

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES
COMPUESTOS, CON MATRICES
TERMOESTABLES Y REFUERZO PARTICULADO
DE RESIDUOS DE LADRILLO H10**

JORGE ANTONIO VELASCO PARRA

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA
E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, DICIEMBRE 10 DE 2019**

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES COMPUESTOS, CON MATRICES TERMOESTABLES Y REFUERZO PARTICULADO DE RESIDUOS DE LADRILLO H10

JORGE ANTONIO VELASCO PARRA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Director:

BLADIMIR A. RAMÓN VALENCIA

Doctor en Ingeniería de Materiales

Email:

hbladimir@unipamplona.edu.co

Codirector:

WILLIAM J. MORA ESPINOSA

Magister en Ingeniería Ambiental

Email:

william.mora2@unipamplona.edu.co



**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA, MECATRÓNICA
E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, DICIEMBRE 10 DE 2019**

DEDICATORIA

¡A mi querida madre, Candida Parra Villamizar!

Has sido el motor que ha impulsado la maquinaria de mi vida. Nunca dejaré de agradecerle a Dios por el regalo más grande que me ha dado: ser tu hijo.

¡A mi padre, Daniel Velasco!

Espero que desde el cielo estés viendo este logro y te sientas muy orgulloso de mí. Siempre estarás en mi corazón.

¡A mi amada Nanny!

Dicen que el momento más oscuro de la noche es justo antes del amanecer. Gracias por estar a mi lado en el ocaso, la noche y el crepúsculo de mi amanecer.

¡A mis hermanos, Patricia, Daniel y Andrés!

Sin su apoyo, su paciencia y su cariño, no estaría en este punto tan importante de mi vida. Mil gracias por todo lo que han hecho por mí.

¡A mis padrinos y Oscar!

Han sido como unos segundos padres para mí y mi primo Oscar como un hermano. Don Julito, doña María y Oscarín, los quiero muchísimo.

¡A mi nonita Amalia, mi tía viky y mi tata!

Las quiero mucho señoritas, son una parte muy especial de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi alma mater, la Universidad de Pamplona, por el recibimiento y por todos los años que me permitieron hacer parte de ella.

Gracias a mi mentor y gran amigo, Bladimir Ramón Valencia, por todo el apoyo brindado, por su confianza, por las oportunidades, por su conocimiento, y por ver y creer en mi potencial. Espero que podamos continuar trabajando y creciendo de manera paralela.

Gracias a todos los integrantes del Semillero de Investigación en Materiales y Procesos de Manufactura, por el desarrollo profesional que he tenido junto a ustedes y todos los objetivos cumplidos.

Gracias a los docentes del Grupo de Investigación en Ingeniería Mecánica (GIMUP), Elkin Flórez, Gonzalo Moreno, Juan Carlos Serrano, Rafael Bolívar, Luz Karime, Albert Miller y Simón Figueroa, por permitirme hacer parte de ese gran equipo de trabajo, por brindarme su amistad y todo su conocimiento.

A mis amigos de carrera y de la vida, Ancizar Rozero, Yezid Flórez, Carlos Pinzón, Jesús Olivo, Daniel Quintana, Manuel Contreras, Yeixon Daniel Jaimes y Cristian Pabón, por el crecimiento profesional y personal, y por todas las aventuras que hemos vivido. ¡Son unos cracks!

A todos los docentes del programa de ingeniería mecánica, William Mora, Edison Martínez, Holger Cagua, Maite Velasco, José Manuel Ramírez, Neyl Richard, Elkin Mora, Félix Ortiz, Jonathan Pabón y Adrián Patiño. Gracias por todos sus aportes personales y profesionales.

A la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad de Pamplona, por todo el apoyo brindado al presente proyecto de investigación, durante su trayectoria departamental, nacional e internacional, en eventos de semilleros de investigación.

A todos los laboratoristas y chicos becatrabajo del programa de ingeniería mecánica, por su colaboración en el desarrollo del tamizado de los residuos, los ensayos destructivos y el análisis en ingeniería computacional.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	10
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	11
CAPÍTULO 2: ESTADO ACTUAL	13
2-1 MATERIALES COMPUESTOS	13
2-1-1 Clasificación de los materiales compuestos	13
2-1-2 Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC).....	13
2-1-3 Moldeo por colado de matrices poliméricas	15
2-1-4 Materiales compuestos reforzados con partículas (PRC).....	15
2-2 LADRILLOS DE ARCILLA SINTERIZADA	16
2-2-1 Arcilla.....	16
2-2-2 Sinterización de la arcilla	17
2-2-3 Ladrillo H10.....	17
2-3 INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR	18
2-3-1 Método de elementos finitos	19
2-4 ANTECEDENTES	20
CAPÍTULO 3: OBJETIVOS	22
3-1 OBJETIVO GENERAL	22
3-2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	23
4-1 MATERIALES	23
4-1-1 Resina poliéster P-2002.....	23
4-1-2 Sistema bioepoxi Super Sap® CLR.....	24
4-1-3 Polvo de arcilla sinterizada	25
4-2 FABRICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	27
4-3 ENSAYOS DESTRUCTIVOS DE CARACTERIZACIÓN	28
4-3-1 Ensayo de tracción	28
4-3-2 Ensayo de flexión.....	30

4-4	SIMULACIÓN DE LA LEVA DE FRENO DE MOTOCICLETA	31
4-5	MANUFACTURA DEL PROTOTIPO	32
4-5-1	Diseño y manufactura del molde.....	33
4-5-2	Ensamblaje del molde y colado del material compuesto	33
4-5-3	Desmolde y montaje de la leva de freno	34
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		35
5-1	DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA ARCILLA SINTERIZDA.....	35
5-2	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A TRACCIÓN.....	36
5-3	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A FLEXIÓN	37
5-3	VALIDACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	39
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES		42
REFERENCIAS		44
ANEXOS		49
Anexo 1:	Ficha Técnica de la resina poliéster P-2002.	49
Anexo 2:	Ficha de seguridad del sistema bioepoxi Super Sap CLR.	49
Anexo 3:	Ficha de seguridad del endurecedor Super Sap CLF Hardener.	49
Anexo 4:	Leva de freno original.....	49
Anexo 5:	Leva de freno modificación 1.....	49
Anexo 6:	Leva de freno modificación 2.....	49
Anexo 7:	Leva de freno modificación 3.....	49
Anexo 8:	Ensamble del molde para la leva de freno.	49
Anexo 9:	Ensayos de tracción.	49
Anexo 10:	Resultados de tracción unificados.....	49
Anexo 11:	Ensayos de flexión.	49
Anexo 12:	Resultados de flexión unificados.	49
Anexo 13:	Simulaciones en ANSYS.	49

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación entre el contenido químico de la corteza terrestre y la arcilla roja común.....	16
Tabla 2. Dimensiones del ladrillo H10 en las empresas de Cúcuta y su área metropolitana.....	18
Tabla 3. Especificaciones generales de la resina P-2002 en estado de suministro.	23
Tabla 4. Composición e información sobre los ingredientes del sistema bioepoxi Super Sap® CLR.....	24
Tabla 5. Composición e información sobre los ingredientes del endurecedor Super Sap® CLF.....	25
Tabla 6. Clasificación de las muestras de tamaños de partícula.....	26
Tabla 7. Dimensiones de la probeta para ensayos de tracción.....	29
Tabla 8. Simulaciones ejecutadas en ANSYS.....	32
Tabla 9. Comparativa de los resultados del ensayo de tracción.....	36
Tabla 10. Comparativa de los resultados del ensayo de flexión.....	38
Tabla 11. Resultados cuantitativos de las simulaciones.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de los materiales compuestos.	13
Figura 2. Colado en molde abierto.....	15
Figura 3. Dimensiones del ladrillo H10.	17
Figura 4. División de un cilindro en elementos: (a) tetraédricos. (b) hexaédricos. (c) prismáticos triangulares.	20
Figura 5. Resina poliéster P-2002: (a) Presentación. (b) Aspecto de la resina y el catalizador.	23
Figura 6. Sistema bioepoxi Super Sap® CLR: (a) Presentación. (b) Aspecto de la resina y el endurecedor.	24
Figura 7. Esquema del proceso de reducción de tamaño de los fragmentos de ladrillo H10: (a) Fragmentos recolectados. (b) Fragmentos reducidos manualmente. (c) Colocación en el molino de bolas. (d) Reducción en el molino de bolas. (e) Polvo grueso de arcilla sinterizada. (f) Tamizado de fragmentos grandes. (g) Muestra para el ensayo granulométrico. (h) Colocación de los tamices. (i) Tamizado mecánico. (j) Clasificación de las muestras.	26
Figura 8. Esquema del proceso de moldeo por colado de los materiales: (a) Agitación y calentamiento de la resina. (b) Adición y mezcla del polvo de arcilla sinterizada. (c) Colado del material en el molde.	28
Figura 9. Dimensiones de la probeta Tipo I.	28
Figura 10. Especímenes utilizados para el ensayo de tracción: (a) Resina poliéster. (b) RP-AS. (c) Resina bioepoxi. (d) RBE-AS.	29
Figura 11. Especímenes utilizados para el ensayo de flexión: (a) Resina poliéster. (b) RP-AS. (c) Resina bioepoxi. (d) RBE-AS.	30
Figura 12. Esquema del proceso de simulación y optimización de la leva de freno: (a) Paso 1 - pieza real. (b) Paso 2 - CAD de la geometría. (c) Paso 3 - mallado de la pieza. (d) Paso 4 - condiciones reales de funcionamiento. (e) Paso 5 - resultados de la simulación. (f) Paso 6 - geometría validada computacionalmente.	31
Figura 13. Diseño del molde en Solidworks.	33

Figura 14. Fabricación de la leva de freno: (a) Ensamblaje y preparación del molde. (b) Colado del material compuesto.....	34
Figura 15. Montaje de la leva de freno: (a) Pieza desmoldada. (b) Ajuste de la pieza. (c) Acercamiento a la bomba de inyección del líquido de frenos. (d) Ensamblaje completo de la leva de freno.....	34
Figura 16. Distribución granulométrica de la arcilla sinterizada.	35
Figura 17. Comparación del comportamiento mecánico a tracción.....	37
Figura 18. Comparación del comportamiento mecánico a flexión.	38
Figura 19. Resultados cualitativos de las simulaciones: (a) Simulación 1. (b) Simulación 2. (c) Simulación 3. (d) Simulación 4. (e) Simulación 5.....	41



RESUMEN

En el presente proyecto, se recolectaron fragmentos de ladrillo desechados en los depósitos de materiales del municipio de Pamplona, con el fin de procesarlos para obtener partículas micrométricas de arcilla sinterizada. Posteriormente, se mezcló un 10% en peso de partículas de la arcilla sinterizada con tamaño inferior a 75 μm , con dos diferentes resinas termoestables, para obtener materiales compuestos mediante la técnica de moldeo por colado: resina poliéster con arcilla sinterizada y resina bioepoxi con arcilla sinterizada.

Luego, se obtuvieron probetas normalizadas para ejecutar ensayos de tracción y flexión, bajo las condiciones de las normas ASTM D638 y ASTM D790, respectivamente. Los resultados mostraron un comportamiento elástico lineal para ambos materiales compuestos y las resinas termoestables sin refuerzo. Además, los ensayos de tracción, mostraron un aumento en las propiedades mecánicas de este tipo, al adicionar el refuerzo particulado propuesto. Asimismo, los mejores resultados fueron obtenidos por el material compuesto de resina poliéster reforzada con arcilla sinterizada.

De acuerdo a los resultados de los ensayos destructivos, se propusieron cinco escenarios de simulación, para una leva de freno de motocicleta tipo sport-turismo. Se partió desde la geometría original y el material tradicional, hasta el planteamiento de una metodología de optimización de la geometría para validar computacionalmente el uso del material compuesto que obtuvo los mejores resultados en las pruebas mecánicas.

Por último, se manufacturó un prototipo de la leva con la geometría validada computacionalmente y el material compuesto de resina poliéster con arcilla sinterizada, mediante el proceso de moldeo por colado. Este prototipo se ensambló en el manubrio de la motocicleta y cumplió con cada una de las funciones que debía desempeñar, de manera correcta.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El campo de aplicación de los materiales compuestos con matriz polimérica presenta un crecimiento exponencial junto con las expectativas exorbitantes de los clientes [1]. Esto se debe principalmente a sus propiedades mejoradas que le proporcionan un rendimiento superior en cuanto a resistencia específica, tenacidad, rigidez, resistencia a la corrosión, y resistencia a ataques químicos [2, 3]. Además, los métodos de fabricación de este tipo de material compuesto proporcionan líneas de producción con baja complejidad y mayor rentabilidad, en comparación con los procesos de manufactura de los materiales tradicionales [4].

Por un lado, las resinas termoestables son un componente muy importante en una extensa gama de aplicaciones en campos de fabricación, como: plastificantes, recubrimientos, adhesivos, electrónica, construcción de viviendas, y en matrices de materiales compuestos. Sin embargo, la mayoría de resinas utilizan el petróleo como materia prima, incluyendo a las epóxicas y los poliésteres insaturados [5, 6]. Por lo anterior, estas resinas no son biodegradables, tienen riesgo de ocasionar emisiones peligrosas, en 50-60 años ya no podrán ser sintetizadas debido a la escasez de petróleo, y sus productos derivados son muy difíciles de gestionar o reciclar, permaneciendo por décadas en vertederos [7, 8].

En consecuencia, las resinas termoestables alternativas y ecológicas, a partir de recursos renovables, han abarcado la atención de los investigadores y surgen como un sustituto viable para los polímeros a base de productos petroquímicos [7]. En el caso particular de esta investigación, una de las finalidades es comparar a dos resinas termoestables comerciales (una tradicional y otra biodegradable): la resina poliéster P-2002 de Industria de Resinas SAS, y el sistema bioepoxi SUPER SAP® CLR de Entropy Resins.

Por otro lado, con la aceleración de la construcción urbana y la mejora de edificaciones, se han producido grandes cantidades de residuos de ladrillo de arcilla, el cual es considerado como el segundo material de construcción más utilizado después del concreto. Este producto se trata como desecho, desde las piezas que no cumplen con los estándares de calidad al final de la línea de producción, hasta los fragmentos recolectados en las actividades de construcción y demolición [9, 10]. Como resultado, se producen millones de toneladas de este residuo, que representan un grave problema ambiental debido a que su disposición se realiza en campos al aire libre, ocasionando contaminación por acumulación y problemas de dispersión de residuos particulados [11].

Por consiguiente, es de gran importancia explorar el potencial del reciclaje y reutilización de los desechos de ladrillos, no solo porque se considere una alternativa ecológica, sino

porque ayuda a disminuir la dependencia de las materias primas naturales, los efectos perjudiciales para el medio ambiente y la alta cantidad de desechos. Asimismo, esto impulsa el desarrollo sostenible en la industria de la construcción de la región de Norte de Santander. Es por esto, que la presente investigación tiene como fin, proponer el uso de partículas micrométricas de arcilla sinterizada, obtenidas a partir de la recolección y procesamiento de los fragmentos de ladrillo H10 acumulados en los depósitos de materiales del municipio de Pamplona, como refuerzo de materiales compuestos de matriz polimérica termoestable.

Para tal fin, se recolectaron los fragmentos de ladrillo H10 del depósito de materiales La Flecha, ubicado en el municipio de Pamplona, Norte de Santander. Subsecuentemente, se ejecutó una reducción del tamaño de los residuos recolectados, hasta obtener el polvo de arcilla sinterizada con el tamaño de grano requerido.

En el siguiente paso, se usó la técnica de moldeo por colado para fabricar láminas de dos materiales compuestos: resina P-2002 y resina bioepoxi SUPER SAP® CLR, con 10% en peso de refuerzo particulado de arcilla sinterizada con tamaño inferior a 75 μm , respectivamente. Para ambos casos, se siguieron las recomendaciones de los fabricantes en cuanto al tiempo de reticulación de la matriz, el cual fue de siete días antes de realizar ensayos destructivos.

Posteriormente, se obtuvieron cinco probetas de cada material, de acuerdo con las dimensiones que exige la norma ASTM para cada ensayo destructivo. Luego se ejecutaron las pruebas de tracción y flexión, bajo las condiciones de las normas ASTM D638 y ASTM D790, respectivamente. Como resultado, se obtuvieron los datos relevantes de cada material y se realizó un análisis comparativo, con el propósito de determinar la influencia del tipo de matriz y el refuerzo propuesto, en las propiedades mecánicas del material compuesto desarrollado.

Luego, se llevaron a cabo simulaciones estructurales a una leva de freno de motocicleta tipo sport-turismo, por medio del método de elementos finitos, con ayuda del software ANSYS R16. En primer lugar, se realizó el diseño virtual de la leva original, con ayuda del software Solidworks 2018-2019. Después, se realizó el modelado de la geometría en ANSYS R16, asignando las propiedades mecánicas obtenidas en los ensayos destructivos y las condiciones reales de funcionamiento de la pieza. Fue necesario realizar modificaciones en la geometría, con el fin de validar el uso del material compuesto desarrollado, en la fabricación de la leva de freno de motocicleta.

Por último, se manufacturó un prototipo de la leva de freno modificada y validada computacionalmente. Para esto, se diseñó el molde la pieza en Solidworks, y posteriormente se cortó a laser, con el fin de proporcionar la precisión geometría deseada. El moldeo por colado de la pieza fue realizado con las mismas condiciones de fabricación del material compuesto en estudio. Finalmente, se obtuvo el prototipo de la leva de freno, el cual fue ensamblado de manera correcta, cumpliendo con el posicionamiento y funcionalidad dentro del manubrio de la motocicleta.

CAPÍTULO 2

ESTADO ACTUAL

2-1 MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos son aquellos que están constituidos por dos o más fases, diferentes química y físicamente, separadas por una interfaz. Estos materiales logran la mayoría de sus propiedades beneficiosas, gracias a una fuerte unión entre una fase continua llamada “matriz” y una fase dispersa denominada “refuerzo”, a fin de obtener una combinación de características que sus constituyentes no pueden lograr por si solos [12].

2-1-1 Clasificación de los materiales compuestos

En la Fig. 1 se observa la clasificación general de los materiales compuestos. Por un lado, se clasifican según la naturaleza de su matriz, que puede tener como base a un polímero, un cerámico o un metal. Por otra parte, se clasifican según la forma del refuerzo, que de manera habitual se presenta en fibras largas, cortas o tejidas, en forma de partículas o plaquetas, y en forma de láminas o capas que conforman a los llamados “materiales compuestos tipo sándwich” [13].

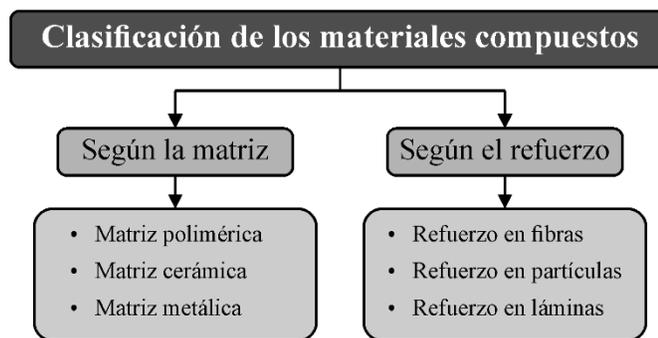


Figura 1. Clasificación de los materiales compuestos.

Fuente: Adaptado de [14].

2-1-2 Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC)

Los materiales compuestos de matriz polimérica o PMC (polymer matrix composite), consisten en una matriz de tipo termoplástica o termoestable, combinada con uno o más refuerzos, como el carbono, vidrio, acero, fibras naturales o partículas cerámicas [15]. Cabe destacar que los polímeros termoestables forman densas redes tridimensionales reticuladas

tras la polimerización y que se degradan con la temperatura; como resultado, no se pueden remodelar, unir o reciclar fácilmente como sus contrapartes termoplásticas [16].

Sin embargo, la alta viscosidad de fusión de las matrices termoplásticas ha sido una limitación importante, ya que requiere técnicas de procesamiento de alto costo en donde se utilizan altas temperaturas y presiones elevadas para obtener viscosidades de infiltración y una consolidación óptima. Por el contrario, las matrices termoestables poseen viscosidades inherentemente bajas, lo que las hace ideales para el procesamiento de bajo costo [16]. Como ejemplo de los polímeros termoestables más importantes, tenemos:

- **Resina poliéster:** La resina poliéster es un polímero termoestable lineal, basado en ácidos/anhídridos y dioles insaturados y saturados, disueltos en monómeros de vinilo insaturado como el estireno [17]. Generalmente, es necesario iniciar una reacción exotérmica de curado radical de la mezcla de pre-polímero. En esta mezcla, las cadenas de poliéster insaturado son endurecidas con ayuda de un agente catalizador, para formar una estructura tridimensional por reticulación con el monómero. Para este tipo de resinas, es muy común el uso de una solución al 50% de MEK peróxido (methyl ethyl ketone) como iniciador del proceso de polimerización [18, 19].
- **Resina epoxi:** La resina epoxi se encuentra dentro de los materiales reticulables, que poseen el mismo tipo de grupo funcional reactivo (epoxi u oxirano). El grupo epoxi es un éter cíclico formado por un átomo de oxígeno unido a dos átomos de carbono por medio de un enlace covalente, y se caracteriza por su reactividad hacia especies nucleófilas y electrófilas, que lo hacen receptivo a una amplia gama de reactivos o agentes de curado. Estos agentes de curado pueden ser de dos tipos: catalizadores o endurecedores. Los catalizadores se extraen de aminas terciarias o ácidos de Lewis, y funcionan iniciando la polimerización iónica del compuesto epoxi para producir estructuras poliéter. A menudo, se usan en asociación con endurecedores a base de aminas alifáticas y aromáticas, y anhídridos carboxílicos, en formulaciones de resina. Estos endurecedores son los que reaccionan directamente con el epoxi, para finalmente producir la resina termoestable curada, con su respectiva red espacial o estructura química tridimensional [20].
- **Resinas biodegradables:** Las resinas biodegradables se originan gracias a la investigación en el área de materiales poliméricos a base de fuentes renovables no contaminantes. Los aceites vegetales han dado resultados muy prometedores para la síntesis de estas resinas, debido a sus características de ser naturales, renovables, biodegradables, de bajo costo, y una relativa facilidad para ser modificados químicamente. En general, los aceites vegetales, también llamados triglicéridos o triésteres, consisten en ácidos grasos unidos a una unidad de glicerol, en donde algunos tipos presentan grupos epóxicos o hidroxilos (aceite de vernonia y de castor, respectivamente). Asimismo, los triglicéridos tienen diferentes grupos funcionales que pueden emplearse para desarrollar polímeros. Como ejemplo, el aceite de soya epoxidado-acrilatado es un producto comercial listo para utilizarse en la preparación

de polímeros y copolímeros mediante reacciones de polimerización en cadena, principalmente por radicales libres. Cabe destacar, que ya se han sintetizado resinas termoestables a base de aceite de soya, que en combinación con fibras naturales de relleno, se emplean actualmente en Estados Unidos de América en techos y en paneles estructurales [21].

En definitiva, la naturaleza termoestable de la matriz polimérica permite crear productos versátiles y rentables, con diversos procedimientos de fabricación. Asimismo, ofrecen una amplia variedad de propiedades importantes, como: bajo peso, alta resistencia específica, excelentes al impacto, compresión, procesos rentables de producción, excelente resistencia química y a la corrosión, alta disponibilidad, y buenas características mecánicas [15].

2-1-3 Moldeo por colado de matrices poliméricas

En la conformación de polímeros, el moldeo por colado o fundición, involucra verter una resina líquida a un molde (ver Fig. 2), para que con ayuda de la gravedad se llene la cavidad, y finalmente que el polímero se endurezca. Tanto los termoplásticos como los termoestables, se pueden colar. No obstante, los sistemas termoendurecibles deben tener reacciones de reticulación lentas, para permitir que el material fundido ocupe por completo el espacio vacío del molde, que para este caso deberá estar a temperatura ambiente [13].

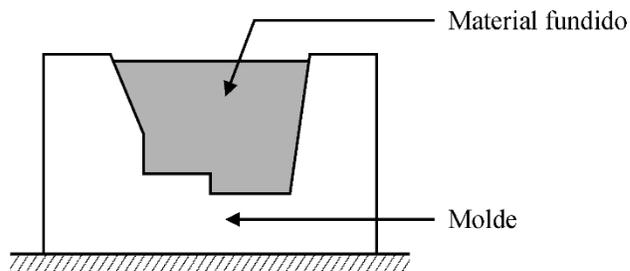


Figura 2. Colado en molde abierto.

Fuente: Adaptado de [13].

2-1-4 Materiales compuestos reforzados con partículas (PRC)

Los materiales compuestos reforzados con partículas o PRC (particle-reinforced composite), cubren una amplia gama de materiales existentes, debido a las diversas combinaciones de partículas y matrices. En este tipo de materiales, las partículas actúan como soporte de las cargas y en conjunto con la matriz, se trata de aprovechar las mejores propiedades de cada uno y minimizar las debilidades. Por otro lado, es muy común que los refuerzos induzcan anisotropía a los materiales compuestos. Sin embargo, en la situación de partículas incrustadas en una matriz isotrópica, se presenta la gran ventaja de obtener como resultado un comportamiento isotrópico, a nivel macroscópico [22]

Los PRC abarcan principalmente al hormigón y los compuestos poliméricos (partículas no metálicas en una matriz no metálica), y a los materiales compuestos con matriz metálica (partículas no metálicas en una matriz metálica), así como diversos procesos de fabricación que incluyen los procesos de agitación manual o magnética, la metalurgia de polvos, la solidificación eutéctica, entre otros [23].

2-2 LADRILLOS DE ARCILLA SINTERIZADA

A lo largo de los años, el ladrillo ha adquirido importancia como un material indispensable en la construcción, y es el segundo producto más utilizado en esta industria, solo por debajo del concreto. La arcilla es la principal materia prima en la elaboración de estas piezas de mampostería, y es un material natural con plasticidad, que en presencia de agua, permite ser moldeado para posteriormente adquirir una dureza que aumenta considerablemente después del proceso de sinterización [24].

2-2-1 Arcilla

La arcilla, en su estado natural, está compuesta de uno o varios minerales arcillosos. En esencia, los minerales de arcilla son silicatos de aluminio, que también presentan óxidos hidratados, álcalis y materiales coloidales. Este material está presente en la naturaleza, y se deriva directamente de la degradación natural de las rocas ígneas o de los feldespatos o en depósitos aluviales o eólicos. Es por esto que la composición química de la corteza terrestre y de la mayoría de las arcillas, es muy similar (ver Tabla 1) [25].

Cabe destacar, que los contenidos de sílice (SiO_2) y de alúmina (Al_2O_3), son los más altos dentro de la composición de estos minerales, y que a excepción del agua (H_2O), el resto de componentes involucra las impurezas que siempre están presentes. De hecho, el contenido químico de los diferentes tipos de arcilla puede variar considerablemente, como consecuencia de las condiciones con las cuales se formó la roca ígnea de la que proviene [25].

Tabla 1. Comparación entre el contenido químico de la corteza terrestre y la arcilla roja común.

Componente	Corteza Terrestre [%]	Arcilla Roja Común [%]
SiO_2	59.14	57.02
Al_2O_3	15.34	19.15
Fe_2O_3	6.88	6.70
MgO	3.49	3.08
CaO	5.08	4.26
Na_2O	3.84	2.38
K_2O	3.13	2.03
H_2O	1.15	3.45
TiO_2	1.05	0.91

Fuente: Adaptado de [25].

2-2-2 Sinterización de la arcilla

La sinterización es un proceso de fabricación de piezas sólidas moldeadas, que consiste en una mezcla homogénea de polvos cerámicos. Esta mezcla es sometida a un tratamiento térmico con una tasa de calentamiento, hasta un valor por debajo de la temperatura de fusión, obteniendo como resultado una pieza consolidada y compacta. Para el caso particular de la arcilla, la sinterización provoca una serie de transformaciones, que va desde la deshidratación (paso inicial del cambio), hasta la aparición de una fase vítrea que constituye el fin del proceso [26].

En síntesis, inicialmente se presenta una pérdida de agua en la mezcla, seguida por la deshidroxilación, la destrucción de la estructura cristalina y la formación de nuevas fases cristalinas. Estas alteraciones, de descomposición y formación, traen consigo la aparición de un sólido policristalino con una matriz amorfa y vítrea. Ciertamente, las fases iniciales de cocción son un producto claro de la materia original, pero si el calentamiento continúa, las nuevas fases que aparecen son ya un reflejo de los elementos químicos presentes en los componentes mineralógicos [26].

2-2-3 Ladrillo H10

El ladrillo H10 es un bloque con seis huecos rectangulares en dirección horizontal, fabricados por extrusión y por medio del proceso de sinterización de la arcilla. Su función principal es soportar cargas uniaxiales de fuerza perpendicular al área portante, y se emplea como mampostería en obras civiles. Las propiedades de este producto están estandarizadas en Colombia, por la norma NTC 4205-2, que incluye a las unidades de mampostería no estructural de arcilla cocida [27].

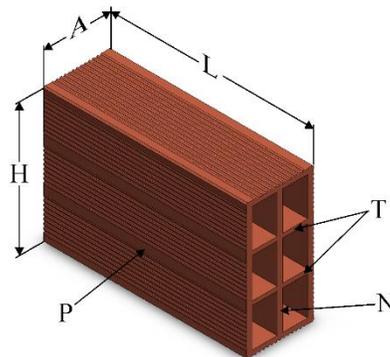


Figura 3. Dimensiones del ladrillo H10.

Fuente: Adaptado de [28].

En la Fig. 3 se muestran las medidas estándar del ladrillo H10, en donde: L es el largo, A es el ancho, H es el alto, P es el espesor más pequeño de las paredes, T es el espesor más pequeño de los tabiques, y N es el espesor del nervio. En la Tabla 2, se observan los valores de las dimensiones del ladrillo H10, fabricado por treinta empresas de la ciudad de Cúcuta

y su área metropolitana, cuyos productos cerámicos son distribuidos a lo largo de toda la región de Norte de Santander [28].

Tabla 2. Dimensiones del ladrillo H10 en las empresas de Cúcuta y su área metropolitana.

Dimensión	Valor [mm]
L	294.8±7.4
A	100.1±2.3
H	196.5±4.2

Fuente: Adaptado de [28].

Es muy importante resaltar, que los productos fabricados por estas empresas de la región, deben ajustarse a las medidas estándar exigida por la norma, pues en la mayoría de los casos, no se está cumpliendo con los requerimientos dimensionales. No obstante, los criterios de absorción de agua y resistencia a la compresión, si se están cumpliendo al pie de la norma, y por ende, las propiedades físico-mecánicas son similares y se pueden garantizar [28].

2-3 INGENIERÍA ASISTIDA POR COMPUTADOR

La ingeniería asistida por computadora o CAE (computer-aided engineering) es el uso de software para simular el rendimiento de un producto con el fin de mejorar el diseño o facilitar la resolución de problemas de ingeniería para diversas industrias. La aplicación del software puede incluir simulación, validación y optimización de materiales, productos, procesos y fabricación [29].

Habitualmente, un proceso CAE consiste en pasos de pre-procesamiento, resolución y pos-procesamiento. En la fase de pre-procesamiento, los ingenieros modelan la geometría y las propiedades físicas del diseño, así como la selección del material de fabricación y los efectos ambientales en el diseño, en forma de cargas o restricciones aplicadas. Luego, en la fase de resolución, el modelo se resuelve utilizando una formulación matemática adecuada de la física fundamental. Por último, en la fase de pos-procesamiento, los resultados se presentan al diseñador para su revisión y análisis [29].

En otras palabras, CAE puede usarse en el proceso de desarrollo del producto, aunque también puede usarse para todo el ciclo de vida del producto y puede incluir fases de mantenimiento y eliminación de productos. Además, se relaciona con los diversos pasos que incluyen el diseño y el proceso de desarrollo de modelos de diseño 3D computarizados y todos los sistemas que acceden, mejoran y usan esta información [30, 31]. Los beneficios más importantes, obtenidos por el uso de software CAE, son:

- El costo y el tiempo de desarrollo del producto se reducen, con la mejora de la calidad y la vida del producto.
- El diseño del producto se puede implementar, evaluar y mejorar.
- El diseño basado en simulación por computadora sustituye a las pruebas de prototipo físico y proporcionará ahorros en costos y tiempo.
- Brinda información sobre el rendimiento del producto antes de la fase de desarrollo cuando los cambios de diseño son menos costosos.
- Proporciona información sobre la ingeniería de riesgo y confiabilidad del diseño del producto.
- Cuando se integra adecuadamente en el diseño del producto y el desarrollo de fabricación, CAE puede permitir la identificación temprana del problema, lo que puede reducir drásticamente los costos asociados con el desgaste del producto.

Por otro lado, existen muchas ramas de la ciencia aplicada, en donde los ingenieros afrontan problemas que presentan sistemas complejos de esfuerzos, deformaciones, vibraciones, transferencia de calor, flujo de fluidos, campos eléctricos, entre otros. Para modelar estos problemas, comúnmente se usan ecuaciones diferenciales, difíciles de resolver de manera analítica [29]. Es entonces, en donde el software CAE junto con el método de elementos finitos, es visto como una herramienta importante, en el modelamiento de problemas de ingeniería.

2-3-1 Método de elementos finitos

El método de elementos finitos o FEM (finite element method), se originó en el campo de la mecánica estructural en la década de 1950. Desde entonces, es una de las principales herramientas de análisis numérico y sus aplicaciones se han ampliado considerablemente. Este método es utilizado para resolver ecuaciones diferenciales parciales, que describen los fenómenos físicos detrás de los problemas de ingeniería [32].

La idea detrás del método de elementos finitos, es dividir el dominio espacial en una serie de elementos geométricos simples (ver Fig. 4). El comportamiento individual del elemento, con ciertas condiciones de continuidad o dependencia entre elementos, tiene como finalidad, aproximar el comportamiento del dominio. El comportamiento de cada elemento se analiza en función de un conjunto de modos, llamados funciones de forma. Por lo general, las funciones de forma son polinomios de bajo orden y se eligen de manera en que los grados de libertad espacial sean desplazamientos o rotaciones en puntos específicos, llamados nodos. En geometrías complejas es necesario tener cuidado con la discretización del modelo, ya que

la precisión de los resultados, depende del tipo y tamaño de elemento que se use para aproximarse a la geometría original [33, 34].

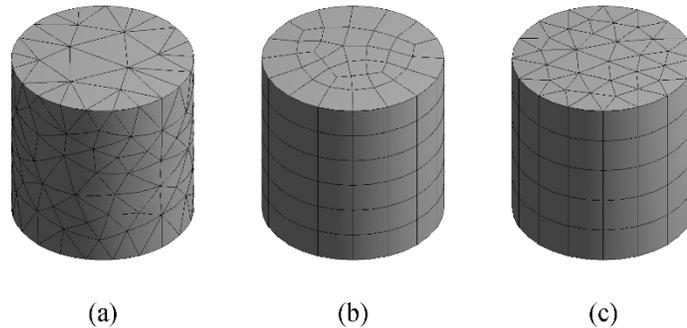


Figura 4. División de un cilindro en elementos: (a) tetraédricos. (b) hexaédricos. (c) prismáticos triangulares.
Fuente: Autor.

2-4 ANTECEDENTES

Liu, C. et al. (2017), usaron taninos condensados y proteína aislada de soya para desarrollar una resina termoestable. Inicialmente, aplicaron diferentes condiciones de PH para catalizar la reacción de la mezcla. Luego, probaron la estructura química, el comportamiento de degradación térmica, la morfología de la fractura y las características físicas de las resinas resultantes. La resina resultante fue aplicada sobre madera contrachapada, midiendo la fabricación y su resistencia al corte en húmedo. Los resultados mostraron, que en la condición ácida, el catenól se unía a la proteína aislada de soya, formando una red de reticulación con la misma. Asimismo, en la condición alcalina la estructura del catenól se oxidó y formo orto-quinona para curar la proteína aislada de soya, formando una estructura reticulada más densa. Esta estructura formada por ambos componentes, mejoró la resistencia al agua de la resina final, y la estructura condujo a una mejor termoestabilidad y creó una superficie de fractura homogénea de la misma. Por último, la resistencia al corte en húmedo de la madera contrachapada unida por una resina comercial, alcanzó 1.07 MPa, que fue un 75.4% más resistente que la resina a base de proteína aislada de soya. En conclusión, las resinas desarrolladas tenían una resistencia al agua favorable, una viscosidad adecuada, rentable y fácil de manejar, y con un buen potencial para su aplicación en la industria [35].

Temminck, R. et al. (2018), examinaron la tela de mezclilla post-consumo en combinación con bioresinas termoestables, para la fabricación de compuestos con aplicaciones estructurales. Los autores utilizaron las resinas bioepoxi y de aceite de soya epoxídica-acrilada (AESO), para crear un amplio abanico de posibilidades de investigación, junto con cuatro diferentes técnicas de fabricación: moldeo por compresión (COM), infusión al vacío (VAC), moldeo por transferencia de resina (RTM) y colocación manual (HND). Además,

compararon las bioresinas con la resina de poliéster convencional, ya que esta es muy utilizada para aplicaciones estructurales. Asimismo, probaron los biocompuestos de manera mecánica y térmica, y caracterizaron propiedades como la porosidad y la absorción de agua, analizando a través de imágenes microscópicas del compuesto. Los resultados mostraron que tanto el bioepoxi como el AESO son adecuados para su uso en aplicaciones estructurales en una amplia gama de técnicas de fabricación. De igual modo, los biocompuestos de bioepoxi fueron superiores a los de la resina AESO. [36].

Adamson, M. et al. (2015), estudiaron la durabilidad del hormigón reforzado hecho con ladrillo triturado como agregado. Para este propósito, realizaron un estudio comparativo sobre las propiedades de durabilidad del concreto hecho con ladrillo triturado como agregados gruesos y con agregados naturales. Los resultados mostraron que los agregados gruesos naturales pueden ser reemplazados por ladrillos triturados, sin un cambio significativo en la durabilidad del concreto, cuando el acero no está presente. Sin embargo, cuando el concreto se refuerza con acero, los autores no recomiendan reemplazar los agregados naturales con ladrillo triturado [37].

Velázquez, N. et al. (2015), realizaron diferentes aportes a la evaluación del comportamiento mecánico de la estructura de entibación minera tipo puerta alemana fabricada en resina poliéster - polvos cerámicos. Inicialmente, determinaron los porcentajes de concentración adecuados en el material compuesto, esto a fin de obtener una mezcla que lograra cumplir con las especificaciones deseadas. Para tal fin, realizaron probetas estandarizadas mediante la norma ASTM D7264M, con porcentajes de 90% resina - 10% polvo cerámico (90/10) y 60% resina - 40% polvo cerámico (60/40), las cuales sometieron a pruebas de flexión por tres puntos. Posteriormente, realizaron simulaciones de una puerta tipo alemana, con el objetivo de determinar el diseño óptimo mediante el software ANSYS R16, al variar el ángulo de palanca. Los resultados del ensayo de flexión, demostraron que el porcentaje de concentración resina/polvos cerámico, con mejores propiedades mecánicas, fue el de 90/10. Además, se validó el diseño de la puerta que más soportaba esfuerzos de flexión, usando un ángulo de 74 grados. [38].

CAPÍTULO 3

OBJETIVOS

3-1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar mecánicamente a dos materiales compuestos, con diferentes matrices termoestables y un refuerzo en forma de partículas, obtenido a partir de fragmentos de ladrillo H10.

3-2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fabricar los dos materiales compuestos de matrices termoestables con un 10% de refuerzo y partículas con tamaño inferior a 75 μm .
- Caracterizar mecánicamente a los dos materiales compuestos, mediante ensayos de tracción y flexión, bajo las condiciones de las normas ASTM.
- Realizar simulaciones estructurales a una aplicación industrial, por medio del método de elementos finitos, con ayuda del software ANSYS.
- Manufacturar un prototipo de la aplicación validada computacionalmente, hecha con los materiales compuestos en estudio.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4-1 MATERIALES

4-1-1 Resina poliéster P-2002

La resina poliéster utilizada (ver Fig. 5), es una resina ortoftálica pre-acelerada, comercializada con la referencia P-2002 por la empresa Industria de Resinas SAS. Esta resina es muy versátil para aplicaciones de propósito general, y apropiada para trabajar por laminación manual, o spray up, obteniendo buena resistencia mecánica. La resina es suministrada al 70% en sólidos y puede ser modificada por el usuario con la adición de estireno hasta un 30% máximo, según su aplicación particular.



Figura 5. Resina poliéster P-2002: (a) Presentación. (b) Aspecto de la resina y el catalizador.

Fuente: Industria de Resinas SAS y autor.

El fabricante recomienda el uso de MEK peróxido (methyl ethyl ketone), como catalizador. La cantidad de este aditivo puede variar para corregir fluctuaciones de temperatura de trabajo, pero recomiendan del 1 al 2% en peso de la mezcla. Asimismo, recomiendan que el curado no se realice a temperaturas inferiores a 15°C, porque no se alcanzarían buenas propiedades mecánicas, de resistencia química ni al ambiente. Las especificaciones generales de la resina P-2002, se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Especificaciones generales de la resina P-2002 en estado de suministro.

Características	Valor	Método
Apariencia	Rosada transparente	IT-1.01
Valor ácido	42 máximo	IT-1.14

Viscosidad Brookfield [cps] (Agua 3, 10 rpm)	1500 – 2500 (25°C)	IT-1.06
% sólidos	68 – 72	IT-1.11
Temperatura de Exotermia [°C]	130 – 145	IT-3.04
Tiempo de exotermia [minutos]	14 - 25	IT-3.04

Fuente: Industria de Resinas SAS (Anexo 1).

4-1-2 Sistema bioepoxi Super Sap® CLR

La resina bioepoxi utilizada (ver Fig. 6), es el sistema Super Sap® CLR con endurecedor Super Sap® CLF, comercializado por la empresa Entropy Resins. Esta resina es un sistema epóxico estabilizado con rayos ultravioleta, y tiene una viscosidad ideal para una amplia gama de aplicaciones, que utilizan técnicas de colocación manual con reticulación rápida.



Figura 6. Sistema bioepoxi Super Sap® CLR: (a) Presentación. (b) Aspecto de la resina y el endurecedor.

Fuente: Entropy Resins.

En comparación con otras resinas termoestables a base de productos petroquímicos, la resina seleccionada contiene materiales renovables procedentes de los subproductos de procesos industriales, como la producción de aglomerados de madera y los biocombustibles. Según el fabricante, este material reduce el impacto ambiental al disminuir un 50% las emisiones de CO₂ y los gases de efecto invernadero. En la Tabla 4 y 5, se resumen las composiciones e información sobre los ingredientes del sistema bioepoxi Super Sap® CLR y el endurecedor Super Sap® CLF, respectivamente.

Tabla 4. Composición e información sobre los ingredientes del sistema bioepoxi Super Sap® CLR.

Identificación CAS	Nombre	% en peso
25068-38-6	Producto de reacción: bisfenol-A-(epiclorhidrina); resina epóxica	85 – 95
100-51-6	Alcohol de bencilo	< 10

57834-33-0	Ácido benzoico, 4 - [[[(metilfenilamino) metileno] amino] -etil éster	< 10
68609-97-2	Alquí (C12-14) glicidiléter	< 10

Fuente: Entropy Resins (Anexo 2).

Tabla 5. Composición e información sobre los ingredientes del endurecedor Super Sap® CLF.

Identificación CAS	Nombre	% en peso
100-51-6	Alcohol de bencilo	15 – 40
103-83-3	Bencenometamina	1 – 5
1477-55-0	1,3-bencenedimetanamina	10 – 30
25154-52-3	Nonilfenól	1 – 5
2855-13-2	Isoforona diamina	10 – 30

Fuente: Entropy Resins (Anexo 3).

4-1-3 Polvo de arcilla sinterizada

En la Fig. 7 se resume el proceso de reducción de tamaño de los fragmentos de ladrillo H10. En la Fig. 7a se muestran los fragmentos de ladrillo H10 recolectados del depósito de materiales La Flecha, ubicado en el municipio de Pamplona, Norte de Santander. Estos fragmentos son el resultado de los ladrillos que se rompen durante el almacenamiento, y son acumulados en una sección de la empresa, para posteriormente ser descartados y enviados al vertedero municipal.

En primer lugar, se realizó una reducción manual de los fragmentos, con ayuda de un martillo, en donde se obtuvieron los fragmentos más pequeños que se observan en la Fig. 7b. En segundo lugar, se realizó un proceso de reducción mecánica, con ayuda de un molino de bolas (ver Fig. 7c y 7d). El tiempo dentro del molino de bolas fue de 1 hora. De esto, se obtuvo un polvo de la arcilla sinterizada (ver Fig. 7e), al cual se le retiraron los fragmentos e impurezas con un tamaño superior a 0.85 mm, por medio de un tamiz #20 (ver Fig. 7f).

A partir de este punto, la reducción de tamaño se ejecutó bajo las condiciones de la norma ASTM C136/136M [39]. Esta misma definió el tamaño de la muestra, el procedimiento de preparación, y la ejecución del tamizado. Primero, se realizó el secado a 100°C durante 24 horas, de una muestra representativa del polvo de arcilla sinterizada. Luego, se pesó una masa de 5372.7 gramos, para el ensayo granulométrico (ver Fig. 7g).

En la Fig. 7h, se observa la configuración en torre de los tamices empleados, que de manera descendente, fueron: tamiz #40, #60, #80, #100, #140, #200, y el fondo. Cabe aclarar que la muestra tamizada, reposaba sobre el tamiz #40, al cual se le colocó una tapa antes del montaje en el agitador mecánico o sieve shaker de la Fig. 7i. El tamizado mecánico se ejecutó durante 10 minutos, según los parámetros establecidos por la norma. Finalmente, se

clasificaron los tamaños de las muestras, de acuerdo al material que se obtuvo sobre cada uno de los tamices y el fondo (ver Fig. 7j).

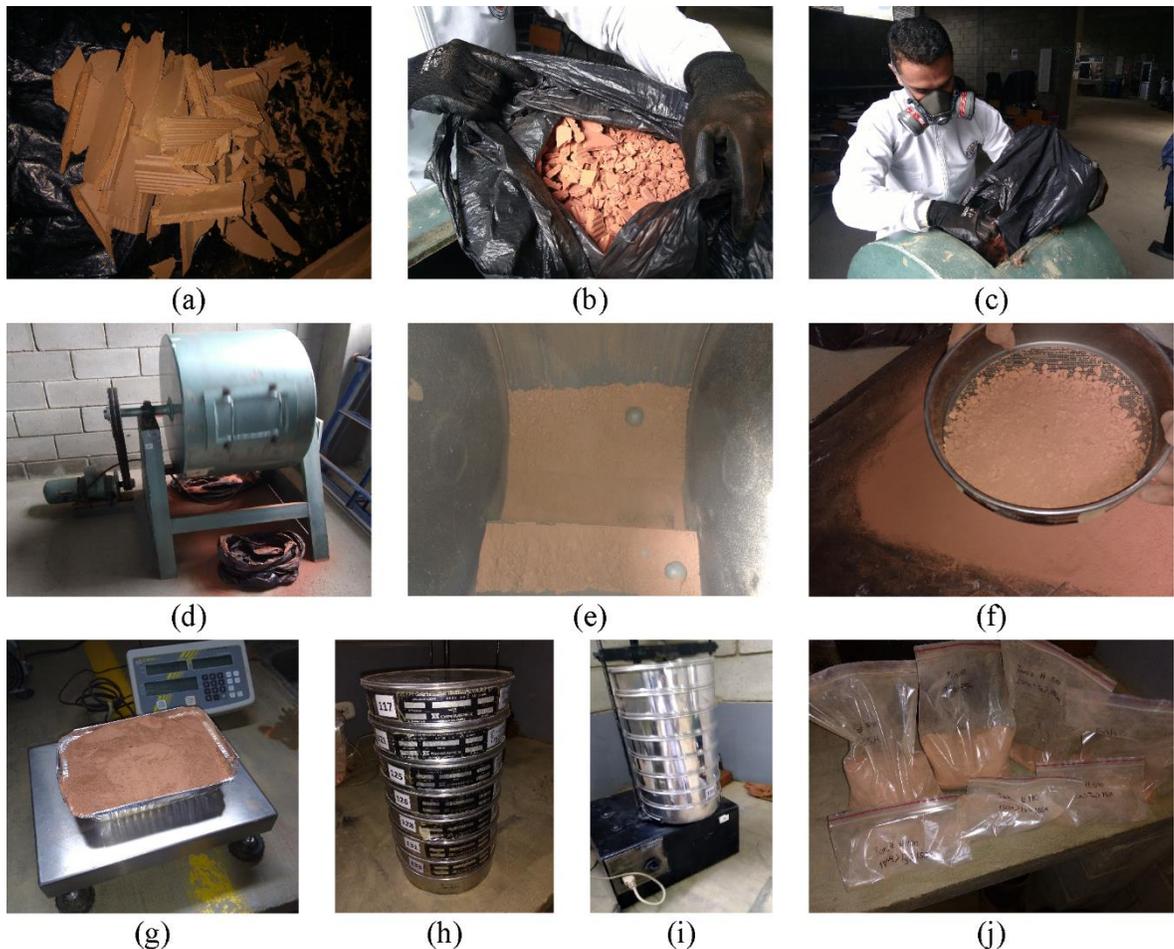


Figura 7. Esquema del proceso de reducción de tamaño de los fragmentos de ladrillo H10: (a) Fragmentos recolectados. (b) Fragmentos reducidos manualmente. (c) Colocación en el molino de bolas. (d) Reducción en el molino de bolas. (e) Polvo grueso de arcilla sinterizada. (f) Tamizado de fragmentos grandes. (g) Muestra para el ensayo granulométrico. (h) Colocación de los tamices. (i) Tamizado mecánico. (j) Clasificación de las muestras.

Fuente: Autor.

En la Tabla 6, se observa la clasificación de las muestras de tamaños de partícula, con sus respectivos valores de masa.

Tabla 6. Clasificación de las muestras de tamaños de partícula.

Tamiz [#]	Tamaño de partícula [μm]	Masa [gr]
40	> 425	2758.8
60	250 – 425	1403.1
80	180 – 250	145.4

100	150 – 180	298.6
140	106 – 150	500.0
200	75 – 106	115.2
Fondo	< 75	151.6
Total	> 425 – < 75	5372.7

Fuente: Autor.

4-2 FABRICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Se fabricaron dos configuraciones de material compuesto con matriz polimérica termoestable, reforzados con 10% en peso de arcilla sinterizada (AS) con tamaño de partícula menor a 75 μ m. Por un lado, tenemos a la resina poliéster P-2002, usando una relación en peso de 99 partes de resina y 1 parte de catalizador MEK peróxido (RP). Por el otro, tenemos al sistema bioepoxi Super Sap® CLR, utilizando una relación en peso de 100 partes de resina y 33 partes de endurecedor Sper Sap® CLF (RBE). Conviene señalar, que a excepción de la relación resina termoestable/agente de curado, se sigue el mismo procedimiento para la fabricación mediante moldeo por colado, de las láminas de los dos materiales compuestos:

- **RP-AS:** 99/1 de resina P-2002/MEK peróxido con 10% en peso de arcilla sinterizada < 75 μ m.
- **RBE-AS:** 100/33 de resina bioepoxi CLR/endurecedor CLF con 10% en peso de arcilla sinterizada < 75 μ m.

El primer paso del proceso, fue el secado del polvo de arcilla sinterizada, a una temperatura de 100°C durante 24 horas, en una mufla, con el fin de extraer humedad residual del refuerzo. Posteriormente, se pesaron los componentes con ayuda de una balanza digital, respetando los porcentajes definidos para cada configuración de material compuesto.

Luego, se colocó la resina en una plancha de calentamiento con agitación magnética, elevando la temperatura hasta llegar a los 50°C (ver Fig. 8a), con el propósito de disminuir la viscosidad. El siguiente paso fue adicionar el polvo de arcilla sinterizada, y mediante agitación mecánica, se distribuyó por completo hasta lograr una mezcla homogénea (ver Fig. 8b).

La mezcla obtenida se dejó en agitación hasta que la temperatura se redujo a 30°C. En este punto, se adicionó el agente de curado y se mezcló de manera uniforme durante 5 minutos. Por últimos, se realizó el colado del contenido, dentro de un molde de madera con una cavidad de 230x240x5 mm, y una base de vidrio (ver Fig. 8c). La reticulación completa de los materiales compuestos tardó 7 días, bajo condiciones de presión y temperatura estándar. Según los fabricantes de las resinas, este tiempo era necesario para que alcanzara el 100% de sus propiedades.

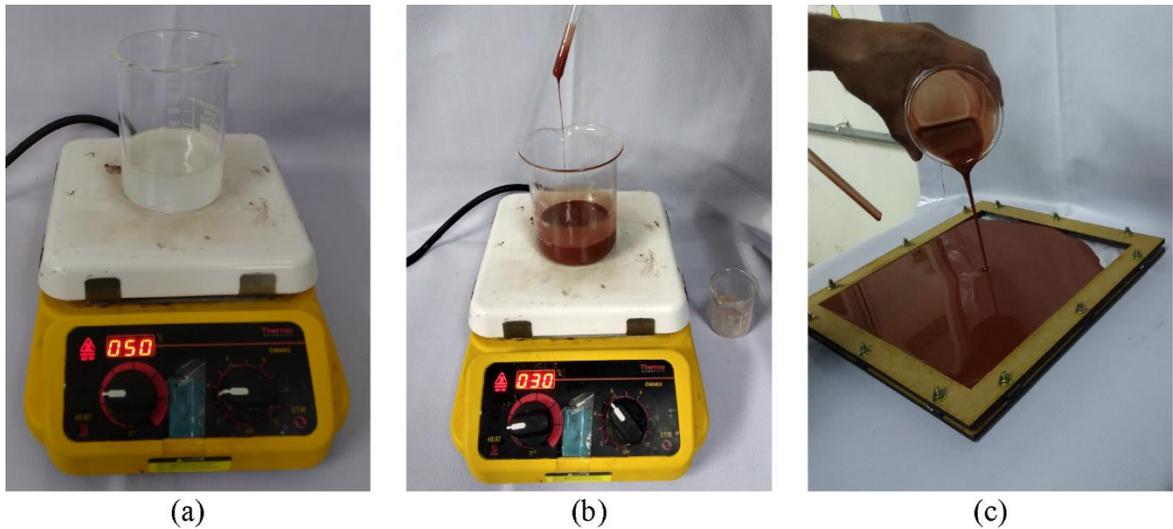


Figura 8. Esquema del proceso de moldeo por colado de los materiales: (a) Agitación y calentamiento de la resina. (b) Adición y mezcla del polvo de arcilla sinterizada. (c) Colado del material en el molde.

Fuente: Autor.

4-3 ENSAYOS DESTRUCTIVOS DE CARACTERIZACIÓN

4-3-1 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción fue realizado bajo la norma ASTM D638, con ayuda de la máquina universal de ensayos SHIMADZU UH-600KN. Este método de prueba está diseñado para producir datos de propiedades de tracción para el control y especificación de materiales plásticos reforzados y no reforzados [40].

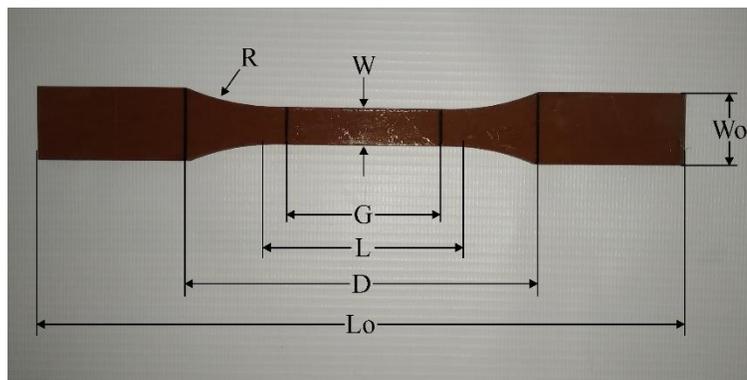


Figura 9. Dimensiones de la probeta Tipo I.

Fuente: Adaptado de [40].

Tabla 7. Dimensiones de la probeta para ensayos de tracción.

Símbolo	Nombre	Valor [mm]
W	Ancho de la sección estrecha	13
L	Longitud de la sección estrecha	60
W ₀	Ancho total	25
L ₀	Longitud total	220
G	Longitud calibrada	50
D	Distancia entre mordazas	115
R	Radio de filete	76
T	Espesor	5

Fuente: Adaptado de [40].

Debido a que el material, es un plástico reforzado, se utilizó la geometría de la probeta Tipo I (ver Fig. 9) que tiene por dimensiones los valores detallados en la Tabla 7. Del mismo modo, la velocidad de aplicación de la carga se estableció en un valor 5 mm/min. En la Fig. 10 se observan los especímenes utilizados para la ejecución del ensayo de tracción.

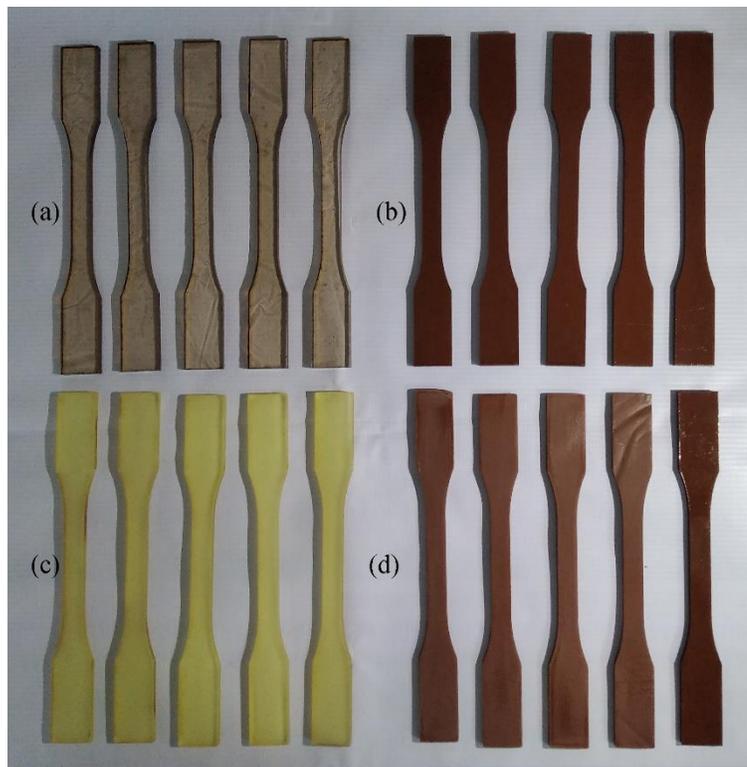


Figura 10. Especímenes utilizados para el ensayo de tracción: (a) Resina poliéster. (b) RP-AS. (c) Resina bioepoxi. (d) RBE-AS.

Fuente: Autor

4-3-2 Ensayo de flexión

El ensayo de flexión por tres puntos se llevó a cabo siguiendo las condiciones de la norma ASTM D790, con ayuda de la máquina universal de ensayos SHIMADZU UH-600KN. Las propiedades de flexión determinadas por este método de prueba son especialmente útiles para fines de control de calidad y especificación [41].

Los materiales de estudio se encuentran dentro de la clasificación de materiales termoplásticos moldeados. Por lo anterior, se usaron las dimensiones de una probeta plana de 150x13x5 mm (Largo x Ancho x Espesor), con una distancia entre soportes o longitud luz de 80 mm. Del mismo modo, la velocidad de aplicación de la carga se estableció en un valor 2.13 mm/min, a causa de la geometría de la pieza y del uso del procedimiento A de la respectiva norma. En la Fig. 11 se observan los especímenes utilizados para la ejecución del ensayo de flexión.

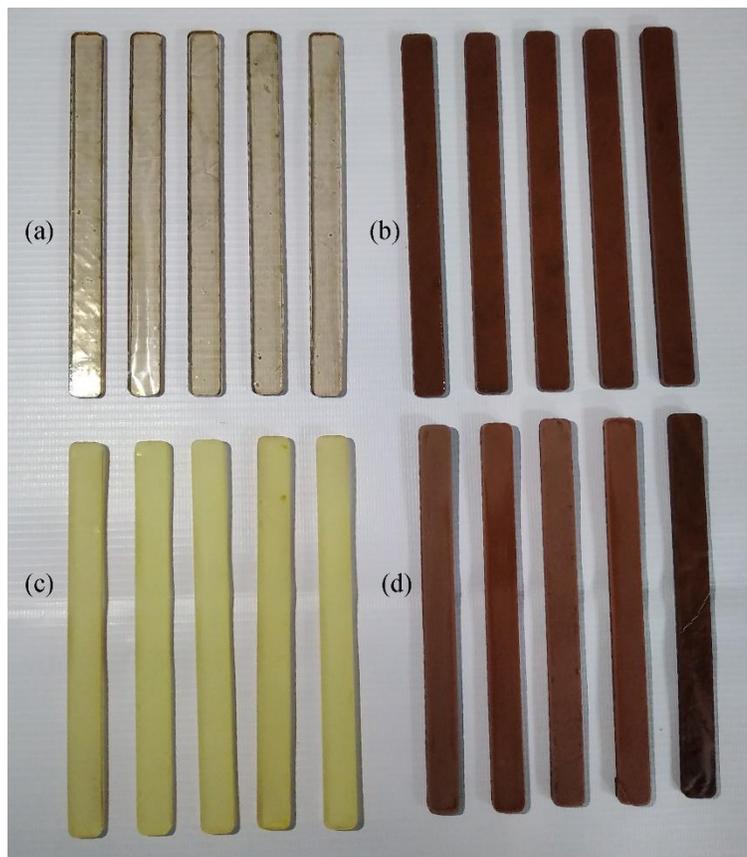


Figura 11. Especímenes utilizados para el ensayo de flexión: (a) Resina poliéster. (b) RP-AS. (c) Resina bioepoxi. (d) RBE-AS.

Fuente: Autor

4-4 SIMULACIÓN DE LA LEVA DE FRENO DE MOTOCICLETA

El esquema de la Fig. 12 muestra el resumen de los pasos realizados, desde la pieza real (ver Fig. 12a) hasta la geometría validada computacionalmente (ver Fig. 12f). El objetivo de este desarrollo, era validar el comportamiento mecánico de la leva, al asignar las propiedades mecánicas obtenidas por la mejor configuración de material compuesto. Esto, con ayuda del método de elementos finitos y en sistema de análisis de tipo estructural de ANSYS R16.

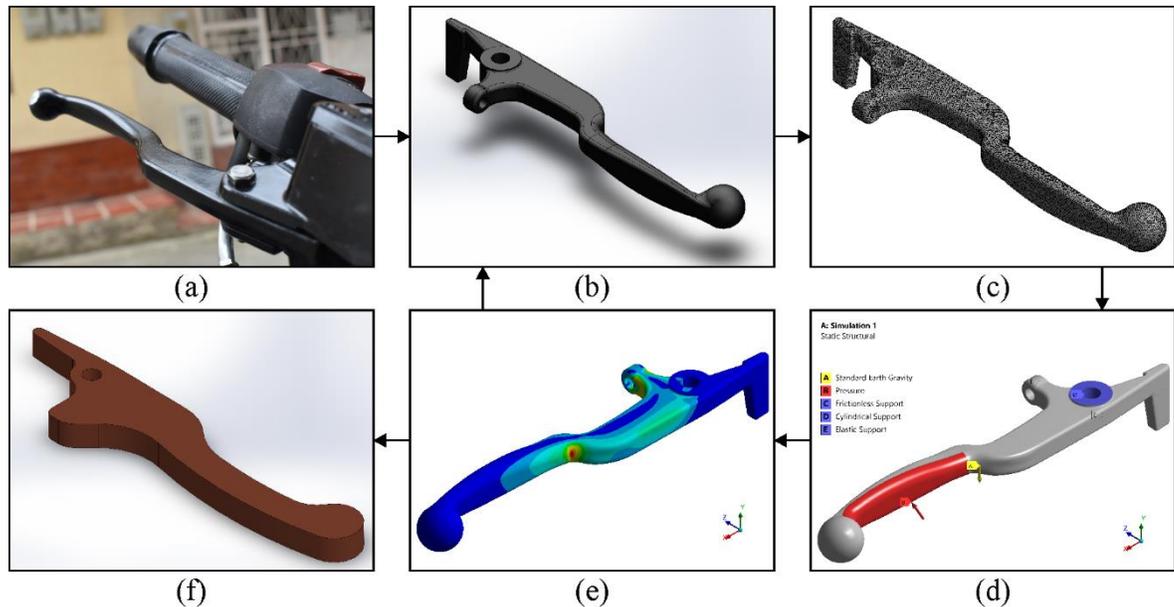


Figura 12. Esquema del proceso de simulación y optimización de la leva de freno: (a) Paso 1 - pieza real. (b) Paso 2 - CAD de la geometría. (c) Paso 3 - mallado de la pieza. (d) Paso 4 - condiciones reales de funcionamiento. (e) Paso 5 - resultados de la simulación. (f) Paso 6 - geometría validada computacionalmente.

Fuente: Autor.

En el paso 1, se tomó como aplicación, a la leva de freno de una motocicleta tipo sport-turismo (ver Fig. 12a). En el paso 2, se realizó el CAD original y las modificaciones realizadas a la pieza (ver Fig. 12b), con ayuda del software de diseño asistido por computador “Solidworks”. A partir del paso 3, se trabajó en el software de ingeniería asistida por computador “ANSYS”. En él, se realizó el mallado de la geometría (ver Fig. 12c), el cual fue optimizado para que los resultados convergieran a la solución de manera correcta y con el menor gasto computacional.

Las condiciones de trabajo para una leva de freno, fueron parametrizadas mediante el funcionamiento real en circunstancias límite, teniendo en cuenta que el sistema de frenado es el componente más importante en los vehículos para mantener la integridad de los pasajeros [42]. En consecuencia, se asumió que el tiempo necesario para alcanzar la fuerza máxima de agarre, era inferior a 2 segundos, y los valores óptimos de contracción voluntaria

máxima, se obtienen en un lapso de 3 segundos [43]. Así mismo, de acuerdo a un estudio antropométrico realizado por Lee & Sechachalam (2016), se tomó un valor de 32.60 kg como la fuerza de agarre máxima ejercida por la mano dominante [44]. De acuerdo a lo anterior, fueron establecidas las siguientes cargas y restricciones (ver Fig. 12d), para el paso 4:

- Gravedad estándar de la tierra: 9.8066 m/s².
- Fuerza de la mano: 32.60 kg aplicados durante 3 segundos.
- Soporte sin fricción: ubicado en las caras superior e inferior.
- Soporte cilíndrico: ubicado en la cara cilíndrica que hace la función de pivote.
- Soporte elástico: ubicado en la cara que contacta al buje de inyección del líquido de frenos.

En el paso 5, se obtuvieron los resultados más relevantes de la simulación (ver Fig. 12e), tales como: masa de la pieza, esfuerzos equivalentes (von-Mises), factor de seguridad, y detección de las zonas críticas de la pieza. Estos resultados fueron analizados, y con base en ellos se realizó una retroalimentación en donde se modificó la geometría, para nuevamente iniciar el procedimiento desde el paso 2 (Anexo 4 - 7). En la Tabla 8 se resumen las simulaciones ejecutadas en ANSYS y su respectiva configuración, las cuales hicieron parte de la optimización. Finalmente, en el paso 6, se presenta la geometría validada computacionalmente (ver Fig. 12f).

Tabla 8. Simulaciones ejecutadas en ANSYS.

Simulación	CAD	Material	Tipo de elemento	Elementos	Nodos
1	Original	Aluminio	Tetraédricos	252 189	362 197
2	Original	RP-AS	Tetraédricos	252 189	362 197
3	Modificado 1	RP-AS	Tetraédricos	452 799	636 738
4	Modificado 2	RP-AS	Tetraédricos	525 919	736 787
5	Modificado 3	RP-AS	Prismático triangular	114 516	317 844

Fuente: Autor.

4-5 MANUFACTURA DEL PROTOTIPO

De acuerdo con los resultados obtenidos en las simulaciones, se procedió a realizar la fabricación de un prototipo de leva, tomando como referencia la geometría validada computacionalmente y el material compuesto propuesto que obtuvo los mejores resultados.

4-5-1 Diseño y manufactura del molde

Se realizó el diseño del molde, con ayuda del software Solidworks. En la Fig. 13, se observa el CAD con su respectivo explosionado (Anexo 8). Para cumplir con el diseño de la leva, se usaron dos capas de MDF de 5mm cortadas a láser, con el fin de dar la mayor precisión geométrica posible. Asimismo, se fabricaron 3 piezas complementarias, con ayuda del proceso de impresión en 3D, con el propósito de cumplir con todas las funciones de la leva, en el prototipo final. Por otra parte, se usó una base de vidrio para que el desmóldelo fuera más sencillo, y se colocó un accesorio de posicionamiento, para colocar un buje en el pivote de la leva de freno. Por último, se utilizaron tornillos milimétricos y tuercas autoblocantes para ensamblar el molde, y evitar las filtraciones de material fluido en la interfaz capa-capo y vidrio-capo.

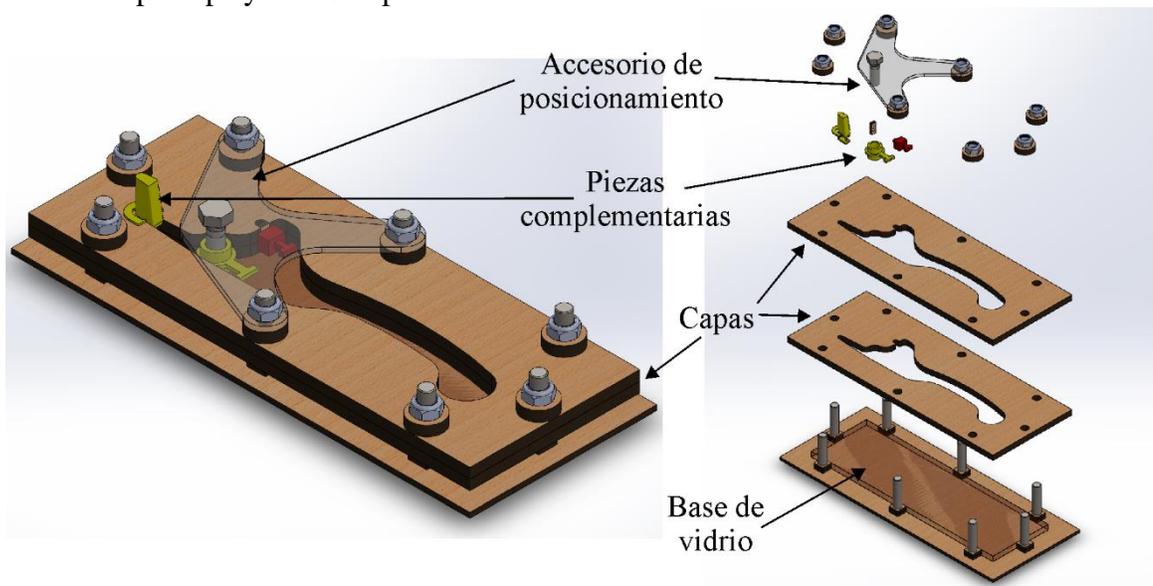


Figura 13. Diseño del molde en Solidworks.

Fuente: Autor.

4-5-2 Ensamblaje del molde y colado del material compuesto

En la Fig. 14a se observa el molde completamente ensamblado. Posteriormente, se preparó para el colado del material compuesto, impregnando una delgada capa de aceite mineral en las paredes internas. Luego, se vació el material dentro del molde, como se observa en la Fig. 14b, garantizando el llenado completo del mismo. Por último, se dejó reticular el material durante siete días, en condiciones estándar a temperatura ambiente y presión.

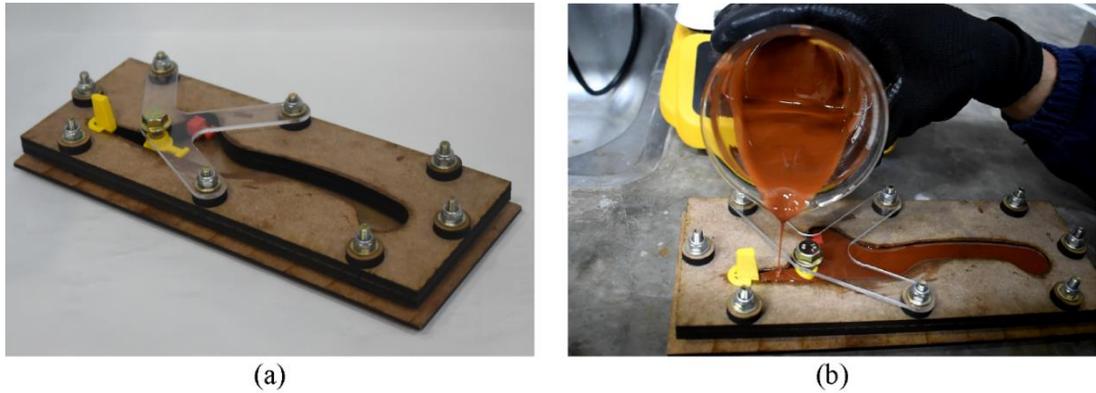


Figura 14. Fabricación de la leva de freno: (a) Ensamblaje y preparación del molde. (b) Colado del material compuesto.

Fuente: Autor.

4-5-3 Desmolde y montaje de la leva de freno

En la Fig. 15a se observa la pieza desmoldada, junto con los accesorios complementarios embebidos en el material compuesto. En la Fig. 15b se observa el ajuste de la pieza en su posición. En la Fig. 15c se hace un acercamiento a la bomba de inyección del líquido de frenos, en donde se aprecia el posicionamiento correcto de la leva, en las partes en las que debe cumplir con su función de frenado. Por último, la Fig. 15d muestra el ensamblaje completo de la leva de freno en el manubrio de la motocicleta.

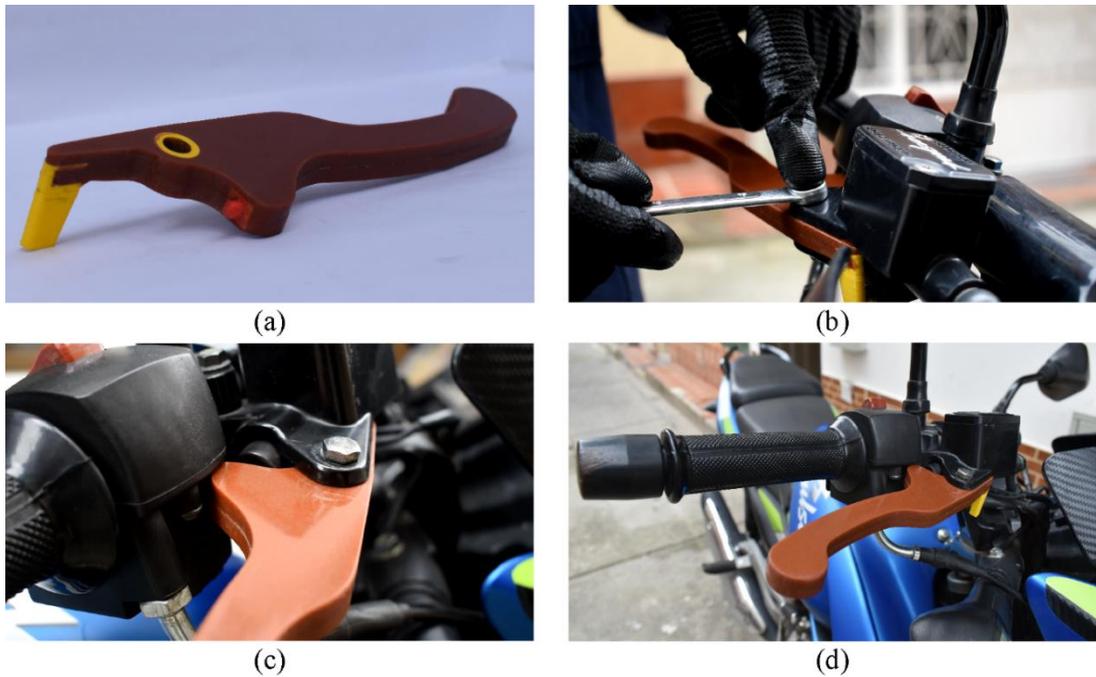


Figura 15. Montaje de la leva de freno: (a) Pieza desmoldada. (b) Ajuste de la pieza. (c) Acercamiento a la bomba de inyección del líquido de frenos. (d) Ensamblaje completo de la leva de freno.

Fuente: Autor.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5-1 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA ARCILLA SINTERIZADA

En la Fig. 16 se muestra la distribución granulométrica de la arcilla sinterizada, tomando como referencia los valores obtenidos en la Tabla 6. Como se observa, hubo una mayor cantidad de partículas con tamaño superior a 425 μm (51.35%), pero con una alta presencia de impurezas. Inclusive, hasta los tamaños de partícula superiores a 180 μm , se detectaron cantidades significativas de las mismas. En consecuencia, casi un 53% de polvo de arcilla sinterizada no es apto para su uso como refuerzo, desde el punto de vista macro.

Por otra parte, se obtuvieron 161.6 gramos del tamaño de partícula utilizado en esta investigación (menor a 75 μm) significando un 2.82% en peso del total de la muestra de 5.2737 kg. Debido a esto, el rango de partículas con un tamaño inferior a 75 μm , fue el tercero con mayor presencia, con respecto a los tamaños de grano inferiores a 180 μm que no presentaron impurezas aparentes.

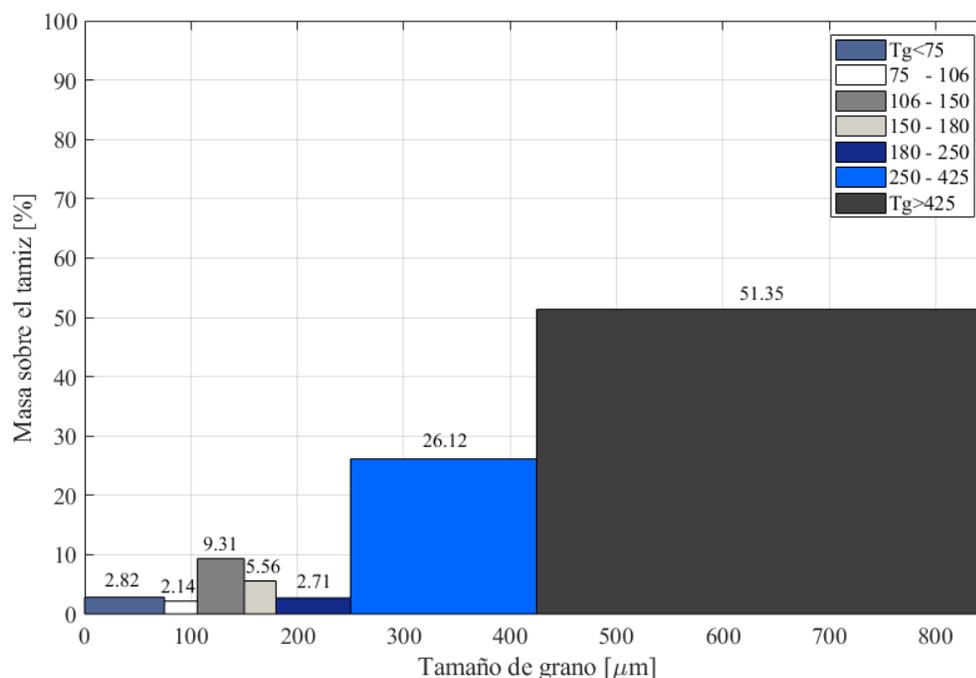


Figura 16. Distribución granulométrica de la arcilla sinterizada.

Fuente: Autor.

5-2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A TRACCIÓN

En el anexo 9 y 10 se encuentran todos los resultados obtenidos de los ensayos destructivos a tracción. La Tabla 9 resume los resultados obtenidos del módulo de Young, resistencia a la tracción y porcentaje de deformación, con sus respectivas desviaciones estándar, para cada uno de los materiales en estudio.

La resina poliéster reforzada con arcilla sinterizada obtuvo un módulo de Young de 0.356 ± 0.153 GPa, significando una disminución en esta propiedad, con respecto a la resina poliéster sin refuerzo. No obstante, la resistencia y la deformación a tracción, aumentó hasta 40.336 ± 5.635 MPa y 11.373 ± 1.600 %, respectivamente. Esto demuestra una mejora en las propiedades mecánicas de la resina poliéster al ser reforzada con la arcilla sinterizada, pero una disminución en la rigidez de la misma.

Por otro lado, la resina bioepoxi reforzada con arcilla sinterizada obtuvo un módulo de Young de 0.454 ± 0.257 GPa, cuyo valor es similar al de la resina bioepoxi sin reforzar. Asimismo, la resistencia y deformación a tracción de la resina bioepoxi reforzada fue superior a la resina sin refuerzo, con valores de 32.552 ± 4.950 MPa y 6.108 ± 2.223 %, respectivamente. Esto demuestra que el refuerzo de arcilla sinterizada, aportó de manera positiva al aumento de todas las propiedades mecánicas, para este caso particular.

Tabla 9. Comparativa de los resultados del ensayo de tracción.

Material	Módulo de Young [GPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Deformación a tracción [%]
RP	0.533 ± 0.124	33.195 ± 3.974	7.684 ± 1.600
RP-AS	0.356 ± 0.153	40.336 ± 5.635	11.373 ± 1.532
RBE	0.447 ± 0.135	16.146 ± 2.715	3.153 ± 0.735
RBE-AS	0.454 ± 0.257	32.552 ± 4.950	6.108 ± 2.223

Fuente: Autor.

En la Fig. 17 se muestra la comparativa del comportamiento mecánico a tracción, descrito en la gráfica de esfuerzo deformación, obtenida de una muestra representativa de cada uno de los materiales ensayados.

Para el caso de los materiales con resina bioepoxi, la pendiente de la recta es muy similar, comprobando los resultados cuantitativos de la rigidez. En el caso de los materiales con resina poliéster, es evidente el cambio en la pendiente entre la resina virgen y la reforzada, y por lo tanto el aumento en la rigidez de la misma al añadir el refuerzo particulado.

Es importante destacar, que el comportamiento de todos los materiales fue de tipo elástico lineal, con aumento en las propiedades mecánicas, debidas a la adición del 10% en peso de partículas micrométricas de arcilla sinterizada. Además, las mejores propiedades obtenidas a

tracción, fueron las arrojadas por el material compuesto de resina poliéster reforzado con partículas micrométricas de arcilla sinterizada.

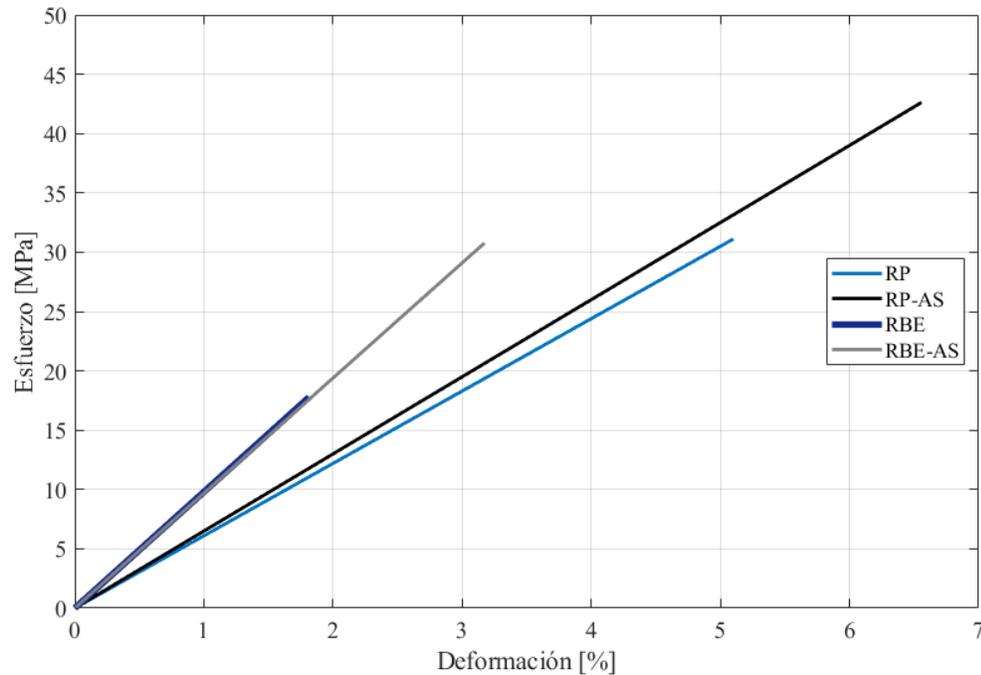


Figura 17. Comparación del comportamiento mecánico a tracción.

Fuente: Autor.

5-3 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A FLEXIÓN

En el anexo 11 y 12 se encuentran todos los resultados obtenidos de los ensayos destructivos a flexión. La Tabla 10 resume los resultados obtenidos del módulo de flexión, resistencia a la flexión y porcentaje de deformación, con sus respectivas desviaciones estándar, para cada uno de los materiales en estudio.

La resina poliéster reforzada con arcilla sinterizada obtuvo un módulo de flexión de 1.204 ± 0.560 GPa y una deformación de 5.486 ± 1.288 %, significando una disminución en estas dos propiedades, con respecto a la resina poliéster sin refuerzo. No obstante, la resistencia a flexión aumentó hasta $58.545.336 \pm 37.406$ MPa. En estas pruebas, se aprecia bastante dispersión de los resultados, demostrada por los valores exorbitantes de la desviación estándar, para cada una de las tres propiedades mecánicas a flexión obtenidas en los ensayos destructivos.

Por otro lado, la resina bioepoxi reforzada con arcilla sinterizada obtuvo módulo de flexión de 5.464 ± 1.862 GPa, mostrando un aumento en esta propiedad, con respecto a la

resina bioepoxi sin refuerzo. Por otro lado, la resistencia a la flexión y la deformación de compuesto de RBE-AS, disminuyó a 23.319 ± 4.634 MPa y 0.502 ± 0.042 %, respectivamente. Para este caso, el refuerzo particulado desmejoró el valor de las propiedades mecánicas a flexión, tomando como referencia los datos obtenidos por la resina bioepoxi sin refuerzo.

Tabla 10. Comparativa de los resultados del ensayo de flexión.

Material	Módulo de flexión [GPa]	Resistencia a la flexión [MPa]	Deformación a flexión [%]
RP	1.607 ± 0.672	55.790 ± 18.900	6.234 ± 0.336
RP-AS	1.204 ± 0.560	58.545 ± 37.403	5.486 ± 1.288
RBE	4.675 ± 0.618	26.776 ± 5.506	0.670 ± 0.291
RBE-AS	5.464 ± 1.862	23.319 ± 4.634	0.502 ± 0.042

Fuente: Autor.

En la Fig. 18 se muestra la comparativa del comportamiento mecánico a flexión, descrito en la gráfica de esfuerzo deformación, obtenida de una muestra representativa de cada uno de los materiales ensayados.

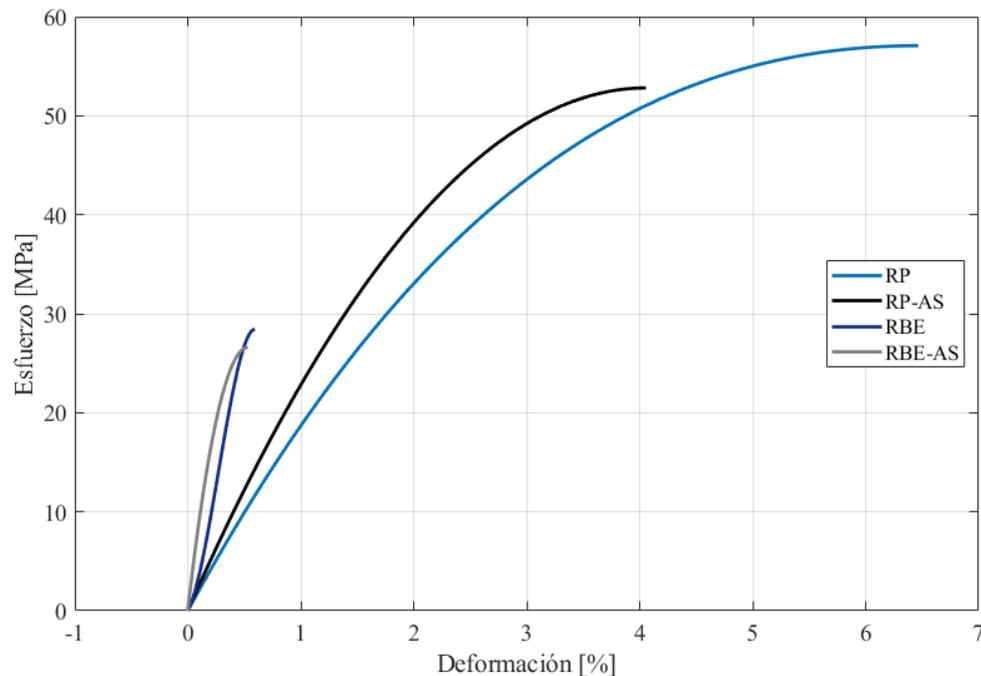


Figura 18. Comparación del comportamiento mecánico a flexión.

Fuente: Autor.

Para ambos materiales compuestos (RP-AS y RBE-AS), hubo una clara disminución en el rendimiento a flexión, debido a la adición del refuerzo particulado. Es importante destacar

que el comportamiento de todos los materiales fue del tipo elástico lineal, y que las mejores propiedades obtenidas a flexión, fueron las arrojadas por la resina poliéster sin refuerzo.

5-3 VALIDACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

En el anexo 13 se presenta el archivo con las cinco simulaciones propuestas. Además, la Tabla 11 muestra los resultados de esfuerzo equivalente máximo, factor de seguridad mínimo y masa de las piezas, para cada una de las simulaciones propuestas.

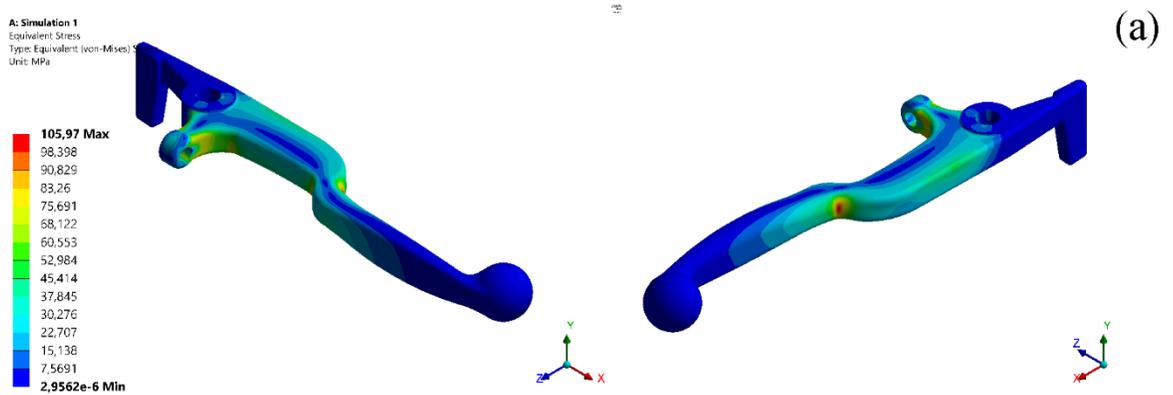
Tabla 11. Resultados cuantitativos de las simulaciones.

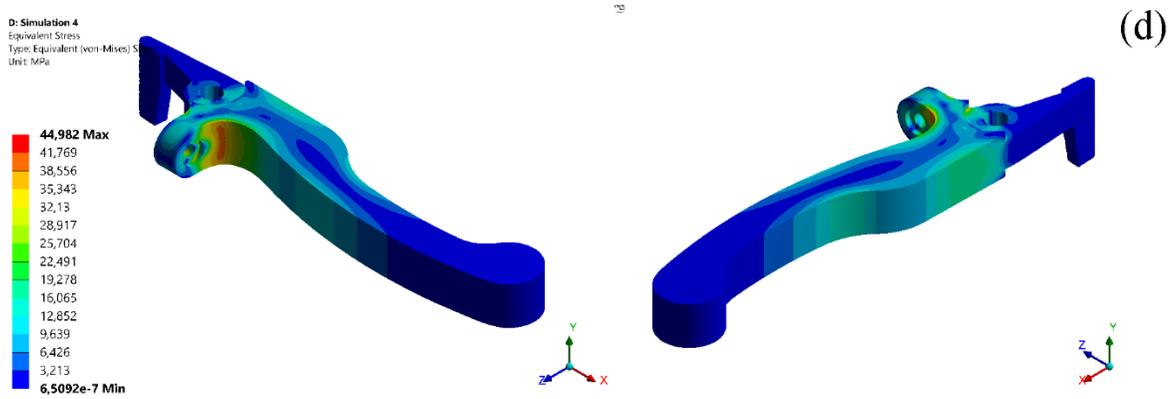
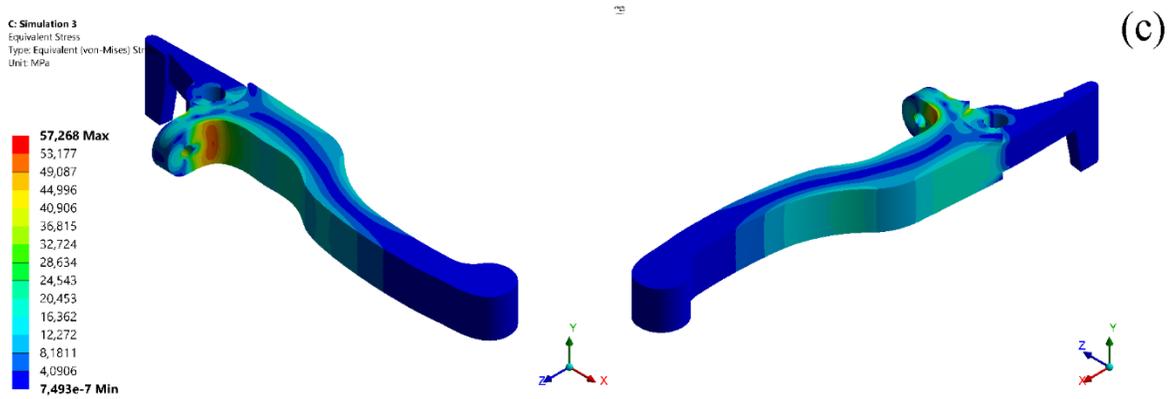
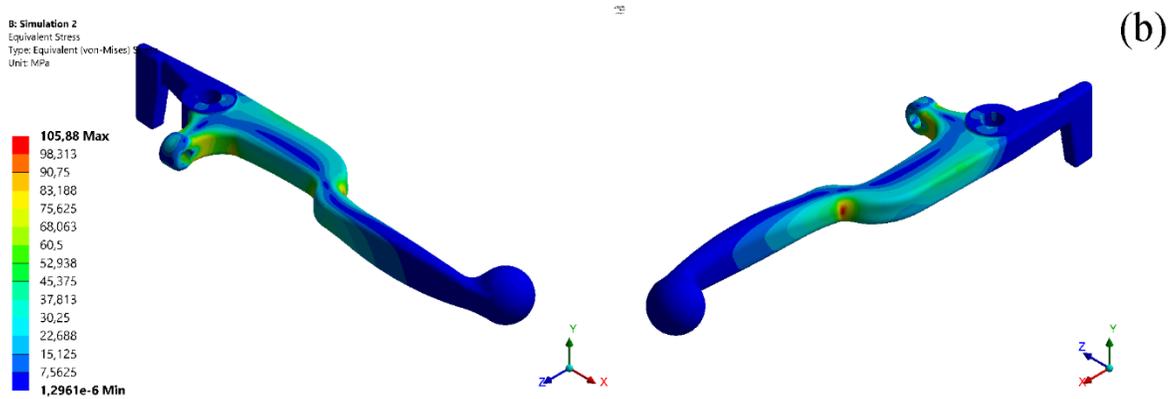
Simulación	Esfuerzo equivalente máximo [MPa]	Factor de seguridad mínimo	Masa [gr]
1	105.97	2.64	80.26
2	105.88	0.31	35.75
3	57.27	0.57	64.67
4	44.98	0.74	75.07
5	21.7	1.53	58.84

Fuente: Autor.

Se observa una similitud en el esfuerzo equivalente entre la simulación 1 y 2, debido a que en ambos casos se usa la misma geometría. No obstante, el factor de seguridad se reduce significativamente, de 2.64 a 0.31, debido al cambio de material de aluminio por el material compuesto. Del mismo modo se presenta una reducción en la masa, de 80.26 a 35.75 gramos.

En las simulaciones 3, 4 y 5, se observa una disminución en el esfuerzo equivalente y aumento en el factor de seguridad, al variar la geometría. El mejor resultado en los valores, fue proporcionado por la geometría modificada 3 asignando las propiedades del material compuesto RP-AS de la simulación 5, con un esfuerzo equivalente de 21.7 MPa, un factor de seguridad de 1.53, y una reducción de 21.42 gramos en la masa con respecto a la geometría original de la simulación 1.





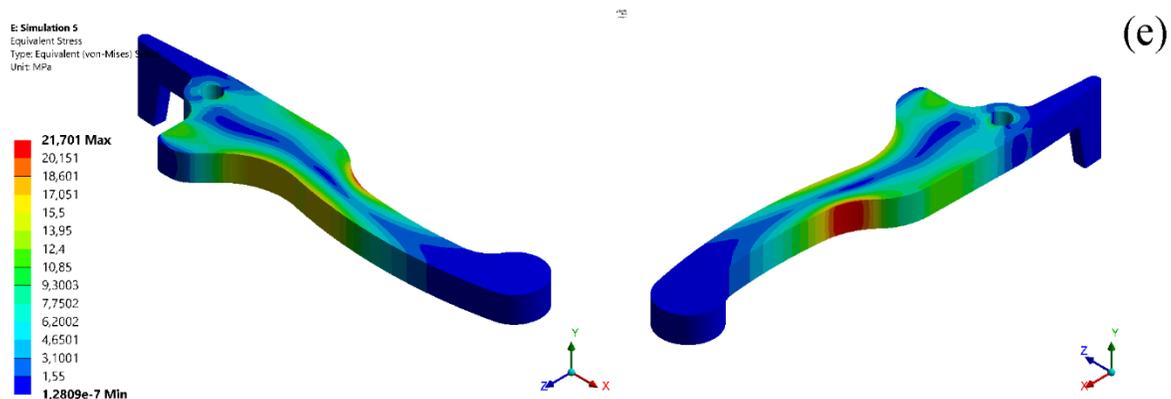


Figura 19. Resultados cualitativos de las simulaciones: (a) Simulación 1. (b) Simulación 2. (c) Simulación 3. (d) Simulación 4. (e) Simulación 5.

Fuente: Autor.

Por otra parte, la Fig. 19 muestra los resultados cualitativos de las simulaciones. En ella, se observa la distribución de los esfuerzos equivalentes, y en color rojo, las zonas críticas de cada una de las piezas simuladas. Es importante resaltar, que en las zonas con mayor esfuerzo equivalente (zonas críticas), se encuentran los valores mínimos de factor de seguridad.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

Se obtuvieron las partículas micrométricas de arcilla sinterizada, mediante un proceso de reducción de los fragmentos de ladrillo. De este proceso, se obtuvo una distribución granulométrica, de la cual, el 51.35% de la muestra tamizada mostró impurezas a nivel macro, que descartaron de inmediato el uso de partículas con un tamaño superior a $425\ \mu\text{m}$. El tamaño de grano utilizado como refuerzo de las matrices termoestables ($< 75\ \mu\text{m}$) es el tercero con mayor presencia, con un 2.82%.

Los resultados de los ensayos de tracción, mostraron una baja dispersión de los resultados. Del mismo modo, la adición del refuerzo de arcilla sinterizada, aumentó las propiedades mecánicas de las resinas termoestables en estudio. Además, el comportamiento mecánico del material compuesto se mantuvo en elástico lineal, por lo que este está influenciado directamente por las matrices termoestables. Por último, el material que obtuvo las mejores propiedades mecánicas a tracción, fue la resina poliéster reforzada con partículas micrométricas de arcilla sinterizada.

Los resultados de los ensayos de flexión, mostraron una alta dispersión de los resultados, particularmente en los materiales a base de resina poliéster. Por otra parte, la adición del refuerzo conllevó a una disminución en las propiedades mecánicas de las resinas termoestables sin reforzar. Por lo anterior, el material con las mejores propiedades a flexión fue la resina poliéster sin refuerzo. Además, nuevamente el comportamiento elástico lineal se mantuvo, independientemente del refuerzo particulado.

La validación por el método de elementos finitos, permitió demostrar la efectividad de la metodología de optimización propuesta. Esto se afirma, gracias a que en los resultados obtenidos, al realizar modificaciones a la geometría de la leva y asignar el material compuesto de resina poliéster reforzado con arcilla sinterizada, se redujeron los esfuerzos equivalentes y la masa, y se logró un factor de seguridad aceptable, con respecto a la leva de freno original con el material de fabricación tradicional usado para este tipo de piezas.

Se pudo manufacturar un prototipo de la leva de freno validada computacionalmente. Esto permitió ensamblar la leva en el manubrio de la motocicleta y comprobar el diseño correcto de cada una de las secciones para cumplir de manera adecuada con todas las funciones preestablecidas.

Se demostró la viabilidad, desde el punto de vista mecánico, del uso de las micropartículas obtenidas a partir de fragmentos de ladrillos procesados, para reforzar matrices termoestables. En ambos casos (resina poliéster y bioepoxi), las propiedades se vieron

favorecidas gracias a la adición de un 10% del refuerzo. Con esto, se abre paso para futuras investigaciones, relacionadas con la recolección y procesamiento de residuos particulados, con el fin de impulsar el desarrollo sostenible en las industrias generadoras de este tipo de desechos.

*

REFERENCIAS

- [1] Kurtyka, P. y Rylko, N. *Quantitative analysis of the particles distributions in reinforced composites*. Composite Structures, 182, pp. 412-419, 2017. DOI: [10.1016/j.compstruct.2017.09.048](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.09.048).
- [2] Kavadi, B.V., Pandey, A.B., Tadavi, M.V. y Jakharia, H.C. *A Review paper on effects of drilling on glass fiber reinforced plastic*. Procedia Technology, 14, pp. 457-464, 2014. DOI: [10.1016/j.protcy.2014.08.058](https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.08.058).
- [3] Wang, H.W., Zhou, H.W., Gui, L.L., Ji, H.W. y Zhang, X.C. *Analysis of effect of fiber orientation on Young's modulus for unidirectional fiber reinforced composites*. Composites Part B: Engineering, 56, pp. 733-739, 2014. DOI: [10.1016/j.compositesb.2013.09.020](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.020).
- [4] Rafiee, R. *On the mechanical performance of glass-fibre-reinforced thermosetting-resin pipes: A review*. Composite Structures, 143, pp. 151-164, 2016. DOI: [10.1016/j.compstruct.2016.02.037](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.02.037).
- [5] Jansson, J., Gustafsson, T., Salomonsson, K., Olofsson, J., Johansson, J., Appelsved, P. y Palm, M. *An anisotropic non-linear material model for glass fibre reinforced plastics*. Composite Structures, 195, PP. 93-98, 2018. DOI: [10.1016/j.compstruct.2018.04.044](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.044).
- [6] Kim, J.R. y Netravali, A.N. *Self-healing starch-based 'green' thermoset resin*. Polymer, 117, pp. 150-159, 2017. DOI: [10.1016/j.polymer.2017.04.026](https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.04.026).
- [7] Jiang, H., Sun, L., Zhang, Y., Liu, Q., Ru, C., Zhang, W. y Zhao, C. *Novel biobased epoxy resin thermosets derived from eugenol and vanillin*. Polymer Degradation and Stability, 160, pp. 45-52, 2019. DOI: [10.1016/j.polymdegradstab.2018.12.007](https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.12.007)
- [8] Kim, J.R. y Netravali, A.N. *Self-healing green composites based on soy protein and microfibrillated cellulose*. Composites Science and Technology, 143, pp. 22-30, 2017. DOI: [10.1016/j.compscitech.2017.02.030](https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2017.02.030)
- [9] Cheng, H. *Reuse research progress on waste clay brick*. Procedia Environmental Sciences, 31, pp. 218-226, 2016. DOI: [10.1016/j.proenv.2016.02.029](https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.02.029)
- [10] Wong, C.L., Mo, K.H., Yap, S.P., Alengaram, U.J. y Ling, T.-C. *Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review*. Journal of Cleaner Production, 195, pp. 226-239, 2018. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.05.193](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.193).

- [11] Aliabdo, A.A., Abd-Elmoaty, M. y Hassan, H.H. *Utilization of crushed clay brick in concrete industry*. Alexandria Engineering Journal, 53 (1), pp. 151-168, 2014. DOI: [10.1016/j.aej.2013.12.003](https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.12.003).
- [12] Ogin, S.L., Brøndsted, P. y Zangenberg, J. *Modeling damage, fatigue and failure of composite materials* [en línea]. Woodhead Publishing, 2016, cap. 1, *Composite materials: constituents, architecture, and generic damage*. DOI: [10.1016/B978-1-78242-286-0.00001-7](https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-286-0.00001-7).
- [13] Groover, M. P. *Fundamentos de manufactura moderna*, tercera edición, McGraw Hill Interamericana, México, 2007.
- [14] Rajak, D.K., Pagar, D.D., Kumar, R. y Pruncu, C.I. *Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials*. Journal of Materials Research and Technology, 8 (6), pp. 6354-6374, 2018. DOI: [10.1016/j.jmrt.2019.09.068](https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.09.068).
- [15] Sharma, A.K., Bhandari, R., Aherwar, A. y Rimašauskienė, R. *Matrix materials used in composites: A comprehensive study*. Materials Today: Proceedings, en prensa, 2019. DOI: [10.1016/j.matpr.2019.11.086](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.086).
- [16] Obande, W., Mamalis, D., Ray, D., Yang, L. y Ó Brádaigh, C.M. *Mechanical and thermomechanical characterisation of vacuum-infused thermoplastic- and thermoset-based composites*. Materials & Design, 175, 107828, 2019. DOI: [10.1016/j.matdes.2019.107828](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107828).
- [17] Naguib, H.M., Kandil, U.F., Hashem, A.I. y Boghdadi, Y.M. *Effect of fiber loading on the mechanical and physical properties of “green” bagasse–polyester composite*. Journal of Radiation Research and Applied Sciences, 8 (4), pp. 544-548, 2015. DOI: [10.1016/j.jrras.2015.06.004](https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.06.004).
- [18] Kosar, V. y Gomzi, Z. *Crosslinking of an unsaturated polyester resin in the mould: Modelling and heat transfer studies*. Applied Mathematical Modelling, 34 (6), pp. 1586-1596, 2010. DOI: [10.1016/j.apm.2009.09.004](https://doi.org/10.1016/j.apm.2009.09.004).
- [19] Liu, L., Xu, Y., Xu, M., He, Y., Li, S. y Li, B. *An efficient synergistic system for simultaneously enhancing the fire retardancy, moisture resistance and electrical insulation performance of unsaturated polyester resins*. Materials & Design, 187, 108302, 2020. DOI: [10.1016/j.matdes.2019.108302](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108302).
- [20] Hodd, K. *Comprehensive polymer science and supplements* [en línea]. Pergamon, 1989, vol. 5, *Step polymerization*. DOI: [10.1016/B978-0-08-096701-1.00178-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096701-1.00178-6)
- [21] López, S.H. y Santiago, E. V. *Temas selectos en ciencia de materiales I*, primera edición,

Cuernavaca, Facultad de Química – Universidad Autónoma del Estado de México, 2015, pp. 21-25.

[22] Derrien, K., Morin, L. y Gilormini, P. *Designing isotropic composites reinforced by aligned transversely isotropic particles of spheroidal shape*. Comptes Rendus Mécanique, 246 (12), pp. 1123-1135, 2018. DOI: [10.1016/j.crme.2018.09.004](https://doi.org/10.1016/j.crme.2018.09.004).

[23] K. Palanikumar. *Machining Technology for Composite Materials* [en línea]. Woodhead Publishing, 2012, cap. 6, *Analyzing surface quality in machined composites*. DOI: [10.1533/9780857095145.1.154](https://doi.org/10.1533/9780857095145.1.154).

[24] García, N.A., Ibarra J., A.C. y López D., C.A. *Caracterización de arcillas empleadas en pasta cerámica para la elaboración de ladrillos en la zona de Ocaña, Norte de Santander*. Epsilon, 20, pp. 101-119, 2013.

[25] Barranzuela L. y Ruiz P., G. *Proceso productivo de los ladrillos de arcilla producidos en la Región Piura*. Tesis de pregrado, Ingeniería Civil, Universidad de Piura, Perú, 2014.

[26] Linares G., J., Huertas G., F. y Capel M., J. *La arcilla como material cerámico: características y comportamiento*. Cuadernos de Prehistoria y Arqueología, 8, pp. 479-489, 1983. DOI: [10.30827/cpag.v8i0.1224](https://doi.org/10.30827/cpag.v8i0.1224).

[27] NTC 4205-2, *Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos. Parte 2: mampostería no estructural*. ICONTEC, Ingeniería Civil, 2009, www.icontec.org.

[28] Rozo R., S.M., Sanchez M., J. y Alvarez R. D.C. *Propiedades físico mecánicas de bloques H10 fabricados en el área metropolitana de Cúcuta*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 24 (1), pp. 67-78, 2014. DOI: [10.18359/rcin.8](https://doi.org/10.18359/rcin.8).

[29] Bahman, A.S. y Iannuzzo, F. *Wide bandgap power semiconductor packaging* [en línea]. Woodhead Publishing, 2018, cap. 8, *Computer-aided engineering simulations*. DOI: [10.1016/B978-0-08-102094-4.00010-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102094-4.00010-4).

[30] Datta, A.K. *Toward computer-aided food engineering: Mechanistic frameworks for evolution of product, quality and safety during processing*. Journal of Food Engineering, 176, pp. 9-27, 2016. DOI: [10.1016/j.jfoodeng.2015.10.010](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.10.010).

[31] Schleich, B. y Wartzack, S. *How can computer aided tolerancing support closed loop tolerance engineering?*. Procedia CIRP, 21, pp. 312-317, 2014. DOI: [10.1016/j.procir.2014.03.129](https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.129).

- [32] Neittaanmäki, P. y Repin, S. *Studies in mathematics and its applications*. Elsevier, 2004, vol. 33, cap. 4, *A posteriori estimates for finite element approximations*. DOI: [10.1016/S0168-2024\(04\)80005-5](https://doi.org/10.1016/S0168-2024(04)80005-5).
- [33] Bless, R.R. y Hodges, D. H. *Control and dynamic systems*. Academic Press, 1995, vol. 72, *A finite element method for the solution of optimal control problems*. DOI: [10.1016/S0090-5267\(06\)80053-8](https://doi.org/10.1016/S0090-5267(06)80053-8).
- [34] Ramirez, W.F. *Computational Methods in Process Simulation*, segunda edición, Butterworth-Heinemann, 1997, cap. 8, *Solution of partial differential equations*. DOI: [10.1016/B978-075063541-7/50010-X](https://doi.org/10.1016/B978-075063541-7/50010-X).
- [35] Liu, C., Zhang, Y., Li, X., Luo, J., Gao, Q. y Li, J. “Green” bio-thermoset resins derived from soy protein isolate and condensed tannins. *Industrial Crops and Products*, 108, pp. 363-370, 2017. DOI: [10.1016/j.indcrop.2017.06.057](https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.057).
- [36] Temmink, R., Baghaei, B. y Skrifvars, M. *Development of biocomposites from denim waste and thermoset bio-resins for structural applications*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 106, pp. 59-69, 2018. DOI: [10.1016/j.compositesa.2017.12.011](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.12.011).
- [37] Adamson, M., Razmjoo, A. y Poursaee, A. *Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate*. *Construction and Building Materials*, 94, pp. 426-432, 2015. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2015.07.056](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.056).
- [38] Velasquez, N. Parra, C.P. y Triviño, N.R. Aportes a la evaluación del comportamiento mecánico de las estructuras de entibación minera tipo puerta alemana fabricada en resina poliéster-polvos cerámicos. Tesis de pregrado, Ingeniería Mecánica, Universidad de Pamplona, Colombia, 2015.
- [39] ASTM C136/C136M. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org. DOI: [10.1520/C0136_C0136M-14](https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-14).
- [40] ASTM D638. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org. DOI: [10.1520/D0638-14](https://doi.org/10.1520/D0638-14).
- [41] ASTM D790. *Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org. DOI: [10.1520/D0790-17](https://doi.org/10.1520/D0790-17).
- [42] García L., R. A. y Flórez S., E. *Dynamic analysis of three autoventilated disc brakes*.

Ingeniería e Investigación, 37 (3), pp. 102-114, 2017. DOI: [10.15446/ing.investig.v37n3.63381](https://doi.org/10.15446/ing.investig.v37n3.63381).

[43] Marina, M., Porta, J., Vallejo, L. y Angulo, R. *Monitoring hand flexor fatigue in a 24-h motorcycle endurance race*. Journal of Electromyography and Kinesiology, 21 (2), pp. 255-261, 2011. DOI: [10.1016/j.jelekin.2010.11.008](https://doi.org/10.1016/j.jelekin.2010.11.008).

[44] Lee, J. A. y Sechachalam, S. *The Effect of Wrist Position on Grip Endurance and Grip Strength*. The Journal of Hand Surgery, 41 (10), pp. e367-e373, 2016. DOI: [10.1016/j.jhsa.2016.07.100](https://doi.org/10.1016/j.jhsa.2016.07.100).



ANEXOS

- Anexo 1:** Ficha Técnica de la resina poliéster P-2002.
- Anexo 2:** Ficha de seguridad del sistema bioepoxi Super Sap CLR.
- Anexo 3:** Ficha de seguridad del endurecedor Super Sap CLF Hardener.
- Anexo 4:** Leva de freno original.
- Anexo 5:** Leva de freno modificación 1.
- Anexo 6:** Leva de freno modificación 2.
- Anexo 7:** Leva de freno modificación 3.
- Anexo 8:** Ensamble del molde para la leva de freno.
- Anexo 9:** Ensayos de tracción.
- Anexo 10:** Resultados de tracción unificados.
- Anexo 11:** Ensayos de flexión.
- Anexo 12:** Resultados de flexión unificados.
- Anexo 13:** Simulaciones en ANSYS.