



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

Evaluación de las propiedades mecánicas del material bio-compuesto de epoxi y fibra de bambú, como posible aplicación en parachoques de automóviles

HENRY GEOMAT MOREJÓN UCHUBANDA

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

MAYO DE 2024

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD Y CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Henry Geomat Morejón Uchubanda, declaro que en el **presente trabajo de titulación modalidad proyectos 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 proviene de otra fuente 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, mayo de 2024



Henry Geomat Morejón Uchubanda

1804604039

©2023, Henry Geomat Morejón Uchubanda

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 **Proyectos de Investigación y Desarrollo**, titulado: **Evaluación de las propiedades mecánicas del material bio-compuesto de epoxi y fibra de bambú, como posible aplicación en parachoques de automóviles**, de responsabilidad del señor **Henry Geomat Morejón Uchubanda** ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

Ing. Jorge Isaías Caicedo Reyes Mgtr.



PRESIDENTE

Ing. Edison Patricio Abarca Pérez Mgtr.



DIRECTOR

Ing. José Luis Pérez Rojas Mgtr.



MIEMBRO

Ing. Santiago Alejandro López Ortiz Mgtr.



MIEMBRO

Riobamba, mayo 2024

DEDICATORIA

Para todo aquellos que me apoyaron con un granito de arena para llegar con éxito a mi sueño.

A mis padres, quienes han sido mi pilar y fuente de inspiración, Cesar Morejón y Dolores Uchubanda les agradezco por educarme con amor y valores, a mis hermanas Tatiana y Leidy por su aliento invaluable, a mi esposa e hija por su amor incondicional en noches de desvelo con risas y llantos que han formado parte de este viaje.

A los ingenieros que han compartido sus conocimientos, amigos que brindaron su amistad incondicional.

Henry Morejón

AGRADECIMIENTO

A mi tutor y miembros expreso mis sinceros agradecimientos en el presente proyecto de investigación.

A las personas que trabajan en los Laboratorios de Ingeniería Civil y Mecánica por la colaboración brindada en las pruebas de impacto.

A mi apreciada Politécnica por ser fuente primordial en el enriquecimiento del conocimiento durante los últimos años, cada aula, cada ingeniero, desafío tras desafío ha sido un escalón lleno de éxito.

A mis compañeros quienes, al compartir tanto tiempo entre risas y amistad, en especial a todos quienes compartieron experiencias durante el proceso del proyecto de investigación

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	xv
SUMMARY	xvi
CAPÍTULO I	
1	INTRODUCCIÓN1
1.1	Planteamiento del problema.....1
<i>1.1.1</i>	<i>Situación problemática1</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Formulación del problema1</i>
1.2	Preguntas directrices o específicas de la investigación.....1
1.3	Justificación de la investigación2
1.4	Objetivos.....2
<i>1.4.1</i>	<i>Objetivo general2</i>
<i>1.4.2</i>	<i>Objetivos específicos2</i>
1.5	Hipótesis3
<i>1.5.1</i>	<i>Hipótesis general.....3</i>
<i>1.5.2</i>	<i>Hipótesis específicas3</i>
CAPÍTULO II	
2	MARCO TEÓRICO4
2.1	Antecedentes.....4
2.2	BASES TEÓRICAS6
<i>2.2.1</i>	<i>Sistema de parachoques, seguridad pasiva del vehículo.6</i>
<i>2.2.1.1</i>	<i>Estructura del sistema de parachoques.....6</i>
<i>2.2.1.2</i>	<i>Selección del sistema de parachoques7</i>
<i>2.2.1.3</i>	<i>Componentes del sistema de parachoques8</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Estándares de homologación de sistemas de parachoques frontal10</i>
<i>2.2.2.1</i>	<i>Dispositivo de prueba11</i>
<i>2.2.3</i>	<i>Materiales Compuestos12</i>
<i>2.2.4</i>	<i>Elementos del material compuesto13</i>

2.2.4.1	<i>Matriz</i>	13
2.2.4.2	<i>Refuerzo</i>	16
2.2.4.3	<i>Bambú</i>	20
2.2.4.4	<i>Interfaz fibra-matriz</i>	25
2.2.4.5	<i>Adhesión e interacción entre fibra y matriz</i>	26
2.2.5	<i>Características de materiales bio-compuesto reforzados con fibras</i>	26
2.2.5.1	<i>Disposición de la fibra en el material compuesto.</i>	27
2.2.5.2	<i>Influencia de la orientación sobre las propiedades mecánicas</i>	28
2.2.5.3	<i>Estrategias para optimizar el diseño de orientación de fibras.</i>	29
2.2.5.4	<i>Tejido de la fibra</i>	29
2.2.5.5	<i>Incidencia de la fracción de volumen, del diámetro y dimensión de las fibras.</i>	33
2.2.5.6	<i>Efecto de los vacíos</i>	34
2.2.5.7	<i>Efecto del diámetro de la fibra</i>	35
2.2.6	<i>Manufactura del material compuesto</i>	36
2.2.6.1	<i>Estratificación manual</i>	36
2.2.6.2	<i>Moldeo a compresión</i>	37
2.2.7	<i>Proceso de elaboración de un material compuesto.</i>	37
2.2.7.1	<i>Impregnación</i>	37
2.2.7.2	<i>Laminado</i>	37
2.2.7.3	<i>Solidificación</i>	37
2.2.8	<i>Evaluación mecánica mediante ensayos destructivos para materiales compuestos.</i> 38	
2.2.8.1	<i>Ensayo a flexión</i>	38
2.2.8.2	<i>Ensayo a tracción</i>	38
2.2.8.3	<i>Ensayo de impacto</i>	39
2.2.9	<i>Simulación por métodos de elementos finitos</i>	40
2.2.9.1	<i>Simulación de componentes y sistemas automotrices mediante MEF.</i>	40
2.2.9.2	<i>Comportamiento ortotrópico en materiales compuestos con fibras naturales.</i>	41
2.2.9.3	<i>Comportamiento isotrópico en materiales plásticos (ABS)</i>	42
2.2.9.4	<i>Técnicas eficientes de elementos finitos aplicadas a impacto sobre parachoques.</i>	42

2.3	Marco Conceptual.....	43
2.4	Identificación de variables.....	44
2.5	Operacionalización de variables.	45
2.6	Matriz de consistencia	45
CAPÍTULO III		
3	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	47
3.1	Tipo y diseño de investigación.....	47
3.2	Métodos de investigación.....	47
3.2.1	<i>Método experimental</i>	47
3.2.2	<i>Método deductivo</i>	47
3.2.3	<i>Matriz Morfológica</i>	48
3.2.3.1	<i>Criterios de evaluación</i>	48
3.3	Enfoque de la investigación	49
3.4	Alcance de la investigación.....	50
3.5	Población de estudio	50
3.6	Unidad de análisis	50
3.7	Selección de la muestra.....	50
3.8	Tamaño de la muestra	51
3.9	Técnicas de recolección de datos primarios y secundarios	51
3.9.1	<i>Técnicas de generación de información primaria</i>	52
3.9.2	<i>Técnicas de recopilación de información secundaria</i>	52
3.10	Instrumentos de recolección de datos primarios y secundarios.....	52
3.10.1	<i>Materiales</i>	52
3.10.1.1	<i>Fibra de Bambú</i>	52
3.10.1.2	<i>Resina Epoxi</i>	53
3.10.1.3	<i>Cera desmoldante</i>	54
3.10.2	<i>Tratamiento superficial de la fibra de bambú</i>	54
3.10.3	<i>Elaboración de probetas</i>	55
3.10.3.1	<i>Dimensionamiento de probetas</i>	55

3.10.3.2	<i>Preparación de moldes</i>	56
3.10.3.3	<i>Formulación de probetas de ensayo</i>	56
3.10.3.4	<i>Aplicación de cera desmoldante</i>	58
3.10.3.5	<i>Preparación del material bio-compuesto</i>	58
3.10.3.6	<i>Desmolde y corte</i>	60
3.10.4	<i>Caracterización del material bio-compuesto</i>	60
3.10.4.1	<i>Ensayo a tracción (ASTM D3039) de probetas normalizadas</i>	60
3.10.4.2	<i>Ensayo de Flexión (ASTMD D7264) de probetas normalizadas</i>	64
3.10.4.3	<i>Ensayo de impacto en probetas normalizadas</i>	67
3.10.5	<i>Fundamentación de ponderación de criterios definidos matriz morfológica</i>	70
3.10.5.1	<i>Análisis de sensibilidad</i>	70
3.10.5.2	<i>Ponderaciones finales</i>	71
3.10.5.3	<i>Evaluación y calificación de alternativas</i>	71
3.10.5.4	<i>Análisis cuantitativo</i>	72
3.10.5.5	<i>Selección final del material bio-compuesto</i>	73
3.10.6	<i>Proceso de manufactura del prototipo de parachoques</i>	73
3.10.6.1	<i>Selección del proceso de manufactura</i>	73
3.10.6.2	<i>Etapas del proceso de manufactura</i>	74
3.10.6.3	<i>Construcción de molde</i>	74
3.10.6.4	<i>Construcción de la barra frontal del sistema de parachoques</i>	75
3.10.7	<i>Implementación de software del parachoques</i>	78
3.10.7.1	<i>Observaciones generales para el análisis por elementos finitos</i>	78
3.10.7.2	<i>Modelado tridimensional del parachoques</i>	79
3.10.7.3	<i>Modelado tridimensional del impactador</i>	81
3.10.7.4	<i>Análisis de Elementos Finitos usando ANSYS Workbench</i>	82
3.10.7.5	<i>Definición de propiedades del material bio-compuesto</i>	83
3.10.7.6	<i>Valores de ingeniería en datos de entrada</i>	85
3.10.7.7	<i>Restricciones de cada elemento para la simulación</i>	87
3.10.8	<i>Ensayo de impacto a baja velocidad</i>	88

3.10.8.1	<i>Dinámicas de energías.....</i>	89
3.10.8.2	<i>Calculo del ángulo de elevación del péndulo.....</i>	90
3.10.8.3	<i>Configuración de masa impactante.....</i>	91
3.10.8.4	<i>Preparación de la probeta del parachoques en el ensayo de impacto</i>	92
3.10.8.5	<i>Protocolo de ensayo de impacto con péndulo</i>	93

CAPÍTULO IV

4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	95
4.1	Simulación del ensayo de impacto a baja velocidad	95
4.1.1	<i>Deformación de la probeta de parachoques frontal</i>	<i>97</i>
4.1.2	<i>Esfuerzo equivalente de Von-Mises.....</i>	<i>99</i>
4.1.3	<i>Factor de seguridad</i>	<i>100</i>
4.2	Ensayo de impacto a baja velocidad por péndulo.....	102
4.2.1	<i>Deformación.....</i>	<i>102</i>
4.2.2	<i>Inspección visual.....</i>	<i>107</i>
4.2.3	<i>Análisis comparativo de peso entre configuraciones de parachoques</i>	<i>109</i>
4.2.4	<i>Calculo de energías presentes durante el ensayo de impacto.....</i>	<i>110</i>
4.2.4.1	<i>Energía de absorción.....</i>	<i>111</i>

CAPÍTULO V

5	PROPUESTA. Análisis de costos de manufactura	117
5.1	Costos de manufactura	117
	CONCLUSIONES.....	120
	RECOMENDACIONES.....	123

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2. Matriz Polimérica reforzada con diferentes fibras.....	14
Tabla 2-2. Propiedades mecánicas de la resina Epoxi	16
Tabla 3-2. Comparación entre fibras naturales y sintéticas	17
Tabla 4-2. Composición química de las fibras naturales.	19
Tabla 5-2. Propiedades mecánicas de las fibras naturales.	19
Tabla 6-2. Reducción de peso estructural con fibras naturales en aplicaciones de la industria..	20
Tabla 7-2. Propiedades mecánicas de la fibra de bambú.	23
Tabla 8-2. Propiedades de fibra naturales comparadas con fibras sintéticas.....	27
Tabla 9-2. Propiedades típicas y orientación de fibras naturales con matriz polimérica.....	29
Tabla 10-2. Comparación de las propiedades de los tejidos de la fibra	32
Tabla 11-2. Dependencia del diámetro de fibra de lino sobre las propiedades del compuesto .	35
Tabla 12-2. Operacionalización de la variable independiente.	45
Tabla 13-2. Operacionalización de la variable dependiente.....	45
Tabla 14-2. Matriz de consistencia.....	46
Tabla 15-3. Cantidad de probetas para los ensayos	51
Tabla 16-3. Porcentaje de fibra de bambú y resina epoxi	57
Tabla 17-3. Preparación y condiciones de resina epoxi	59
Tabla 18-2. Valores cuantitativos del ensayo a tracción (60% - 40%).....	61
Tabla 19-3. Valores cuantitativos de Ensayo de tracción (70% - 30%).....	62
Tabla 20-3. Valores cuantitativos de ensayo de tracción (75% - 25%).....	63
Tabla 21-3. Valores cuantitativos del ensayo de flexión (60% - 40%).....	64
Tabla 22-3. Valores cuantitativos del ensayo de flexión (70% - 30%).....	65
Tabla 23-3. Valores cuantitativos del ensayo de flexión (75% - 25%).....	66
Tabla 24-3. Valores cuantitativos del ensayo de impacto (75% - 25%).....	67
Tabla 25-3. Valores cuantitativos del ensayo de impacto (70% - 30%).....	68
Tabla 26-3. Valores cuantitativos del ensayo de impacto (60% - 40%).....	69
Tabla 27-3. Matriz morfológica material bio-compuesto	72
Tabla 28-4. Valores de deformación después del ensayo de impacto	103
Tabla 29-4. Valores de deformación del material compuesto ensayo de impacto.....	104
Tabla 30-4. Deformación promedio de los diferentes parachoques	111
Tabla 31-4. Energía Específica.....	116
Tabla 32-5. Costes Directos de manufactura del parachoques.....	117
Tabla 33-5. Costes Directos de manufactura del parachoques.....	118
Tabla 34-5. Gastos administrativos y de venta	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2. Sistema de parachoques Lincoln MKZ 2017.	6
Figura 2-2. Barra frontal metálica	7
Figura 3-2. Mascarilla de plástico y viga de refuerzo.	8
Figura 4-2. Mascarilla plástica con viga de refuerzo y absorción de energía	8
Figura 5-2. Mascarilla o fascia	9
Figura 6-2. Barra frontal del parachoques.	9
Figura 7-2. Secciones Transversales de la viga de refuerzo.	10
Figura 8-2. Impacto a baja velocidad.	11
Figura 9-2. Péndulo de impacto	12
Figura 10-2. Materiales compuestos.....	12
Figura 11-2. Fibras Naturales.....	18
Figura 12-2. Microestructura de las fibras naturales	18
Figura 13-2. Planta de bambú.	20
Figura 14-2. Estructura de la fibra de bambú.	21
Figura 15-2. Estructura del bambú	22
Figura 16-2. Fibra de bambú.....	23
Figura 17-2. Procesos de extracción de la fibra de bambú	23
Figura 18-2. Enlaces de interfaz.....	25
Figura 19-2. Resistencia a la tensión en fibra a diferentes grados	28
Figura 20-2. Tejido de la fibra	30
Figura 21-2. Configuración del tejido plano de la fibra.....	31
Figura 22-2. Tejido tipo sarga	31
Figura 23-2. Configuración del tejido Satén	32
Figura 24-2. Configuración del no tejido de la fibra.	33
Figura 25-2. Módulo de elasticidad vs fracción de volumen de la fibra	33
Figura 26-2. Identificación de la porosidad en los sub-componentes.	34
Figura 27-2. Módulo Elástico en función del diámetro de la fibra.	35
Figura 28-2. Fabricación por estratificación manual	36
Figura 29-2. Moldeo a compresión	37
Figura 30-2. Ensayo a flexión	38
Figura 31-2. Ensayo a tracción.....	39
Figura 32-2. Ensayo de impacto.....	40
Figura 33-3. Presentación de la Fibra de Bambú.....	53
Figura 34-3. Resina Epoxi Cretonbond 52YN	53

Figura 35-3. Cera Desmoldante	54
Figura 36-3. Tratamiento de la fibra en hidróxido de sodio	55
Figura 37-3. Construcción del molde para probetas	56
Figura 38-3. Aplicación de cera desmoldante	58
Figura 39-3. Balanza electrónica.....	58
Figura 40-3. Etapas de fabricación del material bio-compuesto	59
Figura 41-3. Grupo de probetas con el material bio-compuesto	60
Figura 42-3. Fabricación del molde barra frontal del parachoques.....	75
Figura 43-3. Extracción del molde de la barra frontal	75
Figura 44-3. Proceso de manufactura del parachoques frontal	77
Figura 45-3. Prototipo de parachoques del material bio-compuesto.....	78
Figura 46-3. Modelado tridimensional de parachoques frontal	80
Figura 47-3. Centro de masa y peso del parachoques (Material ABS)	81
Figura 48-3. Modelado del impactador	81
Figura 49-3. Centro de masa y peso del impactador (Acero Estructural)	82
Figura 50-3. Configuración del material bio-compuesto	84
Figura 51-3. Configuración del material ABS.....	85
Figura 52-3. Configuración de valores de entrada para los parachoques.....	86
Figura 53-3. Mallado del sistema de parachoques.....	87
Figura 54-3. Calidad de malla para la simulación de impacto	87
Figura 55-3. Restricciones de la simulación del impacto	88
Figura 56-3. Esquema gráfico del péndulo de ensayo	90
Figura 57-3. Configuración de parámetros del péndulo de ensayo.....	91
Figura 58-3. Preparación de la masa del péndulo.....	92
Figura 59-3. Preparación del parachoques para el ensayo de impacto.....	92
Figura 60-3. Calibración de sistema de medición laser	93
Figura 61-3. Péndulo de para configurado para ensayo de impacto	94
Figura 62-4. Conducta de las energías en la simulación de impacto	95
Figura 63-4. Análisis de energías en la simulación de impacto	96
Figura 64-4. Curva de energía interna de la simulación	96
Figura 65-4. Valores resultantes de la energía en la simulación de impacto	97
Figura 66-4. Deformación del parachoques comercial (ABS).....	98
Figura 67-4. Deformación del parachoques con materia bio-compuesto.....	98
Figura 68-4. Esfuerzo equivalente probeta comercial de parachoques	99
Figura 69-4. Esfuerzo equivalente del parachoques de material bio-compuesto	100
Figura 70-4. Factor de seguridad parachoques comercial.....	101
Figura 71-4. Factor de seguridad del parachoques material compuesto.	101

Figura 72-4. Ensayo de impacto probeta comercial de parachoques	102
Figura 73-4. Ensayo de impacto probeta de parachoques fibra longitudinal y fibra tejida	103
Figura 74-4. Inspección visual del parachoques comercial	107
Figura 75-4. Inspección visual del parachoques fibra tejida.....	108
Figura 76-4. Inspección visual del parachoques fibra longitudinal	108
Figura 77-4. Fractura del parachoques con configuración de fibra unidireccional	109
Figura 78-4. Medición de masa de cada tipo de parachoques.....	110
Figura 79-4. Diagrama de impacto del péndulo de ensayo	111

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** FICHA TÉCNICA DE LA RESINA CRETObOND 52YN.
- ANEXO B:** NORMATIVA TÉCNICA FEDERAL MOTOR VEHICLE SAFETY STANDARDS 581 (FMVSS).
- ANEXO C:** INFORME DE IMPACTO.
- ANEXO D:** FICHA TÉCNICA CES-EDUPACK BAMBÚ.
- ANEXO E:** NORMATIVA ASTM DE TRACCIÓN.
- ANEXO F:** NORMATIVA ASTM DE FLEXIÓN.
- ANEXO G:** NORMATIVA ASTM DE IMPACTO.
- ANEXO H:** FICHA TÉCNICA CES-EDUPACK ABS (ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO) HIGH IMPACT.
- ANEXO I:** PROFORMA PARACHOQUES DELANTERO/SOPORTE BARRA FRONTAL CHEVROLET AVEO 2010.

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar las propiedades mecánicas de un material bio-compuesto de matriz epoxi reforzado con fibra de bambú, como una alternativa ecológica para la fabricación de parachoques frontales automotrices, con el fin de satisfacer los niveles esperados de resistencia y absorción de energía en esta aplicación. La metodología empleada consistió en fabricar probetas de material bio-compuesto siguiendo estándares de normas ASTM, variando el contenido de fibra de bambú en 25%, 30% y 40% con orientaciones longitudinales y bidireccionales, para su caracterización mecánica y la formulación óptima en fracción de volumen de matriz epoxi y refuerzo natural de bambú, siendo 70% resina epoxi y 30% fibra de bambú la combinación con una alta resistencia a la flexión. Se realizaron ensayos normalizados de tracción, flexión e impacto para el análisis cuantitativo. Adicionalmente, se llevaron a cabo simulaciones por elementos finitos del modelo de parachoques para predecir distribuciones de esfuerzos y deformaciones ante impactos a baja velocidad. Así mismo, se fabricó un prototipo de parachoques con el material bio-compuesto mediante estratificación manual para ensayarlo bajo los requerimientos de la norma Federal de Seguridad de Vehículos Motorizados 581 para parachoques automotrices. Los resultados de los ensayos y simulaciones demostraron la validez del nuevo material bio-compuesto como alternativa para satisfacer los niveles esperados de resistencia y absorción de energía en la aplicación de parachoques automotrices, destacando una mayor sostenibilidad al utilizar fibras orgánicas en lugar de refuerzos sintéticos tradicionales. Se recomienda realizar un escogimiento adecuado de las fibras de bambú en relación a su diámetro, en su mayoría deben tener el mismo valor con el fin de tener una alta resistencia a los impactos. Además, se sugiere llevar a cabo un análisis comparativo frente a requisitos normativos y especificaciones técnicas de parachoques automotrices para validar la factibilidad de implementación a nivel industrial.

Palabras clave: <BIO-COMPUESTOS>, <PARCHOQUES>, <BAMBÚ>, <PROPIEDADES MECÁNICAS>, <EPOXI>, <ESTRATIFICACIÓN>



Firmado electrónicamente por:
CRISTHIAN FERNANDO
CASTILLO RUIZ



0036-DBRAI-UPT-DP-2024

09-05-2024

SUMMARY

The research aimed to evaluate the mechanical properties of a bamboo fiber-reinforced epoxy matrix bio-composite material as an environmentally friendly alternative for manufacturing automotive front bumpers, to meet the expected strength and energy absorption levels in this application. The methodology used consisted of manufacturing bio-composite specimens following ASTM standards, varying the bamboo fiber content by 25%, 30%, and 40% with longitudinal and bidirectional orientations, for their mechanical characterization and the optimal formulation in volume fraction of epoxy matrix and natural bamboo reinforcement, with 70% epoxy resin and 30% bamboo fiber being the combination with high flexural strength. Standardized tensile, bending, and impact tests were conducted for quantitative analysis. Furthermore, finite element simulations of the bumper model were executed to anticipate stress and deformation distributions for low-speed impacts. Additionally, a prototype bumper was fabricated using bio-composite material through manual layering to test its compliance with the Federal Motor Vehicle Safety Standard 581 for automotive bumpers. The test results and simulations confirmed the validity of the new bio-composite material as a viable alternative to achieve the required strength and energy absorption levels in automotive bumper applications. This also emphasizes increased sustainability by using organic fibers over traditional synthetic reinforcements. It is advisable to carefully select bamboo fibers based on their diameter, with most having the same value to ensure high impact resistance. Additionally, conducting a comparative analysis against regulatory requirements and technical specifications of automotive bumpers is recommended to validate the feasibility of implementation at the industrial level.

KEYWORDS: <BIO-COMPOSITE MATERIAL>, <BUMPER>, <BAMBOO>, <MECHANICAL PROPERTIES>, <EPOXY>, <MANUAL LAYERING>

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

1.1.1 Situación problemática

El presente estudio se centra en la necesidad de investigar y caracterizar materiales compuestos basados en recursos renovables que potencialmente puedan reemplazar los plásticos reforzados con fibras sintéticas convencionales, la manufactura de los parachoques con el uso de estos materiales representan una pieza indispensable en la seguridad pasiva de los vehículos, por lo que deben proveer prestaciones confiables y predecibles ante impactos, ser más ligeros y que a su vez disminuyan la huella ambiental, estos materiales deben exhibir propiedades mecánicas superiores o similares, como resistencia a la tracción, rigidez y tenacidad. Los materiales compuestos con matrices termoestables reforzadas con fibras naturales representan una opción aún poco explorada debido a su forma composición como la fracción en volumen del refuerzo y matriz, número de capas correcto para una ideal adhesión entre matriz y refuerzo para satisfacer las necesidades del sistema de parachoques, la industria está en un alto crecimiento de demanda de vehículos más ecológicos y eficientes por lo que la competitividad de los materiales compuestos en el mercado cada vez es mayor.

1.1.2 Formulación del problema

¿Es posible desarrollar un parachoques delantero con un material bio-compuesto en fracción de volumen correcto de resina epoxi y fibra bambú que cumplan con especificaciones y normativas de los elementos que componen la estructura de un vehículo?

1.2 Preguntas directrices o específicas de la investigación

¿El proceso de extracción mecánico y el tratamiento químico del refuerzo natural incrementa la propiedad de iteración y adhesión con la matriz termoestable, así mismo incrementa la resistencia al impacto de elemento manufacturado?

¿Qué capacidad de absorción de energía de impacto presentará el parachoques manufacturado con un material bio-compuesto de fibra de bambú y matriz termoestable de resina epoxi?

¿Presenta el parachoques construido con el material bio-compuesto una similar o elevada resistencia al impacto en comparación del construido con un material convencional?

¿Qué ahorros son posibles en costos de manufactura de un parachoques que utiliza un material bio-compuesto como materia prima en relación a un parachoques que use material convencional?

1.3 Justificación de la investigación

En la industria automotriz, es imperativo abordar los desafíos industriales y buscar constantemente alternativas sostenibles que puedan reemplazar los materiales convencionales utilizados en la fabricación de parachoques de automóviles. En este contexto, la presente investigación se enfoca en evaluar la viabilidad del material bio-compuesto, conformado por una matriz de epoxi y refuerzo de fibra de bambú, como una alternativa sólida y respetuosa con el medio ambiente para la fabricación de parachoques de automóviles.

La investigación analiza en profundidad las propiedades mecánicas del material bio-compuesto y su capacidad para cumplir con los rigurosos requisitos de resistencia, absorción de impactos y flexión necesaria, en la fabricación de parachoques automotrices detallados en la norma Federal Motor Vehicle Safety Standard 581. El uso de la fibra de bambú como refuerzo en el material compuesto conlleva ventajas significativas, la fibra de bambú se destaca por su excepcional resistencia, rigidez y capacidad para absorber impactos, cualidades fundamentales para garantizar la seguridad y protección en los parachoques automotrices, es un recurso renovable que se caracteriza por su rápido crecimiento y su menor demanda energética y de recursos en comparación con los materiales convencionales.

El desempeño deficiente en pruebas de seguridad pone de manifiesto la necesidad de explorar nuevas tecnologías y materiales en la fabricación de componentes automotrices, Un ejemplo de esto es la prueba de choque realizada por INECAP en un automóvil Chevrolet Aveo, en la que el vehículo obtuvo una calificación de 0 estrellas en términos de seguridad. Este incidente subraya la urgencia de investigar y mejorar los componentes críticos de los vehículos, como los parachoques, para garantizar la seguridad de los ocupantes y los sistemas de vehículo, esta investigación proveerá información para empresas dedicadas a la manufactura de elementos automotrices de bastidor y carrocería, así también para centro de investigación, universidades y politécnicas en la cuales lleven a cabo estudios relacionados con el tema de materiales compuestos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar las propiedades mecánicas del material bio-compuesto de matriz epoxi y refuerzo de fibra de bambú, como posible aplicación en parachoques de automóviles.

1.4.2 Objetivos específicos

- Generar una estructura de material bio-compuesto basada en la revisión crítica de referencias bibliográficas previas, que permita obtener el porcentaje de matriz y fibra natural deseadas para su aplicación en parachoques de automóviles.

- Caracterizar las propiedades mecánicas de flexión y resistencia al impacto del material bio-compuesto de matriz epoxi y refuerzo de fibra de bambú.
- Realizar una simulación del comportamiento mecánico del material bio-compuesto utilizado en el parachoques del automóvil en un ambiente estático y dinámico sustentado las especificaciones de la norma FMVSS 581.
- Fabricar un parachoques delantero para el vehículo Chevrolet Family utilizando la técnica estratificación manual con un material bio-compuesto, con los requisitos de la norma FMVSS 581 en términos de resistencia a absorción de impactos y flexión.

1.5 Hipótesis

1.5.1 Hipótesis general

Los parachoques manufacturados con materiales bio-compuestos presentan características o propiedades mecánicas similares o superiores en relación a los parachoques fabricados con materiales convencionales.

1.5.2 Hipótesis específicas

La evaluación de la resistencia mecánica de los parachoques de vehículos livianos mediante el ensayo de impacto con el uso del péndulo, fabricados con matriz polimérica termoestable de resina epoxi y refuerzo de fibra de bambú permitirá realizar las pruebas experimentales del reglamento de la Federal Motor Vehicle Safety Standard 581, requisitos para la absorción de energía del parachoques frontal para minimizar los daños presentados en los ocupantes y en los sistemas del vehículo después de un choque.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes.

En el campo de los materiales compuestos aplicados a la industria automotriz, se han llevado a cabo diversas investigaciones que exploran el uso de fibras naturales como refuerzo en matrices poliméricas para la fabricación de piezas de automóviles. Estos estudios han demostrado el potencial de los materiales compuestos de fibra natural como alternativas sostenibles y respetuosas con el medio ambiente a los compuestos de fibra sintética convencionales.

Uno de los estudios encontrados se centró en el desarrollo de una carrocería de vehículo Formula Student utilizando fibra animal (crin de caballo) y fibra vegetal (cabuya) como refuerzos adheridos a una matriz de resina de poliéster. Mediante pruebas de propiedades mecánicas y evaluación aerodinámica, se encontró que la carrocería fabricada con estos materiales compuestos presentaba una reducción de masa del 41,95% en comparación con las carrocerías convencionales fabricadas en fibra de vidrio y resina de poliéster (Bravo, Christian Bautista et al. 2021).

Además, se encontró otro estudio que investigó las características técnicas, económicas y ambientales del uso de compuestos de fibra natural en piezas de automóviles, centrándose específicamente en los paneles interiores de las puertas. Los investigadores analizaron diversos parámetros del material, como tratamientos de fibra, composición microestructural, técnicas de fabricación de compuestos y niveles de contenido de fibra. Los resultados revelaron que los materiales procesados con fibras naturales, como las fibras de yute-kenaf, presentaban un mejor rendimiento mecánico general (Berrezueta, Manuel Fernando Gomez et al. 2017).

El uso de compuestos poliméricos reforzados con fibras naturales para aplicaciones automotrices ha sido explorado en diversos estudios, buscando alternativas más ligeras y sostenibles a los materiales tradicionales. (Osoka, Emmanuel et al. 2018) estudiaron las propiedades mecánicas de compuestos formados con tres fibras naturales (fibra de racimo de plátano, fibra de racimo de palma aceitera y fibra de ratán) y dos resinas termoestables (poliéster y epoxi) para evaluar su potencial en la industria automotriz. Encontraron que los compuestos con matriz de epoxi presentaban una resistencia al impacto nueve veces mayor que la del acero usado regularmente en autopartes. Asimismo, tenían una absorción específica de energía por impacto 29-50 veces superior a la del acero. Los autores concluyeron que estos materiales compuestos con fibras naturales pueden ser una alternativa ecológica y más liviana que el acero para ciertos componentes automotrices donde se requiere alta resistencia al impacto.

En la última década, los fabricantes de automóviles han comenzado a adoptar compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales como alternativas más livianas y ecológicas a

los materiales tradicionales en diversos componentes automotrices (Holbery, James et al. 2006). Se han desarrollado partes interiores con fibras de lino, yute, coco o madera, logrando reducciones de peso, costo y emisiones. También existen prototipos y estudios para aplicaciones en partes estructurales exteriores. Sin embargo, para lograr una inserción masiva de estos materiales, es necesario resolver desafíos técnicos relacionados a las propiedades de las fibras, la estabilidad ante humedad y la repetibilidad en la fabricación de los compuestos.

En años recientes, se ha explorado el uso de compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales como una alternativa más sostenible a los materiales tradicionales en la industria automotriz (Norhidayah, M.H. et al. [sin fecha]). Diversos fabricantes han desarrollado componentes interiores con fibras naturales como kenaf, yute, lino y madera, logrando reducciones de peso frente al acero. También existen prototipos para aplicaciones en partes estructurales externas. Si bien estos materiales compuestos naturales tienen gran potencial para reemplazar partes metálicas, reduciendo peso y siendo ecológicos, aún deben superarse desafíos técnicos asociados a las propiedades de las fibras, la estabilidad dimensional y la repetitividad en los procesos de fabricación de los compuestos.

Diversos estudios recientes han explorado el potencial de compuestos de polipropileno reforzados con fibras de bambú, encontrando mejoras significativas en las propiedades mecánicas. (Chen, Xiaoya et al. 1998) desarrollaron composites de PP con hasta 50% en peso de fibras de bambú, logrando resistencias a la tracción de 32-36 MPa y módulos de elasticidad de 5-6 GPa al utilizar MAPP como agente de acoplamiento. Asimismo, (Osoka, Emmanuel et al. 2018) obtuvieron compuestos de PP-bambú con una absorción de energía por impacto 29-50 veces superior al acero, por lo que concluyeron que estos materiales pueden ser alternativas ecológicas en la industria automotriz. Sin embargo, aún faltan estudios que analicen en detalle el efecto de parámetros como orientación de fibras, contenidos, tratamientos superficiales y envejecimiento en las propiedades finales de estos compuestos de PP-bambú.

Los antecedentes teóricos y estudios previos demuestran el potencial de los materiales bio-compuestos con matrices poliméricas reforzadas con fibras naturales como por ejemplo el uso del cáñamo o lino, para su aplicación den la industria automotriz ofreciendo ventajas en términos de reducción de peso y propiedades mecánicas frente a los materiales convencionales. Sin embargo, la literatura aplaca la necesidad de continuar las investigaciones disponer de parámetros como tratamientos superficiales, contenido de nuevas fibras, orientación y procesos de fabricación sobre las propiedades finales de estos materiales. El presente trabajo de investigación busca colaborar a la industria automotriz mediante la construcción de un bio-compuesto de resina epoxi con fibras de bambú para definir su potencial como un material opcional para la fabricación de elementos automotrices.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Sistema de parachoques, seguridad pasiva del vehículo.

El sistema de parachoques cumple con dos acciones importantes, la primera toma en cuenta la seguridad, es decir, absorber la energía que se produce por un impacto frontal y distribuirla en zonas del auto con el objetivo de minimizar el daño en los pasajeros y elementos del motor. En el caso de la segunda esta tiene que ver con la aerodinámica y estética del automóvil, es decir su diseño atrae a los clientes y da a conocer a una empresa automotriz (Marzbanrad et al., 2009).

2.2.1.1 Estructura del sistema de parachoques.

Este sistema se compone principalmente de una barra de refuerzo que suele estar hecha de acero, aluminio, fibra de vidrio, plástico e incluso de materiales compuestos (poliuretano), cubiertas de plástico, sujetadores, vinchas plásticas, mascarilla y elementos de plástico que en la actualidad cumplen la función de absorber energía al momento de un impacto.

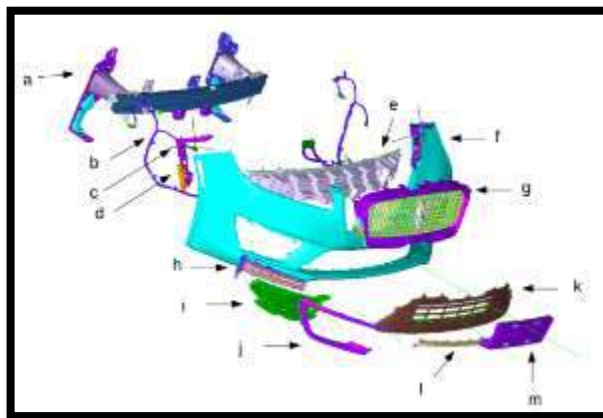


Figura 1-2. Sistema de parachoques Lincoln MKZ 2017.

Fuente: (De la Cruz, David 2016)

La parte frontal de la **Figura 1-2** muestra el sistema estructural de refuerzo con metales y aleaciones para aportar rigidez al chasis del vehículo y protección en caso de impactos **(a)**. El arnés de 5 puntos fabricado de nylon, poliéster y fibras elásticas sujeta al ocupante a la carrocería, brindando restricción segura en caso de choques o volcaduras, cumpliendo con estándares de pruebas dinámicas **(b)**. En el tren de rodaje lateral está instalado un sujetador de guardabarros de acero inoxidable o plástico de alta resistencia **(c)**. La pieza evita la acumulación de lodo y residuos, permitiendo la cobertura completa de los neumáticos, la superficie lateral incluye cintas reflectantes adhesivas especiales que aumentan la visibilidad en condiciones de poca iluminación, incrementando la seguridad vial **(d)**. En el parachoques, el absorbente de energía de poliuretano y membrana termoplástica entre los refuerzos metálicos ayudan a mitigar los daños y lesiones en colisiones a baja velocidad **(e)**, el vehículo utiliza una mascarilla que ayuda con la aerodinámica del auto y con la performance **(f)**. La parrilla superior está fabricada con plástico ABS o acero

para dar protección aerodinámica a las luces y componentes (g), debajo se ubican faros de niebla con cubiertas de policarbonato y otros conectores (h, i, j).

2.2.1.2 Selección del sistema de parachoques

Es imprescindible tener en cuenta varios factores al momento de escoger un sistema de para choque de vehículo, pero el factor más importante es la capacidad que este sistema tiene para absorber la energía de impacto y cumplir con estándares de seguridad y calidad. Así también otro factor es mantenerse ileso e íntegro a impactos con velocidades especificadas en normas internacionales.

En el momento del diseño y selección del sistema de parachoques también se toma en consideración el peso, la capacidad de fabricación y el precio, es decir, su costo inicial como el costo de reparación otro aspecto hace referencia a la conformabilidad de los materiales y por último la reciclabilidad de los materiales del sistema de parachoques (Scott, W.R. et al. 2010).

En la actualidad existen cuatro sistemas de parachoques (Sindrey, David A. 2020),

- Barra frontal de metal.
- Mascarilla de plástico y viga de refuerzo.
- Faja plástica, viga de refuerzo y absorbentes de energía mecánicos.
- Faja de plástico, viga de refuerzo y absorbentes de energía de espuma o panal.

El sistema de **barra metálica** en la parte frontal como se indica en la **Figura 2-2**, está formado por un solo parachoques metálico que se ubica en la parte delantera y trasera del automóvil y es el principal encargado en absorber la energía de impacto en choque frontal.

Los fabricantes de piezas originales en Norte América diseñan sus sistemas de parachoques para sus autos sedan de pasajeros para que estos soporten un impacto de 8 km/h sin aparentes daños visuales en el sistema de parachoques y sistemas de seguridad del auto (Sindrey, David A. 2020).

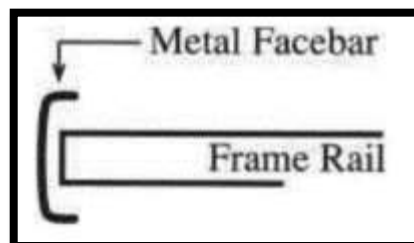


Figura 2-2. Barra frontal metálica

Fuente: (Sindrey, David A. 2020)

Mascarilla de plástico y viga de refuerzo es un sistema de parachoques de plástico y como refuerzo una viga que está fijada directamente al bastidor del auto, se utiliza principalmente en Europa y Japón donde los requerimientos son menos estrictos que en EEUU. La viga de refuerzo

al ser parte del bastidor o de la carrocería del auto, su material de fabricación es el acero debido a los requisitos de estructura del bastidor por lo que aumenta la resistencia al impacto en el auto (Sindrey, David A. 2020).

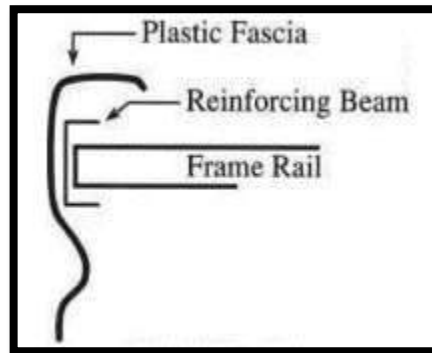


Figura 3-2. Mascarilla de plástico y viga de refuerzo.

Fuente: (Sindrey, David A. 2020).

La **Mascarilla plástica con viga de refuerzo y absorción de energía** se utiliza en EEUU, los componentes que conforman este sistema de parachoques cumplen de manera fácil con los requisitos de impacto de sistemas de parachoques a 8 km/h, esto se debe a que la energía de impacto puede ser absorbida por un elemento de amortiguamiento mecánico o espuma como se indica en la **Figura 3-2**, o a su vez por la propia viga de refuerzo (Scott, W.R. et al. 2010).

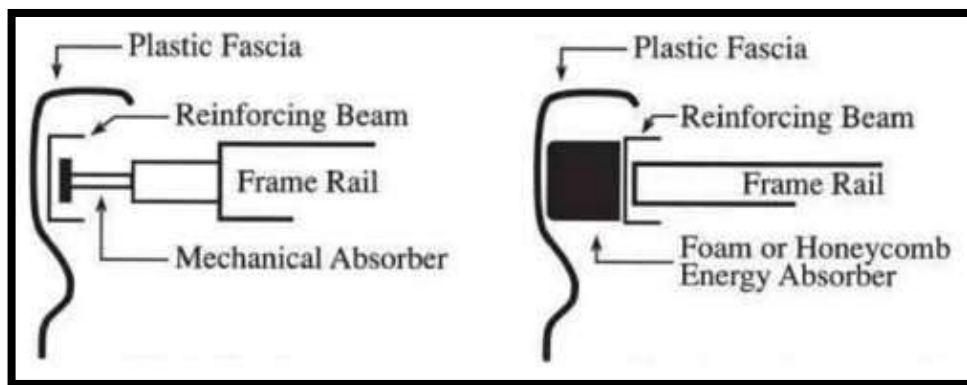


Figura 4-2. Mascarilla plástica con viga de refuerzo y absorción de energía

Fuente: (Sindrey, David A. 2020)

2.2.1.3 Componentes del sistema de parachoques

Las **Mascarilla** son elementos fabricadas con la intención de cumplir con algunos requisitos importantes tales como, ser aerodinámicos con el fin de supeditar el aire fuera del auto y el aire que ingresa a los comportamientos de motor, ser de un diseño agradable al comprador. Este componente suele poseer bastantes curvas y crestas para cumplir con lo mencionado anteriormente, así mismo, deber ser fáciles de montar en sistemas de parachoques y ligeros por lo que su material base puede ser, polipropileno, poliuretano o policarbonato.



Figura 5-2. Mascarilla o fascia

Fuente: (Sindrey, David A. 2020)

El **Absorbentes de Energía**, su principal objetivo es absorber en parte la energía cinética que es producida por un impacto o colisión del auto, es importante mencionar que cumplen con su trabajo de manera eficaz a baja velocidad (5km/h – 8 km/h), entre los absorbentes se tiene los de tipo espuma, panel y dispositivos mecánicos (**Figura 5-2**). El material principal de los absorbentes de espuma y panel con el polipropileno poliuretano y polietileno con una baja densidad, por otro lado los absorbentes mecánicos son de metal y similares a los amortiguadores son de uso muy limitados por su peso, también las viga de refuerzo en la mayoría de vehículos son diseñadas y fabricadas para absorber energía de impacto por lo que estos vehículos no es necesario el montaje de absorbentes de energía (Sindrey, David A. 2020).

La **Barra Frontal** en la actualidad son estampadas en acero con algunos elementos plásticos o de acero inoxidable para hacerlo estéticamente agradable (**Figura 6-2**), por razones de conformabilidad estos están fabricados de acero que posee un límite elástico de bajo a medio, por este motivo las barras frontales son muy gruesas y pesadas así también se croman y se pintan para la protección contra la corrosión.



Figura 6-2. Barra frontal del parachoques.

Fuente: (Morejón 2024)

Las **vigas de refuerzo**, son elementos muy importantes en los sistemas de parachoques, estos ayudan a absorber la energía de impacto (cinética) y protegen en medida al resto del vehículo

(Figura 7-2), entre los requisitos de diseño de las vigas de refuerzo están la resistencia, la capacidad de fabricación, el peso, la reciclabilidad y el costo.

Estas vigas se estampan o se fabrican utilizando un proceso llamado Plannja, el proceso de estampado se utiliza debido a su gran volumen de producción y porque se puede fabricar formas complejas, pero este representa un costo alto. Así pues las vigas laminadas son la mayoría de las vigas de refuerzo de acero que se usan actualmente, entre las secciones transversales más comunes se tiene de caja, C o canal y sombrero, el material de este tipo de secciones es el acero de alta resistencia con espesores finos o delgados es importante mencionar que todas las vigas tienen una protección contra la corrosión, la mayoría de las vigas de refuerzo están hechas de acero de alta resistencia (resistencia mínima a la tracción superior a 550 MPa (80 ksi) (Sindrey, David A. 2020).

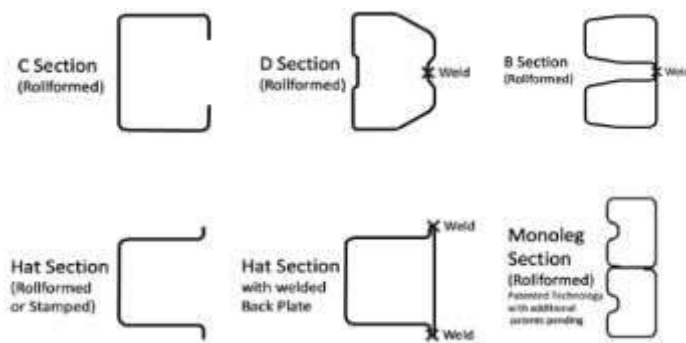


Figura 7-2. Secciones Transversales de la viga de refuerzo.

Fuente: (Sindrey, David A. 2020)

2.2.2 Estándares de homologación de sistemas de parachoques frontal

La Norma Federal de Seguridad de Vehículos Motorizados 581 (Federal Motor Vehicle Safety Standard 581 en inglés, abreviada FMVSS 581) dicta requerimientos de desempeño y métodos de prueba estándares para sistemas de parachoques delanteros y traseros en vehículos automotores de menos de 4,536 kg de peso bruto vehicular.

Esta regulación, emitida originalmente en 1971 por la Administración Nacional de Seguridad de Tráfico en Carreteras de EE.UU. (NHTSA), establece pruebas de impacto para evaluar daños a los componentes externos de los vehículos luego de choques frontales y traseros a bajas velocidades, así como la efectividad de dichos sistemas para resistir y absorber energía en colisiones menores.

La norma FMVSS No. 581 establece requisitos de rendimiento para los sistemas de parachoques de vehículos motorizados con un peso bruto de 4536 kg o menos, el propósito es reducir la frecuencia de fallas de parachoques y el costo de reparar los componentes de los vehículos dañados en choques de baja velocidad, al tiempo que se limiten los daños al sistema de

parachoques. Esta norma requiere que los vehículos se prueban experimentalmente mediante un dispositivo de prueba de péndulo según cuatro tipos de impactos, dos longitudinales en cada parachoques delantero y trasero, y un impacto en cada una de las cuatro esquinas del vehículo. Los impactos longitudinales deben realizarse a una velocidad de 2.3 ± 0.1 mph, mientras que los impactos en la esquina a 1.3 ± 0.1 mph.

Además, la norma FMVSS No. 581 solicita dos impactos con una barra rígida, uno en parachoques delantero y otro en el parachoques trasero, a una velocidad de 2.3 ± 0.1 mph, las pruebas de impacto evalúan si los componentes externos del vehículo, aparte del parachoques, sufren daños y si los sistemas de seguridad del vehículo siguen funcionando después de los impactos, así también, la norma instituye criterios específicos sobre el tipo de daño permitido en las superficies exteriores, sistema de iluminación y otros componentes después de los impactos de prueba, por ejemplo, no se permite ninguna separación de los materiales e la superficie a la que está unidos, con algunas excepciones.

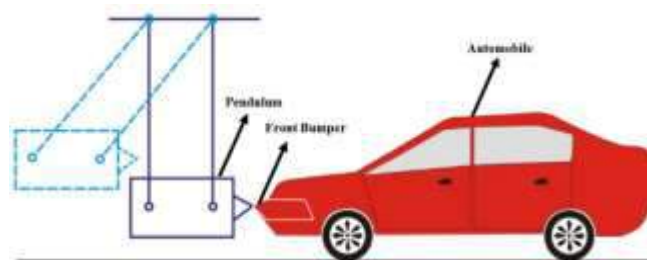


Figura 8-2. Impacto a baja velocidad.

Fuente: (Marzbanrad et al., 2009)

2.2.2.1 Dispositivo de prueba

La FMVSS 581 incluye ilustraciones esquemáticas de la configuración del equipo de prueba de impacto de péndulo utilizado para evaluar el rendimiento de los parachoques de vehículos, la **figura 8-2** muestra un brazo de impacto rígido con una arista de contacto bien definida, esta cresta de impacto tiene una altura ajustable para cada uno de los ensayos longitudinales entre 16.1 y 20 pulgadas desde la superficie.

El brazo impactador tiene una masa efectiva variable, entre 40 a 90 libras menos que el peso sin carga del vehículo bajo prueba, así mismo la parte trasera presenta contrapesos para garantizar que el centro de percusión coincida con la línea media horizontal del impactador, esto asegura una transferencia correcta de impulso cinético y mediciones de fuerza consistencia. El péndulo se suspende con los pivotes necesarios para describir un arco circular de radio mínimo de 11 ft, se monta los acelerómetros en los planos de carga frontales para compensar la inercia en las mediciones, el dispositivo debe mantener los planos de impacto verticales y horizontales dentro de 0.25 grados de tolerancia.

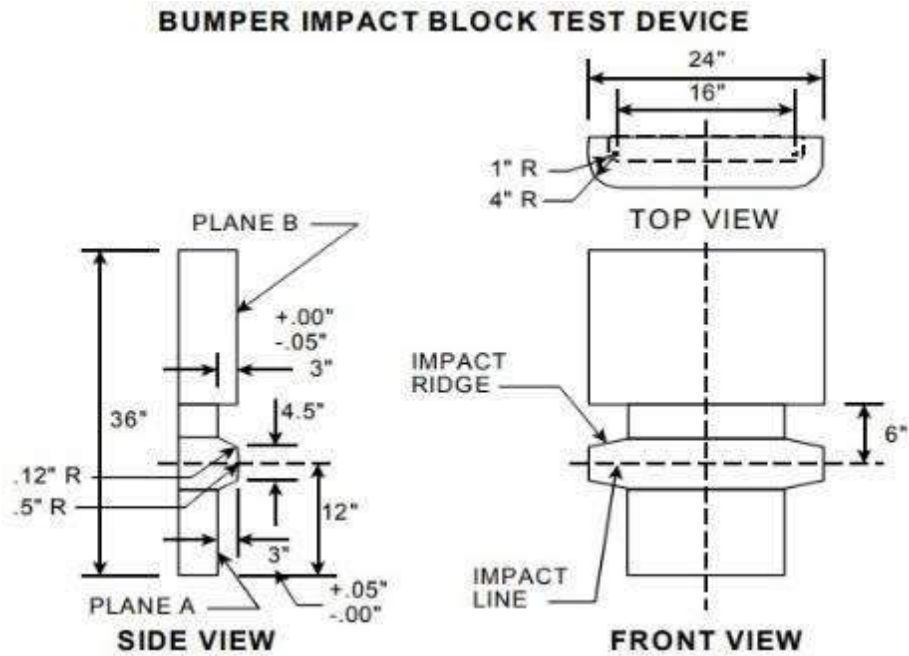


Figura 9-2. Péndulo de impacto

Fuente: (FMSSV581, 1979)

2.2.3 Materiales Compuestos

Los materiales compuestos son el resultado de conjuntar dos o más materiales con propiedades físicas y químicas diferentes, dando lugar a un nuevo material con propiedades relevantes (Elmarakbi, Ahmed 2014), están formados de una matriz o fase continua y un material de refuerzo o fase discontinua que ofrece mejores beneficios en sus propiedades. Estos materiales se utilizan en una variedad de aplicaciones, incluyendo la industria automotriz, debido a su alta resistencia, rigidez y capacidad de absorción de energía así mismo los materiales compuestos pueden estar hechos de una variedad de materiales como polímeros, metales y cerámicas, también se pueden diseñar para cumplir con requisitos específicos de rendimiento, en la **Figura 9-2** se puede apreciar la formación de un material compuesto de a) una matriz y partículas como refuerzo y b) con fibra longitudinales.

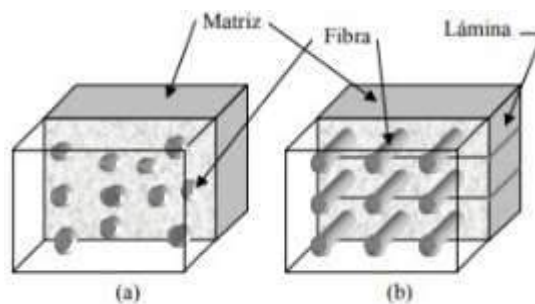


Figura 10-2. Materiales compuestos

Fuente: (Maya, Luz et al. 2004)

Por otro lado para (Elmarakbi, Ahmed 2014), aduce que los materiales compuestos tienen varias características que los hacen atractivos para su uso en la industria, algunas de estas características incluyen:

Alta resistencia y rigidez: los materiales compuestos pueden ser más resistentes y rígidos que los materiales individuales que los componen, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren alta resistencia y rigidez, como en la fabricación de piezas estructurales de vehículos.

Bajo peso: los materiales compuestos pueden ser más livianos que los materiales individuales que los componen, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren una alta relación resistencia-peso, como en la fabricación de piezas de vehículos que deben ser livianas para mejorar la eficiencia de combustible.

Capacidad de absorción de energía: los materiales compuestos pueden ser diseñados para tener una alta capacidad de absorción de energía, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren una alta resistencia a impactos, como en la fabricación de piezas de vehículos que deben proteger a los ocupantes en caso de accidentes.

Diseño personalizado: los materiales compuestos pueden ser diseñados para cumplir con requisitos específicos de rendimiento, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren un diseño personalizado, como en la fabricación de piezas de vehículos que deben cumplir con requisitos específicos de rendimiento.

2.2.4 Elementos del material compuesto

Para obtener un material compuesto se debe tener en cuenta dos elementos importantes, la matriz y el refuerzo, la unión de estos en proporciones adecuadas forman un nuevo material para una aplicación específica en la industria (Chawla, Krishan K. 2019).

2.2.4.1 Matriz

Fase continua que permite mantener unificados a los demás elementos, es un componente primordial en la fabricación de materiales compuestos, la matriz actúa como un aglutinante que mantiene las fibras juntas y transfiere las cargas y esfuerzos mecánicos, también puede influir en las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas del material compuesto. Por lo tanto, la selección de la matriz adecuada es esencial para obtener las propiedades deseadas en el material compuesto (Dávila, Jose Luis et al. 2011). Puede ser polimérica, cerámica o metálica que se utiliza para unir y distribuir las cargas a los refuerzos, es esencial para la resistencia y la durabilidad del material compuesto, protege a los refuerzos de daños mecánicos y ambientales, también puede proporcionar otras propiedades al material compuesto, como la resistencia a la corrosión, la resistencia al fuego y la resistencia química (Chawla, Krishan K. 1998).

- **Matriz cerámica.**

Estas matrices están compuestas de materiales cerámicos, los cuales tienen buenas propiedades a temperaturas elevadas y son menos densos en comparación con los compuestos de matriz metálica, es muy común que se usen fibras cerámicas como refuerzo, porque se obtiene mejor resistencia y tenacidad a la fractura que con los materiales cerámicos convencionales, los mismos que se caracterizan por ser frágiles. Los materiales compuestos de matriz cerámica reforzada con fibras reciben gran atención porque son materiales que presentan buena resistencia a la oxidación (Dávila, Jose Luis et al. 2011).

- **Matriz metálica.**

Formada de metales o aleaciones de metales, pueden contener entre 20 y 50% de volumen de refuerzo, los materiales de refuerzo comúnmente utilizados son carburo de silicio, óxido de aluminio, carburo de boro, grafito, entre otros, se utilizan en aplicaciones que requieren dureza, rigidez, resistencia a altas temperaturas, alta resistencia mecánica. Los materiales compuestos de matriz metálica ofrecen alta resistencia mecánica, elevada rigidez y pueden trabajar en un amplio rango de condiciones de operación (Dávila, Jose Luis et al. 2011).

- **Matriz polimérica.**

Este tipo de matriz utiliza polímeros que son materiales orgánicos que consisten en moléculas grandes y complejas formadas por la unión de muchas de ellas más pequeñas llamadas monómeros. Las matrices poliméricas se utilizan comúnmente en materiales compuestos por su bajo peso, alta resistencia y facilidad de procesamiento, además, pueden ser diseñadas para proporcionar propiedades específicas, como la resistencia a la corrosión, la resistencia al fuego y la resistencia química entre matrices poliméricas más comunes incluyen resinas epoxi, resinas de poliéster (Chawla, Krishan K. 1998). La **Tabla 1-2** indica las diferentes aplicaciones de la matriz polimérica junto con fibras naturales como refuerzos.

Tabla 1-2. Matriz Polimérica reforzada con diferentes fibras

Matriz Polimérica	Fibra
PP	Sisal
PP	Bambú
PP	Coco
PP	Bagazo de caña de azúcar
PS	Sisal
HDPE	Flax
LLDPE	Palma
Epoxi	Kenaf
Epoxi	Yute
PBS	Coco

Fuente: (Ferreira, Filipe V. et al. 2019)

La **matriz termoplástica** está compuesta de polímeros que pasan al estado líquido cuando son calentados, este ciclo reversible de ablandamiento y endurecimiento es el responsable de su aptitud para el reciclaje, matrices termoplásticas son el polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC) y polietileno-tereftalato (PET). También, se tienen polímeros termoplásticos de origen natural, como el ácido poli láctico (PLA) o el polihidroxibutirato (PHB), los cuales presentan propiedades muy similares al PE, PP y demás polímeros termoplásticos derivados del petróleo. Las matrices termoplásticas se utilizan comúnmente en la fabricación de materiales compuestos debido a su facilidad de procesamiento, su capacidad para ser moldeadas en formas complejas y su capacidad para mejorar las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas del material compuesto (Dávila et al., 2011).

Una **matriz termoestable** es un tipo de matriz polimérica que se endurece irreversiblemente cuando se somete a altas temperaturas y presiones, se utilizan comúnmente en materiales compuestos debido a su alta resistencia y rigidez, así como a su capacidad para soportar altas temperaturas, se componen de moléculas de polímero que se unen mediante enlaces químicos covalentes, brindándole una estructura tridimensional rígida. Cuando se somete a altas temperaturas y presiones, la matriz termoestable se cura y se endurece, originando resistente a la deformación y la descomposición térmica. Algunos ejemplos de matrices termoestables incluyen resinas epoxi, resinas de bismaleimida, resinas de fenol-formaldehído y resinas de polimida (Chawla, 2019).

Resina epoxi este tipo pertenece a la familia de la polimérica específicamente es una resina termoestable, por consiguiente, toma su forma final con el uso de reacciones químicas, una vez realizado esto no existe ninguna forma que la resina regrese a su estado original por lo cual la resina no es reciclable. Por otro lado este tipo de resinas se le conoce también como termo fijadoras porque al momento de reaccionar con su catalizador tiende al endurecimiento, así también tiene decadencia al curar, entre las ventajas de esta resina comprende elevados estándares de Resistencia a los aislantes eléctricos así como químicos además se tiene altos índices en sus propiedades mecánicas y se complementa con su buena adherencia a otros materiales.

La epoxi constituye una de las matrices termoestable más comúnmente utilizadas para la fabricación de bio-compuestos reforzados con fibras (Joshi, S. V et al. 2004), esto se debe a la destacable resistencia y rigidez después del curado, excelente adhesión a las fibras debido a la conformación de enlaces químicos, alta resistencia a la corrosión, y sus excelentes propiedades eléctricas y estabilidad dimensional, su composición química incluye la resina con grupos oxirano (epóxidos o etéreos altamente reactivos) y un agente entrecruzante con conjuntos de amina que reaccionan para formar un estructura densa tridimensional, ocasionando así el cambio de estado termoestable irreversible (Thomason, J.L. et al. 2014).

Para el autor (Ortiz, Pablo Daniel Mazón 2018) las resinas epoxis son muy utilizadas como adhesivos, elementos de vehículos, piezas moldeadas rígidas para elementos eléctricos, artículos deportivos, circuitos y también es una excelente matriz para materiales compuestos de alto rendimiento que necesiten ser reforzados con fibras, el tipo de resina está sujeta a la matriz que se utilizará según la aplicación que sea necesaria por motivos de estudio y para la investigación la resina debe tener propiedades mecánicas sumamente altas lo que se traduce en propiedades mecánicas a las cuales deben comprender la Resistencia a la tracción y al impacto, **la Tabla 2-2** detalla las principales propiedades mecánicas de la resina epoxi.

Tabla 2-2. Propiedades mecánicas de la resina Epoxi

Propiedades	Matriz Resina Epóxica
Resistencia a la tensión (psi)	15000
Elongación	6
Módulo de elasticidad (psi)	500
Densidad (g/cm ³)	1,17-1,25
Alargamiento	6-8
Fluencia	Muy baja
Temperatura de moldeo (°C)	Temp. Hasta 170
Temperatura de reblandamiento	80-130
Propiedades reológicas	Muy buena
Resistente a:	Alcohol, gasolina, aceites, grasas y benzol
No resiste a:	Ésteres, agua hirviendo, grasas, ácidos y bases
Inflamabilidad	Difícil de inflamar

Fuente:(Ortiz, Pablo Daniel Mazón 2018)

2.2.4.2 Refuerzo

Fase discontinua en forma de partículas, fibras, hojuelas o estructuras más complejas, su principal función es mejorar las características de la matriz, soporta la carga y puede aportar propiedades al material compuesto, como conductividad eléctrica o aislamiento, estabilidad térmica, propiedades estructurales, entre otras (Dávila, Jose Luis et al. 2011).

- **Fibras naturales y sintéticas**

Las fibras son materiales filamentosos que se caracterizan por su alta relación longitud-diámetro y su capacidad para soportar cargas en una dirección, se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, desde textiles y materiales compuestos hasta productos de papel y construcción. Las fibras pueden ser de origen natural o sintético, y se clasifican según su estructura, composición química y propiedades físicas, se obtienen de fuentes vegetales, animales o minerales, mientras que las fibras sintéticas se producen a partir de materiales químicos, en general, las fibras se utilizan para mejorar las propiedades de los materiales compuestos, como la resistencia, la rigidez, la durabilidad y la conductividad, tienen un impacto significativo en la sostenibilidad y el medio

ambiente (Dávila, Jose Luis et al. 2011), la **Tabla 3-2** detalla propiedades típicas entre las fibras naturales y la fibra de vidrio y de carbono.

Tabla 3-2. Comparación entre fibras naturales y sintéticas

Propiedades	Fibras de plantas	Fibra de vidrio	Fibra de carbono
Economy			
Annual global production of fibres (tonnes)	31000000	4000000	55000
Distribution of fibres for FRPs in EU (tonnes)	Moderate (≈ 60000)	Wide (≈ 600000)	Low (15000)
Cost of raw fibre (\$/kg)	Low ($\approx 0,5-1,5$)	Low ($\approx 1,3-20,0$)	High ($>2,0$)
Technical			
Density (gcm^{-3})	Low ($\approx 1,35-1,55$)	High (2,50–2,70)	Low (1,70–2,20)
Tensile stiffness (GPa)	Moderate ($\approx 30-80$)	Moderate (70–85)	High (150–500)
Tensile strength (GPa)	Low ($\approx 0,4-1,5$)	Moderate (2,0–3,7)	High (1,3–6,3)
Tensile failure strain (%)	Low ($\approx 1,4-3,2$)	High (2,5–5,3)	Low (0,3–2,2)
Specific tensile stiffness (GPa/gcm^{-3})	Moderate ($\approx 20-60$)	Low (27–34)	High (68–290)
Specific tensile strength (GPa/gcm^{-3})	Moderate ($\approx 0,3-1,1$)	Moderate (0,7–1,5)	High (0,6–3,7)
Abrasive to machines	No	Yes	Yes
Ecological			
Energy consumption/kg of raw fibre (MJ)	Low (4–15) ^e	Moderate (30–50)	High (>130)
Renewable source	Yes	No	No
Recyclable	Yes	Partly	Partly
Biodegradable	Yes	No	No
Hazardous/toxic (upon inhalation)	No	Yes	Yes

Fuente: (Shah, 2013)

Las **fibras sintéticas** son materiales fibrosos que se producen a partir de productos químicos sintéticos, como el petróleo y el gas natural, se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como la fabricación de textiles, alfombras, cuerdas, cinturones de seguridad, neumáticos, entre otros productos. Las fibras sintéticas incluyen el poliéster, el nylon, el acrílico, el spandex. Tienen propiedades únicas, como la resistencia, la durabilidad, la elasticidad y la facilidad de moldeo, pueden ser producidas en grandes cantidades y a bajo costo, convirtiéndolas en una opción más económica que las fibras naturales. Sin embargo, las fibras sintéticas no son biodegradables y pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente si no se eliminan adecuadamente (Chawla, 1998).

Las **fibras naturales** se obtienen de fuentes vegetales, animales o minerales **Figura 11-2**, y que no han sido sometidas a procesos químicos significativos, se caracterizan por ser biodegradables, renovables y tener una baja huella de carbono, algunos ejemplos de fibras naturales son el algodón, el bambú, el lino, el cáñamo, la seda y la lana (Dávila, Jose Luis et al. 2011). Estas fibras han sido utilizadas por el ser humano desde tiempos inmemoriales para la confección de prendas de vestir, elaboración de cuerdas, textiles y otros productos. En la actualidad, las fibras naturales han ganado un renovado interés debido a su naturaleza sostenible y ecológica, convirtiéndose en una alternativa atractiva frente a las fibras sintéticas derivadas del petróleo.



Figura 11-2. Fibras Naturales

Fuente: (Elfaleh, Issam et al. 2023)

La arquitectura, conformación y anatomía fibrilar a nivel microscópico, las fibras naturales representan una estructura fibrilar altamente ordenada ver **Figura 12-2**, conformada por microfibras de celulosa impregnadas en una matriz de lignina y hemicelulosa (Müssig, Jürg 2010), esta particular arquitectura con refuerzos manométricos alineados confiere a las fibras vegetales y animales sus excelentes propiedades mecánicas de resistencia, no obstante, la presencia de defectos como la porosidad en las paredes celulares, así como la distribución y contenidos relativos de los biopolímeros, afecta las propiedades mecánicas de la fibras naturales (Faruk, Omar et al. 2012a).

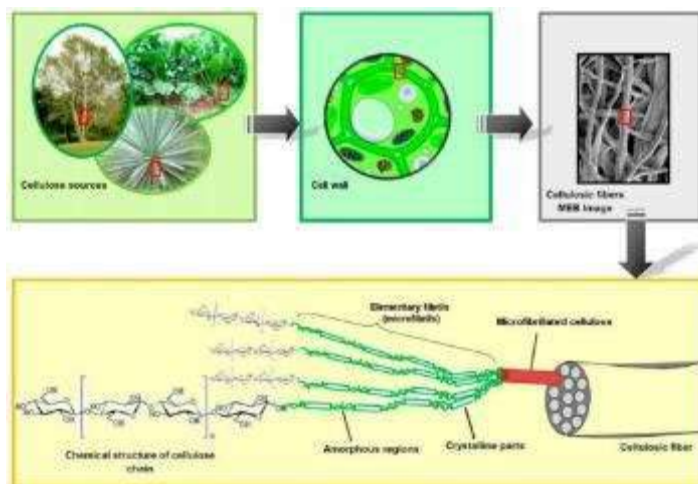


Figura 12-2. Microestructura de las fibras naturales

Fuente: (Ferreira, Filipe V. et al. 2019)

Las fibras naturales de origen vegetal como el lino, yute, abacá, bambú entre otras, están conformadas principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, la celulosa es el elemento con

mayor presencia en contenido que varía entre 43%-91%, acorde al tipo de fibra (Reddy, Narendra et al. 2005). por otro lado la hemicelulosa también se encuentra presente entre valores del 13% al 24%, así mismo la lignina se manifiesta de 2% a 7% (John, Maya Jacob et al. 2008), la relación entre estos biopolímeros influye sobre las características como la estabilidad térmica, degradación y propiedades mecánicas de las fibras naturales, aspectos primordiales que se deben considerar al incorporarse en materiales compuestos (Saba, N. et al. 2015), la **Tabla 4-2** detalla la composición química de las fibras naturales más utilizadas.

Tabla 4-2. Composición química de las fibras naturales.

Fibra	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Caña de azúcar	45	30	24
Bambú	26-43	30	21-31
Flax	71	18,6-20,6	22
Kenaf	72	20,3	9
Yute	68	14-20	12-13
Cáñamo	68,6-76,2	15	10
Seda	65	13-16	0,6-0,7
Sisal	32-43	12	9,9
Coco	81	0,15-0,25	40-45
Fibra de piña	73,6	-	12,7
Curaua		9,9	7,5

Fuente: (Ferreira, Filipe V. et al. 2019)

Las fibras naturales poseen buenas prestaciones mecánicas **ver Tabla 5-2**, que las posicionan como una excelente alternativa viable para manufacturar materiales compuestos, por ejemplo, las fibras de lino detallan una resistencia a la tracción entre 345-1500 MPa, y un módulo de Young de 27 a 80 GPa (Bledzki, Andrzej K. et al. 2010).

Análogamente las fibras de yute presentan una resistencia entre 393-800 MPa, y rigidez específica se suma a ventajas como baja densidad, biodegradabilidad y sustentable (Rahman, Md. Siddiquir 2010). Sin embargo, la dispersión en valores se debe a que las propiedades mecánicas están en función de la morfología de la fibra, condiciones de crecimiento entre otros factores.

Tabla 5-2. Propiedades mecánicas de las fibras naturales.

Fibra	Densidad (Kg/m ³)	Longitud (mm)	Resistencia a la tracción (MPa)	Deformación (%)	Módulo de Young (GPa)
Caña de azúcar	1,3	500-1000	290	3-7	17
Seda	1,5	900-1200	560	15	24,5
Abacá	1,4	2,5-13	500	5,9	12
Coco	1,1-1,5	20-150	131-220	15-40	4-6
Algodón	1,5-1,6	10-60	287-800	1,2-1,5	13-27
Curaua	1,4	150-1500	500-1150	3,7-4,3	11,8
Cáñamo	1,5	5-55	310-750	1,6	30-70
Yute	1,5	1,5-120	393-1000	1,16-2,5	13-54
Kenaf	-	3000	930	1,6	53
Palma	0,7-1,6	248	248	25	3,2
Piña	0-1,6	3-9	1,44	14,5	34,5-82,5
Sisal	1,5		468-640	15	9-22

Fuente:(Liu, Dagang et al. 2012)

- **Fibra natural-polímero en el sector automotriz**

Los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibra natural han despertado un interés por su aplicación en sector industrial y automotriz, como una alternativa más sustentable y amigable con el medio ambiente, diversos estudios han marcado su atención en el desarrollo de tableros de instrumentos, revestimientos interiores, paneles de puertas, partes estructurales del chasis, parachoques y otro elementos del vehículo utilizando fibras como el lino, cáñamo, kenaf o madera en fusión con resinas termoestables y termoplásticas (Shah, 2013). Los resultados de los estudios mencionados presentan mejoras importantes en las propiedades como rigidez y tenacidad frente a los materiales tradicionales, así mismo contribuyen a disminuir el peso del vehículo como se lo indica en la **Tabla 6-2**, con consecuentes beneficios en consumo de combustible y emisiones contaminantes

Tabla 6-2. Reducción de peso estructural con fibras naturales en aplicaciones de la industria

Componente	Materiales convencionales	Peso (g)	Materiales compuestos	Peso (g) MC	Reducción de peso (%)
Panel interior del auto	ABS	1125	Cáñamo – Epoxi	820	27
Panel de aislamiento del auto	Fibra de vidrio – PP	3500	Cáñamo – PP	2600	26
Pallet de transporte	Fibra de vidrio – PP1	15000	China reed - pp	11770	22

Fuente: (Joshi, S. V et al. 2004)

2.2.4.3 Bambú



Figura 13-2. Planta de bambú.

Fuente: (Liese, Walter et al. 2015)

Tipo de planta que pertenece a la subfamilia Bambusoideae, el bambú es el único del linaje importante dentro de la familia que se ha adaptado y diversificado en hábitats forestales **Figura 13-2**. El bambú se caracteriza por tener hojas con células invaginadas asimétricamente fuertemente desarrolladas en la hoja, así como por tener hojas relativamente anchas (Liese, Walter et al. 2015).

El bambú es muy trascendental para la población de las zonas rurales de todo el mundo, es endémica de América con aproximadamente 30 especies distribuidas desde México hasta la Argentina, las cuales se encuentran en un rango de altitud desde el nivel del mar hasta los 2.200 m.s.n.m (Taborda-Rios, July Andrea et al. 2017), es considerado como el acero vegetal por composición natural, posee fibras de celulosa de manera longitudinal y se incrementan desde el interior hacia el exterior del tallo, es un material ideal para la construcción de viviendas sismo-resistentes por sus propiedades estructurales la resistencia, flexibilidad y su ligereza (Bernal, José et al. 2021).

En el Ecuador la guadua angustifolia es la especie de bambú predominante, se desarrolla de manera silvestre en occidentales de los Andes y en los valles interandinos con climas tropicales y subtropicales húmedos, de acuerdo con la norma técnica NEC-SE-GUADÚA, ciudades como Guayaquil, Jipijapa y Montecristi situadas geográficamente en la costa ecuatoriana detallan una extensa presencia de este tipo de bambú (MIDUVIC 2017).

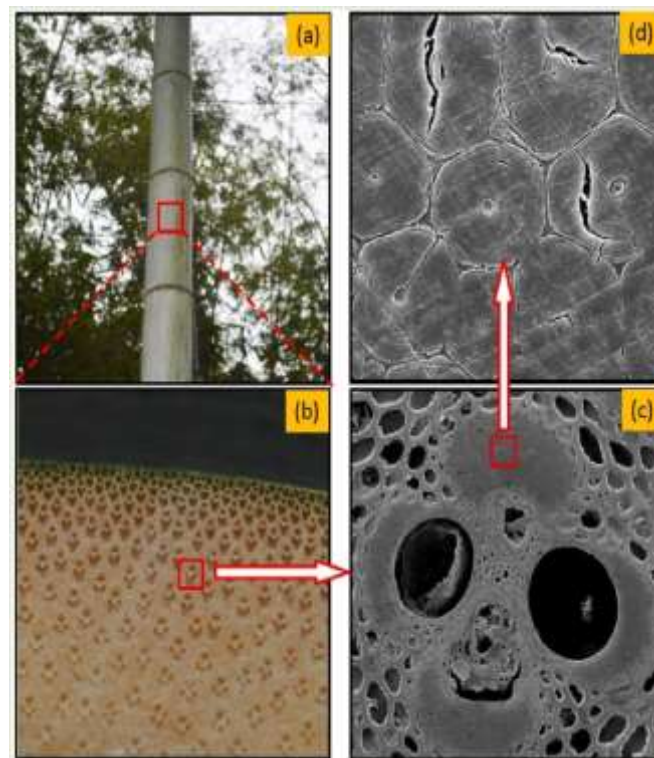


Figura 14-2. Estructura de la fibra de bambú.

Fuente: (Hasan, K. M. Faridul et al. 2023)

La fibra de bambú presenta una estructura multicelular compleja, como se aprecia en la **Figura 14-2**, está compuesta por haces vasculares, visibles en el corte transversal del culmo (a), que contienen las fibras elementales alargadas y cementadas por lignina (c), se distingue la morfología de estas fibras individuales (d), las cuales poseen un diámetro entre 2-10 μm (Hasan, K. M. Faridul et al. 2023).

- **Composición química cuantitativa de la fibra de bambú**

La pared celular de las fibras naturales del bambú está compuesta por tres fracciones poliméricas mayoritarias, celulosa, hemicelulosas y lignina, la celulosa representa el 40-50% de su contenido, la hemicelulosa está aproximadamente el 20-30%, mientras la lignina es un polímero complejo que se encuentra en la pared celular del bambú y se encuentra entre el 20-30% de su contenido de materia seca, la celulosa es responsable de la resistencia y rigidez del bambú, mientras que la hemicelulosa es reflejada en su flexibilidad y capacidad de absorción de agua por último la lignina de la resistencia a la descomposición y la putrefacción del bambú (Akinlabi, Esther Titilayo et al. 2017). Los grupos hidroxilo superficiales de la fibra de bambú pueden establecer enlaces covalentes con grupos funcionales de la resina termoestable, mejorando la adhesión, no obstante, la lignina actúa como barrera amorfa, requiriendo por tanto de modificaciones físicas, químicas o biológicas sobre la topografía de la fibra que potencien la unión fibra-matriz.

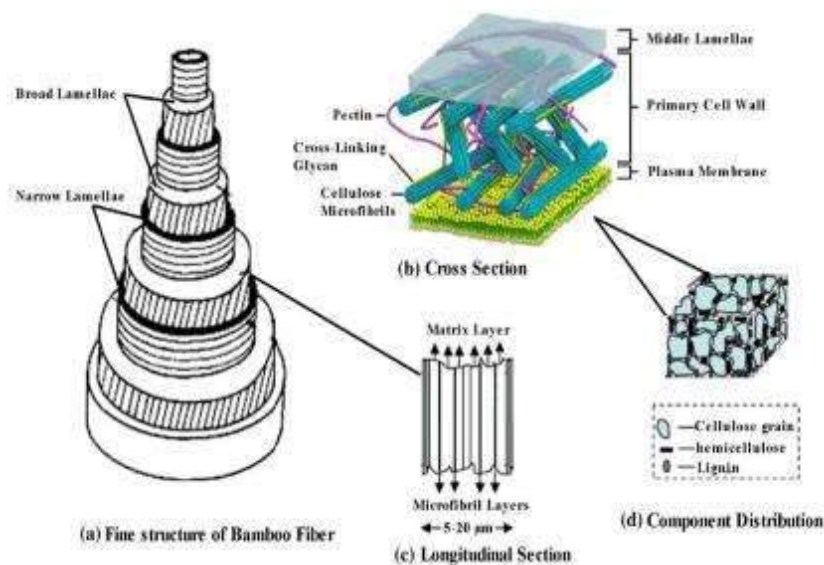


Figura 15-2. Estructura del bambú

Fuente: (Liu, Dagang et al. 2012)

En el campo mecánico, la microestructura fibrilar del bambú orientada longitudinalmente **Figura 15-2** y cementadas por la lignina (Chen, Xiaoya et al. 1998), resulta en un comportamiento mecánico estructural (Yu, Yan et al. 2014), esta morfología particular ofrece elevadas propiedades de resistencia y módulo elástico cuando se aplican cargas axiales paralelas de las fibras (Osorio, L. et al. 2011).

Asimismo su alta relación de resistencia densidad de la fibra de bambú brinda una buena tenacidad ante las sollicitaciones dinámicas de impacto, presenta una notable capacidad de deformación plástica y disipación de energía previo a su fractura total (Shah, Ain et al. 2016), en la **Tabla 7-2** se indica las propiedades mecánicas de la fibra de bambú.

Tabla 7-2. Propiedades mecánicas de la fibra de bambú.

Propiedades Mecánicas	
Densidad(Kg/m ³)	0,6-1,5
Módulo de elasticidad (Gpa)	11–30
Resistencia a la tracción (Mpa)	140-800
Elongación (%)	1,3

Fuente: (Chen, Xiaoya et al. 1998)

- **Extracción de la fibra de bambú.**



Figura 16-2. Fibra de bambú.

Fuente: (Osorio, L. et al. 2011)

La obtención de la fibra de bambú **Figura 16-2** no posee un proceso específico, sin embargo existen principalmente dos métodos, mecánico y químico, según (Estrada, Mejia, Martin 2009) el método más utilizado es el Kraft que consiste en separar la celulosa, lignina y hemicelulosa, por medio del licor blanco que contiene hidróxido de sodio y sulfuro de sodio que acelera la digestión y disminuye efectos contaminantes.

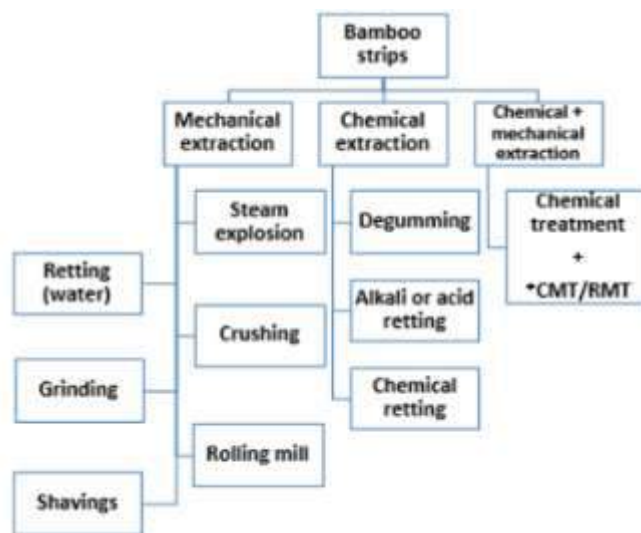


Figura 17-2. Procesos de extracción de la fibra de bambú

Fuente: (Shah, Ain et al. 2016)

El proceso mecánico emite menor polución pero requiere mayor inversión de mano de obra, consta en extraer las fibras de manera manual o con ayuda de rocas o molinos, para materiales blandos como el la fibra de abacá que se obtiene del tallo del banano o fibras de coco, así también se puede utilizar rodillos o molinos industriales que separan las fibras de plantas como caña de azúcar, yute o el bambú (Estrada, Mejia, Martin 2009), por otro lado el proceso químico utiliza soluciones alcalinas o ácidas (NaOH o KOH) para la separación de fibras, siendo más rápido pero generando residuos contaminantes (Shah, Ain et al. 2016), la **Figura 17-2** muestra los proceso de extracción de la fibra de bambú.

El presente estudio se basa en la extracción mecánica de fibras a partir de culmos de *Guadua angustifolia* Kunth (bambú) entre 3 a 5 años de maduración. Inicialmente, los culmos son cosechados y desprovistos de impurezas o material excedente, Posteriormente, mediante procesos de descortezado y seccionamiento longitudinal del tallo, se libera el tejido fibroso para su aislamiento, la separación de los haces fibrosos se realiza manualmente utilizando herramientas punzantes que provoquen el desmembramiento celular, finalmente, las fibras elementales son sometidas a secado solar para eliminación de contenidos de humedad previo a su incorporación en la matriz polimérica (Sanipatín Silva, Angélica Maribel et al. 2022).

- **Tratamiento superficial de la fibra de bambú**

Diversos tratamientos se pueden aplicar a las fibras naturales como el bambú para modificar propiedades superficiales y mejorar su adhesión en compuestos poliméricos, entre los métodos **físicos** se tiene el tratamiento por secado térmico y por plasma, que utiliza la radiación UV libre que luego se entrecruzan, incrementando la energía de la fibra para ser impresa o unida a la matriz (Mukhopadhyay, S. et al. 2009).

Por otra parte, dentro de los procedimientos **químicos** se destaca el tratamiento alcalino al sumergir las fibras en soluciones acuosas diluidas de NaOH o KOH, el cual modifica los grupos hidroxilos de la celulosa, aumentando así la rugosidad de la superficie (Elfaleh, Issam et al. 2023), también se utilizan agentes acrilantes para generar radicales e injertar moléculas acrílicas sobre los grupos hidroxilo de la fibra.



Otro tipo de tratamientos para las fibras son los **biológicos**, en los cuales se utilizan microorganismos naturales como bacterias y hongos, inmersos en ambientes acuosos, descomponiendo selectivamente fracciones de la fibra mediante la liberación enzimática. Por ejemplo, en el tratamiento de enriado, los microorganismos degradan compuestos de la planta, ayudando a liberar las fibras individuales de sus haces (Preet Singh, Jai Inder et al. 2017), las desventajas son la alta duración de estos tratamientos y la contaminación del agua residual.

2.2.4.4 Interfaz fibra-matriz

La calidad de unión entre la matriz y el refuerzo, llamado interfaz, es la zona donde se produce la transferencia de carga entre las fibras y la matriz se convierte en determinante en las propiedades mecánicas finales del material bio-compuesto, así pues, una interfaz deficiente puede debilitar el material y reducir su resistencia y rigidez. Por lo tanto, se han desarrollado diversas técnicas para mejorar la calidad de la interfaz, como el tratamiento de las fibras y la matriz, la modificación de la superficie y la adición de agentes de acoplamiento, existen diferentes mecanismos de adhesión interfacial, tal como muestra la Figura 1-2 (Chawla, Krishan K. 2019).

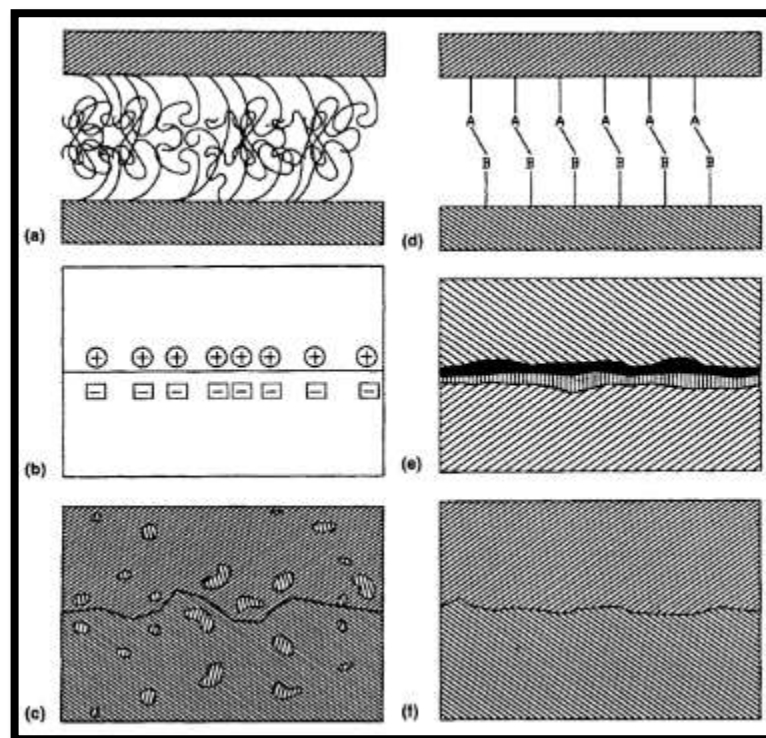


Figura 18-2: Enlaces de interfaz formados por (a) enredos moleculares; (b) atracción electrostática; (c) interdifusión de elementos; (d) reacción química entre grupos; (e) formación de nuevos compuestos; (f) anclaje mecánico.

Fuente: (Kim et al., 1998)

Como ha sido expuesto en la Figura 1-2, existen múltiples mecanismos de adhesión interfacial entre la matriz y el material de refuerzo en los materiales compuestos, supeditándose de la naturaleza química de las fases, algunos de estos mecanismos predominarán sobre el resto (Kim, Jang-Kyo et al. 1998).

En el caso particular de sistemas compuestos con una matriz polimérica termoestable y fibras lignocelulósicas como refuerzo, la literatura reporta que son los enlaces químicos covalentes y las interacciones físicas las que gobiernan en mayor medida la adhesión fibra-matriz (Ahmad, Syed Mansoor et al. 2023). Esta adhesión es fundamental para garantizar una transferencia eficiente de esfuerzos de la matriz a las fibras de refuerzo.

Se ha demostrado que algunos tratamientos sobre la superficie de la fibra pueden potenciar los enlaces químicos con grupos funcionales de la resina, así como incrementar la rugosidad de esta para mejorar el anclaje mecánico con la matriz (Gupta, Anu et al. 2011).

2.2.4.5 Adhesión e interacción entre fibra y matriz

La adhesión e interacción entre fibra y matriz está relacionada directamente con la fuerza de unión entre ellas en un material compuesto. La adhesión es la capacidad de la matriz para incorporarse a la superficie de la fibra, mientras que la interacción se refiere a la característica de la fibra y la matriz para interactuar químicamente y mecánicamente. Los tratamientos superficiales de las fibras naturales como los alcalinos, incrementado la rugosidad superficial, el área de contacto interfacial y la energía libre, colaborando con una mejor adhesión química por los enlaces covalentes con grupos funcionales de la matriz, así como un comportamiento mecánico eficiente (Elfaleh, Issam et al. 2023).

Una buena adhesión e interacción entre la fibra y la matriz es esencial para lograr un material compuesto de alta calidad y alto rendimiento, si es insuficiente, la fibra puede desprenderse de la matriz, lo que debilita el material y reduce su resistencia mecánica, la adhesión excesiva puede hacer que la fibra se rompa antes de que la matriz falle, lo que también reduce la resistencia del material. Por lo tanto, es importante optimizar la adhesión e interacción entre la fibra y la matriz para lograr un material compuesto con propiedades mecánicas y durabilidad óptimas (Dávila, Jose Luis et al. 2011).

Para (Estrada, Mejia, Martin 2009), los materiales compuestos que esta reforzados con fibras contienen anisotropía por lo que los refuerzos tienden a cambiar de eje geométrico, por esta razón se necesita verificar en el módulo de Young que hace referencia a la orientación del material es decir, se puede utilizar diferentes formas y orientación de la fibra con el fin de que este soporte mayores cargas. Las fibras deben tener un diámetro de 2 a 10 μm y 50 cm longitud este último de la necesidad de las pruebas a comprobar.

2.2.5 Características de materiales bio-compuesto reforzados con fibras

Entre los aspectos determinantes en las prestaciones mecánicas de los materiales compuestos reforzados con fibras esta la longitud de estos elementos fibrosos por lo tanto un mayor alargamiento de los filamentos de la fibras está relacionado directamente con indicadores más elevados de resistencia y modulo elástico, a su vez un excesivo aumento en el valor longitudinal pone en riesgos los procesos de mezcla y dispersión durante la fabricación de bio-compuestos (Faruk, Omar et al. 2012a), otro factor influyente en el comportamiento mecánico es el diámetro de los haces de refuerzo, los modelos de difusión predicen que a menor valor de diámetro se favorece una impregnación más completa por parte de la matriz polimérica en la manufactura, mejoran la superficie específica para la fusión con el biopolímero (Müssig, Jürg 2010) Las fibras

naturales describen densidades entre 0,6 – 1,5 g/cm³, por debajo de las fibras sintéticas derivadas del vidrio o carbono (Bledzki, Andrzej K. et al. 2006), debido a esto el material compuesto resultante sostendrá una menor densidad, sin embargo la porosidad en las paredes de las fibras naturales pueden ocasionar concentración de esfuerzos y precipitadas fallas.

Las fibras naturales presentan una alternativa positiva frente a las sintéticas ver **Tabla 8-2**, aspectos a considerar están la baja densidad, precio competitivo, buena resistencia, ciclo de vida sustentable, biodegradabilidad y un impacto ambiental favorable durante su procesamiento (Ferreira, Filipe V. et al. 2019), no obstante tiene limitaciones en las propiedades mecánicas dependiendo de su fuente vegetal, así también menor estabilidad dimensional y propenso a absorber la humedad que envejece la adhesión con algunas matrices poliméricas.

Tabla 8-2. Propiedades de fibra naturales comparadas con fibras sintéticas

Fibra	Densidad (g/cm ³)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)	Elongación de falla (%)	Resistencia a la tracción específica (MPa)	Módulo de elasticidad específica (GPa)
Jute	1,3-1,5	393-800	10-55	1,5-1,8	300-610	7,1-39
Flax	1,4-1,5	345-1500	27-80	1,2-3,2	230-1220	18-53
Cotton	1,5-1,6	287-800	5,5-13	3-10	190-530	3,7-8,4
Kenaf	1,5	930	53	1,6	641	36
Pineapple	1,4	413-1627	34-82,5	1,6	-	-
Sisal	1,2-1,5	468-855	3-98	2-2,5	362-610	6,7-20
Hemp	1,5	550-110	58-70	1,6	370-740	39-47
Abaca	1,5	12-980	-	-	-	-
Bagasse	0,5-1,2	290	-	-	-	-
Banana	0,75-1,3	180-914	-	-	-	-
Bamboo	1,5	575	27	-	-	18
Kapok	0,38	93,3	4	-	-	12,9
Ramie	1,5	400-938	44-128	1,2-3,8	270-620	29-85
Harakeke	1,3	440-990	14-33	4,2-5,8	338-761	11-25
Alfa	1,4	188-308	18-25	1,5-2,4	134-220	13-18
Coir	1,2	131-220	4-6	14-40	110-180	3,3-5
Silk	1,3	100-1500	5-258	15-60	100-1500	4-20
Feather	0,9	100-203	3-10	6,9	112-226	3,3-11
Wool	1,3	50-315	2,3-5	13,2-35	38-242	1,8-3,8
E-glass	2,5-2,6	2000-3500	70-73	2,5-3	800-1400	28-29
S-glass	2,5	4570	86	2,8	-	-
Aramid	1,4	300-3150	63-67	3,3-3,7	-	-
Carbon	1,7	4000	230-240	1,4-1,8	-	-

Fuente: (Ferreira, Diana P. et al. 2019)

2.2.5.1 Disposición de la fibra en el material compuesto.

Las fibras pueden disponerse en diferentes orientaciones y presentar una relevancia crucial en el comportamiento mecánico del compuesto final, cuando estas se distribuyen y se orientan al azar ocasiona un material reforzado con comportamiento isotrópico, no obstante, una alineación unidireccional de la fibra otorga propiedades anisótropas al compuesto aumentando el desenvolvimiento mecánico de rigidez y resistencia al impacto en la dirección de orientación seleccionada, así mismo, es posible una orientación multidireccional buscando un equilibrio entre las diversas propiedades según los requisitos de la aplicación (Kalia, Susheel et al. 2009).

La orientación de la fibra en un material compuesto presenta diferentes tipos o puede ser aleatoria (Ortiz, Pablo Daniel Mazón 2018), En la **Figura 19-2** se observa la tensión que soporta los arreglos de la fibra en una matriz en función de los grados de giro.

La orientación aleatoria de la fibra es el caso más simple, adoptan una dispersión unidireccional, es decir sin ninguna orientación relevante (0° - 180°), se dispersan al azar en toda la superficie de la matriz polimérica, esto lleva a manufacturar un material cuasi-isotrópico con propiedades mecánicas uniformes en cualquier dirección de análisis, cuando se trata de una orientación unidireccional las fibras se alinean en su mayoría en la misma dirección por ejemplo en 0° , este orden direccional induce a tener una marcada anisotropía en el material, reforzando el rendimiento mecánico en el mismo eje de las fibras, pero lo decae al material en direcciones de 90° . Existen configuraciones intermedias en dos o más direcciones con ciertos ángulos entre sí, a este tipo se lo denomina orientación multidireccional por ejemplo disposiciones de la fibra de 0° - 90° o -45° - 45° , obteniendo un material con propiedades cuasi-isotrópicas, compensando el desempeño mecánico entre los diferentes ejes (Summerscales, John et al. 2010).

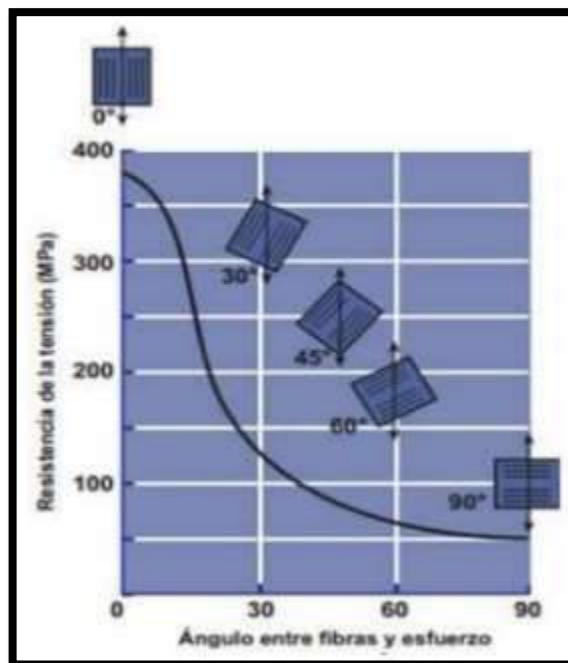


Figura 19-2. Resistencia a la tensión en fibra a diferentes grados

Fuente: (Ortiz, Pablo Daniel Mazón 2018)

2.2.5.2 Influencia de la orientación sobre las propiedades mecánicas

La alineación direccional de los bio-refuerzos impacta anisotrópicamente sobre las prestaciones mecánicas del material compuesto, maximizando o disminuyendo diferentes propiedades dependiendo de la dirección de análisis (Shah, Ain et al. 2016) Así tracción o compresión las fibras orientadas axialmente potencia la rigidez y la resistencia en mencionado eje longitudinal, pero en sentido contrario, el resultado es considerablemente inferior.

El grado de anisotropía en función de la orientación, las fibras unidireccionales confieren una marcada anisotropía micro-estructural al sólido, esto resulta en un refuerzo importante en la dirección de orientación de la fibra preferencial, en algunos bio-compuestos puede significar incrementos del 60% en el módulo elástico o 70% en la resistencia a la tracción axial, contrariamente, en ejes ortogonales o trasversales las propiedades pueden deteriorarse por debajo del 40%, el esparcimiento de la fibra de forma multidireccional converge en un comportamiento cuasi-isotrópico sobre (Elfaleh, Issam et al. 2023), con desviaciones del orden del 10% entre direcciones, la **Figura 9-2** detalla la relación existente entre las propiedades mecánicas del material compuesto y la orientación de la fibra.

Tabla 9-2. Propiedades típicas y orientación de fibras naturales con matriz polimérica

Fibra	Matriz	Configuración	% Fibra	Módulo elástico (Gpa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Elongación (%)
Flax	Epoxy	Unidirectional	40	28	133	n/a
Flax	PLLA	Aligned roving	40	7,3 +/- 7,2	44,1	0,9
Flax	PLLA	Random mat	30	9,5	99	1,5
Hemp	UP resin	Mat	44	6,2 +/- 6	53	1,39
Hemp	PP	Injection moulded	40	5,3	50,5	n/a
Yute	PP	Injection moulded	50	5,5	32	n/a
Yute	PP/MAPP	Injection Moulded	50	5,4	57,9	n/a
Nettle	Epoxy	Unidirectional	24	9	91	n/a
Nettle	Phenolic	Unidirectional	23	5	13	n/a

Fuente: (Summerscales, John et al. 2010)

2.2.5.3 Estrategias para optimizar el diseño de orientación de fibras.

Mediante simulaciones computacionales resulta viable la modelación y predecir la orientación potencial de las fibras en diversos escenarios de fabricación, estas herramientas de predicción ayudan a establecer estrategias efectivas para la correcta alineación de las fibras en función de las propiedades requeridas para la aplicación (Faruk et al., 2012).

2.2.5.4 Tejido de la fibra

El tejido es un proceso que consiste en entrelazar las fibras longitudinalmente ver **Figura 20-2**, conocidos como urdimbre, con las fibras horizontales a los que se les conoce con el nombre de trama las cuales pasan de forma alternada por debajo y por arriba de las fibras de la urdimbre (Ortiz, Pablo Daniel Mazón 2018). Este entrelazado de hilos forma un patrón repetitivo que da lugar a una estructura tejida resistente y flexible. El tejido es uno de los métodos más antiguos y comunes para la fabricación de textiles, ya que permite combinar distintos tipos de fibras y crear una amplia variedad de diseños y texturas. El tejido confiere propiedades específicas al material resultante, como la resistencia a la tracción, la elasticidad, la permeabilidad al aire y la capacidad de absorción de humedad, entre otras. Estas características hacen que los tejidos sean adecuados para diversas aplicaciones.

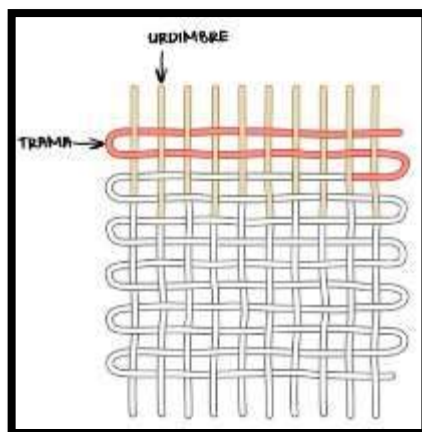


Figura 20-2. Tejido de la fibra

Fuente: (Tipos de tela y conceptos de tejidos en textil hogar, 2019)

Es importante tener en cuenta como se coloca la fibra (refuerzo), en la matriz ya que este se convierte en factor muy trascendental para encontrar las propiedades que resultará del nuevo material, las conformaciones que puede tener fibra, larga corta o tejida. Se puede obtener diferentes modificaciones por la manera que se tejen las fibras, que tienen lugar a materiales compuestos con diferentes propiedades mecánicas. Se conoce que existen defectos en el uso de fibras naturales como refuerzo, así tenemos, cuando se sitúa la fibra en el mismo camino de la fuerza a la cual estará sometida el material compuesto esta ofrecerá una resistencia mayor, caso contrario son situadas perpendicularmente con la fuerza aplicada el material compuesto se convertirá en isotrópico pero a razón de esto su tenacidad y resistencia disminuirá. Esto se puede controlar mediante el uso de un tejido fibra como refuerzo porque este presenta un configuración más estable, mayor rugosidad y estará mejor conformada logrando una correcta adhesión del material compuesto (Ortiz, Pablo Daniel Mazón 2018).

- **Tejido Plano**

Es el tejido más simple de todos, este tiene filamentos intercalados con fibras de trama que pasan de forma uniforme por encima y por debajo de los filamentos de urdimbre ver **Figura 21-2**. Por tanto, la primera fibra pertenece al hilo de trama que pasa por encima de la primera fibra de urdimbre, por debajo de la segunda fibra, por encima de la tercera fibra, y así sucesivamente. Luego se continúa repitiendo la primera secuencia en la tercera columna y en todas las columnas impares. Estas telas tienen más enredos por unidad de área, lo que puede reducir Resistencia y rigidez de materiales compuestos (Dávila, Jose Luis et al. 2011). Este patrón de tejido, conocido como tafetán o liso, es ampliamente utilizado en la industria textil debido a su sencillez y versatilidad. Sin embargo, en el campo de los materiales compuestos reforzados con fibras tejidas, puede resultar en una menor eficiencia estructural en comparación con otros patrones de tejido más complejos.

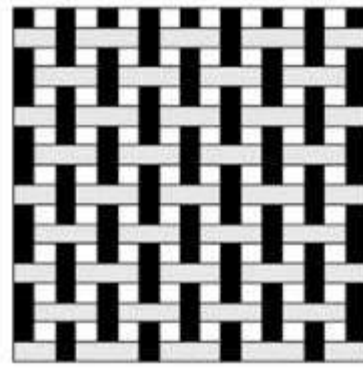


Figura 21-2. Configuración del tejido plano de la fibra.

Fuente: (Dávila, Jose Luis et al. 2011)

- **Tejido Sarga**

Este tipo de tejido tiene una configuración en donde un filamento de fibra de trama debe pasar por encima de dos hilos de fibra de urdimbre, esto continua con la siguiente fila de trama en donde se debe tomar en cuenta que debe estar un filamento delante de la urdimbre. Estos se caracterizan por tener una estructura más compacta y presenta una buena resistencia a la abrasión y al desgaste. En la **Figura 22-2** se observar la configuración del tejido sarga.

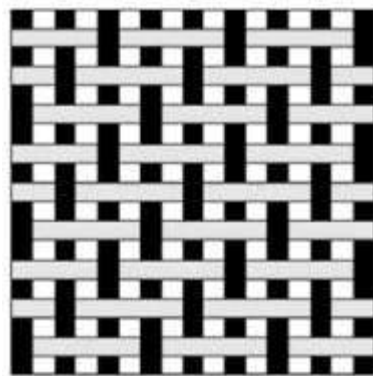


Figura 22-2. Tejido tipo sarga

Fuente: (Dávila, Jose Luis et al. 2011)

- **Tejido Satén**

En este tejido los filamentos de la urdimbre se reparten en series mayores para la sarga pueden ser hasta 8 series, cada filamento sólo cubre la trama cuando es la primera pasada; en la siguiente, el tercero saltando uno y así sucesivamente. En la **Figura 23-2** se observa la configuración de un tejido tipo satén. Esta disposición de los hilos crea una superficie lisa y brillante en un lado del tejido, mientras que en el otro lado se observa un patrón diagonal característico. Los tejidos de sarga y satén son ampliamente utilizados en la industria textil debido a su apariencia atractiva y su suavidad al tacto. estos tejidos ofrecen una mayor resistencia a la abrasión y al desgaste, lo que los hace adecuados para aplicaciones decorativas industriales.

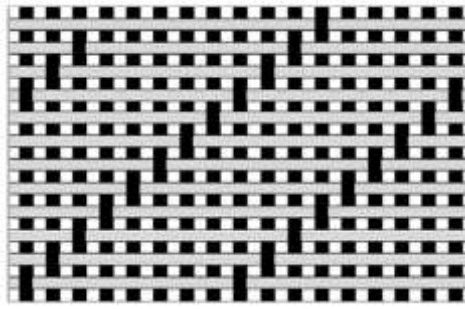


Figura 23-2. Configuración del tejido Satén

Fuente: (Dávila, Jose Luis et al. 2011)

A continuación, se muestra la **Tabla 10-2** que exhibe la relación de las propiedades mecánicas de los tipos de tejidos de la fibra como refuerzo de los materiales compuesto.

Tabla 10-2. Comparación de las propiedades de los tejidos de la fibra

Propiedad	Plano	Diagonal	Satén
Estabilidad	4	3	2
Conformado	2	4	5
Porosidad	3	4	5
Acabado	2	3	5
Equilibrio	4	4	2
Simetría	5	3	1
Ondulación	2	3	5
Total	22	34	25

Fuente: (Ortiz, Pablo Daniel Mazón 2018).

- **No tejidos**

Para (Dávila et al., 2011) los no tejidos tienen una configuración plana flexible y a su vez poderosa en donde los filamentos se encuentran orientados al azar ver **Figura 24-2**, para una mejor comprensión de esto es necesario entender que las fibras del refuerzo tiene un desorden en comparación con el tejido.

Es importante mencionar que los no tejidos tienen algunas aplicaciones que está en función de su estructura, las propiedades mecánicas que presenta son limitadas, En la industria automotriz se usa este tipo de tejido en aislación térmica y acústica, base de piezas moldeadas, terminación superficial, separadores de batería, revestimientos internos de paneles de puertas refuerzos de asientos, filtros, entre otros. A pesar de sus limitaciones en cuanto a propiedades mecánicas, los no tejidos ofrecen ventajas como su bajo costo de producción, versatilidad en la selección de fibras y estructuras, y la capacidad de incorporar diferentes aditivos y recubrimientos. Su naturaleza porosa y flexible los hace adecuados para aplicaciones como filtración, absorción de líquidos y amortiguación de impactos.

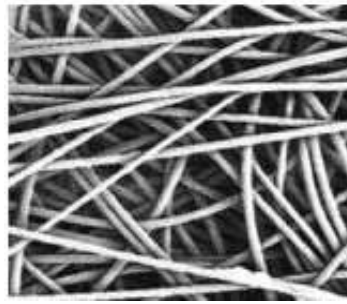


Figura 24-2. Configuración del no tejido de la fibra.

Fuente: (Dávila et al., 2011)

2.2.5.5 Incidencia de la fracción de volumen, del diámetro y dimensión de las fibras.

Un modelo ampliamente adoptado por la industria para la conjeturar los atributos elásticos en materiales compuestos es la regla de las mezclas (Bledzki, Andrzej K. et al. 2006) esta relaciona el módulo elástico (E_c) resultante en el bio-compuesto como función de la fracción en volumen (V_f) y propiedades intrínsecas de los bio-refuerzos (E_f), así también la contribución relativa de la matriz polimérica (V_m , E_m), factores adicionales de longitud y orientación de las fibras consideran la dependencia direccional, se ha reportado un elevado módulo elástica de hasta 140 GPa para fibras naturales puras (Summerscales, John et al. 2010), razón por la cual los materiales híbridos se convierten en alternativas para refuerzos.

$$E_c = n_l n_o V_f E_f + V_m E_m$$

Dónde, n_f es el factor de distribución de longitud de la fibra, n_o es el factor de distribución de orientación de la fibra, E_f es el módulo elástica de la fibra E_m módulo elástico de la matriz, V_f la fracción de volumen de la fibra y V_m es la fracción de volumen de la matriz (asumiendo que $v_f + v_m = 1$, sin poros ni inclusiones), en la mayoría de fibras naturales no existe una perfecta estructura de las mismas por lo que $V_f + V_M + V_v + V_o = 1$, donde V_v es la fracción de volumen de los poros y V_i es la fracción de volumen de lumen (luz entre componentes de la fibra) como volumen total de material compuesto esto se observa en la **Figura 25-2**.

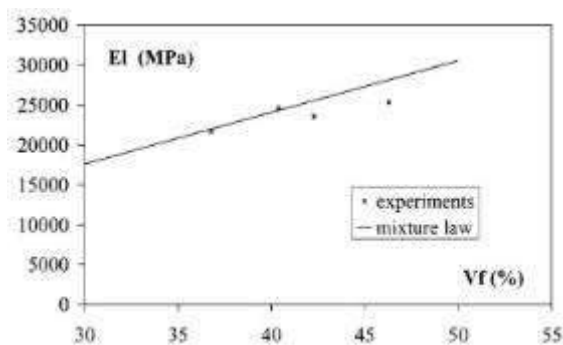


Figura 25-2. Módulo de elasticidad vs fracción de volumen de la fibra

Fuente: (Lamy, B. et al. 2000)

2.2.5.6 Efecto de los vacíos

Un modelo para predecir la conformación volumétrica de las fracciones de la fibra, matriz, poros y la densidad del material de los composites en función del peso de la fibra se encuentra la desarrollada por (Madsen, Bo et al. 2007), esta ecuación se encuentra encaminada a compuestos de fibras naturales, la porosidad está asociada a tres elementos la fibra, la interfaz y la matriz influyendo de manera directa en las propiedades mecánicas del compuesto, donde V_p es la fracción volumétrica de la porosidad derivada del peso en fracciones de los otros componentes y n es un exponente que cuantifica el efecto de la porosidad en donde existe concentraciones de esfuerzos, cuando $n=0$ simboliza que la porosidad no tiene efecto sobre el compuesto.

$$E_c = (n_l n_o V_f E_f + V_m E_m)(1 - V_p)^n$$

Existen tres categorías importantes de porosidad que se manifiestan en los materiales compuestos con matrices poliméricas y reforzados con fibras naturales, en primer lugar, la inherente porosidad en la estructura de las fibras naturales, como los huecos internos o lumen (**Fig. 12b-2**) en segunda instancia, cavidades con precesia de aire situadas en la zona interfacial de contacto entre las fibras y la matriz, deriva en una adhesión deficiente (**Fig. 12c-2**) Y finalmente, espacios vacíos dentro los haces dela fibra resultado de una incompleta impregnación de las fibras por parte del biopolímero (**Fig. 12a-2**) La presencia de estas tres categorías de poros es indeseable, impactando negativamente sobre el desempeño de material compuesto.

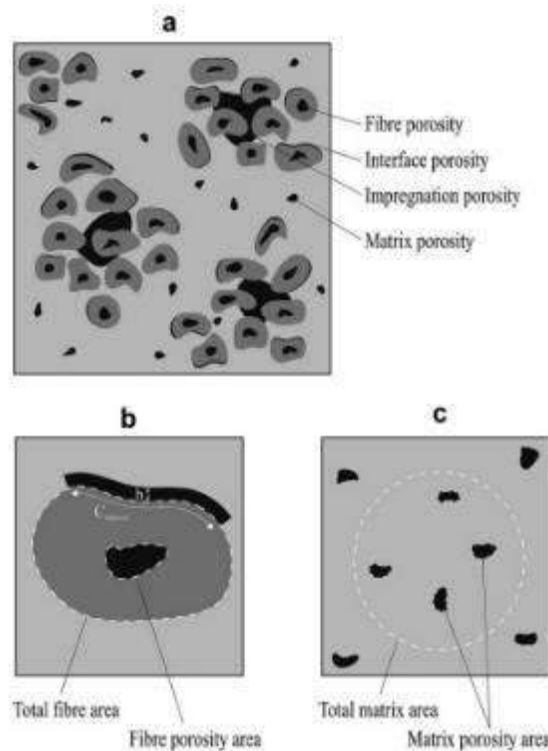


Figura 26-2. Identificación de la porosidad en los sub-componentes.

Fuente: (Madsen, Bo et al. 2007)

2.2.5.7 Efecto del diámetro de la fibra

Investigaciones previas (Lamy, B. et al. 2000), respecto a las propiedades mecánicas de las fibras de lino en relación de su diámetro ver **Tabla 11-2**, demuestran la influencia de esta dimensión sobre las propiedades mecánicas finales del material compuesto, los análisis mediante ensayos revelan una relación inversa entre el diámetro y el módulo elástico, es decir, a menor sección transversal de la fibra mayores serán sus niveles en su rigidez, este estudio presenta un modelo para predecir el módulo elástico longitudinal de material compuesto con fibras naturales (lino), considerando la distribución de diámetros como un factor determinante en las características del nuevo material, marcando la relevancia de este parámetro geométrico.

$$E_l = V_f \sum_{i=1}^n \frac{n_i d_i^2}{\sum_{i=1}^n n_i d_i^2} E_i + V_m E_m$$

Dónde, E_l representa el módulo elástico del material compuesto, V_f se relaciona con la fracción de volumen de las fibras, n_i es el número de muestras (fibras) para i -ésimo rango de diámetro (intervalos o clases de 205 μm), d_i hace referencia al diámetro de las fibras de la clase i , del mismo modo E_i corresponde al módulo elástico de cada clase de diámetro d_i con $i=1$ al número total de clases, E_m el módulo elástico de la matriz y V_m la fracción de volumen de la matriz.

Tabla 11-2. Dependencia del diámetro de fibra de lino sobre las propiedades del compuesto final.

Class i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ni	6	44	84	136	170	143	121	83	45	25
di(um)	6,8	8,8	11,2	13,9	16,2	18,8	21,2	13,6	26,2	28,6
Ei(Gpa)	79	76	72	69	65	62	58	55	51	47
Ki(Mpa)	73	860	2530	5990	9670	10350	10520	8400	5230	3230

Fuente: (Summerscales, John et al. 2010)

La **figura 27-2** detalla la dependencia del diámetro de fibra sobre su correspondiente módulo elástico, los diagramas exhiben los resultados de ensayos experimentales mecánicos de tracción sobre las fibras naturales (lino), las gráficas ilustran la clara relación inversa, donde se tiene valores decrecientes de rigidez (eje y) al considerar rangos mayores de diámetro fibrilar (eje x).

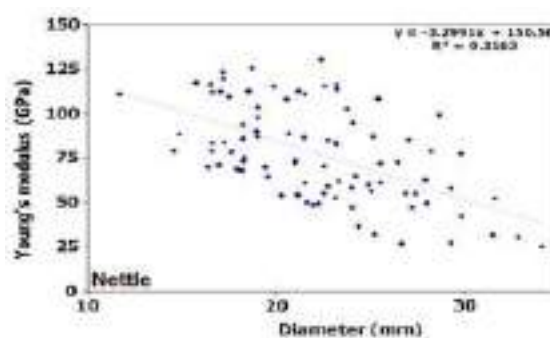


Figura 27-2. Módulo Elástico en función del diámetro de la fibra.

Fuente: (Summerscales, John et al. 2010)

La ecuación siguiente incorpora el parámetro n_d (factor de distribución de diámetro de fibra) para tomar en cuenta la distribución estadística real de los diámetros de la fibra utilizada en material compuesto, un valor de $n_d=1$ se relacionara con una distribución relativamente uniforme, mientras que valores cercanos a 0 representan una alta variabilidad, este factor empírico permite ajustar las predicciones del modelo a las propiedades mecánicas obtenidas experimentalmente en diferentes materiales compuestos reforzados con alguna fibra (Summerscales, John et al. 2010).

$$E_c = n_d n_l n_o V_f E_f + V_m E_m$$

2.2.6 *Manufactura del material compuesto*

Es imprescindible conocer el proceso de fabricación de un material bio-compuesto, este indica las ventajas y desventajas de cada técnica de construcción del material también logra cumplir las exigencias de los materiales nuevos, como por ejemplo su costo de fabricación donde el proceso indica 50% o el 60% de su total. Cabe indicar que existen diferentes procesos de fabricación de materiales compuestos y entre los más populares se encuentran la estratificación manual o al vacío, el moldeo por compresión, están sometidas a fuerzas y tensiones externas o internas (Ortiz, Pablo Daniel Mazón 2018).

2.2.6.1 *Estratificación manual*

Es una de las técnicas más populares y antigua para la fabricación de un material compuesto debido a su fácil aplicar en comparación con los demás, se puede utilizar las resinas termoestables como por ejemplo le epoxi, la poliéster y fenólicas porque presentan buena impregnación en los esfuerzos o tensiones, este proceso es realizado directamente por el trabajador, en dónde, él se encarga de colocar una base de resina y posteriormente la fibra natural, sea esta tejida o no tejida y para la compactación de estos dos elementos se puede utilizar un rodillo ver **Figura 28-2**, con ello se logra la fusión de la matriz con el refuerzo, esto se realiza para cada capa que requiere el material bio-compuesto según la aplicación para la cual fuere creado (Dávila et al., 2011).



Figura 28-2. Fabricación por estratificación manual

Fuente: (Dávila et al., 2011)

2.2.6.2 Moldeo a compresión.

Este proceso es similar al estampado por placas metálicas es decir necesita un molde macho y hembra en donde estarán sujetos por medio de pernos o tuercas tipo mariposa como se lo muestra en la **Figura 29-2**, este proceso utiliza una cantidad de material compuesto tanto de refuerzo como matriz el cual es colocado dentro del molde, se aplica una presión y calor para obtener la pieza mecánica. Si la presión es fácilmente aplicada en cada uno de los moldes a este proceso se le conoce como moldeo por compresión simple (Ortiz, Pablo Daniel Mazón 2018).

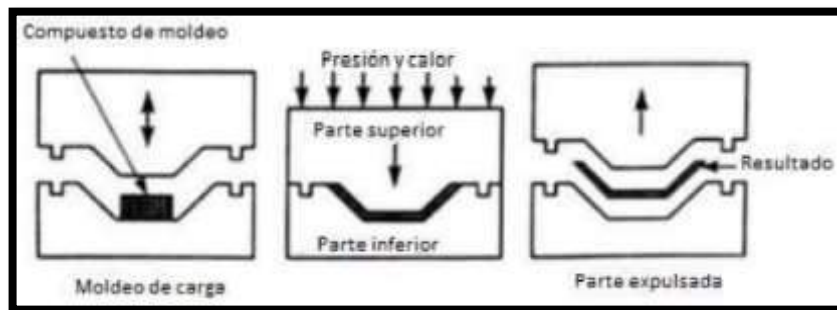


Figura 29-2. Moldeo a compresión

Fuente: (Ortiz, Pablo Daniel Mazón 2018)

2.2.7 Proceso de elaboración de un material compuesto.

Para la conformación de un material bio-compuesto se utiliza distintas etapas como por ejemplo la impregnación, laminado, consolidación y solidificación.

2.2.7.1 Impregnación

En esta etapa la resina y la fibra se unen para conformar una lámina esto se lo realiza para compactar altamente el material vídeo compuesto con el fin de que no se generen burbujas de aire ni ninguna otra imperfección, nuevo pedido en esta etapa la resina debe impregnarse o cubrir toda la fibra natural creando una envoltura, con este proceso se logra un mejor acabado y es importante indicar que la fibra no debe estar fuera de la resina (Sanipatín Silva, Angélica Maribel et al. 2022).

2.2.7.2 Laminado

En esta etapa se toma en cuenta la orientación de la fibra puede ser esta tejida o no la intención es colocar fibra y resina que han sido anteriormente pre impregnados para lograr un diseño adecuado lo cual permitirá una buena estructura del material vídeo compuesto (Sanipatín Silva, Angélica Maribel et al. 2022).

2.2.7.3 Solidificación

Esta etapa hace referencia al tiempo que tarda el nuevo material vídeo compuesto específicamente su matriz en solidificarse puede ser un tiempo menor a 1 minuto si ésta fuere termoplástica y 120 minutos si está fuera termoestable, cabe resaltar que mientras el tiempo de solidificación sea

menor mayor será la tasación de fabricación del material bio-compuesto, en la conformación del precio del nuevo material (Sanipatín Silva, Angélica Maribel et al. 2022).

2.2.8 Evaluación mecánica mediante ensayos destructivos para materiales compuestos.

Para la caracterización del nuevo material compuesto se utilizan ensayos que permitan conocer las propiedades mecánicas del nuevo material según la norma ASTM, la cual indica el proceso que debe realizarse para cada una de las pruebas destructivas, en base a lo mencionado anteriormente se referenciara para las siguientes normas, la ASTM 3039-00 que evalúa las propiedades de flexión, ASTM d 7643-07 la cual permite conocer los datos de tracción del material y la ASTM d 5628-10 que experimenta valores de absorción de energía de un impacto en un material bio compuesto.

2.2.8.1 Ensayo a flexión

Este ensayo refleja la rigidez a la flexión del material bio-compuesto, según la norma ASTM D 7264 el proceso dispone de una viga con 2 apoyos simples y una carga puntual la cual está situada en la parte central de la probeta cómo se lo indica en la **Figura 30-2**, las propiedades de flexión están sujetas a variación por el espesor de la probeta por tal razón es imprescindible cumplir los requisitos de la norma ASTM, permite calcular e módulo de ruptura (MOR) o máximo esfuerzo de la fibra externa en tensión antes de la falla, la norma provee ecuaciones para determinar las propiedades a flexión en base a las dimensiones de la probeta y la fuerza máxima soportada.

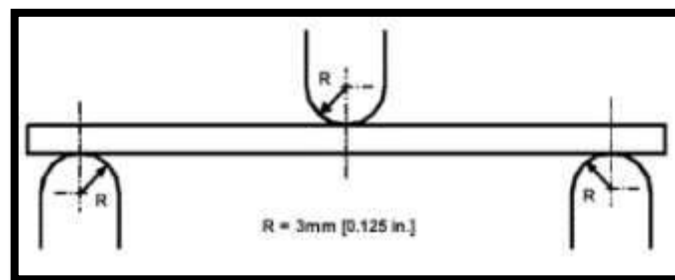


Figura 30-2. Ensayo a flexión

Fuente: (ASTM D 7264/D 7264M – 07 2007)

2.2.8.2 Ensayo a tracción

Permite conocer la fuerza estática y la resistencia que posee un material, su ensayo se basa en colocar una probeta (normalizada) a esfuerzo axial de tracción, en donde este esfuerzo va incrementando lentamente hasta lograr la rotura o falla del material compuesto con ayuda de una maquina universal u otros, se determina la resistencia de cada probeta del material compuesto, datos necesarios para la caracterización del material.

La **figura 31-2** indica la dispersión de la probeta del material compuesto para su posterior análisis en la maquina universal, así pues, la probeta es sujeta por sus extremos en cada mordaza de la

maquina universal esto se lo realiza para obtener un fijación lo más estable en la máquina y sus datos, fruto del ensayo de tracción sean lo más próximos posibles, los cuales serán reflejados en el grafico esfuerzo-deformación curva que posibilita caracterizar el comportamiento inicial, el punto de fluencia y la capacidad del material para soportar elongación plástica previo a la rotura.

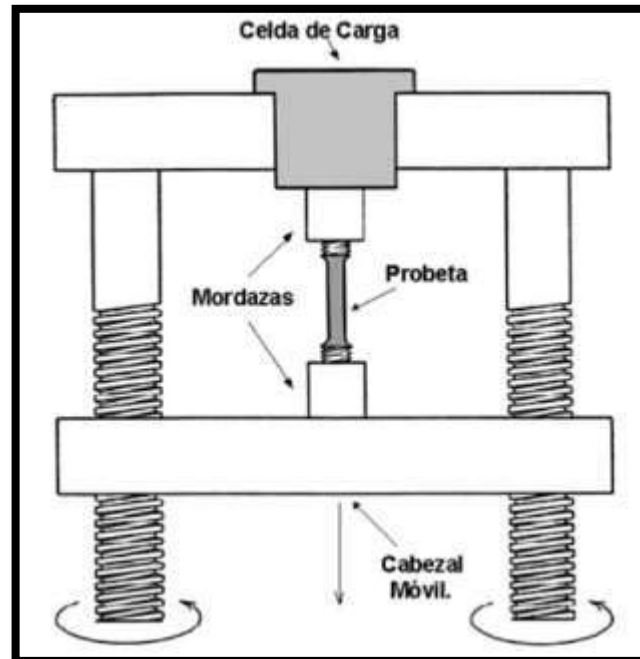


Figura 31-2. Ensayo a tracción

Fuente: (Sanipatín Silva, Angélica Maribel et al. 2022)

2.2.8.3 Ensayo de impacto

Se centra en la determinación del comportamiento de los materiales plásticos frente a impactos de baja energía utilizando una técnica de ensayo con un martillo péndulo (ASTM D5628-10), calculando la energía disipada durante la fractura por diferencia con la energía remanente del martillo. Este estándar especifica procedimientos para evaluar la resistencia al impacto de materiales plásticos rígidos bajo diferentes condiciones de ensayo, lo que resulta fundamental para comprender su comportamiento y rendimiento en aplicaciones donde se espera que enfrenten situaciones de impacto.

Este método de prueba se basa en el uso de un martillo péndulo para medir la energía necesaria para romper o agrietar especímenes planos de plástico bajo condiciones de impacto específicas como se observa en la **Figura 32-2**. Proporciona procedimientos para varias geometrías de probetas y condiciones de ensayo, como la velocidad de impacto y la configuración del equipo, lo que permite evaluar y comparar la resistencia al impacto de diferentes materiales plásticos.

El ensayo es una herramienta fundamental para la evaluación de la resistencia al impacto de materiales plásticos rígidos, proporcionando métodos estandarizados que permiten entender,

comparar y seleccionar los materiales más adecuados para aplicaciones donde existan situaciones de impacto.

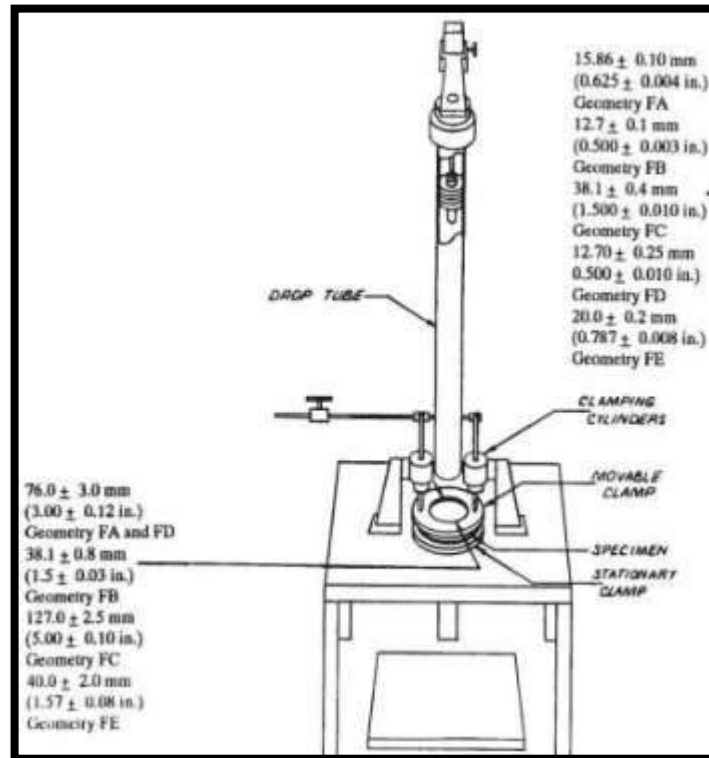


Figura 32-2. Ensayo de impacto

Fuente: Norma ASTM D5628-10

2.2.9 Simulación por métodos de elementos finitos

El método de elementos finitos (MEF) constituye una técnica numérica ampliamente utilizada para resolver problemas de ingeniería y física en diversos campos (Liu, G. R. et al. 2003). El MEF se basa en la desratización de un medio continuo en pequeños elementos individuales interconectados, con propiedades mecánicas definidas, al aplicar cargas y restricciones, y formular las ecuaciones matemáticas respectivas, es posible simular el comportamiento ante deformación, propagación de grietas, concentración de tensiones, y otros fenómenos (Liu, Wing Kam et al. 2022).

En el campo de materiales compuestos, el MEF representa una herramienta cada vez más indispensable debido a su capacidad para incorporar aspectos como anisotropía de las propiedades según orientación de los refuerzos, efectos escalares derivados del tamaño o contenido de fibras, y no linealidad en el rango plástico de la respuesta tensional deformacional (Hutton, David 2004).

2.2.9.1 Simulación de componentes y sistemas automotrices mediante MEF.

MEF se ha convertido en una opción indispensable en el diseño y desarrollo de vehículos, permite modelar virtualmente el comportamiento de componentes automotrices ante diversas condiciones

de carga, impacto y fatiga (Patel, Murlidhar et al. 2018). Las capacidades del MEF para reproducir contactos, grandes deformaciones plásticas, fisuración progresiva, efectos dinámicos y térmicos transitorios resultan especialmente valiosas, así, por ejemplo, la simulación de choques entre vehículos o con barreras rígidas mediante modelos detallados de absorción de energía optimiza el diseño de la carrocería y elementos como parachoques (Xiao, Zhi et al. 2015).

Otra aplicación relevante en la industria automotriz es el análisis tensional de componentes críticos para la seguridad como ejes de transmisión, barras estabilizadoras, rótulas y suspensiones, MEF permite identificar concentradores de esfuerzo y predecir inicio de grietas por fatiga ante cargas cíclicas representativas de la conducción (Junior, José et al. 2023). Diferentes estudios han empleado MEF para modelar y mejorar el rendimiento vibro-acústico de trenes de potencia y grupos motopropulsiones, por medio de análisis armónicos se optimizan soportes, cojinetes y uniones para atenuar vibraciones molestas y reducir emisiones de ruido hacia el habitáculo (Hou, Shujuan et al. 2012).

La barra frontal de los sistemas de parachoques cumple un rol vital en la absorción de energía durante impactos a baja velocidad, mitigando daños al vehículo y ocupantes, su diseño óptimo mediante técnicas convencionales resulta complejo y costoso, es aquí donde potentes herramientas de simulación por elementos finitos demuestran su versatilidad, permitiendo recrear colisiones frontales y laterales sobre modelos computacionales detallados del parachoques, incorporando materiales, geometrías, sujeciones y otras no linealidades en busca de maximizar la capacidad de disipación energética (Hou, Shujuan et al. 2012).

Mediante este enfoque virtual se evalúan tensiones, deformaciones plásticas, desplazamientos y modos de falla en la barra ante impactos normativos, optimizando variables como forma de la sección transversal, número y orientación de pliegues o refuerzos, sin necesidad de construir costosos prototipos físicos, el acoplamiento con algoritmos y demás funciones potencia aún más las bondades de la simulación de parachoques por elementos finitos (Sun, Guangyong et al. 2021).

2.2.9.2 Comportamiento ortotrópico en materiales compuestos con fibras naturales.

Los materiales compuestos reforzados con fibras naturales exhiben un comportamiento fuertemente anisotrópico y dependiente de la orientación direccional de los refuerzos, esta naturaleza se debe a la disposición unidireccional o en forma de láminas que adoptan las fibras celulósicas (Shah, Darshil U. 2013).

Este alineamiento confiere al material resultante un carácter ortotrópico, con propiedades mecánicas diferenciadas según los ejes principales determinados por la orientación de las fibras. Por ejemplo, la resistencia a tracción o compresión axial puede ser 4-6 veces superior que la medida en sentido transversal (Vasiliev, Valery V. et al. 2007).

El modelado computacional de compuestos con fibras vegetales mediante el método de elementos finitos requiere una cuidadosa caracterización experimental previa en las tres orientaciones principales, esto permite definir adecuadamente el tensor constitutivo para cada dirección y representar fielmente la naturaleza ortotrópica real en las simulaciones (Bunsell, A.R. et al. 1974).

La incorrecta suposición de isotropía en el material puede conducir a severos errores de precisión en las predicciones sobre tensiones, fracturas prematuras o incluso colapso ante cargas funcionales en piezas de uso estructural, es por ello que incorporar ortotropía resulta indispensable en análisis confiables por elementos finitos de materiales compuestos con fibras orgánicas.

2.2.9.3 Comportamiento isotrópico en materiales plásticos (ABS).

Los termoplásticos como el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) en su forma sólida se comportan macroscópicamente de forma isotrópica, es decir, sus propiedades elásticas y de fluencia resultan iguales en cualquier eje direccional de medición («ASM Handbook, Volume 21» 2024) sin embargo, esta naturaleza isotrópica no significa ausencia de orden estructural, sino la existencia de una simetría estadística de la microestructura. Los polímeros como el ABS poseen cadenas moleculares con segmentos orientados aleatoriamente, lo cual promedia su rendimiento mecánico en todas las direcciones (Guéguen, Yves et al. 2011), el ABS en particular exhibe un comportamiento tensión-deformación consistente sin importar el eje principal de aplicación de la carga mecánica.

El ABS puro es considerado como un material isotrópico, con igual respuesta mecánica ante sollicitaciones de tracción, compresión, flexión o torsión en cualquier eje ortogonal, esta propiedad facilita el desarrollo de modelos de simulación computacional mediante el método de elementos finitos que representen apropiadamente su comportamiento esperado ante cargas (Torres, J.P. et al. 2016).

2.2.9.4 Técnicas eficientes de elementos finitos aplicadas a impacto sobre parachoques.

El análisis de impacto mediante Explicit Dynamics resulta apropiado para eventos altamente dinámicos y no lineales como los que experimenta un parachoques automotriz durante una colisión (Barbero, Ever 2008), a diferencia de los métodos cuasi-estáticos, contempla efectos inerciales, de contacto variable, grandes deformaciones plásticas y comportamiento transitorio del material (Bessa, M. et al. 2013).

Explicit Dynamics emplea integración directa en el tiempo de las ecuaciones generales de movimiento, sin necesidad de ensamblar o invertir matrices de rigidez en cada incremento, esto lo hace muy eficiente para simulaciones con alto número de elementos y efectos locales complejos propios de impactos (Dias, Allan et al. 2021). El algoritmo es condicionalmente estable, requiriendo un ajuste cuidadoso del incremento temporal para garantizar convergencia. Se utiliza

amortiguamiento numérico y la técnica de escalado inercial para asegurar estabilidad y precisión de resultados, capturando frecuencias altas del evento transitorio (Bessa, M. et al. 2013).

Así, mediante el módulo Explicit Dynamics de ANSYS es posible recrear el choque frontal entre el péndulo impactante y la estructura del parachoques, prediciendo daños, deformaciones permanentes y otros efectos dinámicos congruentes con los ensayos experimentales.

El módulo ANSYS Composite permite generar una amplia variedad de modelos de elementos finitos 3D para materiales compuestos reforzados con partículas o fibras cortas, considerando aspectos como contenidos relativos, distribución de orientaciones y aglomeramiento (Liu, G. R. et al. 2003). Las fibras pueden distribuirse según patrones aleatorios o definidos por el usuario, permitiendo así una representación realista de la morfología del refuerzo.”

Una vez generada la geometría de modelo y malla discretizada, los diversos solvers y módulos de ANSYS facilitan la incorporación de cargas, sujeciones, contactos, no linealidades, anisotropía del material, criterios de falla, entre otros; posibilitando así la simulación avanzada del comportamiento tensional, concentración de esfuerzos, mecanismos de daño, propagación de grietas, entre otros fenómenos complejos propios de materiales compuestos sometidos a solicitaciones (ANSYS, 2023).

2.3 Marco Conceptual

- Fibra de bambú: Filamentos extraídos de los tallos de la planta de bambú, compuestos principalmente de celulosa y utilizados como refuerzo en materiales compuestos.
- Matriz polimérica: Fase continua de naturaleza polimérica que cohesiona las fibras en un material compuesto, transfiere esfuerzos y da forma al material. Puede ser termoplástica o termoestable.
- Resina epoxi: Matriz termoestable ampliamente utilizada en compuestos, que contiene grupos altamente reactivos y entrecruza formando una red tridimensional mediante la adición de un agente catalizador.
- Tejido de fibra: Entramado obtenido al entrelazar hilos o filamentos de fibras, pudiendo adoptar configuraciones como tejido plano, tejido de punto o tela sin tejer. En compuestos aporta integridad estructural.
- Péndulo de ensayo: Dispositivo consistente en un brazo metálico oscilante que aplica un único golpe de impacto con energía conocida sobre una probeta, para evaluar tenacidad de materiales frágiles.
- Ensayos mecánicos destructivos: Pruebas que someten un material a cargas o solicitaciones crecientes hasta la falla, determinando experimentalmente propiedades como resistencia máxima, módulo elástico, límite elástico, tenacidad, entre otras.

- Elementos finitos: Técnica numérica muy utilizada para modelar el comportamiento de estructuras y materiales, consistente en subdividir un medio continuo en pequeños elementos discretos con propiedades definidas, interconectados mediante nodos.

2.4 Identificación de variables

Variable Independiente

Material bio-compuesto de matriz epoxi y refuerzo de fibra de bambú.

Variable dependiente

Parachoques del automóvil

La variable independiente de presente estudio es la utilización del material bio-compuesto conformado por una matriz termostable (resina epoxi) y como refuerzo la fibra natural de bambú en la manufactura del elemento automotriz, mientras que la variable dependiente es el parachoques fabricado con el material bio-compuesto.

2.5 Operacionalización de variables.

Tabla 12-2. Operacionalización de la variable independiente.

VARIABLE INDEPENDIENTE	CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES	CRITERIO DE MEDICIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTO	ESCALA
Material bio-compuesto de matriz epoxi y refuerzo de fibra de bambú.	Es un material compuesto de dos o más componentes donde uno de ellos es un material orgánico, fibra de cáñamo, y el otro es un polímero sintético, matriz epoxi. (Ortiz, Pablo Daniel Mazón [sin fecha])	D1: % Refuerzo fibra de bambú	Curado de la Fibra	Ataque químico para mejorar propiedades mecánicas	Acabado Superficial	Ensayo de laboratorio	Microscopio	65-550 um
			Orientación	Implementación de estrategias de dirección de las fuerza para fortalecer la resistencia	Diseño Geométrico	Ensayo de laboratorio	Escuadra Regla Graduador	0-90°
		D2: % Matriz Resina Epoxi	Característica Física	Densidad	Volumen	Ensayo de laboratorio	Densímetro	1.1 ± 0.27 gr/cm ³
		D3: Propiedades Mecánicas del material bio-compuesto	Propiedades mecánicas	Ruptura Estructural	Prueba de tracción	Ensayo de laboratorio	ASTM D3039	10-80 MPa
					Prueba de Flexión	Ensayo de laboratorio	ASTM D7264	20-80 MPa
					Prueba de impacto	Ensayo de laboratorio	ASTM D5628	1.75-8.92 J
D4: Simulación de ensayos en software ANSYS	Resultados de la simulación	Daño Estructural	Simulación resistencia al impacto	Ensayos en Software ANSYS	FMVSS 581	1.75-8.92 J		

Realizado por: (Morejón H, 2024)

Tabla 13-2. Operacionalización de la variable dependiente

VARIABLE DEPENDIENTE	CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	DEFINICIÓN DE LOS INDICADORES	CRITERIO DE MEDICIÓN	TÉCNICA	INSTRUMENTO	ESCALA
Parachoques de automóvil	Significa la parte baja de la estructura exterior frontal, de un vehículo. Incluye todas las estructuras concebidas para dar protección a un vehículo en caso de un choque frontal a baja velocidad («Nte Inen 2715» [sin fecha])	D1: Seguridad Pasiva	Deformación	Daño estructural	Prueba de Flexión	Ensayo de laboratorio	Norma FMVSS 581	3-50 mm
			Energía de absorción		Prueba de impacto	Ensayo de laboratorio		250-380 J

Realizado por: (Morejón H, 2024)

2.6 Matriz de consistencia

Tabla 14-2. Matriz de consistencia

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
¿El material bio-compuesto de matriz epoxi y refuerzo de fibra de bambú puede ser una alternativa viable y sostenible para la fabricación de parachoques de automóviles, al presentar propiedades mecánicas apropiadas en términos de resistencia impacto y flexión?	Evaluar de las propiedades mecánicas de un material bio-compuesto de matriz epoxi y refuerzo de fibra de bambú, como posible aplicación en parachoques de automóviles	El material bio-compuesto de matriz epoxi y refuerzo de fibra de bambú si podría ser una alternativa viable y sostenible para la fabricación de parachoques de automóviles, al presentar propiedades mecánicas apropiadas en términos de resistencia al impacto y flexión.	Variable Independiente Material bio-compuesto Variable dependiente: Propiedades mecánicas	% Volumen fibra % Volumen Resina Orientación fibra Vacíos material compuesto Resistencia a la flexión Enlazamiento entre la matriz y la fibra	Tipo de investigación Explicativa	
FORMULACIÓN DEL PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVO ESPECIFICOS	HIPÓTESIS ESPECIFICAS	VARIABLES	INDICADORES	Metodología	
¿La generación de una estructura de material bio-compuesto basada en la revisión crítica de referencias bibliográficas previas, permite obtener el porcentaje de matriz y fibra natural deseadas para su aplicación en parachoques de automóviles?	Generar una estructura de material bio-compuesto basada en la revisión crítica de referencias bibliográficas previas, que permita obtener el porcentaje de matriz y fibra natural deseadas para su aplicación en parachoques de automóviles.	La generación de una estructura de material bio-compuesto basada en la revisión crítica de referencias bibliográficas previas, si permitirá obtener el porcentaje de matriz y fibra natural deseadas para su aplicación en parachoques de automóviles.	Variable Independiente: Estructura del material bio-compuesto. Variable Dependiente: Propiedades mecánicas del material.	Ensayos a flexión, tracción e impacto.	Observación Toma de datos Microscopía Electrónica de barrido	Probetas Ces_Edupack Precipitaciones
¿El material bio-compuesto de matriz epoxi y refuerzo de fibra de bambú tiene una resistencia al impacto, tracción y flexión adecuada para parachoques de automóviles?	Caracterizar las propiedades mecánicas de tracción, flexión y resistencia al impacto del material bio-compuesto de matriz epoxi y refuerzo de fibra de bambú.	El material bio-compuesto de matriz epoxi y refuerzo de fibra de bambú si tendrá una resistencia al impacto, tracción y flexión adecuada para parachoques de automóviles.	Variable Independiente: Clase de material compuesto Variable dependiente: Clase de refuerzo	Propiedades mecánicas del material bio-compuesto y sus componentes	Ensayo de flexión y tracción Nivel de la Investigación	Balanza Microscopio SEM Software CAD, MEF
¿La simulación del comportamiento mecánico del material bio-compuesto utilizado en el parachoques del automóvil en un ambiente estático y dinámico sustentado las especificaciones de la norma FMVSS 581, es posible utilizando software específico?	Realizar una simulación del comportamiento mecánico del material bio-compuesto utilizado en el parachoques del automóvil en un ambiente estático y dinámico sustentado las especificaciones de la norma FMVSS 581.	La simulación del comportamiento mecánico del material bio-compuesto en el parachoques del automóvil en un ambiente estático y dinámico sustentado las especificaciones de la norma FMVSS 581, si será posible utilizando software específico.	Variable Independiente: Material Bio-compuesto. Variable dependiente: Software específico	Porcentaje de reducción de peso en comparación con parachoques original. Porcentaje de mejora de la resistencia del parachoques de material bio-compuesto.	Experimental Población	Simulación MEF Parachoques de automóviles
¿La Fabricación de un parachoques delantero para el vehículo Chevrolet Family utilizando la técnica estratificación manual con un material bio-compuesto, con los requisitos de FMVSS 581 en términos de resistencia a absorción de impactos?	Fabricar un parachoques delantero para el vehículo Chevrolet Family utilizando la técnica estratificación manual con un material bio-compuesto, con los requisitos de la norma FMVSS 581 en términos de resistencia a absorción de impactos.	La Fabricación de un parachoques delantero para el vehículo Chevrolet Family utilizando la técnica estratificación manual con un material bio-compuesto, con los requisitos de la norma FMVSS 581 en términos de resistencia a absorción de impactos.	Variable Independiente: Parachoques delantero de automóvil Variable dependiente: Estratificación manual.	Deformación geométrica Energía de absorción de impacto		

Realizado por: (Morejón H, 2024)

CAPÍTULO II

3 METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo y diseño de investigación

La investigación fue de corte experimental, dado que se manipula una variable independiente como el contenido de refuerzo de fibra de bambú, para establecer su efecto sobre una medición objetiva de propiedades mecánicas dependientes como tracción, flexión o impacto. Se fabrican probetas con distintas proporciones relativas de fibra y matriz epoxi, para diversos fines de caracterización físico-mecánica y contrastación de hipótesis respecto a la influencia de esta variable sobre las prestaciones del bio-compuesto.

Dentro de las modalidades experimentales, el estudio se enmarca como una investigación transversal de alcance exploratorio descriptivo (Hernández et al., 2006), es transversal ya que el desarrollo, fabricación y caracterización de las probetas transcurre en un periodo temporal único y específico, la naturaleza exploratoria se justifica en evaluar propiedades intrínsecas y conducta de un nuevo material aún no estudiado ampliamente como lo es el bio-compuesto de bambú y epoxi para aplicaciones automotrices.

3.2 Métodos de investigación

3.2.1 Método experimental

El estudio tiene un componente experimental importante en cuanto se fabricará un prototipo a escala de parachoques automotriz mediante moldeo del bio-compuesto, sometiéndolo luego a ensayos de impacto controlado para simular colisiones frontales, se censarán variables como fuerza, deflexión y tiempo de contacto, para determinar tenacidad, rigidez y capacidad de absorción de impactos, previa validación de requerimientos normativos.

3.2.2 Método deductivo

Respecto al método deductivo, las hipótesis consideran que al reforzar la matriz con mayores fracciones de fibras de bambú orientadas en dirección del impacto, se incrementarán las propiedades del prototipo de parachoques en cuanto a tenacidad, resistencia máxima y rigidez en dicho sentido, lo cual se verificará o rechazará tras el respectivo análisis de los resultados experimentales.

Mediante un método comparativo con enfoque cuantitativo (Hernández et al., 2006), los valores experimentales de absorción energética, resistencia máxima y deformación durante el impacto del prototipo de parachoques se contrastarán frente a rangos de admisibilidad o límites estipulados según normas internacionales aplicables a parachoques para determinar su grado de cumplimiento.

3.2.3 *Matriz Morfológica*

Con la finalidad de determinar las proporciones óptimas de las fases constituyentes del material compuesto para maximizar las propiedades de interés, se planteó una matriz morfológica que interrelaciona los distintos componentes variacionales con las respuestas esperadas (Fernández, 2021). Entre los ejes de esta herramienta se definieron el contenido relativo de fibra de bambú, tratamientos superficiales, concentración y orientación, así como la dispersión u orientación de los refuerzos. En las ordenadas se establecieron las principales propiedades mecánicas relevantes para la aplicación. El análisis conjunto de efectos potenciales conduce a determinar combinaciones óptimas del sistema multicriterio.

3.2.3.1 *Criterios de evaluación*

El peritaje de las diferentes combinaciones de porcentajes tanto de fibra de bambú como de resina epoxi, selecciona criterios primordiales considerados para la relación de las diferentes configuraciones del material bio-compuesto basan su fundamento en parámetros críticos que predominan en el ejercicio del material de fabricación y sus estimaciones fueron interpretadas en ensayos experimentales bajo normas específicas.

Los criterios definidos satisfacen parámetros primordiales que experimentará la barra frontal del sistema de parachoques durante su trabajo o en un impacto frontal, han sido seleccionados mediante la consideración de estándares internacionales e investigaciones previas acerca de fallas características (Shitalkumar, Shahaji et al. 2017) en este elemento automotriz (barra frontal).

a) Resistencia a la flexión (Mpa).

Idoneidad del material de tolerar cargas o fuerzas aplicadas de forma perpendicular en relación a su eje longitudinal, denotando la capacidad de este a resistir tantas fuerzas como le sea posible antes de curvarse, este valor es imprescindible para estipular tanto la rigidez así como la capacidad estructural del material bio-compuesto (Caicedo, Isaías et al. 2020).

b) Resistencia a la tracción (Mpa).

Valor máximo del esfuerzo de tracción que tiene un material antes de alcanzar su punto de falla o ruptura, es decir, si el esfuerzo supera este valor la muestra se rompe, importante indicar que esto sucede una vez que haya superado la zona plástica del material (ASTM [sin fecha]).

c) Resistencia al impacto (J/m²).

Disposición del material para resistir a una fractura o falla cuando, este es sometido a un impacto o choque, muestra la capacidad del material para absorber energía durante un impacto, parámetro primordial para diseño de la barra frontal del parachoques la cual está sometida a golpes y colisiones (Zwick, Roell 2021).

d) Módulo de elasticidad (Gpa).

Valor que evidencia la rigidez de un material, así también, la resistencia del mismo a la deformación cuando es sometido a una carga, la importancia de este parámetro radica en la aptitud que tiene el material para regresar a su forma original o inicial después de estar supedita a una carga o fuerza superficial (Cervera, Miguel et al. 2015).

e) Deformación Máxima (%).

Característica del material, que se relaciona directamente con la zona plástica del mismo, es decir, capacidad que se representa en la deformación o alargamiento del material sin que este recupere su posición original antes de llegar al punto de fractura del material (Ramírez, Miguel 2010).

f) Densidad (g/cm³).

La densidad está relacionada con la proporción de masa que se encuentra en cada unidad de volumen de un material o elemento, por lo que, es imprescindible para coadyuvar a la ligereza de la barra frontal del sistema de parachoques (Baez, Jorge Mauro 2015).

g) Costo (\$/kg).

Relaciona los parámetros económicos y de fabricación para llevar a cabo su construcción masiva, por lo que se inclina por materiales de bajo coste (Sanipatín Silva, Angélica Maribel et al. 2022).

h) Sostenibilidad Ambiental.

Figura relacionada con el proceso de obtención de la fibra de bambú y el impacto en el medio ambiente de aquellos materiales que se usan para la obtención del material bio-compuesto (resina epoxi), así pues, su importancia se centra en conocer el cómo estos materiales (fibras y resinas) influyen de forma negativa al ambiente teniendo en cuenta su ciclo de vida útil, su reciclabilidad y la biodegradabilidad (Gilbert, Marianne 2017).

3.3 Enfoque de la investigación

Respecto a la naturaleza de los datos, la investigación se aborda desde un enfoque cuantitativo (Hernández et al., 2006), dado que una porción importante de la evidencia recolectada consiste en valores numéricos de propiedades mecánicas como módulo de elasticidad, resistencia máxima, tenacidad al impacto, entre otros. Dichos descriptores del comportamiento mecánico del bio-compuesto permiten un análisis estadístico, correlacional y cuantificar diferencias entre las formulaciones estudiadas.

Los resultados obtenidos de los ensayos se supeditaron a un estudio profundo y más detallado cuestionando cada criterio definido, su interpretación y evaluación origino una visión completa del comportamiento entre el material bio-compuesto y los criterios instaurados, se empleó estos

resultados en la aplicación de una matriz morfológica la misma que admitió una relación entre los criterios y una ponderación de cada combinación, también permitiendo el escogimiento de la combinación adecuada para el material bio-compuesto y su aplicación en el área automotriz.

3.4 Alcance de la investigación

Al ser un material aún poco estudiado en esta aplicación particular, el trabajo adquiere un matiz exploratorio, indagando experimentalmente en el desempeño del innovador bio-compuesto de bambú/epoxi al ser sometido a rigor que implica la función de un parachoques automotriz, contrastando con los requerimientos y normas aplicables, como punto de partida para investigaciones futuras enfocadas en la posible sustitución de materiales sintéticos por otros de origen renovable (Montero y León, 2014).

Surge un alcance correlacional al pretender dimensionar analíticamente los respectivos efectos que variables como contenido relativo de fibra, tratamiento superficial o curado ejercen sobre propiedades tensionales determinadas experimentalmente como tenacidad, resistencia o absorción energética; estableciendo así relaciones causa-efecto cuantitativas que expliquen el comportamiento mecánico del material compuesto en la aplicación como parachoques.

3.5 Población de estudio

La población se definirla como el conjunto de unidades de análisis que se pretende estudiar y sobre el cual se busca establecer conclusiones (Bernal, 2006). En este caso puntual, la población involucrada consiste en muestras fabricadas con el material compuesto bajo estudio, incluyendo tantas probetas mecánicas estándar destinadas a la caracterización tensional, así como el prototipo a escala con geometría básica tipo parachoques automotriz que se elaborará y someterá a ensayos de impacto. Se variarán formulaciones relativas de fibra y matriz sobre estos elementos de prueba. Opcionalmente también podrían abarcarse muestras comerciales de parachoques convencionales como grupos de control o comparación con propiedades validadas

3.6 Unidad de análisis

La unidad de análisis se define como los elementos mismos que conforman la población a estudiar (Bernal, 2006). En el presente estudio experimental, la unidad de análisis resulta ser cada probeta individual fabricado con el material compuesto de refuerzo de fibra de bambú en una matriz de resina epoxi, destinado a la caracterización de propiedades mecánicas.

3.7 Selección de la muestra

Dado que resulta materialmente improbable considerar a toda la población objetivo disponible, se define un subconjunto representativo denominado muestra (Bernal, 2006). En esta ocasión, la muestra tentativa quedaría constituida por 36 probetas mecánicas standard en configuración de 4

repeticiones por cada formulación de bambú-epoxi con 4 % relativos de refuerzo distintos; sometidas a ensayos destructivos de tracción, flexión e impacto guiados por normas ASTM D3039, D7264 y D5828 respectivamente. Se añadiría también una muestra intencional de un único prototipo de parachoques elaborado con el bio-compuesto optimizado, sujeto igualmente a ensayos dinámicos de impacto según normas específicas para parachoques. La selección de esta muestra permite evaluar las propiedades mecánicas del material compuesto de bambú-epoxi en diferentes condiciones de carga, así como su comportamiento en una aplicación real como un parachoques.

3.8 Tamaño de la muestra

Para facilitar la construcción de cada una de las probetas para cada ensayo (flexión, tracción e impacto), se trabajó en grupo de 4 probetas por cada combinación de porcentajes y para cada ensayo, es decir, 4 probetas con un 25 % de fibra de bambú y 75% de resina epoxi para en ensayo de tracción, así mismo 4 probetas para la combinación de 30% y 70% respectivamente para el mismo ensayo, la **Tabla 15-3** indica la cantidad de probetas ensayadas con su respetiva configuración de capas de fibra, combinación y la norma que se aplica para cada grupo de muestras, las normas de ensayo corresponde a la American Society for Testing and Materials (ASTM).

Tabla 15-3. Cantidad de probetas para los ensayos

Grupo de 4 probetas	% fibra de resina epoxi	% fibra de bambú	Norma de ensayo ASTM	Configuración de capas de fibra
1 Tracción	75	25	D3039-00	Capa 1: Tejida
2 Tracción	70	30	D3039-00	Capa 1: Tejida Capa2 : Longitudinal
3 Tracción	60	40	D3039-00	Capa 1: Tejida Capa2: Longitudinal Capa 3: Tejida
1 Flexión	75	25	D7264-07	Capa 1: Tejida
2 Flexión	70	30	D7264-07	Capa 1: Tejida Capa2 : Longitudinal
3 Flexión	60	40	D7264-07	Capa 1: Tejida Capa2: Longitudinal Capa 3: Tejida
1 Impacto	75	25	D5828-10	Capa 1: Tejida
2 Impacto	70	30	D5828-10	Capa 1: Tejida Capa2 : Longitudinal
3 Impacto	60	40	D5828-10	Capa 1: Tejida Capa2: Longitudinal Capa 3: Tejida

Realizado por: (Morejón H, 2024)

3.9 Técnicas de recolección de datos primarios y secundarios

3.9.1 Técnicas de generación de información primaria

La tesis por su carácter experimental involucra la generación de datos primarios originales, recolectados en primera instancia por el propio investigador (Bernal, 2006). Las técnicas aplicables son los ensayos mecánicos destructivos sobre las muestras de bambú/epoxi, registrando mediciones físicas directas de respuesta tensional como fuerza, deformación, energía absorbida. También el modelado por elementos finitos constituye una técnica primaria al simular digitalmente el comportamiento, la instrumentación como máquinas universales y simuladoras computarizadas representan las herramientas para esta compilación original de información cuantitativa.

3.9.2 Técnicas de recopilación de información secundaria

Adicionalmente, la investigación requiere consultar y recopilar antecedentes, teorías y normas técnicas previamente publicadas en medios especializados, como parte de la información secundaria relevante (Bernal, 2006). Esta proviene de fuentes externas ya existentes, siendo igualmente válida dentro del proceso investigativo al establecer estado del arte, requerimientos regulatorios y comparaciones técnicas. Las técnicas empleadas abarcan la búsqueda en bases de datos científicas y normas técnicas estandarizadas sobre materiales y componentes automotrices.

3.10 Instrumentos de recolección de datos primarios y secundarios

3.10.1 Materiales

Se detalla los materiales usados en el proceso de fabricación del material bio-compuesto, el cual basa su estructura final en dos principales componentes resina epoxi y fibra de bambú.

3.10.1.1 Fibra de Bambú

Para el refuerzo de material bio-compuesto se utilizó fibra natural de bambú, esta fibra renovable posee excelentes propiedades mecánicas, es ligera y un bajo coste la cual se configura con un tejido plano y horizontalmente en función del eje longitudinal para formar laminas que se usan en la construcción del material bio-compuesto (Estrada, Mejia, Martin 2009).

La **Figura 33-3** muestra las diferentes presentaciones de la fibra, su origen se encuentra dentro de la planta de bambú, luego esta se extrae mecánicamente para obtener la fibra natural, después fue tejida por medio de un telar (tejido plano) para su posterior uso como refuerzo en el material bio-compuesto, la fusión de fibra-matriz que se conforme permitirá conocer en buena parte las características finales del nuevo material bio-compuesto, por lo que la disposición de las fibras tiene un papel primordial para acrecentar las propiedades de resistencia y rigidez (Sanipatín Silva, Angélica Maribel et al. 2022).



Figura 33-3. Presentación de la Fibra de Bambú

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.1.2 Resina Epoxi

La resina termoestable se utiliza como matriz componente esencial en la fabricación de materiales compuestos, actúa como agente adherente que une y refuerza las fibras de bambú (Sanipatín Silva, Angélica Maribel et al. 2022). Al combinarse con la fibra, la resina epoxi forma una matriz que imparte resistencia estructural al material final.



Figura 34-3. Resina Epoxi Cretonbond 52YN

Fuente: (Morejón H, 2024)

En este caso de investigación se ha seleccionado la resina Epoxi CRETONBOND 52YN **Figura 34-2**, la cual ofrece una serie de cualidades deseables para este propósito de parachoques automotriz, como su capacidad de adhesión, resistencia a diversos agentes externos, tales como la humedad, solventes y productos químicos, así como su capacidad para formar películas duras y resistentes (Gibson, Geoff 2017).

La combinación de la resina epoxi con la fibra de bambú puede mejorar significativamente las propiedades mecánicas del material compuesto, como la resistencia a la tracción, la flexión y la durabilidad lo que lo hace útil en aplicaciones donde se requiere una alta resistencia y rigidez.

La resistencia de la resina epoxi a la humedad y a varios productos químicos proporciona al material compuesto una mayor durabilidad y estabilidad dimensional, características adecuadas para su uso en entornos expuestos a condiciones adversas (Gibson, Geoff 2017), los materiales compuestos de fibra de bambú con resina epoxi pueden ser moldeados en diversas formas y aplicados en una amplia gama de industrias, como la construcción, la fabricación de piezas estructurales, la industria automotriz, entre otras, el **ANEXO A** indica las principales propiedades mecánicas de la resina epoxi cretonbond 52YN.

3.10.1.3 Cera desmoldante

Se trata de una sustancia cerosa, a menudo compuesta por una mezcla de ceras naturales, sintéticas o una combinación de ambas, y otros aditivos que le confieren propiedades específicas. La principal función de la cera desmoldante es evitar que los materiales utilizados para el moldeo se adhieran a la superficie del molde o matriz durante el proceso de curado o solidificación (Berins, Michael L. 1991).



Figura 35-3. Cera Desmoldante

Fuente: (Morejón H, 2024)

La cera desmoldante se aplica en las superficies internas de los moldes o matrices antes de verter o inyectar el material a moldear. Al aplicar una capa delgada y uniforme de esta cera, se crea una barrera entre el material y el molde, lo que facilita la separación sin dañar la pieza ni el molde. Esta acción permite obtener productos moldeados con una calidad superficial óptima y reduce significativamente el riesgo de defectos o daños en las piezas durante el proceso de desmolde, por lo cual se utiliza la cera desmoldante autocare **Figura 35-3** que cumplen con lo mencionado anteriormente.

3.10.2 Tratamiento superficial de la fibra de bambú

Con el propósito de mejorar la adherencia fibra-matriz, los filamentos de bambú fueron sometidos a un tratamiento alcalino por inmersión en una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH) al

5% w/v a temperatura ambiente por 4 hora (Ravi, M et al. 2018). Este proceso busca la remoción selectiva de componentes como lignina y hemicelulosas, exponiendo la celulosa y aumentando así la rugosidad superficial de las fibras para potenciar el anclaje mecánico este proceso se lo observa en la **Figura 36-3**. La cantidad de NaOH se calcula mediante la ecuación,

$$mNaOH = C \times V \times PM$$

Dónde:

mNaOH: masa de NaOH (g)

C: Concentración de la disolución (% peso/volumen)

V: Volumen de disolución (L)

PM: Peso molecular NaOH = 40 g/mol



Figura 36-3. Tratamiento de la fibra en hidróxido de sodio

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.3 Elaboración de probetas

Para la fabricación de las muestras o probetas que se utilizaron para los ensayos de flexión, tracción e impacto se cumplió con los requerimientos de las normas ASTM para avalar la precisión y el análisis de los resultados.

3.10.3.1 Dimensionamiento de probetas

a) Tracción, para la obtención de la geometría de las probetas de tracción se tomó como base la norma ASTM E3039-00, en donde se considera lo siguiente,

- Longitud = 250 mm
- Ancho = 25 mm
- Espesor = 2,5 mm

b) Flexión, así mismo para las dimensiones de las probetas de flexión la norma ASTM D7264-07 pone en consideración lo siguiente.

- Longitud = 160 mm

- Ancho = 13 mm
 - Espesor = 4 mm
- c) **Impacto**, para la fabricación de las probetas para el ensayo de impacto se tuvo como prioridad la norma ASTM D562810 en donde menciona lo siguiente,
- Longitud = 58 mm
 - Ancho = 58 mm
 - Espesor = 6 mm

3.10.3.2 Preparación de moldes

La construcción del molde para las probetas utilizó un material de tipo madera con cavidades macho y hembra según geometrías y dimensiones especificadas en normas ASTM que soporte una temperatura igual o mayor a 150 °C (Ponce, Diego Sebastián Ponce 2011), las disposición de las muestra en el molde fue de 5 probetas por cada grupo con el fin de escoger las mejores probetas para los ensayos con número total de 4, se fabricó un molde tipo macho hembra que contenga la cantidad total de las muestras (60 probetas).

Es imprescindible denotar que la normativa ASTM para sus diferentes ensayos menciona que se debe tener un mínimo de 4 y un máximo de 5 de muestras o probetas (Sanipatín Silva, Angélica Maribel et al. 2022), acatando lo requerido se seleccionó los mejores guapos de 4 probetas para cada ensayos descrito (flexión, tracción e impacto).

Se procedió a la construcción del molde con los requisitos definidos, así también se dispuso la ubicación geométrica de cada grupo de probetas descrito en la figura del plano, se definió la distribución de los tronillos de fijación para la unión de macho hembra como se muestra en la **Figura 37-3**, del mismo las superficies internas se sellaron aplicando 5 capas de laca para obtener un acabo liso y sin ninguna porosidad.



Figura 37-3. Construcción del molde para probetas

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.3.3 Formulación de probetas de ensayo

Se realizó el cálculo de la masa tanto de la fibra de bambú como de la resina partiendo de la fórmula de la densidad con el siguiente proceso,

$$\rho = m/V$$

$$m = \rho * V$$

Dónde,

ρ = densidad del material sea este fibra o resina

ρ fibra de bambu = 1,4 g/cc

ρ resina = 1,10 g/cc

m = masa

V = volumen

De esta manera se obtiene la masa en gramos de los componentes del material bio-compuesto (fibra de bambú, resina epoxi).

La **Tabla 16-3** muestra las cantidades de masa en gramos para las diferentes combinaciones del material bio-compuesto y su aplicación en el molde fabricado, se indica tanto para la combinación 75% - 25%, la 70% - 30% y la configuración 60% - 40% de fibra orgánica de bambú y resina epoxi respectivamente.

Tabla 16-3. Porcentaje de fibra de bambú y resina epoxi

Probetas ensayo a tracción					
	1 probeta	5 probetas	75 % de 5 probetas	60% de 5 probetas	70% de 5 probetas
Volumen (cc)	15,63	78,13	58,60	46,88	54,70
Masa resina (g)	17,19	85,97	64,46	51,56	60,17
Masa fibra (g)	21,82	109,38	27,34	43,75	32,80
Probetas ensayo a flexión					
	1 probeta	5 probetas	75 % de 5 probetas	60% de 5 probetas	70% de 5 probetas
Volumen (cc)	8,32	41,6	31,2	24,96	29,12
Masa resina (g)	9,15	45,76	34,32	27,46	32,02
Masa fibra (g)	11,65	58,24	14,56	23,3	17,47
Probetas ensayo a impacto					
	1 probeta	5 probetas	75 % de 5 probetas	60% de 5 probetas	70% de 5 probetas
Volumen (cc)	20,18	100,92	75,69	60,55	70,64
Masa resina (g)	22,19	101,30	83,26	66,60	77,70
Masa fibra (g)	28,52	141,28	35,32	56,51	42,39

Realizado por: (Morejón H, 2024)

3.10.3.4 Aplicación de cera desmoldante

Realizada la limpieza del molde para la fabricación de probetas, las caras internas del molde se impregnaron con cera desmoldante entre 5 a 6 veces con guaipe de hilo para lograr una distribución uniforme en la superficie de trabajo y por ser la primera vez que se utiliza el molde, este proceso se lo conoce como curado de moldes **Figura 38-3**, con la cera en la superficie se debe pulir la misma hasta conseguir un brillo diferente al original de la superficie como se lo evidencia en la figura 25, luego después se debe tener un tiempo de secado entre 3 y 4 horas, la cera actúa como agente liberador para facilitar la extracción de las muestras moldeadas (Sanipatín Silva, Angélica Maribel et al. 2022).

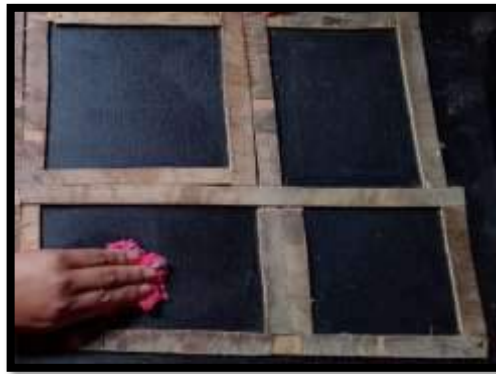


Figura 38-3. Aplicación de cera desmoldante

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.3.5 Preparación del material bio-compuesto.

Las fibras de bambú se cortaron y mezclaron con la resina epoxi sucediendo la proporción de disposición para cada grupo de probetas **Tabla 16-3**, donde la aplicación estratégica de los componentes ejerce una misión primordial en el desarrollo del material bio-compuesto. La fibra de bambú fue cuidadosamente colocada en el molde con el fin de establecer una configuración uniforme y homogénea en la superficie de trabajo, se empleó una balanza electrónica (Truper Modelo BASE-5EP) para garantizar que se cumplan los valores (masa) de la fibra de bambú y resina epoxi (**Figura 26**).



Figura 39-3. Balanza electrónica

Fuente: (Morejón H, 2024)

La resina epoxi, siendo el material adherente fue aplicada con exactitud para garantizar una infiltración total de la fibra de bambú y, de este modo, lograr la fusión correcta de los materiales, este controlado emplazamiento se base el correcto manejo de las diferentes condiciones, detalladas en la **Tabla 17-3**, para garantizar la integridad estructural y las propiedades mecánicas del nuevo material bio-compuesto.

Tabla 17-3. Preparación y condiciones de resina epoxi

Parámetros de preparación de la resina epoxi		
Parámetro	Descripción	Valor
Proporción de resina y catalizador	Avalar las cantidades correctas de resina y catalizador para lograr una mezcla homogénea	4 porciones de resina y 1 porción de catalizador
Tiempo de mezcla	Controlar el tiempo adecuado para que los componentes tenga una mezcla completa	20 minutos
Temperatura	Comprobar la temperatura de la mezcla, para llegar a su estado de fusión óptimo	20 °C
Humedad	Examinar los parámetros ambientales y la humedad del molde para su posterior curado	50% de Humedad relativa
Método de aplicación	Aplicar primero la capa de resina en el molde, luego las capas de fibra según sea el caso y por ultimo otra capa de resina de forma homogénea para una favorable adhesión de los elementos.	Por capas e impregnación por brocha o rodillo
Curado	Instaurar temperatura y tiempos necesarios para el curado del material bio-compuesto	24 °C

Realizado por: (Morejón H, 2024)

La aplicación de la resina epoxi en el molde se realizó mediante una brocha que impregna toda la superficie y la distribución es uniforme, imprescindible mencionar que una vez que el tiempo de mezcla se ha cumplido, la temperatura comienza a incrementarse momento exacto para la aplicación de la resina sobre el molde con el método de aplicación descrito en la **Tabla 17-3**, con la mezcla de resina epoxi y fibra de bambú se sitió la tapa o molde hembra para cumplir con el curado del nuevo material bio-compuesto, la **Figura 40-3** muestra las distintas etapas para conseguir el nuevo material se observa una mezcla homogénea de resina y fibra con un color café característico de esta, así también el emplazamiento de resina y fibra en el molde para posteriormente colocar el molde hembra.

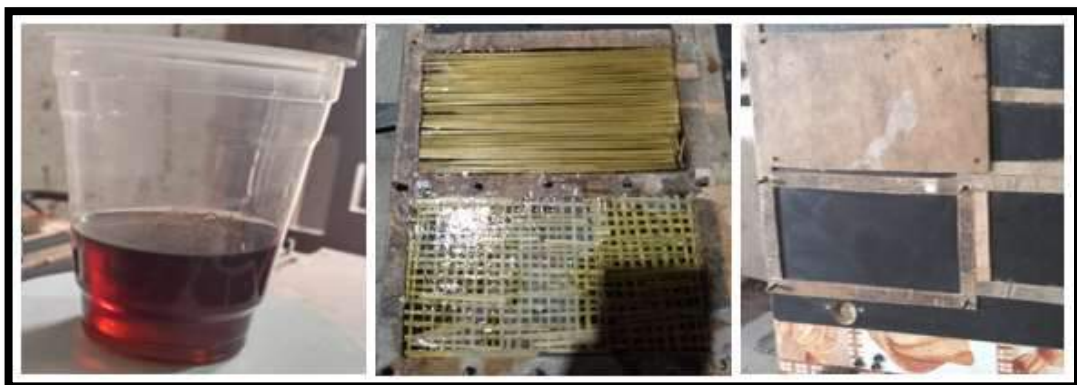


Figura 40-3. Etapas de fabricación del material bio-compuesto

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.3.6 Desmolde y corte

Después de cumplido con el tiempo de curado de las probetas, se extrajo cada una de las muestras sólidas del molde, para conseguir las dimensiones de cada probeta para los ensayos (flexión, tracción e impacto) se utilizó un corte mediante un maquina CNC laser por su precisión al momento del corte y porque este método no desprende el material, la **Figura 41-3** indica los diferentes grupos de probetas para los ensayos definidos.

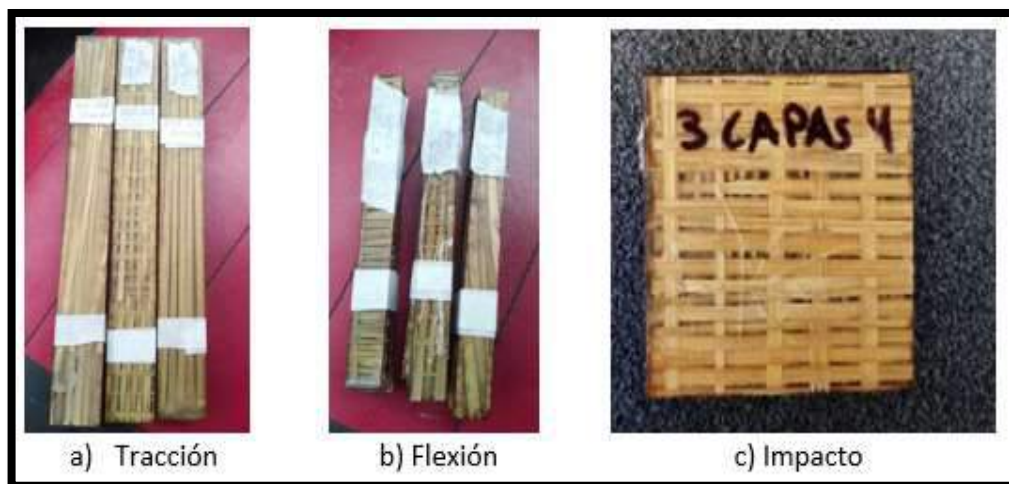


Figura 41-3. Grupo de probetas con el material bio-compuesto

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.4 Caracterización del material bio-compuesto

La caracterización del material bio-compuesto se basa en ensayos de laboratorios según normas ASTM (flexión, tracción e impacto) para las distintas combinaciones de y configuraciones de fibra de bambú y resina epoxi, los resultados obtenidos están relacionados directamente con los criterios de evaluación, las probetas fabricadas fueron sometidas a los siguientes ensayos normalizados.

3.10.4.1 Ensayo a tracción (ASTM D3039) de probetas normalizadas.

- Determina las propiedades mecánicas del material respecto a fuerzas axiales de las cuales resultan esfuerzos de tensión.
- Se empleó una maquina universal de ensayos con una carga de 20 toneladas y velocidad de ensayo de 1mm/min.
- Los parámetros obtenidos son esfuerzo o tensión máxima (MPa), porcentaje de deformación máxima (%) y módulo elástico (GPa).
- Se aplicó una precarga inicial de 100N y luego se fue incrementando la fuerza gradualmente lo que genera seguidamente un aumento de la longitud de la probeta, hasta que la misma llegue a su punto máximo.
- En ensaya finalizó con la fractura de la probeta.

Configuración 60% de resina epoxi y 40% de fibra de bambú

Tabla 18-2. Valores cuantitativos del ensayo a tracción (60% - 40%)

#		Identificación de probeta	Temp (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Desplazamiento mm	Tensión Máxima (Mpa)	Módulo Elástico (GPa)	% Deformación máxima
					Ancho	Espesor					
1	2	3	4	17.0	25,00	4,50	5523,7700	3,41799	44,1902	4,03937	2,13624
2	3	4	4896,7700				2,57073	39,1741	5,71305	1,60670	
3	4	5	6578,8900				2,52543	52,6311	6,21125	1,57839	
4	5	6	5919,9100				4,38933	47,3593	2,17676	2,74333	
Promedio							5729,835	3,226	45,839	4,535	2,016
Mediana							5721,840	2,994	45,775	4,876	1,871
Desviación estándar							705569	0,878	5,645	1,826	0,548
Coefficiente de variación							0123	0,272	0,123	0,403	0,272
Máximo							6578,890	4,389	52,631	6,211	2,743
Mínimo							4896,770	2525	39,174	2,177	1,578
Rango							1683,120	1,864	13,457	4,034	1,165

Realizado por: (Morejón H, 2024)

Como se detalla en la **Tabla 18-2**, los valores de resistencia a la tracción para la combinación 60% - 40% representan un rango entre 39,17 y 52,63 MPa para la tensión máxima, obteniendo un promedio de 45,83 MPa. La deformación máxima se encuentra entre 1,57 y 2,47%, así también el módulo de elasticidad está entre 2,1 y 6,2 GPa, se observa una mayor dispersión de resultados en la tensión máxima y la deformación respecto al módulo. Po medio de un análisis estadístico, el coeficiente de variación alcanza un 27,2%, 12,3% y 40,3% para la tensión máxima, deformación máxima y módulo elástico respectivamente, indicando una heterogeneidad regular entre las probetas ensayadas.

Tabla 19-3. Valores cuantitativos de Ensayo de tracción (70% - 30%)

#		Identificación de probeta	Temp (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Desplazamiento mm	Tensión Máxima (Mpa)	Módulo Elástico (GPa)	% Deformación máxima
					Ancho	Espesor					
1		70% - 30% - 1	17	54.35	25,00	4,50	4355,8100	2,51063	38,7183	3,78110	1,56914
2		70% - 30% - 2			25,00	4,50	3425,1500	1,69308	30,4457	2,45113	1,69308
3		70% - 30% - 3			25,00	4,50	4545,4600	2,41164	40,4041	2,42433	2,41164
4		70% - 30% - 4			25,00	4,50	4700,7800	2,38351	41,7847	2,56085	2,38351
		Promedio				4256,800	2,250	37,838	2,804	2,014	
		Mediana				4450,635	2,398	39,561	2,506	2,038	
		Desviación estándar				572,098	0,375	5,085	0,654	0,446	
		Coefficiente de variación				0,134	0,167	0,134	0,233	0,221	
		Máximo				4700,780	2,511	41,785	3,781	2,412	
		Mínimo				3425,150	1,693	30,446	4,424	1,569	
		Rango				1275,630	0,818	11,339	1,357	0,843	

ANEXOS FOTOGRAFICOS

Realizado por: (Morejón H, 2024)

Las cantidades de caracterización a tracción contenidos en la **Tabla 19-3** demuestran una resistencia máxima entre 30,44 y 41,78 MPa, con una media de 37,83 MPa, para la combinación de 70% de matriz epoxi y 30% de fibra natural de bambú.

La deformación unitaria máxima, se identificó un rango de 1,56 a 3,41 %, significativamente menor al límite elástico del material. El módulo de elasticidad varía entre 2,42 y 3,78 GPa según la probeta analizada.

Se denota cierta dispersión en resultados de tensiones y alargamiento entre las probetas, con coeficientes de variación moderados del 13,4 % y 22,1% respectivamente, por otro lado, la consistencia del módulo elástico resulta mayor, con solo un 23,3% de variabilidad.

Tabla 20-3. Valores cuantitativos de ensayo de tracción (75% - 25%)

#		Identificación de probeta	Temp (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Desplazamiento mm	Tensión Máxima (Mpa)	Módulo Elástico (GPa)	% Deformación máxima
					Ancho	Espesor					
1	75% - 25% - 1	17	54,35	25,00	4,50	4406,6100	2,46898	35,2529	1,96131	2,46898	
2	75% - 25% - 1			25,00	4,50	5157,8800	3,16284	41,2630	2,08621	3,16284	
3	75% - 25% - 1			25,00	4,50	4785,1600	3,48184	38,2813	1,84411	3,48184	
4	75% - 25% - 1			25,00	4,50	4144,4300	3,41266	33,1554	1,81602	3,41266	
Promedio						4623,520	3,132	36,988	1,927	3,132	
Mediana						4595,885	3,288	36,767	1,903	3,288	
Desviación estándar						442,811	0,462	3,542	0,123	0,462	
Coefficiente de variación						0,096	0,148	0,096	0,064	0,148	
Máximo						5157,880	3,482	41,263	2,086	3,482	
Mínimo						4140,430	2,469	33,155	1,816	2,469	
Rango						1013,450	1,013	8,108	0,270	1,013	

ANEXOS FOTOGRAFICOS

Realizado por: (Morejón H, 2024)

Los resultados contenidos en la **Tabla 20-3** evidencian un rango de 33,15 a 41,26 MPa en la tensión máxima soportada antes de la fractura de las probetas del material bio-compuesto con 75% de resina y 25% de fibra de bambú, su promedio esta 36,98 MPa, ligeramente inferior a la combinación de 70% - 30%. La deformación máxima varía entre valores de 2,4 y 3,41 % solamente entre las distintas probetas ensayadas, siendo incluso menos dispersos (coeficiente de variación de 14,8%) que en los casos previos.

El módulo elástico se ubica principalmente entre 1,96 y 2,08 GPa según la probeta considerada. Así, la configuración 75% - 25% presenta consistencia en las respuestas, pero rigidez y resistencias levemente menores que otras combinaciones como la 70% -30%, la cual podría aproximar un mejor balance de propiedades mecánicas.

3.10.4.2 Ensayo de Flexión (ASTMD D7264) de probetas normalizadas

- Determina el comportamiento del material bio-compuesto frente a las cargas perpendiculares a su eje lo que provoca la flexión.
- Se empleó una maquina universal de ensayos con una carga de 5 toneladas y una velocidad transversal de ensayo de 10 mm/min.
- Los parámetros obtenidos son, Esfuerzo máximo (MPa), Porcentaje de deformación máxima (%) y módulo de elasticidad (GPa).
- Se aplicó una precarga de 10N y se acrecentó progresivamente observando el aumento en la deformación.

Tabla 21-3. Valores cuantitativos del ensayo de flexión (60% - 40%).



#		Identificación de probeta	Temp (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Desplazamiento mm	Tensión Máxima (Mpa)	Módulo Elástico (GPa)	% Deformación máxima
					Ancho	Espesor					
1		60% -40% 1	21,3	57,1	12,70	5,00	118,8910	3,69321	35,9481	3,44990	2,70499
2		60% -40% 2			12,70	5,00	281,3180	4,04907	85,0599	6,01172	2,96563
3		60% -40% 3			12,70	5,00	215,5540	2,81243	65,1754	5,68136	2,05989
4		60% -40% 4			12,70	5,00	250,3000	3,58492	75,6813	5,68136	2,62567
Promedio							216,516	3,535	65,466	5,206	2,589
Mediana							232,927	3,639	70,428	5,681	2,665
Desviación estándar							70,409	0,521	21,289	1,181	0,381
Coeficiente de variación							0,325	0,147	0,325	0,227	0,147
Máximo							281,318	4,049	85,060	6,012	2,966
Mínimo							118,891	2,812	35,948	3,450	2,060
Rango							162,427	1,237	49,112	2,562	0,906

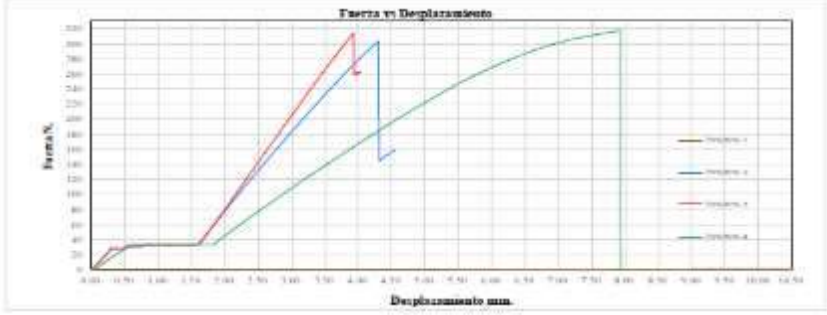
ANEXOS FOTOGRAFICOS

Realizado por: (Morejón H, 2024)

Los datos cuantitativos de la **Tabla 21-3** revelan un rango de 35,94 a 85,05 MPa en la tensión máxima soportada a flexión por las muestras del material bio-compuesto con 60% de termoplástico como matriz y 40% de fibras naturales. Se aprecia mayor variabilidad entre las probetas, con desviación estándar de 21,28 MPa respecto a la media de 65.46MPa calculada. La deformación máxima antes de la fractura se ubica entre 2,05 y 2,96%, mientras que el módulo elástico a flexión varía entre 3,44 y 6,01 GPa dependiendo de la probeta, por otro lado, el coeficiente de variación alcanza 32,5, 14,7 y 22,7% para tensión máxima, deformación máxima y módulo respectivamente. Comparando frente al material 70% - 30%, ésta combinación 60% - 40% muestra menores resistencias y rigidez ante cargas perpendiculares, que podrían comprometer su utilización en aplicaciones de alto desempeño a flexión.



Tabla 22-3. Valores cuantitativos del ensayo de flexión (70% - 30%).

		 								
DATOS DEL CLIENTE				DATOS INFORMATIVOS						
Empresa / Cliente:		Henry Geomat Morejón Uchubanda		Laboratorio: Resistencia de Materiales		Método de ensayo: ASTM D7264-07				
Fecha de Inicio:		22-Dec-2023		Designación del material: Material bio-compuesto de fibra de bambú y resina epoxi						
#	Identificación de probeta	Temp (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Desplazamiento mm	Tensión Máxima (Mpa)	Módulo Elástico (GPa)	% Deformación máxima
				Ancho	Espesor					
1	70% - 30% 1	21,3	51,7	12,70	5,00	297,4510	8,42490	89,9379	2,97179	6,17058
2	70% - 30% 2			12,70	5,00	303,6660	4,30748	91,8171	4,68348	3,15489
3	70% - 30% 3			12,70	5,00	314,3950	3,92632	95,0612	5,24877	2,87572
4	70% - 30% 4			12,70	5,00	317,6050	9,89908	96,0317	2,59650	7,25030
Promedio						308,279	6,639	93,212	3,875	4,863
Mediana						309,031	6,366	93,439	3,828	4,663
Desviación estándar						9,361	2,978	2,831	1,290	2,181
Coefficiente de variación						0,030	0,449	0,030	0,333	0,449
Maximo						317,605	9,899	96,032	5,249	7,250
Minimo						297,451	3,926	89,938	2,596	2,876
Rango						20,154	5,973	6,094	2,652	4,357



El gráfico muestra la relación entre la fuerza aplicada (en Newtons) y el desplazamiento (en milímetros) para cuatro probetas diferentes. Las curvas muestran un comportamiento elástico inicial, seguido de un punto de máxima tensión y una posterior fractura. El eje Y (Fuerza N) va de 0 a 3000, y el eje X (Desplazamiento mm) va de 0,000 a 12,500.

ANEXOS FOTOGRAFICOS

Realizado por: (Morejón H, 2024)

La **Tabla 22-3** reporta los hallazgos del ensayo de flexión en tres puntos sobre el material compuesto con 70% de matriz polimérica termoestable y 30% de fibra de bambú, los valores del esfuerzo máximo antes de la fractura oscilan entre 89,93 y 96,03 MPa, con tensión media de 93 MPa aproximadamente. En cuanto a ductilidad del bio-compuesto sometido a cargas perpendiculares, se registraron deformaciones entre 2,8 y 7,25%, destacando cierta dispersión entre las probetas ensayadas bajo condiciones controladas. El módulo elástico, indicador de resistencia a la flexión, se ubicó principalmente entre 2,9 y 5,2 GPa según el grupo de probetas analizadas. Comparativamente frente a otras composiciones, la configuración 70% - 30% exhibe valores altos de resistencia y una deformación máxima considerable, confiriéndole un buen desempeño ante sollicitaciones de flexión como las esperadas en la aplicación automotriz.

Tabla 23-3. Valores cuantitativos del ensayo de flexión (75% - 25%).

#		Identificación de probeta	Temp (°C)	Humedad Relativa (%)	Dimensiones mm		Fuerza máxima (N)	Desplazamiento mm	Tensión Máxima (Mpa)	Módulo Elástico (GPa)	% Deformación máxima
					Ancho	Espesor					
1	75% - 25% - 1	21,3		8,42490	12,70	5,00	144,9030	5,88907	43,8132	1,48263	4,31328
2	75% - 25% - 2			4,30748	12,70	5,00	76,8185	3,76161	23,2270	1,39824	2,75509
3	75% - 25% - 3			3,92632	12,70	5,00	109,8185	4,80074	33,0071	1,45752	3,51617
4	75% - 25% - 4			9,89908	12,70	5,00	150,6410	5,51908	45,5481	1,89378	4,04230
Promedio							120,545	4,993	36,399	1,558	3,657
Mediana							127,361	5,160	38,410	1,470	3,779
Desviación estándar							34,284	0,937	10,387	0,227	0,686
Coefficiente de variación							0,284	0,188	0,285	0,145	0,188
Máximo							150,641	5,889	45,548	1,894	4,313
Mínimo							76,819	3,762	23,227	1,398	2,755
Rango							73,823	2,127	22,321	0,496	1,558

Autenticado por: Ana Solís Viquez
 CENTRO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO TECNOLÓGICO Y MECÁNICA - CIDE
 FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y

ANEXOS FOTOGRAFICOS	

Realizado por: (Morejón H, 2024)

Los hallazgos para el régimen de cargas perpendiculares registradas en la **Tabla 23-3** revelan tensiones máximas en el rango 23,22–45,54 MPa antes de la fractura de las muestras del material bio-compuesto reforzado en un 75% de termoplástico como matriz y un 25% de fibra natural. A pesar de la consistencia en las deformaciones que no exceden el 3,65 % se una rigidez moderada entre 1,48-1,89 GPa, la cual podrían limitar la implementación del material compuesto en piezas que requieran soportar intensas sollicitaciones de flexión sin pandeo excesivo. Ensayo de impacto en probetas normalizadas

- Estipula la carga de soporta el material bio-compuesto frente a una fractura frágil provocado por un solo impacto.
- Se empleó Charpy con masa de 25J, apoyada y libre para golpear la probeta en el centro.
- El parámetro medido, Energía Absorbida (Joules) antes de la fractura completa.
- El equipo registró la energía absorbida por la probeta mediante el freno de la masa.
- El ensayo finalizó ante perforación o ruptura completa de la probeta.

Configuración 75% de resina epoxi y 25% de fibra natural de bambú

Tabla 24-3. Valores cuantitativos del ensayo de impacto (75% - 25%).


UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO								
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA								
Centro de Transferencia y Tecnología								
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS								
DATOS INFORMATIVOS:								
Fecha:	20/12/2023			Ciudad:	Ambato			
Lugar:	Laboratorios de Materiales				Campus Huachi			
Equipo:	Máquina tipo caída de masas de Impacto							
Realizado por: Ing. Jonathan Mora				Supervisado por: Ing. Sebastián Villegas S.				
Tipo de material:	Material compuesto 1 Capa							
Composición	Material bio-compuesto de fibra de bambú y resina epoxi							
PARÁMETROS DE ENSAYO								
Tipo de Medición:	Energía Media de impacto(J)			Norma:	ASTM D5628-10			
Dimensiones(mm):	58mm x 58mm			Nº de probetas:	4			
								
CODIFICACIÓN	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Masa aplicada (Kg)	Incremento de masa (kg)	Altura media de fallo (mm)	Energía media de fallo(J)	Criterio de falla
1 Capa 1	58	58	5	0,232	0,351	150	0,8579	No falla
1 Capa 2	58	58	5	0,232	0,351	200	1,1438	No falla
1 Capa 3	58	58	5	0,232	0,351	250	1,4298	Falla
1 Capa 4	58	58	5	0,232	0,351	300	1,7158	Falla

Realizado por: (Morejón H, 2024)

La **Tabla 24-3** resume los hallazgos de caracterización al impacto de la fórmula reforzada con 75% de matriz y fibra de 25% de material bio-compuesto, las alturas de 150 y 200 mm en la caída del impactador no supera el límite elástico de las muestras. A los 250 mm se registra una energía promedio de fractura de 1,42 Joules entre las probetas evaluadas, mientras 1,71 Joules cuando se realiza el impacto desde 300 mm sobre la superficie de las probetas, produciendo en este punto la rotura total.

Si bien la absorción de energía antes de la fractura resulta moderada, esta configuración 60% - 40% pareciera requerir mayor contenido de refuerzo fibroso o una matriz más tenaz para expandir la capacidad elástica del bio-compuesto ante golpes.

Tabla 25-3. Valores cuantitativos del ensayo de impacto (70% - 30%).

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO								
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA								
Centro de Transferencia y Tecnología								
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS								
DATOS INFORMATIVOS:								
Fecha:	20/12/2023			Ciudad:	Ambato			
Lugar:	Laboratorios de Materiales				Campus Huachi			
Equipo:	Máquina tipo caída de masas de Impacto							
Realizado por:	Ing. Jonathan Mora			Supervisado por:	Ing. Sebastián Villegas S.			
Tipo de material:	Material compuesto 2 Capas							
Composición	Material bio-compuesto de fibra de bambú y resina epoxi							
PARÁMETROS DE ENSAYO								
Tipo de Medición:	Energía Media de impacto (J)			Norma:	ASTM D5628-10			
Dimensiones (mm):	58mm x 58mm			Nº de probetas:	4			
								
CODIFICACIÓN	Ancho (mm)	Largo(mm)	Espesor (mm)	Masa aplicada(kg)	Incremento de masa (kg)	Altura media de fallo (mm)	Energía media de fallo(J)	Criterio de falla
2 Capas 1	58	58	4	0,232	0,351	150	0,8579	No falla
2 Capas 2	58	58	4	0,232	0,351	200	1,1438	No falla
2 Capas 3	58	58	4	0,232	0,351	250	1,4298	Falla
2 Capas 4	58	58	4	0,232	0,351	300	1,7158	Falla


Realizado por: (Morejón H, 2024)

La **Tabla 25-3** documenta los valores registrados del ensayo de impacto para determinar la energía que logra absorber el grupo de probetas compuestas en un 70% de matriz termoplástica y un 30% de fibras. De forma similar a la combinación previa, a alturas de caída de 150 y 200 mm aún no se producía fractura en las muestras, evidenciando un comportamiento elástico del material. Ya a los 250 mm se manifestó la primera rotura de las probetas, con una energía

promedio de 1.42 Joules resistida antes de fallar por completo. Incrementando a 300 mm, el promedio incrementó a 1.71 Joules en el punto de fallo.

Esta combinación 70% - 30% recrea consistentemente las tendencias de desempeño observadas para otros grupos de probetas, con absorción intermedia de energía de impacto gracias al refuerzo fibroso y las propiedades tenaces de la matriz.

Tabla 26-3. Valores cuantitativos del ensayo de impacto (60% - 40%).

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO								
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA								
Centro de Transferencia y Tecnología								
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS								
DATOS INFORMATIVOS:								
Fecha:	20/12/2023			Ciudad:			Ambato	
Lugar:	Laboratorios de Materiales						Campus Huachi	
Equipo:	Máquina tipo caída de masas de Impacto							
Realizado por: Ing. Jonathan Mora				Supervisado por: Ing. Sebastián Villegas S.				
Tipo de material:	Material compuesto 3 Capas							
Composición	Material bio-compuesto de fibra de bambú y resina epoxi							
PARÁMETROS DE ENSAYO								
Tipo de Medición:	Energía Media de impacto (J)			Norma:			ASTM D5628-10	
Dimensiones(mm):	58mm x 58mm			Nº de probetas:			4	
								
CODIFICACIÓN	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Masa aplicada (kg)	Incremento de masa (kg)	Altura media de fallo (mm)	Energía media de fallo(J)	Criterio de falla
3 Capas 1	58	58	5	0,232	0,351	150	0,8579	No falla
3 Capas 2	58	58	5	0,232	0,351	250	1,4298	No falla
3 Capas 3	58	58	5	0,232	0,351	450	2,5737	No falla
4 Capas 4	58	58	5	0,232	0,351	550	3,1456	Falla

Realizado por: (Morejón H, 2024)

La **Tabla 26-3** compila las mediciones experimentales de energía absorbida hasta la fractura de las muestras bajo impacto para la composición reforzada en un 40% con fibras y un 60% de termoplástico termoestable como matriz (equivalente a 3 capas).

Los datos reportan que, a alturas de 150, 200 y 450 mm del impactador no se generó falla, mientras que a 450 mm supero el límite elástico con una energía promedio absorción antes de la fractura de 3,41 Joules. Comparando con las otras combinaciones del material bio-compuestos, esta fórmula 60% - 40% presenta absorción de energía buena ante impactos, mostrando la matriz polimérica una contribución en la tenacidad al fallar menos frágilmente.

3.10.5 Fundamentación de criterios definidos matriz morfológica

Los criterios técnicos establecidos para la evaluación del ABS Acrylonitrile Butadiene Styrene (High-impact, Injection Molding) de alto impacto actualmente utilizado en el parachoques frontal del vehículo, se basaron en requerimientos normativos, antecedentes de falla y consideraciones de diseño informadas en diversas fuentes técnicas automotrices.

Para la selección del material bio-compuesto más adecuado para el diseño del nuevo parachoques, se ha implementado el uso de una matriz morfológica. Esta herramienta permite explorar sistemáticamente diversas combinaciones de los componentes clave, evaluando su impacto en las propiedades mecánicas y la sostenibilidad del material.

La regulación ECE-R42 de la comisión Económica Europea posibilitó la identificación de parámetros críticos para la resistencia de impacto de la barra frontal, así como también prevenir la injerencia de objetos al habitáculo del automóvil y asegurar el posterior funcionamiento del sistema de luces, frenos y suspensión.

Los criterios incluidos en la matriz morfológica se fundamentan en los requisitos técnicos y ambientales establecidos para este proyecto. En primer lugar, se ha considerado el tipo y porcentaje de fibra de bambú, dado que este refuerzo natural es el principal responsable de las propiedades mecánicas del bio-compuesto. Asimismo, se ha evaluado el tipo y porcentaje de resina epoxi, ya que afecta tanto la resistencia del material como su sostenibilidad.

La geometría de las barras frontales del sistema de parachoques y su forma de deformación que estas sufren en un impacto frontal del automóvil, estableció que el esfuerzo primordial al que esta sometida esta pieza es flexión producto del impacto de la barra del parachoques que tiene sus puntos de sujeción con la carrocería del auto en los extremos de este elemento.

Acorde a lo anterior y con resultados detallados por (Shitalkumar, Shahaji et al. 2017), acerca de los efectos sobre las barras frontales del sistema de parachoques con un material compuesto en impactos, se motivó a destinar una alta valuación al criterio de resistencia a la flexión en la matriz morfológica, esto debido a la importancia que representa la capacidad de absorción de energía en un choque.

3.10.5.1 Análisis de sensibilidad

Previo a la selección de la alternativa más adecuada para el diseño del parachoques bio-compuesto, se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad. Este estudio permite evaluar el impacto que tienen las variaciones en la composición del material sobre su desempeño en términos de propiedades mecánicas y sostenibilidad. El análisis de sensibilidad se ha enfocado en dos parámetros clave: el porcentaje de fibra de bambú y el porcentaje de resina epoxi.

En cuanto a la resistencia a la flexión, se ha encontrado que el contenido de fibra de bambú conlleva a una variación significativa en esta propiedad mecánica. Por ejemplo, al pasar del 40% de fibra de la Alternativa 2 al 30%, la resistencia a la flexión se eleva.

3.10.5.2 Evaluaciones finales

El análisis de sensibilidad previo ha permitido comprender la influencia que tienen los porcentajes de fibra y resina sobre el desempeño del material. Se ha evidenciado que una variación en el contenido de fibra de bambú mejora la resistencia a la flexión, pero reduce la sostenibilidad del bio-compuesto. Por el contrario, un mayor porcentaje de resina epoxi conlleva a una disminución en la sostenibilidad.

Según reportes de daños típicos por agrietamiento y fractura en barras de parachoques de termoplásticos (Xie, Suchao et al. 2016), se estipuló que el criterio de mayor relevancia es la resistencia a la flexión. La severidad relativa de ensayos sobre sistemas de parachoques descritos en la regulación FMVSS 581 del NHTSA (Zhang, Yong et al. 2012) motivó asignar este criterio de importancia, por constituir solicitaciones representativas en posibles colisiones frontales. Los parachoques están diseñados para deformarse y disipar energía durante impactos (Chinnasamy, Jegadheesan et al. 2021), por lo que permitir cierto grado controlado de deformación elástica mejora la respuesta. Un balance entre integridad y capacidad de cambiar de forma. Al tratarse de un componente exterior, reducir la masa del parachoques a través de materiales más ligeros favorece el ahorro de combustible y la maniobrabilidad (Meng, Xiangchao et al. 2023), por lo que se busca mejorar la relación resistencia/peso respecto al ABS actual.

La producción masiva en la industria automotriz obliga a diseños de bajo costo (Yan, Lei et al. 2021), esto se refleja por medio de materiales y procesos asequibles sin afectar la seguridad. La creciente consciencia ecológica demanda materiales y productos más amigables con el medio ambiente (Jawaid, M. et al. 2011), que promueva menos emisiones de CO₂, toxicidad y mayor reciclabilidad.

Las evaluaciones finales representan la influencia relativa y el nivel de impacto de cada característica sobre el desarrollo del nuevo material bio-compuesto, primordialmente hace énfasis en su aplicación que tiene su base en la barra frontal del sistema de parachoques. Estos resultados y análisis previos serán fundamentales para la selección final de la alternativa de material bio-compuesto que cumpla de manera satisfactoria con los criterios técnicos y ambientales requeridos para el diseño del nuevo parachoques.

3.10.5.3 Calificación de alternativas

Los criterios definidos se basaron en datos técnicos primordiales, evaluando las tres combinaciones del material bio-compuesto, 60% resina epoxi 40% de fibra de bambú, 70% resina epoxi 30% fibra de bambú, y 75% resina epoxi 25% de fibra de bambú.

Para seleccionar la combinación óptima de fibra de bambú y resina epoxi para el diseño del parachoques bio-compuesto, la matriz permite explorar sistemáticamente las diferentes alternativas al variar los porcentajes de los componentes, evaluando cómo impactan en la resistencia a la flexión, la sostenibilidad y el costo del material. La matriz morfológica facilita la comparación de las diferentes opciones y la identificación de la combinación que mejor se ajusta a los requisitos del diseño del parachoques.

Al analizar alternativas como 60% fibra - 40% resina, 70% fibra - 30% resina y 80% fibra - 20% resina, se podrá seleccionar la solución que ofrezca el mejor balance entre la resistencia a la flexión, las características de sostenibilidad y el costo, permitiendo así optimizar el desempeño y la sostenibilidad del nuevo parachoques bio-compuesto.

La **Tabla 27-3** detalla las diferentes alternativas, criterios definidos y características atribuidas al material bio-compuesto con sus diferentes combinaciones tanto de fibra de bambú como resina epoxi.

Tabla 27-3. Matriz morfológica material bio-compuesto

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Porcentaje de fibra de bambú	60,00	70,00	75,00
Porcentaje de resina epoxi	40,00	30,00	25,00
Resistencia la flexión MPa	65,46	93,21	36,39
Sostenibilidad	Alta	Media-alta	Media

Realizado por: (Morejón H, 2024)

3.10.5.4 Análisis comparativo de las alternativas

Al examinar las tres alternativas propuestas, se puede realizar un análisis cuantitativo detallado de las propiedades mecánicas y la sostenibilidad de cada una. En términos de resistencia a la flexión, la Alternativa 2 presenta el mejor desempeño con un valor de 93,21 MPa. Este resultado se debe a la combinación de un porcentaje alto de resina epoxi (30%) en comparación con la fibra de bambú (30%). La mayor fracción de refuerzo otorga una mayor capacidad de carga y rigidez al material bio-compuesto.

Por otro lado, la Alternativa 1, con 40% de fibra de bambú y 60% de resina epoxi, exhibe una resistencia a la flexión intermedia de 65,46 MPa. Mientras que la Alternativa 3, con la menor proporción de fibra (25%) y de resina (75%), muestra la resistencia más baja del grupo, con 36,39 MPa.

En cuanto a la sostenibilidad, la Alternativa 1 se destaca con una calificación "Alta", reflejando el mayor contenido de material natural (fibra de bambú) en su composición. La Alternativa 2 se ubica en un nivel "Media-alta" de sostenibilidad, debido a su mayor porcentaje de fibra (30%) en comparación con la resina. Por último, la Alternativa 3, con un 25% de resina, presenta una sostenibilidad catalogada como "Media".

3.10.5.5 Selección final del material bio-compuesto

En términos de resistencia a la flexión, la Alternativa 2 presenta un valor de 93,21 MPa, **ver Tabla 27-3**, siendo el más alto de las tres opciones. Este desempeño se atribuye a la mayor fracción de resina epoxi, la cual aporta una mayor resistencia y rigidez al material bio-compuesto.

Sin embargo, en cuanto a la sostenibilidad, la Alternativa 2 se ha calificado como "Baja", debido al mayor contenido de resina epoxi de origen petroquímico. Esta característica limita los beneficios ambientales del material bio-compuesto. Al considerar el equilibrio entre las propiedades mecánicas y la sostenibilidad, la Alternativa 2 se perfila como la opción más adecuada para el diseño del nuevo parachoques. Su resistencia a la flexión de 93,21 MPa, si bien es la más alta, se ve contrastada por su baja sostenibilidad.

Las demás alternativas presentan compromisos en términos de resistencia mecánica (Alternativa 3) o sostenibilidad (Alternativa 1), por lo que la Alternativa 2 se selecciona como la solución de referencia para el diseño y fabricación del parachoques de material bio-compuesto.

3.10.6 Proceso de manufactura del prototipo de parachoques

El moldeo de materiales compuestos es un proceso versátil para la manufactura de piezas con formas complejas y alto volumen, orientado a sectores como el transporte y la construcción, la técnica involucra el curado de la resina termoestable (epoxi) reforzada con fibras naturales dentro de un molde (material similar al material compuesto) mediante el aporte de capas de refuerzo y resina y simultáneamente presión mediante un rodillo o brocha.

Para el caso del moldeo de la barra frontal del parachoques, inicialmente se coloca las capas de fibra de bambú tejidas (tejido plano), para después impregnar mediante un rodillo la resina epoxi aun en estado líquido. El control estricto de temperatura, tiempos de curado, velocidad de llenado y presiones de compactación resulta primordial para la obtención de las propiedades óptimas del compuesto final, así mismo se garantiza una correcta y uniforme impregnación de los refuerzos minimizando la porosidad.

3.10.6.1 Selección del proceso de manufactura

Entre los métodos disponibles para la manufactura o la reproducción de la pieza frontal del sistema de parachoques en un molde polimérico, se seleccionó la estratificación manual, esta técnica resulta ideal cuando se tiene geometrías relativamente sencillas como sea el caso, con la ventaja de compactar correctamente los refuerzos y facilitar la evacuación de aire atrapado durante las fases iniciales del curado del elemento final (Mazumdar, Sanjay 2001).

La estratificación manual también permite un control adecuado sobre la orientación de la fibra de bambú colocándolas láminas en la dirección deseada para mejorar las propiedades mecánicas en

función de los esfuerzos esperados sobre el componente, al ser un proceso de temperatura ambiente, se minimiza la contracción del molde producto del curado.

La manufactura de la barra frontal mediante este método resulta más eficiente en términos de costo, cuando se considera producir unas pocas piezas a partir del molde en la etapa actual de investigación y desarrollo, facilitando modificaciones en caso de ser necesario o iterar en el diseño del sistema de parachoques (Ruiz, Edu et al. 2006).

3.10.6.2 Etapas del proceso de manufactura

El proceso de fabricación de materiales bio-compuestos mediante estratificación manual involucra una serie de etapas, que inician con la impregnación de la resina sobre el refuerzo, después la colocación de capas de fibra natural tejida, y posterior la eliminación del oxígeno atrapado en el proceso con la compactación para finalmente completar el curado químico a temperatura ambiente (solidificación). Cada una de estas fases o etapas juegan un papel primordial para la obtención de la pieza final sin defectos y con propiedades uniformes (Franco, 2010).

- Impregnación, busca depositar la resina fluida con una distribución uniforme sobre la superficie de las telas de fibra, garantizando que todos los filamentos queden completamente recubiertos por la matriz polimérica, esto se logra mediante procesos manuales con rodillo o pincel controlando el espesor y evitando excesos o deficiencias locales de resina que comprometan las propiedades (Liotier, Pierre-Jacques et al. 2019).
- Estratificación, la colocación de las sucesivas capas de tejido impregnadas con resina para formar el laminado se conoce como estratificación, el adecuado control sobre la orientación, posicionamiento y solape entre láminas determina la calidad estructural y resistencia del material compuesto final (Kalpakjian, Serope et al. 2002).
- Consolidación, luego de estratificar las capas húmedas, se requiere una etapa de compactación para permitir que la resina fluya, elimine porosidades y moje completamente los refuerzos, esto se logra mediante presiones externas con rodillos, pinceles o aplicación de vacío antes de la gelificación (Mazumdar, Sanjay 2001).
- Solidificación, conocido como curado o solidificación de la resina termoestable permite el endurecimiento completo para obtener un material sólido con elevadas prestaciones mecánicas, usualmente ocurre de forma ambiental o acelerada por estufas con control termodinámico estricto de ciclos térmicos (Rosato, Dominick V. et al. 2000).

3.10.6.3 Construcción de molde

Para la correcta manufactura de la barra frontal del sistema de parachoques con el material bio-compuesto es necesario la fabricación de un molde por medio de la barra frontal original **Figura**

42-3, lo cual recreara una pieza con las mismas dimensiones que la pieza original para su posterior ensayo y validación.

La construcción del molde inicia con la preparación de la superficie de la pieza del parachoques existente, proceso de lijado y aplicando ente 2-3 capas uniformes de agente desmoldante para prevenir adhesión con la resina en el moldeo, las sucesivas capas de resina epoxi termoestable catalizada se deposita después manualmente con brocha, asegurando un espesor entre 5-7mm para proveer una rigidez estructural una vez curada.



Figura 42-3. Fabricación del molde barra frontal del parachoques.

Fuente: (Morejón H, 2024)

La estratificación manual con aplicaciones controladas de la resina epoxi sobre la superficie del componente garantiza que se reproduzcan todos los detalles geométricos más pequeños, el curado del molde puede ser realizado a temperatura ambiente con acelerantes o mediante ciclos térmicos controlados en un horno, el desmolde final **Figura 43-3** permite el uso del molde para producir los nuevos prototipos de la barra frontal del sistema de parachoques con el material compuesto.



Figura 43-3. Extracción del molde de la barra frontal

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.6.4 Construcción de la barra frontal del sistema de parachoques.

Obtenido el molde positivo que replica la geometría actual de la barra de refuerzo del vehículo, se procede a manufacturar los nuevos prototipos del componente en el material compuesto de la investigación. El material bio-compuesto utilizado en la investigación es una mezcla de fibras de bambú y una matriz polimérica de resina epoxi, cuidadosamente seleccionados por sus propiedades mecánicas adecuadas y su ligereza. Las fibras se entretajan en una disposición específica, optimizada mediante tratamientos superficiales, para maximizar la resistencia y rigidez del componente final.

Inicialmente se cortan segmentos de los tejidos unidireccionales de fibra de bambú previamente caracterizados en la etapa de experimentación, estos se depositan en el molde con la orientación requerida perpendicular a los esfuerzos producidos por el impacto y demás cargas que deberá soportar la pieza en servicio.

Utilizando un sistema de vacío, se procede a impregnar con la resina epoxi sobre cada capa de refuerzo a medida que se van colocando, hasta completar el número establecido según cálculos para el espesor deseado, los rodillos permiten eliminar oquedades y mejorar impregnación en esta etapa. Tras alcanzar las condiciones de curado según **ANEXO A** de la resina epoxi, se obtiene la barra sólida del parachoques con las propiedades mecánicas adecuadas provistas por el bio-compuesto optimizado, luego del desmolde, maquinado final de bordes define el prototipo listo para instalación y ensayos.

La fabricación de los prototipos implica un meticuloso proceso de laminado manual, donde cada capa de fibras de bambú se impregna con la resina epoxi y se coloca en el molde siguiendo un patrón predeterminado. Este proceso requiere una gran habilidad y experiencia por parte de los artesanos, quienes deben asegurar una distribución uniforme de las fibras y evitar la formación de burbujas de aire o defectos en el laminado.

La **Figura 44-3** muestra el proceso técnico que se utilizó en la construcción del sistema de parachoques con material bio-compuesto (resina epoxi y fibra de bambú), este procedimiento se aplicó en la manufactura de dos prototipos, el primero usa una configuración longitudinal de la fibra natural a lo largo de la probeta, el segundo usa capas tejidas de la fibra en un número total de dos, estos se diferencian entre sí por el color de suma matriz verde con fibra longitudinal y azul para fibra tejida.

Una vez completado la estratificación manual, los prototipos se someten a un ciclo de curado a temperatura ambiente, donde la resina epoxi se polimeriza y endurece, consolidando la estructura del material compuesto. Este paso es crucial para alcanzar las propiedades mecánicas deseadas y garantizar la integridad estructural del componente (parachoques automotriz), el proceso mencionado es muy útil para la construcción de superficies complejas.

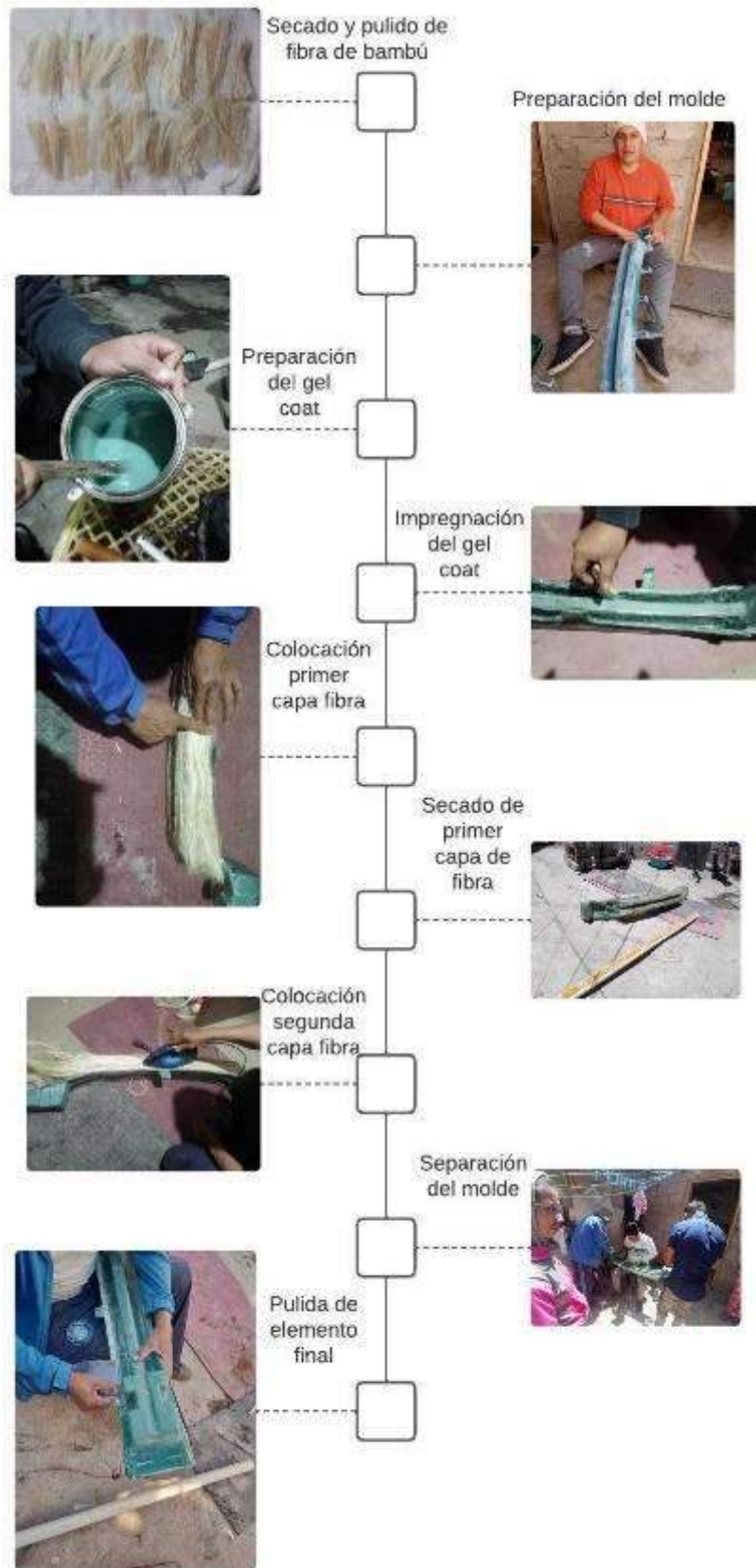


Figura 44-3. Proceso de manufactura del parachoques frontal

Fuente: (Morejón H, 2024)

Parachoques de fibra longitudinal (color verde), luego del proceso de manufactura del prototipo de la barra frontal de parachoques mediante moldeo manual del material bio-compuesto optimizado, se obtuvo un primer espécimen con la fibra de bambú dispuesta en sentido longitudinal unidireccional, buscando maximizar las propiedades a tracción. El componente final curado presentaba un distintivo color verde **Figura 45-3a**, debido al pigmento aplicado a la resina y las fibras naturales son visibles alineadas en la dirección axial principal del elemento. Dicho parachoques reforzado longitudinalmente se someterá al ensayo de impacto en el equipo de prueba estandarizado.

Parachoques de fibra tejida (color azul), paralelamente se elaboró un segundo espécimen de prueba pero sustituyendo la fibra unidireccional por un entramado textil bidireccional, donde los hilos de bambú se entrecruzan ortogonalmente en trama y urdimbre, el objetivo fue mejorar la integridad estructural y resistencia multidireccional ante impactos. Este otro parachoques con los haces de bio-fibra en forma de tejido, exhibía un color azul **Figura 45-3b** debido a los tratamientos aplicados. El espécimen tejido será sometido a idéntico ensayo de impacto para comparación directa respecto al reforzado longitudinalmente.

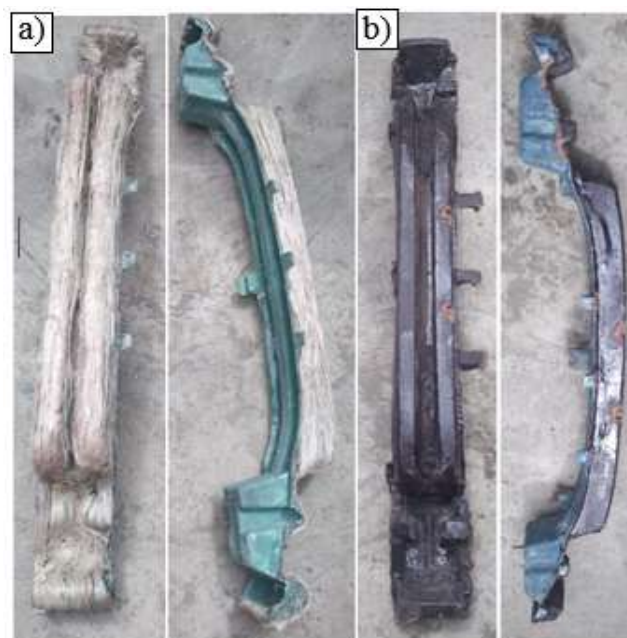


Figura 45-3. Prototipo de parachoques del material bio-compuesto.

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.7 Implementación de software del parachoques.

3.10.7.1 Observaciones generales para el análisis por elementos finitos.

El análisis de elementos finitos (MEF) es una potente herramienta computacional que permite modelar el comportamiento de estructuras complejas ante diferentes tipos de cargas y condiciones

de contorno. Se basa en subdividir una geometría en pequeños elementos interconectados con puntos nodales, que simplifican cálculos sobre tensiones, deformaciones, desplazamientos, frecuencias naturales y otras respuestas (Logan, Daryl L. 2007).

En el campo de la ingeniería automotriz y el diseño de vehículos, FEA facilita reproducir virtualmente condiciones de operación reales sobre componentes para predecir fallas, así, optimiza costos y tiempo en comparación con la construcción física de múltiples prototipos (Belingardi, Giovanni et al. 2013). En esta investigación sobre el desarrollo de un sistema de parachoques, se empleará MEF para analizar comportamientos esperados del mismo y apoyar la validación del diseño propuesto.

El software de elementos finitos ANSYS constituye una herramienta versátil y potente para evaluar el comportamiento estructural y la respuesta a impactos de componentes de ingeniería como los sistemas de parachoques automotrices, mediante un preciso modelado 3D del elemento, la incorporación de propiedades mecánicas del material, la representación de condiciones de frontera y cargas dinámicas; ANSYS facilita predecir distribuciones de tensiones, concentraciones de esfuerzos, deformaciones plásticas y modos de falla ante sollicitaciones severas de impacto (Sapuan, S.M. et al. 2005). Considerando explícitamente efectos transitorios, no linealidades geométricas y de contacto; los análisis por ANSYS entregan información valiosa sobre integridad estructural y capacidad de absorción energética de los sistemas de parachoques sometidos a impacto (Belingardi, Giovanni et al. 2013).

3.10.7.2 Modelado tridimensional del parachoques

El parachoques o defensa delantera de los vehículos comprende una barra frontal de refuerzo que cumple la importante función de absorber energía durante impactos a baja velocidad, brindando protección estructural a los sistemas del auto y al habitáculo de los pasajeros, mediante software de diseño asistido (CAD), se modeló la geometría de la barra acorde a dimensiones y forma requeridas según especificaciones del fabricante, el modelo 3D considera aspectos como longitud total, altura y ancho de sección transversal, curvatura en la zona media y forma de los soportes laterales de unión (cajas de impacto).

Las cualidades fundamentales que se busca cumplir con un adecuado modelado virtual son: reproducir aproximadamente la realidad, permitir incorporar las propiedades del material específico, y facilitar el posterior análisis por elementos finitos del conjunto. El modelado preciso permite evaluar comportamientos frente a cargas dinámicas representativas en una colisión y en base a estos tomar las decisiones de diseño sobre espesores, geometrías de pliegue y modificaciones para mejorar la capacidad de absorción energética (Sapuan, S.M. et al. 2005).

La geometría sólida de la barra frontal de refuerzo del parachoques fue modelada en el software de diseño 3D SolidWorks, aprovechando la capacidad de este CAD para generar modelos

paramétricos de componentes industriales con precisión y eficiencia, siguiendo las dimensiones y especificaciones técnicas del fabricante para el sistema de parachoques del modelo de vehículo objeto de estudio, se recreó la forma mediante operaciones básicas de croquizado 2D y operaciones posteriores de extrusión y barrido (revolución) que otorgaron la tercera dimensión.

Se prestaron particular atención a detalles como la curvatura frontal, tramos rectos, nervaduras intermedias, puntos de montaje mediante zonas de extrusión adicional, y el perfil uniforme requerido de la sección transversal a lo largo del componente parachoques, el sólido resultante se detalla en la **Figura 46-3**, dentro del entorno de SolidWorks constituye una representación precisa de la barra original, sobre la cual se realizarán estudios posteriores de ingeniería asistida por computador como simulación por elementos finitos o análisis tensional.

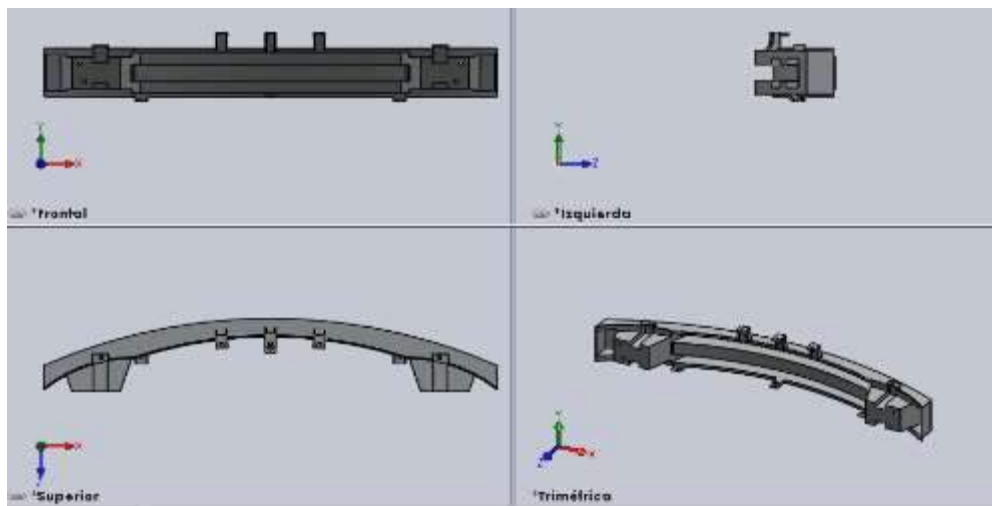


Figura 46-3. Modelado tridimensional de parachoques frontal

Fuente: (Morejón H, 2024)

Entre las capacidades de SolidWorks para el análisis ingenieril de modelos 3D, se procedió a calcular la ubicación del centro de masa del conjunto representando la barra frontal de refuerzo del parachoques, con base en la distribución de masas relativa al modelo sólido previamente generado con la densidad del material compuesto, el software permitió identificar las coordenadas del punto centroidal respecto al sistema de referencia global **Figura 47-3**. Conocer la localización del centro de gravedad resulta útil para comprender cómo se distribuyen las masas y así predecir comportamientos dinámicos, garantizando una orientación balanceada de los protuberantes como puntos de montaje sin ocasionar volcamientos durante eventos de alto impacto que impliquen transferencias de cantidad de movimiento.

El modelo geométrico en SolidWorks, efectuó un cómputo automático del volumen total desplazado por el sólido, este valor en conjunción con el dato previo de densidad ingresado como propiedad del material para la aleación del parachoques, permitió obtener el peso **Figura 47-3** completo del conjunto mediante el producto de ambos parámetros, con el peso exacto se permite

realizar verificaciones preliminares de objetivos de ligereza en el diseño conceptual, garantizando el cumplimiento de índices de resistencia-peso relativo esperados en componentes automotrices destinados a absorber impactos frontales.



Figura 47-3. Centro de masa y peso del parachoques (Material ABS)

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.7.3 Modelado tridimensional del impactador

Con el objetivo de recrear las condiciones normativas del ensayo de impacto sobre el sistema de parachoques, se procedió también a modelar el elemento percutor dentro del entorno de SolidWorks **Figura 48-3**, cumpliendo las directrices dimensionales sobre masa y geometría especificadas en los lineamientos FMVSS 581 que rigen este tipo de experimentación (**Anexo B**); se generó un sólido rígido representando el péndulo oscilante que colisionará contra la superficie frontal de la barra de refuerzo previamente modelada.

El modelado CAD incluyó aspectos como la forma del impactador con su longitud definida, la masa suspendida efectiva dependiente del peso del vehículo, así como una orientación inicial que garantiza un impacto perpendicular de acuerdo al procedimiento normado. La precisión en todos los detalles geométricos y configuraciones referentes al percutor resulta fundamental, dado que condicionan directamente la interacción dinámica contra el parachoques durante la simulación computarizada.

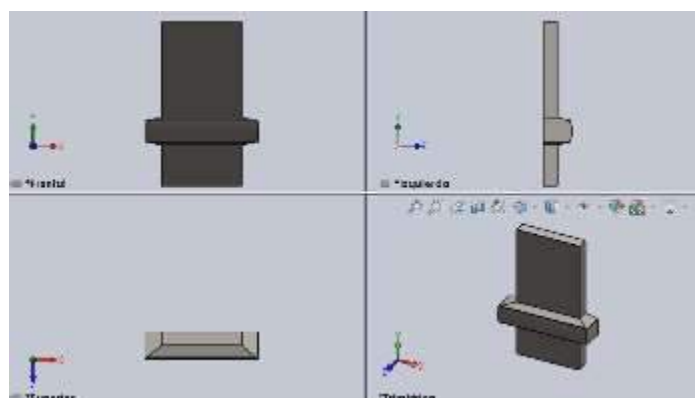


Figura 48-3. Modelado del impactador

Fuente: (Morejón H, 2024)

Además del cálculo realizado para la barra frontal de parachoques, también se determinó la ubicación centroidal de la masa con respecto al modelo tridimensional que representa al impactador o péndulo de ensayo ver **Figura 49-3**. La distribución de densidades previamente incorporada como dato de entrada al modelo sólido, permitió resolver numéricamente la posición equivalente del centroide, conocer el centro de gravedad resulta especialmente útil en el impactador, porque permite verificar que la masa suspendida efectiva se encuentra apropiadamente balanceada y actúa a través de su baricentro durante la colisión. Esto se traduce en mediciones consistentes y repetibles de fuerza-tiempo con magnitudes esperables, evitando oscilaciones arbitrarias por desequilibrios o vibraciones espurias que contaminen los resultados del ensayo simulado sobre el parachoques.



Figura 49-3. Centro de masa y peso del impactador (Acero Estructural)

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.7.4 Análisis de Elementos Finitos usando ANSYS Workbench

ANSYS constituye una poderosa herramienta de ingeniería asistida por computador con múltiples capacidades de análisis mediante el método de elementos finitos (FEA) la simulación ayuda a recrear escenarios de carga complejos sobre modelos 3D de componentes, estudiando su respuesta en términos de esfuerzos, deformaciones, frecuencias de vibración, comportamiento a fatiga, entre otros.

Su implementación resulta de gran utilidad en el proceso de diseño de la barra frontal de parachoques del vehículo, dado que posibilita simular condiciones reproducibles de impacto frontal y lateral sin incurrir en costos de fabricación de prototipos (Ansys 2021). Así, a partir de un detallado modelado tridimensional que incorpore fielmente las características del material compuesto, geometría y métodos de sujeción, se pueden evaluar daños, optimizar formas o espesores para mejorar la absorción de energía, y predecir modificaciones en la rigidez. La gran capacidad para representar contactos, no linealidades de material, grandes deformaciones, efectos

en su masa y comportamiento dinámico transitorio, hacen de ANSYS una poderosa herramienta en el contexto específico del estudio de impacto sobre los sistemas de parachoques automotrices.

3.10.7.5 Definición de propiedades del material bio-compuesto.

El desarrollo de materiales compuestos reforzados con fibras naturales ha cobrado importante atención dada la necesidad de componentes más livianos y sostenibles en diversas industrias de manufactura y transporte, la incorporación de refuerzos orgánicos como yute, lino, cáñamo o bambú con matrices termoestables o termoplásticas de alto desempeño está mostrando mejoras respecto a propiedades mecánicas frente a fuerzas estáticas y de impacto en comparación con los materiales tradicionales (Shah, Darshil U. 2014).

En el sector automotriz en particular, el uso potencial del bio-compuesto de resina epoxi reforzada con fibra de bambú para la fabricación de la barra frontal de los sistemas de parachoques representa múltiples beneficios, entre los cuales se resaltan la reducción de peso del vehículo sin detrimento de la capacidad de absorción de energía durante choques, el aprovechamiento de materias primas renovables y reciclables, así como la disminución en emisiones de CO₂ asociadas a su ciclo de vida útil, en consonancia con las tendencias modernas de movilidad sostenible (Joshi, S. V et al. 2004).

Los materiales compuestos reforzados con fibras, al incorporar refuerzos orientados en una o más direcciones dentro de una matriz polimérica, confieren al material **propiedades ortotrópicas** y dependientes de la orientación, comportándose como ortotrópicos (Barbero, Ever 2008). En el bio-compuesto desarrollado en esta tesis, la disposición unidireccional y el tejido de los haces de fibra de bambú para conformar láminas induce directamente dicho comportamiento diferenciado según el eje principal de alineación de los refuerzos.

Los materiales compuestos reforzados con fibras vegetales como sisal, yute, cáñamo o bambú han mostrado propiedades fuertemente dependientes de la dirección de las sollicitaciones mecánicas aplicadas, comportamiento característico de los denominados materiales ortotrópicos, la razón fundamental detrás de esta naturaleza ortotrópica en compuestos con fibras naturales es la disposición unidireccional y tejida en forma de láminas que adoptan las fibras celulósicas de refuerzo así lo demuestra (Lotfi, Amin 1999) en su estudio Natural fiber polymer compsites a review.

Los análisis de diferencias significativas en módulos elásticos a tracción y compresión según el eje principal de alineación de las fibras corrobora esto (Bledzki, Andrzej et al. 2010), así pues, el potencial aprovechamiento de las fibras vegetales en compuestos estructurales conlleva un obligado tratamiento ortotrópico en etapas de modelado, simulación computacional y diseño antes de la implementación.

Esta naturaleza ortotrópica del material compuesto de matriz termoestable y fibra de bambú seleccionado debe considerarse tanto en el modelado computacional, asignando propiedades cuantitativamente diferenciadas en ejes principales, como durante la etapa de diseño mecánico, considerando la orientación relativa de la pieza y los esfuerzos esperados en servicio (Vasiliev, Valery V et al. [sin fecha]). Por ejemplo, se espera una rigidez y resistencia 4-6 veces superior a cargas axiales de tracción frente a solicitaciones transversales de compresión o cortante (Reinhart, Theodore J. 1987).

La adecuada caracterización experimental del bio-compuesto en las tres orientaciones principales utilizando ensayos mecánicos especializados, y la posterior incorporación precisa de los valores de resistencia obtenidos en los modelos de simulación, resulta esencial para representar fielmente la naturaleza ortotrópica real en el análisis de respuesta a cargas complejas como las experimentadas por la barra frontal de un parachoques ver **Figura 50-3**.

Property	Value	Unit
Orthotropic Elasticity		
Young's Modulus X direction	28000	MPa
Young's Modulus Y direction	3500	MPa
Young's Modulus Z direction	3500	MPa
Poisson's Ratio XY	0.27	
Poisson's Ratio YZ	0.4	
Poisson's Ratio XZ	0.27	
Shear Modulus XY	4700	MPa
Shear Modulus YZ	3100	MPa
Shear Modulus XZ	4700	MPa
Orthotropic Stress Limits		
Tensile Z direction	3251	MPa

Figura 50-3. Configuración del material bio-compuesto

Fuente: (Morejón H, 2024)

Previo a la simulación por elementos finitos del comportamiento del sistema de parachoques automotriz, fue necesario asignar las correspondientes propiedades del material del parachoques comercial constituyente dentro del entorno de ANSYS (Zienkiewicz, Olgierd Cecil 2000), considerando que la pieza original se encontraba fabricada en termoplástico ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) de alto impacto **Figura 51-3**, se le asignó a todas las partes del modelo 3D del parachoques los valores medios de densidad, módulo elástico y resistencias características reportadas para este polipropileno.

La correcta asociación de las propiedades mecánicas, límites elásticos y parámetros mecánicos del ABS resulta determinante para representar fielmente el comportamiento tensional y la respuesta dinámica transitoria del sistema de parachoques ante un eventual escenario de impacto frontal (Zhang, Yong et al. 2012).

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	1030	kg m ⁻³
Elasticity		
Derive from	Young's Modulus	
Young's Modulus	1.628E+09	Pa
Poisson's Ratio	0.4059	
Bulk Modulus	2.978E+09	Pa
Shear Modulus	5.779E+08	Pa
Specific Heat Constant Pressure, C _p	1400	J kg ⁻¹ C ⁻¹

Figura 51-3. Configuración del material ABS

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.7.6 Valores de ingeniería en datos de entrada

Una precisa definición de parámetros base ingresados como datos iniciales de entrada al software de análisis de elementos finitos, tales como propiedades elásticas, límites de resistencia, contenido de humedad entre otros, resulta determinante para el éxito de las simulaciones computacionales sobre compuestos naturales (Swolfs, Yentl et al. 2014), una representativa configuración del ambiente operacional, condiciones de frontera, interfaces de unión, y la adecuada incorporación de no linealidades del material, contacto y grandes deformaciones, es crítica. La calidad final de los resultados numéricos sobre tensiones, deformaciones, desplazamientos y modos de falla depende en gran medida de estos aspectos iniciales de modelado, un insuficiente o inexacto ingreso de propiedades críticas del material compuesto o errónea consideración del escenario completo de cargas y sujeciones, pone en riesgo la validez de los análisis por elementos finitos (Yan, Libo et al. 2016).

El ensayo de impacto a baja velocidad de parachoques descrito en la regulación estadounidense FMSSV 581 busca reproducir colisiones frontales y laterales que puedan ocurrir en condiciones de operación real a velocidades equivalentes en rango 5 km/h **Figura 52-3**, para evaluar la capacidad de absorción de energía. Los vehículos sometidos a prueba con esta normativa deben ser representativos de la producción en serie proyectada, inicialmente se determinan las masas sobre el impactador y carga estándar, luego después, barras rígidas de acero cromado se impulsan para impactar en sitios específicos de la defensa automotor.

El reglamento FMVSS 581 establece condiciones controladas de impacto longitudinal y lateral de un dispositivo de prueba de péndulo (PTD, por sus siglas en inglés) contra las defensas delantera y trasera del vehículo (ver ANEXO B). El PTD posee una masa igual al peso sin carga del automóvil, garantizando una transferencia representativa de energía cinética en el choque. Mientras que la altura del impacto es de 20 pulgadas en los ensayos frontales y de 16 a 20 pulgadas en los laterales. Estos ensayos de impacto estandarizados permiten evaluar la capacidad de las defensas para absorber y disipar la energía de una colisión, protegiendo así la integridad estructural del vehículo y la seguridad de los ocupantes. Además, las pruebas se realizan en

condiciones controladas de laboratorio para garantizar resultados consistentes y comparables entre diferentes modelos de vehículos. De esta manera, el reglamento FMVSS 581 establece un marco regulatorio riguroso para garantizar un nivel adecuado de protección en caso de colisiones.

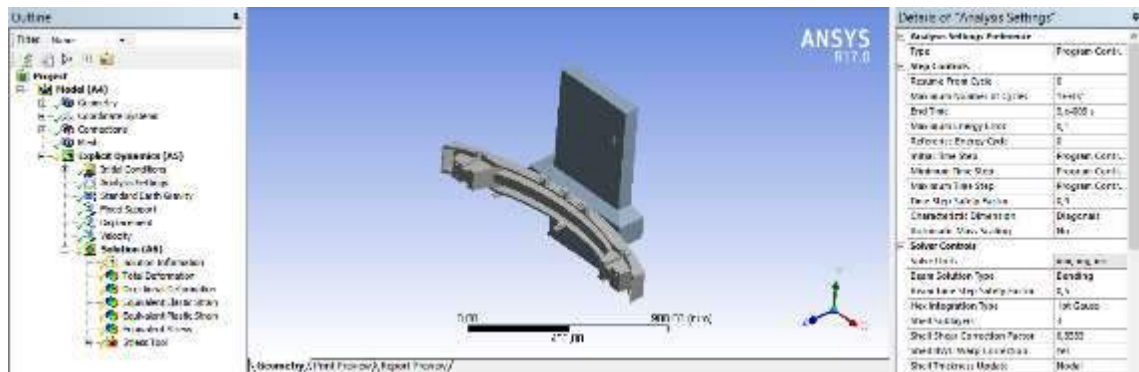


Figura 52-3. Configuración de valores de entrada para los parachoques

Fuente: (Morejón H, 2024)

La configuración del PTD consiste en un péndulo rígido con perfil de impacto definido, instrumentado para medir fuerzas de contacto contra superficies inferiores o superiores, aceleraciones por compensación de inercia y un sistema de sujeción con resortes que simula la flexibilidad del chasis del vehículo según la norma FMSSV 581, por reglamento, la curvatura del arco descrito debe tener un radio constante mínimo de 11 pies.

Las restricciones del daño permitido luego de los impactos, requiere operación normal de luces, puertas, cofre, suspensión y frenos, del mismo modo la norma permite un daño menor en la barra frontal de parachoques pero no desprendimiento de recubrimientos o abolladuras permanentes en paneles externos adyacentes.

En el parachoques delantero de los vehículos livianos se describe proceso el ensayo en el inciso N°11 de la norma FMSSV 581 (**ANEXO B**).

El módulo Explicit Dynamics integrado en ANSYS Workbench constituye una potente herramienta de análisis transitorio altamente no lineal orientado a eventos de corta duración con efectos de alta velocidad como impactos, choques o explosiones, mediante el uso de Explicit Dynamics es posible reproducir las condiciones de impacto sobre el sistema de parachoques considerando efectos dinámicos transitorios, comportamiento plástico del material ante grandes deformaciones, cambio en las condiciones de contacto, entre otros (Bathe, Klaus-Jürgen 1996).

El conjunto de ecuaciones que gobiernan la dinámica de un sistema de partículas o cuerpos rígidos son las conocidas ecuaciones generales de movimiento producto de la segunda ley de Newton, relacionan fuerzas resultantes con aceleraciones y velocidades de cada nodo en una malla de elementos finitos. Explicit Dynamics resuelve mediante integración directa explícita en tiempo la

forma discreta de estas ecuaciones diferenciales para cada incremento temporal, sin necesidad de ensamblar o invertir matrices de rigidez del sistema esto a diferencia del método implícito aplicable a análisis cuasi estático (*ANSYS Explicit Dynamics Analysis Guide 18.2*).

De este modo, las capacidades específicas para modelar problemas de alta energía permitirán estudiar los modos de falla en la barra frontal ante impactos laterales y frontales, así como optimizar geometrías y espesores para mejorar la respuesta del parachoques, en la **Figura 53-3**, se observa el mallado del sistema de impacto de parachoques.

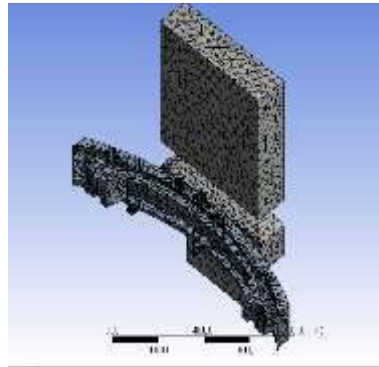


Figura 53-3. Mallado del sistema de parachoques.

Fuente: (Morejón 2024)

Para la obtención de resultados correctos o aproximados a los reales se debe trabajar con una calidad de malla adecuada para estos ensayos por lo cual evaluar la calidad de la malla se convierte en un factor importante al momento de la simulación la **Figura 54-3** muestra la convergencia de la malla la cual debe estar cercana a 1 para que los resultados sean adecuados después de la simulación.

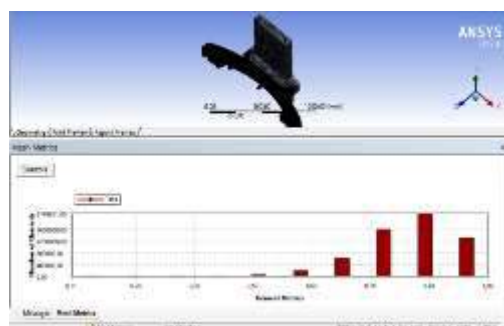


Figura 54-3. Calidad de malla para la simulación de impacto

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.7.7 Restricciones de cada elemento para la simulación

En la etapa de pre-procesamiento dentro del entorno de simulación por elementos finitos de ANSYS, es necesario restringir adecuadamente los grados de libertad sobre las zonas del modelo

3D donde va anclado el componente parachoques (Liu & Quek, 2003), considerando las prescripciones de sujeción especificadas en la normativa que rige estos ensayos de impacto FMVSS 581 (**Anexo B**), se limitaron traslaciones y rotaciones en la barra frontal correspondiendo a los puntos de montaje hacia el chasis.

La correcta restricción del dominio computacional resulta fundamental **Figura 55-3** para replicar las condiciones reales, donde el espécimen se encuentra sólidamente fijado al marco del vehículo, y así garantizar correlación entre las deformaciones virtuales predichas frente a las mediciones experimentales durante los ensayos de impacto a baja velocidad (Zhang et al., 2013).

El modelo tridimensional representando al péndulo percutor dentro del escenario de impacto tampoco se dejó completamente libre, se le aplicaron restricciones de velocidad de impacto, así se permitió la rotación respecto a un eje horizontal que pasa por los puntos de oscilación, pero se bloqueó cualquier traslación según ejes perpendiculares que comprometerían la naturaleza de péndulo ideal requerido (Hernández et al., 2022). Las adecuadas restricciones tanto al parachoques como al impactador garantizan consistencia entre la situación física real y el modelo virtual, requisito para obtener predicciones confiables.

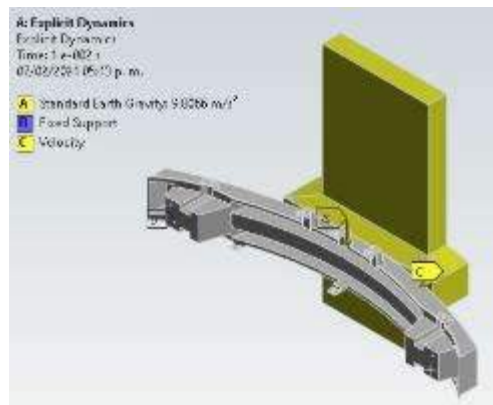


Figura 55-3. Restricciones de la simulación del impacto

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.8 Ensayo de impacto a baja velocidad.

La experimentación de impactos a baja velocidad sobre los sistemas de protección frontal y trasera de vehículos (parachoques) constituye una prueba estándar requerida por las regulaciones de seguridad de Estados Unidos en la FMVSS 581 (Federal Motor Vehicle Safety Standards).

El propósito fundamental es validar ciertos requisitos mínimos de operación, protección a los sistemas del vehículo (sistema de refrigeración, sistema de freno, sistema de luces, sistema de embrague entre otros) así como el de los ocupantes del automóvil frente choques a velocidades bajas (Cando, Diego et al. 2021). Así, a través de impactos controlados por medio de un péndulo

rígido con masa y geometría definida sobre la barra de parachoques, se busca corroborar su adecuado desempeño al absorber energía, deformarse permanentemente y proteger la integridad del vehículo, sin poner en riesgo a los pasajeros.

Equipo utilizado: Detalles técnicos del péndulo, características como masa, geometría y sistema de sujeción.

Para el registro preciso de la interacción dinámica entre el péndulo impactante y la estructura del parachoques durante los breves momentos de la colisión, se emplean sistemas de adquisición a baja velocidad tanto para las fuerzas de contacto como las aceleraciones y deformaciones resultantes (G Keni, Laxmikant et al. 2021).

3.10.8.1 Dinámicas de energías

La energía cinética del péndulo en el punto de impacto contra la barra frontal de parachoques responde a la conocida formulación clásica en términos de su masa suspendida y la altura relativa respecto al punto de equilibrio o reposo, se puede expresar también en función del radio o longitud del brazo del péndulo medido hasta el pivote, y del ángulo de elevación al cual se haya inicialmente lanzado, tal como describe la ecuación basada en principios de conservación de energía mecánica para sistemas oscilatorios, con las geometrías y configuración del equipo de impactos, se tiene otra vía analítica para determinar la energía resultante durante el choque (Meriam, James L. et al. 2015).

E_i = Energía en impacto

P = Peso péndulo

R_{eje} = longitud eje de rotación

E_d = Energía después del ensayo de impacto

β = ángulo obtenido después del impacto

E_p = Energía absorbida por parte de probeta

$$E_i = P * h$$

$$E_i = P * R_{eje}(1 - \cos\theta)$$

$$E_d = P * h'$$

$$E_d = P * R_{eje}(1 - \cos\beta)$$

Mediante sistemas de medición láser o marcas físicas en el brazo del péndulo, se puede registrar dicho ángulo de elevación en cada experimentación, para incorporarlo en los cómputos respectivos junto con la longitud hasta el punto de pivote, resultando así en valores de energía

potencial previa y por ende cinética durante el choque contra las muestras de parachoques (Benaroya, Haym et al. 2017).

3.10.8.2 Cálculo del ángulo de elevación del péndulo

El ángulo de elevación del péndulo se determina a partir de la energía cinética y potencial objetivo que se desea alcanzar durante la fase de impacto contra la barra frontal de parachoques. Conociendo así la velocidad requerida y empleando las ecuaciones clásicas de las energías que relacionan velocidad, la gravedad y la altura, se realiza el cálculo trigonométrico para obtener el ángulo específico al cual se debe elevar el brazo de sujeción para que, tras oscilar como péndulo, se alcance la velocidad calculada en el punto más bajo con la consecuente energía cinética igualmente determinada (Boresi, Arthur P. et al. 2002).

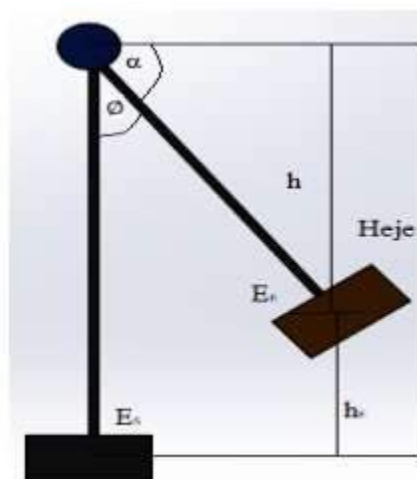


Figura 56-3. Esquema gráfico del péndulo de ensayo

Fuente: (Telechana, Christian 2022).

h_e = altura de elevación

h = altura total

h_{eje} = altura del eje del péndulo 3530 mm

ϕ = ángulo de elevación del péndulo

$$E_p = E_c$$

$$mgh_e = \frac{1}{2}mv^2$$

$$h_e = \frac{v^2}{2g}$$

$$h_e = \frac{(1,38m/s)^2}{2 * 9,81m/s^2} = 0,097m$$

$$h = h_{eje} - h_e$$

$$h = (3530 - 97)mm = 3433 \text{ mm}$$

$$\text{sen}\alpha = \frac{h}{h_{eje}}$$

$$\text{sen}\alpha = \frac{3433mm}{3530mm} = 0,9752$$

$$\alpha = 76,53^\circ$$

$$\emptyset = 90^\circ - 76,53^\circ = 13,46^\circ$$

Luego de la verificación visual rutinaria del adecuado estado del equipo de impacto estándar **Figura 57-3**, se procedió a realizar al ajuste de los parámetros de configuración y operación, el ángulo de elevación del brazo de sujeción del péndulo con respecto a la vertical fue ajustado a $13,46^\circ$, resultando en una altura inicial del impactador de 1,1 metros sobre el piso, con la masa suspendida de 352,5 kg, esto le confirió una energía cinética previa al impacto de 0,336 kJ, producto de su velocidad lineal resultante de 1,38 m/s, la cual pudo corroborarse experimentalmente con los instrumentos de registro disponibles (medidor laser de deformaciones).



Figura 57-3. Configuración de parámetros del péndulo de ensayo

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.8.3 Configuración de masa impactante

La normativa FMVSS 581 que regula la experimentación de impactos sobre parachoques automotrices especifica rangos admisibles ver **Anexo B** para la masa suspendida en el extremo

del péndulo, buscando replicar las condiciones de peso que durante una colisión experimentaría el vehículo debido a su carga nominal.

Considerando la gama estándar, se seleccionó una masa total indicada por la norma FMVSS 581, de modo que se emulen fielmente los modos de falla y energías involucradas cuando su propia masa impacta las barras de la defensa durante episodios reales de choques frontales. Una serie de bloques de acero sólido fueron colocados según requerimiento para después ensamblarse en el soporte del péndulo **Figura 58-3**, verificando su centro de gravedad para evitar desequilibrios y oscilaciones, por lo que, la energía cinética dependerá únicamente de la altura relativa lograda en cada experimento.



Figura 58-3. Preparación de la masa del péndulo

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.8.4 Preparación de la probeta del parachoques en el ensayo de impacto

La muestra experimental de la barra de refuerzo de parachoques elaborada en material compuesto se fijó con pernos en zonas específicas de la superficie (cajas de sujeción del parachoques) donde previamente se realizaron perforaciones para el correcto acople de la probeta al eje fijo del péndulo como indica la instalación de parachoques original en un vehículo **Figura 59-3**.

La pieza de prueba así equipada se sujeta de forma rígida según el área de contacto esperada, garantizando empotramiento seguro para evitar desprendimientos no deseados y permitir correlación de daños, además de considerar el ángulo normativo de impacto (**Ver Anexo B**).



Figura 59-3. Preparación del parachoques para el ensayo de impacto

Fuente: (Morejón H, 2024)

Para el registro de desplazamientos y deformaciones transitorias durante la fracción de segundo que dura la colisión entre el péndulo y la estructura del parachoques, se emplean sistemas ópticos sin contacto tipo láser **Figura 60-3** con capacidad de medición altamente dinámica (Zhang, Song 2018).

El principio operativo se basa en un láser puntual que incide sobre la superficie de interés, reflejando un haz que es recogido con precisión milimétrica mediante un sensor CCD, correlacionando el cambio relativo de posición del punto respecto a una línea base con la deformación experimentada, estos sensores se calibran y posicionan enfocando la zona media de la probeta, permitiendo medir desplazamientos resultantes del choque frontal, sus elevadas frecuencias de muestreo entregan información clave del evento de impacto para correlación con modelos computacionales (Schreier, Hubert et al. 2009).



Figura 60-3. Calibración de sistema de medición laser

Fuente: (Morejón H, 2024)

3.10.8.5 Protocolo de ensayo de impacto con péndulo

Cumplida la adecuada preparación de equipos, adquisición, posicionamiento de muestra e instrumentación como se lo muestra en la **Figura 61-3**, se estipulan y corroboran parámetros operativos como masa del péndulo, dimensión del brazo, altura efectiva, ángulo de impacto según zona, y la condición de disparo por interrupción una vez alcanzada la orientación pretendida (Cando, Diego et al. 2021).

La persona a cargo da inicio liberando de forma controlada el mecanismo de sujeción mecánico, permitiendo así el movimiento de oscilación idealmente de forma tangencial al inicio para lograr máxima transferencia de energía durante el impacto. El sistema de adquisición, las cámaras de alta velocidad se usan mediante la señal de inicio al abrir las mordazas del péndulo, registrándose en alta fidelidad toda la colisión, el péndulo se detiene mediante un sistema amortiguador de contrapesos laterales que evitan daños mayores (Cando, Diego et al. 2021).



Figura 61-3. Péndulo de para configurado para ensayo de impacto

Fuente: (Morejón H, 2024)

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La verificación física mediante péndulo oscilante sobre prototipos de parachoques bajo condiciones controladas reproduce colisiones frontales del vehículo durante circulación real, constituyendo un indispensable método normado para caracterización de estos sistemas. Simultáneamente, el análisis por elementos finitos permite una simulación computarizada de tales impactos. En el presente estudio, se sometió tanto al modelo comercial de parachoques como al prototipo desarrollado con material bio-compuesto, a rigurosos ensayos de impacto ejecutados sobre un péndulo de impacto (**Anexo D**), así también, se recrearon virtualmente idénticas condiciones de choques sobre los modelos 3D de ambos especímenes. El siguiente capítulo recopila y analiza en detalle los resultados arrojados durante esta etapa experimental y de simulación computarizada, en términos de daño estructural, deformaciones plásticas resultantes, y energía absorbida por los distintos parachoques expuestos a choques controlados.

4.1 Simulación del ensayo de impacto a baja velocidad

La simulación por elementos finitos del ensayo de impacto sobre los modelos tridimensionales del parachoques permite obtener una estimación temprana sobre el comportamiento dinámico frente a choques, el software ANSYS posibilita representar la interacción cuando el péndulo impacta al parachoques, con el fin de obtener resultados acerca de distribuciones de tensiones y deformaciones, sobre el parachoques comercial de polímero ABS y el desarrollado en material bio-compuesto. Comparando estos resultados contra los valores experimentales, se evalúa la precisión de las predicciones por elementos finitos.

4.1.1 Validación de la simulación de impacto a baja velocidad

La gráfica obtenida de la simulación entre el impactador y el parachoques frontal en estudio del vehículo, detalla como este soporta al impactador y al mismo tiempo lo aleja, logrando que los parachoques cumplan con su función de absorción de impactos.

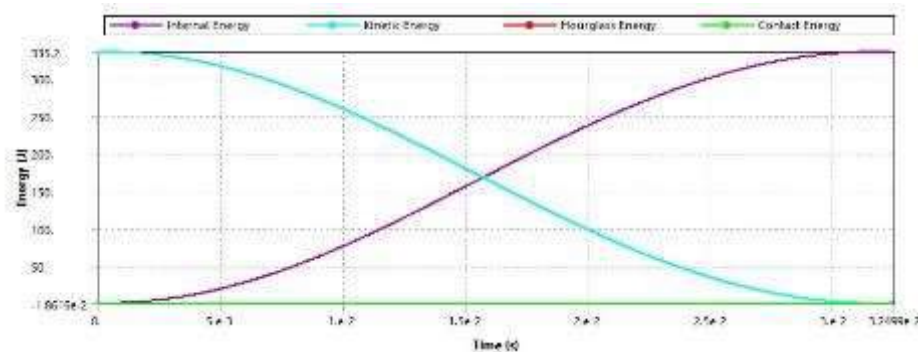


Figura 62-4. Conducta de las energías en la simulación de impacto

Fuente: (Morejón H, 2024)

La **figura 62-4** detalla la variación de la energía cinética (segmento de color celeste) del impactador, así también, la energía interna (segmento de color morado) del sistema de parachoques, cada uno de estos puntos son importantes para comprender el comportamiento de la simulación y su posterior validación.

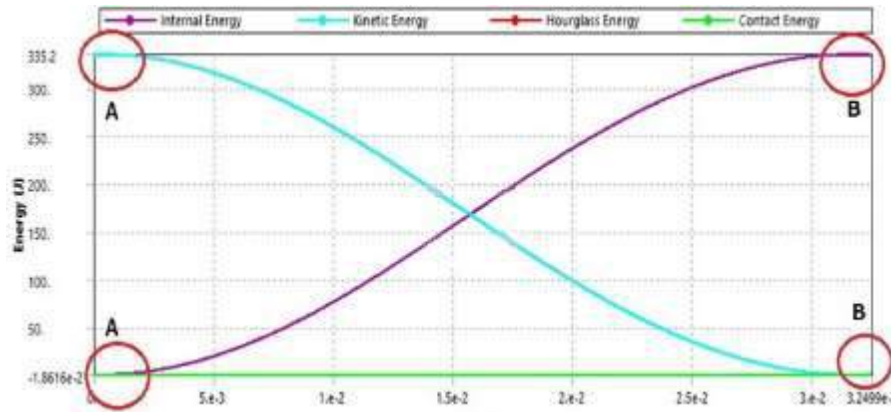


Figura 63-4. Análisis de energías en la simulación de impacto

Fuente: (Morejón H, 2024)

En la **figura 63-4**, existen dos momentos de análisis que son identificados por los segmentos A, B, son puntos críticos en la simulación. El punto de análisis A, hace referencia al lugar de intersección o contacto entre el impactador y el parachoques frontal del vehículo dando comienzo al impacto entre estos dos elementos en este instante el tiempo es mínimo, debido a que en el modelo de simulación el impactador fue situado a una distancia menor a 1mm del parachoques optimizando el tiempo y los recursos computacionales. El punto de análisis B, demuestra como la energía es transformada en deformación, en este momento de simulación se observa como el impactador es frenado y es expulsado por el parachoques del automóvil, debido a este comportamiento entre los elementos de impacto la energía cinética en su totalidad es convertida en deformación.

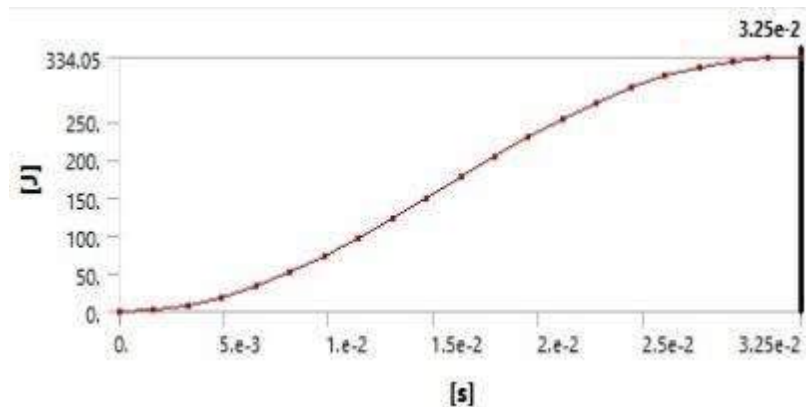


Figura 64-4. Curva de energía interna de la simulación

Fuente: (Morejón H, 2024)

En la **figura 64-4**, se observa el valor de la energía interna que es absorbida en el momento del impacto en el material configurado en el inicio de la simulación.

Maximum Value Over Time		Minimum Value Over Time	
Internal	334,36 J	Internal	0 J
Kinetic	335,2 J	Kinetic	0,82379 J
Plastic Work	0 J	Plastic Work	0 J
Hourglass	0 J	Hourglass	0 J
Contact	0 J	Contact	-1,8311e-002 J
Total	335,2 J	Total	335,17 J

Figura 65-4. Valores resultantes de la energía en la simulación de impacto

Fuente: (Morejón H, 2024)

Para la validación de la simulación del ensayo de impacto a baja velocidad del sistema de parachoques frontal del vehículo, la energía de contacto debe estar por debajo del 10% de la energía interna del sistema de simulación, si la energía de contacto excede el 10% de la energía interna, indica que los efectos numéricos están teniendo un impacto demasiado grande, lo que podría comprometer la precisión de la simulación (Hallquist, John O. 2006). La **figura 65-4**, muestra los valores resultantes de energía del sistema de parachoques, en donde la energía de contacto tiene un valor de 0,00183 J y una energía interna total de 334,36 J.

$$EC = \frac{E. contacto}{E. Interna} * 100\%$$

$$EC = \frac{0,00183}{334,36} * 100\%$$

$$EC = 0,000547\%$$

$$EC < 10\%$$

Con el resultado obtenido se observa que el valor porcentual 0,000547 está por debajo del 10% de la energía interna validando de este modo la simulación del sistema de parachoques.

4.1.2 Deformación de la probeta de parachoques frontal

La zona del parachoques automotriz sujeta a mayores cargas de impacto es la región central frontal, ya que recibe el golpe directo en caso de colisiones frontales, por ello, entender el comportamiento a la deformación de esta área resulta crítico para un diseño óptimo que maximice la absorción de energía (Ha, Ngoc San et al. 2020).

Los sistema de parachoques de los vehículos esta dispuestos a sufrir a impactos frontales durante la conducción por lo que su integridad estructural ante deformaciones es un aspecto crítico a evaluar, con ayuda de los lineamientos la norma FMVSS 581 se estudió el comportamiento a la deformación de un parachoques comercial sometido a una fuerza de impacto.

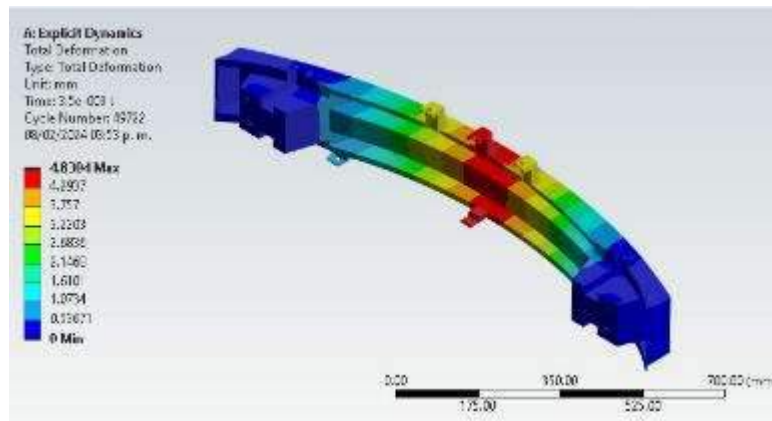


Figura 66-4. Deformación del parachoques comercial (ABS)

Fuente: (Morejón H, 2024)

La modelación computacional por elementos finitos del ensayo de impacto permitió estimar la deformación del prototipo de prueba representando el sistema de parachoques frontal, elaborado con el termoplástico de alto impacto ABS. Luego de recrear el escenario normativo donde el péndulo percutor colisiona la superficie media del componente automotriz, los análisis arrojaron una deformación máxima de 4,8 mm ver **Figura 66-4** en la zona de contacto.

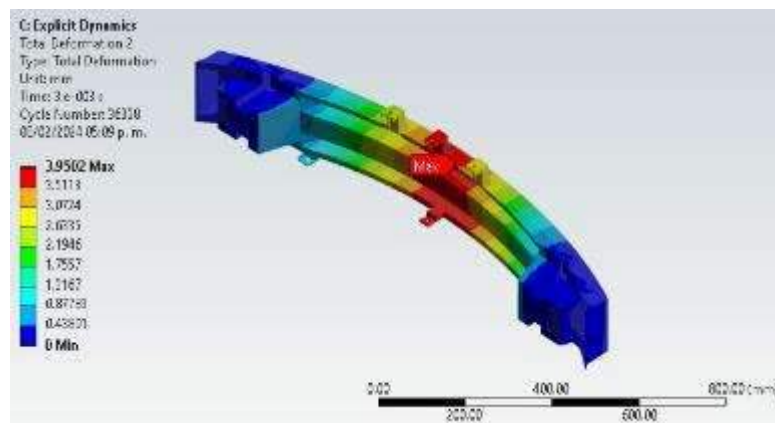


Figura 67-4. Deformación del parachoques con materia bio-compuesto

Fuente: (Morejón H, 2024)

La máxima deformación resultante de la simulación en ANSYS en la zona de contacto directo del golpe sobre la probeta del material bio-compuesto con fibra tejida fue de 3,95 mm ver **Figura 67-4**, muy cercana a los 4 mm que exhibió la variante comercial de termoplástico ABS sometida al mismo protocolo experimental de impactos.

Esta precisión en términos de deformación resultante valida las capacidades de las herramientas de simulación computacional por elementos finitos para representar el complejo sistema dinámico inherente a choques y colisiones entre componentes de un vehículo automotor. El estrecho rango entre los resultados y observaciones experimentales refuerza la hipótesis sobre el desempeño

equivalente entre el material bio-compuesto desarrollado y los sistemas de parachoques convencionales actuales.

4.1.3 Esfuerzo equivalente de Von-Mises

El criterio de Von Mises permite predecir el inicio de la deformación plástica de materiales dúctiles sometidos a varios esfuerzos, este modelo estipula que la estructura atómica del material provoca el movimiento interno cuando supera un valor crítico dependiente del material, matemáticamente la energía de distorsión que se almacena en el material puede calcularse a partir de los valores de tensiones que están actuando sobre la zona de impacto.

La simulación computacional del comportamiento mecánico de la probeta mediante el software ANSYS Workbench, incorporó el criterio de Von Mises para el modelado del material bio-compuesto que permite estimar cuándo comenzará la fluencia plástica (deformación permanente), el criterio de Von Mises es un criterio tensorial que se ha comprobado efectivo, tanto experimental como numéricamente, para predecir el inicio del flujo plástico en materiales isotrópicos (propiedades iguales en todas direcciones) y ortotrópicos (propiedades diferentes en tres direcciones ortogonales) (Leppin et al., 2018).

Los resultados de la simulación muestran los valores del esfuerzo equivalente de Von Mises a lo largo de la probeta comercial, concentrando valores máximos de 8,85 Mpa en el punto de sujeción de la barra frontal del parachoques al chasis del vehículo ver **Figura 68-4**. Esta concentración de tensiones explica la concentración de esfuerzos en este punto.

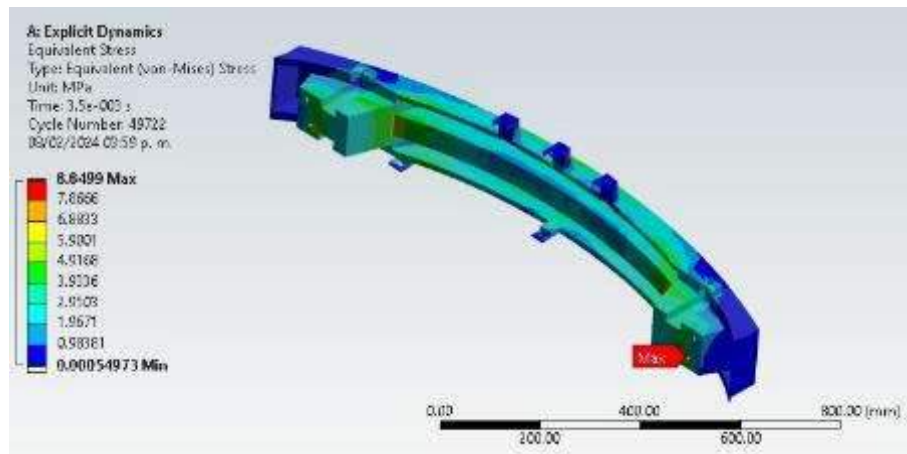


Figura 68-4. Esfuerzo equivalente probeta comercial de parachoques

Fuente: (Morejón H, 2024)

La **Figura 69-4** muestra el mapa de contornos del esfuerzo de Von Mises resultante de la simulación por elementos finitos sobre la geometría de la probeta de parachoques elaborada con el material bio-compuesto, se aprecian concentraciones que superan los 6,94 MPa según la simulación realizada.

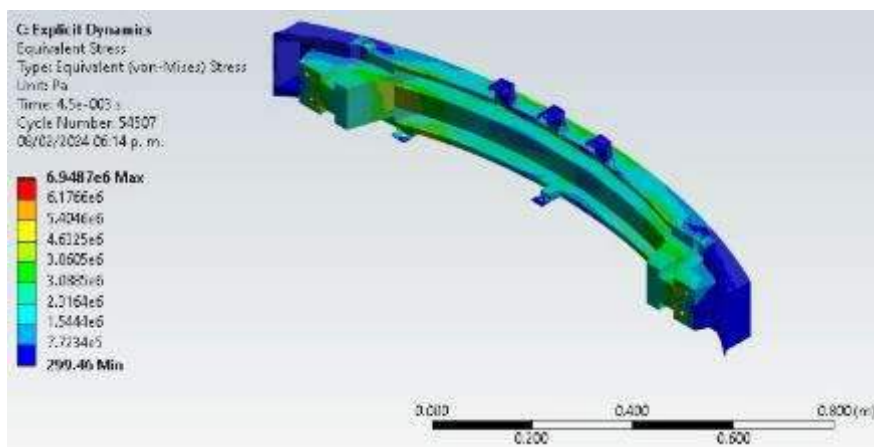


Figura 69-4. Esfuerzo equivalente del parachoques de material bio-compuesto

Fuente: (Morejón H, 2024)

Los valores de esfuerzo equivalente resultante de 8,84 MPa y 6,95 MPa predichos por la simulación computacional mediante método de elementos finitos, concentran las tensiones en puntos críticos de la probeta comercial de ABS y del prototipo de material bio-compuesto respectivamente, luego del impacto con el percutor oscilante.

Dichos niveles se mantienen por debajo de los límites elásticos, reportados para los materiales constituyentes de ambos prototipos de prueba sometidos al evento de choque simulado.

Los resultados validan consistentemente la idoneidad del diseño, materiales y proceso de fabricación implantados tanto para el sistema de parachoques de polímero ABS como el bio-compuesto (resina epoxi y fibra de bambú), para soportar solicitudes intensas de corta duración como los impactos frontales sobre las barras frontales automotrices, sin pérdidas de integridad funcional según estipula la normativa FMVSS 581 aplicable al sistema de protección y absorción sobre vehículos.

4.1.4 Factor de seguridad

El factor de seguridad (FS) es un parámetro adimensional ampliamente utilizado en ingeniería de diseño para cuantificar los márgenes de resistencia frente a condiciones extremas de operación. Se define como la razón entre la capacidad máxima del sistema y la sollicitación real aplicada, valores típicos del FS están entre 1,5 y 3 dependiendo la criticidad de la aplicación (Budynas, Richard et al. 2014)

En el caso de análisis de elementos finitos sobre componentes automotrices, se recomienda un factor de seguridad mayor o igual a 2 entre límite elástico del material y máximo esfuerzo de Von Mises resultante de las simulaciones computacionales, esto valida la integridad estructural y evita las deformaciones permanentes no deseadas ante impactos o vibraciones severas (Laxman, S. et al. 2007).

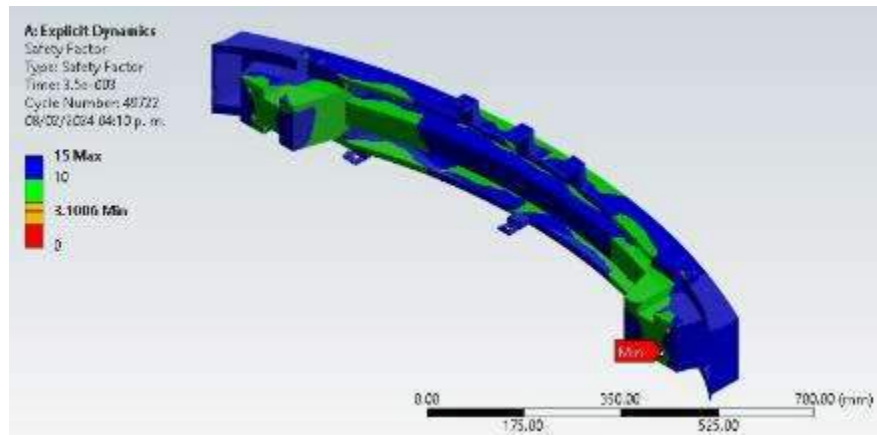


Figura 70-4. Factor de seguridad parachoques comercial

Fuente: (Morejón H, 2024)

El análisis por simulación computacional permitió estudiar la respuesta tensional del sistema de parachoques (barra frontal) elaborada en material ABS, cuando se le aplica una fuerza perpendicular a los extremos de sujeción, buscando recrear un escenario de impacto frontal severo durante la conducción. La **Figura 70-4** señala un factor de seguridad igual a 3,1 en el punto de concentración de esfuerzos, validando integridad y soporte de solicitaciones esperadas sin fractura prematura.

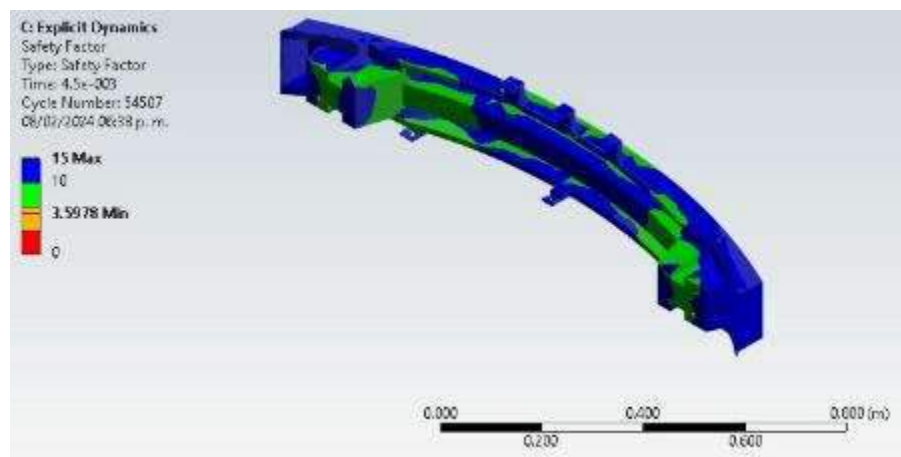


Figura 71-4. Factor de seguridad del parachoques material compuesto.

Fuente: (Morejón H, 2024)

El análisis tensional del parachoques de material bio-compuesto evidencia concentraciones locales del esfuerzo equivalente de Von Mises en distintas zonas geométricas cuando se aplican cargas perpendiculares representativas de posibles impactos, los valores resultantes se mantienen por debajo del límite elástico del material bio-compuesto, traduciéndose en factores de seguridad superiores a 1 validando integridad estructural sin riesgo de falla según los criterios de diseño mecánico, la **Figura 71-4** muestra un FS de 3,59 que corrobora los criterios de diseño del

parachoques, así también este FS es ligeramente superior al parachoques comercial, validando su resistencia al impacto.

Este margen de resistencia indica que la capacidad máxima del elemento ante tensiones elevadas es mayor que las solicitaciones de servicio, cumpliendo las especificaciones estándar que estipulan factores de seguridad mínimos de 2 para componentes automotrices (Laxman, S. et al. 2007).

4.2 Ensayo de impacto a baja velocidad por péndulo.

El presente estudio evaluó el comportamiento ante impactos de tres tipos de probetas del sistema de parachoques, una probeta comercial de polímero ABS, una probeta de material bio-compuesto con fibras longitudinales de bambú y resina epoxi y una tercera probeta de bio-compuesto con el mismo tipo de fibra pero con un tejido bidireccional (tejida), cada una de estas se verifican en el péndulo experimental por tres ocasiones para obtener valores precisos del ensayo de impacto, las probetas se obtuvieron por molde y estratificación manual a partir del elemento comercial del vehículo Chevrolet Aveo family, las probetas de material compuesto se fabricaron con una fracción en peso de 30% de fibras y 70% de resina Epoxi, tanto la disposición longitudinal como el tejido de las fibras de bambú buscaban mejorar las propiedades a impacto del bio-compuesto en comparación al polímero ABS.

4.2.1 Deformación

Una vez realizado el ensayo de impacto en el parachoques comercial ver **Figura 72-4**, se observa la deformación que se genera en el punto más crítico, así también cada uno de los valores arrojados por el instrumento laser de las deformaciones presentes en los tres ensayos realizados, se evalúa mediante una inspección visual detallada el elemento y se corrobora que no existe fisuras en la superficie, convirtiendo a este elemento apto para la absorción de energía de impacto según norma FMVSS 581 también detalla que los sistemas del vehículo no deben sufrir daños considerables.



Figura 72-4. Ensayo de impacto probeta comercial de parachoques

Fuente: (Morejón H. 2024)

Así mismo, con la prueba física de la probeta en el péndulo de impacto se pudo observar un comportamiento similar a la simulación (**Figura 66-4**), obteniendo los siguientes datos de deformación.

Tabla 28-4. Valores de deformación después del ensayo de impacto

N° Ensayo	Angulo de elevación del péndulo	Deformación máxima del parachoques (mm)
1	13,46°	4,00
2	13,46°	5,00
3	13,46°	4,00
Promedio	13,46°	4,33

Realizador por: (Morejón H, 2024)

La experimentación controlada sobre el espécimen comercial de parachoques automotriz arrojó lecturas consistentes de deformación resultante en la zona de impacto directo con la masa oscilante, en los tres ensayos realizados se registraron valores de deformación de 4 mm, 5 mm y nuevamente 4 mm respectivamente ver **Tabla 28-4**. Estas mediciones, obtenidas con instrumental láser de alta precisión, denotan una excelente receptibilidad del espécimen compuesto de ABS de alto impacto para replicar su comportamiento.

El promedio de las tres mediciones obtiene un valor representativo de deformación de 4,33 mm debida al choque con el péndulo normado (**ANEXO B**), esta magnitud resulta consistente con la elevada tenacidad de los termoplásticos de ingeniería como el ABS, capaces de experimentar una extensión elástica significativa sin fracturarse ante sollicitaciones intensas como las producidas durante estos ensayos de impacto a baja velocidad. Los bajos niveles de deformación, todos dentro de rangos esperables evidencian contundentemente la idoneidad del parachoques comercial para cumplir los requerimientos de integridad funcional según estándares FMVSS 581 (**ANEXO B**) que aplican para este componente de alta criticidad en la seguridad automotriz.

Del mismo modo, se ensayó las probetas fabricadas con material compuesto, con fibra de bambú longitudinal (color verde) y con fibra tejida (color azul), las misma tomaron el mismo proceso de ensayo que la probeta de parachoques comercial obteniendo los siguientes datos.



Figura 73-4. Ensayo de impacto probeta de parachoques fibra longitudinal y fibra tejida

Fuente: (Morejón H, 2024)

La **Figura 73-4** muestra la colocación y la configuración de las probetas a ensayar en el péndulo mecánico bajo las mismas condiciones ya establecidas.

Tabla 29-4. Valores de deformación del material compuesto ensayo de impacto

N° Ensayo	Angulo de elevación del péndulo	Deformación máxima del parachoques fibra longitudinal (mm)	Deformación máxima del parachoques fibra tejida (mm)
1	13,46°	6,00	2,00
2	13,46°	6,00	4,00
3	13,46°	7,00	3,00
Promedio	13,46°	6,33	3,00

Realizador por: (Morejón H, 2024)

El prototipo de prueba del sistema de parachoques elaborado en material bio-compuesto con fibras unidireccionales de bambú orientadas axialmente, exhibió las siguientes deformaciones producto del impacto normado experimental: 6 mm, 6 mm y 7 mm como se muestra en la **Tabla 29-4**; en los tres ensayos realizados variando la orientación para promediar la respuesta, el valor promedio resultante de 6,33 mm denota una mayor deformabilidad de este modelo frente al parachoques comercial de referencia.

Esta aparentemente beneficiosa capacidad de experimentar mayores extensiones elásticas se vio lamentablemente comprometida ante la presencia de una fisura transversal en la zona media de impacto, la cual bifurca completamente el espesor de la probeta en el punto de contacto con mayor concentración tensional debido al choque. Dicha disgregación estructural se atribuye a una combinación de factores como insuficiente deformación elástica ante las intensas tasas de esfuerzo por limitada ductilidad de la disposición unidireccional del refuerzo en la matriz polimérica, sumado a desalineaciones microscópicas de las fibras que debilitan el material bio-compuesto.

En definitiva, la presencia de esta fractura frontal compromete la efectividad del parachoques al no poder garantizar integridad ante impactos sin roturas prematuras, incumpliendo los requerimientos sobre capacidad de absorción energética y resistencia que estipula la FMVSS 581 para seguridad automotriz.

La probeta de ensayo consistente en el sistema de parachoques desarrollado con material bio-compuesto reforzado mediante un tejido de la fibra de bambú, exhibió las siguientes deformaciones máximas debido al impacto normativo experimental: 2 mm, 4 mm y 3 mm ver **Tabla 29-4**; según las tres repeticiones realizadas, el promedio resultante de estas deformaciones plásticas fue de 3 mm.

Este valor promedio se encuentra incluso por debajo de los 4,33 mm obtenidos para el parachoques de referencia de ABS, evidenciando la mayor rigidez que confiere la configuración tejida de los haces de refuerzo en dos direcciones, la disposición bidireccional de las fibras

naturales restringe la ductilidad si se compara frente a la orientación puramente unidireccional, pero maximiza la resistencia y módulo elástico según ejes principales.

La ausencia total de fracturas o fisuramiento en la superficie de la probeta tejida, incluso en zonas de máxima concentración tensional producidas por el impacto del péndulo oscilante, demuestran una capacidad de deformación balanceada sin llegar a puntos de claudicación del material que deriven en fallas, este comportamiento valida los requerimientos básicos de absorción energética que plantea la FMVSS 581 en parachoques.

La máxima deformación resultante de las simulaciones computacionales en ANSYS para la probeta de parachoques de ABS y el modelo de material bio-compuesto fue de 4,8 mm y 3,95 mm respectivamente. Estos valores exhiben una estrecha concordancia con las deformaciones promedio cuantificadas experimentalmente mediante mediciones láser de alta precisión sobre los correspondientes especímenes luego de ser sometidos a impactos controlados con el péndulo oscilante, siendo de 4,33 mm y 3 mm cada uno.

Esta estrecha correlación entre los resultados de la modelación por elementos finitos y las observaciones físicas constituye evidencia contundente de la precisión y utilidad predictiva de las modernas técnicas de simulación computarizada. Representan adecuadamente el acoplamiento entre la simulación y la prueba experimental de impacto.

Para determinar el error que existe entre los resultados de deformación provenientes de la simulación con los valores obtenidos de la prueba de impacto a baja velocidad, se calcula el error estándar de estimación con ayuda del estudio estadístico t-student, en donde se utiliza la siguiente ecuación (Kutner, Michael H. 2005).

$$\text{Error estandar de estimación (EEE)} = \text{coeficiente de confianza (p)} * \text{error estándar (EE)}$$

Para el coeficiente de confianza, se trabajó con un 95% de nivel de confianza recomendado para ensayos experimentales (Kutner, Michael H. 2005), con este valor porcentual se obtiene la estimación de la variable t procedente de la tabla t-student del **ANEXO J**.

Datos

Cantidad de impactos sobre probeta comercial = $n = 3$

Valor de simulación = 4,83 mm

Varianza = s

Grados de libertad $gl = n - 1 = 2$

Nivel de confianza al 95% = $t = 2,920$

$$s^2 = \frac{(4 - 4,83)^2 + (5 - 4,83)^2 + (4 - 4,83)^2}{3}$$

$$s^2 = \frac{0,6889 + 0,0289 + 0,6889}{3}$$

$$s^2 = 0,4689$$

$$s = 0,6847$$

Error estándar parachoques comercial

$$EEE = 2,920 * \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$EEE = 2,920 * \frac{0,6847}{\sqrt{3}}$$

$$EEE = 1,15$$

Cantidad de impactos sobre probeta de material bio-compuesto tejido = n = 3

Valor de simulación = 3,95 mm

Varianza = s1

Grados de libertad gl = n-1 = 2

Nivel de confianza al 95% = t = 2,920

$$s^2 = \frac{(2 - 3,95)^2 + (4 - 3,95)^2 + (3 - 3,95)^2}{3}$$

$$s^2 = \frac{3,8025 + 0,0025 + 0,9025}{3}$$

$$s^2 = 1,5691$$

$$s = 1,2526$$

Error estándar parachoques material bio-compuesto tejido

$$EEE = 2,920 * \frac{s}{\sqrt{n}}$$

$$EEE = 2,920 * \frac{1,2526}{\sqrt{3}}$$

$$EEE = 2,11$$

Al comparar los resultados de la simulación tanto del parachoques comercial como el de material bio-compuesto tejido con el ensayo de impacto a baja velocidad, se obtiene un error bajo, esto debe al uso del instrumento de medición de deformación laser logrando resultados de calidad tema imprescindible en el inicio de la investigación del sistema de parachoques de material bio-compuesto, con los valores se ratifica que al no existir valores elevados de deformación el parachoques delantero de material bio-compuesto con fibra tejida absorbe la energía producida por un impacto frontal sin llegar a producir daños en los sistemas complementarios de los vehículos como en los pasajeros cumpliendo con lo estipulado en la norma FMVSS 581.

4.2.2 *Inspección visual*

La inspección visual representa una técnica cualitativa invaluable para evaluar modos de falla y mecanismos de daño en prototipos sometidos a ensayos mecánicos estandarizados, ya sean materiales metálicos, polímeros, cerámicos o compuestos, mediante una meticulosa observación de las superficies de contacto recién expuestas, así como de regiones adyacentes, es posible caracterizar procesos de agrietamiento, fractura frágil o dúctil y otros fenómenos relevantes.

La norma FMVSS 581 exige una inspección visual de la probeta del parachoques de material bio-compuesto ver **ANEXO B** para pruebas mecánicas donde se busca correlacionar las fallas físicas observadas con el material utilizado en la manufactura del mismo, aspectos como la forma y topografía de las superficies fracturadas resultan indicativos de mecanismos activos de daño bajo la acción de fuerzas externas. El análisis visual diligente permite incluso la identificación de defectos ocultos previos no detectados mediante otras técnicas convencionales que precipitaron una falla prematura de la probeta.



Figura 74-4. Inspección visual del parachoques comercial

Fuente: (Morejón H, 2024)

La inspección visual posterior al ensayo de impacto sobre la probeta comercial de parachoques automotriz **Figura 74-4**, no evidenció la presencia de fisuras o grietas en la superficie, incluso en la zona de contacto directo con el péndulo durante la colisión controlada. Únicamente se observó una deformación promedio de 4,33 mm de profundidad debido al impacto provocado, la ausencia de agrietamiento frágil a pesar de la existencia de deformación impuesta por la masa oscilante, se atribuye principalmente a la tenacidad del termoplástico base del parachoques junto con una

geometría y espesores adecuados para mitigar concentración de esfuerzos, el componente comercial valida los requerimientos normativos de absorción energética y protección estructural sin comprometer integridad ante impactos frontales de baja velocidad.



Figura 75-4. Inspección visual del parachoques fibra tejida

Fuente: (Morejón H, 2024)

La inspección visual de la probeta de parachoques fabricada con el material bio-compuesto de matriz epoxi reforzada con fibra de bambú bidireccional (tejida) ver **Figura 75-4** no evidenció fisuramiento o grietas tras ser impactada con el péndulo, la no presencia de agrietamiento ante deformaciones se debe a una combinación de factores, entre ellos la tenacidad interlaminar de las capas tejidas del bio-compuesto, la correcta impregnación de los refuerzos por la resina que evita concentración de tensiones en la interfaz, así como una adecuada orientación de las fibras naturales para maximizar absorción energética del impacto sin comprometer integridad del sistema.

Así, el análisis visual preliminar de la probeta de prueba sugiere un comportamiento adecuado ante sollicitaciones con una deformación máxima de 3mm un valor inferior a la deformación del parachoques comercial, cumpliendo requerimientos básicos sobre resistencia al impacto sin evidencias de inicio de grietas que comprometan efectividad como sistema de parachoques automotriz.



Figura 76-4. Inspección visual del parachoques fibra longitudinal

Fuente: (Morejón H, 2024)

La inspección visual de la probeta de parachoques fabricada en material compuesto con fibras de bambú orientadas unidireccionalmente ver **Figura 76-4**, evidenció la presencia de una fisura transversal en la zona media posterior al impacto con el péndulo oscilante, la grieta de aproximadamente 10 mm corta la sección transversal de la probeta, fracturando incluso las capas internas del elemento automotriz, este agrietamiento frágil a pesar de la elevada tenacidad del bio-compuesto se atribuye a variables como, a la probable desalineación puntual de las fibras que concentra esfuerzos en la interfaz debilitando la matriz, junto con insuficiente deformación ante el impacto con el péndulo por falta de capas en direcciones alternas que aporten ductilidad al material bio-compuesto.



Figura 77-4. Fractura del parachoques con configuración de fibra unidireccional

Fuente: (Morejón H, 2024)

La presencia de esta discontinuidad estructural detallada en la **Figura 77-4** compromete severamente la efectividad del sistema de parachoques al fracturarse prematuramente sin alcanzar niveles admisibles de absorción energética, por lo que se requeriría probablemente incrementar el número de capas de fibra, mejorar impregnabilidad de los refuerzos o cambiar la configuración del tejido para restablecer margen de deformación sin falla, el promedio de deformación de esta probeta llego a 5,33 mm superior a los ensayos anteriores pero provocó una grieta que compromete el funcionamiento del parachoques con esta configuración de fibra.

4.2.3 Análisis comparativo de peso entre configuraciones de parachoques

La masa del sistema de parachoques influye sobre aspectos en el desempeño automotriz como consumo de combustible y maniobrabilidad, por lo que la industria ha enfocado esfuerzos en aligeramiento de componentes externos sin detrimento de integridad. Los materiales compuestos representan una alternativa por mejorar la relación resistencia/peso, por lo que se analiza comparativamente las masas de los prototipos de parachoques estudiados, el modelo comercial de ABS y los desarrollados en bio-compuesto de bambú/epoxi. Relacionando porcentualmente el

peso de cada probeta, se cuantificará la efectividad del enfoque más ecológico para satisfacer métricas de aligeramiento que demanda el sector automotriz actual.



Figura 78-4. Medición de masa de cada tipo de parachoques

Fuente: (Morejón H, 2024)

La medición experimental de masa de los distintos prototipos de parachoques arrojó un peso total de 2924 gramos (equivalente a 2,924 kg) para el modelo comercial de referencia, manufacturado en termoplástico ABS mediante procesos de moldeo por inyección convencional en la industria automotriz ver **Figura 78-4**. En contraste, el prototipo desarrollado con el nuevo material bio-compuesto exhibió una masa mayor, tanto para la configuración con refuerzos unidireccionales de fibra de bambú (3103 g), como con la variante de disposición tejida multidireccional (3031 g) como lo indica la **Figura 78-4**. Esto representa incrementos porcentuales en peso total de 6,2% y 3,6% respectivamente frente al prototipo base de ABS.

Si bien en términos de peso el bio-compuesto resultante no logra aún una reducción de peso respecto a tecnologías actuales de parachoques, éste logra un desempeño funcional equivalente mientras reduce huella ambiental, constituyendo una alternativa prometedora considerando el enfoque de la presente investigación.

En conclusión, aunque el objetivo de aligeramiento queda parcialmente superado en esta etapa preliminar, la evidencia técnica sobre factibilidad constituye un punto de partida que futuras iteraciones pueden perfeccionar en sinergia entre ligereza, resistencia y beneficio ecológico.

4.2.4 Cálculo de energías presentes durante el ensayo de impacto

Los ensayos de impacto consisten en hacer colisionar un elemento impactante o proyectil contra una probeta a una velocidad definida, transfiriendo así energía cinética al espécimen que es parcialmente absorbida a través de deformación y diversos mecanismos de daño ante la sollicitación dinámica, un adecuado análisis basado en principios de conservación de la energía, es posible cuantificar la energía inicial, final y absorbida durante cada evento de impacto experimental, constituyendo una información valiosa para caracterizar materiales y estructuras bajo cargas de choque (Chen, Yafeng et al. 2017).

4.2.4.1 Energía de absorción

La cuantificación de la capacidad de absorción energética resulta indispensable para caracterizar el desempeño de los sistemas de parachoques automotrices sometidos a ensayos de impacto. La energía disipada por el prototipo durante el choque controlado representa la magnitud de interés para validar cumplimiento normativo y evaluar alternativas de materiales.

Existen diversos abordajes para estimar esta energía absorbida (E_{abs}) a partir de los resultados experimentales. Los Métodos se basan en comparar la energía inicial (E_c) del péndulo contra la energía remanente después del impacto una vez se ha deformado la probeta **Figura 79-4**, otra alternativa es correlacionar E_{abs} con la reducción de altura del centro de masa del péndulo antes y después de la colisión (Telechana, Christian 2022).

Las expresiones analíticas involucran parámetros dimensionales del prototipo, propiedades del material, velocidad de impacto, masas relativas, deformaciones resultantes y cambios en la cinética del cuerpo percutor luego del contacto con la superficie del parachoques.

Tabla 30-4. Deformación promedio de los diferentes parachoques

Probeta de Ensayo	Deformación promedio del parachoques (mm)
Comercial	4,33
F. Tejida	3,00
F. Longitudinal	6,33

Realizador por: (Morejón H, 2024)

$$E_{p_i} = E_{p_f} + \text{friccion} + E_{abs}$$

Dónde:

E_{abs} = Energía de impacto.

E_{p_i} = Energía potencial inicial.

E_{p_f} = Energía potencial final.

Fricción = causada por el aire y por el rozamiento del eje, no se considera fricción.

Para el parachoques comercial se tiene lo siguiente,

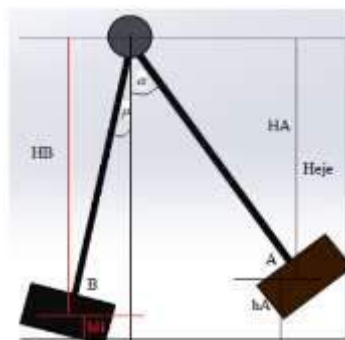


Figura 79-4. Diagrama de impacto del péndulo de ensayo

Fuente: (Telechana, Christian 2022).

$$E_{abs} = E_{p_i} - E_{p_f}$$

$$E_{abs} = E_{p_i} - E_{p_f}$$

$$E_{abs} = mgh_i - mgh_f$$

$$E_{abs} = (352,5Kg) \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (Heje - HA) - (352,5Kg) \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (Heje - HB)$$

$$E_{abs} = (352,5Kg) \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (hA) - (352,5Kg) \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (hB)$$

$$E_{abs} = (352,5Kg) \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (hA) - (353,5Kg) \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (hB)$$

$$\cos\alpha = \frac{HA}{Heje}$$

$$HA = \cos\alpha * Heje$$

$$Heje = 3530mm$$

$$HA = \cos(13,46^\circ) * 3530$$

$$HA = 3433.04mm$$

$$HA = 3,43304m$$

$$\text{sen}\mu = \frac{\text{deformación}}{Heje}$$

$$\text{sen}\mu = \frac{4,33mm}{3530mm}$$

$$\mu = \text{sen}^{-1} \left(\frac{4,33mm}{3530mm} \right) = 0,0702^\circ$$

$$\mu = 0,0702^\circ$$

$$\cos\mu = \frac{HB}{Heje}$$

$$HB = \cos\mu * Heje$$

$$Heje = 3530mm$$

$$HB = \cos(0,0702^\circ) * 3530$$

$$HB = 3529,9973mm$$

$$HB = 3,529997m$$

$$hA = Heje - HA$$

$$hA = 3530 - 3433,04$$

$$hA = 96,96mm$$

$$hA = 0,09696m$$

$$hB = Heje - HB$$

$$hB = 3530 - 3529,99$$

$$hB = 0,002649mm$$

$$hB = 2,649 \times 10^{-6}m$$

$$Eabs = (352,5Kg) \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (0,09696m) - (352,5Kg) \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (2,65 \times 10^{-6})$$

$$E1abs = 335,280 J$$

$$E1abs = 335280 mJ$$

$$Epi = (352,5Kg) \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (0,09696m) J$$

$$Epi = 335,29 J$$

Para el parachoques con fibra unidireccional se tiene,

$$\text{sen}\mu = \frac{\text{deformación}}{\text{Heje}}$$

$$\text{sen}\mu = \frac{6,33mm}{3530mm}$$

$$\mu = \text{sen}^{-1} \left(\frac{6,33mm}{3530mm} \right) = 0,1028^\circ$$

$$\mu = 0,1028^\circ$$

$$\text{cos}\mu = \frac{HB}{\text{Heje}}$$

$$HB = \text{cos}\mu * \text{Heje}$$

$$\text{Heje} = 3530mm$$

$$HB = \text{cos}(0,1028^\circ) * 3530$$

$$HB = 3529,9943mm$$

$$HB = 3,53m$$

$$hA = \text{Heje} - HA$$

$$hA = 3530 - 3433,04$$

$$hA = 96,96mm$$

$$hA = 0,09696m$$

$$hB = \text{Heje} - HB$$

$$hB = 3530 - 3529,9943$$

$$hB = 5,68 \times 10^{-3}mm$$

$$Eabs = (352,5Kg) \left(\frac{9,81m}{s^2} \right) (0,09696m - 5,68 \times 10^{-6}m)$$

$$E2abs = 335,27 J$$

$$E2_{abs} = 335270 \text{ mJ}$$

Para el parachoques con fibra tejida se tiene,

$$\text{sen}\mu = \frac{\text{deformación}}{\text{Heje}}$$

$$\text{sen}\mu = \frac{3\text{mm}}{3530\text{mm}}$$

$$\mu = \text{sen}^{-1}\left(\frac{3\text{mm}}{3530\text{mm}}\right) = 0,4869^\circ$$

$$\mu = 0,4869^\circ$$

$$\text{cos}\mu = \frac{HB}{\text{Heje}}$$

$$HB = \text{cos}\mu * \text{Heje}$$

$$\text{Heje} = 3530\text{mm}$$

$$HB = \text{cos}(0,04869^\circ) * 3530$$

$$HB = 3529,9987\text{mm}$$

$$HB = 3,5299987\text{m}$$

$$hA = \text{Heje} - HA$$

$$hA = 3530 - 3433,04$$

$$hA = 96,96\text{mm}$$

$$hA = 0,09696\text{m}$$

$$hB = \text{Heje} - HB$$

$$hB = 3530 - 3529,9978$$

$$hB = 1,27 \times 10^{-3}\text{mm}$$

$$hB = 1,27 \times 10^{-6}\text{m}$$

$$E_{abs} = (352,5\text{Kg}) \left(\frac{9,81\text{m}}{\text{s}^2}\right) (0,09696\text{m} - 1,27 \times 10^{-6}\text{m})$$

$$E3_{abs} = 335,285 \text{ J}$$

$$E3_{abs} = 335285 \text{ mJ}$$

Los valores experimentales del ensayo con péndulo impactante sobre los prototipos de prueba para parachoques automotrices arrojaron valores de energía absorbida de 335280 mJ en la probeta comercial de ABS, 335270 mJ para la variante de material compuesto con fibras de bambú unidireccionales, y 335285 mJ en la versión tejida del bio-compuesto, se aprecian pequeñas diferencias en la capacidad de absorción energética entre las tres configuraciones analizadas, congruente con la naturaleza dúctil y tenaz de los polímeros que facilitan deformación y

mecanismos de daño progresivos ante las sollicitaciones del impacto, se observa que la energía de absorción de la probeta con fibra longitudinal tiene el menor valor de absorción y esto se comprobó por la presencia de fractura en el prototipo de parachoques después del ensayo de impacto.

Los resultados de la energía absorbida durante el ensayo de impacto normativo evidencian desempeños prácticamente idénticos entre las tres configuraciones estudiadas, con magnitudes de disipación muy similares en torno a los 335 J.

Esta equivalencia cuantitativa en la respuesta entre los prototipos, corrobora la hipótesis sobre la factibilidad del material bio-compuesto como alternativa sustituta con al menos el mismo nivel de eficiencia energética que los parachoques comerciales de ABS ante choques frontales.

No obstante, la ocurrencia de una fractura localizada en la probeta reforzada unidireccionalmente contradice las expectativas teóricas de un reforzamiento máximo en la orientación preferencial de las fibras. Esta combinación de elevada absorción promedio con agrietamiento frágil simultáneo probablemente se explica por una dispersión no homogénea direccional de los refuerzos (fibra).

4.2.4.2 *Energía específica*

La energía específica (E_s) es una propiedad que representa la cantidad de energía que un material, componente o sistema puede absorber o almacenar por unidad de masa antes de fallar o deformarse plásticamente.

Se expresa en unidades de energía por unidad de masa, comúnmente en julios por kilogramo (J/kg), la energía específica es un parámetro clave en el diseño de sistemas y componentes donde el peso es un factor crítico, como en la industria aeroespacial, automotriz y de dispositivos portátiles.

Un valor alto de energía específica indica una mayor capacidad de absorción o almacenamiento de energía por unidad de masa, lo que permite optimizar el rendimiento y la eficiencia en términos de peso (Callister, William D. et al. 2013).

$$E_s = \frac{\text{Energía de absorción (J)}}{\text{masa (Kg)}}$$

A continuación, se realiza los cálculos para determinar la energía específica de cada material.

Para el parachoques comercial con material ABS se tiene lo siguiente,

$$E_{s1} = \frac{335,280 \text{ J}}{2,924 \text{ kg}}$$

$$E_{s1} = 114,664 \text{ J/Kg}$$

Tabla 31-4. Energía Específica

Elemento automotriz	Energía de absorción (J)	Masa (Kg)	Energía específica (J/Kg)
Parachoques comercial (ABS)	335,280	2,924	114,664
Parachoques material bio-compuesto (fibra unidireccional)	335,270	3,103	107,115
Parachoques material bio-compuesto (fibra tejida)	335,285	3,031	110,618

Realizador por: (Morejón H, 2024)

Basados en los resultados obtenidos de energía específica para los tres tipos de parachoques evaluados: 114,664 J/kg para el parachoques comercial de ABS, 107,115 J/kg para el parachoques de material bio-compuesto con fibra unidireccional, y 110,618 J/kg para el parachoques de material bio-compuesto con fibra tejida como se indica en la **Tabla 31-4**.

El parachoques comercial de ABS exhibe la mayor energía específica de absorción con 114,664 J/kg, lo que indica una capacidad superior para disipar la energía cinética por unidad de masa durante un impacto en comparación con los bio-compuestos evaluados. Sin embargo, cabe destacar que los valores de energía específica de los parachoques de material bio-compuesto con fibra unidireccional (107,115 J/kg) y fibra tejida (110,618 J/kg) se encuentran muy cercanos al del ABS, demostrando un rendimiento prometedor para aplicaciones de absorción de impactos.

Con el fin de reemplazar el parachoques comercial de ABS por uno de material bio-compuesto de fibra de bambú y resina, se recomienda seleccionar el parachoques con fibra tejida, ya que presenta una energía específica de 110,618 J/kg, la más cercana al valor del ABS y superior a la del bio-compuesto con fibra unidireccional. Esta elección ofrecería una capacidad de absorción de energía comparable al ABS, pero con las ventajas adicionales que brindan los materiales bio-compuestos, como mayor sostenibilidad.

CAPÍTULO V

5 PROPUESTA

Análisis de costos de manufactura

La manufactura de parachoques (barra frontal delantera) tras el diseño conceptual y definición del proceso de fabricación mediante moldeo o estratificación manual, engloba en su totalidad los materiales usados en el proceso, así se tiene por ejemplo la fibra de bambú y la resina epoxi que representan los materiales principales del presente estudio de investigación del material bio-compuesto, por otro lado también existen coste de mano de obra, equipos y elementos secundarios para la creación del elemento automotriz, también se incluye costes asociados con recursos administrativos, transporte, entre otros. La investigación muestra los costes de manufactura primordiales que intervienen en este proceso y al mismo tiempo permite estimar la eficiencia en la manufactura.

5.1 Costos de manufactura

Dentro de los criterios de evaluación y decisión en el desarrollo de la matriz morfológica para la selección del material bio-compuesto, el costo de fabricación resulta una variable imprescindible y determinante, sobre todo considerando requerimientos de producción masiva de la industria automotriz, en este contexto, la viabilidad de implementación dependerá en buena medida de lograr costos razonables del nuevo componente, que se convierte en un atractivo para el cliente final y sea competitivo en el mercado industrial.

Tabla 32-5. Costes Directos de manufactura del parachoques

Costes Directos		
Descripción	Cantidad	Total
Materia Prima		\$ 150
Resina epoxi Cretonbond 52YN	2 galones	\$ 100
Fibra natural (bambú)	5 kilogramos	\$ 50
Mano de Obra		\$ 1050
Operarios de producción	2	\$ 900
Depreciación de molde por año	1	\$ 150

Realizado por: (Morejón H, 2024)

Dentro de la categoría de costes directos **Tabla 31-5** se incorporan todas las erogaciones identificables y cuantificables que se relacionan de manera específica con cada unidad producida del nuevo componente automotriz.

En el caso del proceso de moldeo o estratificación manual del bio-compuesto de fibra de bambú y resina epoxi, se consideran como costes directos tanto el valor unitario de la materia prima ingresado en la formulación de cada lámina (fibras de bambú y resina epoxi), como la mano de obra de los operarios involucrados activamente en cada etapa de la fabricación (Hansen, Don R. et al. 2006), estos son los elementos principales en el proceso inicial de la fabricación del elemento automotriz.

Además de los elementos directos de fabricación, existen otras actividades de soporte y suministros adicionales necesarios para la elaboración efectiva de cada unidad de parachoques que también intervienen en los costes finales, estos componentes indirectos (**Tabla 32-5**) varían respecto al volumen producido e incluyen mano de obra no directa de fábrica como mantenimiento o supervisión, insumos como lubricantes y material de empaque, además del costo prorrateado de espacio físico y servicios básicos requeridos durante el proceso productivo (Tennant, Geoff 2002).

Tabla 33-5. Costes Directos de manufactura del parachoques

Costes Directos		
Descripción	Cantidad	Total
Materia Prima Indirecta		\$ 85
Catalizador	1 galón	\$ 50
Desmoldante	1 lote	\$ 35
Mano de Obra Indirecta		\$ 1150
Mantenimiento del taller	1	\$ 500
Jefe de taller	1	\$ 500
Mantenimiento de maquinas	1	\$ 50
Depreciación de la infraestructura taller a 15 años	1	\$ 100

Realizado por: (Morejón H, 2024)

La estructura organizacional existente tras la operación fabril también implica costos fijos independientes del nivel de producción ver **Tabla 33-5** como sueldos de personal administrativo y gerencial, equipos de oficina que se deben incorporar para la estimación del precio de cada unidad, gastos de tipo administrativo dependen del tamaño de compañía e incluyen partidas contables por servicios externos de gestión legal, financiera y tributaria que garantizan el funcionamiento institucional (Ross, Stephen A. et al. 2003).

Aquellas erogaciones comerciales asociadas tanto al mercadeo para gestionar venta de unidades producidas como a entrega del producto terminado a clientes externos se consideran gastos de venta ver **Tabla 33-5**. Se incorporan gastos variables por comisiones de vendedores y fijos en publicidad, además de los costos logísticos de distribución según necesidades de cada comprador (Castro, Alejandra 2007).

Tabla 34-5. Gastos administrativos y de venta

Gastos de administración y de ventas		
Descripción	Cantidad	Total
Gastos de administración		\$ 660
Salario gerente	1	\$ 500
Artículos de oficina	1 lote	\$ 50
Registros municipales	1	\$ 60
Depreciación infraestructura oficina a 15 años	1	\$ 50
Gastos de ventas		\$ 1337,5
Salario ventas	1	\$ 450
Publicidad	1	\$ 300
Distribución	1	\$ 450
Comisión sobre ventas 2% precio de venta	1	\$ 102,50
Depreciación de oficina ventas a 15 años	1	\$ 35

Realizado por: (Morejón H, 2024)

Con los elementos de costos directos e indirectos identificados y cuantificados en detalle para el proceso productivo, más la incorporación de gastos fijos de estructura organizacional y comercialización, se puede estimar el costo integral de fabricación asociado a cada unidad de la barra frontal de parachoques desarrollada. Inicialmente se suma el total de costos directos por unidad, resultado de multiplicar la cantidad consumida de insumos variables como materias primas y mano de obra directa más la cuota parte de la depreciación de equipos especializados, entre las unidades mensuales proyectadas de producción (Fabio, Guarnizo Cuellar et al. 2020).

Del mismo modo se calcula la cuota de costos indirectos a partir de los totales por periodo entre el número de unidades producidas mensualmente, se incorpora la cuota de gastos administrativos y ventas entre unidades vendidas, la suma de estos conceptos entrega una aproximación basal al precio mínimo del nuevo producto parachoques para cubrir costos integrales de producción y comercialización (Gonzalo, Sinisterra Valencia et al. 2015).

$$\text{Coste por unidad} = \frac{\text{Coste Total}}{\text{parachoques producidos por mes}}$$

$$\text{Coste por unidad} = \frac{4432,5}{35} = \$ 126,64$$

Luego de estimar el costo total unitario sumando elementos identificados de costos directos, indirectos y cuota de gastos tanto administrativos como comerciales, se obtiene un “precio mínimo” de equilibrio para cubrir las erogaciones incurridas en elaboración y venta del nuevo producto (Colín, Juan García 2013).

No obstante, desde una perspectiva de empresa se requiere incluir un margen adicional por encima de dicho precio de equilibrio que represente un beneficio o utilidad neta por cada unidad vendida en la operación, este margen se establece usualmente como un porcentaje estándar dentro de la industria o según políticas internas, teniendo cuidado en no exceder precios existentes para artículos de funcionalidad análoga si se desea ingresar a ese mercado específico con un margen de ganancia estimado del 25% (Gonzalo, Sinisterra Valencia et al. 2017).

$$Pvp = \frac{\text{Coste por unidad}}{1 - \text{margen}}$$

$$Pvp = \frac{126,64}{1 - 0,25}$$

$$Pvp = 168,85$$

Una vez añadido el margen, se obtiene finalmente el “Precio de Venta al Público” (PVP) para cada parachoques que la empresa requeriría establecer dentro de su modelo de negocio considerando no sólo recuperación de costos integrales sino también razonable rentabilidad por las unidades comercializadas.

CONCLUSIONES

- El análisis del marco teórico-conceptual permitió determinar la formulación óptima de un nuevo material bio-compuesto con matriz de resina epoxi reforzada con fibras naturales de bambú, como una alternativa más amigable con el ambiente para fabricar componentes automotrices actualmente elaborados con refuerzos sintéticos tradicionales, la orientación de la fibra dentro de los materiales bio-compuestos está disponible en configuraciones de 0° , 90° y aleatorias, así también existen diferentes tejidos de fibra donde el tejido plano ofrece ventajas superiores a las configuraciones mencionadas. Esto permite una mayor adhesión e iteración entre el refuerzo y la matriz, se estableció combinaciones en porcentaje para tres tipos 60%-40%, 70%-30% y 75%-25% de matriz polimérica y fibra natural respectivamente para asegurar una buena conformación del nuevo material compuesto, así también es importante trabajar la fracción de volumen de la fibra natural por capas estas deben ser simétricas y tener estabilidad respecto del plano intermedio de la microestructura del nuevo material para evitar la creación de porosidad debilitando la adhesión del material compuesto.
- El número de muestras ensayadas se basó en los requerimientos de las normas ASTM, estableciendo como mínimo 4 probetas por cada formulación de bio-compuesto a evaluar. Se analizaron así los tres grupos de combinaciones de fibra de bambú y resina epoxi pero variando contenidos de fibra de bambú, 60% -40 % con tres capas de fibra Grupo 1, 70% - 30% con dos capas de refuerzo Grupo 2 y 75%-25% con una capa de refuerzo Grupo 3. El Grupo 1 alcanzó una tensión máxima en el ensayo de flexión de 65.46 MPa, y 5.20 GPa de módulo elástico y una capacidad de absorción de impactos de 2.57 J antes de la fractura. Mientras que el Grupo 2 obtuvo valores de 93.21 MPa a tracción, 3.875 GPa de módulo elástico y 1.14 Julios de energía disipada de la prueba de impacto, por otro lado el grupo tres tuvo un módulo elástico de 1.55 GPa una tensión máxima de 36.39 MPa y una energía absorbida de 1.14J, para el correcto escogimiento de la combinación adecuada de nuevo material bio-compuesto se utilizó una matriz morfológica con criterios de ponderación en base a las propiedades mecánicas del polímero ABS high impact (Acrylonitrile Butadiene Styrene) material base del parachoques comercial, así como también su propiedad de biodegradable, el material compuesto que cumple con la mayoría de criterios es la combinación 70% de resina epoxi y 30% de resina epoxi. Demostrando así el beneficio de una adecuada orientación de las fibras para direccionar propiedades, en total se ensayaron 32 probetas entre todos los grupos experimentales.
- La simulación mediante elementos finitos de un modelo de parachoques fabricado con un material compuesto definido, se llevó a cabo cumpliendo los requerimientos de la norma FMVSS 581 (Estándares federales de seguridad de vehículos) para dos tipos de probetas

una comercial existente en el mercado y otra con el material bio-compuesto obtenido. Entre los resultados de las simulaciones de impacto se encuentran de 8.84 MPa con una deformación de 4.83 mm y un factor de seguridad igual a 3.1 para el ensayo de impacto del parachoques comercial (ABS), y de 6.84 MPa con una deformación total de 3.95 mm muy similar que la probeta comercial y un factor de seguridad de 3.5 para el ensayo del probeta del material bio-compuesto con la fibra de bambú en disposición bidireccional (tejida). Cada uno de los valores tratados por parte del material bio-compuesto se encuentran dentro de las propiedades mecánicas del material ABS high impact el cual es usado para la fabricación del parachoques comercial. Por consiguiente, el parachoques manufacturado de material bio-compuesto muestra propiedades mecánicas apropiadas para su aplicación en el campo automotriz así también cumple con lo mencionado en la FMVSS 581.

- El ensayo experimental de impacto consistió en un péndulo oscilante con masa de 350.5 kg que replicó colisiones frontales sobre tres configuraciones de probetas para parachoques: una comercial de material ABS high impact (Acrylonitrile Butadiene Styrene), una elaborada con el bio-compuesto de 30% en peso de fibras unidireccionales de bambú y 70% de resina epoxi, y una tercera con el mismo bio-compuesto pero en disposición con fibra de bambú tejida. Los resultados evidenciaron la mayor capacidad de absorción energética para la variante de refuerzo tejido del nuevo material bio-compuesto, con 335,285 J de energía después del impacto. Comparativamente, el parachoques comercial alcanzó los 335,280 J, mientras que la versión unidireccional de la fibra del bio-compuesto se limitó a 335,270 J y ocasionó una fractura en el lugar de impacto del péndulo. Esta mayor tenacidad del compuesto con fibras tejidas se explica por la elevada resistencia y módulo elástico en la dirección axial y transversal, facilitando una extensión dúctil del material sin fractura súbita ante las intensas sollicitaciones del impacto, permitiendo así cumplir los requerimientos sobre capacidad de absorción para su aplicación como sistema de parachoques en vehículos ligeros, se concluye que la disposición tejida del 30% de fibras de bambú en la matriz epoxi representa la configuración óptima de este nuevo bio-compuesto para enfrentar el comportamiento frente a impactos de baja velocidad, convirtiéndolo en una alternativa viable y ecológica para reemplazar los refuerzos sintéticos tradicionales.
- La energía específica de absorción es un parámetro en el diseño de parachoques vehiculares, ya que determina la capacidad del material para disipar la energía cinética durante un impacto. Los resultados obtenidos en este estudio demuestran la importancia de esta propiedad, donde el parachoques comercial de ABS exhibe la mayor energía específica de 114,664 J/kg, indicando su superior capacidad para disipar la energía durante un choque en comparación con los bio-compuestos evaluados. No obstante, los parachoques de material bio-compuesto con fibra unidireccional (107,115 J/kg) y tejida (110,618 J/kg)

presentan valores muy cercanos al del ABS, lo que sugiere un rendimiento prometedor para reemplazarlo. Considerando el objetivo de sustituir el parachoques de ABS por uno de material bio-compuesto, se selecciona el de fibra tejida, por su energía específica de 110,618 J/kg es la más cercana al valor del ABS y mayor que la del bio-compuesto de fibra unidireccional, ofreciendo una capacidad de absorción de impactos comparable al ABS, con las ventajas adicionales de los materiales bio-compuestos en términos de sostenibilidad.

RECOMENDACIONES

- El efecto de tratamientos superficiales sobre las fibras naturales ha reportado que tiende a modificaciones físicas o químicas mejorando la durabilidad, un tratamiento físico adecuado provocará una impregnación más eficiente por la matriz y reducirá los defectos interranciales y concentradores de tensiones.
- La evaluación de un mínimo de tres espesores diferentes de las fibras de bambú como refuerzo del bio-compuesto, determinaría experimentalmente el número de capas que optimiza impregnación con la matriz epoxi así como propiedades mecánicas del laminado final.
- El cumplimiento de las especificaciones tanto de tiempo como de temperatura de curado proveerá las propiedades mecánicas esperadas en el material compuesto, así también la correcta formulación química para la reacción y solidificación de la resina.
- Se recomienda para la fabricación artesanal de elementos automotrices a través de un molde y el proceso de manufactura sea la estratificación manual, colocar una base de gel coat (resina preparada más densa) en el molde con el fin de lograr una capa inicial, que ayudará con una mejor iteración y adhesión entre las fibras y la matriz.
- Para la medición de la deformación en el ensayo del péndulo en cada una de las probetas se recomienda utilizar herramientas laser por ejemplo un flexómetro laser que registre la variación de la deformación, el instrumento debe estar correctamente calibrado y debe tener una capacidad de grabación de suceso alta para registrar los valores.

GLOSARIO

°C Grado Celsius

CAD (Computer Aided Design): Diseño asistido por computador.

CAE (Computer Aided Engineering): Ingeniería asistida por computador.

F Fuerza

FEA (Finite Element Analysis): Análisis por elementos finitos.

FEM (Finite Element Method): Método de elementos finitos.

Eabs Energía de absorción

L Longitud inicial de ensayo

Lignocelulósica Parte estructural de las plantas formada por celulosa, hemicelulosa y lignina.

USD Dólares de los Estados Unidos de América

Material bio-compuesto Material formado por la combinación de dos o más componentes, con el fin de lograr mejores propiedades estructurales y funcionales.

Fibra de bambú Filamentos extraídos de los tallos de la planta de bambú, empleados como refuerzo en materiales compuestos.

Resina epoxi Tipo de polímero termoestable que actúa como matriz en materiales compuestos, brindando cohesión estructural.

Péndulo de impacto Dispositivo para ensayos consistentes en un brazo oscilante que aplica un golpe sobre una probeta.

BIBLIOGRAFÍA

- AHMAD, Syed Mansoor; et al.** "Experimental investigation of mechanical properties and morphology of bamboo-glass fiber-nanoclay reinforced epoxy hybrid composites". *Cogent Engineering*, 2023. vol. 10, (2), ISSN null. Disponible en: [10.1080/23311916.2023.2279209](https://doi.org/10.1080/23311916.2023.2279209).
- AKINLABI, Esther Titilayo; et al.** *Bamboo* [en línea]. Cham: Springer International Publishing, 2017, [consulta: 18 agosto 2023]. ISBN 978-3-319-56807-2. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-56808-9>.
- ANSYS**, 2021. "Simulating Composite Structures with Ansys Composite PrepPost". [en línea]. [consulta: 22 enero 2024]. Disponible en: <https://www.ansys.com/resource-center/white-paper/simulating-composite-structures>.
- ASTM D 7264/D 7264M – 07.** *Standard test method for flexural propietes of polymer matriz composites materials*. S.l.: s.n., 2007,
- BAEZ, Jorge Mauro; Mecánica de Fluidos** [en línea]. Séptima, México: Pearson Educación, 2015, [consulta: 27 diciembre 2023]. ISBN 978-0-13-255892-1. págs. 556. Disponible en: https://www.academia.edu/43741728/Mecanica_de_Fluidos_7a_ed_Mott.
- BARBERO, Ever; Finite Element Analysis of Composite Materials**. S.l.: s.n., 2008, ISBN 978-0-429-18525-0.
- BATHE, Klaus-Jürgen; Finite Element Procedures**. S.l.: Prentice Hall, 1996, ISBN 978-0-13-301458-7. págs. 1064.
- BELINGARDI, Giovanni; et al.** "Geometrical optimization of bumper beam profile made of pultruded composite by numerical simulation". *Composite Structures*, 2013. vol. 102, ISSN 02638223. Disponible en: [10.1016/j.compstruct.2013.02.013](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.02.013).
- BENAROYA, Haym; et al.** *Mechanical Vibration: Analysis, Uncertainties, and Control, Fourth Edition*. S.l.: CRC Press, 2017, ISBN 978-1-4987-5301-2. págs. 602.
- BERINS, Michael L.; SPI Plastics Engineering Handbook of the Society of the Plastics Industry, Inc.** [en línea]. Boston, MA: Springer US, 1991, [consulta: 3 enero 2024]. ISBN 978-1-4615-7606-8. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4615-7604-4>.
- BERNAL, José; et al.** *Implementación de fibra vegetal (bambu) en hormigón armado*. Primera, Cuenca: Universidad del Azuay, 2021,
- BERREZUETA, Manuel Fernando; et al.** "Polipropileno reforzado con fibra natural para fabricación de paneles internos de las puertas de un automóvil". *INNOVA Research Journal*, 2017. vol. 2, (10.1), ISSN 2477-9024. Disponible en: [10.33890/innova.v2.n10.1.2017.569](https://doi.org/10.33890/innova.v2.n10.1.2017.569).
- BESSA, M.; et al.** *Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures, Second Edition. Solution Manual*. S.l.: s.n., 2013,

- BLEDZKI, Andrzej; et al.** "Barley husk and coconut shell reinforced polypropylene composites: The effect of fibre physical, chemical and surface properties". *Composites Science and Technology*, 2010. vol. 70, Disponible en: 10.1016/j.compscitech.2010.01.022.
- BLEDZKI, Andrzej K.; et al.** "Cars from Bio-Fibres". *Macromolecular Materials and Engineering*, 2006. vol. 291, (5), ISSN 1439-2054. Disponible en: 10.1002/mame.200600113.
- BLEDZKI, Andrzej K.; et al.** "Physical, chemical and surface properties of wheat husk, rye husk and soft wood and their polypropylene composites". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010. vol. 41, (4), ISSN 1359-835X. Disponible en: 10.1016/j.compositesa.2009.12.004.
- BORESI, Arthur P.; et al.** *Advanced Mechanics of Materials*. S.l.: John Wiley & Sons, 2002, ISBN 978-0-471-43881-6. págs. 715.
- BRAVO, Christian Bautista; et al.** "Construcción de la carrocería del vehículo de competición Fórmula Student a partir de materiales compuestos con fibra natural". *Revista Ingeniería*, 2021. vol. 5, (13), ISSN 2664-8245. Disponible en: 10.33996/revistaingenieria.v5i13.85.
- BUDYNAS, Richard; et al.** *Shigley's Mechanical Engineering Design*. S.l.: McGraw-Hill Higher Education - VST E+p, 2014, ISBN 978-1-259-98624-6. págs. 1106.
- BUNSELL, A.R.; et al.** "Hybrid carbon and glass fibre composites". *Composites*, 1974. vol. 5, (4), ISSN 00104361. Disponible en: 10.1016/0010-4361(74)90107-4.
- CAICEDO, Isaías; et al.** *Resistencia de materiales final* [en línea]. Riobamba-Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2020, [consulta: 25 diciembre 2023]. vol. 17,6 x 25 cm. ISBN 978-9942-38-017-3. págs. 195. Disponible en: http://cimogsys.esPOCH.edu.ec/direccion-publicaciones/public/docs/books/2021-01-19-155352-Resistencia%20de%20materiales%20final_compressed.pdf.
- CALLISTER, William D.; et al.** *Materials Science and Engineering: An Introduction, 9th Edition: Ninth Edition*. S.l.: John Wiley and Sons, Incorporated, 2013, ISBN 978-1-118-47654-3. págs. 990.
- CANDO, Diego; et al.** *Diseño y construcción de un péndulo para realizar ensayos de impacto en componentes y materiales de aplicaciones automotrices* [en línea]. Tesis Ingeniería. Riobamba-Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2021. págs. 80-110.
- CASTRO, Alejandra;** "MARKETING Versión para Latinoamérica Contenido", 2007.
- CERVERA, Miguel; et al.** *Resistencia de Materiales.pdf* [en línea]. Barcelona-España: CIMNE, 2015, [consulta: 26 diciembre 2023]. ISBN 978-84-944244-4-1. págs. 317. Disponible en: <http://cervera.rmee.upc.edu/libros/Resistencia%20de%20Materiales.pdf>.
- CHAWLA, Krishan K.;** *Composite Materials* [en línea]. New York, NY: Springer New York, 1998, [consulta: 14 agosto 2023]. ISBN 978-1-4419-3124-5. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4757-2966-5>.

- CHAWLA, Krishan K.;** *Composite Materials: Science and Engineering* [en línea]. Cham: Springer International Publishing, 2019, [consulta: 14 agosto 2023]. ISBN 978-3-030-28982-9. Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-28983-6>.
- CHEN, Xiaoya; et al.** "Bamboo fiber-reinforced polypropylene composites: A study of the mechanical properties". *Journal of Applied Polymer Science*, 1998. vol. 69, (10), ISSN 0021-8995, 1097-4628. Disponible en: 10.1002/(SICD)1097-4628(19980906)69:10<1891::AID-APP1>3.0.CO;2-9.
- CHEN, Yafeng; et al.** "Crashworthiness analysis of octagonal multi-cell tube with functionally graded thickness under multiple loading angles". *Thin-Walled Structures*, 2017. vol. 110, ISSN 02638231. Disponible en: 10.1016/j.tws.2016.11.001.
- CHINNASAMY, Jegadheesan; et al.** "Design and Analysis of Bumper Beam and Energy Absorbers by Using Composite Materials". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021. vol. 1055, (1), ISSN 1757-899X. Disponible en: 10.1088/1757-899X/1055/1/012044.
- COLÍN, Juan García;** *Contabilidad de costos*. S.l.: McGraw-Hill Interamericana, 2013, ISBN 978-607-15-0939-0. págs. 320.
- DÁVILA, Jose Luis; et al.** *Nuevos Materiales Aplicaciones Estructurales e Industriales*. Primera, Quito-Ecuador: Imprefepp, 2011, ISBN 978-9978-383-20-9.
- DE LA CRUZ, David;** *Proceso de diseño de componentes plásticos del sistema de parachoques frontal de un automóvil [en línea]*. Tesis Doctoral. México: Universidad Nacional Autónoma De México, 2016. págs. 47-67.
- DIAS, Allan; et al.** *Simulation of non-linear structural elastodynamic and impact problems using minimum energy and simultaneous diagonalization high-order bases*. S.l.: s.n., 2021,
- ELFALEH, Issam; et al.** "A comprehensive review of natural fibers and their composites: An eco-friendly alternative to conventional materials". *Results in Engineering*, 2023. vol. 19, ISSN 2590-1230. Disponible en: 10.1016/j.rineng.2023.101271.
- ELMARAKBI, Ahmed;** *Advanced Composite Materials For Automotive Applications*. First, UK: University of Sunderland, UK, 2014, ISBN 978-1-118-42386-8. págs. 472-489.
- ESTRADA, MEJIA, Martin;** *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua Angustifolia) para el refuerzo de materiales compuestos*. Colombia: Universidad de los Andes, 2009,
- FABIO, Guarnizo Cuellar; et al.** *Costos por órdenes de producción y por procesos*. S.l.: Universidad de la Salle, 2020, ISBN 978-958-51-3658-8. págs. 126-140.
- FARUK, Omar; et al.** "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010". *Progress in Polymer Science*, 2012a. vol. 37, (11), ISSN 0079-6700. Disponible en: 10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.

- FARUK, Omar; et al.** "Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010". *Progress in Polymer Science*, 2012b. vol. 37, (11), ISSN 00796700. Disponible en: 10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003.
- FERREIRA, Diana P.; et al.**, 2019. "Surface modification of natural fibers in polymer composites". *Green Composites for Automotive Applications* [en línea]. S.l.: Elsevier, págs. 3-41. [consulta: 13 enero 2024]. ISBN 978-0-08-102177-4. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978008102177400001X>.
- FERREIRA, Filipe V.; et al.** "Polymer Composites Reinforced with Natural Fibers and Nanocellulose in the Automotive Industry: A Short Review". *Journal of Composites Science*, 2019. vol. 3, (2), ISSN 2504-477X. Disponible en: 10.3390/jcs3020051.
- FRANCO, Saul Cruz;** "Manufactura, Ingeniería Y Tecnología". [en línea], [2020]. [consulta: 23 enero 2024]. Disponible en: https://www.academia.edu/44318116/ManufacturA_INGENIER%C3%8DA_Y_TecNOLOG%C3%8DA.
- G KENI, Laxmikant; et al.** "Conceptual design and analysis of a car bumper using finite element method". En: D.T. PHAM (ed.), *Cogent Engineering*, 2021. vol. 8, (1), ISSN null. Disponible en: 10.1080/23311916.2021.1976480.
- GIBSON, Geoff;** 2017. "Epoxy Resins". En: M. GILBERT (ed.), *Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition)* [en línea]. S.l.: Butterworth-Heinemann, págs. 773-797. [consulta: 3 enero 2024]. ISBN 978-0-323-35824-8. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978032335824800027X>.
- GILBERT, Marianne;** 2017. "Plastics Materials: Introduction and Historical Development". En: M. GILBERT (ed.), *Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition)* [en línea]. S.l.: Butterworth-Heinemann, págs. 1-18. [consulta: 3 enero 2024]. ISBN 978-0-323-35824-8. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780323358248000013>.
- GONZALO, Sinisterra Valencia; et al.** *Contabilidad administrativa*. S.l.: Ecoe Ediciones, 2015, ISBN 978-958-771-210-0. págs. 311.
- GONZALO, Sinisterra Valencia; et al.** *Contabilidad de costos: Con aproximación a las NIC-NIIF*. S.l.: Ecoe Ediciones, 2017, ISBN 978-958-771-465-4. págs. 327.
- GUÉGUEN, Yves; et al.** "Characteristics of anisotropy and dispersion in cracked medium". *Tectonophysics*, 2011. vol. 503, (1-2), ISSN 00401951. Disponible en: 10.1016/j.tecto.2010.09.021.
- GUPTA, Anu; et al.** "Effect of Different Parameters on Mechanical and Erosion Wear Behavior of Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composites". *International Journal of Polymer Science*, 2011. vol. 2011, ISSN 1687-9422. Disponible en: 10.1155/2011/592906.

- HA, Ngoc San; et al.** "Thin-walled corrugated structures: A review of crashworthiness designs and energy absorption characteristics". *Thin-Walled Structures*, 2020. vol. 157, ISSN 02638231. Disponible en: 10.1016/j.tws.2020.106995.
- HALLQUIST, John O.;** *LS-DYNA: theory manual*. Livermore, Calif: Livermore Software Technology Corp, 2006, ISBN 978-0-9778540-0-4.
- HANSEN, Don R.; et al.** *Cost management: accounting and control, 5e*. 5th ed, Mason, Ohio: Thomson/South-Western, 2006, ISBN 978-0-324-23310-0. págs. 1004. HF5686.C8 H239 2006
- HASAN, K. M. Faridul; et al.** "Sustainable bamboo fiber reinforced polymeric composites for structural applications: A mini review of recent advances and future prospects". *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2023. vol. 8, ISSN 2666-0164. Disponible en: 10.1016/j.cscee.2023.100362.
- HOLBERY, James; et al.** "Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications". *JOM*, 2006. vol. 58, (11), ISSN 1047-4838, 1543-1851. Disponible en: 10.1007/s11837-006-0234-2.
- HOU, Shujuan; et al.** "Multivariable crashworthiness optimization of vehicle body by unrepeated saturated factorial design". *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2012. vol. 46, (6), ISSN 1615-147X, 1615-1488. Disponible en: 10.1007/s00158-012-0799-z.
- HUTTON, David;** *Fundamentals of finity elements analysis* [en línea]. S.l.: McGraw-Hill, 2004, [consulta: 18 enero 2024]. ISBN 0-07-239536-2. págs. 505. Disponible en: https://research.iaun.ac.ir/pd/atrian/pdfs/UploadFile_2613.pdf.
- JAWAID, M.; et al.** "Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review". *Carbohydrate Polymers*, 2011. vol. 86, (1), ISSN 01448617. Disponible en: 10.1016/j.carbpol.2011.04.043.
- JOHN, Maya Jacob; et al.** "Biofibres and biocomposites". *Carbohydrate Polymers*, 2008. vol. 71, (3), ISSN 0144-8617. Disponible en: 10.1016/j.carbpol.2007.05.040.
- JOSHI, S. V; et al.** "Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2004. vol. 35, (3), ISSN 1359-835X. Disponible en: 10.1016/j.compositesa.2003.09.016.
- JUNIOR, José;** et al., 2023. "Fatigue Analysis Using The Finite Element Method". . EEUU: s.n., págs. 5.
- KALIA, Susheel; et al.** "Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites—A review". *Polymer Engineering & Science*, 2009. vol. 49, (7), ISSN 0032-3888, 1548-2634. Disponible en: 10.1002/pen.21328.
- KALPAKJIAN, Serope; et al.** *Manufactura, ingeniería y tecnología*. S.l.: Pearson Educación, 2002, ISBN 978-970-26-0137-1. págs. 1182.
- KIM, Jang-Kyo;** et al., 1998. "Chapter 2 - Characterization of interfaces". En: J.-K. KIM et al. (eds.), *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites* [en línea]. Oxford: Elsevier Science

Ltd, págs. 5-41. [consulta: 5 enero 2024]. ISBN 978-0-08-042695-2. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080426952500038>.

KUTNER, Michael H.; *Applied Linear Statistical Models*. S.l.: McGraw-Hill Irwin, 2005, ISBN 978-0-07-112221-4. págs. 1396.

LAMY, B.; et al. "Stiffness prediction of flax fibers-epoxy composite materials". *Journal of Materials Science Letters*, 2000. vol. 19, (11), ISSN 1573-4811. Disponible en: 10.1023/A:1006776423764.

LAXMAN, S.; et al. "Structural Optimization: Achieving a Robust and Light-Weight Design of Automotive Components". *SAE Transactions*, 2007. vol. 116, ISSN 0096-736X.

LIESE, Walter; et al. *Bamboo: The Plant and its Uses* [en línea]. Cham: Springer International Publishing, 2015, [consulta: 15 agosto 2023]. *Tropical Forestry*, vol. 10. ISBN 978-3-319-14132-9. Disponible en: <https://link.springer.com/10.1007/978-3-319-14133-6>.

LIOTIER, Pierre-Jacques; et al. "Role of interface formation versus fibres properties in the mechanical behaviour of bio-based composites manufactured by Liquid Composite Molding processes". *Composites Part B: Engineering*, 2019. vol. 163, Disponible en: 10.1016/j.compositesb.2018.10.103.

LIU, Dagang; et al. "Bamboo fiber and its reinforced composites: structure and properties". *Cellulose*, 2012. vol. 19, (5), ISSN 1572-882X. Disponible en: 10.1007/s10570-012-9741-1.

LIU, G. R.; et al. *The finite element method: a practical course*. Oxford ; Boston: Butterworth-Heinemann, 2003, ISBN 978-0-7506-5866-9. págs. 348. TA347.F5 L57 2003

LIU, Wing Kam; et al. "Eighty Years of the Finite Element Method: Birth, Evolution, and Future". *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2022. vol. 29, (6), ISSN 1886-1784. Disponible en: 10.1007/s11831-022-09740-9.

LOGAN, Daryl L.; *A first course in the finite element method*. 4th ed, United States: Thomson, 2007, ISBN 978-0-534-55298-5. págs. 808. TA347.F5 L64 2007

LOTFI, Amin; "Natural fiber polymer composites: a review". *Advances in Polymer Technology* [en línea], 1999. [consulta: 22 enero 2024]. Disponible en: https://www.academia.edu/1962118/Natural_fiber_polymer_composites_a_review.

MADSEN, Bo; et al. "Plant fibre composites – porosity and volumetric interaction". *Composites Science and Technology*, 2007. vol. 67, (7), ISSN 0266-3538. Disponible en: 10.1016/j.compscitech.2006.07.009.

MARZBANRAD, Javad; et al. "Design and analysis of an automotive bumper beam in low-speed frontal crashes". *Thin-Walled Structures*, 2009a. vol. 47, (8-9), ISSN 02638231. Disponible en: 10.1016/j.tws.2009.02.007.

MARZBANRAD, Javad; et al. "Design and analysis of an automotive bumper beam in low-speed frontal crashes". *Thin-Walled Structures*, 2009b. vol. 47, (8-9), ISSN 02638231. Disponible en: 10.1016/j.tws.2009.02.007.

MAYA, Luz; et al. "Falla de los materiales compuestos laminados". , 2004. vol. 25,

MAZUMDAR, Sanjay; *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2001, ISBN 978-0-429-12742-7. págs. 416.

MENG, Xiangchao; et al. "Multi-Objective Lightweight Optimization Design of the Aluminium Alloy Front Subframe of a Vehicle". *Metals*, 2023. vol. 13, (4), ISSN 2075-4701. Disponible en: 10.3390/met13040705.

MERIAM, James L.; et al. *Engineering Mechanics, Binder Ready Version: Dynamics*. S.l.: Wiley, 2015, ISBN 978-1-119-02253-4. págs. 736.

MIDUVIC, 2017. "Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-GUADÚA. Estructuras de Guadúa (GaK)". [en línea]. [consulta: 8 enero 2024]. Disponible en: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/04/NEC-SE-GUADUA-VERSION-FINAL-WEB-MAR-2017.pdf>.

MUKHOPADHYAY, S.; et al. "Physical Modification of Natural Fibers and Thermoplastic Films for Composites — A Review". *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2009. vol. 22, (2), ISSN 0892-7057. Disponible en: 10.1177/0892705708091860.

MÜSSIG, Jürg; 2010. "Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Applications". En: DOI: 10.1002/9780470660324 [en línea]. S.l.: Wiley, [consulta: 13 enero 2024]. ISBN 978-0-470-69508-1. Disponible en: 10.1002/9780470660324. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470660324>.

NORHIDAYAH, M.H.; et al., [sin fecha]. "A Review of Current Development in Natural Fiber Composites in Automotive Applications | Scientific.Net". [en línea]. [consulta: 9 agosto 2023]. Disponible en: <https://www.scientific.net/AMM.564.3>.

ORTIZ, Pablo Daniel Mazón; "*Caracterización Mecánica Del Material Híbrido De Matriz Epóxica Reforzada Con Fibra De Vidrio Y Tejido De Fibras Naturales De Caña Guadua Y Algodón Para La Determinación De Propiedades Mecánicas En Aplicaciones Industriales*". Ambato-Ecuador: Universidad Técnica de Ambato, 2018,

OSOKA, Emmanuel; et al. "Mechanical Properties Of Selected Natural Fiber Reinforced Composites For Automobile Application 1*". , 2018. vol. 7,

OSORIO, L.; et al. "Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibers and flexural characterization of bamboo/ epoxy composites". *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2011. vol. 30, (5), ISSN 0731-6844. Disponible en: 10.1177/0731684410397683.

PATEL, Murlidhar; et al. "Lightweight Composite Materials for Automotive -A Review". , 2018. vol. 5,

PONCE, Diego Sebastián Ponce; *Obtención De Materiales Compuestos De Matriz Polimérica Biodegradable Reforzada Con Fibra Natural. Tesis Ingeniería*. Quito-Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2011. págs. 150-187.

- PREET SINGH, Jai Inder; et al.** "Study of Effect of Surface Treatment on Mechanical Properties of Natural Fiber Reinforced Composites". *Materials Today: Proceedings*, 2017. vol. 4, (2, Part A), ISSN 2214-7853. Disponible en: [10.1016/j.matpr.2017.02.158](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.158).
- RAHMAN, Md. Siddiqur;** 2010. "Jute – A Versatile Natural Fibre. Cultivation, Extraction and Processing". *Industrial Applications of Natural Fibres* [en línea]. S.l.: John Wiley & Sons, Ltd, págs. 135-161. [consulta: 13 enero 2024]. ISBN 978-0-470-66032-4. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470660324.ch6>.
- RAMÍREZ, Miguel;** *Ciencia de Materiales Aplicaciones en Ingeniería* [en línea]. Primera, México: Alfaomega Grupo Editor, 2010, [consulta: 27 diciembre 2023]. ISBN 978-0-471-75365-0. págs. 368. Disponible en: https://www.academia.edu/37290810/Ciencia_de_Materiales_Aplicaciones_en_Ingenieria.
- RAVI, M; et al.** "Effect of surface treatment on Natural fibers composite". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018. vol. 376, ISSN 1757-8981, 1757-899X. Disponible en: [10.1088/1757-899X/376/1/012053](https://doi.org/10.1088/1757-899X/376/1/012053).
- REDDY, Narendra; et al.** "Biofibers from agricultural byproducts for industrial applications". *Trends in Biotechnology*, 2005. vol. 23, (1), ISSN 0167-7799, 1879-3096. Disponible en: [10.1016/j.tibtech.2004.11.002](https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2004.11.002).
- REINHART, Theodore J.;** *Engineered Materials Handbook: Composites. - 1. print*. S.l.: ASM Internat., 1987, ISBN 978-0-87170-279-1. págs. 908-950.
- ROSATO, Dominick V.;** et al., 2000. "Molding Materials". En: Dominick V. ROSATO et al. (eds.), *Injection Molding Handbook* [en línea]. Boston, MA: Springer US, págs. 479-622. [consulta: 24 enero 2024]. ISBN 978-1-4615-4597-2. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4597-2_6.
- ROSS, Stephen A.;** et al. *Fundamentals of Corporate Finance*. S.l.: McGraw-Hill Irwin, 2003, ISBN 978-0-07-115102-3. págs. 850-870.
- RUIZ, Edu; et al.** "Multi-criteria thermal optimization in liquid composite molding to reduce processing stresses and cycle time". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006. vol. 37, (6), ISSN 1359835X. Disponible en: [10.1016/j.compositesa.2005.06.010](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.06.010).
- SABA, N.;** et al. "Mechanical properties of kenaf fibre reinforced polymer composite: A review". *Construction and Building Materials*, 2015. vol. 76, ISSN 0950-0618. Disponible en: [10.1016/j.conbuildmat.2014.11.043](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.043).
- SANIPATÍN SILVA, Angélica Maribel; et al.** *Estudio de las características Mecánicas de las Fibras de Bambú con resina Epoxica para la fabricación de piezas mecánicas*. Primera, Ibarra-Ecuador: Universidad Técnica del Norte, 2022, vol. 1. págs. 150-170.
- SAPUAN, S.M.;** et al. "A note on the conceptual design of polymeric composite automotive bumper system". *Journal of Materials Processing Technology*, 2005. vol. 159, (2), ISSN 09240136. Disponible en: [10.1016/j.jmatprotec.2004.01.063](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.063).

SCHREIER, Hubert; et al. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications* [en línea]. Boston, MA: Springer US, 2009, [consulta: 30 enero 2024]. ISBN 978-0-387-78746-6. Disponible en: <https://link.springer.com/10.1007/978-0-387-78747-3>.

SCOTT, W.R.; et al. "Simulation Model for Low-Speed Bumper-to-Bumper Crashes". *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 2010. vol. 3, (1), ISSN 1946-4002. Disponible en: 10.4271/2010-01-0051.

SHAH, Ain; et al. "A review on the tensile properties of bamboo fiber reinforced polymer composites". , 2016. vol. 11, (4), ISSN 10654-10676. Disponible en: 10.15376/biores.11.4.Shah.

SHAH, Darshil U.; "Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: a critical review". *Journal of Materials Science*, 2013. vol. 48, (18), ISSN 0022-2461, 1573-4803. Disponible en: 10.1007/s10853-013-7458-7.

SHAH, Darshil U.; "Natural fibre composites: Comprehensive Ashby-type materials selection charts". *Materials & Design (1980-2015)*, 2014. vol. 62, ISSN 02613069. Disponible en: 10.1016/j.matdes.2014.05.002.

SHITALKUMAR, Shahaji; et al. "Design, analysis, fabrication of composite frontal crash beam for passenger vehicle". 2017. vol. 5, (4),

SINDREY, David A.; "Steel Bumper Systems for Passenger Cars and Light Trucks". *SAE Technical Paper* [en línea]. S.l.: s.n., [consulta: 18 enero 2024]. 1999-01-1007, Disponible en: <https://trid.trb.org/View/1782997>.

SUMMERSCALES, John; et al. "A review of bast fibres and their composites. Part 2 – Composites". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2010. vol. 41, (10), ISSN 1359835X. Disponible en: 10.1016/j.compositesa.2010.05.020.

SUN, Guangyong; et al. "Parallelized optimization design of bumper systems under multiple low-speed impact loads". *Thin-Walled Structures*, 2021. vol. 167, ISSN 02638231. Disponible en: 10.1016/j.tws.2021.108197.

SWOLFS, Yentl; et al. "Fibre hybridisation in polymer composites: A review". *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014. vol. 67, ISSN 1359835X. Disponible en: 10.1016/j.compositesa.2014.08.027.

TABORDA-RIOS, July Andrea; et al. "Estudio comparativo de las propiedades mecánicas de la resina poliéster reforzada con fibra de bambú, como material sustituto de la fibra de vidrio". *DYNA*, 2017. vol. 84, (202), ISSN 2346-2183, 0012-7353. Disponible en: 10.15446/dyna.v84n202.57334.

TELECHANA, Christian; *Análisis De La Resistencia Al Impacto De Una Muestra De Barandas De Seguridad Simple Usadas En Carreteras. Tesis Ingeniería*. Riobamba-Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2022. págs. 110-125.

TENNANT, Geoff; *Design for Six Sigma: Launching New Products and Services Without Failure*. S.l.: Gower Publishing, Ltd., 2002, ISBN 978-0-566-08434-8. págs. 176-198.

THOMASON, J.L.; et al. "Temperature dependence of the interfacial shear strength in glass–fibre epoxy composites". *Composites Science and Technology*, 2014. vol. 96, ISSN 02663538. Disponible en: 10.1016/j.compscitech.2014.03.009.

TORRES, J.P.; et al. "Deformation and failure of semicrystalline polymers under dynamic tensile and biaxial impact loading". *International Journal of Impact Engineering*, 2016. vol. 98, ISSN 0734743X. Disponible en: 10.1016/j.ijimpeng.2016.08.004.

VASILIEV, Valery V.; et al., 2007. "Mechanics Of A Composite Layer". *Advanced Mechanics of Composite Materials* [en línea]. S.l.: Elsevier, págs. 133-254. [consulta: 6 febrero 2024]. ISBN 978-0-08-045372-9. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978008045372950004X>.

XIAO, Zhi; et al. "Crashworthiness design for functionally graded foam-filled bumper beam". *Advances in Engineering Software*, 2015. vol. 85, ISSN 09659978. Disponible en: 10.1016/j.advensoft.2015.03.005.

XIE, Suchao; et al. "Crashworthiness optimisation of the front-end structure of the lead car of a high-speed train". *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016. vol. 53, Disponible en: 10.1007/s00158-015-1332-y.

YAN, Libo; et al. "A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering". *Composites Part B: Engineering*, 2016. vol. 92, ISSN 13598368. Disponible en: 10.1016/j.compositesb.2016.02.002.

YAN, Lei; et al. "A size optimization procedure for irregularly spaced spot weld design of automotive structures". *Thin-Walled Structures*, 2021. vol. 166, ISSN 02638231. Disponible en: 10.1016/j.tws.2021.108015.

YU, Yan; et al. "Bamboo fibers for composite applications: a mechanical and morphological investigation". *Journal of Materials Science*, 2014. vol. 49, (6), ISSN 1573-4803. Disponible en: 10.1007/s10853-013-7951-z.

ZHANG, Song; "High-speed 3D shape measurement with structured light methods: A review". *Optics and Lasers in Engineering*, 2018. vol. 106, ISSN 01438166. Disponible en: 10.1016/j.optlaseng.2018.02.017.

ZHANG, Yong; et al. "Optimization of foam-filled bitubal structures for crashworthiness criteria". *Materials & Design*, 2012. vol. 38, (6), ISSN 02613069. Disponible en: 10.1016/j.matdes.2012.01.028.

ZIENKIEWICZ, Olgierd Cecil; *The Finite Element Method: The basis*. S.l.: Butterworth-Heinemann, 2000, ISBN 978-0-7506-5049-6. págs. 345-356.

ZWICK, Roell; "ASTM D256 | Resistencia al impacto Izod plástico". *ASTM D256 / Resistencia al impacto Izod plástico* [en línea]. [consulta: 26 diciembre 2023]. Disponible en: <https://www.zwickroell.com/es/sectores/plasticos/termoplasticos-y-materiales-termoendurecibles/resistencia-al-impacto-izord-astm-d256/>.



Información Técnica

CRETONBOND 52YN

INGENIERÍA CIVIL / EPÓXICOS INYECCIÓN-IMPRIMANTES-MORTEROS-AUTONIVELANTES
 INYECCIÓN EN GRIETAS ESTRUCTURALES - EPÓXICA ALTA PENETRACIÓN



Technical Data Sheet
 I.E. MM-2018-0011031W7

Información Técnica & Especificaciones	
Tipo Genérico	Epóxico de Cadena Cruzada
Descripción	Producto de 2 componentes (base y catalizador) miscible 4:1
Usos	Epóxico inyección: Suela líquida de refuerzo y unión estructural de elementos endurecidos de hormigón, piedra, mármol, acero, hierro y maderas. Ideal para inyección en grietas inactivas en el hormigón originadas por contracción del fraguado, por movimientos sísmicos, por asentamientos diferenciales, por exceso de carga viva o por uso prematuro de la construcción. Como endurecedor del hormigón en superficies delgadas o altamente porosas y de baja resistencia al desgaste. - Impermeabilizante de hormigón por efecto penetrante y eficiente sellado de porosidad que impiden filtraciones. Resistente a la inmersión en agua y derivados de petróleo, ácidos inorgánicos, diluidos ácidos diluidos, aceites grasos y solventes.
Ventajas	- Epóxico líquido de alta penetrabilidad - Sistema 100% sólidos - Rellena monolíticamente grietas y capilares. - Reforzante por inyección (suela líquida) - Inerte a la humedad - Cura por polimerización formando una película dura de excelentes propiedades físicas y de alto grado de adhesividad e impermeabilidad. - Excelente resistencia mecánica (no se contrae)
Color	Transparente
Brillo	Semibrillante
% de Sólidos en volumen:	100%
Rendimiento teórico*	37 m ² /litro a 1 mil (25.4 micras) 7.07 m ² /galón a 0.5 mm (500.0 micras) * No incluye pérdidas por mezcla, aplicación y rugosidad superficial
Espesor seco de película	Mínimo: 0.5 mm (500.0 micras) Máximo: 1.0 mm (1000.0 micras) Sistema ideal "Piso Autonivelante 100%SV": Espesor de película seca recomendado: Primer: Cretonbond 1340S 0.5 - 1.0 mm Epóxico inyección: Cretonbond 52YN 1 - 5 mm Autonivelante: Cretonhard 961SL 0.5 - 2.0 mm
Compatibilidad con capas precedentes y subsiguientes:	
Primers	Normalmente no requiere
Acabados	CRETONHARD, CRETONPOL, AMERTHANE
Resistencia a temperatura	Continuo (seco): 93°C (200°F) No Continuo (seco): 121°C (250°F) (Para exposición a "inmersión específica", consulte al servicio técnico de Pinturas América.)
Observación	Todo epóxico expuesto al exterior se estipa, pierde el brillo y se decolora. Esto no afecta en absoluto su integridad y protección. La solución ideal consiste en aplicar acabado Poluretano AMERTHANE

Performance			
Test	System	Results	Method
Adherencia	Concreto escarificado 1 ct. 52YN	5A (100%)	ASTM D3359
Adherencia Sistema Autonivelante	Concreto escarificado 1 ct. 1340S (primer) 52YN (Epóxico inyección) 1 ct. 961SL (autoniv.)	5A (100%)	ASTM D3359

Resistencia Química		
Exposición	Derrames	Vapores
Agua	Excelente	Excelente
Soluciones salinas	Excelente	Excelente
Alcalis diluidos	Excelente	Excelente
Ácidos diluidos	N/A	Duane
Solventes alifáticos y grasos	Muy bueno	Muy bueno

Características Mecánicas	
7 días 20°C y 50% Humedad Relativa	
Densidad	362 kg/cm ³ / 860 kg/cm ³
Resistencia a la tracción	362 kg/cm ² / 410 kg/cm ²
Módulo de elasticidad	4.6 x 10 ⁴ kg/cm ²
Adherencia al concreto	30 kg/cm ² (falla el concreto)

* Norma ASTM D-985

Mezcla y Dilución	
Mezclado	Agite bien cada componente por separado.
Proporción de mezcla en volumen:	
Base:	4 partes del componente "A"
Catalizador:	1 parte del componente "B"
Adición en peso:	Incorpore con agitación: 50 kilogramos de Cuarzo/Sílice
Thinner y Dilución:	No requiere
Pot life:	40 minutos mínimo después de mezclado (a 24°C)
NOTA:	Ver otros usos y aplicaciones, en la siguiente página.

Tiempos de Secado (50%HR)			
Temperatura	Al tacto	Manejo	Repite
0°C (32°F)	2 horas	16 horas	24 horas
10°C (50°F)	1.5 horas	8 horas	12 horas
24°C (75°F)	60 minutos	3 - 4 horas	4 horas
32°C (90°F)	30 minutos	3 horas	2 horas

- Si se excede el tiempo final de curado (máx. 36 horas), la superficie deberá ser lijada, antes de aplicar capas de acabado.
 - Excesiva humedad o condensación sobre la superficie durante el curado, puede resultar en una superficie enroscada o carbonada

Presentación Comercial
 Kit de 1 galón: Parte "A" galón 3.028 cm³ / parte "B" onzas 757 cm³



TP-581-01
April 25, 1990

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION
NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION

LABORATORY TEST PROCEDURE

FOR

REGULATION PART 581

Bumper Standard



SAFETY ASSURANCE
Office of Vehicle Safety Compliance
Room 6115, NSA-30
400 Seventh Street, SW
Washington, DC 20590

**OVSC LABORATORY TEST PROCEDURE NO. 581
TABLE OF CONTENTS**

	PAGE
1. PURPOSE AND APPLICATION.....	1
2. GENERAL REQUIREMENTS.....	2
3. SECURITY	3
4. GOOD HOUSEKEEPING.....	3
5. TEST SCHEDULING AND MONITORING	3
6. TEST DATA DISPOSITION.....	4
7. GOVERNMENT FURNISHED PROPERTY (GFP).....	5
8. CALIBRATION OF TEST INSTRUMENTS.....	8
9. PHOTOGRAPHIC DOCUMENTATION.....	9
10. DEFINITIONS.....	10
11. PRETEST REQUIREMENTS	16
12. COMPLIANCE TEST EXECUTION.....	17
13. POST TEST REQUIREMENTS.....	41
14. REPORTS	43
14.1. MONTHLY STATUS REPORTS.....	43
14.2. APPARENT TEST FAILURE	43
14.3. FINAL TEST REPORTS	43
14.3.1. COPIES.....	43
14.3.2. REQUIREMENTS.....	44
14.3.3. FIRST THREE PAGES.....	44
14.3.4. TABLE OF CONTENTS	50
15. DATA SHEETS.....	50
16. FORMS	65

1. PURPOSE AND APPLICATION

The Office of Vehicle Safety Compliance (OVSC) provides contractor laboratories with Laboratory Test Procedures as guidelines for obtaining compliance test data. The data are used to determine if a specific vehicle or item of motor vehicle equipment meets the minimum performance requirements of the subject Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS). The purpose of the OVSC Laboratory Test Procedures is to present a uniform testing and data recording format, and provide suggestions for the use of specific equipment and procedures. If any contractor views any part of an OVSC Laboratory Test Procedure to be in conflict with a Federal Motor Vehicle Safety Standard (FMVSS) or observes deficiencies in a Laboratory Test Procedure, the contractor is required to advise the Contracting Officer's Technical Representative (COTR) and resolve the discrepancy prior to the start of compliance testing.

Every contractor is required to submit a detailed test procedure to the COTR before initiating the compliance test program. The procedure must include a step-by-step description of the methodology to be used. The contractor's test procedure shall contain a complete listing of test equipment with make and model number and a detailed check-off sheet. The list of test equipment shall include instrument accuracy and calibration dates. All equipment shall be calibrated in accordance with the manufacturer's instructions. There shall be no contradictions between the Laboratory Test Procedure and the contractor's in-house test procedure. Written approval of the in-house test procedures shall be obtained from the COTR before initiating the compliance test program. The OVSC Laboratory Test Procedures are not intended to limit or restrain a contractor from developing or utilizing any testing techniques or equipment, which will assist in procuring the required compliance test data. These Laboratory Test Procedures do not constitute an endorsement or recommendation for use of any product or method. However, the application of any such testing technique or equipment is subject to prior approval of the COTR.

NOTE: The OVSC Laboratory Test Procedures, prepared for the limited purpose of use by independent laboratories under contract to conduct compliance tests for the OVSC, are not rules, regulations or NHTSA interpretations regarding the meaning of a FMVSS. The Laboratory Test Procedures are not intended to limit the requirements of the applicable FMVSS(s). In some cases, the OVSC Laboratory Test Procedures do not include all of the various FMVSS minimum performance requirements. Recognizing applicable test tolerances, the Laboratory Test Procedures may specify test conditions that are less severe than the minimum requirements of the standard. In addition, the Laboratory Test Procedures may be modified by the OVSC at any time without notice, and the COTR may direct or authorize contractors to deviate from these procedures, as long as the tests are performed in a manner consistent with the standard itself and within the scope of the contract. Laboratory Test Procedures may not be relied upon to create any right or benefit in any person. Therefore, compliance of a vehicle or item of motor vehicle equipment is not necessarily guaranteed if the manufacturer limits its certification tests to those described in the OVSC Laboratory Test Procedures.

2. GENERAL REQUIREMENTS

Regulation Part 581 (P581) was issued under the authority of Title I of the Motor Vehicle Information and Cost Savings Act. P581 specifies the following requirements for low speed vehicle impacts:

- A. Prohibits damage to the vehicle surfaces
- B. Incorporates the safety requirements contained in the former Federal Motor Vehicle Standard (FMVSS) No. 215
- C. Limits damage to passenger vehicle bumpers on vehicles manufactured on or after September 1, 1979
- D. Limits the impact force levels for pendulum impacts to reduce the frequency of override and under ride.

3. SECURITY

The contractor shall provide appropriate security measures to protect the OVSC test vehicles from unauthorized personnel during the entire compliance-testing program. The contractor is financially responsible for any acts of theft and/or vandalism, which occur during the storage of test vehicles from unauthorized personnel during the entire compliance-testing program. Any security problems, which arise, shall be reported by telephone to the Industrial Property Manager (IPM), Office of Contracts and Procurement, NHTSA, within 2 working days after the incident. A letter containing specific details of the security problem will be sent to the IPM (with copy to the COTR) within 48 hours.

The contractor shall protect and segregate the data that evolves from compliance testing before and after each passenger car test. No information concerning the vehicle safety compliance-testing program shall be released to anyone except the COTR, unless specifically authorized by the COTR or the COTR's supervisors.

NOTE: NO INDIVIDUALS, OTHER THAN CONTRACTOR PERSONNEL DIRECTLY INVOLVED IN THE COMPLIANCE TESTING PROGRAM OR OVSC PERSONNEL, SHALL BE ALLOWED TO WITNESS ANY VEHICLE COMPLIANCE TEST UNLESS SPECIFICALLY AUTHORIZED BY THE COTR.

4. GOOD HOUSEKEEPING

Contractors shall maintain the entire vehicle compliance testing area, test fixtures and instrumentation in a neat, clean and painted condition with test instruments arranged in an orderly manner consistent with good test laboratory housekeeping practices.

5. TEST SCHEDULING AND MONITORING

The contractor shall submit a vehicle test schedule to the COTR prior to conducting the first compliance test. Tests shall be completed as required in the contract.

Scheduling of vehicle tests shall be adjusted to permit vehicles to be tested to other FMVSSs as may be required by the OVSC. All vehicle compliance testing shall be coordinated with the COTR in order to allow monitoring by the COTR and/or other OVSC personnel if desired.

6. TEST DATA DISPOSITION

The contractor shall make all vehicle preliminary compliance test data available to the COTR at the test site immediately after the test. Final test data, including digital printouts and computer generated plots (if applicable), shall be furnished to the COTR within 5 working days. Additionally, the contractor shall analyze the preliminary test results as directed by the COTR.

All backup data sheets, strip charts, recordings, plots, technician's notes, etc., shall be either sent to the COTR or destroyed at the conclusion of each delivery order, purchase order, etc..

7. GOVERNMENT FURNISHED PROPERTY (GFP)

ACCEPTANCE OF VEHICLE

The Contractor has the responsibility of accepting the test vehicle from either a new car dealer or a vehicle transporter. In both instances, the contractor acts in the OVSC's behalf when signing an acceptance of the test vehicle. If a dealer delivers the vehicle, the contractor must check to verify the following:

- A. All options listed on the "window sticker" are present on the test vehicle
- B. Tires and wheel rims are new and the same as listed
- C. There are no dents or other interior or exterior flaws
- D. The vehicle has been properly prepared and is in running condition
- E. The glove box contains an owner's manual, warranty document, consumer information, and extra set of keys
- F. Proper fuel filler cap is supplied on the test vehicle.

If a government-contracted transporter delivers the test vehicle, the contractor should check for damage, which may have occurred during transit.

A "Vehicle Condition" form is shown on the next page and will be supplied by the COTR when the test vehicle is transferred from the new car dealer or between test contracts. The upper half of the form describes the vehicle in detail, and the lower half provides space for a detailed description of the posttest condition. Vehicle Condition forms must be returned to the COTR with the copies of the Final Test Report or the reports will NOT be accepted.

NOTIFICATION OF COTR

The COTR must be notified with 24 hours after a vehicle has been delivered.

REPORT OF VEHICLE CONDITION AT THE COMPLETION OF TESTING

CONTRACT NO.: DTNH22 - _____ DATE: _____

FROM: _____

TO: _____

The following vehicle has been subjected to compliance testing for FMVSS No. _____

The vehicle was inspected upon arrival at the laboratory for the test and found to contain all of the equipment listed below. All variances have been reported within 2 working days of vehicle arrival, by letter, to the NHTSA Industrial Property Manager (NAD-30), with a copy to the OVSC COTR. The vehicle is again inspected, after the above test has been conducted, and all changes are noted below. The final condition of the vehicle is also noted in detail.

MODEL YEAR/MAKE/MODEL/BODY STYLE: _____

NHTSA NO.: _____ BODY COLOR: _____ VIN: _____

ODOMETER READINGS: ARRIVAL - _____ miles DATE - _____

COMPLETION - _____ miles DATE - _____

PURCHASE PRICE: \$ _____ DEALER'S NAME: _____

ENGINE DATA: _____ Cylinders _____ Liters _____ Cubic Inches

TRANSMISSION DATA: _____ Automatic _____ Manual _____ No. of Speeds

FINAL DRIVE DATA: _____ Rear Drive _____ Front Drive _____ 4 Wheel Drive

TIRE DATA: Size - _____ Mfr. - _____

CHECK APPROPRIATE BOXES FOR VEHICLE EQUIPMENT:

<input type="checkbox"/>	Air Conditioning	<input type="checkbox"/>	Traction Control	<input type="checkbox"/>	Clock
<input type="checkbox"/>	Tinted Glass	<input type="checkbox"/>	All Wheel Drive	<input type="checkbox"/>	Roof Rack
<input type="checkbox"/>	Power Steering	<input type="checkbox"/>	Speed Control	<input type="checkbox"/>	Console
<input type="checkbox"/>	Power Windows	<input type="checkbox"/>	Rear Window Defroster	<input type="checkbox"/>	Driver Air Bag
<input type="checkbox"/>	Power Door Locks	<input type="checkbox"/>	Sun Roof or T-Top	<input type="checkbox"/>	Passenger Air Bag
<input type="checkbox"/>	Power Seat(s)	<input type="checkbox"/>	Tachometer	<input type="checkbox"/>	Front Disc Brakes
<input type="checkbox"/>	Power Brakes	<input type="checkbox"/>	Tilt Steering Wheel	<input type="checkbox"/>	Rear Disc Brakes
<input type="checkbox"/>	Antilock Brake System	<input type="checkbox"/>	AM/FM/Cassette Radio	<input type="checkbox"/>	Other-

LIST OTHER PERTINENT OPTIONAL EQUIPMENT ON NEXT PAGE (REMARKS SECTION)

REPORT OF VEHICLE CONDITION AT THE COMPLETION OF TESTING....Continued

REMARKS:

Equipment that is no longer on the test vehicle as noted on previous page:

Explanation for equipment removal:

Test Vehicle Condition:

RECORDED BY: _____

DATE: _____

APPROVED BY: _____

8. CALIBRATION OF TEST INSTRUMENTS

Before the contractor initiates the safety compliance test program, a test instrumentation calibration system will be implemented and maintained in accordance with established calibration practices. Guidelines for setting up and maintaining such a calibration systems are described in MIL-C-45662A, "Calibration System Requirements". The calibration system shall be set up and maintained as follows:

- A. Standards for calibrating the measuring and test equipment will be stored and used under appropriate environmental conditions to assure their accuracy and stability.
- B. All measuring instruments and standards shall be calibrated by the contractor, or a commercial facility, against a higher order standard at periodic intervals NOT TO EXCEED TWELVE (12) MONTHS! Records, showing the calibration traceability to the National Institute of Standards and Technology (NIST) shall be maintained for all measuring and test equipment.
- C. All measuring and test equipment and measuring standards will be labeled with the following information:
 - (1) Date of calibration
 - (2) Date of next scheduled calibration
 - (3) Name of the technician who calibration the equipment.
- D. A written calibration procedure shall be provided by the contractor, which includes as a minimum the following information for all measurement and test equipment:
 - (1) Type of equipment, manufacturer, model number, etc.
 - (2) Measurement range
 - (3) Accuracy
 - (4) Calibration interval
 - (5) Type of standard used to calibrate the equipment (calibration traceability of the standard must be evident).
- E. Records of calibration for all test instrumentation shall be kept by the contractor in a manner, which assures the maintenance of established calibration schedules. All such records shall be readily available for inspection when requested by the COTR. The calibration procedure must be approved by the COTR before the test program commences.

9. PHOTOGRAPHIC DOCUMENTATION

Photos, if required, shall be glossy black and white, 8 x 10 inches, and properly focused for clear images. A placard identifying the test vehicle model, vehicle NHTSA number and test date shall appear in each photograph and must be legible. Each photograph shall be labeled as to the subject matter such as "P581 Bumper Testing".

As a minimum the following photographs shall be included in EACH vehicle final test report:

- A. Vehicle's certification label
- B. Vehicle's tire information label or placard
- C. Full front view of test vehicle
- D. Full rear view of test vehicle
- E. 3/4 left front and left rear views of test vehicle
- F. 3/4 right rear and right front views of test vehicle
- G. Test vehicle's bumper impact energy absorption systems.

Obtain sufficient photographs of the following views, which will be developed in the event of a test failure.

- H. Test vehicle under hood views including engine mounts, fuel, cooling, exhaust, braking, and steering system components
- I. Test vehicle underbody views including fuel supply and return lines, vapor lines, cooling, exhaust propulsion, braking steering and suspension systems
- J. Views that show the vehicle's bumper face bar and adjacent body panels, filler panels and decorative moldings.

10. DEFINITIONS

BUMPER FACE BAR

Any component of the bumper system that contacts the impact ridge of the pendulum test device.

EFFECTIVE IMPACTING PENDULUM MASS

Equal to the mass of the block plus one-third (1/3) the mass of the support arms if the arms are of uniform cross section.

EXTERIOR VEHICLE SURFACE

Portions of a component, which are readily visible, which usually have a decorative coating or finish, applied, and which are intended to enhance vehicle appearance. Exceptions are the bumper face bar, and components and associated fasteners that directly attach the bumper face bar to the chassis frame.

FILLER PANEL

Component located between the top of the bumper face bar and the body panels that conceals and protects the components that structurally attach the bumper face bar to the chassis frame.

FIXED COLLISION BARRIER

Flat, vertical, unyielding surface with the following characteristics:

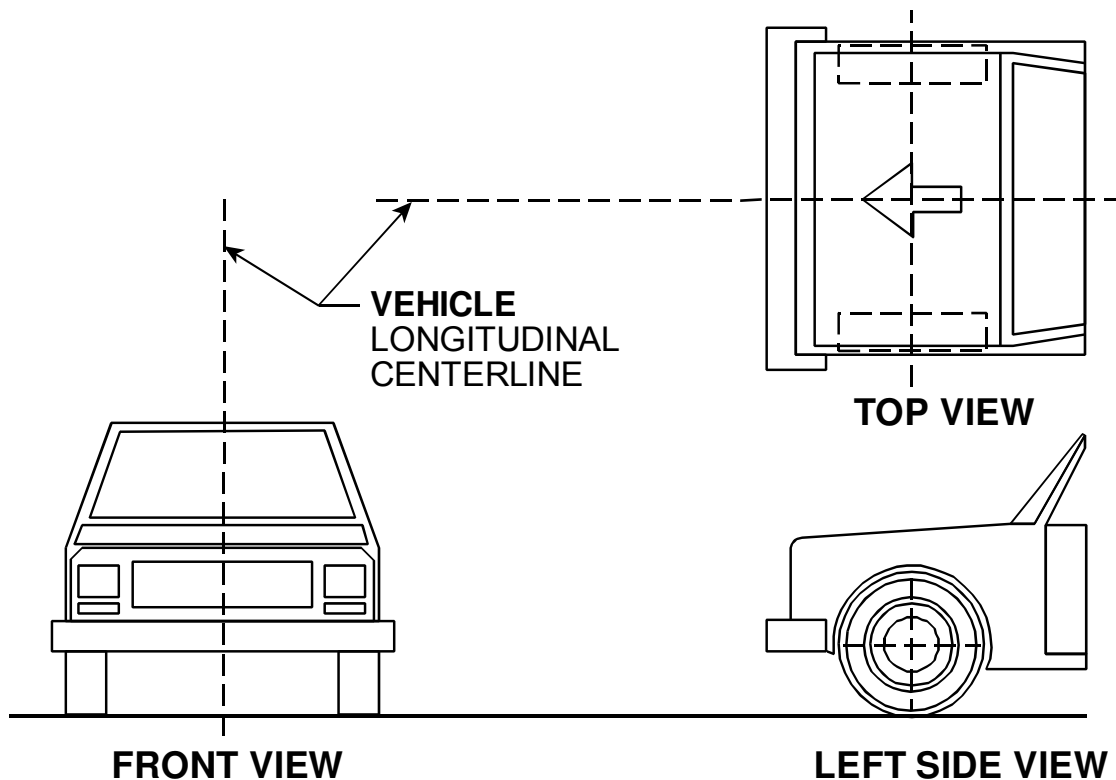
- A. Surface is sufficiently large that when struck by a tested vehicle, no portion of the vehicle projects or passes beyond the surface.
- B. Approach is a horizontal surface that is large enough for the vehicle to attain a stable attitude during its approach to the barrier, and that does not restrict vehicle motion during impact.
- C. When struck by a vehicle, the surface and its supporting structure absorb no significant portion of the vehicle's Kinetic Energy ($KE = 1/2mv^2$), so that a performance requirement described in terms of impact with a fixed collision barrier must be met no matter how small an amount of energy is absorbed by the barrier.

10. DEFINITIONS....Continued

LONGITUDINAL or LONGITUDINALLY

Parallel to the longitudinal centerline of the test vehicle.

TEST VEHICLE LONGITUDINAL CENTERLINE LOCATION



OPTICAL AXIS

Line formed by the intersection of a vertical plane parallel to the longitudinal axis of the vehicle through the filament center and a horizontal plane through the filament center.

OPTICAL CENTER

- A. For a Direct Optics Lamp, means the point of intersection of the optical axis with the normal external surface of the lens.
- B. For a Parabolic Reflector Lamp, means the point of intersection of the axis of the Parabola with the normal external surface of the lens.

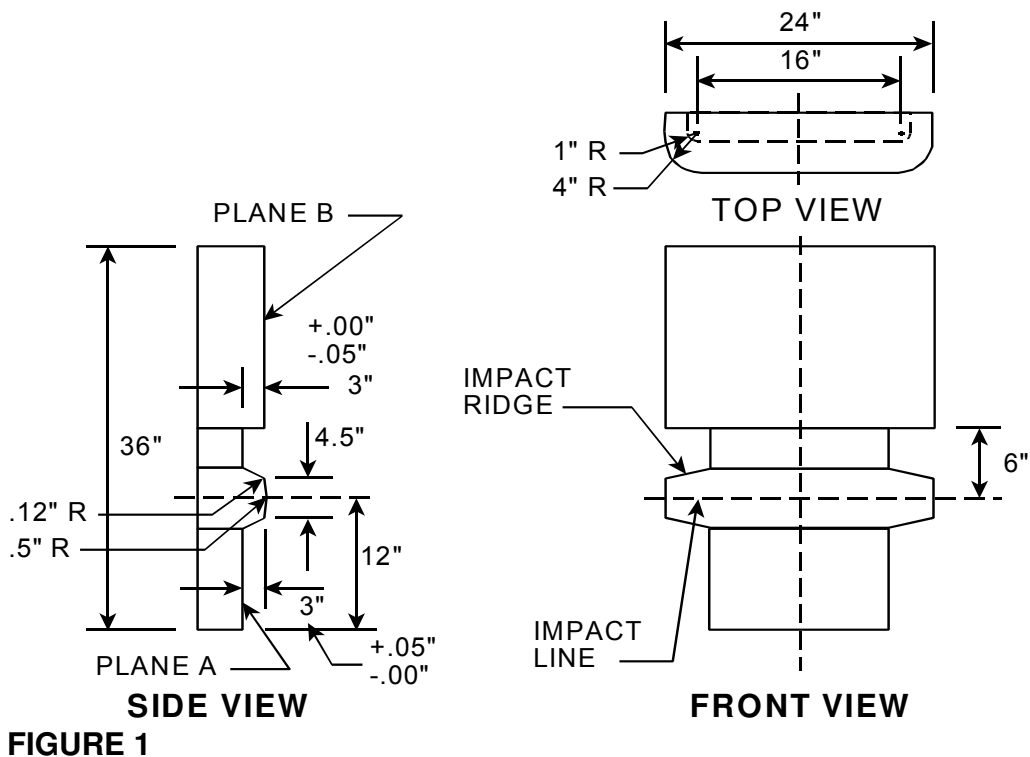
10. DEFINITIONS....Continued**PENDULUM TEST DEVICE (PTD)**

Test device with the following characteristics:

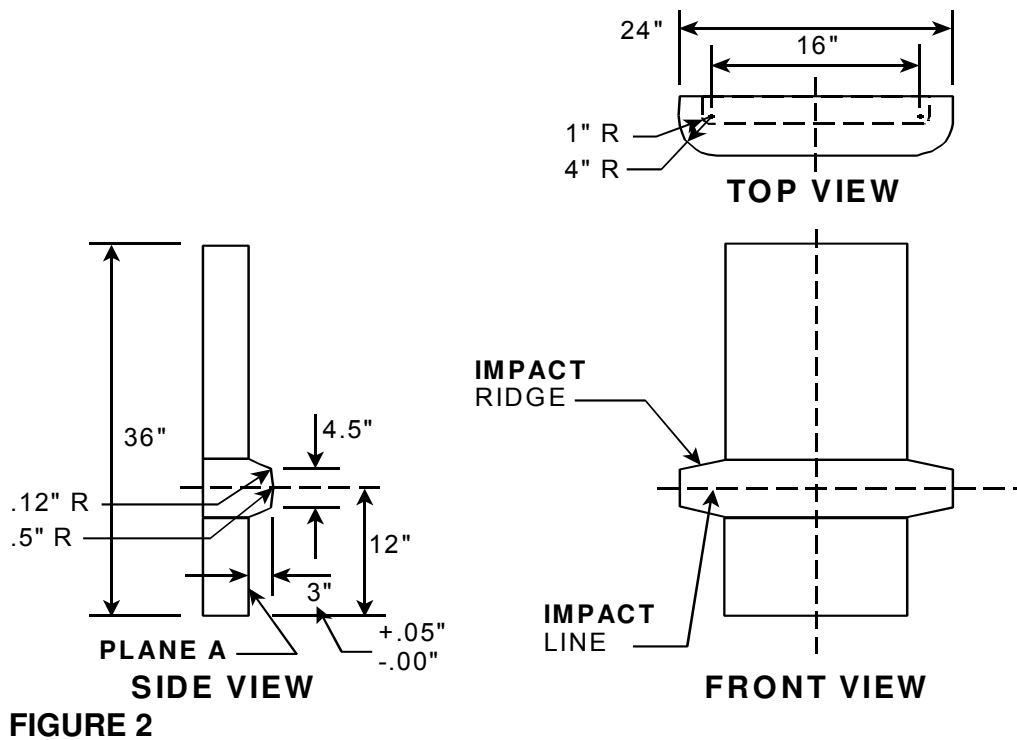
- A. Impacting block shall have one side contoured as specified in Figures 1 and 2. The impact ridge made of AISI steel with a minimum hardness of 30 Rockwell C.
- B. PTD shall be constructed in such a way as to maintain Plane A vertical within $\pm 0.25^\circ$ and the impact line horizontal within $\pm 0.25^\circ$ from release until the onset of rebound.
- C. Planes A and B shall be instrumented to measure the longitudinal contact force during impact tests. Capabilities shall exist for recording contact loads to at least 2500 lbs. on each contact plane. Accelerometers shall be mounted on the contact planes to compensate for inertial induced errors. A general arrangement for a representative force measurement system is presented in Figure 3. A system accuracy of ± 80 lbs. shall be demonstrated prior to the initiation of testing.
- D. Arc described by any point on the impact line shall be constant, with a minimum radius of 11 feet, and lie in a plane perpendicular to Plane A of the PTD.
- E. Test area is a flat, level, rigid concrete surface large enough to allow proper positioning of the test vehicle, and that does not restrict vehicle motion during impact.
- F. Height of the impact line from the test surface must be adjustable over the range of 15.5" to 20.5".

10. DEFINITIONS....Continued

BUMPER IMPACT BLOCK TEST DEVICE



BUMPER IMPACT BLOCK TEST DEVICE



10. DEFINITIONS....Continued

BUMPER IMPACT FORCE MEASUREMENT SYSTEM

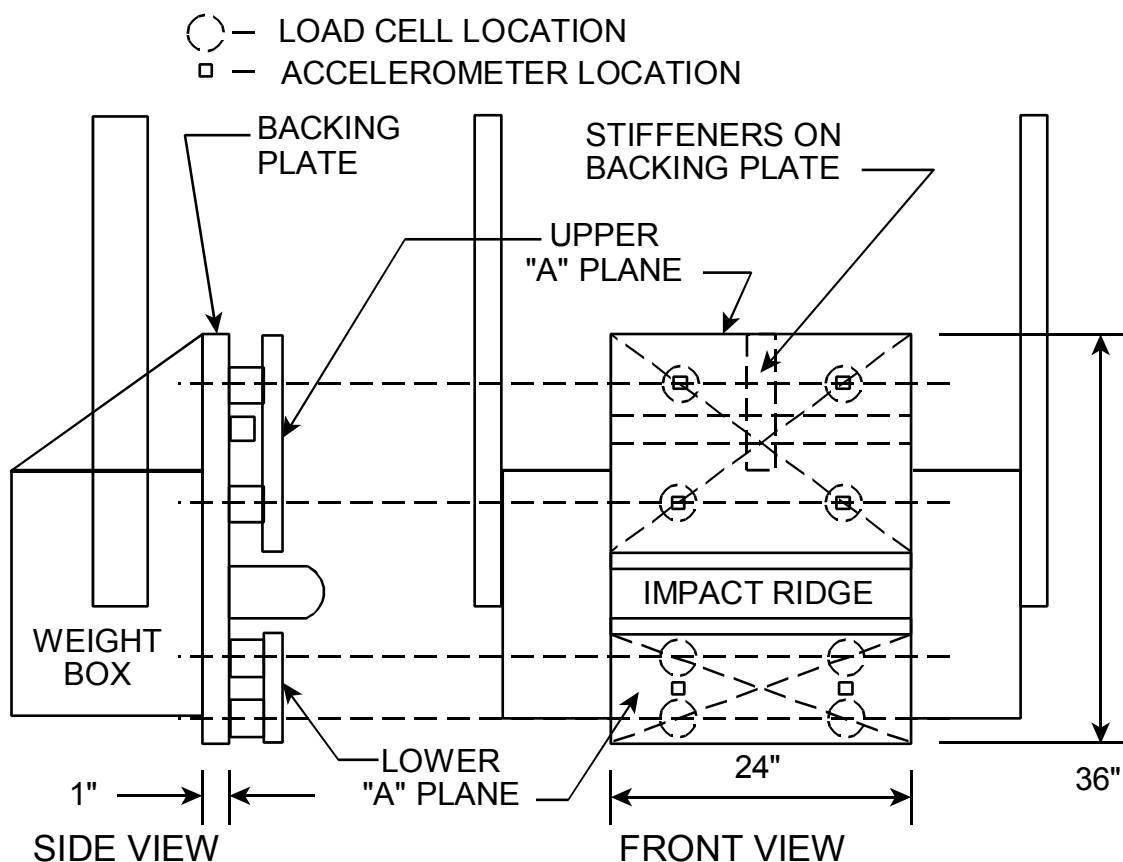


FIGURE 3

- G. Effective impacting mass of the test device shall be equal to the measured Unloaded Vehicle Weight (UVW) of the test vehicle less 40 to 90 lbs.
- H. Center of percussion of the test device shall be located on the impact line. The pendulum shall be tested as described in section 11, "Compliance Test Execution."
- I. Pendulum device shall have a suitable pullback and quick release mechanism so that there is no delay in the free fall of the pendulum.

REFLEX REFLECTOR

Optical device that reflects light emitted from an approaching vehicle back to the driver of that vehicle.

STONE SHIELD

Component located between the bottom of the bumper face bar and the body panels that conceals and protects the components that structurally attach the bumper face bar to the chassis frame.

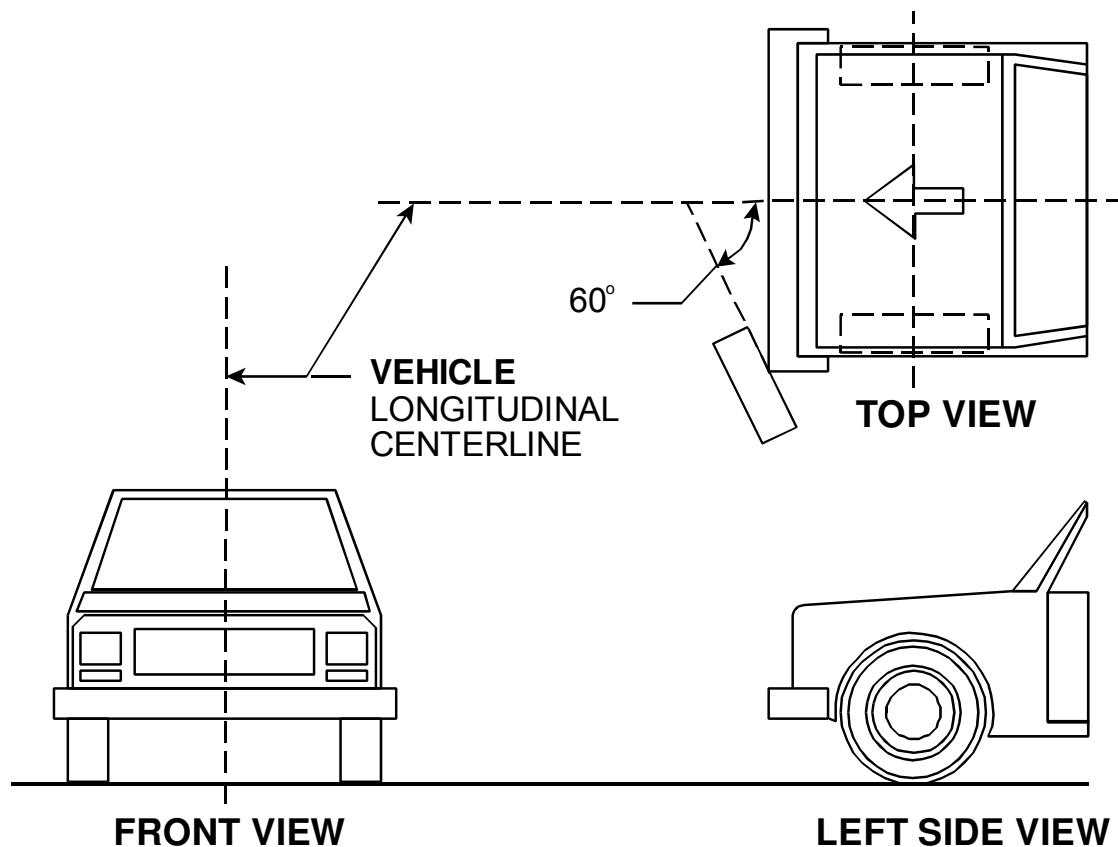
10. DEFINITIONS....Continued**UNLOADED VEHICLE WEIGHT (UVW)**

Weight of a vehicle with maximum capacity of all fluids necessary for operation of the vehicle, but without cargo or occupants.

VEHICLE CORNER

Initial contact point on the vehicle, established by contact between the vehicle and the impact ridge of the pendulum test device under the following conditions:

- A. Impact line of the test device is at the specified impact height
- B. Vehicle longitudinal centerline forms an angle of 60° with Plane A of the test device.

TEST VEHICLE CORNER INITIAL CONTACT POINT

11. PRETEST REQUIREMENTS

Prior to conducting any compliance test, contractors, are required to submit a detailed in-house compliance test procedure to the COTR which includes a step-by-step description of the methodology to be used. Written approval must be obtained from the COTR before initiating the compliance test program so that all parties are in agreement.

The contractor's in-house test procedure shall contain a complete listing of test equipment and a detailed checkoff list. There shall be no contradiction between the OVSC Laboratory TP and the contractor's in-house test procedure. The list of test equipment shall include instrument accuracy and calibration dates.

TEST DATA LOSS

A compliance test is not to be conducted unless all of the various test conditions specified in the applicable OVSC Laboratory TP have been met. Failure of a contractor to obtain the required test data and to maintain acceptable limits on test parameters in the manner outlined in the applicable OVSC Laboratory TP shall require a retest at the expense of the contractor. The retest costs will include the cost of the replacement vehicle or item of motor vehicle equipment and the service costs for conducting the retest. The original Government Furnished Property (GFP) will become the property of the contractor after the retest has been successfully conducted.

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION

REQUIREMENTS

Each vehicle shall meet the following damage criteria when impacted in accordance with these procedures.

LAMPS - VISIBILITY

Each lamp or reflective device except license plate lamps shall be free of cracks and shall comply with applicable visibility requirements of S4.3.1.1 of FMVSS No. 108. The following SAE Standards give the specifications for each lighting device requiring compliance with the applicable visibility requirements of S4.3.1.1 of S108:

LAMP ASSEMBLY	SAE STANDARD	EFFECTIVE DATE	REQMT
Tail	J585e	Sep 1977	(1)
Stop	J586c	Aug 1970	(1)
Turn Signal	J588e	Sep 1970	(2)
Backup	J593c	Feb 1968	(3)
Side Marker	J592e	Jul 1972	(4)
Parking	J222	Dec 1970	(4)

The following list contains excerpts from the above referenced SAE Standards that are relevant to the requirements of this Laboratory Procedure:

- A. Visibility of the lamp shall not be obstructed by any part of the vehicle throughout the photometric test angles for the lamp. Signals from lamps on both sides of the vehicle shall be visible through a horizontal angle from 45° to the left to 45° to the right. Where more than one lamp or optical area is lighted on each side of the car, only one such area on each side need comply. To be considered visible, the lamp must provide an unobstructed projected illuminated area of outer lens surface, excluding reflex, at least 2 in² in extent, measured at 45° to the longitudinal axis of the vehicle.
- B. Visibility of the front signal to the front, and the rear signal to the rear, shall not be obstructed by any part of the vehicle throughout the photometric test angles for the lamps. In addition, lamps mounted on the left side of the vehicle shall be visible through a horizontal angle of 45° to the left, and lamps mounted on the right side of the vehicle shall be visible through a horizontal angle of 45° to the right. To be considered visible,

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

the lamp must provide an unobstructed effective projected illuminated area of outer lens surface, excluding reflex, at least 2 in² in extent measured at 45° to the longitudinal axis of the vehicle.

When there is more than one lamp on each side at the front or rear, only one lamp on each side, front or rear, need comply with the 45° requirement.

- C. Backup lamps shall be mounted on the rear so that the center of the lens of at least one lamp is visible from any eye point elevation from at least 6 feet to 2 feet above the horizontal plane on which the vehicle is standing; and from any position in the rear, rearward of a vertical plane perpendicular to the longitudinal axis of the vehicle, 3 feet to the rear of the vehicle and extending 3 feet beyond each side of the vehicle.

Visibility of the lamp shall not be obstructed by any part of the vehicle throughout the photometric test angles for the lamp. Refer to appropriate SAE Standard for maximum horizontal photometric angles.

LAMPS - HEADLAMP AIM

The aim of each headlamp shall be adjustable to within the beam aim inspection limits specified in Table 2 of SAE Recommended Practice J599b, Jul 1970, measured with a mechanical aim conforming to the requirements of SAE Standard J602a, Jul 1970.

TEST VEHICLE'S OPERATIONAL CAPABILITY

- A. Hood, trunk, and doors shall operate in the normal manner.
- B. Fuel and cooling systems shall have no leaks or constricted fluid passage and all sealing devices and caps shall operate in the normal manner.
- C. Exhaust system shall have no leaks or constrictions.
- D. Propulsion, suspension, steering, and braking systems shall remain in adjustment and shall operate in the normal manner.
- E. Pressure vessel used to absorb impact energy in an exterior protection system by the accumulation of gas pressure or hydraulic pressure shall not suffer loss of gas or fluid accompanied by separation of fragments from the vessel.

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

- F. Vehicle shall not touch the test device, except on the impact ridge shown in Figures 4 and 5, with a force that exceeds 2000 pounds on the combined surfaces of Planes A and B of the test device.

BUMPER IMPACT BLOCK TEST DEVICE

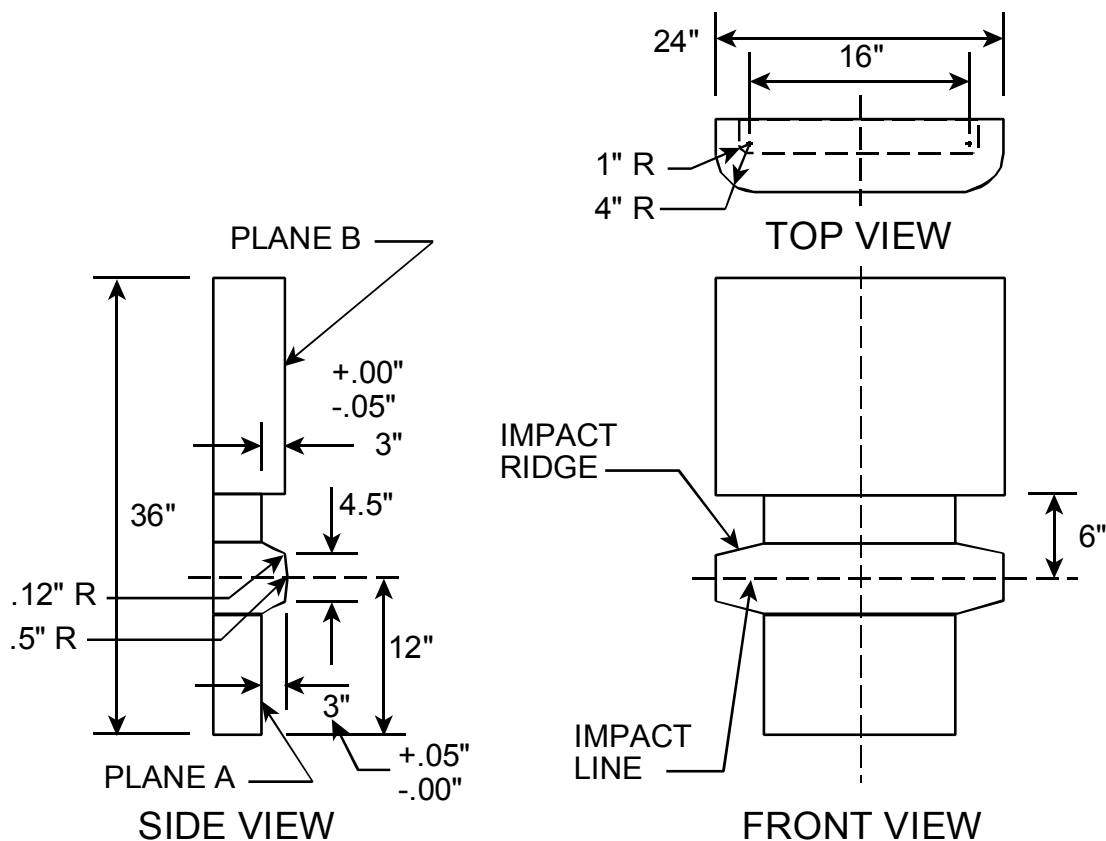


FIGURE 4

- G. The exterior surfaces shall have no separations of surface materials, paints, polymeric coatings, or other covering materials from the surface to which they are bonded, and no permanent deviations from their original contours 30 minutes after completion of each pendulum and barrier impact, except where such damage occurs to the bumper face bar and the components and associated fasteners that directly attach the bumper face bar to the chassis frame.

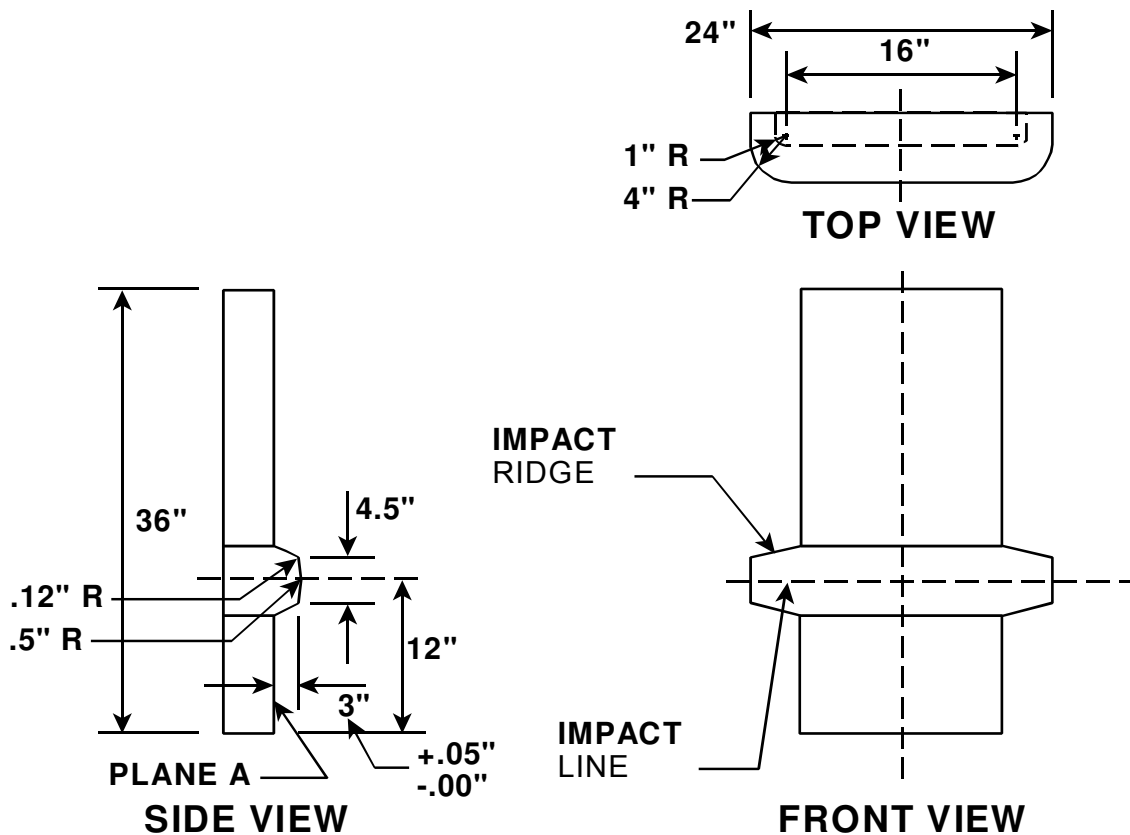
- H. There shall be no breakage or release of fasteners or joints.

TEST EQUIPMENT

A list of the minimum test equipment needed to evaluate the minimum performance requirements follows:

- A. Fixed collision barrier in accordance with the requirements given in DEFINITIONS.

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

BUMPER IMPACT BLOCK TEST DEVICE**FIGURE 5**

- B. Straight, level, paved surface with a straight guide system anchored to the roadway and positioned to guide the test vehicle perpendicularly into the lateral center of the barrier face.
- C. Photographic pit extending perpendicular to the barrier face and having sufficient length so that at least 1/2 of vehicle underbody can be photographically viewed and recorded throughout the impact.
- D. Two (2) certification timing traps positioned so that the vehicle velocity can be measured within 1 foot of the barrier face. The traps shall have the capability to measure vehicle impact velocity within 2 to 3 mph to an accuracy of ± 0.02 mph. The velocity measurement from both timing traps shall be permanently recorded by photographic means immediately following an impact test.
- E. High speed 16 mm cameras operating at a minimum film speed of 500 fps, placed in the following positions:
 - (1) Barrier overhead camera aligned directly on the center of the vehicle course and having a field of view large enough to include the impacted 1/2 of the vehicle length throughout the impact.

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

- (2) Pit camera(s) that will provide clear records of any fluid loss and will show the fuel, cooling, braking, propulsion, steering, exhaust, and energy absorption system components. A hand held camera will be utilized for recording any fluid loss immediately following impact.
 - (3) Barrier side view camera positioned on the right side of the vehicle path in as close proximity as possible to the vehicle and perpendicular to the vehicle path. The camera shall be at approximately the same height as the leading edge of the vehicle surface to be impacted and have a field of view including as much of the impacted surface as possible.
 - (4) Barrier side view camera positioned on the left side of the vehicle path and perpendicular to the vehicle path of travel, having a field of view large enough to include the impacted 2/3 of the vehicle length, including the passenger compartment, throughout the impact.
 - (5) Pulse generators with a minimum frequency of 100 pps for marking the edges of the 16mm film to permit correlation of film data from instant of impact on all cameras and time reference for film analysis.
 - (6) A strobe light will be placed in the field of view of each camera which will mark "Time Zero" when the most forward (or most rearward) part of the vehicle contacts the barrier unless the strobe is in the camera. Light from the strobe should not cover more than 3 frames of high speed film.
- F. A stationary test vehicle towing system having automatic or manual control of test vehicle impact speed. The set point or target speed accuracy of the impact shall be 2.3 ± 0.1 mph.
- G. Each test vehicle will be equipped with an onboard abort system attached to the vehicle brakes. Any secondary offboard type abort system attached to the vehicle shall not exert any loads on the test vehicle during impact. An offboard abort system must be approved by the COTR.
- H. A lateral guidance system and appropriate vehicle attachments to ensure that the vehicle is traveling perpendicular to the barrier face at impact. This system should ensure stable guidance and not affect the vehicle collapse or rebound in any manner. **NOTE:** Guidance system to be approved by the COTR prior to test.
- I. Mechanical headlamp aiming and alignment equipment conforming to the requirements of SAE J602a, Jul 1970.
- J. The following equipment is needed to verify the visibility requirement.

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

- (1) Camera and tripod. Camera with capacity for exposing 4" x 5" film negative
- (2) Illuminated dimensional reference in the form of either a linear scale (6" rule), or a simple geometric object of precisely known area.
- (3) Planimeter
- (4) Target stands having adjustable vertical and horizontal reference points that are suitable for establishing the visibility angles of each respective lighting device. See Figures 6, 7 and 8 which follow.

TURN SIGNAL LAMP TEST SETUP

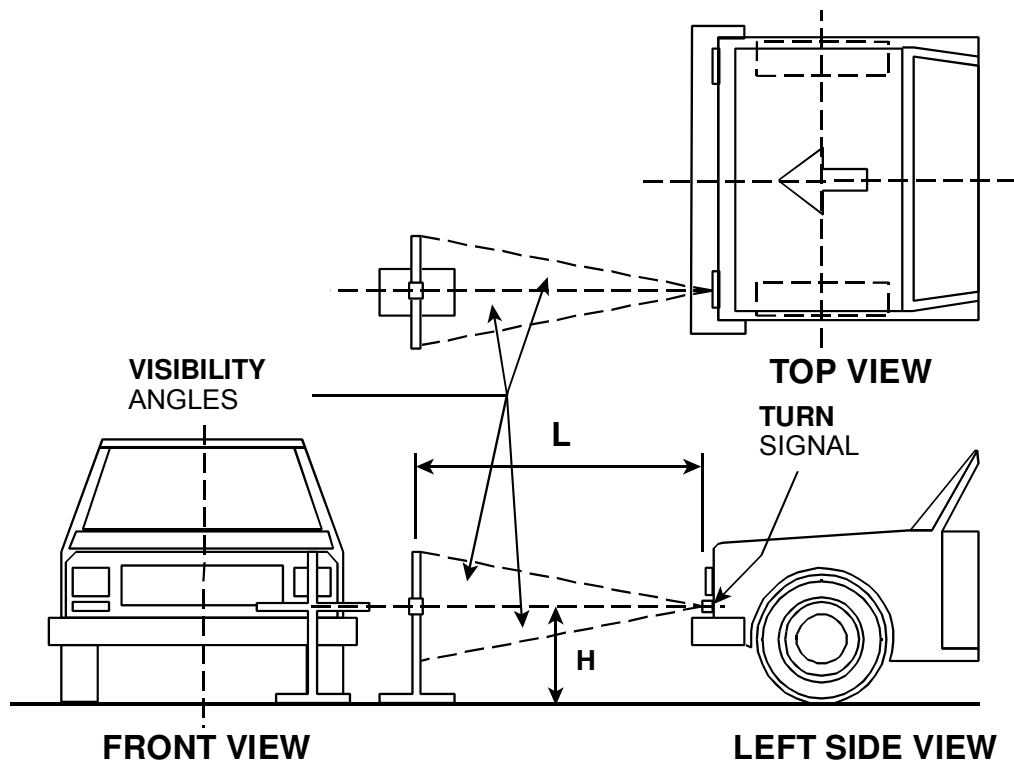


FIGURE 6

The following equipment is needed to perform the photographic procedure to establish visible vehicle damage to filler panels or stone shields.

Camera & Film:

Standard 4" x 5" view camera	Focal length of 127 mm
Maximum aperture - f/4.7	Coated lenses
Shutter speeds - 1 second to 1/400th of a second	
Film Type: 52 Pola-Pan 4" x 5" film for Polaroid prints	
Photoelectric exposure meter	
Kodak Gray Card	

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

BACKUP LAMP TEST SETUP

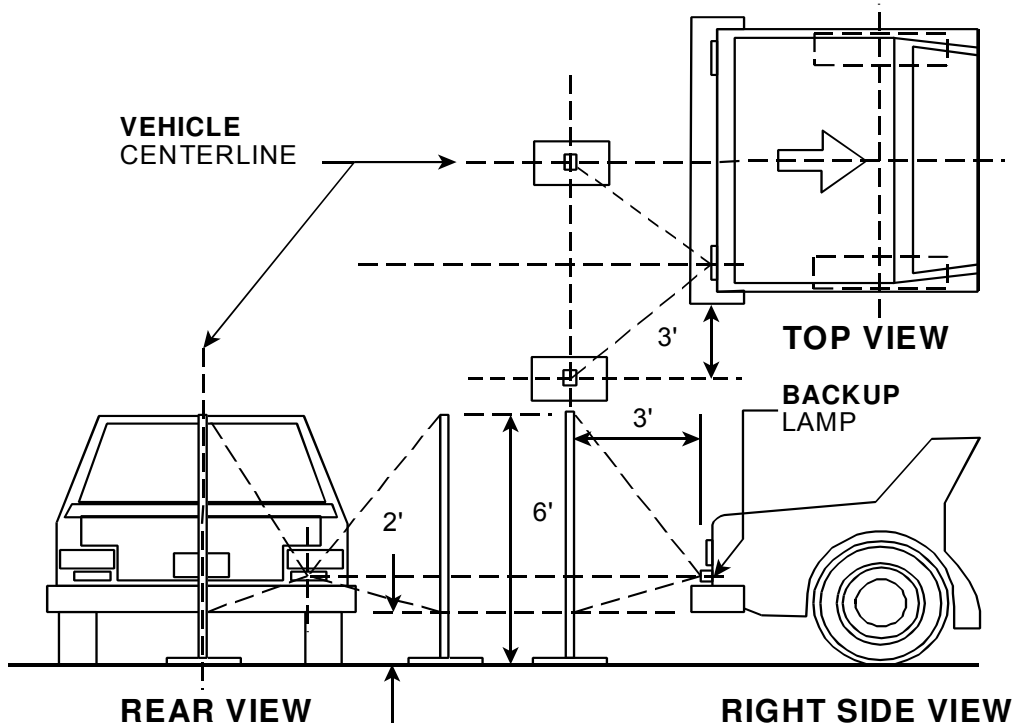


FIGURE 7

LIGHTING DEVICE TEST SETUP

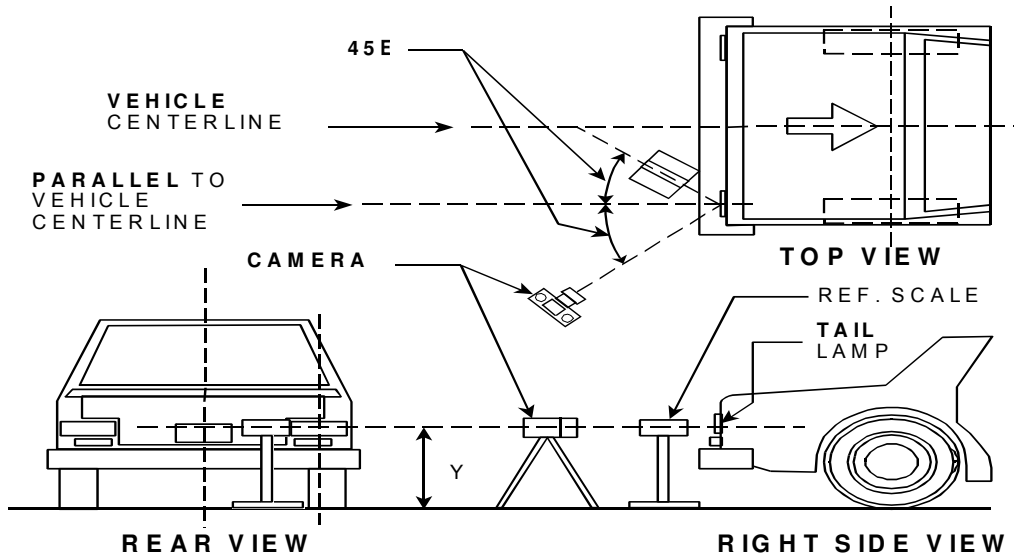


FIGURE 8

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

Illumination:

2 photoflood lamps (1000 watts) for main light

1 photoflood lamp (1000 watts) for fill-in light

4 tripods suitable to support camera and illumination devices

K. Front and rear suspension alignment measurement equipment

Additional equipment items necessary to conduct the pendulum impact tests are as follows:

L. Pendulum Test Device (PTD) in accordance with the requirement given in DEFINITIONS.

NOTE: The precise geometry requirements for the impact faces throughout the pendulum arc establish the PTD design as a pendulum with rigid pivot arms. Special care must be taken in the construction of the test device to make these pivot arms as light as possible, thus placing the bulk of the pendulum mass near the impact line and insuring proper location of the center of percussion. Adjustments to the impacting mass of the pendulum should be made with firmly attached weights placed in such a way as to keep the center of percussion properly located. Static torsional stiffness of the pendulum must be at least 110,000 foot pounds per radian. The static torsional stiffness must be verified before testing begins. A typical configuration which meets these requirements is shown in Figure 9.

M. Steel scale - minimum length of 20" and accuracy of ± 0.05 "

N. Electronic timer with accuracy of ± 0.010 seconds

O. Two (2) certification timing traps positioned so that the pendulum velocity can be measured within 1 foot of impact. The traps shall have the capability to measure pendulum velocity in the range of 2 to 3 mph to an accuracy of ± 0.02 mph for longitudinal impacts and in the range of 1 to 2 mph to an accuracy of ± 0.02 mph for corner impacts. The velocity measurement from both timing traps shall be permanently recorded by photographic procedures.

P. High speed 16 mm cameras operating at a minimum film speed of 500 fps, placed in the following positions:

- (1) Pendulum overhead camera aligned directly on the center of the vehicle course and having a field of view large enough to include the impacted 1/3 of the test vehicle length throughout the impact.

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

TYPICAL PENDULUM TEST DEVICE

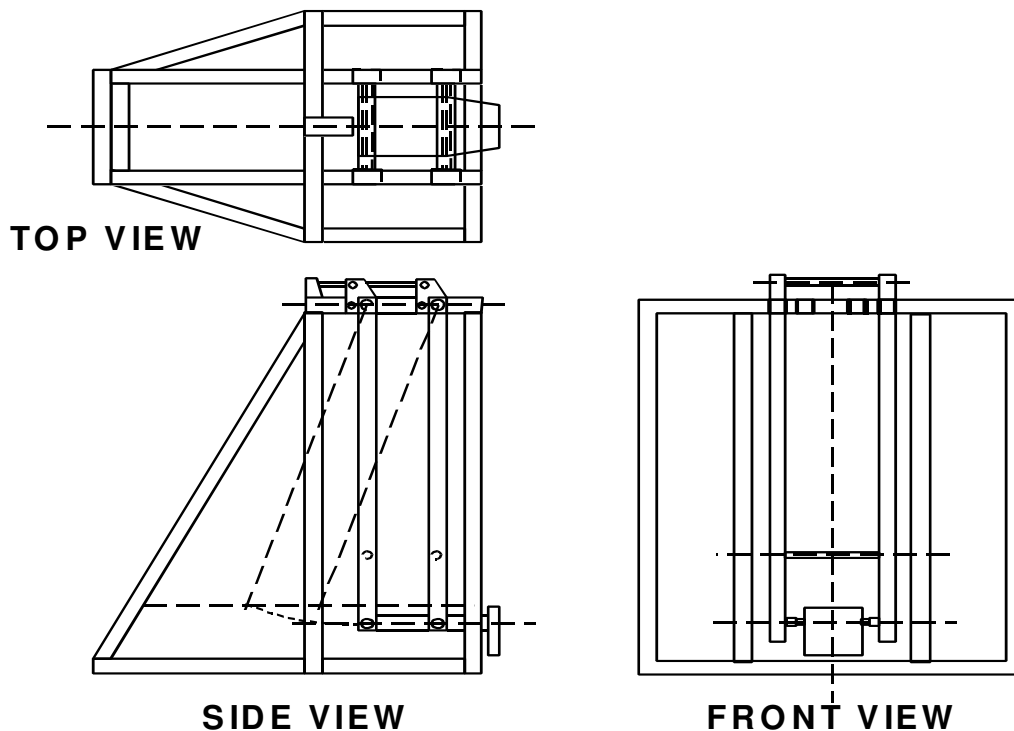


FIGURE 9

- (2) Pendulum side view camera positioned in as close proximity as possible to the vehicle on the side of the vehicle being impacted. The camera shall be at approximately the same height as the pendulum impact line, perpendicular to the plane of the pendulum arc, and have a field of view including as much of the impacted surface as possible.
 - (3) Pendulum side view camera positioned on the opposite side of the vehicle being impacted and having a field of view large enough to include the impacted 1/2 of the test vehicle length throughout the impact.
- Q. A hand held real time 16 mm camera (24 fps) to record vehicle motions during and after impact and for recording any fluid loss immediately following impact.
 - R. A switch that activates point of impact strobe lights visible in all high speed cameras. The switch will NOT be contacted by the impact ridge, Plane A or Plane B.
 - S. A tether system, if used, shall be attached to components of the vehicle undercarriage not directly related to the bumpers or bumper support structures for the purpose of limiting vehicle motion after impact and pendulum rebound. The tether system shall not exert any loads on the test vehicle during impact and shall restrain vehicle travel to one vehicle length after impact. A tether system must be approved by the COTR.

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

- T. All movie film will be edited into a single continuous reel. The introductory titles will show the laboratory name and location, vehicle NHTSA number, camera speed and timing pulse frequency. All impacts will be shown in sequence and each impact will be preceded by an identification showing impact number, date and vehicle NHTSA number.
- U. Plane A and Plane B shown in Figures 1 and 2 shall be instrumented to measure the longitudinal contact force on these planes during pendulum impact tests. Prestress errors induced by mounting load cells to the pendulum test device should be monitored and compensated for, if required. Capabilities for recording contact load time histories to 2500 lbs. on each plane shall be available, and overall measurement accuracy of ± 10 lbs. shall be demonstrated.
- V. The contact planes shall include accelerometers to compensate the measured force data for inertia errors. These accelerometers should be physically located as close as possible to the centroidal axis of the individual load cell, and the overall accuracy of the compensated force signal must be demonstrated through an approved test technique.
- W. Suitable instrumentation shall be provided to amplify, balance, and scale, the outputs from each of the load cells and accelerometer sensors. The signal conditioning electronics shall incorporate provisions for data channel calibration prior to an impact test.
- X. Suitable recording capability shall be provided to record each of the sensor output signals. It is noted that the contact force data will be processed through a SAE J211 Class 60 filter, and appropriate data channel bandwidth should be provided in the signal conditioning electronics and the recorder instrument.
- Y. Either analog circuitry or computer data reduction capability shall be provided to compensate the measured load cell data for inertia error and to provide filtering to SAE J211 Class 60 data. Output data shall consist of filtered scaled time histories of the total force on the upper plane, the lower plane, and both during the impact test. "Time Zero" (initial time of pendulum/vehicle contact) shall be defined in the output data plots.

Since different mass upper planes are required, a convenient method to account for these mass variations shall be provided in the compensation technique. Regardless of which compensation technique is used, it must be thoroughly documented and approved by the COTR prior to use.

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

- Z. A standard mercury thermometer to measure ambient temperature.

INSPECTION

The vehicle's exterior lamps and reflective devices, the fuel, cooling, exhaust, propulsion, suspension, steering, braking, and energy absorption systems shall be subjected to a visual and manual inspection to ascertain that each system is complete and functional per the manufacturer's recommendations. Any damage, deformation, misadjustment or other condition that could influence the test results or the purpose of the test program shall be recorded. Record headlight aim, the front suspension alignment, and the rear suspension alignment on vehicles with adjustable rear suspension, so that any change may be noted. The vehicle shall be subjected to a road test, including braking stops, to insure that all vehicle systems are in proper operating condition. Particular attention should be directed to note the condition of the bumper face bar, bumper/vehicle filler panels, and body parts in close proximity to the bumper face bar. Any damage including small body surface paint scratches and chips, minor dents and other visually observable characteristics should be noted in the test log book and pointed out to the COTR prior to the initiation of actual impact tests. Approval from the COTR must be obtained prior to test initiation if any observable external body surface damage is noted on the vehicle.

PROCEDURE

PREPARATION

- A. If vehicle is equipped with a trailer hitch, IT MUST BE REMOVED.
- B. If the license plate supporter bracket is a dealer installed kit provided by the manufacturer, it must be removed.
- C. Obtain and record unloaded weight of vehicle with maximum capacity of fuel, oil and coolant. Weight measurement accuracy must be within ± 40 lbs. per vehicle. Vehicle shall be tested at UVW.
- D. Check and record vehicle unloaded attitude on a level surface (tire inflation pressure of all tires, including spare, must conform to the vehicle manufacturer's recommended pressure for the unloaded vehicle). Measure from floor to a permanent scribe mark on fender well on a vertical line through each axle centerline and at all four corners of vehicle. Check that spare tire and jack are stowed and secured per the manufacturer's specifications.
- E. Stripe the test vehicle as follows, using a striping tape having contrasting markings (such as yellow and black) at 1" intervals:
 - (1) One stripe along the entire vehicle longitudinal centerline

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

- (2) One horizontal stripe along each side of the vehicle
- (3) Striping or gridlines on the front and rear impacted surfaces and on the adjoining body panels, in the field of the broadside cameras, for determining relative motions of these components during impact.

NOTE: Striping should not be placed in an area that may be contacted by the impact ridge of the PTD.

- F. Place 1 foot photographic reference points on the side of the test vehicle in the field of view of the broadside cameras and on the top of the vehicle in the field of view of the overhead camera.
- G. Attach placards large enough to be legible to the test vehicle denoting the model year, make, model and body style (such as 90 Ford Escort 4DHB), impact number, and vehicle NHTSA number in view of each camera.
- H. Position the front seat(s) to the longitudinal midposition. If there is no adjustment position at the midpoint, move the seat(s) rearward to the first adjustment aft of the midpoint. Adjust seat to the lowest position if vertically adjustable. Place adjustable seatbacks in the nominal design position. Consult the owners manual for details.
- I. Position adjustable headrest to the highest vertical location and affix photographic targets in view of the broadside cameras.
- J. Position the front movable side windows in their fully open position and all other windows in the fully closed position.
- K. Assure all vehicle doors are unlocked.
- L. REMOVE ALL REMOVABLE SHIPPING TIEDOWN PLATES ATTACHED TO THE FRONT OR REAR VEHICLE SURFACES.

PENDULUM IMPACTS

Pretest Procedure

- A. Activate the contact plane electronic equipment and determine that each load cell and each accelerometer is operating free from preload errors and that the data recording and analysis equipment is operating properly.
- B. Enter appropriate setting to identify the proper mass of the upper plane into the compensating circuitry.

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

C. Prior to performance of the pendulum test, and after each change in configuration of the PTD, perform the following:

- (1) Adjust the effective impacting mass of the PTD equal between - 40 and - 90 lbs. of the UVW weight of the test vehicle.
- (2) With the impact line of the PTD set at the specified impact height, conducting the following operation to ascertain if the center of percussion is located on the impact line:

Pull the test device back to a suitable small angle less than 10° and release, allowing it to oscillate freely. Using an electronic timer, measure the time necessary for the test device to complete 10 full cycles (both over and back), and compare this experimental time with the time calculated from the following equation:

$$t = 20 \left(\sqrt{\frac{l}{g}} \right)$$

Where:

- l = length of the pendulum arc, from pivot point(s) to impact line (inches) and accurate to ± 0.125"
- g = local gravitational acceleration (in./sec.²) accurate to ± 0.10%

Adjust the placement of weight on the test device until the experimental time is within 0.75% of the calculated time. Record both experimental time and calculated time on the appropriate test data sheet.

D. Prior to each pendulum impact, perform the following:

- (1) Ascertain the correct position of release of the PTD in order to obtain the desired impact speed.
- (2) Position trap timers and electronic readout equipment. Activate system to insure stable operating temperature. Check out operation of all timing trap equipment.
- (3) With the PTD hanging at the lowest point of its arc, measure the height of the impact line from the test surface and record the measurement on the appropriate Data Sheet.
- (4) With the PTD at the lowest point of its arc, position the test vehicle so that it touches, but does not move the PTD according to the following requirements:

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

- (A) For longitudinal impacts, the vehicle longitudinal centerline must be perpendicular to Plane A of the test device within $\pm 2^\circ$.
- (B) For longitudinal impacts at a height of 20" (+ 0", - 0.1") the midpoint of the impact line with respect to the test vehicle shall be displaced a minimum of 12" laterally from its position in any prior impact.
- (C) For longitudinal impacts at a height between 16.1" and 19.9", the impact line of the PTD shall be displaced vertically a minimum of 2" from its position in any prior impact, unless the midpoint of the impact line with respect to the test vehicle is displaced laterally a minimum of 12" from its position in any prior impact.
- (D) For longitudinal impacts, the outer edges of the impact face of the PTD shall be located inboard of the test vehicle corners.
- (E) For longitudinal impacts, the exact location of the initial impact and subsequent impacts is left to the discretion of the testing agency (within the constraints given above and subject to approval by the COTR)
- (F) For corner impacts, the vehicle longitudinal centerline must form an angle of $60^\circ \pm 2^\circ$ with Plane A of the PTD.
- (G) For corner impacts, align the vehicle so that a vehicle corner touches, but does not move, the lateral center of the PTD.

Record the lateral location of the midpoint of the impact ridge on the data sheet.

- (5) Place a stadia pole on each side of the vehicle directly in line with one of the 1 foot photographic reference points, as viewed through the broadside cameras. This will provide an additional means of determining the instant of impact. Aim, load, focus and check operation of all cameras. Record the position of each camera.
- (6) Move the PTD to its release position and perform the following checks and operations:
 - (A) Attach tether (if used) to test vehicle
 - (B) Place transmission in neutral

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

- (C) Disengage parking brake
- (D) Latch doors, hood and trunk
- (E) Check glove compartment door (latched, but not locked)

Sequence

Each applicable vehicle will be subjected to the following impacts by the PTD:

- A. Two (2) longitudinal impacts on the vehicle front surface at 2.3 ± 0.1 mph using the PTD shown in Figure 2 with its impact line at any height between 16.1" and 19.9".
- B. Two (2) longitudinal impacts to the vehicle rear surface at 2.3 ± 0.1 mph using the PTD shown in Figure 2 with its impact line at any height between 16.1" and 19.9".
- C. One or more of the above impacts may be conducted at a height between 19.9" and 20" using the PTD shown in Figure 1.
- D. One (1) corner impact each to 2 diagonally opposite front and rear corners of the vehicle at 1.3 ± 0.1 mph using the PTD shown in Figure 1 with its impact line at a height of 20", + 0.00", - 0.10".
- E. One (1) corner impact each to the 2 vehicle corners not tested in Item C at 1.3 ± 0.1 mph using the PTD shown in Figure 2 with its impact line at any height between 16.1" and 19.9".

The sequence of the above impacts is left to the discretion of the testing agency (subject to approval by the COTR) but any 2 successive impacts to either the front or rear of the vehicle must be performed at intervals of NOT LESS THAN 30 minutes.

Impact Test

- A. Timing traps and cameras
- B. Activate all data acquisition and recording equipment
- C. Alert all concerned personnel at the test site
- D. Upon signal of engineer in charge, release pendulum and record impact number, time of day and impact speed

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

NOTE: OVSC procedures requires an impact velocity of 2.3 ± 0.1 mph for longitudinal impacts and 1.3 ± 0.1 mph for corner impacts.

Post Test Evaluation

- A. Photograph the impacted area of the test vehicle immediately after each impact. The photographs shall be suitably identified with the number of the impact.
- B. Photographic Procedure for Evaluating Damage to Shielding Panels:

The photographic procedure specified for P581 compliance testing will be used as an aid in determining whether damage to shielding panels (filler panels and stone shields) is "normally observable" for the purpose of compliance with the standard. Upon completion of each pendulum impact during which damage is suspect, photographs will be taken of the shielding panel area in accordance with the procedure that is described below. Damage that is visible to the unaided eye in a good quality photographic print of the questionable area will be considered "normally observable" and, therefore, a test failure.

SIDE VIEW PHOTO PROCEDURE

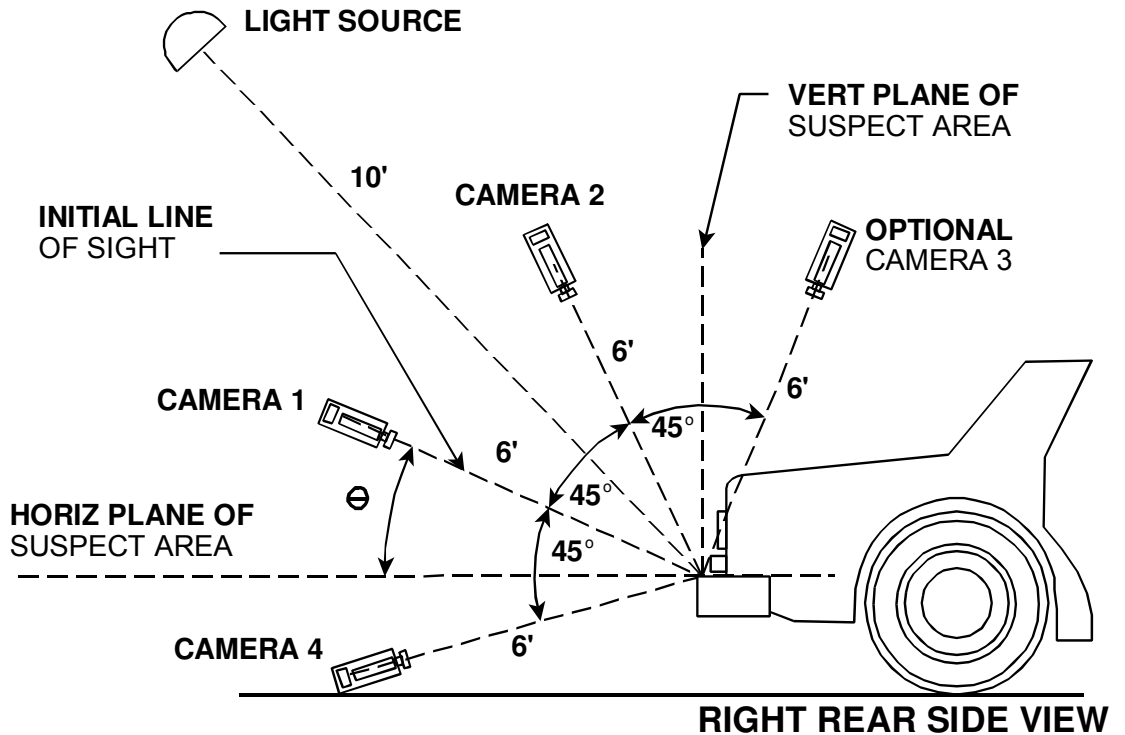


FIGURE 10

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

PLAN VIEW PHOTO PROCEDURE

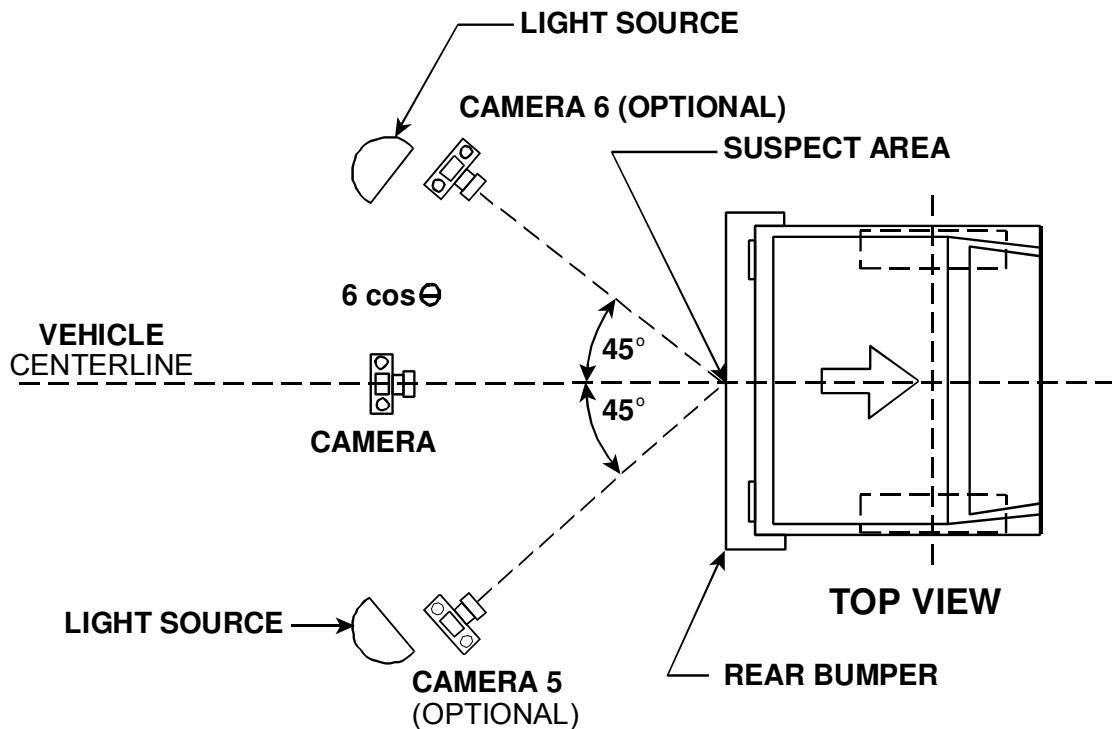


FIGURE 11

The photographs will be taken indoors using the following illumination procedures:

- (1) Illuminate the area to be photographed with crosslighting using 2 photoflood lamps (1000 watts) for main light, and 1 photoflood lamp (1000 watts) for fill-in light.
- (2) Position the photoflood lamps so that the light rays strike the subject area at a 45° angle from a distance of 10 feet from the area being photographed.

Position the camera at a distance of 6 feet from the center of the suspect area and utilizes ground glass focusing to properly focus the camera for that distance. Photographs are taken both at 90° and 45° angles relative to the suspect area.

With a General Electric, Dejur or Weston photoelectric exposure meter to determine the exposure requirements, take light readings by measuring the intensity of reflected light from a Kodak Gray Card placed upon the area to be photographed. The meter is placed near enough to the gray

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

card to indicate the average reflected light (at least within a distance equal to the width of the subject being photographed). The light reading obtained is set opposite the film speed which is indicated on the meter so that the f/stop or the aperture settings and shutter speeds coincide. The correct camera setting is read directly from the meter.

A 4" x 5" black and white photographic contact print from the Polaroid film is produced. Examine the complete contact print with the unaided eye and determine result in accordance with criterion stated for a test failure.

- (3) At least 30 minutes after each pendulum impact, determine whether the exterior surfaces, except for the bumper face bar, have separation of surface materials, paint, polymeric coatings, or other materials from the surface to which they are bonded, and or permanent deviations from their original contours.
- (4) The vehicle shall not touch the pendulum test device, except on the impact ridge shown in Figures 1 and 2, with a force that exceeds 2000 lbs. on the combined surfaces of planes A and B of the test device. Record contact plane load data through an SAE J211 Class 60 filter, and determine if the combined load on planes A and B is less than 2000 lbs. during the impact. Place the actual loads on Plane A, Plane B, and the total in Data Sheet 3.

BARRIER IMPACTS

Pretest Procedure

- A. Install soft (nonrigid) guide attachments to the test vehicle, utilizing bolts, holes, or other existing attaching points which have been provided during original manufacture, when possible. These attachments must be approved by the COTR prior to installation.
- B. Install and check operation of the brake abort system.
- C. Immediately before each test, calibrate tow vehicle null meter or other propulsion method target speed indicating instrument.
- D. Position trap timers and electronic readout equipment. Activate system to insure stable operating temperature. Check out operation of all timing trap equipment.
- E. With the vehicle attached to the guide shoe and rail, move it to the barrier face and conduct the following operation while in contact with the barrier:

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

Place a stadia pole beside vehicle directly in line with one of the 1 foot photographic reference points, as viewed through the broadside camera. This will provide an additional means of determining the instant of impact. Aim, load, focus, and check operation of all cameras.

Record each camera's position.

- F. Place the vehicle at its starting position and perform the following check and operations:
- (1) Attach tow cable to test vehicle
 - (2) Place transmission in neutral
 - (3) Disengage parking brake
 - (4) Close doors, hood and trunk
 - (5) Check glove compartment door (latched, but not locked)

Impact Test

- A. Start engine and allow to warm up and run at its normal hot idle speed (off fast idle cam)
- B. Arm timing traps, cameras, and brake abort systems
- C. Alert all concerned personnel at the test site
- D. Upon signal of engineer in charge, tow vehicle into the barrier and record impact speed **NOTE:** OVSC TP requires an impact velocity of 2.3 ± 0.1 mph for barrier impacts.
- E. Allow the test vehicle engine to idle for at least five minutes after impact and check for proper operation, leaks, etc. If the engine stalls, restart and note on the test data sheet.

Test Evaluation

Inspect the following items and/or systems and provide complete details, including photographs, of any damage, fluid or exhaust gas, constrictions or abnormal conditions that have resulted from the impacts and may impair the safe operation of that vehicle component or system.

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

- A. Determine if any suspect damage on filler panels and stone shields is "normally observable." "Normally observable" damage is not permitted after the completion of barrier impact.
- B. Determine if the exterior surfaces, except for the bumper face bar, have separation of surface materials, paint, polymeric coatings, or other materials from the surface to which they are bonded, or permanent deviations from their original contours at least 30 minutes after each barrier impact.
- C. Determine if each lamp or reflective device, except license plate lamps, is free of cracks and complies with the applicable visibility requirements. Visibility angles and/or projected illuminated areas of each lighting or signaling device shall be measured and recorded on the appropriate data sheet.

Tail, stop, turn signal and side marker lamp visibility angles shall be checked with a test setup similar to that shown in Figure 12. The horizontal and vertical (H-V) centerline of the signaling lamp shall coincide with H-V intersection of the test fixture arms. The height of the test fixture H-V axis (dimension H) must be equal to the height of the horizontal centerline of the signaling lamp being tested. The projection distance of the visibility angles along the longitudinal axis of the signaling lamp (dimension L) shall be at least 6 feet. Strings shall be fastened at the geometric center of the lamp and stretched to points of attachments to the test fixture that correspond to the required visibility angles being checked.

TURN SIGNAL LAMP TEST SETUP

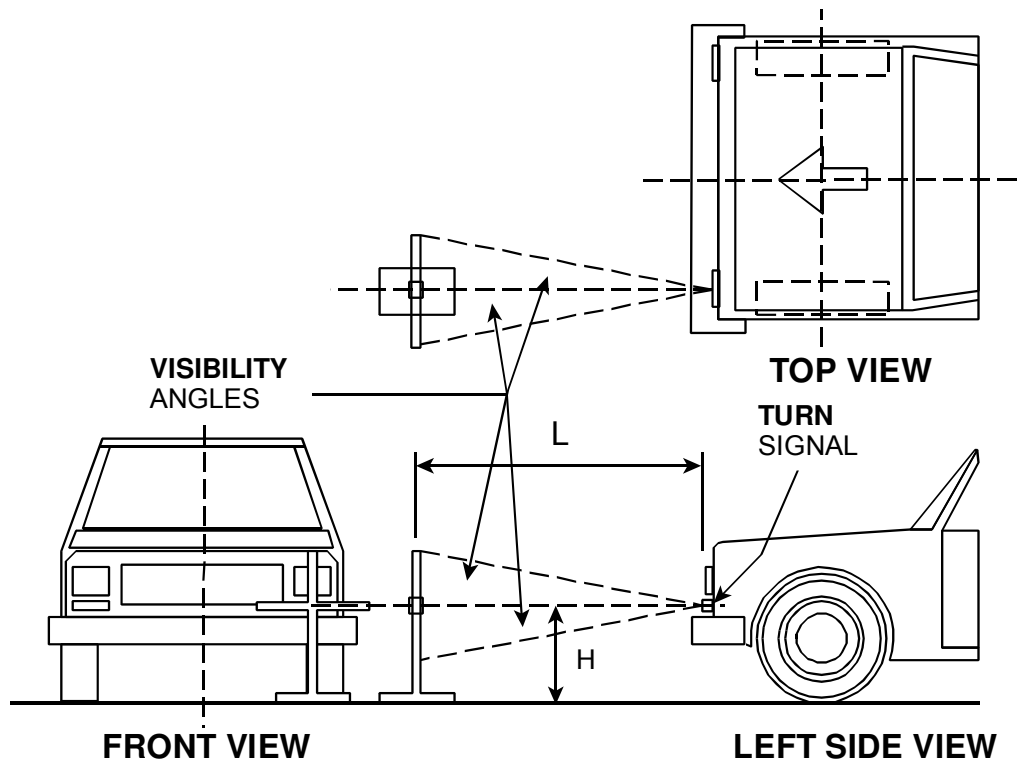


FIGURE 12

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

The horizontal visibility angle shall be that specified in the appropriate paragraph of the visibility requirements.

The vertical visibility angle shall be the maximum photometric test angle specified for the test lamp in the appropriate SAE Standard. Interference with any projection string by any component on the vehicle shall be recorded as a negative entry in the appropriate space in Data Sheet 6, Post Impact Visibility Test Summary Sheet.

Backup lamp visibility limits shall be checked with a test setup similar to that shown in Figure 13. Projection strings are stretched between the geometric center of the backup lamp to vertical points located on the test fixture 2 feet and 6 feet above the reference plane on which the vehicle is standing. Interference with any projection string in either of the test positions shown in Figure 13 by any component on the vehicle shall be recorded as a negative entry in the appropriate space in Data Sheet 6, Post Impact Visibility Test Summary Sheet.

BACKUP LAMP TEST SETUP

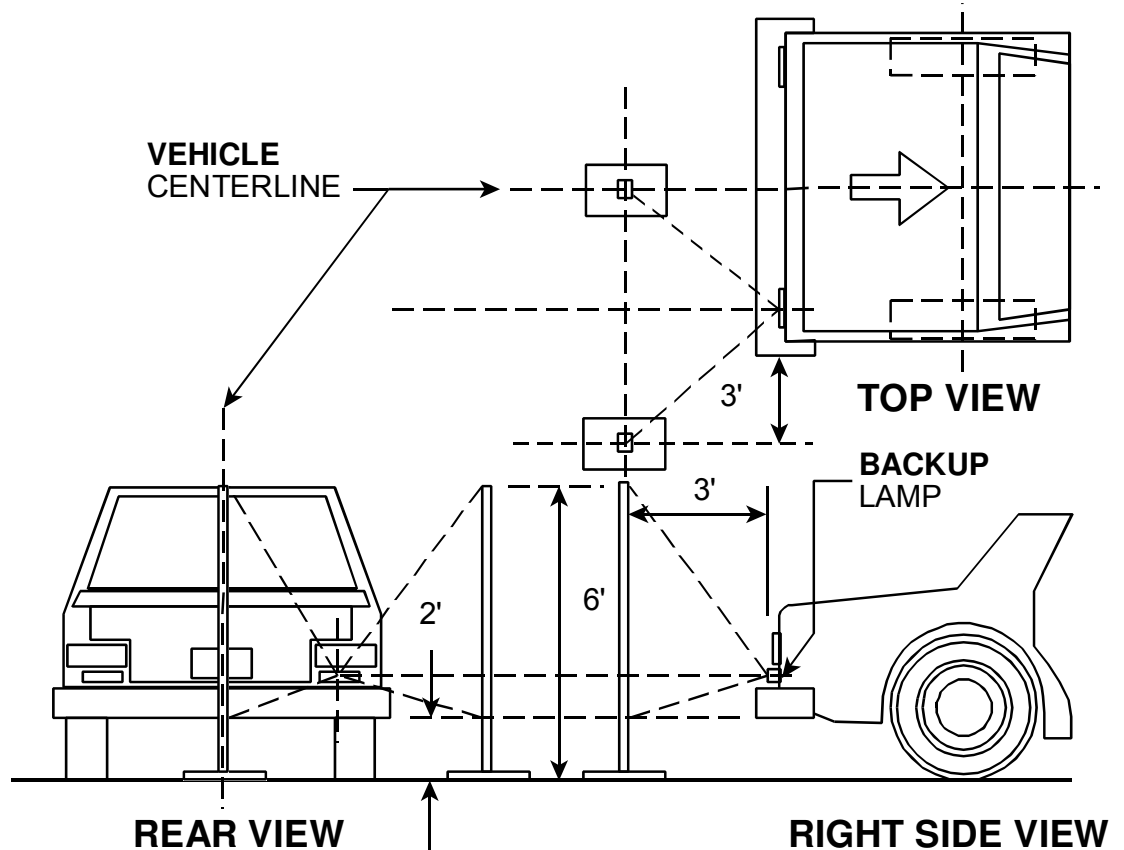


FIGURE 13

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

Projected illuminated areas of tail, stop and turn signal lamps shall be measured with a test setup similar to that shown in Figure 14. Illuminated areas shall be measured by photographing the lighted test lamp together with a dimensional reference using a tripod mounted camera positioned at the same height (Y) as the test lamp and at a 45° angle to the longitudinal centerline of the lamp. The distance from the camera to the lamp should be sufficient to provide the maximum possible image of the test lamp in the camera field of view. The projected area of the test lamp shall be measured by tracing the illuminated area showing on a 4" x 5" (minimum photographic print using a planimeter.

The projected illuminated area of the lamp measured on the photograph shall be recorded and the appropriate corrected or true area shall be computed according to the relationship given below.

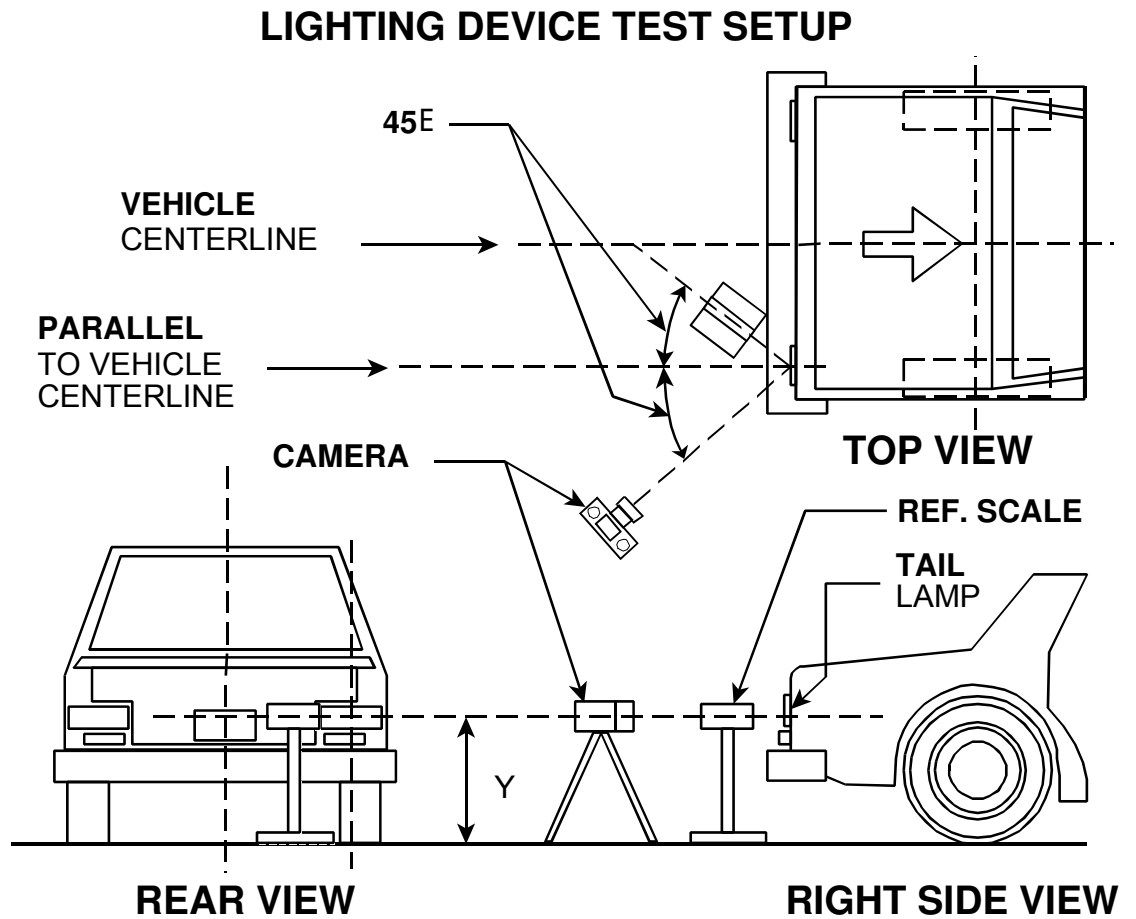


FIGURE 14

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

- (1) If the dimensional reference used to scale the photograph is a linear scale (e.g., a 6" scale, etc), the following expression shall be used to compute the true area value:

$$A_t = A_m [L_t / L_m]^2, \text{ where } -$$

A_t = True area in²

A_m = Measured area of lamp

L_t = True length of reference scale in inches

L_m = Measured length of reference scale on photograph in inches

- (2) If the dimensional reference used to scale the photograph is a simple plane surface of precisely known area (e.g., a square or rectangle, etc.), the following expression shall be used to compute the true area value:

$$A_t = A_m [A_1 / A_2], \text{ where } -$$

A_t = True area in in²

A_m = Measured area of lamp

A_1 = True area of reference surface in in²

A_2 = Measured area of reference surface on photograph in in²

The measured and true values of projected illuminated area for each respective signaling lamp shall be recorded in the spaces provided in Data Sheet 6, Post Impact Visibility Test Summary Sheet.

The aim of each headlamp shall be measured and recorded on the appropriate test data sheet and be adjustable to within the beam aim inspection limits in Table 2 of SAE Recommended Practice J599b, Jul 1970, measured with a mechanical timer conforming to the requirements of SAE Standard J602a, Jul 1970.

- D. Determine if vehicle's hood, trunk, and doors shall operate in the normal manner. The unlatching and opening efforts for each shall be recorded on the appropriate data sheet.
- E. Determine if the vehicle's fuel, cooling, braking and exhaust systems shall have no leaks or constricted passages and all sealing devices and caps shall operate in the normal manner.
- F. The alignment of the vehicle front suspension system and rear suspension system (on vehicles with adjustable rear suspensions) shall be measured and recorded on the appropriate data sheet.

12. COMPLIANCE TEST EXECUTION....Continued

- G. The striping tape and 1 foot photographic markings must be removed and the vehicle surface cleaned of all adhesive, as soon as possible following completion of all tests.
- H. The vehicle shall be subjected to a road test, including braking stops to insure that the propulsion, suspension, steering, and braking systems operate in a normal manner.

13. POST TEST REQUIREMENTS

INTERPRETATIONS AND CLARIFICATION

- A. The term "cooling system" does not include the air conditioning system.
- B. If components such as pollution control vapor canisters and other components used to reduce fuel emission contain fuel or fuel vapor, they are considered to be part of the fuel system.
- C. Designed exhaust system drain ports and flow restrictions do not constitute leaks or constrictions.
- D. During the perpendicular impact tests, the outboard edge of the test device is to be inboard of a line parallel to the vehicle longitudinal centerline and a parallel line passing through the corner impact contact point.
- E. Lamp bulb replacement after impact testing is permitted, if necessary, to check lamp operation.
- F. Movement of the automatic transmission shift lever from Neutral to Drive position during a test impact does not constitute a test failure as long as the movement does not impair the subsequent operation of the transmission or other parts of the propulsion system. However, this occurrence must be noted in the report.
- G. Vehicles must comply with the requirements of P581 both when equipped with the bumper system which is standard for that vehicle model and when equipped with approved optional bumper equipment such as guards or rub strips whether factory or dealer installed.
- H. Any component of the bumper system which can be contacted by the impact ridge of the PTD in any permissible pendulum stroke is considered bumper face bar, whether or not it was actually contacted in a particular test sequence.
- I. Components which do not perform a load bearing function are not necessarily components of the bumper system (and potentially bumper face bar) solely as the result of this incidental mounting on or near a load bearing structure of the bumper system. Components must be examined on a case-by-case basis to determine whether they constitute components of the bumper system.
- J. Bumper system components that can contact the impact ridge of the PTD and thus be considered "bumper face bar" include the following:
 - (1) Bumper and cuffs
 - (2) Bumper guards

13. POST TEST REQUIREMENTS....Continued

- (3) "Nerf strips"
- (4) Shielding panels

The same would be true of other cosmetic components directly associated with the bumper system's function such as manufacturing cutout patches and tape strips - the primary function of which is to hide protrusions, fasteners, or other unsightly aspects of the bumper construction.

- K. Illumination devices, e.g., fog lamps and directional signals, are not associated with the bumper system's function and could not qualify as components of the bumper system, even if contacted by the PTD or barrier. However, they are subject to the damage limitations.
- L. Still other components could be considered components of the bumper system, depending on their application in a particular vehicle design. For example, a grille, which would generally be associated with the vehicle body, could perform a protective function as a component of a bumper system in a soft-face configuration, and could qualify as a component of the bumper system.
- M. A load bearing component in the bumper system that lies under a covering of rubber, plastic, or another material and is not visible when the bumper is mounted on the vehicle would not qualify as an "exterior surface".
- N. The many shielding panel designs that do not contact the impact ridge must be categorized as "exterior surfaces" subject to the damage criteria of 581.5 (C) (10), i.e., no separation of materials from the surface to which bonded and no permanent deviation from original contours.
- O. While both barrier and PTD impacts can cause some chipping or flaking of chrome or soft-face material, such damage is insignificant (41 FR 9346; March 4, 1976). This reasoning also governs minor damage to the tape strips, such as wrinkling or buckling, as long as the strips are contactable by the impact ridge or barrier face and thus qualify as bumper face bar. This interpretation would apply equally whether the damage happened to fall at the area of impact or elsewhere on the face bar.
- P. Vehicle equipped with an automatic leveling system that operates only with the ignition switch on, may not be PTD tested with the ignition on.

14. REPORTS

14.1 MONTHLY STATUS REPORTS

The contractor shall submit a monthly Test Status Report and a Vehicle or Equipment Status Report to the COTR. The Vehicle or Equipment Status Report shall be submitted until all vehicles or items of equipment are disposed of. Samples of the required Monthly Status Reports are contained in the FORMS section.

14.2 APPARENT TEST FAILURE

Any indication of a test failure shall be communicated by telephone to the COTR within 24 hours with written notification mailed within 48 hours (Saturdays and Sundays excluded). A Notice of Test Failure (see FORMS section) with a copy of the particular compliance test data sheet(s) and preliminary data plot(s) shall be included.

In the event of a test a failure, a post test calibration check of some critically sensitive test equipment and instrumentation may be required for verification of accuracy. The necessity for the calibration shall be at the COTR's discretion and shall be performed without additional costs to the OVSC.

14.3 FINAL TEST REPORT

14.3.1 COPIES

In the case of a test failure, 7 copies of the Final Test Report shall be submitted to the COTR for acceptance within 3 weeks of test completion. The Final Test Report format to be used by all contractors can be found in the REPORTS section.

Where there has been no indication of a test failure, 3 copies of each Final Test Report shall be submitted to the COTR within 3 weeks of test completion. Payment of contractor's invoices for completed compliance tests may be withheld until the Final Test Report is accepted by the COTR. Contractors are requested to NOT submit invoices before the COTR is provided copies of the Final Test Report.

Contractors are required to PROOF READ all Final Test Reports before submittal to the COTR. The OVSC will not act as a report quality control office for contractors. Reports containing a significant number of errors will be returned to the contractor for correction, and a "hold" will be placed on invoice payment for the particular test.

14. REPORTS....Continued

14.3.2 REQUIREMENTS

The Final Test Report, associated documentation (including photographs) are relied upon as the chronicle of the compliance test. The Final Test Report will be released to the public domain after review and acceptance by the COTR. For these reasons, each final report must be a complete document capable of standing by itself.

The contractor should use detailed descriptions of all compliance test events. Any events that are not directly associated with the standard but are of technical interest should also be included. The contractor should include as much detail as possible in the report.

Instructions for the preparation of the first three pages of the final test report are provided below for the purpose of standardization.

14.3.3 FIRST THREE PAGES

A. FRONT COVER --

A heavy paperback cover (or transparency) shall be provided for the protection of the final report. The information required on the cover is as follows:

- (1) Final Report Number such as 581-CTL-9X-001 where

581 is the FMVSS or REGULATION PART tested
 CTL are the initials for the laboratory
 9X is the Fiscal Year of the test program (or 0X after year 1999)
 001 is the Group Number (001 for the 1st test, 002 for the 2nd test, etc.)

- (2) Final Report Title and Subtitle such as

SAFETY COMPLIANCE TESTING FOR REGULATION PART 581
 Bumper Standard

Name of Passenger Car Manufacturer
 Car Model Year, Make, Model & Body Style
 NHTSA No. for Test Vehicle

- (3) Contractor's Name and Address such as

COMPLIANCE TESTING LABORATORIES, INC.
 4335 West Dearborn Street
 Detroit, Michigan 48090

14. REPORTS....Continued

NOTE: DOT SYMBOL WILL BE PLACED BETWEEN ITEMS (3) AND (4)

- (4) Date of Final Report Completion
- (5) The words "FINAL REPORT"
- (6) The sponsoring agency's name and address as follows

U.S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION
National Highway Traffic Safety Administration
Safety Assurance
Office of Vehicle Safety Compliance
400 Seventh Street, SW
Room 6115 (NSA-30)
Washington, DC 20590

14. REPORTS....Continued

B. FIRST PAGE AFTER FRONT COVER --

A disclaimer statement and an acceptance signature block for the COTR shall be provided as follows

This publication is distributed by the U. S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, in the interest of information exchange. The opinions, findings and conclusions expressed in this publication are those of the author(s) and not necessarily those of the Department of Transportation or the National Highway Traffic Safety Administration. The United States Government assumes no liability for its contents or use thereof. If trade or manufacturers' names or products are mentioned, it is only because they are considered essential to the object of the publication and should not be construed as an endorsement. The United States Government does not endorse products or manufacturers.

Prepared By: _____

Approved By: _____

Approval Date: _____

FINAL REPORT ACCEPTABLE BY OVSC:

Accepted By: _____

Accepted Date: _____

14. REPORTS....Continued**C. SECOND PAGE AFTER FRONT COVER --**

A Completed Technical Report Documentation Page (Form DOT F1700.7) shall be completed for those items that are applicable with the other spaces left blank. Sample data for the applicable block numbers of the title page follows.

Block 1 -- REPORT NUMBER

581-CTL-9X-001

Block 2 -- GOVERNMENT ACCESSION NUMBER

Leave Blank

Block 3 -- RECIPIENT'S CATALOG NUMBER

Leave Blank

Block 4 -- TITLE AND SUBTITLE

Final Report of Reg Part 581 Compliance Testing of 199X Ace Super
2-door Coupe, NHTSA No. CX0401

Block 5 -- REPORT DATE

March 1, 199X (or 200X after year 1999)

Block 6 -- PERFORMING ORGANIZATION CODE

CTL

Block 7 -- AUTHOR(S)

John Smith, Project Manager
Bill Doe, Project Engineer

Block 8 -- PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER

CTL-DOT-XXX-001

Block 9 -- PERFORMING ORGANIZATION NAME AND ADDRESS

Compliance Testing Laboratories, Inc.
4335 West Dearborn Street
Detroit, MI 48090

14. REPORTS....Continued

Block 10 -- WORK UNIT NUMBER

Leave Blank

Block 11 -- CONTRACT OR GRANT NUMBER

DTNH22-XX-X-XXXXX

Block 12 -- SPONSORING AGENCY NAME AND ADDRESS

US Department of Transportation
National Highway Traffic Safety Administration
Safety Assurance
Office of Vehicle Safety Compliance (NSA-30)
400 Seventh Street, SW, Room 6115
Washington, DC 20590

Block 13 -- TYPE OF REPORT AND PERIOD COVERED

Final Test Report
Feb 15 to Mar 15, 199X (or 200X after year 1999)

Block 14 -- SPONSORING AGENCY CODE

NSA-30

Block 15 -- SUPPLEMENTARY NOTES

Leave Blank

Block 16 -- ABSTRACT

Compliance tests were conducted on the subject 199X Ace Super 2-door coupe in accordance with the specifications of the Office of Vehicle Safety Compliance Test Procedure No. TP-581-XX for the determination of REG PART 581 compliance. Test failures identified were as follows:

None

NOTE: Above wording must be shown with appropriate changes made for a particular compliance test. Any questions should be resolved with the COTR.

14. REPORTS....Continued

Block 17 -- KEY WORDS

Compliance Testing
Safety Engineering
REGULATION PART 581

Block 18 -- DISTRIBUTION STATEMENT

Copies of this report are available from - -

NHTSA Technical Information Services (TIS)
Room 5108 (NAD-40)
400 Seventh St., SW
Washington, DC 20590
Telephone No.: 202-366-4946

Block 19 -- SECURITY CLASSIFICATION OF REPORT

Unclassified

Block 20 -- SECURITY CLASSIFICATION OF PAGE

Unclassified

Block 21 -- NUMBER OF PAGES

Add appropriate number

Block 22 -- PRICE

Leave Blank

14. REPORTS....Continued

14.3.4 TABLE OF CONTENTS

Final test report Table of Contents shall include the following:

Section 1 — Purpose of Compliance Test

Section 2 — Compliance Test Data Summary

Section 3 — Compliance Test Data

Section 4 — Noncompliance Data (if applicable)

Section 5 — Photographs



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

INGENIERÍA MECÁNICA

RESISTENCIA DE IMPACTO SEGÚN ASTM D 5628-10

DICIEMBRE 2023

AMBATO - ECUADOR

INFORME TÉCNICO

OBJETIVO

Establecer y mantener un método para evaluar la energía media de impacto en polímeros.

ALCANCE

Determinación de energía necesaria para el fallo de polímeros por impacto de dardo según las especificaciones señaladas en la norma ASTM D 5628-10.

ANTECEDENTES:

Con fecha 20 de diciembre de 2023, Henry Geomat Morejon Uchubanda, solicita al Centro de Transferencia y Tecnología de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, realizar ensayos de laboratorio para medir la energía media de impacto en muestras de material compuesto.

Se reciben 12 muestras o probetas, en 3 grupos de 4 probetas, bajo las designaciones:

- 1 Capa 1
- 1 Capa 2
- 1 Capa 3
- 1 Capa 4
- 2 Capa 1
- 2 Capa 2
- 2 Capa 3
- 2 Capa 4
- 3 Capa 1
- 3 Capa 2
- 3 Capa 3
- 3 Capa 4

Con la numeración de 1 a 4 en tres grupos (Probetas para Ensayo de Impacto en Material bio-compuesto de fibra de bambú y resina epoxi); se realizó el ensayo de un total de 12 probetas, de dimensiones de 58 x 58 mm.

PROBETAS PARA ENSAYO DE IMPACTO

1 Capa



2 Capas



3 Capas



PROCESO GENERAL:

- Determinación de número de especímenes para cada muestra.
- Mantener hermetizadas las muestras hasta el ensayo y marcarlas para su identificación.
- Preparación de la máquina de ensayos para la geometría preestablecida (FA, FB, FC, FD, FE) en este caso para el tipo FE dadas las dimensiones de la probeta.

Geometría	Diámetro de la Probeta mm	Probeta Cuadrada mm
FA	89	89
FB	51	51
FC	140	140
FD	89	89
FE	58	58

- Medición y registro del espesor de cada muestra, el cual se muestra en los resultados del ensayo.
- Realizar la prueba de impacto con probetas de calibración, fuera de los grupos mostrados anteriormente y localizamos el rango de falla del material.
- Se colocan las mordazas utilizando una fuerza que permita la inmovilidad de la probeta al momento del impacto.



- Colocar la masa a la altura preestablecida, según el método de prueba seleccionado.

- Se libera el dardo asegurándonos que golpee justo en el centro de la muestra, impidiendo cualquier rebote del dardo.



- Retirar la muestra y revisar si ha fallado o no. Considerando que una falla es cualquier ruptura generado por el impacto el cual pueda ser distinguido por el ojo humano bajo luz normal en condiciones normales.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

Centro de Transferencia y Tecnología
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS
DATOS INFORMATIVOS:

Fecha:	20/12/2023	Ciudad:	Ambato
Lugar:	Laboratorios de Materiales		Campus Huachi
Equipo:	Máquina tipo caída de masas de Impacto		
Realizado por:	Ing. Jonathan Mora	Supervisado por:	Ing. Sebastián Villegas S.
Tipo de material:	Material compuesto 1 Capa		
Composición	Material bio-compuesto de fibra de bambú y resina epoxi		

PARAMETROS DE ENSAYO

Tipo de Medición:	Energía Media de impacto (J)	Norma:	ASTM D5628-10
Dimensiones (mm):	58mm x 58mm	Nº de probetas:	4



CODIFICACIÓN	Ancho (mm)	Largo(mm)	Espesor (mm)	Masa aplicada (kg)	Incremento de masa (kg)	Altura media de fallo (mm)	Energía media de fallo (J)	Criterio de falla
1 Capa 1	58	58	5	0,232	0,351	150	0,8579	No falla
1 Capa 2	58	58	5	0,232	0,351	200	1,1438	No falla
1 Capa 3	58	58	5	0,232	0,351	250	1,4298	Falla
1 Capa 4	58	58	5	0,232	0,351	300	1,7158	Falla

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

Centro de Transferencia y Tecnología

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

DATOS INFORMATIVOS:

Fecha:	20/12/2023	Ciudad:	Ambato
Lugar:	Laboratorios de Materiales		Campus Huachi
Equipo:	Máquina tipo caída de masas de Impacto		
Realizado por:	Ing. Jonathan Mora	Supervisado por:	Ing. Sebastián Villegas S.
Tipo de material:	Material compuesto 2 Capas		
Composición	Material bio-compuesto de fibra de bambú y resina epoxi		

PARAMETROS DE ENSAYO

Tipo de Medición:	Energía Media de impacto (J)	Norma:	ASTM D5628-10
Dimensiones (mm):	58mm x 58mm	Nº de probetas:	4



CODIFICACIÓN	Ancho (mm)	Largo(mm)	Espesor (mm)	Masa aplicada (kg)	Incremento de masa (kg)	Altura media de fallo (mm)	Energía media de fallo (J)	Criterio de falla
2 Capas 1	58	58	4	0,232	0,351	150	0,8579	No falla
2 Capas 2	58	58	4	0,232	0,351	200	1,1438	No falla
2 Capas 3	58	58	4	0,232	0,351	250	1,4298	Falla
2 Capas 4	58	58	4	0,232	0,351	300	1,7158	Falla

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
Centro de Transferencia y Tecnología
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

DATOS INFORMATIVOS:

Fecha:	20/12/2023	Ciudad:	Ambato
Lugar:	Laboratorios de Materiales		Campus Huachi
Equipo:	Máquina tipo caída de masas de Impacto		
Realizado por:	Ing. Jonathan Mora	Supervisado por:	Ing. Sebastián Villegas S.
Tipo de material:	Material compuesto 3 Capas		
Composición	Material bio-compuesto de fibra de bambú y resina epoxi		

PARÁMETROS DE ENSAYO

Tipo de Medición:	Energía Media de impacto (J)	Norma:	ASTM D5628-10
Dimensiones (mm):	58mm x 58mm	Nº de probetas:	4



CODIFICACIÓN	Ancho (mm)	Largo(mm)	Espesor (mm)	Masa aplicada (kg)	Incremento de masa (kg)	Altura media de fallo (mm)	Energía media de fallo (J)	Criterio de falla
3 Capas 1	58	58	5	0,232	0,351	150	0,8579	No falla
3 Capas 2	58	58	5	0,232	0,351	250	1,4298	No falla
3 Capas 3	58	58	5	0,232	0,351	450	2,5737	No falla
4 Capas 4	58	58	5	0,232	0,351	550	3,1456	Falla

CONCLUSIONES

- Las probetas 80/20 tienen una energía de fallo de 1,4298 J.
- Las probetas 70/30 tienen una energía de fallo de 1,4298 J.
- Las probetas 60/40 tienen una energía de fallo de 3,1456 J.
- Todas las probetas se las ensayó con el método de prueba FE y fueron impactadas con un dardo de 0,232 Kg.

JONATHAN
MAURICIO
MORA
HERNANDEZ

Firmado digitalmente por
JONATHAN
MAURICIO MORA
HERNANDEZ
Fecha: 2023.12.21
07:55:29 -05'00'

REALIZADO POR:
Ing. Jonathan Mora
TÉCNICO DE LABORATORIO 1



EDMUNDO SEBASTIAN
VELLEGAS SUAREZ

SUPERVISADO POR:
Ing. Sebastián Villegas S.
TÉCNICO DE LABORATORIO 2

Elongation at yield	* 0,737	- 0,794	% strain
Compressive modulus	* 5,19	- 5,32	GPa
Compressive strength	86,7	- 91,1	MPa
Flexural modulus	4,69	- 4,81	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	56,6	- 59,5	MPa
Shear modulus	* 1,88	- 1,9	GPa
Bulk modulus	* 7,21	- 8,67	GPa
Poisson's ratio	* 0,38	- 0,4	
Shape factor	7		
Hardness - Vickers	* 18	- 19	HV
Hardness - Rockwell M	* 53	- 54	
Hardness - Rockwell R	* 35	- 36	
Hardness - Shore D	77	- 84	
Elastic stored energy (springs)	403	- 492	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 24,2	- 24,9	MPa

Impact & fracture properties

Fracture toughness	* 4,01	- 4,26	MPa·m ^{0.5}
Toughness (G)	* 3,06	- 3,45	kJ/m ²
Ductility index	0,0791	- 0,083	µm
Impact strength, notched 23 °C	1,9	- 2,1	kJ/m ²
Impact strength, unnotched 23 °C	8,1	- 8,93	kJ/m ²

Thermal properties

Melting point	145	- 175	°C
Glass temperature	52	- 54	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa	51	- 53	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa	53	- 55	°C
Vicat softening point	62	- 67	°C
Maximum service temperature	* 45	- 55	°C
Minimum service temperature	-20	- -12	°C
Thermal conductivity	* 0,148	- 0,153	W/m·°C
Specific heat capacity	* 1,26e3	- 1,33e3	J/kg·°C
Thermal expansion coefficient	* 106	- 112	µstrain/°C
Thermal shock resistance	* 113	- 127	°C
Thermal distortion resistance	* 0,00132	- 0,00142	MW/m

Electrical properties

Electrical resistivity	* 2,5e17	- 4,8e17	µhm·cm
Electrical conductivity	* 3,59e-16	- 6,9e-16	%ACS
Dielectric constant (relative permittivity)	* 4,38	- 4,56	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	* 0,0963	- 0,117	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	* 13,2	- 13,7	MV/m

General information
Designation

Poly(lactide / Polylactic acid (30% natural fiber filled)

Tradenames

Fibrofin; Kareline; Lactel; Purasorb; Transmare Bio

Typical uses

Consumer goods, sheet, electrical/electronic applications, automotive applications, medical implants, homeware, personal care products, filaments, laminates, trays, furniture

Included in Materials Data for Simulation



Materials Data for Simulation name

Plastic, PLA (30% natural fiber)

Composition overview
Compositional summary
 $(CH_2(CH_3)CO_2)_n$ + bamboo fiber. The lactic acid is produced from sugar (dextrose) with plant starch origins e.g. corn, wheat, sugar beets and sugar cane.

Material family	Plastic (thermoplastic, semi-crystalline)
Base material	PLA (Polylactic acid / polylactide)
% filler (by weight)	30 %
Fiber/reinforcement	Cellulose
Fiber/reinforcement form	Short fiber (<5mm)
Additive	Impact modifier
Renewable content	100 %
Polymer code	PLA-I-NX30

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	60	-	70	%
Impact modifier	0	-	10	%
Woodflour / cellulose	30			%

Price

Price	* 2,77	-	3,36	USD/kg
Price per unit volume	* 3,57e3	-	4,4e3	USD/m ³

Physical properties

Density	1,29e3	-	1,31e3	kg/m ³
---------	--------	---	--------	-------------------

Mechanical properties

Young's modulus	5,19	-	5,32	GPa
Specific stiffness	3,98	-	4,1	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	65	-	72	MPa
Tensile strength	72	-	76	MPa
Specific strength†	50	-	55,4	kN.m/kg
Elongation	1,45	-	1,56	% strain

Magnetic properties

Magnetic type	Non-magnetic
---------------	--------------

Optical, aesthetic and acoustic properties

Refractive index	* 1,44	-	1,46	
Transparency	Translucent			
Softness to touch	* 31,6	-	32,1	
Warmth to touch	* 196	-	203	
Acoustic velocity	2e3	-	2,03e3	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0,102	-	0,104	

Healthcare & food

Food contact	No
Medical grades? (USP Class VI, ISO 10993)	✓

Medical tradenames

Lactel, Purasorb	
Sterilizability (ethylene oxide)	Excellent
Sterilizability (radiation)	Good
Sterilizability (steam autoclave)	Poor
Radiopacity, Predicted 20keV	1,01
Radiopacity, Predicted 80keV	1
Radiopacity, Predicted 150keV	1
Guidance for MRI Safety	No Interaction - MR Safe

Restricted substances risk indicators

RoHS 2 (EU) compliant grades?	✓
EU REACH Candidate List indicator (0-1, 1 = high risk)	0
Notes	
May contain (wt%): Bzocle <0.3%	
SIN List indicator (0-1, 1 = high risk)	0,01
Notes	
May contain (wt%): Bzocle <0.3%	

Absorption & permeability

Water absorption @ 24 hrs	0,7	-	1,1	%
Water absorption @ sat	* 1	-	1,8	%
Humidity absorption @ sat	* 0,3	-	0,55	%
Water vapor transmission	7,1	-	9,1	g.mm/m ² .day
Permeability (O2)	11	-	53	cm ³ .mm/m ² .day.atm
Permeability (CO2)	70	-	80	cm ³ .mm/m ² .day.atm
Permeability (N2)	* 2	-	13	cm ³ .mm/m ² .day.atm

Processing properties

Polymer injection molding	Acceptable
Polymer extrusion	Limited use

Polymer thermoforming	Limited use		
Linear mold shrinkage	0,16	-	0,4 %
Melt temperature	150	-	210 °C
Mold temperature	5	-	35 °C
Molding pressure range	55	-	100 MPa

Durability

Water (fresh)	Acceptable		
Water (salt)	Acceptable		
Weak acids	Acceptable		
Strong acids	Unacceptable		
Weak alkalis	Acceptable		
Strong alkalis	Unacceptable		
Organic solvents	Limited use		
Oxidation at 500C	Unacceptable		
UV radiation (sunlight)	Good		
Flammability	Highly flammable		
Flammability - typical UL 94 rating	HB		
Oxygen index	* 19	-	21 %

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production (virgin grade)	* 38,6	-	42,5 MJ/kg
<small>Sources</small>	<small>Estimated from sources including Institute for Prospective Technological Studies, 2005; Vink et al. 2007; EcoInvent v3.7.1</small>		
Embodied energy, primary production (typical grade)	* 38,6	-	42,5 MJ/kg
CO2 footprint, primary production (virgin grade)	* 2,01	-	2,22 kg/kg
<small>Sources</small>	<small>Estimated from sources including Institute for Prospective Technological Studies, 2005; Vink et al. 2007; EcoInvent v3.7.1</small>		
CO2 footprint, primary production (typical grade)	* 2,01	-	2,22 kg/kg
Water usage	* 1,35e3	-	2,12e3 l/kg

Processing energy, CO2 footprint & water

Polymer extrusion energy	* 5,81	-	6,11 MJ/kg
Polymer extrusion CO2	* 0,436	-	0,458 kg/kg
Polymer extrusion water	* 4,76	-	7,14 l/kg
Polymer molding energy	* 14,5	-	15,2 MJ/kg
Polymer molding CO2	* 1,09	-	1,14 kg/kg
Polymer molding water	* 10,7	-	16 l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	0,531	-	0,557 MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	0,0398	-	0,0418 kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	0,916	-	0,96 MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	0,0688	-	0,0721 kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	1,34	-	1,41 MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	0,101	-	0,106 kg/kg

Recycling and end of life

Recycle	✘			
Downcycle	✓			
Combust for energy recovery	✓			
Heat of combustion (net)	* 15,1	-	17,5	MJ/kg
Combustion CO2	* 1,37	-	1,44	kg/kg
Landfill	✓			
Biodegrade	✓			

Notes

Other notes

PLA is a renewable thermoplastic polyester manufactured from plants such as sugarcane, corn and tapioca. PLA can be amorphous or semi-crystalline. Various blends of D and L enantiomers are available, making available a broader range of properties. Natural fibers that can be used as a filler include coir, cotton, fax, hemp, jute, kenaf, ramie, silk, sisal, bamboo, abaca and wool. The record is based on PLA filled with bamboo fibers.

Links

ProcessUniverse

Producers

Reference

Shape

Designation: D 3039/D 3039M – 00^{e1}

Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials¹

This standard is issued under the fixed designation D 3039/D 3039M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

^{e1} Note—Fig. 3 was revised editorially in December 2003.

1. Scope

1.1 This test method determines the in-plane tensile properties of polymer matrix composite materials reinforced by high-modulus fibers. The composite material forms are limited to continuous fiber or discontinuous fiber-reinforced composites in which the laminate is balanced and symmetric with respect to the test direction.

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. Within the text, the inch-pound units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- D 792 Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement²
- D 883 Terminology Relating to Plastics²
- D 2584 Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins³
- D 2734 Test Method for Void Content of Reinforced Plastics³
- D 3171 Test Methods for Constituent Content of Composites Materials⁴
- D 3878 Terminology for Composite Materials⁴
- D 5229/D 5229M Test Method for Moisture Absorption

Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials⁴

- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines⁵
- E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing⁵
- E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers⁵
- E 111 Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus⁵
- E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate a Measure of Quality for a Lot or Process⁶
- E 132 Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature⁵
- E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods⁶
- E 251 Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages⁵
- E 456 Terminology Relating to Quality and Statistics⁶
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method⁶
- E 1012 Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading⁵
- E 1237 Guide for Installing Bonded Resistance Strain Gages⁵

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology D 3878 defines terms relating to high-modulus fibers and their composites. Terminology D 883 defines terms relating to plastics. Terminology E 6 defines terms relating to mechanical testing. Terminology E 456 and Practice E 177 define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology D 3878 shall have precedence over the other standards.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

NOTE—If the term represents a physical quantity, its analytical dimensions are stated immediately following the term (or letter symbol) in fundamental dimension form, using the following ASTM standard symbology for fundamental

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D30 on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D30.04 on Laminas and Laminated Test Methods.

Current edition approved April 10, 2000. Published July 2000. Originally published as D 3039 – 71T. Last previous edition D 3039 – 97a.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

⁴ Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

dimensions, shown within square brackets: $[M]$ for mass, $[L]$ for length, $[T]$ for time, $[Θ]$ for thermodynamic temperature, and $[nd]$ for nondimensional quantities. Use of these symbols is restricted to analytical dimensions when used with square brackets, as the symbols may have other definitions when used without the brackets.

3.2.1 *nominal value, n* —a value, existing in name only, assigned to a measurable property for the purpose of convenient designation. Tolerances may be applied to a nominal value to define an acceptable range for the property.

3.2.2 *transition region, n* —a strain region of a stress-strain or strain-strain curve over which a significant change in the slope of the curve occurs within a small strain range.

3.2.3 *transition strain, $\epsilon^{transition} [nd]$, n* —the strain value at the mid range of the transition region between the two essentially linear portions of a bilinear stress-strain or strain-strain curve.

3.2.3.1 *Discussion*—Many filamentary composite materials show essentially bilinear behavior during loading, such as seen in plots of either longitudinal stress versus longitudinal strain or transverse strain versus long longitudinal strain. There are varying physical reasons for the existence of a transition region. Common examples include: matrix cracking under tensile loading and ply delamination.

3.3 Symbols:

3.3.1 A —minimum cross-sectional area of a coupon.

3.3.2 B_y —percent bending for a uniaxial coupon of rectangular cross section about y axis of the specimen (about the narrow direction).

3.3.3 B_z —percent bending for a uniaxial coupon of rectangular cross section about z axis of the specimen (about the wide direction).

3.3.4 CV —coefficient of variation statistic of a sample population for a given property (in percent).

3.3.5 E —modulus of elasticity in the test direction.

3.3.6 F^{tu} —ultimate tensile strength in the test direction.

3.3.7 F^{su} —ultimate shear strength in the test direction.

3.3.8 h —coupon thickness.

3.3.9 L_g —extensometer gage length.

3.3.10 L_{min} —minimum required bonded tab length.

3.3.11 n —number of coupons per sample population.

3.3.12 P —load carried by test coupon.

3.3.13 P^f —load carried by test coupon at failure.

3.3.14 P^{max} —maximum load carried by test coupon before failure.

3.3.15 s_{n-1} —standard deviation statistic of a sample population for a given property.

3.3.16 w —coupon width.

3.3.17 x_i —test result for an individual coupon from the sample population for a given property.

3.3.18 \bar{x} —mean or average (estimate of mean) of a sample population for a given property.

3.3.19 δ —extensional displacement.

3.3.20 ϵ —general symbol for strain, whether normal strain or shear strain.

3.3.21 ϵ —indicated normal strain from strain transducer or extensometer.

3.3.22 σ —normal stress.

3.3.23 ν —Poisson's ratio.

4. Summary of Test Method

4.1 A thin flat strip of material having a constant rectangular cross section is mounted in the grips of a mechanical testing machine and monotonically loaded in tension while recording load. The ultimate strength of the material can be determined from the maximum load carried before failure. If the coupon strain is monitored with strain or displacement transducers then the stress-strain response of the material can be determined, from which the ultimate tensile strain, tensile modulus of elasticity, Poisson's ratio, and transition strain can be derived.

5. Significance and Use

5.1 This test method is designed to produce tensile property data for material specifications, research and development, quality assurance, and structural design and analysis. Factors that influence the tensile response and should therefore be reported include the following: material, methods of material preparation and lay-up, specimen stacking sequence, specimen preparation, specimen conditioning, environment of testing, specimen alignment and gripping, speed of testing, time at temperature, void content, and volume percent reinforcement. Properties, in the test direction, which may be obtained from this test method include the following:

5.1.1 Ultimate tensile strength,

5.1.2 Ultimate tensile strain,

5.1.3 Tensile chord modulus of elasticity,

5.1.4 Poisson's ratio, and

5.1.5 Transition strain.

6. Interferences

6.1 *Material and Specimen Preparation*—Poor material fabrication practices, lack of control of fiber alignment, and damage induced by improper coupon machining are known causes of high material data scatter in composites.

6.2 *Gripping*—A high percentage of grip-induced failures, especially when combined with high material data scatter, is an indicator of specimen gripping problems. Specimen gripping methods are discussed further in 7.2.4, 8.2, and 11.5.

6.3 *System Alignment*—Excessive bending will cause premature failure, as well as highly inaccurate modulus of elasticity determination. Every effort should be made to eliminate excess bending from the test system. Bending may occur as a result of misaligned grips or from specimens themselves if improperly installed in the grips or out-of-tolerance caused by poor specimen preparation. If there is any doubt as to the alignment inherent in a given test machine, then the alignment should be checked as discussed in 7.2.5.

6.4 *Edge Effects in Angle Ply Laminates*—Premature failure and lower stiffnesses are observed as a result of edge softening in laminates containing off-axis plies. Because of this, the strength and modulus for angle ply laminates can be drastically underestimated. For quasi-isotropic laminates containing significant 0° plies, the effect is not as significant.

7. Apparatus

7.1 *Micrometers*—A micrometer with a 4- to 5-mm [0.16- to 0.20-in] nominal diameter double-ball interface shall be

used to measure the thickness of the specimen. A micrometer with a flat anvil interface shall be used to measure the width of the specimen. The accuracy of the instruments shall be suitable for reading to within 1 % of the sample width and thickness. For typical specimen geometries, an instrument with an accuracy of $\pm 2.5 \mu\text{m}$ [$\pm 0.0001 \text{ in.}$] is adequate for thickness measurement, while an instrument with an accuracy of $\pm 25 \mu\text{m}$ [$\pm 0.001 \text{ in.}$] is adequate for width measurement.

7.2 Testing Machine—The testing machine shall be in conformance with Practices E 4 and shall satisfy the following requirements:

7.2.1 Testing Machine Heads—The testing machine shall have both an essentially stationary head and a movable head.

7.2.2 Drive Mechanism—The testing machine drive mechanism shall be capable of imparting to the movable head a controlled velocity with respect to the stationary head. The velocity of the movable head shall be capable of being regulated as specified in 11.3.

7.2.3 Load Indicator—The testing machine load-sensing device shall be capable of indicating the total load being carried by the test specimen. This device shall be essentially free from inertia lag at the specified rate of testing and shall indicate the load with an accuracy over the load range(s) of interest of within $\pm 1 \%$ of the indicated value. The load range(s) of interest may be fairly low for modulus evaluation, much higher for strength evaluation, or both, as required.

NOTE 1—Obtaining precision load data over a large range of interest in the same test, such as when both elastic modulus and ultimate load are being determined, place extreme requirements on the load cell and its calibration. For some equipment, a special calibration may be required. For some combinations of material and load cell, simultaneous precision measurement of both elastic modulus and ultimate strength may not be possible and measurement of modulus and strength may have to be performed in separate tests using a different load cell range for each test.

7.2.4 Grips—Each head of the testing machine shall carry one grip for holding the test specimen so that the direction of load applied to the specimen is coincident with the longitudinal axis of the specimen. The grips shall apply sufficient lateral pressure to prevent slippage between the grip face and the coupon. If tabs are used the grips should be long enough that they overhang the beveled portion of the tab by approximately 10 to 15 mm [0.5 in.]. It is highly desirable to use grips that are rotationally self-aligning to minimize bending stresses in the coupon.

NOTE 2—Grip surfaces that are lightly serrated, approximately 1 serration/mm [25 serrations/in.], have been found satisfactory for use in wedge-action grips when kept clean and sharp; coarse serrations may produce grip-induced failures in untabbed coupons. Smooth gripping surfaces have been used successfully with either hydraulic grips or an emery cloth interface, or both.

7.2.5 System Alignment—Poor system alignment can be a major contributor to premature failure, to elastic property data scatter, or both. Practice E 1012 describes bending evaluation guidelines and describes potential sources of misalignment during tensile testing. In addition to Practice E 1012, the degree of bending in a tensile system can also be evaluated using the following related procedure. Specimen bending is considered separately in 11.6.1.

7.2.5.1 A rectangular alignment coupon, preferably similar in size and stiffness to the test specimen of interest, is instrumented with a minimum of three longitudinal strain gages of similar type, two on the front face across the width and one on the back face of the specimen, as shown in Fig. 1. Any difference in indicated strain between these gages during loading provides a measure of the amount of bending in the thickness plane (B_y) and width plane (B_z) of the coupon. The strain gage location should normally be located in the middle of the coupon gage section (if modulus determination is a concern), near a grip (if premature grip failures are a problem), or any combination of these areas.

7.2.5.2 When evaluating system alignment, it is advisable to perform the alignment check with the same coupon inserted in each of the four possible installation permutations (described relative to the initial position): initial (top-front facing observer), rotated back to front only (top back facing observer), rotated end for end only (bottom front facing observer), and rotated both front to back and end to end (bottom back facing observer). These four data sets provide an indication of whether the bending is due to the system itself or to tolerance in the alignment check coupon or gaging.

7.2.5.3 The zero strain point may be taken either before gripping or after gripping. The strain response of the alignment coupon is subsequently monitored during the gripping process, the tensile loading process, or both. Eq 1-3 use these indicated strains to calculate the ratio of the percentage of bending strain to average extensional strain for each bending plane of the alignment coupon and the total percent bending, B_{total} . Plotting percent bending versus axial average strain is useful in understanding trends in the bending behavior of the system.

7.2.5.4 Problems with failures during gripping would be reason to examine bending strains during the gripping process in the location near the grip. Concern over modulus data scatter would be reason to evaluate bending strains over the modulus evaluation load range for the typical transducer location. Excessive failures near the grips would be reason to evaluate bending strains near the grip at high loading levels. While the

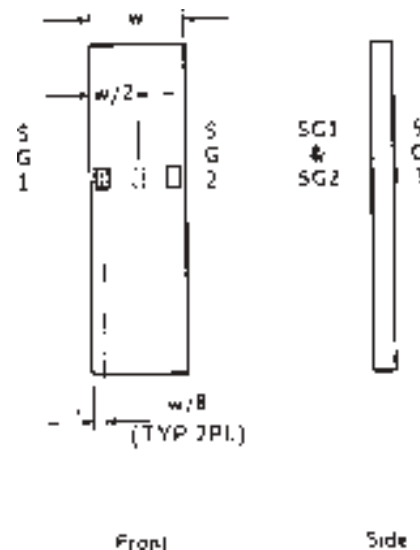


FIG. 1 Gage Locations for System Alignment Check Coupon

maximum advisable amount of system misalignment is material and location dependent, good testing practice is generally able to limit percent bending to a range of 3 to 5 % at moderate strain levels ($>1000 \mu\epsilon$). A system showing excessive bending for the given application should be readjusted or modified.

$$B_y = \frac{\epsilon_{ave} - \epsilon_3}{\epsilon_{ave}} \times 100 \quad (1)$$

$$B_z = \frac{4/3 (\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\epsilon_{ave}} \times 100 \quad (2)$$

where:

B_y = percent bending about system y axis (about the narrow plane), as calculated by Eq 1, %;

B_z = percent bending about system z axis (about the wide plane), as calculated by Eq 2, %;

$\epsilon_1, \epsilon_2, \text{ and } \epsilon_3$ = indicated longitudinal strains displayed by Gages 1, 2, and 3, respectively, of Fig. 1, $\mu\epsilon$; and

ϵ_{ave} = $(|\epsilon_1 + |\epsilon_2|)/2 + |\epsilon_3|/2$.

The total bending component is:

$$B_{total} = |B_y| + |B_z| \quad (3)$$

7.3 Strain-Indicating Device—Load-strain data, if required, shall be determined by means of either a strain transducer or an extensometer. Attachment of the strain-indicating device to the coupon shall not cause damage to the specimen surface. If Poisson's ratio is to be determined, the specimen shall be instrumented to measure strain in both longitudinal and lateral directions. If the modulus of elasticity is to be determined, the longitudinal strain should be simultaneously measured on opposite faces of the specimen to allow for a correction as a result of any bending of the specimen (see 11.6 for further guidance).

7.3.1 Bonded Resistance Strain Gage Selection—Strain gage selection is a compromise based on the type of material. An active gage length of 6 mm [0.25 in.] is recommended for most materials. Active gage lengths should not be less than 3 mm [0.125 in.].⁷ Gage calibration certification shall comply with Test Methods E 251. When testing woven fabric laminates, gage selection should consider the use of an active gage length that is at least as great as the characteristic repeating unit of the weave. Some guidelines on the use of strain gages on composites follow. A general reference on the subject is Tuttle and Brinson.⁸

7.3.1.1 Surface preparation of fiber-reinforced composites in accordance with Practice E 1237 can penetrate the matrix material and cause damage to the reinforcing fibers resulting in improper coupon failures. Reinforcing fibers should not be exposed or damaged during the surface preparation process.

⁷ A typical gage would have a 0.25-in. active gage length, 350- Ω resistance, a strain rating of 3 % or better, and the appropriate environmental resistance and thermal coefficient.

⁸ Tuttle, M. E. and Brinson, H. F., "Resistance-Foil Strain-Gage Technology as Applied to Composite Materials," *Experimental Mechanics*, Vol 24, No. 1, March 1984; pp. 54-65; errata noted in Vol 26, No. 2, June 1986, pp. 153-154.

The strain gage manufacturer should be consulted regarding surface preparation guidelines and recommended bonding agents for composites pending the development of a set of standard practices for strain gage installation surface preparation of fiber-reinforced composite materials.

7.3.1.2 Consideration should be given to the selection of gages having larger resistances to reduce heating effects on low-conductivity materials. Resistances of 350 Ω or higher are preferred. Additional consideration should be given to the use of the minimum possible gage excitation voltage consistent with the desired accuracy (1 to 2 V is recommended) to reduce further the power consumed by the gage. Heating of the coupon by the gage may affect the performance of the material directly, or it may affect the indicated strain as a result of a difference between the gage temperature compensation factor and the coefficient of thermal expansion of the coupon material.

7.3.1.3 Consideration of some form of temperature compensation is recommended, even when testing at standard laboratory atmosphere. Temperature compensation is required when testing in nonambient temperature environments.

7.3.1.4 Consideration should be given to the transverse sensitivity of the selected strain gage. The strain gage manufacturer should be consulted for recommendations on transverse sensitivity corrections and effects on composites. This is particularly important for a transversely mounted gage used to determine Poisson's ratio, as discussed in Note 11.

7.3.2 Extensometers—For most purposes, the extensometer gage length should be in the range of 10 to 50 mm [0.5 to 2.0 in.]. Extensometers shall satisfy, at a minimum, Practice E 83, Class B-1 requirements for the strain range of interest and shall be calibrated over that strain range in accordance with Practice E 83. For extremely stiff materials, or for measurement of transverse strains, the fixed error allowed by Class B-1 extensometers may be significant, in which case Class A extensometers should be considered. The extensometer shall be essentially free of inertia lag at the specified speed of testing, and the weight of the extensometer should not induce bending strains greater than those allowed in 6.3.

NOTE 3—It is generally less difficult to perform strain calibration on extensometers of longer gage length as less precision in displacement is required of the extensometer calibration device.

7.4 Conditioning Chamber—When conditioning materials at nonlaboratory environments, a temperature/vaporlevel-controlled environmental conditioning chamber is required that shall be capable of maintaining the required temperature to within $\pm 3^\circ\text{C}$ [$\pm 5^\circ\text{F}$] and the required relative vapor level to within $\pm 3\%$. Chamber conditions shall be monitored either on an automated continuous basis or on a manual basis at regular intervals.

7.5 Environmental Test Chamber—An environmental test chamber is required for test environments other than ambient testing laboratory conditions. This chamber shall be capable of maintaining the gage section of the test specimen at the required test environment during the mechanical test.

8. Sampling and Test Specimens

8.1 *Sampling*—Test at least five specimens per test condition unless valid results can be gained through the use of fewer specimens, such as in the case of a designed experiment. For statistically significant data, the procedures outlined in Practice E 122 should be consulted. Report the method of sampling.

NOTE 4—If specimens are to undergo environmental conditioning to equilibrium, and are of such type or geometry that the weight change of the material cannot be properly measured by weighing the specimen itself (such as a tabbed mechanical coupon), then use another traveler coupon of the same nominal thickness and appropriate size (but without tabs) to determine when equilibrium has been reached for the specimens being conditioned.

8.2 *Geometry*—Design of mechanical test coupons, especially those using end tabs, remains to a large extent an art rather than a science, with no industry consensus on how to approach the engineering of the gripping interface. Each major composite testing laboratory has developed gripping methods for the specific material systems and environments commonly encountered within that laboratory. Comparison of these methods shows them to differ widely, making it extremely difficult to recommend a universally useful approach or set of approaches. Because of this difficulty, definition of the geometry of the test coupon is broken down into the following three levels, which are discussed further in each appropriate section:

Purpose	Degree of Geometry Definition
8.2.1 <i>General Requirements</i>	Mandatory Shape and Tolerances
8.2.2 <i>Specific Recommendations</i>	Nonmandatory Suggested Dimensions
8.2.3 <i>Detailed Examples</i>	Nonmandatory Typical Practices

8.2.1 *General Requirements:*

8.2.1.1 *Shape, Dimensions, and Tolerances*—The complete list of requirements for specimen shape, dimensions, and tolerances is shown in Table 1.

8.2.1.2 *Use of Tabs*—Tabs are not required. The key factor in the selection of specimen tolerances and gripping methods is the successful introduction of load into the specimen and the prevention of premature failure as a result of a significant discontinuity. Therefore, determine the need to use tabs, and specification of the major tab design parameters, by the end

TABLE 1 Tensile Specimen Geometry Requirements

Parameter	Requirement
Coupon Requirements:	
shape	constant rectangular cross-section
minimum length	gripping + 2 times width + gage length
specimen width	as needed ^A
specimen width tolerance	±1 % of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	±4 % of thickness
specimen flatness	flat with light finger pressure
Tab Requirements (if used):	
tab material	as needed
fiber orientation (composite tabs)	as needed
tab thickness	as needed
tab thickness variation between tabs	±1 % tab thickness
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

^A See 8.2.2 or Table 2 for recommendations.

result: acceptable failure mode and location. If acceptable failure modes occur with reasonable frequency, then there is no reason to change a given gripping method (see 11.10).

8.2.2 *Specific Recommendations:*

8.2.2.1 *Width, Thickness, and Length*—Select the specimen width and thickness to promote failure in the gage section and assure that the specimen contains a sufficient number of fibers in the cross section to be statistically representative of the bulk material. The specimen length should normally be substantially longer than the minimum requirement to minimize bending stresses caused by minor grip eccentricities. Keep the gage section as far from the grips as reasonably possible and provide a significant amount of material under stress and therefore produce a more statistically significant result. The minimum requirements for specimen design shown in Table 1 are by themselves insufficient to create a properly dimensioned and toleranced coupon drawing. Therefore, recommendations on other important dimensions are provided for typical material configurations in Table 2. These geometries have been found by a number of testing laboratories to produce acceptable failure modes on a wide variety of material systems, but use of them does not guarantee success for every existing or future material system.

8.2.2.2 *Gripping/Use of Tabs*—There are many material configurations, such as multidirectional laminates, fabric-based materials, or randomly reinforced sheet-molding compounds, which can be successfully tested without tabs. However, tabs are strongly recommended when testing unidirectional materials (or strongly unidirectionally dominated laminates) to failure in the fiber direction. Tabs may also be required when testing unidirectional materials in the matrix direction to prevent gripping damage.

8.2.2.3 *Tab Geometry*—Recommendations on important dimensions are provided for typical material configurations in Table 2. These dimensions have been found by a number of testing laboratories to produce acceptable failure modes on a wide variety of material systems, but use of them does not guarantee success for every existing or future material system. The selection of a tab configuration that can successfully produce a gage section tensile failure is dependent upon the coupon material, coupon ply orientation, and the type of grips being used. When pressure-operated nonwedge grips are used with care, squared-off 90° tabs have been used successfully. Wedge-operated grips have been used most successfully with tabs having low bevel angles (7 to 10°) and a feathered smooth transition into the coupon. For alignment purposes, it is essential that the tabs be of matched thickness.

8.2.2.4 *Friction Tabs*—Tabs need not always be bonded to the material under test to be effective in introducing the load into the specimen. Friction tabs, essentially nonbonded tabs held in place by the pressure of the grip, and often used with emery cloth or some other light abrasive between the tab and the coupon, have been successfully used in some applications. In specific cases, lightly serrated wedge grips (see Note 2) have been successfully used with only emery cloth as the interface between the grip and the coupon. However, the abrasive used

TABLE 2 Tensile Specimen Geometry Recommendations^A

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, °
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

^A Dimensions in this table and the tolerances of Fig. 2 or Fig. 3 are recommendations only and may be varied so long as the requirements of Table 1 are met.

must be able to withstand significant compressive loads. Some types of emery cloth have been found ineffective in this application because of disintegration of the abrasive.⁹

8.2.2.5 Tab Material—The most consistently used bonded tab material has been continuous E-glass fiber-reinforced polymer matrix materials (woven or unwoven) in a [0/90]_{ns} laminate configuration. The tab material is commonly applied at 45° to the loading direction to provide a soft interface. Other configurations that have reportedly been successfully used have incorporated steel tabs or tabs made of the same material as is being tested.

8.2.2.6 Bonded Tab Length—When using bonded tabs, estimate the minimum suggested tab length for bonded tabs by the following simple equation. As this equation does not account for the peaking stresses that are known to exist at the ends of bonded joints. The tab length calculated by this equation should normally be increased by some factor to reduce the chances of joint failure:

$$L_{\min} = F^{tu}h/2F^{su} \quad (4)$$

where:

- L_{\min} = minimum required bonded tab length, mm [in.];
- F^{tu} = ultimate tensile strength of coupon material, MPa [psi];
- h = coupon thickness, mm [in.]; and
- F^{su} = ultimate shear strength of adhesive, coupon material, or tab material (whichever is lowest), MPa [psi].

8.2.2.7 Bonded Tab Adhesive—Any high-elongation (tough) adhesive system that meets the environmental requirements may be used when bonding tabs to the material under test. A uniform bondline of minimum thickness is desirable to reduce undesirable stresses in the assembly.

8.2.3 Detailed Examples—The minimum requirements for specimen design discussed in 8.2.1 are by themselves insufficient to create a properly dimensioned and toleranced coupon drawing. Dimensionally toleranced specimen drawings for both tabbed and untabbed forms are shown as examples in Fig. 2 (SI) and Fig. 3 (inch-pound). The tolerances on these drawings are fixed, but satisfy the requirements of Table 1 for all of the recommended configurations of Table 2. For a specific configuration, the tolerances on Fig. 2 and Fig. 3 might be able to be relaxed.

8.3 Specimen Preparation:

8.3.1 Panel Fabrication—Control of fiber alignment is critical. Improper fiber alignment will reduce the measured

properties. Erratic fiber alignment will also increase the coefficient of variation. The specimen preparation method shall be reported.

8.3.2 Machining Methods—Specimen preparation is extremely important for this specimen. Mold the specimens individually to avoid edge and cutting effects or cut from them plates. If they are cut from plates, take precautions to avoid notches, undercuts, rough or uneven surfaces, or delaminations caused by inappropriate machining methods. Obtain final dimensions by water-lubricated precision sawing, milling, or grinding. The use of diamond tooling has been found to be extremely effective for many material systems. Edges should be flat and parallel within the specified tolerances.

8.3.3 Labeling—Label the coupons so that they will be distinct from each other and traceable back to the raw material and in a manner that will both be unaffected by the test and not influence the test.

9. Calibration

9.1 The accuracy of all measuring equipment shall have certified calibrations that are current at the time of use of the equipment.

10. Conditioning

10.1 Standard Conditioning Procedure—Unless a different environment is specified as part of the experiment, condition the test specimens in accordance with Procedure C of Test Method D 5229/D 5229M and store and test at standard laboratory atmosphere (23 ± 3°C [73 ± 5°F] and 50 ± 10% relative humidity).

11. Procedure

11.1 Parameters To Be Specified Before Test:

11.1.1 The tension specimen sampling method, coupon type and geometry, and conditioning travelers (if required).

11.1.2 The tensile properties and data reporting format desired.

NOTE 5—Determine specific material property, accuracy, and data reporting requirements before test for proper selection of instrumentation and data-recording equipment. Estimate operating stress and strain levels to aid in transducer selection, calibration of equipment, and determination of equipment settings.

11.1.3 The environmental conditioning test parameters.

11.1.4 If performed, the sampling method, coupon geometry, and test parameters used to determine density and reinforcement volume.

11.2 General Instructions:

11.2.1 Report any deviations from this test method, whether intentional or inadvertent.

⁹ E-Z Flex Metalite K224 cloth, Grit 120-J, available from Norton Company, Troy, NY 12181, has been found satisfactory in this application. Other equivalent types of emery cloth should also be suitable.

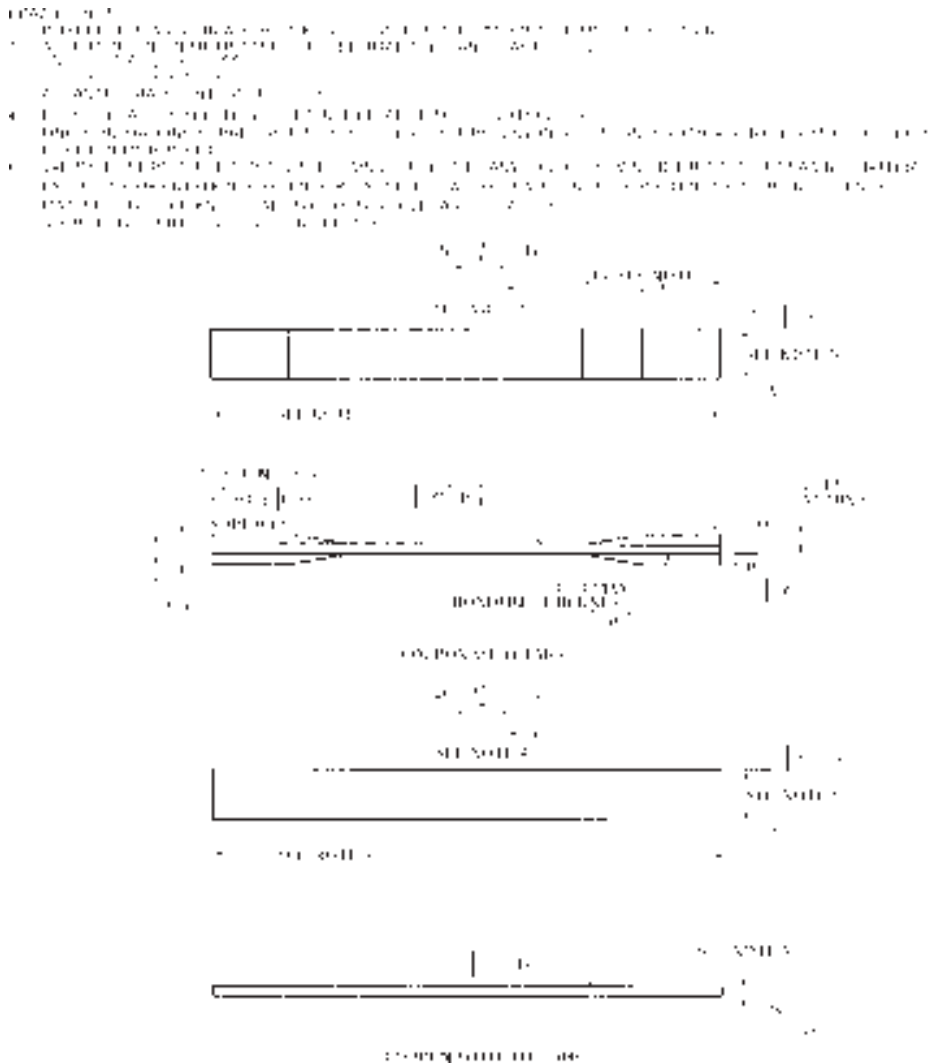


FIG. 2 Tension Test Specimen Drawing (SI)

11.2.2 If specific gravity, density, reinforcement volume, or void volume are to be reported, then obtain these samples from the same panels being tension tested. Specific gravity and density may be evaluated by means of Test Methods D 792. Volume percent of the constituents may be evaluated by one of the matrix digestion procedures of Test Method D 3171, or, for certain reinforcement materials such as glass and ceramics, by the matrix burn-off technique of Test Method D 2584. The void content equations of Test Methods D 2734 are applicable to both Test Method D 2584 and the matrix digestion procedures.

11.2.3 Following final specimen machining and any conditioning, but before the tension testing, determine the specimen area as $A = w \times h$, at three places in the gage section, and report the area as the average of these three determinations to the accuracy in 7.1. Record the average area in units of mm^2 (in.^2).

11.3 *Speed of Testing*—Set the speed of testing to effect a nearly constant strain rate in the gage section. If strain control is not available on the testing machine, this may be approximated by repeated monitoring and adjusting of the rate of load application to maintain a nearly constant strain rate, as mea-

sured by strain transducer response versus time. The strain rate should be selected so as to produce failure within 1 to 10 min. If the ultimate strain of the material cannot be reasonably estimated, initial trials should be conducted using standard speeds until the ultimate strain of the material and the compliance of the system are known, and the strain rate can be adjusted. The suggested standard speeds are:

11.3.1 *Strain-Controlled Tests*—A standard strain rate of 0.01 min^{-1} .

11.3.2 *Constant Head-Speed Tests*—A standard head displacement rate of 2 mm/min [0.05 in./min].

NOTE 6—Use of a fixed head speed in testing machine systems with a high compliance may result in a strain rate that is much lower than required. Use of wedge grips can cause extreme compliance in the system, especially when using compliant tab materials. In some such cases, actual strain rates 10 to 50 times lower than estimated by head speeds have been observed.

11.4 *Test Environment*—Condition the specimen to the desired moisture profile and, if possible, test under the same conditioning fluid exposure level. However, cases such as

DRAWING NOTES

1. DIMENSIONS SHOWN IN ALL DRAWINGS WITH DIMENSION LINES SUBJECT TO THE FOLLOWING:
2. ALL DIMENSIONS IN INCHES WITH DECIMAL TOLERANCES AS FOLLOWS:
 $\begin{matrix} \text{X} & \text{XX} & \text{XXX} \\ \text{X} & \text{XX} & \text{XXX} \\ \text{X} & \text{XX} & \text{XXX} \end{matrix}$
3. ALL ANGLES HAVE TOLERANCE OF $\pm 5^\circ$
4. ALL ORIENTATION DIRECTIONS TOLERANCE RELATIVE TO 0° WITHIN $\pm 5^\circ$
5. FINISH ON MAXIMUM DIMENSIONS NOT TO EXCEED 125 MICROINCHES IN ALL DIRECTIONS WITH 63 MICROINCHES IN PORTION OF DIMENSION IN MICROINCHES.
6. VALUES TO BE PROVIDED FOR THE FOLLOWING, SUBJECT TO ANY BARRIERS SPECIFIED ON THE FIELD OF COUPONS: MATERIAL LAYER ORIENTATION RELATIVE TO 0° (GENERAL), TAB THICKNESS, TAB BEVEL ANGLE, TAB RELATIVE THICKNESS, TAB MATERIAL, TAB THICKNESS, TAB LENGTH, TAB BEVEL ANGLE, TAB RELATIVE THICKNESS.
7. NO GROOVES OR BUILDUP ALLOWED IN THIS AREA.

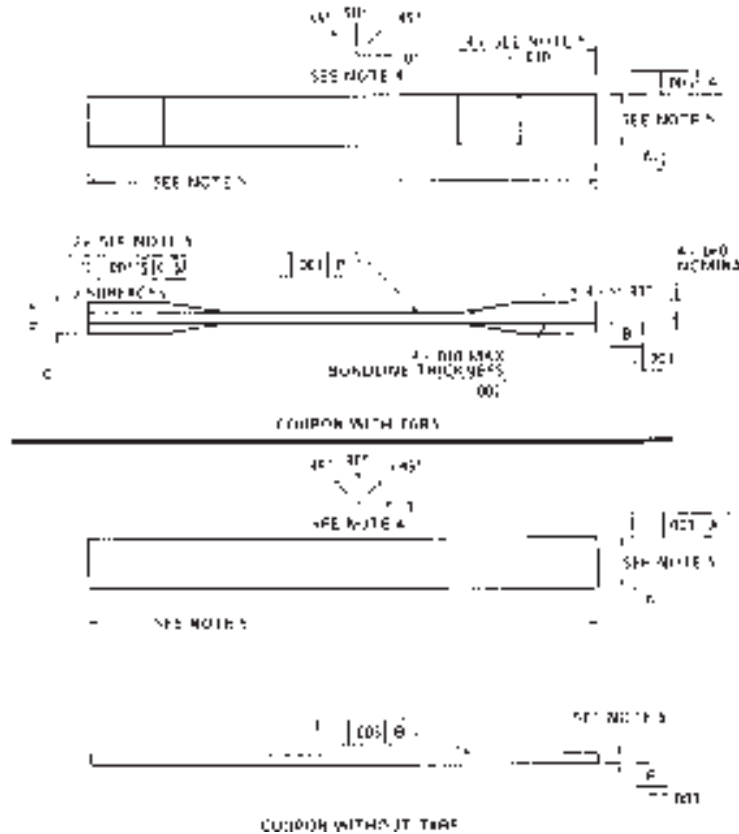


FIG. 3 Tension Test Specimen Drawing (inch-pound)

elevated temperature testing of a moist specimen place unrealistic requirements on the capabilities of common testing machine environmental chambers. In such cases, the mechanical test environment may need to be modified, for example, by testing at elevated temperature with no fluid exposure control, but with a specified limit on time to failure from withdrawal from the conditioning chamber. Modifications to the test environment shall be recorded.

11.4.1 Store the specimen in the conditioned environment until test time, if the testing area environment is different than the conditioning environment.

11.5 *Specimen Insertion*—Place the specimen in the grips of the testing machine, taking care to align the long axis of the gripped specimen with the test direction. Tighten the grips, recording the pressure used on pressure controllable (hydraulic or pneumatic) grips.

NOTE 7—The ends of the grip jaws on wedge-type grips should be even with each other following insertion to avoid inducing a bending moment that results in premature failure of the specimen at the grip. When using

untabbed specimens, a folded strip of medium grade (80 to 150 grit) emery cloth between the specimen faces and the grip jaws (grit-side toward specimen) provides a nonslip grip on the specimen without jaw serration damage to the surface of the specimen. When using tabbed specimens, insert the coupon so that the grip jaws extend approximately 10 to 15 mm [0.5 in.] past the beginning of the tapered portion of the tab. Coupons having tabs that extend beyond the grips are prone to failure at the tab ends because of excessive interlaminar stresses.

11.6 *Transducer Installation*—If strain response is to be determined attach the strain-indication transducer(s) to the specimen, symmetrically about the mid-span, mid-width location. Attach the strain-recording instrumentation to the transducers on the specimen.

11.6.1 When determining modulus of elasticity, it is recommended that at least one specimen per like sample be evaluated with back-to-back axial transducers to evaluate the percent bending, using Eq 5, at the average axial strain checkpoint value (the mid range of the appropriate chord modulus strain range) shown in Table 3. A single transducer can be used if the

TABLE 3 Specimen Alignment and Chord Modulus Calculation Strain Ranges

Tensile Chord Modulus Calculation Longitudinal Strain Range		Longitudinal Strain Checkpoint for Bending
Start Point	End Point	
$\mu\epsilon^A$	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$
1000 ^B	3000	2000

^A 1000 $\mu\epsilon = 0.001$ absolute strain.

^B This strain range is to be contained in the lower half of the stress/strain curve. For materials that fail below 6000 $\mu\epsilon$, a strain range of 25 to 50 % of ultimate is recommended.

percent bending is no more than 3 %. When bending is greater than 3 % averaged strains from back-to-back transducers of like kind are recommended.

$$B_y = \frac{|\epsilon_f - \epsilon_b|}{|\epsilon_f + \epsilon_b|} \quad (5)$$

where:

ϵ_f = indicated strain from front transducer, $\mu\epsilon$;
 ϵ_b = indicated strain from back transducer, $\mu\epsilon$; and
 B_y = percent bending in specimen.

11.7 *Loading*—Apply the load to the specimen at the specified rate until failure, while recording data.

11.8 *Data Recording*—Record load versus strain (or transducer displacement) continuously or at frequent regular intervals. If a transition region or initial ply failures are noted, record the load, strain, and mode of damage at such points. If the specimen is to be failed, record the maximum load, the failure load, and the strain (or transducer displacement) at, or as near as possible to, the moment of rupture.

NOTE 8—Other valuable data that can be useful in understanding testing anomalies and gripping or specimen slipping problems includes load versus head displacement data and load versus time data.

11.9 *Failure Mode*—Record the mode and location of failure of the specimen. Choose, if possible, a standard description using the three-part failure mode code that is shown in Fig. 4.

11.10 *Grip/Tab Failures*—Reexamine the means of load introduction into the material if a significant fraction of failures in a sample population occur within one specimen width of the tab or grip. Factors considered should include the tab alignment, tab material, tab angle, tab adhesive, grip type, grip pressure, and grip alignment.

12. Calculation

12.1 *Tensile Stress/Tensile Strength*—Calculate the ultimate tensile strength using Eq 6 and report the results to three significant figures. If the tensile modulus is to be calculated, determine the tensile stress at each required data point using Eq 7.

$$F^{tu} = P^{max}/A \quad (6)$$

$$\sigma_i = P_i/A \quad (7)$$

where:

F^{tu} = ultimate tensile strength, MPa [psi];
 P^{max} = maximum load before failure, N [lbf];
 σ_i = tensile stress at i th data point, MPa [psi];
 P_i = load at i th data point, N [lbf]; and
 A = average cross-sectional area from 11.2.3, mm² [in.²].

12.2 *Tensile Strain/Ultimate Tensile Strain*—If tensile modulus or ultimate tensile strain is to be calculated, and material response is being determined by an extensometer, determine the tensile strain from the indicated displacement at each required data point using Eq 8 and report the results to three significant figures.

$$\epsilon_i = \delta_i/L_g \quad (8)$$

where:

ϵ_i = tensile strain at i th data point, $\mu\epsilon$;
 δ_i = extensometer displacement at i th data point, mm [in.];
 and
 L_g = extensometer gage length, mm [in.].

12.3 Tensile Modulus of Elasticity:

NOTE 9—To minimize potential effects of bending it is recommended that the strain data used for modulus of elasticity determination be the average of the indicated strains from each side of the specimen, as discussed in 7.3 and 11.6.

12.3.1 *Tensile Chord Modulus of Elasticity*—Select the appropriate chord modulus strain range from Table 3. Calculate the tensile chord modulus of elasticity from the stress-strain data using Eq 9. If data is not available at the exact strain range end points (as often occurs with digital data), use the closest available data point. Report the tensile chord modulus of elasticity to three significant figures. Also report the strain range used in the calculation. A graphical example of chord modulus is shown in Fig. 5.

12.3.1.1 The tabulated strain ranges should only be used for materials that do not exhibit a transition region (a significant change in the slope of the stress-strain curve) within the given strain range. If a transition region occurs within the recommended strain range, then a more suitable strain range shall be used and reported.

$$E^{chord} = \Delta\sigma/\Delta\epsilon \quad (9)$$

where:

E^{chord} = tensile chord modulus of elasticity, GPa [psi];
 $\Delta\sigma$ = difference in applied tensile stress between the two strain points of Table 3, MPa [psi]; and
 $\Delta\epsilon$ = difference between the two strain points of Table 3 (nominally 0.002).

12.3.2 *Tensile Modulus of Elasticity (Other Definitions)*—Other definitions of elastic modulus may be evaluated and reported at the user's discretion. If such data is generated and reported, report also the definition used, the strain range used,

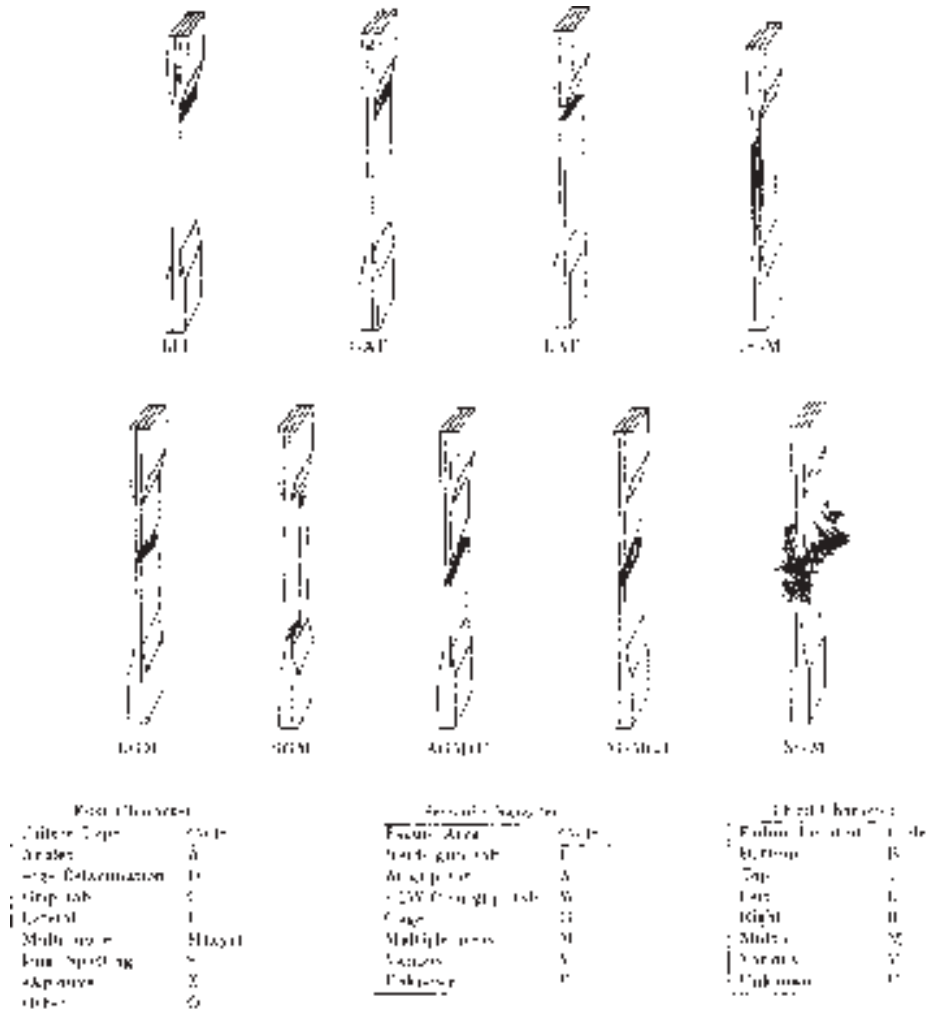


FIG. 4 Tensile Test Failure Codes/Typical Modes

and the results to three significant figures. Test Method E 111 provides additional guidance in the determination of modulus of elasticity.

NOTE 10—An example of another modulus definition is the secondary chord modulus of elasticity for materials that exhibit essentially bilinear stress-strain behavior. An example of secondary chord modulus is shown in Fig. 5.

12.4 Poisson's Ratio:

NOTE 11—If bonded resistance strain gages are being used, the error produced by the transverse sensitivity effect on the transverse gage will generally be much larger for composites than for metals. An accurate measurement of Poisson's ratio requires correction for this effect. The strain gage manufacturer should be contacted for information on the use of correction factors for transverse sensitivity.

12.4.1 Poisson's Ratio By Chord Method—Select the appropriate chord modulus longitudinal strain range from Table 3. Determine (by plotting or otherwise) the transverse strain (measured perpendicular to the applied load), ϵ_t , at each of the two longitudinal strains (measured parallel to the applied load), ϵ_l , strain range end points. If data is not available at the exact strain range end points (as often occurs with digital data), use

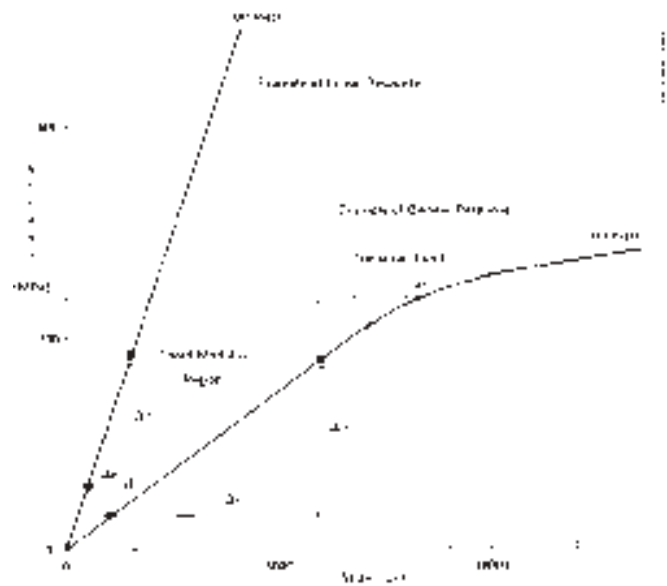


FIG. 5 Typical Tensile Stress-Strain Curves

the closest available data point. Calculate Poisson's ratio by Eq 10 and report to three significant figures. Also report the strain range used.

$$\nu = -\Delta\epsilon_t/\Delta\epsilon_l \quad (10)$$

where:

ν = Poisson's ratio;

$\Delta\epsilon_t$ = difference in lateral strain between the two longitudinal strain points of Table 3, $\mu\epsilon$; and

$\Delta\epsilon_l$ = difference between the two longitudinal strain points of Table 3 (nominally either 0.001, 0.002, or 0.005).

12.4.2 Tensile Poisson's Ratio (Other Definitions)—Other definitions of Poisson's ratio may be evaluated and reported at the user's direction. If such data is generated and reported, report also the definition used, the strain range used, and the results to three significant figures. Test Method E 132 provides additional guidance in the determination of Poisson's ratio.

12.5 Transition Strain—Where applicable, determine the transition strain from either the bilinear longitudinal stress versus longitudinal strain curve or the bilinear transverse strain versus longitudinal strain curve. Create a best linear fit or chord line for each of the two linear regions and extend the lines until they intersect. Determine to three significant digits the longitudinal strain that corresponds to the intersection point and record this value as the transition strain. Report also the method of linear fit (if used) and the strain ranges over which the linear fit or chord lines were determined. A graphical example of transition strain is shown in Fig. 5.

12.6 Statistics—For each series of tests calculate the average value, standard deviation and coefficient of variation (in percent) for each property determined:

$$\bar{x} = \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) / n \quad (11)$$

$$s_{n-1} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right) / (n-1)} \quad (12)$$

$$CV = 100 \times s_{n-1} / \bar{x} \quad (13)$$

where:

\bar{x} = sample mean (average);

s_{n-1} = sample standard deviation;

CV = sample coefficient of variation, in percent;

n = number of specimens; and

x_i = measured or derived property.

13. Report

13.1 Report the following information, or references pointing to other documentation containing this information, to the maximum extent applicable (reporting of items beyond the control of a given testing laboratory, such as might occur with material details or panel fabrication parameters, shall be the responsibility of the requestor):

13.1.1 The revision level or date of issue of this test method.

13.1.2 The date(s) and location(s) of the test.

13.1.3 The name(s) of the test operator(s).

13.1.4 Any variations to this test method, anomalies noticed during testing, or equipment problems occurring during testing.

13.1.5 Identification of the material tested including: material specification, material type, material designation, manufacturer, manufacturer's lot or batch number, source (if not from manufacturer), date of certification, expiration of certification, filament diameter, tow or yarn filament count and twist, sizing, form or weave, fiber areal weight, matrix type, prepreg matrix content, and prepreg volatiles content.

13.1.6 Description of the fabrication steps used to prepare the laminate including: fabrication start date, fabrication end date, process specification, cure cycle, consolidation method, and a description of the equipment used.

13.1.7 Ply orientation stacking sequence of the laminate.

13.1.8 If requested, report density, volume percent reinforcement, and void content test methods, specimen sampling method and geometries, test parameters, and test results.

13.1.9 Average ply thickness of the material.

13.1.10 Results of any nondestructive evaluation tests.

13.1.11 Method of preparing the test specimen, including specimen labeling scheme and method, specimen geometry, sampling method, coupon cutting method, identification of tab geometry, tab material, and tab adhesive used.

13.1.12 Calibration dates and methods for all measurement and test equipment.

13.1.13 Type of test machine, grips, jaws, grip pressure, alignment results, and data acquisition sampling rate and equipment type.

13.1.14 Results of system alignment evaluations, if any such were done.

13.1.15 Dimensions of each test specimen.

13.1.16 Conditioning parameters and results, use of travelers and traveler geometry, and the procedure used if other than that specified in the test method.

13.1.17 Relative humidity and temperature of the testing laboratory.

13.1.18 Environment of the test machine environmental chamber (if used) and soak time at environment.

13.1.19 Number of specimens tested.

13.1.20 Speed of testing.

13.1.21 Transducer placement on the specimen and transducer type for each transducer used.

13.1.22 If strain gages were used, the type, resistance, size, gage factor, temperature compensation method, transverse sensitivity, lead-wire resistance, and any correction factors used.

13.1.23 Stress-strain curves and tabulated data of stress versus strain for each specimen.

13.1.24 Percent bending results for each specimen so evaluated.

13.1.25 Individual strengths and average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population. Note if the failure load was less than the maximum load before failure.

13.1.26 Individual strains at failure and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

13.1.27 Strain range used for chord modulus and Poisson's ratio determination.

13.1.28 If another definition of modulus of elasticity is used in addition to chord modulus, describe the method used, the resulting correlation coefficient (if applicable), and the strain range used for the evaluation.

13.1.29 Individual values of modulus of elasticity, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

13.1.30 If another definition of Poisson's ratio is used in addition to the chordwise definition, describe the method used, the resulting correlation coefficient (if applicable), and the strain range used for the evaluation.

13.1.31 Individual values of Poisson's ratio, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

13.1.32 If transition strain is determined, the method of linear fit (if used) and the strain ranges over which the linear fit or chord lines were determined.

13.1.33 Individual values of transition strain (if applicable), and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

13.1.34 Failure mode and location of failure for each specimen.

14. Precision and Bias

14.1 Precision:

14.1.1 The precision and bias of tension test strength and modulus measurements depend on strict adherence to the Test Method D 3039/D 3039M and are influenced by mechanical and material factors, specimen preparation, and measurement errors.

14.1.2 Mechanical factors that can affect the test results include: the physical characteristics of the testing machine (stiffness, damping, and mass), accuracy of loading and displacement/strain measurement, speed of loading, alignment of test specimen with applied load, parallelism of the grips, grip pressure, and type of load control (displacement, strain, or load).

14.1.3 Material factors that can affect test results include: material quality and representativeness, sampling scheme, and specimen preparation (dimensional accuracy, tab material, tab taper, tab adhesive, and so forth).

14.1.4 The mean tensile strength for a strain rate sensitive, glass/epoxy tape composite testing in the fiber direction was found to increase by approximately two standard deviations with decreasing time to failure tested at the limits of the recommended time to failure prescribed in Test Method D 3039/D 3039M. This result suggest that caution must be used when comparing test data obtained for strain rate sensitive composite materials tested in accordance with this standard.

14.1.5 Measurement errors arise from the use of specialized measuring instruments such as load cells, extensometers and strain gages, micrometers, data acquisition devices, and so forth.

14.1.6 Data obtained from specimens that fracture outside the gage are should be used with caution as this data may not be representative of the material. Failure in the grip region indicates the stress concentration at the tab is greater than the

natural strength variation of the material in the gage section. A tapered tab, bonded with a ductile low-modulus adhesive has a relatively low-stress concentration and should result in the lowest frequency of grip failures. Low-strength bias increases with the frequency of grip failures by an amount proportional to the stress concentration at the tab.

14.1.7 An interlaboratory test program was conducted where an average of five specimens each, of six different materials and lay-up configurations, were tested by nine different laboratories.¹⁰ Table 4 presents the precision statistics generated from this study as defined in Practice E 691 for tensile strength, modulus, and failure strain. All data except that for Material B (90° lay-up) was normalized with respect to an average thickness. The materials listed in Table 15 are defined as:

A	IM-6/3501-6 uni-tape (0)n
B	IM-6/3501-6 uni-tape (90)n
C	IM-6/3501-6 uni-tape (90/0)n
F	Glass/epoxy fabric (7781 glass/Ciba R 7376 Epoxy)- warp aligned
G	Carbon/epoxy fabric (66108 carbon/Ciba R 6376

TABLE 4 Precision Statistics

Material	\bar{x}	$s \bar{x}$	S_r	S_R	$S_r/\bar{x}, \%$	$S_R/\bar{x}, \%$
Strength, ksi						
A	342.69	8.49	10.68	12.78	3.12	3.73
B	8.52	0.52	0.85	0.92	9.94	10.84
C	156.37	3.84	10.85	10.85	6.94	6.94
F	66.18	3.20	1.52	3.48	2.30	5.26
G	121.52	1.59	3.92	3.92	3.23	3.23
Modulus, Msi						
A	23.57	0.65	0.63	0.86	2.69	3.66
B	1.30	0.05	0.04	0.06	3.12	4.57
C	12.38	0.29	0.37	0.44	2.98	3.54
F	3.95	0.08	0.04	0.09	1.01	2.28
G	9.47	0.16	0.12	0.20	1.29	2.06
Failure Strain, %						
A	1.36	0.06	0.07	0.08	4.95	6.15
B	0.66	0.04	0.08	0.09	12.47	13.02
C	1.22	0.03	0.06	0.06	5.25	5.27
F	2.04	0.15	0.07	0.16	3.19	8.03
G	1.27	0.03	0.05	0.05	3.83	4.13

14.1.8 The averages of the coefficients of variation are in Table 5. The values of S_r/X and S_R/X represent the repeatability and the reproducibility coefficients of variation, respectively. These averages permit a relative comparison of the repeatability (within laboratory precision) and reproducibility (between laboratory precision) of the tension test parameters. Overall, this indicates that the failure strain measurements exhibit the least repeatability and reproducibility of all the parameters measured while modulus was found to provide the highest repeatability and reproducibility of the parameters measured.

¹⁰ International Harmonization of Composite Materials—Phase 1: Harmonization of ASTM D 3039/D 3039M and ISO 527-5, Final Report, ASTM Institute for Standards Research, April 1997.

TABLE 5 Averages of the Coefficients of Variation

Parameter	Average of S_r/X , %	Average of S_R/X , %
Strength	5.11	6.00
Modulus	2.22	3.22
Failure strain	5.94	7.32

14.1.9 The consistency of agreement for repeated tests of the same material is dependent on lay-up configuration, mate-

rial and specimen preparation techniques, test conditions, and measurements of the tension test parameters.

14.2 *Bias*—Bias cannot be determined for this test method as no acceptable reference standard exists.

15. Keywords

15.1 composite materials; modulus of elasticity; Poisson's ratio; tensile properties; tensile strength

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

ANEXO I: Normativa ASTM de flexión.



Designation: D 7264/D 7264M – 07

Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials¹

This standard is issued under the fixed designation D 7264/D 7264M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript symbol (e) indicates an editorial change since the last revision or approval.

1. Scope

1.1 This test method determines the flexural stiffness and strength properties of polymer matrix composites.

1.1.1 *Procedure A*—A three-point loading system utilizing center loading on a simply supported beam.

1.1.2 *Procedure B*—A four-point loading system utilizing two load points equally spaced from their adjacent support points, with a distance between load points of one-half of the support span.

Note 1—Unlike test Method D 6272, which allows loading at both one-third and one-half of the support span, in order to standardize geometry and simplify calculations this standard permits loading at only one-half the support span.

1.2 For comparison purposes, tests may be conducted according to either test procedure, provided that the same procedure is used for all tests, since the two procedures generally give slightly different property values.

1.3 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. Within the text, the inch-pound units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards*²

- D 790 Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials
- D 2344/D 2344M Test Method for Short-Beam Strength of

- Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates
 - D 3878 Terminology for Composite Materials
 - D 5229/D 5229M Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials
 - D 5687/D 5687M Guide for Preparation of Flat Composite Panels with Processing Guidelines for Specimen Preparation
 - D 6272 Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending
 - D 6856 Guide for Testing Fabric-Reinforced “Textile” Composite Materials
 - E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines
 - E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing
 - E 18 Test Methods for Rockwell Hardness and Rockwell Superficial Hardness of Metallic Materials
 - F 122 Practice for Calculating Sample Size to Estimate, With a Specified Tolerable Error, the Average for a Characteristic of a Lot or Process
 - E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods
 - E 456 Terminology Relating to Quality and Statistics
 - E 1309 Guide for Identification of Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite Materials in Databases
 - E 1434 Guide for Recording Mechanical Test Data of Fiber-Reinforced Composite Materials in Databases
- 2.2 *Other Documents:*
- ANSI Y14.5-1999 Dimensioning and Tolerancing—Includes Inch and Metric³
 - ANSI B46.1-1995 Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay)³

3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology D 3878 defines the terms relating to high-modulus fibers and their composites. Terminology E 6 defines terms relating to mechanical testing. Terminology E 456 and Practice E 177 define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology D 3878 shall have precedence over the other documents.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D39 on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D39.04 on Laminar and Laminated Test Methods.

Current edition approved April 1, 2007. Published April 2007. Originally approved in 2006. Last previous edition approved in 2006 as D 7264/D 7264M – 06.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 46 Floor, New York, NY 10018. http://www.ansi.org.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.2.1 flexural strength, σ —the maximum stress at the outer surface of a flexure test specimen corresponding to the peak applied force prior to flexural failure.

3.2.2 flexural modulus, E —the ratio of stress range to corresponding strain range for a test specimen loaded in flexure.

3.3 Symbols:

- b = specimen width
- CV = sample coefficient of variation, in percent
- E_c^{flex} = flexural chord modulus of elasticity
- E_s^{flex} = flexural secant modulus of elasticity
- h = specimen thickness
- L = support span
- m = slope of the secant of the load-deflection curve
- n = number of specimens
- P = applied force
- s_{x_i} = sample standard deviation
- x_i = measured or derived property
- \bar{x} = sample mean
- δ = mid-span deflection of the specimen
- ϵ = strain at the outer surface at mid-span of the specimen
- σ = stress at the outer surface at mid-span of the specimen

4. Summary of Test Method

4.1 A bar of rectangular cross section, supported as a beam, is deflected at a constant rate as follows:

4.1.1 Procedure A—The bar rests on two supports and is loaded by means of a loading nose midway between the supports (see Fig. 1).

4.1.2 Procedure B—The bar rests on two supports and is loaded at two points (by means of two loading noses), each an equal distance from the adjacent support point. The distance between the loading noses (that is, the load span) is one-half of the support span (see Fig. 2).

4.2 Force applied to the specimen and resulting specimen deflection at the center of span are measured and recorded until the failure occurs on either one of the outer surfaces, or the deformation reaches some pre-determined value.

4.3 The major difference between four-point and three-point loading configurations is the location of maximum bending moment and maximum flexural stress. With the four-point configuration the bending moment is constant between the central force application members. Consequently, the maximum flexural stress is uniform between the central force application members. In the three-point configuration, the maximum flexural stress is located directly under the center

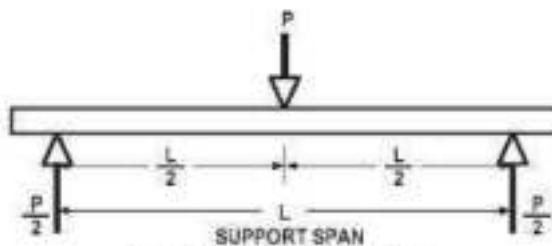


FIG. 1 Procedure A—Loading Diagram

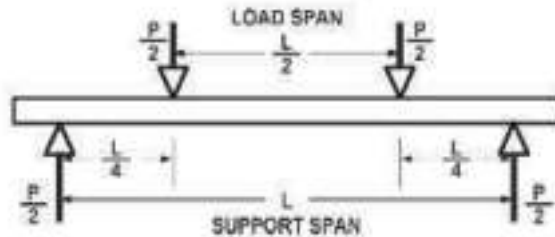


FIG. 2 Procedure B—Loading Diagram

force application member. Another difference between the three-point and four-point configurations is the presence of resultant vertical shear force in the three-point configuration everywhere in the beam except right under the mid-point force application member whereas in the four-point configuration, the area between the central force application members has no resultant vertical shear force. The distance between the outer support members is the same as in the equivalent three-point configuration.

4.4 The test geometry is chosen to limit out-of-plane shear deformations and avoid the type of short beam failure modes that are interrogated in Test Method D 2344/D 2344M.

5. Significance and Use

5.1 This test method determines the flexural properties (including strength, stiffness, and load/deflection behavior) of polymer matrix composite materials under the conditions defined. Procedure A is used for three-point loading and Procedure B is used for four-point loading. This test method was developed for optimum use with continuous-fiber-reinforced polymer matrix composites and differs in several respects from other flexure methods, including the use of a standard span-to-thickness ratio of 32:1 versus the 16:1 ratio used by Test Methods D 790 (a plastics-focused method covering three-point flexure) and D 6272 (a plastics-focused method covering four-point flexure).

5.2 This test method is intended to interrogate long-beam strength in contrast to the short-beam strength evaluated by Test Method D 2344/D 2344M.

5.3 Flexural properties determined by these procedures can be used for quality control and specification purposes, and may find design applications.

5.4 These procedures can be useful in the evaluation of multiple environmental conditions to determine which are design drivers and may require further testing.

5.5 These procedures may also be used to determine flexural properties of structures.

6. Interferences

6.1 Flexural properties may vary depending on which surface of the specimen is in compression, as no laminate is perfectly symmetric (even when full symmetry is intended); such differences will shift the neutral axis and will be further affected by even modest asymmetry in the laminate. Flexural properties may also vary with specimen thickness, conditioning and/or testing environments, and rate of straining. When evaluating several datasets these parameters should be equivalent for all data in the comparison.

6.2 For multidirectional laminates with a small or moderate number of laminae, flexural modulus and flexural strength may be affected by the ply-stacking sequence and will not necessarily correlate with extensional modulus, which is not stacking-sequence dependent.

6.3 The calculation of the flexural properties in Section 13 of this standard is based on beam theory, while the specimens in general may be described as plates. The differences may in some cases be significant, particularly for laminates containing a large number of plies in the $+45^\circ$ direction. The deviations from beam theory decrease with decreasing width.

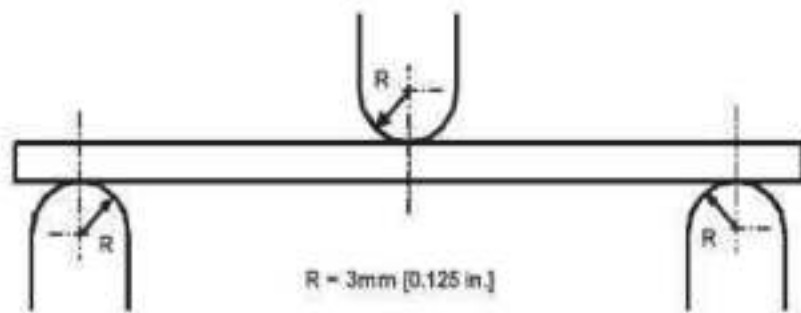
6.4 Loading noses may be fixed, rotatable or rolling. Typically, for testing composites, fixed or rotatable loading noses are used. The type of loading nose can affect results, since non-rolling paired supports on either the tension or compression side of the specimen introduce slight longitudinal forces and resisting moments on the beam, which superpose with the intended loading. The type of supports used is to be reported as described in Section 14. The loading noses should also uniformly contact the specimen across its width. Lack of

uniform contact can affect flexural properties by initiating damage by crushing and by non-uniformly loading the beam. Formulas used in this standard assume a uniform line loading at the specimen supports across the entire specimen width; deviations from this type of loading is beyond the scope of this standard.

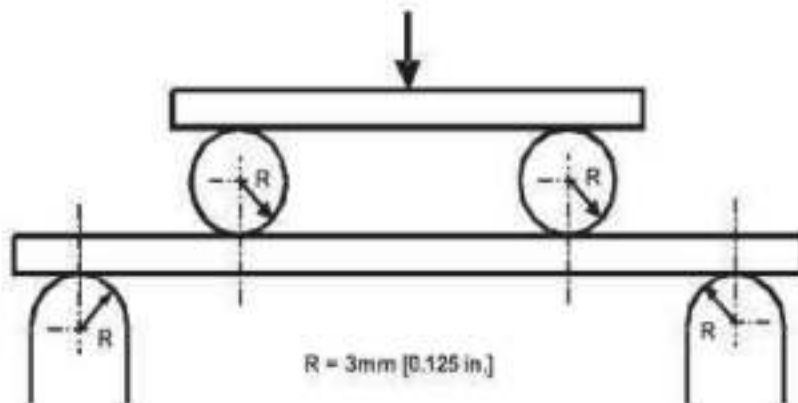
7. Apparatus

7.1 *Testing Machine*—Properly calibrated, which can be operated at a constant rate of crosshead motion, and in which the error in the force application system shall not exceed $\pm 1\%$ of the full scale. The force indicating mechanism shall be essentially free of inertia lag at the crosshead rate used. Inertia lag shall not exceed 1% of the measured force. The accuracy of the testing machine shall be verified in accordance with Practices E.4.

7.2 *Loading Noses and Supports*—The loading noses and supports shall have cylindrical contact surfaces of radius 3.00 mm [0.125 in.] as shown in Fig. 3, with a hardness of 60 to 62 HRC, as specified in Test Methods E.18, and shall have finely



Three-Point Loading Configuration with Fixed Supports and Loading Nose



Four-Point Loading Configuration with Fixed Supports and Rolling Loading Noses

FIG. 3 Example Loading Nose and Supports for Procedures A (top) and B (bottom)

ground surfaces free of indentation and burrs with all sharp edges relieved. Loading noses and supports may be arranged in a fixed, rotatable or rolling arrangement. Typically, with composites, rotatable or fixed arrangements are used.

7.3 *Micrometers*—For width and thickness measurements the micrometers shall use a 4 to 7 mm [0.16 to 0.28 in.] nominal diameter ball-interface on an irregular surface such as the bag side of a laminate, and a flat anvil interface on machined edges or very smooth tooling surfaces. A micrometer or caliper with flat anvil faces shall be used to measure the length of the specimen. The accuracy of the instrument(s) shall be suitable for reading to within 1 % or better of the specimen dimensions. For typical section geometries, an instrument with an accuracy of ± 0.02 mm [± 0.001 in.] is desirable for thickness and width measurement, while an instrument with an accuracy of ± 0.1 mm [± 0.004 in.] is adequate for length measurement.

7.4 *Deflection Measurement*—Specimen deflection at the common center of the loading span shall be measured by a properly calibrated device having an accuracy of ± 1 % or better of the expected maximum displacement. The device shall automatically and continuously record the deflection during the test.

7.5 *Conditioning Chamber*—When conditioning materials at non-laboratory environments, a temperature/vapor-level controlled environmental conditioning chamber is required that shall be capable of maintaining the required temperature to within $\pm 1^\circ\text{C}$ [$\pm 2^\circ\text{F}$] and the required vapor level to within ± 3 % relative humidity, as outlined in Test Method D 5229/D 5229M. Chamber conditions shall be monitored either on an automated continuous basis or on a manual basis at regular intervals.

7.6 *Environmental Test Chamber*—An environmental test chamber is required for test environments other than ambient testing laboratory conditions. This chamber shall be capable of maintaining the test specimen at the required temperature

within $\pm 3^\circ\text{C}$ [$\pm 5^\circ\text{F}$] and the required vapor level to within ± 5 % relative humidity.

8. Test Specimens

8.1 *Specimen Preparation*—Guide D 5687/D 5687M provides recommended specimen preparation practices and should be followed when practical.

8.2 *Specimen Size* is chosen such that the flexural properties are determined accurately from the tests. For flexural strength, the standard support span-to-thickness ratio is chosen such that failure occurs at the outer surface of the specimens, due only to the bending moment (see Notes 2 and 3). The standard span-to-thickness ratio is 32:1, the standard specimen thickness is 4 mm [0.16 in.], and the standard specimen width is 13 mm [0.5 in.] with the specimen length being about 20 % longer than the support span. See Figs. 4 and 5 for a drawing of the standard test specimen in SI and inch-pound units, respectively. For fabric-reinforced textile composite materials, the width of the specimen shall be at least two unit cells, as defined in Guide D 6856. If the standard specimen thickness cannot be obtained in a given material system, an alternate specimen thickness shall be used while maintaining the support span-to-thickness ratio [32:1] and specimen width. Optional support span-to-thickness ratios of 16:1, 20:1, 40:1, and 60:1 may also be used provided it is so noted in the report. Also, the data obtained from a test using one support span-to-thickness ratio may not be compared with the data from another test using a different support span-to-thickness ratio.

8.2.1 Shear deformations can significantly reduce the apparent modulus of highly orthotropic laminates when they are tested at low support span-to-thickness ratios. For this reason, a high support span-to-thickness ratio is recommended for flexural modulus determinations. In some cases, separate sets of specimens may have to be used for modulus and strength determination.



Note: 1—Drawing interpretation per ANSI Y14.5-1999 and ANSI B46.1-1995.
 Note: 2—See 8.2 and 11.3 of this test standard for the required values of span and overall length.
FIG. 4 Standard Flexural Test Specimen Drawing (SI)



Note 1—Drawing interpretation per ANSI Y14.5-1999 and ANSI B46.1-1995.
 Note 2—See 8.2 and 11.3 of this test standard for the required values of span and overall length.

FIG. 5 Standard Flexural Test Specimen Drawing (Inch-Pound)

Note 2—A support span-to-thickness ratio of less than 32:1 may be acceptable for obtaining the desired flexural failure mode when the ratio of the lower of the compressive and tensile strength to out-of-plane shear strength is less than 8, but the support span-to-thickness ratio must be increased for composite laminates having relatively low out-of-plane shear strength and relatively high in-plane tensile or compressive strength parallel to the support span.

Note 3—While laminate stacking sequence is not limited by this test method, significant deviations from a lay-up of nominal balance and symmetry may induce unusual test behaviors and a shift in the neutral axis.

9. Number of Test Specimens

9.1 Test at least five specimens per test condition unless valid results can be gained through the use of fewer specimens, such as in the case of a designed experiment. For statistically significant data the procedures outlined in Practice E 122 should be consulted. Report the method of sampling.

10. Conditioning

10.1 The recommended pre-test specimen condition is effective moisture equilibrium at a specific relative humidity as established by Test Method D 5229/D 5229M; however, if the test requester does not explicitly specify a pre-test conditioning environment, conditioning is not required and the test specimens may be tested as prepared.

Note 4—The term moisture, as used in Test Method D 5229/D 5229M, includes not only the vapor of a liquid and its condensate, but the liquid itself in large quantities, as for immersion.

10.2 The pre-test specimen conditioning process, to include specified environmental exposure levels and resulting moisture content, shall be reported with the data.

10.3 If there is no explicit conditioning process, the conditioning process shall be reported as "unconditioned" and the moisture content as "unknown."

11. Procedure

11.1 Condition the specimens as required. Store the specimens in the conditioned environment until test time.

11.2 Following final specimen machining and any conditioning but before testing, measure and record the specimen width and thickness at the specimen mid-section, and the specimen length, to the specified accuracy.

11.3 Measure the span accurately to the nearest 0.1 mm [0.004 in.] for spans less than 63 mm [2.5 in.] and the nearest 0.3 mm [0.012 in.] for spans greater than or equal to 63 mm [2.5 in.]. Use the measured span for all calculations. See Annex A1 for information on the determination of and setting of the span.

11.4 Speed of Testing—Set the speed of testing at a rate of crosshead movement of 1.0 mm/min [0.05 in./min] for a specimen with standard dimensions. For specimens with dimensions that vary greatly from the standard dimensions, a crosshead rate that will give a similar rate of straining at the outer surface can be obtained via the method outlined in Test Methods D 790 for Procedure A and Test Method D 6272 for Procedure B.

11.5 Align the loading nose(s) and supports so that the axes of the cylindrical surfaces are parallel. For Procedure A, the loading nose shall be midway between the supports. For Procedure B, the load span shall be one-half of the support span and symmetrically placed between the supports. The parallelism may be checked by means of plates with parallel grooves into which the loading nose(s) and supports will fit when properly aligned. Center the specimen on the supports, with the long axis of the specimen perpendicular to the loading noses and supports. See Annex A1 for setting and measuring span.

11.6 Apply the force to the specimen at the specified crosshead rate. Measure and record force-deflection data at a

rate such that a minimum of 50 data points comprise the force deflection curve. (A higher sampling rate may be required to properly capture any nonlinearities or progressive failure of the specimen.) Measure deflection by a transducer under the specimen in contact with it at the center of the support span, the transducer being mounted stationary relative to the specimen supports. Do not use the measurement of the motion of the loading nose relative to the supports as this will not take into account the rotation of the specimen about the load and support noses, nor account for the compliance in the loading nose or crosshead.

11.7 Failure Modes—To obtain valid flexural strength, it is necessary that the specimen failure occurs on either one of its outer surfaces, without a preceding interlaminar shear failure or a crushing failure under a support or loading nose. Failure on the tension surface may be a crack while that on the compression surface may be local buckling. Buckling may be manifested as fiber micro-buckling or ply-level buckling. Ply-level buckling may result in, or be preceded by delamination of the outer ply.

11.7.1 Failure Identification Codes—Record the mode, area, and location of failure for each specimen. Choose a standard failure identification code based on the three-part code shown in Fig. 6. A multimode failure can be described by including each of the appropriate failure mode codes between the parentheses of the M failure mode.

12. Validation

12.1 Values for properties at failure shall not be calculated for any specimen that breaks at some obvious, fortuitous flaw, unless such flaws constitute a variable being studied. Specimens that fail in an unacceptable failure mode shall not be included in the flexural property calculations. Retests shall be made for any specimen for which values are not calculated. If a significant fraction (>50%) of the specimens fail in an unacceptable failure mode then the span-to-thickness ratio (for excessive shear failures) or the loading nose diameter (crushing under the loading nose) should be reexamined.

13. Calculation

Note 5—In determination of the calculated value of some of the properties listed in this section it is necessary to determine if the toe compensation (see Annex A2) adjustment must be made. This toe compensation correction shall be made only when it has been shown that the toe region of the curve is due to take up of the slack, alignment, or seating of the specimen and is not an authentic material response.

13.1 Maximum Flexural Stress, Procedure A—When a beam of homogeneous, elastic material is tested in flexure as a

beam simply supported at two points and loaded at the midpoint, the maximum stress at the outer surface occurs at mid-span. The stress may be calculated for any point on the load-deflection curve by the following equation (Note 6):

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \tag{1}$$

where:

- σ = stress at the outer surface at mid-span, MPa [psi],
- P = applied force, N [lbf],
- L = support span, mm [in.],
- b = width of beam, mm [in.], and
- h = thickness of beam, mm [in.].

Note 6—Eq. 1 applies strictly to materials for which the stress is linearly proportional to strain up to the point of rupture and for which the strains are small. Since this is not always the case, a slight error will be introduced in the use of this equation. The equation will however, be valid for comparison data and specification values up to the maximum fiber strain of 2% for specimens tested by the procedure herein described. It should be noted that the maximum ply stress may not occur at the outer surface of a multidirectional laminate.⁵ Laminated beam theory must be applied to determine the maximum inside stress at failure. Thus, Eq. 1 yields an apparent strength based on homogeneous beam theory. This apparent strength is highly dependent on the ply-stacking sequence for multidirectional laminates.

13.2 Maximum Flexural Stress, Procedure B—When a beam of homogeneous, elastic material is tested in flexure as a beam simply supported at two outer points and loaded at two central points separated by a distance equal to 1/2 the support span and at equal distance from the adjacent support point, the maximum stress at the outer surface occurs between the two central loading points that define the load span (Fig. 2). The stress may be calculated for any point on the load-deflection curve by the following equation (Note 7):

$$\sigma = \frac{3PL}{4bh^2} \tag{2}$$

where:

- σ = stress at the outer surface in the load span region, MPa [psi],
- P = applied force, N [lbf],
- L = support span, mm [in.],
- b = width of beam, mm [in.], and

⁵For the theoretical details, see Whitney, J. M., Browning, C. E., and Mot, A., "Analysis of the Flexure Test for Laminated Composite Materials," *Composite Materials: Testing and Design (Third Conference)*, ASTM STP 546, 1974, pp. 30-35.

First Character		Second Character		Third Character	
Failure Mode	Code	Failure Area	Code	Failure Location	Code
Tension	T	At loading nose	A	Top	T
Compression	C	Between loading noses	B	Bottom	B
Buckling	B	at Support nose	S	Left	L
Interlaminar Shear	S	between Load and support nose	L	Right	R
Multi-mode	M(xyz)	Unknown	U	Middle	M
Other	O			Various	V
				Unknown	U

FIG. 6 Flexure Test Specimen Three-Part Failure Identification Code

b = thickness of beam, mm [in.].

Note 7—The limitations defined for Eq 1 in Note 6 apply also to Eq 2.

13.3 *Flexural Strength*—The flexural strength is equal to the maximum stress at the outer surface corresponding to the peak applied force prior to failure. (for multidirectional laminates, see Note 6). It is calculated in accordance with Eq 1 and 2 by letting P equal the peak applied force.

13.4 *Flexural Stress at a Given Strain*—The maximum flexural stress at any given strain may be calculated in accordance with Eq 1 and 2 by letting P equal the applied force read from the force-deflection curve at the deflection corresponding to the desired strain (for multidirectional laminates, see Note 6). Equations for calculating strains from the measured deflection are given in 13.5 and 13.6.

13.5 *Maximum Strain, Procedure A*—The maximum strain at the outer surface also occurs at mid-span, and it may be calculated as follows:

$$\epsilon = \frac{6\delta b}{L^2} \quad (3)$$

where:

- ϵ = maximum strain at the outer surface, mm/mm [in./in.].
- δ = mid-span deflection, mm [in.].
- L = support span, mm [in.], and
- b = thickness of beam, mm [in.].

13.6 *Maximum Strain, Procedure B*—The maximum strain at the outer surface also occurs at mid-span, and it may be calculated as follows:

$$\epsilon = \frac{4.362\delta}{L^2} \quad (4)$$

where:

- δ = mid-span deflection, mm [in.].
- ϵ = maximum strain at the outer surface, mm/mm [in./in.].
- L = support span, mm [in.], and
- b = thickness of beam, mm [in.].

13.7 Flexural Modulus of Elasticity

13.7.1 *Flexural Chord Modulus of Elasticity*—The flexural chord modulus of elasticity is the ratio of stress range and corresponding strain range. For calculation of flexural chord modulus, the recommended strain range is 0.002 with a start point of 0.001 and an end point 0.003. If the data is not available at the exact strain range end points (as often occurs with digital data), use the closest available data point. Calculate the flexural chord modulus of elasticity from the stress-strain data using Eq 5 (for multidirectional or highly orthotropic composites, see Note 8).

$$E_f^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (5)$$

where:

- E_f^{chord} = flexural chord modulus of elasticity, MPa [psi].
- $\Delta\sigma$ = difference in flexural stress between the two selected strain points, MPa [psi], and
- $\Delta\epsilon$ = difference between the two selected strain points (nominally 0.002).

13.7.1.1 Report the chord modulus of elasticity in MPa [psi] for the strain range 0.001 to 0.003. If a different strain range is used in the calculations, also report the strain range used.

Note 8—Shear deformation can seriously reduce the apparent flexural modulus of highly orthotropic laminates when they are tested at low span-to-thickness ratios.⁹ For this reason, a high span-to-thickness ratio is recommended for flexural modulus determinations. In some cases, separate sets of specimens may have to be used for modulus and strength determination.

13.7.2 *Flexural Secant Modulus of Elasticity*—The flexural secant modulus of elasticity is the ratio of stress to corresponding strain at any given point on the stress-strain curve. The flexural secant modulus is same as the flexural chord modulus in which the initial strain point is zero. It shall be expressed in MPa [psi]. It is calculated as follows (for multidirectional or highly orthotropic composites, see Note 8):

13.7.2.1 *For Procedure A:*

$$E_f^{secant} = \frac{L^3 m}{46b^3} \quad (6)$$

where:

- E_f^{secant} = flexural secant modulus of elasticity, MPa [psi].
- L = support span, mm [in.].
- b = width of beam, mm [in.].
- h = thickness of beam, mm [in.] and
- m = slope of the secant of the force-deflection curve.

13.7.2.2 *For Procedure B:*

$$E_f^{secant} = \frac{0.17L^3 m}{bh^3} \quad (7)$$

where E_f^{secant} , m , L , b , and h are the same as for Eq 6.

13.7.3 Chord modulus of elasticity shall be reported although other definitions of moduli may also be used. However, when other definitions of moduli are used, it should be clearly indicated in the report.

13.8 *Statistics*—For each series of tests calculate the average value, standard deviation, and coefficient of variation for each property determined:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \quad (8)$$

$$s_{x-1} = \sqrt{\frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2 \right)}{n-1}}$$

$$CV = 100 \frac{s_{x-1}}{\bar{x}}$$

where:

- \bar{x} = average value or sample mean.
- x_i = value of single measured or derived property.
- n = number of specimens.
- s_{x-1} = estimated standard deviation.
- CV = coefficient of variation in percentage.

⁹For discussion of these effects, see Zweben, C., Smith, W. S., and Wadley, M. W., "Test Methods for Fiber Tensile Strength, Composite Flexural Modulus, and Properties of Fabric-Reinforced Laminates," *Composite Materials: Testing and Design (P296 Conference)*, ASTM STP 674, 1979, pp. 378-382.

14. Report

14.1 The information reported for this test method includes material identification and mechanical testing data. These data shall be reported in accordance with Guides E 1389 and E 1471. At a minimum, the following should be reported:

14.1.1 The revision level or date of issue of the test method used.

14.1.2 The date(s) and location(s) of the testing.

14.1.3 The name(s) of the test operator(s).

14.1.4 The test Procedure used (A or B).

14.1.5 Any variations to this test method, anomalies noticed during testing, or equipment problems occurring during testing.

14.1.6 Identification of the material tested including: material specification, material type, material designation, manufacturer, manufacturer's lot or batch number, source (if not from the manufacturer), date of certification, expiration of certification, filament diameter, tow or yarn filament count and twist, sizing, form or weave, fiber areal weight, matrix type, prepreg matrix content, and prepreg volatiles content.

14.1.7 Description of the fabrication steps used to prepare the laminate including: fabrication start date, fabrication end date, process specification, cure cycle, consolidation method, and a description of the equipment used.

14.1.8 Ply orientation stacking sequence of the laminate.

14.1.9 If requested, report density, reinforcement volume fraction, and void content test methods, specimen sampling method and geometries, test parameters, and test data.

14.1.10 Average ply thickness of the material.

14.1.11 Results of any nondestructive evaluation tests.

14.1.12 Method of preparing the test specimens, including specimen labeling scheme and method, specimen geometry, sampling method, and specimen cutting method.

14.1.13 Calibration dates and methods for all measurement and test equipment.

14.1.14 Type of test machine, grips, jaws, alignment data, and data acquisition sampling rate and equipment type.

14.1.15 Dimensions of each specimen to at least three significant figures, including specimen width, thickness, and overall length.

14.1.16 Conditioning parameters and results, and the procedure used if other than that specified in this test method.

14.1.17 Relative humidity and temperature of the testing laboratory.

14.1.18 Environment of the test machine environmental chamber (if used) and soak time at environment.

14.1.19 Number of specimens tested.

14.1.20 Load span length, support-span length, and support span-to-thickness ratio.

14.1.21 Loading and support nose type and dimensions.

14.1.22 Speed of testing.

14.1.23 Transducer placement on the specimen, transducer type, and calibration data for each transducer used.

14.1.24 Force-deflection curves for each specimen. Note method and offset value if toe compensation was applied to force-deflection curve.

14.1.25 Tabulated data of flexural stress versus strain for each specimen.

14.1.26 Individual flexural strengths and average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population. Note if the failure load was less than the maximum load prior to failure.

14.1.27 Individual strains at failure and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.28 Strain range used for the flexural chord modulus of elasticity determination.

14.1.29 Individual values of flexural chord modulus of elasticity, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.30 If an alternate definition of flexural modulus of elasticity is used in addition to chord modulus, describe the method used, the resulting correlation coefficient (if applicable), and the strain range used for the evaluation.

14.1.31 Individual values of the alternate (see above) flexural modulus of elasticity, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

14.1.32 Individual maximum flexural stresses, and the average, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) values for the population. Note any test in which the failure load was less than the maximum load before failure.

14.1.33 For flexural modulus only tests: maximum load applied, strain at maximum applied load, and calculated flexural modulus of elasticity (E_f).

14.1.34 Individual maximum flexural strains and the average, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) values for the population. Note any test that was truncated to 2% strain.

14.1.35 Failure mode and location of failure for each specimen.

15. Precision and Bias

15.1 *Precision*—The data required for the development of precision is not currently available for this test method.

15.2 *Bias*—Bias cannot be determined for this test method as no acceptable reference standard exists.

16. Keywords

16.1 fiber-reinforced composites; flexural properties; stiffness; strength

ANNEXES

(Mandatory Information)

A1. MEASURING AND SETTING SPAN

A1.1 For flexural fixtures that have adjustable spans, it is important that the span between the supports is maintained constant or the actual measured span is used in the calculation of flexural stress, flexural modulus and strain, and the loading noses are positioned and aligned properly with respect to the supports. Some simple steps as follows can improve the repeatability of results when using adjustable span fixtures.

A1.2 *Measurement of Span*

A1.2.1 This technique is needed to ensure that the correct span, not an estimated span, is used in calculation of results.

A1.2.2 Scribe a permanent line or mark at the exact center of the support where the specimen makes complete contact. The type of mark depends on whether the supports are fixed or rotatable (see Figs. A1.1 and A1.2).

A1.2.3 Using a vernier caliper with pointed tips that is readable to at least 0.1 mm (0.004 in.), measure the distance between the supports, and use this measurement of span in the calculations.

A1.3 *Setting the Span and Alignment of Loading Noses*—To ensure a constant day-to-day setup of the span and ensure the alignment and proper positioning of the loading nose(s), simple jigs should be manufactured for each of the standard setups used. An example of a jig found to be useful is shown in Fig. A1.3.

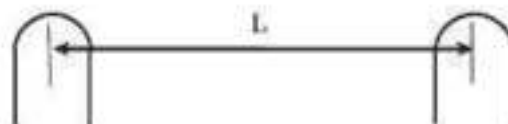


FIG. A1.1 Markings on Fixed Specimen Supports

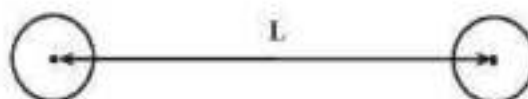


FIG. A1.2 Markings on Rotatable Specimen Supports

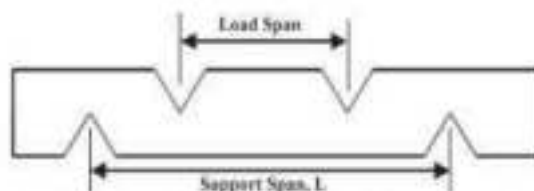


FIG. A1.3 Fixture Used to Align Loading Noses and Supports

A2. TOE COMPENSATION

A2.1 In a typical force-deflection curve (see Fig. A2.1) there is a toe region, AC, which does not represent a property of the material. It is an artifact caused by a take-up of slack and alignment, or seating of the specimen. In order to obtain correct values of such parameters as flexural modulus, and deflection at failure, this artifact must be compensated for to give the corrected zero point on the deflection, or extension axis.

A2.2 In the case of a material exhibiting a region of Hookean (linear) behavior (see Fig. A2.1), a continuation of the linear (CD) region is constructed through the zero axis. This intersection (B) is the corrected zero deflection point from which all deflections must be measured. The slope can be determined by dividing the change in force between any two points along the line CD (or its extension) by the change in deflection at the same two points (measured from Point B, defined as zero-deflection).

A2.3 In the case of a material that does not exhibit any linear region (see Fig. A2.2), the same kind of toe correction of zero-deflection point can be made by constructing a tangent to the maximum slope at the inflection Point H'. This is extended to intersect the deflection axis at Point B', the corrected zero-deflection point. Using Point B' as zero deflection, the force at any point (G') on the curve can be divided by the deflection at that point to obtain a flexural chord modulus (slope of Line B'G').

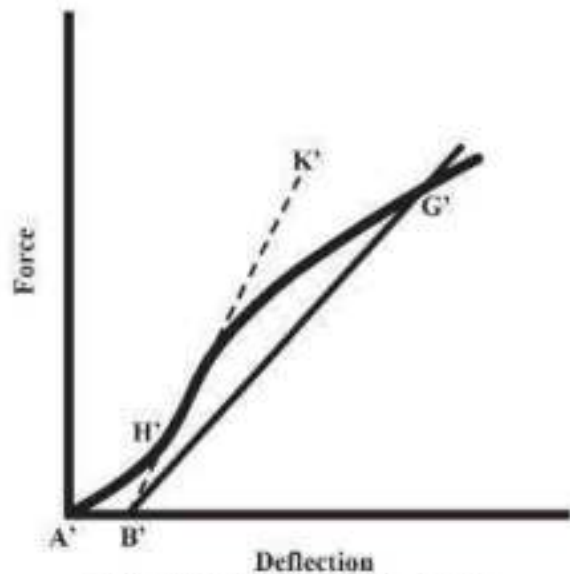


FIG. A2.2 Material without a Hookean Region

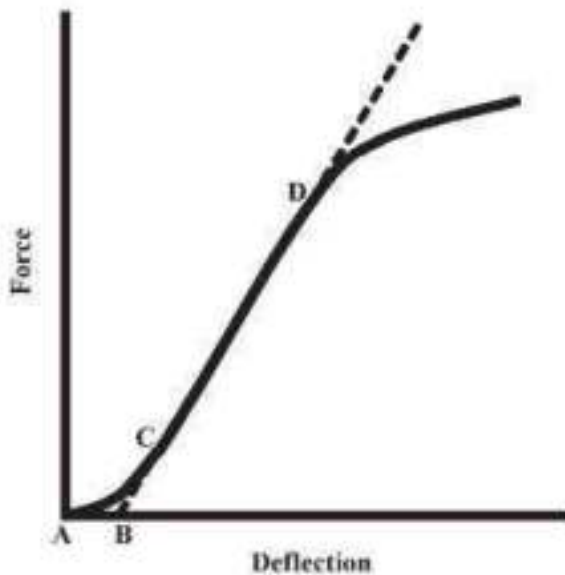


FIG. A2.1 Material with a Hookean Region

ANEXO J: Normativa ASTM de impacto.



Designation: D 5628 – 96 (Reapproved 2001)¹

Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart (Tup or Falling Mass)¹

This standard is issued under the test designation D 5628, the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript symbol (°) indicates an editorial change since the last revision or approval.

¹ Note—Editorial changes were made throughout in November 2001.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the relative ranking of materials according to the energy required to crack or break flat, rigid plastic specimens under various specified conditions of impact of a free-falling dart (tup).

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values in parentheses are for information only.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. Specific hazard statements are given in Section 8.*

Note 1—This test method and ISO 6603-1:1985 are technically equivalent only when the test conditions and specimen geometry required for Geometry FE and the Bruceton Staircase method of calculation are used.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards²

- D 374 Test Methods for Thickness of Solid Electrical Insulation³
- D 618 Practice for Conditioning Plastics for Testing⁴
- D 883 Terminology Relating to Plastics⁵
- D 1600 Terminology for Abbreviated Terms Relating to Plastics⁶
- D 1709 Test Method for Impact Resistance of Plastic Film by the Free Falling Dart Method⁷
- D 1898 Practice for Sampling of Plastics⁸
- D 2444 Test Method for Determination of the Impact Resistance of Thermoplastic Pipe and Fittings by Means of a

Top Falling Weight⁹

- D 3763 Test Method for High-Speed Puncture Properties of Plastics Using Load and Displacement Sensors¹⁰
- D 4066 Classification System for Nylon Injection and Extrusion Materials PA¹¹
- E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods¹²
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method¹³
- 2.2 ISO Standards
- ISO 291 Standard Atmospheres for Conditioning and Testing¹⁴
- ISO 6603-1 Plastics—Determination of Multiaxial Impact Behavior of Rigid Plastics—Part 1: Falling Dart Method¹⁵

3. Terminology

3.1 Definitions

3.1.1 For definitions of plastic terms used in this test method, see Terminologies D 883 and D 1600.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard

3.2.1 *failure (of test specimen)*—the presence of any crack or split, created by the impact of the falling tup, that can be seen by the naked eye under normal laboratory lighting conditions.

3.2.2 *mean-failure energy (mean-impact resistance)*—the energy required to produce 50 % failures, equal to the product of the constant drop height and the mean-failure mass or the product of the constant mass and mean-failure height.

3.2.3 *mean-failure height (impact-failure height)*—the height at which a standard mass, when dropped on test specimens, will cause 50 % failures.

Note 2—Cracks usually start at the surface opposite the one that is struck. Occasionally incipient cracking in glass-reinforced products, for

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and is the direct responsibility of Subcommittee D20.10 on Mechanical Properties. Current edition approved March 10, 1996. Published July 1996. Originally published as D 5628 – 94. Last previous edition D 5628 – 93.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01.

⁴ Discontinued, see 1999 Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

⁵ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.04.

⁶ Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

⁷ Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

⁸ Available from American National Standards Institute, 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10018.

example, may be difficult to differentiate from the reinforcing fibers. In such cases, a penetrating dye may be used to confirm the onset of crack formation.

3.2.4 *mean-failure mass (impact-failure mass)*—the mass of the dart (tup) that, when dropped on the test specimens from a standard height, will cause 50 % failures.

3.2.5 *tup*—a dart with a hemispherical nose. See 7.2 and Fig. 1.

4. Summary of Test Method

4.1 A free-falling dart (tup) is allowed to strike a supported specimen directly. Either a dart having a fixed mass may be dropped from various heights, or a dart having an adjustable mass may be dropped from a fixed height. (See Fig. 2).

4.2 The procedure determines the energy (mass \times height) that will cause 50 % of the specimens tested to fail (mean failure energy).

4.3 The technique used to determine mean failure energy is commonly called the Bruceton Staircase Method or the Up-and-Down Method (1).⁹ Testing is concentrated near the mean, reducing the number of specimens required to obtain a reasonably precise estimate of the impact resistance.

4.4 Each test method permits the use of different tup and test specimen geometries to obtain different modes of failure, permit easier sampling, or test limited amounts of material. There is no known means for correlating the results of tests made by different impact methods or procedures.

5. Significance and Use

5.1 Plastics are viscoelastic and therefore may be sensitive to changes in velocity of the mass falling on their surfaces. However, the velocity of a free-falling object is a function of the square root of the drop height. A change of a factor of two in the drop height will cause a change of only 1.4 in velocity. Hagan et al (2) found that the mean-failure energy of sheeting was constant at drop heights between 0.30 and 1.4 m. This suggests that a constant mass-variable height method will give the same results as the constant height-variable mass technique. On the other hand, different materials respond differently to changes in the velocity of impact. Equivalence of these methods should not be taken for granted. While both constant-mass and constant-height techniques are permitted by these methods, the constant-height method should be used for those materials that are found to be rate-sensitive in the range of velocities encountered in falling-weight types of impact tests.

5.2 The test geometry FA causes a moderate level of stress concentration and can be used for most plastics.

5.3 Geometry FB causes a greater stress concentration and results in failure of tough or thick specimens that do not fail with Geometry FA (3). This approach may produce a punch shear failure on thick sheet. If that type of failure is undesirable, Geometry FC may be used. Geometry FB is suitable for research and development because of the smaller test area required.

5.3.1 The conical configuration of the 12.7-mm diameter tup used in Geometry FB minimizes problems with tup penetration and sticking in failed specimens of some ductile materials.

5.4 The test conditions of Geometry FC are the same as those of Test Method A of Test Method D 1709. They have been used in specifications for extruded sheeting. A limitation of this geometry is that considerable material is required.

5.5 The test conditions of Geometry FD are the same as for Test Method D 3763.

5.6 The test conditions of Geometry FE are the same as for ISO 6603-1.

5.7 Because of the nature of impact testing, the selection of a test method and tup must be somewhat arbitrary. While any one of the tup geometries may be selected, knowledge of the final or intended end-use application should be considered.

5.8 Clamping of the test specimen will improve the precision of the data. Therefore, clamping is recommended. However, with rigid specimens, valid determinations can be made without clamping. Unclamped specimens tend to exhibit somewhat greater impact resistance.

5.9 Before proceeding with this test method, reference should be made to the specification of the material being tested. Any test specimens preparation, conditioning, dimensions, or testing parameters or combination thereof covered in the relevant ASTM materials specification shall take precedence over those mentioned in this test method. If there are no relevant ASTM material specifications, then the default conditions apply.

6. Interferences

6.1 Falling-mass-impact-test results are dependent on the geometry of both the falling mass and the support. Thus, impact tests should be used only to obtain relative rankings of materials. Impact values cannot be considered absolute unless the geometry of the test equipment and specimen conform to the end-use requirement. Data obtained by different procedures within this test method, or with different geometries, cannot, in general, be compared directly with each other. However, the relative ranking of materials may be expected to be the same between two test methods if the mode of failure and the impact velocities are the same.

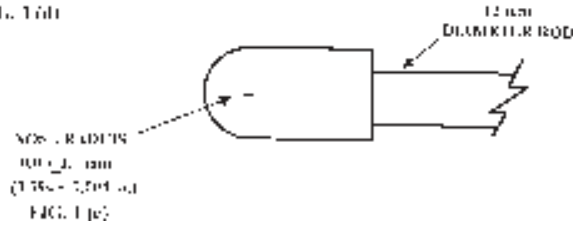
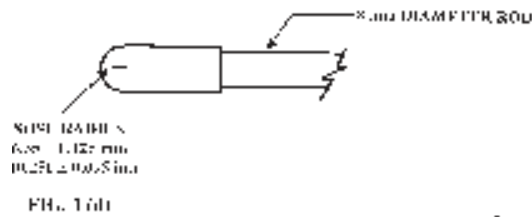
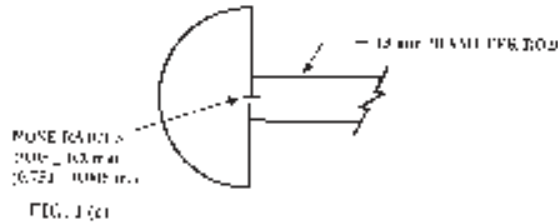
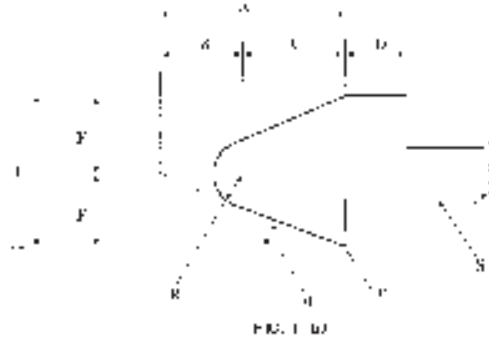
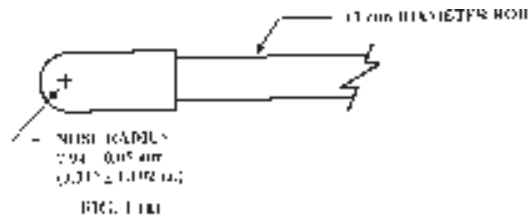
6.1.1 Falling-mass-impact types of tests are not suitable for predicting the relative ranking of materials at impact velocities differing greatly from those imposed by these test methods.

6.2 As cracks usually start at the surface opposite the one that is struck, the results can be greatly influenced by the quality of the surface of test specimens. Therefore, the composition of this surface layer, its smoothness or texture, levels of and type of texture, and the degree of orientation introduced during the formation of the specimen (such as may occur during injection molding) are very important variables. Flaws in this surface will also affect results.

6.3 Impact properties of plastic materials can be very sensitive to temperature. This test can be carried out at any reasonable temperature and humidity, thus representing actual use environments. However, this test method is intended primarily for rating materials under specific impact conditions.

⁹ The boldface numbers in parentheses refer to a list of references at the end of the text.

D 5628 – 96 (2001)^{e1}



Dimensions of Conical Dart (Not to scale.)—Fig. 1(b)

NOTE 1—Unless specified, the tolerance on all dimensions shall be $\pm 2\%$.

Position	Dimension, mm	Dimension, in.
A	27.2	1.07
B	15	0.59
C	12.2	0.48
D	6.4	0.25
E	25.4	1
F	12.7	0.5
R	6.35 \pm 0.05	0.250 \pm 0.002
(nose radius)		
r (radius)	0.8	0.03
S (diameter) ⁴	6.4	0.25
θ	25 \pm 1°	25 \pm 1°

⁴ Larger diameter shafts may be used.

FIG. 1 Tup Geometries for Geometries FA (1a), FB (1b), FC (1c), FD (1d), and FE (1e)

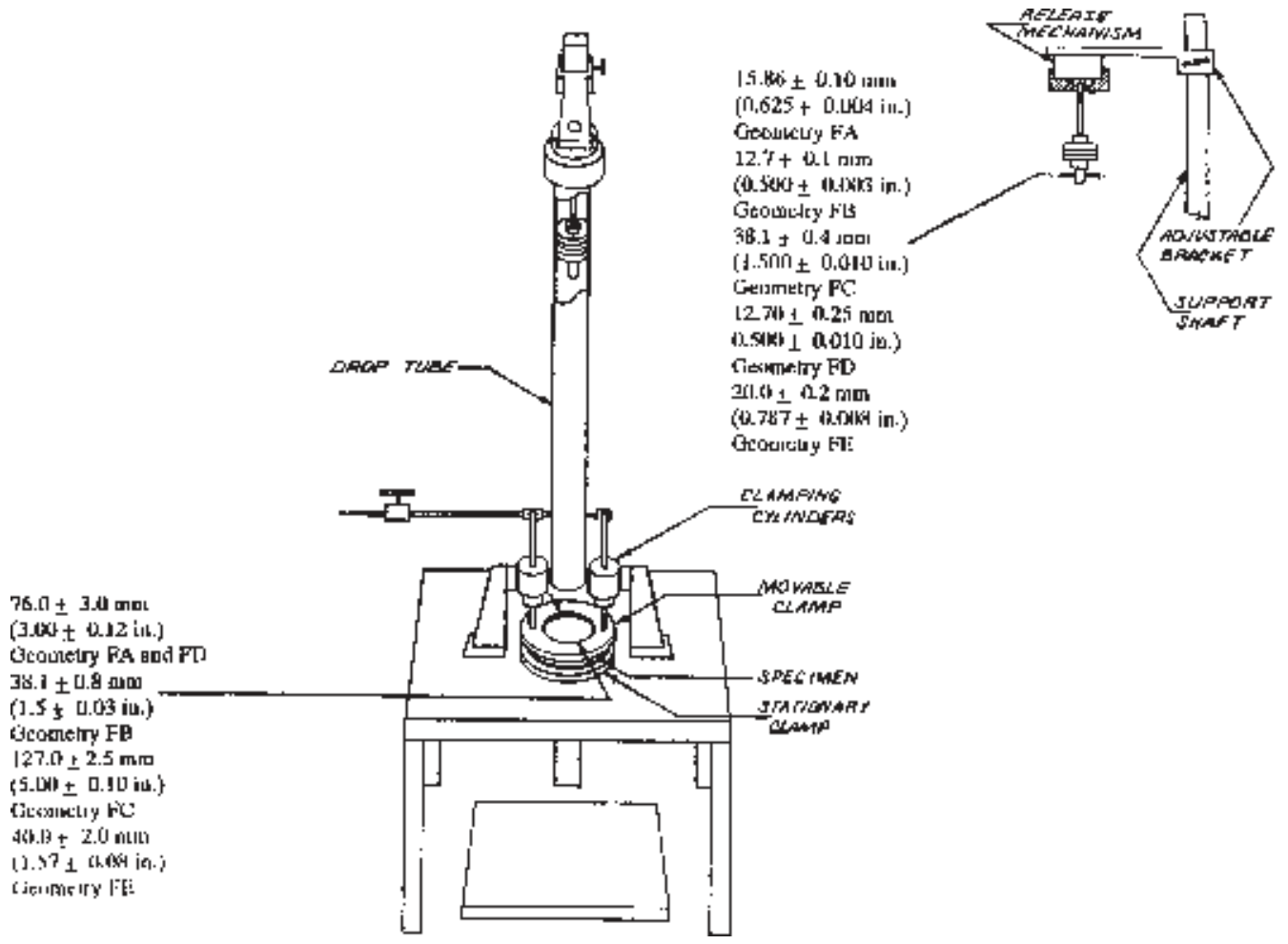


FIG. 2 One Type of Falling Mass Impact Tester

7. Apparatus

7.1 *Testing Machine*—The apparatus shall be constructed essentially as is shown in Fig. 2. The geometry of the specimen clamp and tup shall conform to the dimensions given in 7.1.1 and 7.2.

7.1.1 *Specimen Clamp*—For flat specimens, a two-piece annular specimen clamp similar to that shown in Fig. 3 is recommended. For Geometries FA and FD, the inside diameter should be 76.0 ± 3.0 mm (3.00 ± 0.12 in.). For Geometry FB, the inside diameter should be 38.1 ± 0.80 mm (1.5 ± 0.03 in.).

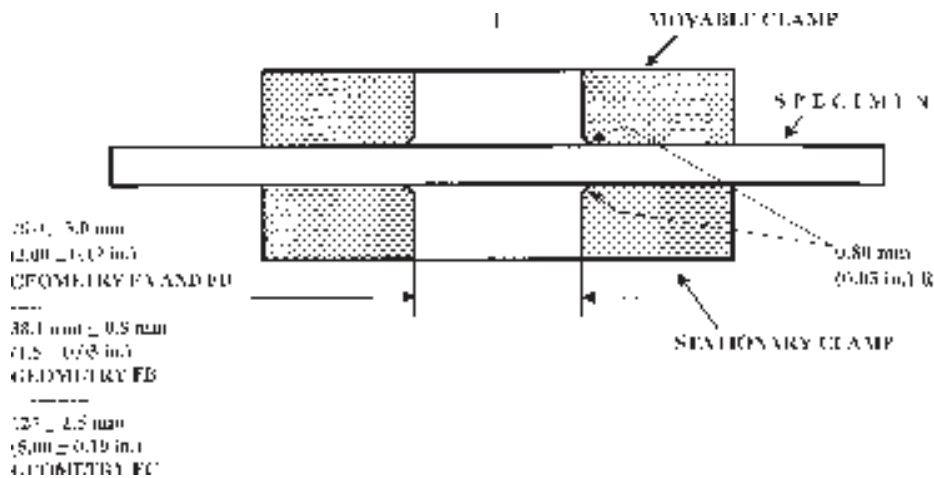


FIG. 3 Support Plate/Specimen/Clamp Configuration for Geometries FA, FB, FC, and FD

For Geometry FC, the inside diameter should be 127.0 ± 2.5 mm (5.00 ± 0.10 in.). For Geometry FE an annular specimen clamp similar to that shown in Fig. 4 is required. The inside diameter should be 40 ± 2 mm (1.57 ± 0.08 in.) (see Table 1). For Geometries FA, FB, FC, and FD, the inside edge of the upper or supporting surface of the lower clamp should be rounded slightly; a radius of 0.8 mm (0.03 in.) has been found to be satisfactory. For Geometry FE this radius should be 1 mm (0.04 in.).

7.1.1.1 Contoured specimens shall be firmly held in a jig so that the point of impact will be the same for each specimen.

7.1.2 *Tup Support*, capable of supporting a 13.5-kg (30-lb) mass, with a release mechanism and a centering device to ensure uniform, reproducible drops.

NOTE 3—Reproducible drops may be ensured through the use of a tube or cage within which the tup falls. In this event, care should be exercised so that any friction that develops will not reduce the velocity of the tup appreciably.

7.1.3 *Positioning Device*—Means shall be provided for positioning the tup so that the distance from the impinging surface of the tup head to the test specimen is as specified.

7.2 *Tup*:

7.2.1 The tup used in Geometry FA shall have a 15.86 ± 0.10 -mm (0.625 ± 0.004 -in.) diameter hemispherical head of tool steel hardened to 54 HRC or harder. A steel shaft about 13 mm (0.5 in.) in diameter shall be attached to the center of the flat surface of the head with its longitudinal axis at 90° to that surface. The length of the shaft shall be great enough to accommodate the maximum mass required (see Fig. 1(a) and Table 1).

7.2.2 The tup used in Geometry FB shall be made of tool steel hardened to 54 HRC or harder. The head shall have a diameter of 12.7 ± 0.1 mm (0.500 ± 0.003 in.) with a conical (50° included angle) configuration such that the conical surface is tangent to the hemispherical nose. A 6.4-mm (0.25-in.) diameter shaft is satisfactory (see Fig. 1(b) and Table 1).

7.2.3 The tup used for Geometry FC shall be made of tool steel hardened to 54 HRC or harder. The hemispherical head shall have a diameter of 38.1 ± 0.4 mm (1.5 ± 0.015 in.). A

TABLE 1 Tup and Support Ring Dimensions

Geometry	Dimensions, mm (in.)	
	Tup Diameter	Inside Diameter Support Ring
FA	15.86 ± 0.10 (0.625 ± 0.004)	76.0 ± 3.0 (3.00 ± 0.12)
FB	12.7 ± 0.1 (0.500 ± 0.003)	38.1 ± 0.8 (1.5 ± 0.03)
FC	38.1 ± 0.4 (1.5 ± 0.010)	127.0 ± 2.5 (5.00 ± 0.10)
FD	12.70 ± 0.25 (0.500 ± 0.010)	76.0 ± 3.0 (3.00 ± 0.12)
FE	20.0 ± 0.2 (0.787 ± 0.008)	40.0 ± 2.0 (1.57 ± 0.08)

steel shaft about 13 mm (0.5 in.) in diameter shall be attached to the center of the flat surface of the head with its longitudinal axis at 90° to that surface. The length of the shaft shall be great enough to accommodate the maximum mass (see Fig. 1(c) and Table 1).

7.2.4 The tup used in Geometry FD shall have a 12.70 ± 0.25 -mm (0.500 ± 0.010 -in.) diameter hemispherical head of tool steel hardened to 54 HRC or harder. A steel shaft about 8 mm (0.31 in.) in diameter shall be attached to the center of the flat surface of the head with its longitudinal axis at 90° to the surface. The length of the shaft shall be great enough to accommodate the maximum mass required (see Fig. 1(d) and Table 1).

7.2.5 The tup used in Geometry FE shall have a 20.0 ± 0.2 -mm (0.787 ± 0.008 -in.) diameter hemispherical head of tool steel hardened to 54 HRC or harder. A steel shaft about 13 mm (0.5 in.) in diameter shall be attached to the center of the flat surface of the head with its longitudinal axis at 90° to the surface. The length of the shaft shall be great enough to accommodate the maximum mass required (see Fig. 1(e) and Table 1).

7.2.6 The tup head shall be free of nicks, scratches, or other surface irregularities.

7.3 *Masses*—Cylindrical steel masses are required that have a center hole into which the tup shaft will fit. A variety of masses are needed if different materials or thicknesses are to be

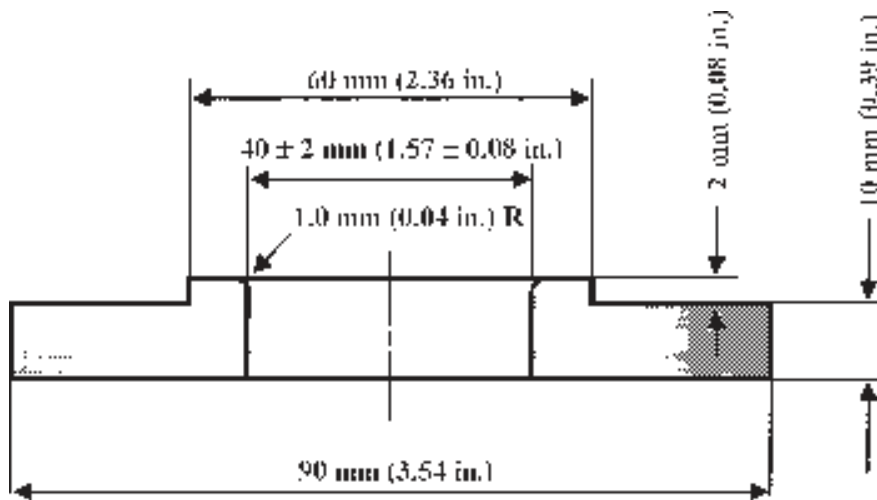


FIG. 4 Test-Specimen Support for Geometry FE

tested. For a material of low impact resistance, the tup mass may need to be adjusted by increments of 10 g or less. Materials of high impact resistance may require increments of 1 kg or more.

7.4 *Micrometer*, for measurement of specimen thickness. It should be accurate to within 1 % of the average thickness of the specimens being tested. See Test Methods D 374 for descriptions of suitable micrometers.

7.5 The mass of the tup head and shaft assembly and the additional mass required must be known to within an accuracy of ± 1 %.

8. Hazards

8.1 Safety Precautions:

8.1.1 Cushioning and shielding devices shall be provided to protect personnel and to avoid damage to the impinging surface of the tup. A tube or cage can contain the tup if it rebounds after striking a specimen.

8.1.2 When heavy weights are used, it is hazardous for an operator to attempt to catch a rebounding tup. Figure 2 of Test Method D 2444 shows an effective mechanical “rebound catcher” employed in conjunction with a drop tube.

9. Sampling

9.1 Unless otherwise agreed upon between the manufacturer and the producer, sample the material in accordance with Sections 9 through 14 of Practice D 1898.

10. Test Specimens

10.1 Flat test specimens shall be large enough so that they can be clamped firmly if clamping is desirable. See Table 2 for the minimum size of specimen that can be used for each test geometry.

10.2 The thickness of any specimen in a sample shall not differ by more than 5 % from the average specimen thickness of that sample. However, if variations greater than 5 % are unavoidable in a sample that is obtained from parts, the sample may be tested, but the data shall not be used for referee purposes. For compliance with ISO 6603-1 the test specimen shall be 60 ± 2 mm (2.4 ± 0.08 in.) in diameter or 60 ± 2 mm (2.4 ± 0.08 in.) square with a thickness of 2 ± 0.1 mm (0.08 ± 0.004 in.). Machining specimens to reduce thickness variation is not permissible.

10.3 When the approximate mean failure mass for a given sample is known, 20 specimens will usually yield sufficiently precise results. If the approximate mean failure mass is unknown, six or more additional specimens should be used to

determine the appropriate starting point of the test. For compliance with ISO 6603-1 a minimum of 30 specimens must be tested.

10.4 Carefully examine the specimen visually to ensure that samples are free of cracks or other obvious imperfections or damages, unless these imperfections constitute variables under study. Samples known to be defective should not be tested for specification purposes. Production parts, however, should be tested in the as-received condition to determine conformance to specified standards.

10.5 Select a suitable method for making the specimen that will not affect the impact resistance of the material.

10.6 Specimens may have flat smooth surfaces on both sides, be textured on one side and smooth on the other side, or be textured on both surfaces. Both surfaces may have the same texture or two different levels and types of texture. When testing, special attention must be paid to how the specimen is positioned on the support.

NOTE 4—As few as ten specimens often yield sufficiently reliable estimates of the mean-failure mass. However, in such cases the estimated standard deviation will be relatively large (1).

11. Conditioning

11.1 Unless otherwise specified, condition the test specimens at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and 50 ± 5 % relative humidity for not less than 40 h prior to test, in accordance with Procedure A of Test Methods D 618, for those tests where conditioning is required. In cases of disagreement, the tolerances shall be $\pm 1^\circ\text{C}$ ($\pm 1.8^\circ\text{F}$) and ± 2 % relative humidity. For compliance with ISO requirements, the specimens must be conditioned for a minimum of 16 h prior to testing or post conditioning in accordance with ISO 291, unless the period of conditioning is stated in the relevant ISO specification for the material.

11.1.1 Note that for some hygroscopic materials, such as nylons, the material specifications (for example, Specification D 4066) call for testing “dry as-molded specimens”. Such requirements take precedence over the above routine preconditioning to 50 % RH and require sealing the specimens in water vapor-impermeable containers as soon as molded and not removing them until ready for testing.

11.2 Conduct tests in the standard laboratory atmosphere of $23 \pm 2^\circ\text{C}$ ($73.4 \pm 3.6^\circ\text{F}$) and at 50 ± 5 % relative humidity, unless otherwise specified.

11.3 When testing is desired at temperatures other than 23°C , transfer the materials to the desired test temperature within 30 min, preferably immediately, after completion of the preconditioning. Hold the specimens at the test temperature for no more than 5 h prior to test, and, in no case, for less than the time required to ensure thermal equilibrium in accordance with Section 10 of Test Method D 618.

12. Procedure

12.1 Determine the number of specimens for each sample to be tested, as specified in 10.3.

12.2 Mark the specimens and condition as specified in 11.1.

12.3 Prepare the test apparatus for the geometry (FA, FB, FC, FD, FE) selected.

TABLE 2 Minimum Size of Specimen

Geometry	Specimen Diameter, mm (in.)	Square Specimen, mm (in.)
FA	89 (3.5)	89 by 89 (3.5 by 3.5)
FB	51 (2.0)	51 by 51 (2.0 by 2.0)
FC	140 (5.5)	140 by 140 (5.5 by 5.5)
FD	89 (3.5)	89 by 89 (3.5 by 3.5)
FE	58 (2.3)	58 by 58 (2.3 by 2.3)

12.4 Measure and record the thickness of each specimen in the area of impact.

12.5 Choose a specimen at random from the sample. A random-numbers table may be used if desired.

12.6 Clamp or position the specimen. The same surface or area should be the target each time (see 6.2). When clamping is employed, the force should be sufficient to prevent motion of the clamped portion of the specimen when the tup strikes.

12.7 Unless otherwise specified, initially position the tup 0.660 ± 0.008 m (26.0 ± 0.3 in.) from the surface of the specimen.

12.8 Adjust the total mass of the tup or the height of the tup, or both, to that amount expected to cause half the specimens to fail.

NOTE 5—If failures cannot be produced with the maximum available missile mass, the drop height can be increased. The test temperature could be reduced by (a) use of an ice-water mixture, or (b) by air-conditioned environment to provide one of the temperatures given in 3.3 of Test Methods D 618. Conversely, if the unloaded tup causes failures when dropped 0.660 m, the drop height can be decreased. A moderate change in dart velocity will not usually affect the mean-failure energy appreciably. Refer to 5.1.

12.9 Release the tup. Be sure that it hits the center of the specimen. If the tup bounces, catch it to prevent multiple impact damage to the specimen's surface (see 8.1.2).

12.10 Remove the specimen and examine it to determine whether or not it has failed. Permanent deformation alone is not considered failure, but note the extent of such deformation (depth, area). For some polymers, for example, glass-reinforced polyester, incipient cracking may be difficult to determine with the naked eye. Exposure of the stressed surface to a penetrating dye, such as gentian violet, may be used to determine the onset of cracking. As a result of the wide range of failure types that may be observed with different materials, the definition of failure defined in the material specification shall take precedence over the definition stated in 3.2.1. Other definitions of failure may be used if agreed upon by supplier and user.

12.11 If the first specimen fails, remove one increment of mass from the tup while keeping the drop height constant, or decrease the drop height while keeping the mass constant (see 12.12). If the first specimen does not fail, add one increment of mass to the tup or increase the drop height one increment, as above. Then test the second specimen.

12.12 In this manner, select the impact height or mass for each test from the results observed with the specimen just previously tested. Test each specimen only once.

12.13 For best results, the mass or height increment used should be approximately equivalent to s , the estimated standard deviation of the test for that sample. An increment of 0.5 to 2 times s is satisfactory (see section 13.4).

NOTE 6—An increment of 10 % of the estimated mean-failure mass or mean-failure height has been found to be acceptable in most instances.

12.14 Keep a running plot of the data, as shown in Appendix X1. Use one symbol, such as X , to indicate a failure and a different symbol, such as O , to indicate a non-failure at each mass or height level.

12.15 For any specimen that gives a break behavior that appears to be an outlier, the conditions of that impact shall be examined. The specimen may be discarded only if a unique cause for the anomaly can be found, such as an internal flaw visible in the broken specimen. Note that break behavior may vary widely within a set of specimens. Data from specimens that show atypical behavior shall not be discarded simply on the basis of such behavior.

13. Calculation

13.1 *Mean-Failure Mass*—If a constant-height procedure was used, calculate the mean-failure mass from the test data obtained, as follows:

$$w = w_o + d_w(A/N \pm 0.5) \quad (1)$$

13.2 *Mean-Failure Height*—If a constant-mass procedure was used, calculate the mean-failure height from the test data obtained, as follows:

$$h = h_o + d_h(A/N \pm 0.5) \quad (2)$$

where:

- w = mean-failure mass, kg,
- h = mean-failure height, mm,
- d_w = increment of tup weight, kg,
- d_h = increment of tup height, mm,
- N = total number of failures or non-failures, whichever is smaller. For ease of notation, call whichever are used events,
- w_o = smallest mass at which an event occurred, kg
- h_o = lowest height at which an event occurred, mm (or in.),
- $A = \sum_{i=0}^k in_i$,
- $i = 0, 1, 2, \dots, k$ (counting index, starts at h_o or w_o),
- n_i = number of events that occurred at h_i or w_i ,
- $w_i = w_o + id_w$, and
- $h_i = h_o + id_h$.

In calculating w or h , the negative sign is used when the events are failures. The positive sign is used when the events are non-failures. Refer to the example in Appendix X1.

13.3 *Mean-Failure Energy*—Compute the mean-failure energy as follows: $MFE = hwf$

where:

- MFE = mean-failure energy, J,
 - h = mean-failure height or constant height as applicable, mm
 - w = mean-failure mass or constant mass as applicable, kg, and
 - f = factor for conversion to joules.
- Use $f = 9.80665 \times 10^{-3}$ if $h = \text{mm}$ and $w = \text{kg}$.

13.4 *Estimated Standard Deviation of the Sample*—If desired for record purposes, the estimated standard deviation of the sample for either variable mass or variable height can be calculated as follows:

$$s_w = 1.62d_w[B/N - (A/N)^2] + 0.047d_w \quad \text{or} \quad (3)$$

$$s_h = 1.62d_h[B/N - (A/N)^2] + 0.047d_h \quad (4)$$

where:

s_w = estimated standard deviation, mass, kg
 s_h = estimated standard deviation, height, mm, and

$$B = \sum_{i=0}^k i^2 n_i \quad (5)$$

The above calculation is valid for $[B/N - (A/N)^2] > 0.3$. If the value is < 0.3 , use Table I from Ref (3).

13.5 *Estimated Standard Deviation of the Sample Mean*—Calculate the estimated standard deviation of the sample mean-failure height or weight as follows:

$$S_{\bar{w}} = G s_w / \sqrt{N} \quad (6)$$

or

$$S_{\bar{h}} = G s_h / \sqrt{N} \quad (7)$$

where:

$s_{\bar{h}}$ = estimated standard deviation of the mean height, mm,
 $s_{\bar{w}}$ = estimated standard deviation of the mean mass, kg,
 and

G = factor that is a function of s/d (see Appendix X2).

A sample computation of s_w may be found in Appendix X1.

NOTE 7—For values of G at other levels of s/d , see Fig. 22 in Ref (4).

13.6 *Estimated Standard Deviation of the Mean-Failure Energy*—Calculate the estimated standard deviation of the mean-failure energy as follows:

$$S_{MFE} = s_{\bar{h}} w f \quad (8)$$

or

$$S_{MFE} = S_{\bar{w}} h f, \text{ as applicable} \quad (9)$$

where:

S_{MFE} = estimated standard deviation of the mean-failure energy.

14. Report

14.1 Report the following information:

14.1.1 Complete identification of the sample tested, including type of material, source, manufacturer's code, form, principal dimensions, and previous history,

14.1.2 Method of preparation of specimens,

14.1.3 Whether surface of the specimen is smooth or textured, the level of and type of texture if known, and whether texture is on only one or both surfaces,

14.1.4 If the specimen is textured, report whether textured surface faces upward towards the dart or downward away from the dart,

14.1.5 Means of clamping, if any,

14.1.6 Statement of geometry (FA, FB, FC, FD, FE) and procedure used—constant mass or constant height,

14.1.7 Thickness of specimens tested (average and range).

14.1.8 Number of test specimens employed to determine the mean failure height or mass,

14.1.9 Mean-failure energy,

14.1.10 Types of failure, for example: (a) crack or cracks on one surface only (the plaque could still hold water), (b) cracks that penetrate the entire thickness (water would probably penetrate through the plaque), (c) brittle shatter (the plaque is in several pieces after impact), or (d) ductile failure (the plaque

is penetrated by a blunt tear). Report other observed deformation due to impact, whether the specimens fail or not,

14.1.11 If atypical deformation for any specimen within a sample for that material is observed, note the assignable cause, if known,

14.1.12 Date of test and operator's identification,

14.1.13 Test temperature,

14.1.14 In no case shall results obtained with arbitrary geometries differing from those contained in these test methods be reported as values obtained by this test method (D 5628), and

14.1.15 The test method number and published/revision date.

15. Precision and Bias

15.1 Tables 3 and 4 are based on a round robin¹⁰ conducted in 1972 involving three materials tested by six laboratories. Data from only four laboratories were used in calculating the values in these tables. Each test result was the mean of multiple individual determinations (Bruceton Staircase Procedure). Each laboratory obtained one test result for a material.

NOTE 8—The number of laboratories participating in the 1972 round robin and the number of results collected do not meet the minimum requirements of Practice E 691. Data in Tables 3 and 4 should be used only for guidance, and not as a referee when there is a dispute between users of this test method.

15.1.1 *Polymethylmethacrylate (PMMA)*—Specimens were cut from samples of 3.18-mm (0.125-in.) thickness extruded sheet.

15.1.2 *Styrene-Butadiene (SB)*—Specimens were cut from samples of 2.54-mm (0.100-in.) thickness extruded sheet.

15.1.3 *Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS)*—Specimens were cut from samples of 2.64-mm (0.104-in.) thickness extruded sheet.

NOTE 9—**Caution:** The following explanations of r and R (15.2-15.2.3) are only intended to present a meaningful way of considering the approximate precision of this test method. The data in Tables 3 and 4 should not be rigorously applied to acceptance or rejection of material, as those data are specific to the round robin and may not be representative of other lots, conditions, materials, or laboratories. Users of this test method should apply the principles outlined in Practice E 691 to generate data specific to their laboratory and materials, or between specific laboratories. The principles of 15.2-15.2.3 would then be valid for such data.

15.2 *Concept of r and R* —If V_r and V_R have been calculated from a large enough body of data, and for test results that were

¹⁰ Supporting data are available from ASTM Headquarters. Request RR:D 20-1030.

TABLE 3 Precision, Method FB

Material	Mean, J	Values Expressed as Percent of the Mean	
		V_r	r
Polymethyl Methacrylate (PMMA)	0.35	12.6	35.7
Styrene-Butadiene (SB) ^A	9.26	18.7	52.9
Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) ^A	11.8	14.9	42.2

^A Data generated in three laboratories.

V_r = within-laboratory coefficient of variation of the mean.
 $r = 2.83 V_r$.

TABLE 4 Precision, Method FC

Material	Mean, <i>J</i>	Values Expressed as Percent of the Mean	
		<i>V_r</i>	<i>r</i>
Polymethyl Methacrylate (PMMA)	1.33	4.13	11.7
Styrene-Butadiene (SB)	48.3	18.3	51.8

V_r = within-laboratory coefficient of variation of the mean.
r = 2.83 *V_r*.

means from testing multiple individual specimens (Bruceton Staircase Procedure), the following applies:

15.2.1 *Repeatability, r*—In comparing two test results for the same material obtained by the same operator using the same equipment on the same day, the two test results should be judged not equivalent if they differ by more than the *r* value for that material.

15.2.2 *Reproducibility, R*—In comparing two test results for the same material obtained by different operators using differ-

ent equipment in different laboratories, reproducibility statistics were not calculated because data from only four and three laboratories do not justify making these calculations.

15.2.3 Any judgment in accordance with 15.2.1 would have an approximate 95 % (0.95) probability of being correct.

15.3 *Bias*—There are no recognized standards by which to estimate bias of this test method.

15.4 Efforts to form a task group to address between laboratory reproducibility of this test method has been unsuccessful. Persons interested in participating in such a task group should contact ASTM Headquarters.

16. Keywords

16.1 dart impact; falling-mass impact; impact; impact resistance; mean-failure energy; mean-failure height; mean-failure mass; rigid plastic; tup

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. SAMPLE CALCULATIONS

Total Dart Mass, kg	Outcome of Test (X = failure; O = non failure)																				<i>n₁</i>	<i>n₂</i>	<i>n₁</i>	<i>n₂</i>		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					<i>n₁</i>	<i>n₂</i>
9.00						X															1	0	2	1	2	4
8.00					O		X		X			X		X							4	1	1	4	4	4
7.00		X		O				O		X		O		O		X		X		O	4	0	0	4	0	0
6.00	O		O								O						O		O		0	5				
Totals																					9	11		9	8	8
																					(<i>N₁</i>)	(<i>N₂</i>)		(<i>M</i>)	(<i>A</i>)	(<i>B</i>)

$w_0 = 7.00; N = N_1 = 9; d = 1.00$
 $w = w_0 + d(N/N - 0.5)$
 $= 7.00 + 1.00(9/9 - 0.5)$
 $= 7.17 \text{ kg}$
 $s = 1.620 \sqrt{[(1/9)(1.00)^2(9^2) + 0.125]}$
 $= 1.620 \sqrt{1.00(1.00 - 0.5^2) + 0.125}$
 $= 0.77 \text{ kg}$
 $s/d = 0.77/1.00 = 0.77; G = 1.035 \text{ (from Table X1.1)}$
 $s_w = Gs/\sqrt{N} = 1.035(0.77)/\sqrt{9} = 0.27 \text{ kg}$

TABLE X1.1 Values of G for Obtaining the Estimated Standard Deviation of the Mean

<i>s/d</i>	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.40						1.18	1.175	1.17	1.16	1.155
0.50	1.15	1.145	1.14	1.135	1.13	1.125	1.12	1.11	1.105	1.10
0.60	1.095	1.09	1.085	1.08	1.075	1.07	1.07	1.065	1.06	1.06
0.70	1.055	1.055	1.05	1.05	1.045	1.04	1.04	1.035	1.035	1.03
0.80	1.03	1.025	1.025	1.02	1.02	1.02	1.015	1.015	1.015	1.01
0.90	1.01	1.01	1.005	1.005	1.005	1.00	1.00	1.00	0.995	0.995
1.00	0.995	0.99	0.99	0.99	0.985	0.985	0.985	0.985	0.98	0.98
1.10	0.98	0.98	0.98	0.975	0.975	0.975	0.975	0.975	0.975	0.97
1.20	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.965	0.965	0.965	0.965
1.30	0.965	0.965	0.965	0.965	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96
1.40	0.96	0.96	0.96	0.955	0.955	0.955	0.955	0.955	0.955	0.955
1.50	0.955	0.955	0.955	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
1.60	0.95	0.95	0.95	0.95	0.945	0.945	0.945	0.945	0.945	0.945
1.70	0.945	0.945	0.945	0.945	0.945	0.945	0.94	0.94	0.94	0.94
1.80	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.94	0.935
1.90	0.935	0.935	0.935	0.935	0.935	0.935	0.935	0.935	0.935	0.935
2.00	0.935	0.935	0.935	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93

REFERENCES

- (1) Brownlee, K. A., Hodgest, J. L., Jr., and Rosenblatt, Murray, "The Up-and-Down Method with Small Samples," *American Statistical Association Journal*, Vol 48, 1953, pp. 262–277.
- (2) Hagan, R. S., Schmitz, J. V., and Davis, D. A., "Impact Testing of High Impact Thermoplastic Sheet," *Technical Papers, 17th Annual Technical Conference of SPE, SPPPB*, Vol VIII, January 1961.
- (3) "Test Method A—Falling Dart Impact, Proposed Method of Test for Impact Resistance of Fabricated Plastics Parts," *Proposed Test Methods for Plastics Parts Used in Appliances*, the Society of the Plastics Industry, New York, NY, January 1965.
- (4) Weaver, O. R., "Using Attributes to Measure a Continuous Variable in Impact Testing Plastic Bottles," *Materials Research and Standards, MR & S*, Vol 6, No. 6, June 1966, pp. 285–291.
- (5) Natrella, M. G., *Experimental Statistics*, National Bureau of Standards Handbook 91, October 1966, pp. 10–22 and 10–23.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

General information

Designation

Acrylonitrile Butadiene Styrene (High-impact, Injection Molding)

Tradenames

Abistir, Abscom, Absolac, Abstron, Accucomp, Alcom, Allen, Altech, Anjacom, Ashlene, Astalac, Badalac, Bulksam, Certene, Cevian, Cevian-V, Cheng, Claradex, Clariant, Colomx, Cycolac, Delta, Diamond, Dynacom, Edgetek, Electrafil, Elix, Encom, Epitec, Estadiene, Evosource, Excelloy, Ghaed, Hival, Hylac, Isopak, Jackdaw, Jamplast, Kaneka, Kralastic, Kumho, Kumhosunny, LNP Stat-Loy, Lustran, Magnum, Malecca, Micholac, Nefekhim, Next, Next Signature, Nexus, Nilac, Novakral, Novalloy-E, Novodur, Omnitech, Permastat, Plastube, Polmaxx, Polyabs, Poly-Elek, Polyac, Polylan, Polyman, Ponacom, Pryme, Radici, Ramshine, Retelan, Ronfalin, Rotec, Royalite, Santac, Sattler, Saxalac, Shinko-Lac, Sicoflex, Sindustris, Sinkral, Spartech, Starex, Styfac, Tairlac, Taitalac, Tarodur, Techno, Tenogel, Terez, Teruran, Toyolac, Trilac, Tynab, Tyre, Veroplas, ZGPC

Typical uses

Safety helmets, boat hulls, recreational vehicle bodies and parts, luggage, ski boots, insulated power tools, furniture, agricultural parts.

Composition overview

Compositional summary

Block terpolymer of acrylonitrile (15-35%), butadiene (5-30%), and styrene (40-60%).

Material family	Plastic (thermoplastic, amorphous)
Base material	ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)
Polymer code	ABS

Composition detail (polymers and natural materials)

Polymer	100	%

Price

Price	* 2,7	- 3,24	USD/kg
Price per unit volume	* 2,73e3	- 3,4e3	USD/m ³

Physical properties

Density	1,01e3	- 1,05e3	kg/m ³
---------	--------	----------	-------------------

Mechanical properties

Young's modulus	1,1	- 2,41	GPa
Specific stiffness	1,07	- 2,34	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	18,5	- 40,7	MPa
Tensile strength	30,3	- 43,4	MPa
Specific strength	18	- 39,5	kN.m/kg
Elongation	5	- 75	% strain
Compressive modulus	0,963	- 2,06	GPa
Compressive strength	* 31	- 55,2	MPa
Flexural modulus	1,23	- 2,56	GPa
Flexural strength (modulus of rupture)	37,2	- 75,8	MPa
Shear modulus	* 0,366	- 0,856	GPa

Bulk modulus	* 2,77	- 2,91	GPa
Poisson's ratio	0,399	- 0,419	
Shape factor	5,9		
Hardness - Vickers	* 6	- 12	HV
Hardness - Rockwell M	* 56	- 62	
Hardness - Rockwell R	85	- 108	
Elastic stored energy (springs)	111	- 481	kJ/m ³
Fatigue strength at 10 ⁷ cycles	* 12,1	- 17,4	MPa

Impact & fracture properties

Fracture toughness	* 1,19	- 3,56	MPa.m ^{0.5}
Toughness (G)	1,02	- 6,59	kJ/m ²
Impact strength, notched 23 °C	25,3	- 45,3	kJ/m ²
Impact strength, notched -30 °C	9,93	- 25,7	kJ/m ²
Impact strength, unnotched 23 °C	590	- 600	kJ/m ²
Impact strength, unnotched -30 °C	120	- 144	kJ/m ²

Thermal properties

Glass temperature	91	- 110	°C
Heat deflection temperature 0.45MPa	99	- 107	°C
Heat deflection temperature 1.8MPa	89	- 102	°C
Maximum service temperature	63	- 77	°C
Minimum service temperature	-45	- -35	°C
Thermal conductivity	0,19	- 0,21	W/m.°C
Specific heat capacity	1,39e3	- 1,41e3	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	171	- 198	µstrain/°C
Thermal shock resistance	54,3	- 154	°C
Thermal distortion resistance	* 9,94e-4	- 0,00119	MW/m

Electrical properties

Electrical resistivity	3,3e21	- 3e22	µohm.cm
Electrical conductivity	5,75e-21	- 5,22e-20	%ACS
Dielectric constant (relative permittivity)	2,8	- 3,2	
Dissipation factor (dielectric loss tangent)	0,005	- 0,007	
Dielectric strength (dielectric breakdown)	13,8	- 19,7	MV/m
Comparative tracking index	400	- 600	V

Magnetic properties

Magnetic type	Non-magnetic
---------------	--------------

Optical, aesthetic and acoustic properties

Transparency	Opaque	
Acoustic velocity	1,01e3 - 1,56e3	m/s
Mechanical loss coefficient (tan delta)	* 0,0166 - 0,0388	

Healthcare & food

Food contact	Yes
--------------	-----

Restricted substances risk indicators

RoHS (EU) compliant grades?	✓
REACH Candidate List indicator (0-1, 1 = high risk)	0,02
Notes: May contain restricted (w%): UV-stabilizer up to 2%	
SIN List indicator (0-1, 1 = high risk)	0,03
Notes: May contain restricted (w%): Anti-oxidant up to 1%, UV stabilizer up to 2%	

Critical materials risk

Contains >5wt% critical elements?	No
-----------------------------------	----

Absorption & permeability

Water absorption @ 24 hrs	0,2	-	0,45	%
Water vapor transmission	2,04	-	3,2	g.mm/m ² .day
Permeability (O2)	47,3	-	78,5	cm ³ .mm/m ² .day.atm

Processing properties

Polymer injection molding	Excellent			
Polymer extrusion	Excellent			
Polymer thermoforming	Excellent			
Linear mold shrinkage	0,4	-	0,9	%
Melt temperature	153	-	274	°C
Mold temperature	50	-	70	°C
Molding pressure range	55	-	172	MPa

Durability

Water (fresh)	Excellent
Water (salt)	Excellent
Weak acids	Excellent
Strong acids	Limited use
Weak alkalis	Acceptable
Strong alkalis	Excellent
Organic solvents	Unacceptable
Oxidation at 500C	Unacceptable
UV radiation (sunlight)	Poor
Flammability	Highly flammable

Primary production energy, CO2 and water

Embodied energy, primary production	87,7	-	96,7	MJ/kg
Sources: 92,3 MJ/kg (PlasticsEurope, 2015)				
CO2 footprint, primary production	3,27	-	3,61	kg/kg
Sources:				

3.32 kg/kg (Kenna et al. 2005); 3.75 kg/kg (Hammond and Jones, 2008); 3.1 kg/kg (PlasticEurope)

Water usage	* 167	- 185	l/kg
-------------	-------	-------	------

Processing energy, CO2 footprint & water

Polymer extrusion energy	* 5,77	- 6,37	MJ/kg
Polymer extrusion CO2	* 0,432	- 0,478	kg/kg
Polymer extrusion water	* 4,8	- 7,21	l/kg
Polymer molding energy	* 17,1	- 18,9	MJ/kg
Polymer molding CO2	* 1,26	- 1,42	kg/kg
Polymer molding water	* 11,9	- 17,9	l/kg
Coarse machining energy (per unit wt removed)	* 0,857	- 0,947	MJ/kg
Coarse machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,0642	- 0,071	kg/kg
Fine machining energy (per unit wt removed)	* 4,29	- 4,74	MJ/kg
Fine machining CO2 (per unit wt removed)	* 0,322	- 0,358	kg/kg
Grinding energy (per unit wt removed)	* 8,11	- 8,96	MJ/kg
Grinding CO2 (per unit wt removed)	* 0,608	- 0,672	kg/kg

Recycling and end of life

Recycle	✓		
Embodied energy, recycling	* 30,7	- 34	MJ/kg
CO2 footprint, recycling	* 1,17	- 1,29	kg/kg
Recycle fraction in current supply	3,8	- 4,2	%
Downcycle	✓		
Combust for energy recovery	✓		
Heat of combustion (net)	* 37,6	- 39,5	MJ/kg
Combustion CO2	* 3,06	- 3,22	kg/kg
Landfill	✓		
Biodegrade	✗		

Geo-economic data for principal component

Principal component	ABS		
Annual world production, principal component	8,07e6		tonne/yr
Reserves, principal component	7,13e7	- 7,68e7	tonne

Notes
Warning

HDT 1.8 and 0.45 are for annealed

Enlaces

ProcessUniverse	
Producers	
Reference	
Shape	

ANEXO I: Proforma parachoques delantero soporte barra frontal Chevrolet Aveo 2010



AUTOMOTORES CONTINENTAL
La casa Chevrolet

PROFORMA DE REPUESTOS
CONTRIBUYENTE ESPECIAL
RUC: 1780005280001

Página 1 de 1

ESTA NO ES UNA FACTURA

Agencia	Mall de los Andes	Nro. Proforma	3214567	
Nombre	Henry Morayón	Fecha	11/01/2024	
Dirección	La Magdalena	Vendedor	Juan Alvarez	
Identificación	1804604038			
Teléfono	0981441295			

R ⁿ de Parte	Descripción	Cantidad Solicitada	Cantidad Disponible	Un. Desc.	Precio Venta	Descuento	Precio Final
	Parachoques delantero/soporte barra frontal	1.00	0.00	0.00	115	0.00	115
						Subtotal	115
						Descuento	-0.00
						Impuesto	115
						IVA	16.2
						Total	146.2

Net: 146.20

LAS VEGAS: Av. 70 de Agosto 845-250 y Av. Américas (Bypass a Lata) P.O. BOX 2418030 - 240710 FAX 2907 888
 EL RECREO: Av. Mariscal Sucre y Morazanito Jumbo S.C.C. El Recreo P.O. BOX 2907 301 - 241 000 FAX 2418030
 PANDEMONTE: Av. Cero Puntos Lata No. 2479 TEL: 02473940
 CUMBAYA: Av. Ciudad Guayaquil (DEF. 478 y Calle C La del Estado) P.O. BOX 2408012 - 4
 BARRAS VIEJAS (ERDE): Av. Marco Velasco 057 400 y Marginal 400 P.O. BOX 2410030 - 240710
 MANA: Maná