



**ESTUDIO DE APLICABILIDAD DE
MATERIAL BIOCOPUESTO CON FIBRA
DE CASCARILLA DE ARROZ PARA LA
FABRICACIÓN DE ENGRANAJES DE
DIENTE RECTO PARA APLICACIONES DE
BAJA CARGA**

Jossi Esteban Galeano Medina

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Neiva, Colombia
2021

ESTUDIO DE APLICABILIDAD DE MATERIAL BIOCOMPUESTO CON FIBRA DE CASCARILLA DE ARROZ PARA LA FABRICACIÓN DE ENGRANAJES DE DIENTE RECTO PARA APLICACIONES DE BAJA CARGA

Jossi Esteban Galeano Medina

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director (a):

Ing. Martha Lucia Solano

Línea de Investigación:

Materiales

Grupo de investigación:

Biomateriales Compuestos de Altas Prestaciones BICAP

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Neiva, Colombia

2021

Dedicatoria o lema

Le dedico este trabajo al señor Dios todo poderoso y a mis padres que me ayudaron en todos los procesos de formación, y a los docentes de la universidad Antonio Nariño que fomentaron la perseverancia y el conocimiento en la carrera

Agradecimientos

Agradezco mucho a la ingeniera Martha Lucia Solano Moreno, vicedecana de ingeniería mecánica y electromecánica, quien estuvo ayudándome en cada consulta y guía de este trabajo de investigación, al grupo de investigación BICAP, que aportaron la información adecuada para la investigación, ya que con mucho esfuerzo y dedicación se logró los objetivos deseados en el transcurso del proyecto. Por otra parte, agradezco mucho también a mi madre, que contribuyo en la parte económica para poder seguir en el proyecto y terminar la carrera de ingeniería mecánica, y a Dios por haber estado apoyándonos con rectitud y perseverancia en situaciones difíciles, que impedían seguir adelante. También, a la universidad UAN, quien apporto a las bases de datos para las consultas de investigación, muchas gracias por todo.

Resumen

El proyecto se basa en estudiar la aplicación de material biocompuesto con cascarilla de arroz (CA) para la fabricación de engranajes de diente plano para sistemas de transmisión de baja potencia; esta idea surge de la necesidad de encontrar alternativas diferentes a los engranajes metálicos y plásticos usados en la industria. Los sistemas de transmisión de potencia están diseñados principalmente con engranajes metálicos de diente plano, caracterizados por ser pesados, costosos de fabricar, difíciles de maquinar, muy ruidosos y requieren constante lubricación, por ello es necesario estudiar alternativas de diseño para estos sistemas mecánicos.

El objetivo del proyecto es desarrollar un engranaje de dientes rectos, usando material biocompuesto de fibra de CA y matriz polimérica, para demostrar la aplicabilidad de acuerdo a sus características mecánicas; desarrollando el proyecto bajo una investigación descriptiva de campo y aplicada, donde se definirá los parámetros de diseño y fabricación para los engranajes a estudiar, para posteriormente realizar pruebas de resistencia mecánica y obtener datos cuantitativos con lo que definir las probables aplicaciones para los engranajes de material compuesto.

Se obtuvo un tipo de engranaje a base de MC de fácil maquinado aplicable a transmisiones de potencia con torques menores a 15 Nm los cuales se podrían aplicar como sustitutos de los engranajes metálicos y plásticos en aplicaciones de transmisión de baja potencia.

Palabras clave: Engranaje, Biocompuesto, Material compuesto (MC), cascarilla de arroz (CA).

Abstract

The project is based on studying the application of biocomposite material with rice husk (CA) for the manufacture of flat tooth gears for low power transmission systems; This idea arises from the need to find different alternatives to the metal and plastic gears used in the industry. Power transmission systems are designed mainly with flat tooth metal gears, characterized by being heavy, expensive to manufacture, difficult to machine, very noisy and require constant lubrication, therefore it is necessary to study design alternatives for these mechanical systems.

The objective of the project is to develop a straight tooth gear, using biocomposite material of AC fiber and polymeric matrix, to demonstrate the applicability according to its mechanical characteristics; developing the project under a descriptive field and applied research, where the design and manufacturing parameters for the gears to be studied will be defined, to later carry out mechanical resistance tests and obtain quantitative data with which to define the probable applications for material gears compound.

An easy machining type of MC-based gear was obtained, applicable to power transmissions with torques less than $15 Nm$. The limes could be applied as substitutes for metal and plastic gears in low-power transmission applications.

Keywords: Gear, Bio composite, Composite Material (MC), rice husk (CA).

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Lista de Figuras.....	XIII
Lista de Tablas.....	XV
Lista de Símbolos y Abreviaturas.....	XVI
Introducción.....	1
1. Marco de Referencia	5
1.1 Estado del Arte.....	5
1.2 Marco teórico	8
1.2.1 Materiales compuestos.....	8
1.2.3 Refuerzo.....	11
1.2.4 Análisis de la composición de un material compuesto.....	14
1.2.5 Generalidades de los engranajes.....	15
1.2.6 Partes de un engranaje.....	18
1.2.7 Fabricación de engranajes.....	21
1.2.8 Fallas en los engranajes.....	22
1.2.9 Ensayos no destructivos (NDT) aplicados a engranajes.....	25
2. Desarrollo de engranajes.....	27
2.1 Diseño de engranajes	27
2.2 Estructura del MC.....	28
2.2.1 Resina poliéster altos solidos.....	29
2.2.2 Determinación de la proporción	29
2.2.3 Obtención de la materia prima trituración de la fibra.....	31
2.2.4 Separación por método de granulometría de la cascarilla de arroz.....	32
2.3 Fabricación de cilindros a base de MC.....	34
2.4 Maquinado por Torneado de cilindros a base de MC	36
2.5 Maquinado por Fresado de cilindros a base de MC para la obtención de engranajes de dientes rectos.....	39
3. Aplicabilidad de engranajes de diente recto	43
3.1 Prueba en motorreductor.....	44
3.2 Máquina de ensayo de flexión de diente y trabajo rotativo	47
3.3 Equipo de medida torcometro.....	49
3.4 Selección y nomenclatura de los engranajes a ensayar a base de MC ...	50
3.5 Montaje del sistema para pruebas.....	51
3.6 Validación del rpm.....	53
3.7 Aplicación de tintas penetrantes.....	53
3.8 Ensayo de flexión de diente en engranaje recto de MC.....	54
3.9 Ensayo dinámico rotativo de engranaje recto de MC.....	56

4. Conclusiones y recomendaciones.....	60
4.1 Conclusiones.....	60
4.2 Recomendaciones.....	62
A. Anexo A: Ficha técnica resina de poliéster altos sólidos.....	63
B. Anexo B: Ficha técnica tinta penetrante y revelador.....	65
Bibliografía.....	68

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Clasificación de los materiales compuestos.	8
Figura 1-2: Componentes de un material compuesto.	9
Figura 1-3: Clasificación de las fibras naturales.....	13
Figura 1-4: Composición elemental de la cascarilla de arroz a diferentes porcentajes de humedad en Colombia.	14
Figura 1-5: Engranaje cilíndrico recto.	16
Figura 1-6: Cilíndricos Helicoidales.	16
Figura 1-7: Engranaje helicoidal en V.	17
Figura 1-8: Cónicos Helicoidales.	17
Figura 1-9: Engranajes cónicos helicoidales.....	18
Figura 1-10: Partes de un engranaje.	19
Figura 1-11: Clasificación de la fabricación de engranajes.	21
Figura 1-12: Falla por desgaste.	23
Figura 1-13: Falla por fatiga Superficial.	23
Figura 1-14: Fractura por sobrecarga.	24
Figura 1-15: Rotura de diente.	24
Figura 1-16: Fallas combinadas.	25
Figura 2-1: Engranaje de diente recto de 20 dientes.	27
Figura 2-2: Muestras de fibra CA.....	29
Figura 2-3: mezcla en proporción de volumen fibra - resina.....	29
Figura 2-4: Proceso de mezclado fibra y resina.....	30
Figura 2-5: tipos de grano obtenidos por tamizaje	33
Figura 2-6: Empacado y marcación de muestras de grano #20, #30 y #40.	33
Figura 2-7: Alineación del cilindro con el embolo de la prensa hidráulica.	35
Figura 2-8: Prensado de material compuesto cascarilla de arroz.	35
Figura 2-9: Bloque en bruto, cilindro final.	36
Figura 2-10: Instalación de centro punto bloque de MC.....	37
Figura 2-11: desbaste de MC para la obtención del diámetro exterior del cilindro.	38
Figura 2-12: Maquinado final del cilindro presencia de porosidad.....	38
Figura 2-13: Fabricación de engranaje de 24 dientes.	39
Figura 2-14: instalación de herramienta para corte y perforación de engranajes.	40
Figura 2-15: engranajes de dientes rectos de 20 y 24 dientes ancho del diente 7 m.	40
Figura 2-16: engranajes de diente recto de 20 dientes	41
Figura 2-17: engranajes de diente recto de 24 dientes.	41
Figura 3-1: Motorreductor Jenbacher.	44
Figura 3-2: Caja reductora para prueba de engranajes.	44
Figura 3-3: Desarme de motorreductor y modificación de anclajes.....	45

Figura 3-4: Presentación de engranajes de acuerdo con su distancia entre centros.	45
Figura 3-5: toma de dimensiones de acuerdo con el ajuste de las tuercas.	46
Figura 3-6: Descripción y características del Taladro atornillador B&D.	46
Figura 3-7: Visual de los engranajes después de la prueba.	47
Figura 3-8: Diseño de ensamble para prueba de resistencia de engranajes.	48
Figura 3-9: Presentación, acotación y perforación placa de 12 mm.	48
Figura 3-10: Presentación final de componentes.	49
Figura 3-11: Máquina de prueba de engranajes.	49
Figura 3-12: Torcometro de 0-150 in-lb, marca Snap-on	50
Figura 3-13: Nomenclatura de engranajes de MC	51
Figura 3-14: Presentación del montaje del sistema.	51
Figura 3-15: Acople de torcometro al eje de ensayo.	52
Figura 3-16: acoplamiento del equipo rotativo para ensayo dinámico.	52
Figura 3-17: Medición de rpm por medio de tacómetro Lutron.	53
Figura 3-18: Inspección por tintas penetrantes en MC.	54
Figura 3-19: Equipos rotativos para prueba dinámica.	56
Figura 3-20: Falla en lateral del diente MC	58
Figura 3-21: huella de rodadura de engranaje recto.	59

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: datos característicos de los engranajes diseñados	28
Tabla 2-2: Muestras de MC en proporción 70% - 30%	31
Tabla 2-3: Muestras de MC en proporción 60% - 40%	31
Tabla 2-4: Velocidad de corte según maquinado para MC	37
Tabla 2-5: Velocidad de avance según maquinado para MC	37
Tabla 3-1: Resistencia a flexión en diente de MC en in-lb	55
Tabla 3-2: Resistencia a flexión en diente de MC en Nm	55
Tabla 3-3: Temperatura de operación a intervalos de 4 min en °F	57
Tabla 3-4: Valoración cualitativa de engranajes después de prueba dinámica.	58

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término
m	Modulo
d	Diametro primitivo
Z	Numero de dientes
C	Distancia entre centros
p	Paso circular
H	Profundidad del diente
j	Juego de engranaje entre dientes

Símbolos con letras especiales

Símbolo	Término
Å	Angstrom
α	Angulo de presión

Subíndices

Subíndice	Término
f_v	Fracción volumétrica
f_{vf}	Fracción volumétrica de la fibra
f_{vm}	Fracción volumétrica de la matriz
d_b	Diámetro base
P_b	Paso base
e_b	Espesor base
d_e	Diámetro exterior

Abreviaturas

Abreviatura	Término
MC	Material Compuesto
MMC	Compuesto de matriz metálica
CMC	Compuesto de matriz cerámica
PMC	Compuesto de matriz polimérica

Introducción

El ser humano siempre ha buscado la forma de optimizar procesos, desarrollando tecnologías que le permitan realizar trabajos con una menor cantidad de esfuerzo; los engranajes son un ejemplo de ello, se utilizan para transmitir potencia mecánica entre las distintas partes de una máquina, ayudan a simplificar tareas y elevar cargas con un menor esfuerzo, una de las aplicaciones más importantes de los engranajes es la transmisión del movimiento desde el eje de una fuente de energía, hacia otro engranaje encargado de multiplicar la velocidad o su torque (Ligero, 2018).

A la hora de diseñar un engranaje, el material en el cual se fabricará es uno de los criterios más relevantes, debido a que este define las características más importantes y propiedades mecánicas. El uso de polímeros y materiales compuestos ha tenido un notable aumento dentro de diferentes campos de la ingeniería, debido principalmente a su bajo costo y aumento de las propiedades mecánicas de las piezas.

Pawar en su investigación sobre materiales compuestos (MC) determino que este tipo de material proporcionan una resistencia adecuada con reducción de peso y se han convertido en una mejor alternativa para reemplazar los engranajes metálicos (Pawar & Utpat, 2015) en uno de sus estudios, donde encontró que los engranajes de MC estudiados presentan una reducción en peso del 60% y una potencia nominal similar a la de los engranajes de acero.

Por lo cual, estos materiales han revolucionado la forma de diseñar piezas mecánicas y el desempeño de estas dentro de la industria. En este ambiente podemos encontrar el uso de los engranajes, siendo estos uno de los mecanismos de transmisión de potencia más utilizados en el ámbito mecánico (Díaz, 2013).

Por otra parte, uno de los estudios más destacados en cuanto a engranajes de material compuesto fue el realizado por Atul Sharma y otros, quienes investigaron el efecto de las propiedades de amortiguación del material en los engranajes y el nivel de ruido en engranajes rectos para aplicaciones de carga ligera en vehículos automotores, comparando engranajes de tres materiales diferentes (acero AISI 4140, material compuesto particulado AA2014 y polímero reforzado con fibra de vidrio). Los resultados indicaron que los engranajes rectos de polímero reforzado con fibra de vidrio son mejores que los engranajes metálicos en aplicaciones de transmisión de potencia de carga ligera, debido a su menor ruido y factor de amortiguación (Sharma et al., 2017). Bajo esta investigación experimental se muestran los beneficios de usar materiales sintéticos como una alternativa a los materiales ya conocidos.

La necesidad de fabricar engranajes más eficientes y con mejores propiedades ha llevado a diferentes investigadores a utilizar los materiales compuestos; Varun Rajan y su equipo estudiaron el uso de engranajes fabricados con MC de espuma metálica y resina epoxi, encontrando excelentes resultados en comparación con engranajes plásticos, evidenciaron un aumento de aproximadamente 3 veces en la resistencia a la flexión del polímero reforzado con espuma metálica de níquel en comparación con polímero no reforzado, además, un aumento en la resistencia a la tracción en los engranajes reforzados con espuma de aluminio (Rajan et al., 2020).

El uso de la cascarilla de arroz ha sido objeto de estudio dentro del semillero de investigación BICAP de la universidad Antonio Nariño sede Neiva, con el fin de buscar usos alternos para esta materia prima. En las diferentes investigaciones realizadas se logró evidenciar las propiedades mecánicas del material biocompuesto de CA y resina de poliéster; en los ensayos de tracción el esfuerzo máximo promedio fue de 12.88 Mpa, el módulo de Young de 38.61 Mpa y a flexión el esfuerzo máximo obtenido fue de 31.73 Mpa, con un módulo de Young de 82.54 Mpa (Solano, 2017); finalmente a compresión, el esfuerzo máximo promedio fue de 70.54 Mpa, (Castro & Silva, 2018). Estas características hacen de este material biocompuesto una buena opción para la fabricación de engranajes.

Con el fin de contribuir al estudio de nuevos materiales y sus aplicaciones industriales se estudió el uso del material biocompuesto con CA (material caracterizado en diferentes estudios del semillero de investigación BICAP), para la fabricación de engranajes de diente plano y su uso dentro de la industria como una opción alternativa a los engranajes metálicos y plásticos.

Con este proyecto se obtiene información relevante para el estudio de los MC que pueden ser aplicados a la industria regional y nacional, lo que podría dar a conocer otro uso para la CA, materia prima que predomina en cada una de las zonas arroceras del país. La industria se vería beneficiada con el uso de tecnología de materiales como la que se estudia aquí, logrando aumentar la eficiencia de diferentes sistemas mecánicos, reduciendo costos operativos de los equipos mecánicos.

Se definió como el objetivo general de este proyecto “Determinar la aplicabilidad de material biocompuesto con cascarilla de arroz para la fabricación de engranajes en aplicaciones de baja potencia”, el cual se llevará a cabo con el cumplimiento de tres objetivos específicos, los cuales van relacionados con cada etapa del proyecto:

1. Identificar los criterios de diseño para la fabricación de engranajes rectos en MC.
2. Desarrollar un engranaje recto de bajo peso y fácil fabricación que cumpla con las características técnicas para transmisiones de baja potencia.
3. Evaluar las propiedades mecánicas del engranaje de dientes rectos de acuerdo a su aplicabilidad.

Esta investigación se limita al desarrollo del engranaje recto de material biocompuesto a base de cascarilla de arroz y matriz polimérica, la caracterización de las propiedades del material y el análisis de la resistencia de los dientes, para determinar la el torque máximo a transmitir de esta manera asignar un uso a nivel industrial mediante ensayos físicos y mecánicos; buscando la presentación de un producto con características propias de los MC.

El proyecto se desarrollará bajo una investigación descriptiva de campo y aplicada, que permita obtener la información necesaria para determinar las propiedades mecánicas de los engranajes de dientes rectos de MC, evaluando la resistencia de

los dientes a flexión. Para la ejecución del proyecto, este debe pasar por 3 fases, iniciando en una fase documental, pasando por la aplicativa y finalizando en la etapa evaluativa o de análisis.

- **Fase identificativa:** Se recopilaron datos de investigaciones realizadas por semillero BICAP, para obtener la información importante que sirve como punto de partida para la determinación de las propiedades mecánicas del material, se consultaron bases de datos sobre investigaciones en engranajes de MC y tipos de ensayos realizados en estos. En la **Fase aplicativa:** Para la elaboración de los engranajes de diente recto se procedió a estudiar los métodos de fabricación de engranajes rectos, seleccionando moldeo por compresión, se clasificó la fibra por medio de malla calibrada No 25 y 30 obteniéndose 3 tipos de grano diferente que permitirán fabricar el bloque central de MC cuyo diámetro será de 3", con la materia prima lista se procederá a maquinar los cilindros para darle los diámetros adecuados para la fabricación de 12 engranajes de módulo 2.5, este módulo permite que se pueda obtener un buen tamaño del diente facilitando su estudio; la cantidad de dientes se determinó de acuerdo al diámetro exterior del bloque de MC seleccionando fabricar engranajes de 20 y 24 dientes. Por otra parte, para realizar los respectivos ensayos, se fabricó un banco de pruebas dinámicas de engranajes donde se realizaron una serie de pruebas mecánicas para determinar el punto de ruptura del diente y temperatura de operación; adicionalmente obtener datos de abrasión, desgaste y picadura en los engranajes, datos que se analizaron en la **Fase de analítica** teniendo los datos cuantificados se procede a procesar esta información mediante hojas de cálculo, donde se obtienen valores de esfuerzos, coeficientes y porcentajes a ser comparados de manera gráfica con engranes convencionales de polímeros, esto hará que el análisis sea más intuitivo, determinando las propiedades mecánicas, acústicas del MC.

Con la implementación de este estudio, se logró la fabricación de engranajes rectos a base de MC para aplicaciones de baja carga con el fin de diversificar el uso de los materiales compuestos a base de CA, los cuales han sido estudiados dentro de la facultad de ingeniería mecánica en la seccional Huila, lo que permitiría introducir un mercado alternativo para la elaboración de engranajes de acuerdo con su aplicabilidad, esto bajo los estándares de la norma NTC 1140.

1. Marco de Referencia

En este capítulo se hace la revisión documental y bibliográfica del estudio de los materiales compuestos y el uso de fibras naturales como elementos de refuerzo. Se plantea el estado actual del estudio de los materiales, los antecedentes de estudios realizados con cascarilla de arroz para aplicaciones en materiales compuestos y los antecedentes del uso de estos en la fabricación engranajes.

1.1 Estado del Arte

Los engranajes rectos son uno de los elementos mecánicos más simples y utilizados en cuanto a transmisión de potencia y se requieren para operar máquinas en carga variable y velocidad. Los dientes de los engranajes normalmente fallan cuando la carga aumenta por encima de cierto límite. Por esta razón se requiere explorar materiales alternativos para la fabricación de engranajes y los materiales compuestos proporcionan una resistencia adecuada con reducción de peso (Pawar & Utpat, 2015).

Para el diseño y fabricación de un engranaje se debe tener en cuenta la normativa y los estándares definidos por las diferentes organizaciones técnicas. Para Colombia se tiene que tener en cuenta la norma técnica colombiana (NTC) 1140 basada en la norma española UNE 18066, el cual es el documento que define las características y medidas de los engranajes cilíndricos, con dentado recto o helicoidal (ICONTEC, 2018). Esta norma va a ser de vital importancia en este proyecto, sobre todo en la etapa de diseño de los engranajes para el cálculo de cada una de las dimensiones, además, esta norma define las diferentes variables y la nomenclatura a la hora de tratar con engranajes. Cabe aclarar que la norma NTC 1140 se puede usar para engranajes de cualquier material, ya que esta define los parámetros para engranajes

6 Estudio de aplicabilidad de material biocompuesto con fibra cascarilla de arroz para la fabricación de engranajes de diente recto para aplicaciones de baja carga

de diente recto y helicoidal, siendo esta la única característica para poder aplicar la norma.

Ahora bien, un material compuesto consiste en la combinación a nivel macroscópico de dos o más componentes no solubles entre ellos que se unen sinérgicamente, obteniéndose un material con una mayor capacidad estructural que la de sus constituyentes cuando actúan por separado (Pérez & Sánchez, 2014). Las propiedades que se obtienen son un producto de la combinación de los refuerzos que se utilizan y de la matriz que soporta al refuerzo en los materiales compuestos (Pino Rivero, 2017).

Por lo cual, la aparición de los materiales compuestos y el desarrollo de los mismos para dar solución a diversos problemas de ingeniería ha sido uno de los sucesos más relevantes de los últimos años, Sus beneficios más que demostrados han hecho que sectores como el eólico, la automoción, el ferroviario o la construcción se hayan unido al uso de estos MC. A medida que se ha ido estudiando y perfeccionado el uso de los compuestos, estos han ido sustituyendo a los materiales ya existentes, como los metales y sus aleaciones.

Además, dentro de los estudios para la caracterización del MC con cascarilla de arroz, se destaca el realizado por Castro & Silva (2018), quienes caracterizaron perfiles cilíndricos de material compuesto fabricados con refuerzo natural de cascarilla de arroz, estudiaron la resistencia de los mismos con diferentes granulometrías, conservando la misma proporción de resina en cada probeta. Los resultados obtenidos en cada tipo de probeta indican un aumento en la resistencia al aplastamiento cada vez que el grano disminuye su tamaño, estos datos se obtuvieron de diferentes ensayos a compresión del material y tomas microscópicas del compuesto.

Una de las investigaciones más relevantes en cuanto a engranajes de material compuesto fue la realizada por Sharma et al. (2017), quienes al comparar engranajes

metálicos y de MC encontraron que los engranajes rectos de polímero reforzado con fibra de vidrio son mejores que los engranajes metálicos en aplicaciones de transmisión de potencia de carga ligera, debido a su menor ruido y mayor factor de amortiguación.

Cabe mencionar que, en los últimos años se ha popularizado el uso de fibras naturales para el estudio de materiales bio-compuestos, los cuales son originados al combinar una fibra natural con una matriz que puede ser sintética o natural. Estas fibras se extraen de la vellosidad de algunas semillas, como el algodón; de los tallos, como el lino y el cáñamo; fibras de follajes, como el sisal; y fibras de cáscaras, como las de arroz (Marín & Monroy, 2013).

Por lo tanto, la cascarilla de arroz ha sido estudiada por diversos investigadores para aplicaciones de ingeniería y el desarrollo de materiales compuestos, debido a las propiedades que presenta esta fibra, la cual ha demostrado mejorar las propiedades mecánicas de materiales compuestos y cerámicos, en relación a la resistencia mecánica y la capacidad de aislamiento térmico. La disponibilidad de estas fibras naturales, específicamente la CA en diferentes regiones de Colombia ha llevado a diversos investigadores a estudiar la viabilidad de su aplicación como refuerzo y la medida en que satisfacen las especificaciones requeridas en aplicaciones tribológicas (Omrani et al., 2016).

Uno de los estudios más recientes en relación al uso de la cascarilla de arroz en MC fue el realizado por Andrade et al., (2019), quienes desarrollaron un material compuesto de matriz metálica de aluminio reforzada con partículas de ceniza de cascarilla de arroz. Fabricaron materiales compuestos con matriz formada a partir de residuos de aluminio, específicamente latas, y partículas de sílice amorfa (menor a 1mm) obtenidas del quemado de cascarilla de arroz. Determinaron las propiedades mecánicas de la matriz elaborada a partir de la lata, comparándolas con los resultados de los ensayos mecánicos de dureza y resistencia a la tracción obtenidos de los MC, determinando que a mayores concentraciones de sílice amorfa en la matriz aumentaron la dureza de las aleaciones, mientras que un mayor nivel de sílice amorfa disminuyó la elongación.

A pesar de que existen diversos estudios del uso de fibras naturales como materia prima para MC, hoy en día no se cuenta con mucha información sobre la caracterización de propiedades mecánicas de los compuestos reforzados con fibra natural o el desarrollo de nuevos productos industriales a base de las mismas.

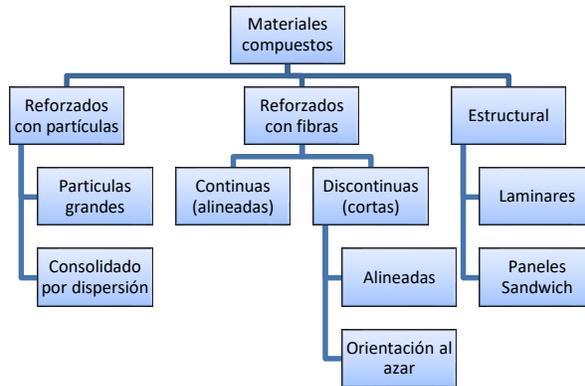
Adicional a esto, en el estudio de los engranajes de MC es de vital importancia identificar el tipo de fallas que se pueden presentar en los mismos, esto se debe a que al analizar las fallas se definen las condiciones de trabajo permisibles para el engranaje. Según las características del MC y al tener en cuenta que este está conformado por una matriz polimérica, podemos asimilar su comportamiento con el de los engranajes plásticos y estudiar sus fallas. Dentro de las fallas más comunes de los engranajes plásticos podemos encontrar las siguientes: desgaste adhesivo, desgaste abrasivo, picadura, flujo plástico, fractura y fatiga por ciclo térmico (Rodríguez et al., 2019).

1.2 Marco teórico

1.2.1 Materiales compuestos

Un material compuesto (MC) se define como la combinación de dos o más materiales, que en forma conjunta obtienen una combinación de sus propiedades mecánicas y físicas; estas propiedades en los materiales compuestos pueden variar debido a diversos factores, podemos obtener materiales con un comportamiento isotrópico o anisotrópico, que se traduce en la resistencia que se puede obtener en cada uno de sus ejes, esto según el tipo de fibra y de cómo estas están distribuidas u orientadas. En la Figura 1-1 se encuentra la clasificación de los materiales compuestos, separados en tres grandes grupos según el tipo de refuerzo, ya sean reforzados con partículas, fibras o estructurales, los cuales potencializan las características intrínsecas de cada tipo de fibra.

Figura 1-1: Clasificación de los materiales compuestos.



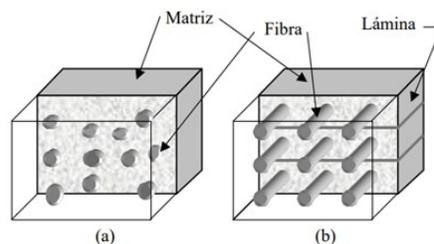
Fuente: Tecnología de los materiales (2015).

Para comprender qué son los materiales compuestos y por qué los necesitamos, debemos estudiar qué características poseen y cómo se relacionan la matriz y el refuerzo. En los materiales compuestos la matriz se junta con las fibras, que pueden ser fibras cortas, largas, partículas o láminas y dependiendo de estas configuraciones, junto con las características intrínsecas de cada componente se obtiene las propiedades específicas del material compuestos (Besednjak, n.d.).

En la figura 1-2, se logra apreciar las composiciones básicas que puede tener un material compuesto.

(a) Compuesto reforzado con partículas. **(b)** Compuesto reforzado con fibras, el cual es un compuesto laminado (la matriz se forma apilando láminas) unidireccional (las fibras están orientadas en este caso en una sola dirección) (Arias & Vanegas, 2004).

Figura 1-2: Componentes de un material compuesto.



Fuente: Falla de los materiales compuestos laminados (2004).

1.2.2 La matriz.

La matriz es la fase continua en la que el refuerzo queda sumergida. Tanto materiales metálicos, cerámicos o resinas orgánicas y sintéticas pueden cumplir con esta labor. A excepción de los cerámicos, el material que se elige como matriz no es, en general, tan rígido ni tan resistente como el material de refuerzo (Pino Rivero, 2017).

Las principales funciones de la matriz en un material compuesto son definir las propiedades físicas y químicas, transmitir las cargas al refuerzo, proteger la fibra y brindarle cohesión al compuesto.

- **Matriz metálica (MMC).**

Son aquellos materiales destinados para aplicaciones de corte y desgaste (carburos cementados, aceros reforzados con carburos, etc.) y aquellos materiales de alta rigidez, resistencia y módulo específico, normalmente destinados para aplicaciones estructurales en la industria automotriz o aeronáutica. Se utilizan cada vez más en la industria automotriz. Estos materiales están formados por una matriz de metales livianos como el aluminio y fibras de refuerzo como las de carburo de silicio (Edil et al., 2015)

- **Matriz Cerámica (CMC).**

Un compuesto de matriz cerámica consiste en fibras cerámicas incrustadas en una matriz también cerámica. Otro nombre alternativo es cerámica reforzada con fibra de cerámica (CRFC). Los tipos comunes de cerámica usados son carburo de silicio, alúmina y mullita (Universal Laser Systems, 2018).

Se usan para aplicaciones de ingeniería en las cuales el material está expuesto a una alta temperatura. Estos materiales están formados por una matriz cerámica y un refuerzo de fibras cortas o whiskers de carburo de silicio o nitruro de boro.

- **Matriz polimérica (PMC).**

Son los materiales compuestos más comunes, también se los conoce como polímeros o plásticos reforzados con fibras.

Los compuestos de matriz polimérica son los más usados y son particularmente adecuados en aplicaciones que requieran alta relación entre la rigidez o la

resistencia y la densidad, tales como las requeridas en la industria aeronáutica y aeroespacial. Dentro de las matrices poliméricas podemos encontrar diferentes tipos, según el comportamiento se definen así:

- **Matriz polimérica termoplásticas.**

Son polímeros que al estar en presencia de altas temperaturas se convierten en un material blando, permitiendo su fácil moldeabilidad. Poseen la cualidad de ser relativamente blandos y dúctiles, entre este tipo de encontramos polipropileno (PP), polietileno (PE), poliestireno (PS) y Cloruro de polivinilo (PVC) (Naval composites, 2010).

- **Matriz polimérica termoestables o termofijas.**

Se encuentran en estado líquido a temperatura ambiente y para llegar al estado sólido pasan por una reacción de entrecruzamiento químico, produciendo el endurecimiento del material, después de esta reacción de curado el material adquiere una forma sólida irreversible. Este tipo de matrices son ideales para la fabricación de materiales compuestos aplicables a ambientes con temperaturas de hasta 200 °C, bajo este umbral no se presentara deformación plástica o degradación en la matriz (Kalpakjian & Schmid, 2014).

- **Elastómeros.**

Los elastómeros son los polímeros que poseen la particularidad de ser estirados muchas veces su propia longitud, para luego recuperar su forma original sin una deformación permanente. Entre los polímeros elastómeros se encuentran el polisopreno o caucho natural, el polibutadieno, el polisobutileno, y los poliuretanos (Juarez et al., 2012).

1.2.3 Refuerzo.

Se entiende como la fase discontinua o dispersa que se agrega a la matriz para agregar al compuesto propiedades que la matriz no posee. En general, el refuerzo se utiliza para incrementar la resistencia y rigidez mecánicas, pero también se emplean refuerzos para mejorar el comportamiento a altas temperaturas o la resistencia a la abrasión.

Las fibras más utilizadas son las de vidrio, carbono y aramida. Estos tres materiales poseen una resistencia a la tracción muy alta. Sin embargo, esto no parece muy

evidente cuando los pensamos como sólidos macizos. Podemos encontrar diferentes tipos de compuestos, dependiendo el tipo de refuerzo que posean, como se muestra a continuación:

- **Compuestos reforzados por partículas.**

Son aquellos materiales compuestos conformados por partículas pequeñas de fibra o material de refuerzo, ubicándose estas de manera aleatoria dentro del MC.

- **Reforzados por dispersión.**

Estos MC están formados partículas de tamaño muy pequeño, con diámetros de 100-2500 Å. Debido a que estas partículas dificultan el movimiento de las dislocaciones, producen un efecto de endurecimiento notable en el material con pequeñas cantidades (Universidad Politécnica de Valencia, 2018).

- **Compuestos reforzados con fibra.**

Son los compuestos más importantes desde el punto de vista tecnológico, con este tipo de fibras se obtienen MC con una elevada resistencia a la fatiga y rigidez, a bajas y altas temperaturas, y simultáneamente una baja densidad, por lo que se pretende conseguir una mejor relación resistencia-peso (Naval Composite, 2016).

Las fibras de refuerzo pueden ser de origen sintético o natural, cada una de ellas posee propiedades que definen las características del material compuesto.

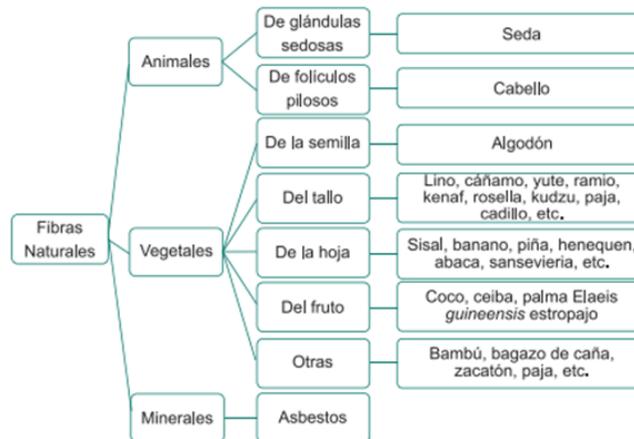
- **Fibras Sintéticas.**

Proviene de diversos productos derivados del petróleo o que se producen por medio de procesos químicos. Las fibras más usadas son las de vidrio, carbono y aramida.

- **Fibras Naturales.**

Existen un sin número de fibras naturales como se denota en la figura 1-3, se pueden clasificar de acuerdo con su origen animal, vegetal y mineral. Las fibras vegetales se están convirtiendo en una alternativa para aplicaciones industriales por su bajo costo, bajo peso y por ser una materia prima renovable con propiedades superiores a otros materiales cuando se utiliza como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica.

Figura 1-3: Clasificación de las fibras naturales



Fuente: Biofibras and biocomposites (2008).

▪ **Origen animal.**

Son todas aquellas fibras obtenidas de los animales, que como tal se encuentran en estado natural y que no exigen más que una ligera adecuación para ser hiladas y utilizadas como materia textil. Pueden ser de Glándulas Sedosas como es la seda o de folículos pilosos como la lana y los pelos (CONABIO, 2020).

▪ **Origen vegetal.**

Las fibras vegetales de recursos renovables, lo cual facilita su disponibilidad; son de bajo costo, biodegradables, por lo tanto, se atenúa el impacto sobre el medio ambiente, y además son livianas. Una característica de gran interés es que presentan propiedades mecánicas que, en algunas aplicaciones, son comparables con materiales de refuerzo sintéticos convencionales como las fibras de vidrio o de carbono (Kalia et al., 2009).

La cascarilla de arroz es una fibra corta de origen vegetal, su función es recubrir naturalmente el grano de arroz para protegerlo del ambiente; está compuesto por una serie de elementos que varía de acuerdo con su tipo en la figura 1-4, encontramos las características fisicoquímicas de esta; por otra parte, la longitud de la vaina se encuentra entre 5 mm y 11 mm según la especie considerada, es de estructura ondulada y apariencia superficial irregular. Tiene propiedades altamente abrasivas.

Figura 1-4: Composición elemental de la cascarilla de arroz a diferentes porcentajes de humedad en Colombia.

Humedad	C	H	O	N	S	Cenizas
8.6	42.5	6.0	36.2	0.21	0.49	14.6
8.9	39.1	5.2	37.2	0.27	0.43	17.8
9.4	33.4	4.3	38.5	0.38	0.32	23.1

Fuente: Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz (2007).

1.2.4 Análisis de la composición de un material compuesto.

La composición en un MC se puede calcular tanto en masa como en volumen, debido a la diferencia en la densidad de la matriz y del refuerzo, estas composiciones se obtienen en fracciones que van de 0 a 1 y se pueden interpretar en porcentajes de fibra y matriz en el compuesto.

Dentro de la universidad Antonio Nariño sede Neiva se han realizado diversas investigaciones referentes a la composición de MC con cascarilla de arroz, con el fin de identificar la proporción más equilibrada para este material. De estas investigaciones sean resaltado los siguientes proyectos: Caracterización de perfiles cilíndricos de material compuesto con refuerzo natural de cascarilla de arroz (Castro & Silva, 2018) y el desarrollo de cubierta tipo teja de material bio-compuesto con fibra de CA (Romero & Mora, 2019).

- **Fracción volumétrica (fv).**

Cálculo de la fracción volumétrica de la fibra (fv_f) y de la matriz (fv_m)

$$fv_f = V_f * V_c \quad (1.1)$$

$$fv_m = V_m * V_c \quad (1.2)$$

Donde: V_c = Volumen del compuesto. V_f = Volumen de la fibra.
 V_m = Volumen de la matriz.

1.2.5 Generalidades de los engranajes.

Se denomina engranaje al mecanismo utilizado para transmitir potencia mecánica entre las distintas partes de una máquina. Una de las aplicaciones más importantes de los engranajes es la transmisión del movimiento desde el eje de una fuente de energía, hasta otro eje situado a cierta distancia y que ha de realizar un trabajo (Ligero, 2008).

Nadie sabe a ciencia cierta dónde ni cuándo se originaron los engranajes. El mecanismo de engranajes más antiguo de cuyos restos se disponen es el mecanismo de Anticitera. Se trata de una calculadora astronómica datada entre el 150 y el 100 a.C. y compuesta por al menos 30 engranajes de bronce con dientes triangulares. En China también se han conservado ejemplos muy antiguos de máquinas con engranajes. Un ejemplo es el llamado "carro que apunta hacia el Sur" (120-250 d.C.), inventado por el ingeniero mecánico chino Ma Jun. Este aparato consistía en un vehículo con ruedas que hacía uso de un complejo sistema de engranajes diferenciales, utilizados en los automóviles actuales para aplicar cantidades iguales de torsión a las ruedas mientras éstas giran a velocidades distintas cuando el vehículo gira (Díaz, 2013).

Existen diferentes tipos de engranajes, cada uno diseñado para una aplicación específica y con características que los diferencian de los otros; estas variables van orientadas sobre todo a la forma y orientación de los dientes. A continuación se pueden ver los diferentes tipos de engranajes que existen (Ingeniería Mercafenix, 2019):

- **Cilíndrico de diente recto**

Son los más comunes, se utilizan cuando los ejes son paralelos y cuando se necesitan grandes reducciones y velocidades medias o pequeñas. Este tipo de engranajes se encuentran en aplicaciones industriales de alta y baja potencia.

Figura 1-5: Engranaje cilíndrico recto.



Fuente: Ingeniería Mercafenix.

- **Cilíndricos Helicoidales**

Este tipo de engrane se caracteriza por tener sus dientes inclinados y se utilizan principalmente cuando se necesitan altas velocidades y una potencia alta. Una de sus principales características es que su marcha es más suave y silenciosa comparados con los engranes rectos.

Figura 1-6: Cilíndricos Helicoidales.



Fuente: Ingeniería Mercafenix.

- **Cilíndrico en V**

También se les conocen como espina de pescado o doble helicoidal ya que incorporan dos engranes helicoidales colocados opuestamente, algunos pueden llevar una pequeña ranura entre las dos hélices.

Figura 1-7: Engranaje helicoidal en V.



Fuente: Ingeniería Mercafenix.

- **Cónicos rectos**

Este tipo de engranes permiten transmitir el movimiento entre ejes colocados en ángulos principalmente a 90 grados y se le llama así debido a la construcción en forma de cono de uno de los engranes.

Figura 1-8: Cónicos Helicoidales.



Fuente: Ingeniería Mercafenix.

- **Cónicos Helicoidales**

Estos engranajes tienen diferente construcción con respecto a los rectos, ya que sus dientes se fabrican inclinados. Estos engranes se utilizan de la misma forma que los

helicoidales cilíndricos, para velocidades altas y una potencia mayor y también su marcha es más silenciosa y suave.

Figura 1-9: Engranajes cónicos helicoidales.



Fuente: Ingeniería Mercafenix.

1.2.6 Partes de un engranaje

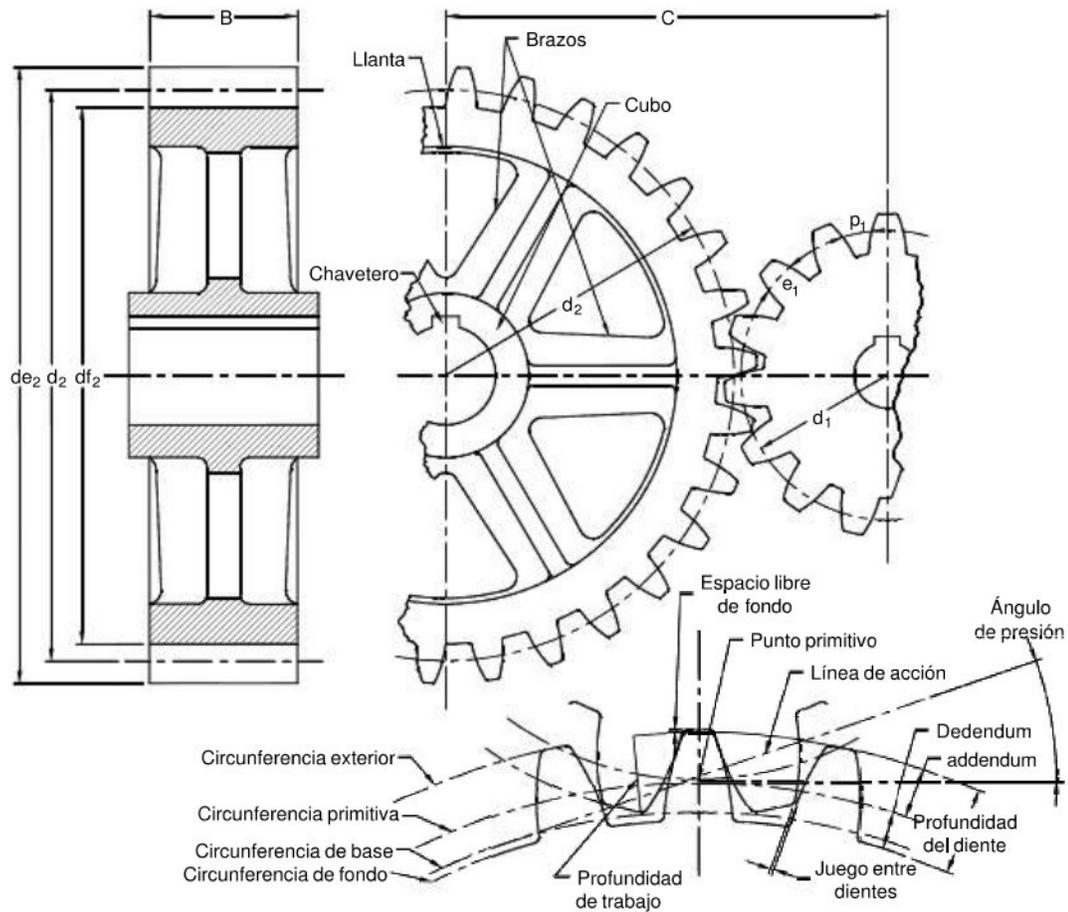
Los engranajes están compuestos por diferentes partes, cada una de ellas aporta una característica específica al engranaje y define las dimensiones de estos. Existen también algunas medidas como lo son los diámetros de fondo, base, primitivo y exterior, los cuales definen el tamaño del engranaje y de los dientes.

Para calcular un tren de engranajes se deben tener en cuenta diferentes definiciones y magnitudes que van a precisar la geometría del engranaje y la relación de velocidades en un tren de engranajes.

- **Modulo (m)**

Relación del diámetro primitivo en milímetros y el número de dientes siendo equivalente al número de milímetros de diámetro primitivo que corresponde a cada diente.

Figura 1-10: Partes de un engranaje.



Fuente: Norma Técnica Colombiana 1140.

▪ **Circunferencia y diámetro primitivo (d)**

La circunferencia primitiva es el lugar geométrico de los puntos primitivos de la rueda o piñón y su diámetro primitivo. La relación de los dientes es igual a la de las velocidades angulares.

$$d = Z * m \tag{1.3}$$

Donde: *Z*: Numero de dientes. *M*: Modulo.

▪ **Ángulo de presión (α)**

Ángulo formado por la línea de acción y la tangente común a las circunferencias primitivas, en el punto primitivo (ver figura 1-10).

▪ **Circunferencia base y diámetro base (d_b)**

Lugar geométrico de todos los puntos de origen de las envolventes, que forman los flancos de los dientes del engranaje. Su diámetro, es el diámetro base.

$$d_b = d * \cos \alpha = Z * m * \cos \alpha \quad (1.4)$$

▪ **Paso base (P_b)**

Arco de circunferencia base, comprendido entre las dos evolventes homólogas de los perfiles de dos dientes consecutivos. Es igual a la circunferencia base, dividida por el número de dientes.

$$P_b = \frac{\pi}{Z} * d_b = p * \cos \alpha = m * \pi * \cos \alpha \quad (1.5)$$

▪ **Espesor base (e_b)**

Arco de circunferencia base, comprendido entre las dos evolventes simétricas que forman ambos flancos del diente.

▪ **Distancia entre centros (C)**

Distancia mínima del centro del piñón al centro de la rueda.

▪ **Paso circular (p)**

En los engranajes rectos, es el arco de circunferencia primitiva. Comprende entre los flancos homólogos de dos dientes consecutivos.

$$p = \frac{\pi}{2} * d = \pi * m \quad (1.6)$$

▪ **Espacio libre de fondo (C)**

Segmento de la línea de centros, comprendido entre la circunferencia exterior de la rueda y la del fondo del piñón o viceversa. En los engranajes normales, es igual a 0,25 por el módulo.

▪ **Profundidad del diente (h)**

Distancia radial desde la circunferencia exterior a la del fondo del diente, según lo establecido en la NTC 1033.

$$h = a + b = 2,25 * m \quad (1.7)$$

- **Circunferencia exterior y diámetro exterior (d_e)**

Circunferencia de mayor diámetro de la rueda. Su diámetro es el diámetro exterior. En los engranajes normales.

$$d_e = d + 2 \times m \tag{1.8}$$

- **Juego de engranaje entre dientes (j)**

Espacio libre que existe entre flancos de dientes engranados que no se tocan.

1.2.7 Fabricación de engranajes

Existen diversos métodos para la fabricación de engranajes, estos han evolucionado con la aparición de nuevas tecnologías y materiales, que han definido los parámetros y el desarrollo de nuevos equipos para el conformado de engranajes. Algunos de los métodos más usados para fabricar engranajes de diferentes materiales se describen a continuación:

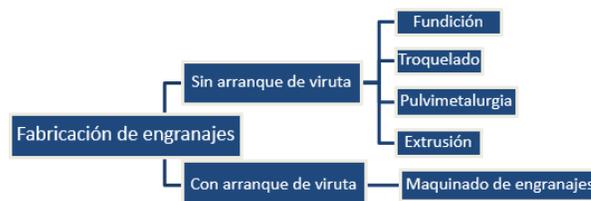
- **Conformado por fundición**

La fabricación de los dientes del engranaje por fundición se realiza por varios procedimientos, entre los cuales se encuentran: colado en arena, moldeo en cáscara, fundición por revestimiento, colada en molde permanente, colada en matriz.

- **Conformado por troquelado**

Este tipo de procedimiento para obtención de engranajes tiene aplicación bastante limitada en el entorno industrial. Normalmente se fabrican grandes series de ruedas dentadas de características mecánicas bajas y de limitada precisión; especialmente demandadas por los sectores jugueteros, fotográficos, artículos para oficina.

Figura 1-11: Clasificación de la fabricación de engranajes.



Fuente: Engranajes: historia, fabricación y fallas (Díaz, 2013).

- **Conformado por pulvimetalurgia**

Se usa para fabricar piezas de formas complejas con excelentes tolerancias y de alta calidad de forma relativamente barata. Se toman polvos metálicos con ciertas características como tamaño, forma y empaquetamiento para luego crear una figura de alta dureza y precisión. Los pasos claves que incluye son: la compactación del material polvo y la subsiguiente unión termal de las partículas por medio de la sinterización.

- **Extrusión**

Este procedimiento consiste en que el material tiene que pasar a través de varias matrices en donde la última de estas tiene la forma exacta del acabado final del engrane correspondiente y una vez que el material va pasando por esta serie de dados, puede decirse que se le va exprimiendo, para darle la forma de la herramienta.

- **Fabricación de engranajes por maquinado**

Los procedimientos de tallado de engranajes consisten en la utilización de una herramienta de corte para efectuar el maquinado de los dientes de los engranajes a partir de un cilindro base. Estos se mecanizan por fresado, cepillado o formado con sinfín y pueden ser acabados por cepillado, bruñido, esmerilado o pulido con rueda.

1.2.8 Fallas en los engranajes

El estudio de las fallas de los engranajes permite a los investigadores identificar aspectos a mejorar en cuanto a material, diseño o método de fabricación. A continuación se describen los diferentes tipos de fallas que se pueden presentar en un tren de engranajes(Eduardo & Hernandez, 1985):

- **Fallas por desgaste:**

Se puede definir como el deterioro que sufren las superficies de los dientes y mediante el cual se van removiendo capas de material de una manera más o menos uniforme. Este desgaste reduce el espesor del diente y produce cambios relevantes en el perfil del diente. Las causas más comunes de esta falla son el contacto directo

de los engranajes sin ningún tipo de lubricante o la presencia de partículas abrasivas que remueven material durante la fricción y generan rayones en las superficies del material. En los engranajes plásticos se puede presentar una elevada temperatura producida por la fricción de las superficies de los engranajes, estas condiciones hacen que se presente un desgaste acelerado y la pérdida de material de una manera más rápida.

Figura 1-12: Falla por desgaste.



Fuente: Análisis de fallas: Modulo desgaste (2010)

- **Fatiga Superficial**

Esta falla es el resultado de esfuerzos repetitivos en la superficie de los engranajes, generando una fatiga en el material hasta formar una grieta en la superficie de contacto o alrededor de ella. La grieta aumenta progresivamente hasta generar una picadura parcial o completa del diente del engranaje. Estas fallas son evidentes después de millones de ciclos de esfuerzo y de un prolongado servicio de las piezas.

Figura 1-13: Falla por fatiga Superficial.



Fuente: Deterioro y modo de fallo en engranajes, 2017.

- **Flujo Plástico:** Esta falla se puede manifestar de varias maneras, pero parte de cuando se aplica un esfuerzo por encima de la resistencia plástica del material provocando deformaciones permanentes o rupturas en los dientes del engranaje. Si las cargas de compresión son elevadas o la vibración causa cargas intermitentes altas que hacen las veces de golpe de martillo, la superficie de los dientes puede laminarse o descamarse.

Figura 1-14: Fractura por sobrecarga.



Fuente: Deterioro y modo de fallo en engranajes, 2017.

- **Fractura de dientes**

Esta falla resulta de sobrecargas o por ciclos e esfuerzo de los dientes más allá del límite de fluencia del material. Cuando un diente se rompe por fatiga debe haber evidencia de un punto focal donde comienza la fractura, la mayoría de las ocasiones una ralladura o una entalla en la raíz pueden coincidir con el punto de partida de la rotura; incluso, también se puede presentar en por fallas en el tratamiento térmico, en caso de los engranajes metálicos.

Figura 1-15: Rotura de diente.

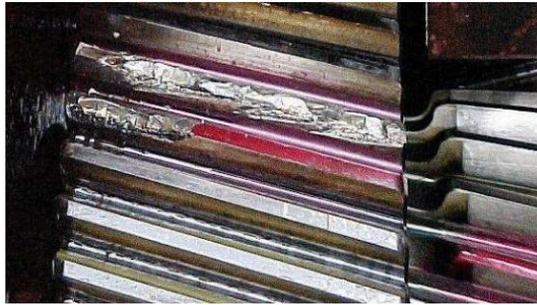


Fuente: Deterioro y modo de fallo en engranajes, 2017.

- **Fallas combinadas**

En general las fallas no se presentan de forma separada, sino que existen otros factores que hacen que se presente dos o más fallas al mismo tiempo o que haya una cadena de fallas que conduzca a la rotura del engranaje.

Figura 1-16: Fallas combinadas.



Fuente: Deterioro y modo de fallo en engranajes, (2017).

Estos tipos de fallas también se pueden presentar en los engranajes de material compuesto y por ello es tan importante tener en cuenta el modo en el que se pueden identificar cada una de ellas. Como método de prueba se va a aplicar esfuerzo a los engranajes de MC con el fin de llegar a la ruptura del diente, siendo esta la falla más crítica que se puede presentar en los engranajes.

1.2.9 Ensayos no destructivos (NDT) aplicados a engranajes

Dentro de los tipos de ensayos no destructivos encontramos una serie de pruebas que se le pueden realizar a las piezas mecánicas para poder determinar su integridad garantizando su uso seguro y confiable, los ensayos NDT permiten detectar las irregularidades, desperfectos o fallas en los materiales de construcción de piezas mecánicas; una de las ventajas de los ensayos NDT es que no se requieren afectar las piezas u elementos a verificar, permitiendo solo cambiar aquellas que presenten anomalías.

Dentro de esta clasificación encontramos los siguientes tipos de ensayos NDT:

- Ultrasonido
- Partículas magnéticas

- Corrientes inducidas
- Tintas penetrantes

Debido a costos del proyecto profundizaremos en las tintas penetrantes las cuales para su aplicabilidad no es obligatorio que se cuente con el certificado

- **Tintas Penetrantes**

son un tipo de Ensayo NDT que permiten detectar imperfecciones a nivel de superficie de material como fisuras o desperfectos superficiales en las piezas mecánicas; el ensayo consiste en la aplicación de tres líquidos el limpiador, el penetrante y el revelador, este tipo de ensayo se trabaja gracias al efecto de la capilaridad, llegando a penetrar las discontinuidades.

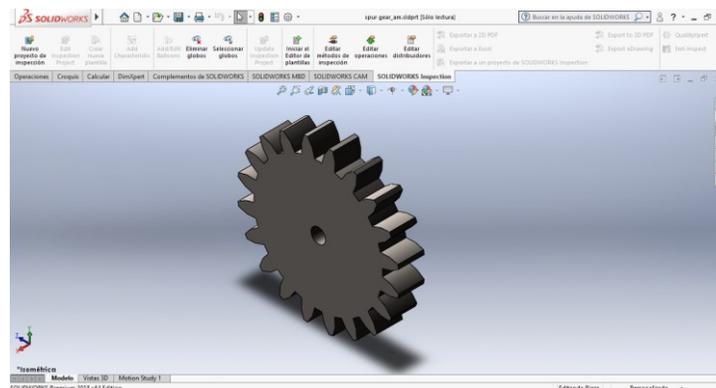
2. Desarrollo de engranajes

Para el desarrollo de los engranajes a base de material compuesto se analizaron las variables intrínsecas en cada una de las etapas como lo son diseño, materiales, fabricación y ensayos; dentro de la literatura no existe un estándar establecido de resistencia de los engranajes, ya que esto varía de acuerdo a su aplicación y el tipo de material de fabricación; debido a esto la mayoría de los estudios son experimentales.

2.1 Diseño de engranajes

Para el diseño del engranaje de diente recto se utilizó el software CAD SolidWorks versión 2018, el cual permite el modelamiento y simulación de piezas mecánicas; se tuvieron en cuenta las referencias encontradas en el capítulo anterior en el apartado 1.2.5 de los engranajes, el diseño se estableció en sustituir dos de los engranajes del motorreductor jenbacher, los cuales son de diente recto de 20 y 24 dientes (ver figura 2-1).

Figura 2-1: Engranaje de diente recto de 20 dientes.



Fuente: autor.

Para la comprobación de la aplicabilidad de los engranajes rectos de MC se utilizarán dos mecanismos; el primero se analiza sobre el motorreductor reemplazando los engranajes de diente recto de 20 y 24 dientes ambos fabricados en MC realizando prueba dinámica ensayados inicialmente a 600 rpm; el otro consiste en encontrar el punto máximo de torque que se le puede aplicar a un engranaje de MC. Para esto fue necesario diseñar un banco de pruebas que permitiera realizar esta operación dado que no existe normativa concerniente a los ensayos destructivos de los engranajes de diente recto, estos solo se basan de acuerdo a las propiedades mecánicas del material previamente establecida y estudiada a lo largo de los años.

Algunas características de este tipo de engranajes como lo denota su literatura es que deben de diseñarse y la fabricarse con el mismo ángulo de presión y módulo; el número de dientes varía de acuerdo con la aplicación final del sistema de engranajes los datos de los engranes a fabricar se encuentran enunciados en la tabla 2.1.

Tabla 2-1: datos característicos de los engranajes diseñados

<u>PARTES DEL ENGRANJE</u>	<u>RUEDA</u>	<u>PIÑON</u>
Modulo (m)	2	2
Angulo de Presión (α)	20	20
Número de dientes (Z)	20	24
Diámetro exterior (d_e) [mm]	44	52
Diámetro Primitivo (d) [mm]	40	48
Paso circular (p) [mm]	6,28	6,28
Espesor base (e_b) [mm]	3,14	3,14
Profundidad del diente (H) [mm]	4,5	4,5
Ancho del engranaje (b) [mm]	10	10
Diámetro base (D_b) [mm]	37,59	45,11
Distancia entre centros (C) [mm]	44	44

Fuente: Autor.

2.2 Estructura del MC

En investigaciones presentadas en años anteriores dentro de la facultad de ingeniería mecánica en la universidad Antonio Nariño, se ha estudiado ampliamente

los materiales compuestos a base de cascarilla de arroz y resina poliéster. Este proyecto recopila parte de estas investigaciones y de manera conjunta define la aplicabilidad del MC para la fabricación de engranajes de bajo peso y costo reducido ya que se disminuyen los tiempos de fabricación.

2.2.1 Resina poliéster altos solidos

La resina utilizada para el desarrollo del proyecto fue seleccionada a base de la alta carga de solidos que permite que se tenga una mezcla más homogénea ver características en el Anexo A.

2.2.2 Determinación de la proporción

La relación de proporción está dada y seleccionada paso por una serie de ensayos para encontrar la calidad de mezcla idónea para el tipo de fabricación seleccionado de cilindro prensado estas se pueden denotar en las figuras 2.2, 2.3 y 2.4; se seleccionaron 3 tipos de grano diferentes variando la concentración de resina en volumen; cada una de las muestras fue medida en volumen y pesada para luego proceder a denotarla de acuerdo a la característica del grano.

Figura 2-2: Muestras de fibra CA



Fuente: Autor

El tipo de muestra número “1” es la fibra de CA mayor a 0.840 mm, que corresponde al tamiz #20, Las muestras de tipo “2” son fibras de entre 0.590 mm y 0.839 mm, correspondiente al tamiz número #30 y la numero “3” son fibras de entre 0.420 mm y 0.589 mm, correspondiente al tamiz #40. El volumen y el tamaño de la fibra tienen una relación directamente proporcional.

Figura 2-3: mezcla en proporción de volumen fibra - resina

30 Estudio de aplicabilidad de material biocompuesto con fibra cascarilla de arroz para la fabricación de engranajes de diente recto para aplicaciones de baja carga



Fuente: Autor

Se generaron inicialmente 6 muestras para encontrar la proporción adecuada de fibra y matriz, estas muestras se nombraron de acuerdo con la nomenclatura definida a continuación: “1,1” – “1,2” – “2,1” – “2,2” – “3,1” – “3,2”. El primer número indica el número de la muestra según el tamaño de la fibra, mientras que el segundo número indica la proporción fibra-matriz usada, siendo “1” 70%-30% como se muestra en la tabla 2-2 y “2” 60%-40% como se muestra en la tabla 2-3.

Figura 2-4: Proceso de mezclado fibra y resina



Fuente: Autor

Cada elemento en el proceso inicial de encontrar la proporción fibra-matriz fue validado mediante medida volumétrica por medio de un recipiente graduado y el peso con la ayuda de una balanza gramera digital.

Tabla 2-2: Muestras de MC en proporción 70% - 30%

MUESTRA	CASCARILLA [ml]	RESINA [ml]	CASCARILLA [g]	RESINA [g]
MUESTRA 1,1	50	15	10	17
MUESTRA 2,1	50	15	18	17
MUESTRA 3,1	50	15	20	17

Fuente: Autor

Se evidencia en la muestra 1,1 alta presencia de porosidad, ocasionada por la baja compactación de la fibra y la resina, a pesar de que se tenía una mezcla homogénea. En las muestras 2,1 y 3,1 se evidencio una mejor compactación del material compuesto, debido a que el tamaño de la fibra es menor se presenta menos cavidades de aire en la mezcla, pero se aprecia una baja proporción de resina.

Tabla 2-3: Muestras de MC en proporción 60% - 40%

MUESTRA	CASCARILLA [ml]	RESINA [ml]	CASCARILLA [g]	RESINA [g]
MUESTRA 1,2	50	20	10	23
MUESTRA 2,2	50	20	18	23
MUESTRA 3,2	50	20	20	23

Fuente: Autor

Estas muestras presentan un mejor aspecto visual, no se aprecian excesos de resina o vacíos en el material. La muestra 1,2 posee una distribución de fibra más dispersa que la de las muestras 2,2 y 3,2, en estas dos últimas se logró un material compuesto más compacto y con una distribución de fibra más homogénea. Se opto por seleccionar la proporción y tipo de fibra utilizado en las muestras terminadas en 2, debido a que esta es la mezcla que presenta mejor compactación y equilibrio en la proporción de fibra-matriz.

2.2.3 Obtención de la materia prima trituración de la fibra

De acuerdo con la información recopilada de investigaciones anteriores y a las consideraciones obtenidas de las muestras estudiadas anteriormente en el apartado 2.2.2, se procesó la CA en bruto, la cual fue triturada con ayuda de un molino eléctrico el cual se muestra en la figura 2-4; este trabaja con un motor de 2 hp que proporciona el accionamiento mecánico para moler la fibra. Para la obtención de un

tipo de grano con un tamaño menor fue necesario realizar la molienda por partes y dosificando su adición para evitar el atascamiento del molino y el calentamiento por la fricción generada por la CA.

Figura 2-4: Molino eléctrico.



Fuente: Autor

En total se procesó $\frac{1}{2}$ bulto de cascarilla de arroz con un peso de 6 kg la cual se particiono para la obtención de una fibra más dispersa y de fácil modelamiento; el tamaño del grano de salida se controlaba mediante el accionamiento del tornillo de ajuste del molino el cual permitía pulverizar más la fibra; con la obtención de la fibra se procedió a la clasificación de esta por medio de granulometría.

2.2.4 Separación por método de granulometría de la cascarilla de arroz.

Para asegurar que los bloques a fabricar tengan la mayor parte de la mezcla homogénea se determinó obtener la granulometría de la CA que paso por el proceso de triturado; para esto fue necesario solicitar el servicio con una empresa idónea para la clasificación por tamizado, para ello fue seleccionado el laboratorio agroambiental de suelos y agua (Labsa), quien presto el servicio de análisis físico de materiales; las muestras enviadas fueron clasificadas de acuerdo al tipo de grano por los tamices seleccionados de grano 20, 30, 40 y fondo, ver tabla 2-5 clasificación de grano por tamaño de acuerdo a la muestra analizada.

Tabla 2-5: clasificación de grano por tamaño de acuerdo con la muestra analizada.

RESULTADOS					
Nº Tamiz	apertura del tamiz (mm)	masa retenida (gr)	% retenido	% ret acumulado	% en peso que pasa
20	0,840	78,2	16,157	16,157	83,843
30	0,590	50,0	10,330	26,487	73,513
40	0,420	172,5	35,640	62,127	37,873
Fondo	-	183,3	37,871	-	-
	Total	484,0	99,998		

Fuente: Labsa.

El proceso de clasificación de la muestra física de CA permitió separarla en los diferentes tamaños de fibra, del más grande al más pequeño. Esto se realizó en una tamizadora eléctrica por un tiempo de 20 minutos por muestra de 500 gramos como se denota en la figura 2-5.

Figura 2-5: tipos de grano obtenidos por tamizaje



Fuente: Labsa

Se realizaron 12 tamizajes de 500 gramos cada uno, de los cuales se obtuvieron aproximadamente 700 gramos de la fibra retenida en el tamiz #30. Una vez separada las muestras se procede a pesar y empacar de acuerdo con la clasificación del grano como se denota en la figura 2-6.

Figura 2-6: Empacado y marcación de muestras de grano #20, #30 y #40.

34 Estudio de aplicabilidad de material biocompuesto con fibra cascarilla de arroz para la fabricación de engranajes de diente recto para aplicaciones de baja carga



Fuente: Labsa

El total de la cascarilla de arroz procesado por tamizaje fue de 6 kg, donde se obtuvo 984 gramos de cascarilla tamiz #20, 700 gramos de fibra #30, 2415 gramos de #40 y 1901 gramos de polvo de cascarilla de arroz, depositado en el fondo de la tamizadora.

2.3 Fabricación de cilindros a base de MC

Para la fabricación de los cilindros de material compuesto fue necesario la utilización de una prensa hidráulica de 5 toneladas, servicio prestado por el taller Servijaponesa. En las secciones anteriores se había determinado la proporción de la mezcla a utilizar que fue 60-40% permitiendo obtener una homogeneidad en las fibras.

Este proceso requirió la aplicación de la teoría estudiada en el capítulo anterior para lo cual fue indispensable la determinación del volumen a moldear; se calculó el volumen del cilindro a moldear tasado en 1000 ml, el cual si aplicamos la proporción 60-40% indica que el 600 ml corresponderían a la fibra y el 40% restante a la matriz; se procedió a llenar el cilindro con la materia prima en seco de la granulometría No 20, 30 y 40; con la materia prima lista se procede a medir la resina poliéster 400 ml y se le aplica catalizador al 1% de la mezcla 4 ml, se agita uniformemente y se va adicionando cascarilla poco a poco con el fin de crear una mezcla uniforme y totalmente impregnada.

Con la mezcla homogénea lista se procede a realizar el vaciado dentro del molde para lo que se hace necesario utilizar un palo de escobero como acuñador de la mezcla que posteriormente sería prensada; con la mezcla totalmente vaciada dentro del molde se realizó la alineación del embolo de la prensa hidráulica con el orificio del cilindro ver figura 2-7.

Figura 2-7: Alineación del cilindro con el embolo de la prensa hidráulica.



Fuente: Autor

En la figura anterior se denota el proceso de alineación y compresión mediante prensa hidráulica manual, se va aplicando presión mediante la bomba manual teniendo la precaución de no excederse en esta ya que se puede fracturar el cilindro que es de material PVC; con el cilindro desplazándose hacia abajo este va ejerciendo una compactación de la mezcla ver figura 2-8; para que todos los cilindros se les aplicara la misma presión se determino que la cantidad de pulsos necesarios era de 12, una vez el émbolo realizaba contacto con el MC.

Figura 2-8: Prensado de material compuesto cascarilla de arroz.



Fuente: Autor

La mezcla homogénea se deja secar prensada por 24 horas y posteriormente se realizó el desmoldeado para lo que fue necesario el uso de una pulidora con un disco de corte para partir el tubo por la mitad y así poder extraer el bloque en bruto ver figura 2-9. Los cilindros muestran a primera vista una mezcla uniforme de cascarilla de arroz y resina y un bajo índice de porosidad superficial, así como un acabado uniforme y liso.

Figura 2-9: Bloque en bruto, cilindro final.



Fuente: Autor

No se denota excesos de resina o altas concentraciones de estas por lo menos a primera vista; con los bloques terminados y curados por un tiempo de 72 horas para tener un secado completo se procedió a realizar el envío al centro de maquinado para la obtención de los engranajes.

2.4 Maquinado por Torneado de cilindros a base de MC

Para el proceso de maquinado fue necesario contratar la empresa maquinado MG Joralberto Gutiérrez especializada en procesos de maquinado de piezas metalmecánicas en torno y fresadora; en la sección 2.1 se había establecido el diseño que tendrían los engranajes de dientes rectos, la cantidad de dientes y el módulo datos específicos suministrado a la empresa encargada de la fabricación.

Con estos valores preestablecidos se inicia el proceso de maquinado en el torno para obtener el cilindro del diámetro exterior especificado en la sección 2.1; para esto fue necesario contrapuntear el bloque ver figura 2-10; este proceso consiste en perforar el centro del cilindro e instalar un centro punto que elimina el pivote o cabeceo de la pieza a maquinar.

Los parámetros de maquinado los suministro la empresa maquinado MG Joralberto Gutiérrez quien debido a las características iniciales del material decidió utilizar los parámetros de maquinado del aluminio como se denota en las tablas 2.4 y 2.5 de acuerdo al tipo de operación realizada desbaste o acabado.

Tabla 2-4: Velocidad de corte según maquinado para MC

Tipo de operación	Torneado	Fresado
Desbaste [m/min]	61	45
Acabado [m/min]	93	45

Fuente: Autor

Tabla 2-5: Velocidad de avance según maquinado para MC

Tipo de operación	Torneado [mm]	Fresado [mm/min]
Desbaste	0.56	960
Acabado	0.20	960

Fuente: Autor

Con los parámetros establecidos, se procede a configurar las maquinas torno y fresadora, así como la configuración del divisor que permite fabricar los engranajes.

Figura 2-10: Instalación de centro punto bloque de MC



Fuente: Autor

Posteriormente se inicia el desbaste del MC hasta el diámetro exterior solicitado por medio de arranque de viruta realizado con un buril afilado tipo E utilizado para desbaste y el acabado final se utiliza un tipo G ver figura 2-11; debido a que el material presenta una muy buena maquinabilidad es posible realizar desbastes de viruta de alrededor de 0.5 mm por pasada.

Figura 2-11: desbaste de MC para la obtención del diámetro exterior del cilindro.



Fuente: Autor

En el avance de este proceso, se denoto la presencia significativa de porosidad interior debido a que las partículas de aire quedaron encapsuladas dentro del bloque como se evidencia en la figura 2-12.

Figura 2-12: Maquinado final del cilindro presencia de porosidad.



Fuente: Autor

En la figura 2-12, se puede evidenciar el maquinado final a un diametro exterior de 52 milímetros deseado para posteriormente realizar el maquinado de los dientes del engranaje de 24 dientes en la fresadora.

2.5 Maquinado por Fresado de cilindros a base de MC para la obtención de engranajes de dientes rectos.

Con el proceso del maquinado por torneado finalizado se inicia el proceso de maquinado por fresado donde se configura el palto divisor de la fresadora para la cantidad de dientes a fabricar en este caso 20 y 24 dientes respectivamente; se instala la fresa modular en el portaherramientas y se selecciona la velocidad de trabajo y avance al ser un material de muy buena maquinabilidad se le aplica velocidades de corte y avance relativamente altas similares a las de maquinar el aluminio.

En la figura 2-13, se puede denotar la fabricación del engranaje recto de 24 dientes el cual se encuentra sujeto en un extremo por el plato divisor y en el otro extremo por un centro punto

Figura 2-13: Fabricación de engranaje de 24 dientes.

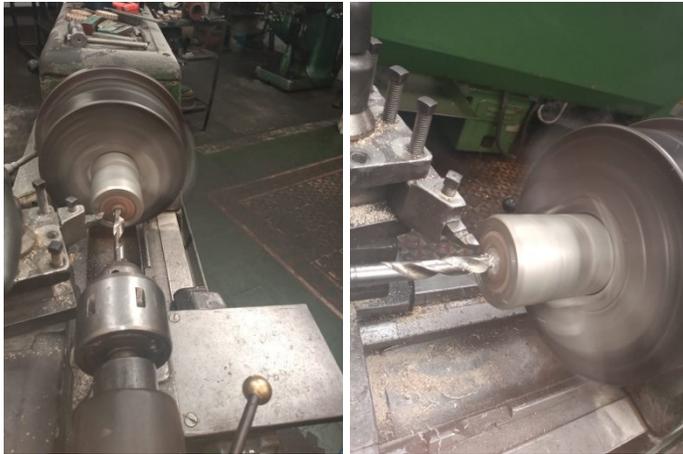


Fuente: Autor

En la fabricación se decidió fabricar engranajes mixtos de cada bloque, lo que se traduce a que se maquinó una sección de tramo en engranaje de 20 dientes y el restante en engranaje de 24 dientes; con este proceso finalizado se procede a cortar

en dimensiones de ancho de cara del diente de 7 mm, para lo cual se insertó el engranaje en un cilindro metálico que posee espaciadores que permite prensar materiales frágiles y se instala una broca de 12 milímetros para la perforación del centro del engranaje como se denota en la figura 2-14.

Figura 2-14: instalación de herramienta para corte y perforación de engranajes.



Fuente: Autor

Con el centro de los engranajes perforados, se procede a realizar el fraccionamiento de los bloques para obtener piezas de 7 milímetros de espesor, esto se realiza por medio de una cuchilla de corte que va instalada en la porta herramienta del torno. En la figura 2-15 se pueden apreciar el resultado de este proceso.

Figura 2-15: engranajes de dientes rectos de 20 y 24 dientes ancho del diente 7 m.



Fuente: Autor

De los tres bloques fabricados y maquinados se obtuvieron 21 engranajes de 20 dientes ver figura 2-16 y 20 engranajes de 24 dientes ver figura 2-17, los cuales se analizarán sus propiedades en la siguiente sección.

Figura 2-16: engranajes de diente recto de 20 dientes



Fuente: Autor

Figura 2-17: engranajes de diente recto de 24 dientes.



Fuente: Autor

Se evidencia que un porcentaje elevado de porosidad en ciertos engranajes en total 7 de 24 dientes y 6 de 20 dientes estos se dejaron para hacer pruebas de resistencia a ver si se tiene alguna variación, se realizó una revisión de los dientes para ver fisuras o imperfecciones en sus dientes. En la siguiente sección se evaluará la resistencia de los engranajes.

3. Aplicabilidad de engranajes de diente recto

Para el desarrollo de esta sección fue necesario el análisis y perspectivas de trabajo a las cuales estaría asociado los engranajes de dientes rectos de MC de baja carga; aunque en la literatura no es específica a partir de que rango se considera de baja carga se debe de definir en el transcurso de las pruebas debido a que es la primera vez que se fabrican engranajes de MC a base de cascarilla de arroz y no se contaban con parámetros de partida por lo tanto ronda una incertidumbre.

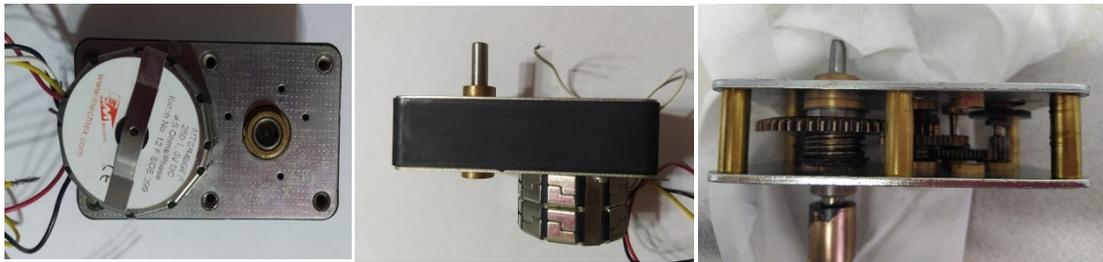
Aunque por medio de modelamientos se puede obtener los datos de resistencia estimada de los engranajes, cuando se lleva a la practica en los procesos de moldeo, fabricación y prueba de estos, algunas de estas variables no se pueden controlar. Una que influye directamente en el comportamiento del material compuesto es la cantidad de aire en la mezcla del MC que afecta directamente la resistencia de la pieza a ensayar. Se realizaron 2 pruebas en diferentes equipos para determinar la resistencia de los engranajes a diferentes circunstancias.

Dentro de la investigación no se encontró normativa relacionada con la prueba de engranajes, para obtener valores de resistencia o lograr apreciar la respuesta de los engranajes a condiciones reales de operación los investigadores optan por diseñar bancos o ensambles que permitan simular estas condiciones. Para la prueba de los engranajes se recurrió a usar el método experimental, con ayuda de un motorreductor y con el diseño de un ensamble que permitió realizar ensayos de esfuerzo a los dientes del engranaje y de rodadura a todo el elemento en sí, esto con el fin de obtener mediciones de variables que permitieran la caracterización de propiedades de resistencia mecánica, temperatura de operación y la respuesta de este ante la fricción.

3.1 Prueba en motorreductor

Para realizar la prueba en una aplicación real del engranaje de material compuesto fue necesario modificar un motorreductor utilizado en válvulas reguladores de gas para motores estacionarios Jenbacher, el cual se muestra en la figura 3-1.

Figura 3-1: Motorreductor Jenbacher.

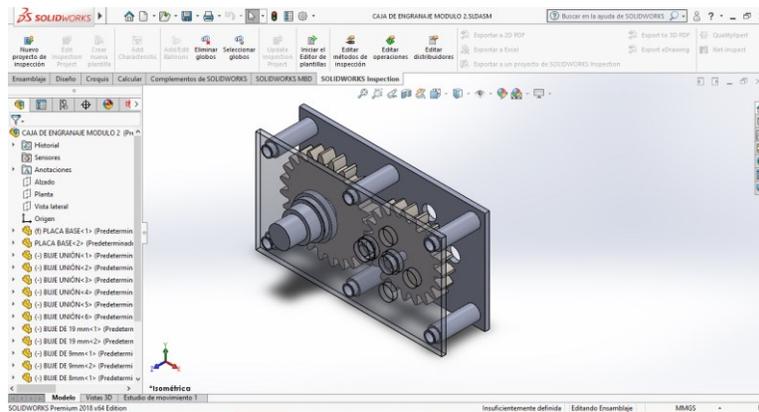


Fuente: Autor

El sistema de engranajes se desensambla y se rediseña para ser usado con los engranajes de material compuesto que se habían fabricado.

Se le realizó una adecuación que permitió sustituir 2 de los engranajes como se puede denotar en la figura 3-2, que permitió probar los engranajes de MC en una aplicación real.

Figura 3-2: Caja reductora para prueba de engranajes.



Fuente: Autor

Se sustituyeron los bujes separadores de la caja reductora por tornillos de 6 mm que permitieran dar un ajuste variable al ensamble (ver figura 3-3). Una vez sujetados los tornillos se procedió a realizar la alineación de los engranajes de MC presentándolos sobre la placa y para fijar el engranaje al eje fue necesario perforar y roscar el eje a 3 mm y sujetar mediante tornillo el engranaje al eje como se denota en la figura 3-4.

Figura 3-3: Desarme de motorreductor y modificación de anclajes.



Fuente: autor

Figura 3-4: Presentación de engranajes de acuerdo con su distancia entre centros.



Fuente: Autor

Con el fin de tener un ajuste parejo se va ajustando las tuercas de 6 mm y se va tomando la medida con un calibrador pie de rey análogo, esto permite que todo el sistema este alineado como se denota en la figura 3-5.

45 Estudio de aplicabilidad de material biocompuesto con fibra cascarilla de arroz para la fabricación de engranajes de diente recto para aplicaciones de baja carga

Figura 3-5: toma de dimensiones de acuerdo con el ajuste de las tuercas.



Fuente: Autor

Al tener todo el sistema ensamblado se procedió a realizar la primera prueba de rotación para ver el comportamiento de los engranajes bajo condiciones de trabajo reales. El ensamble está dotado de un eje con un resorte que al comprimirse aplica fuerza al engranaje de salida, haciendo un efecto de freno para generar oposición al giro. La caja reductora se acopló a un taladro Atornillador Black & Decker ver descripción y características de la herramienta en la figura 3-6.

Figura 3-6: Descripción y características del Taladro atornillador B&D.



Especificaciones del producto

- o Voltaje 12V MAX
- o Velocidad 0 - 600/min (rpm)
- o Mandril 3/8" (10mm)
- o Torque 100 in-lb (11,3 Nm)
- o VVR Si
- o Batería LD112BAT
- o Tiempo de carga 3-5hr



Fuente: Catalogo virtual Black & Decker.

Se hizo girar el sistema de engranajes durante lapsos de 20 minutos, teniendo un giro continuo. Esta prueba se realizó 6 veces, dejando espacios de 5 minutos para dejar bajar la temperatura del motor del taladro. Después de realizadas estas

pruebas se procedió a examinar los engranajes de manera visual con el fin de identificar posibles fallas o indicios de desgaste en los engranajes.

Figura 3-7: Visual de los engranajes después de la prueba



Fuente: Autor

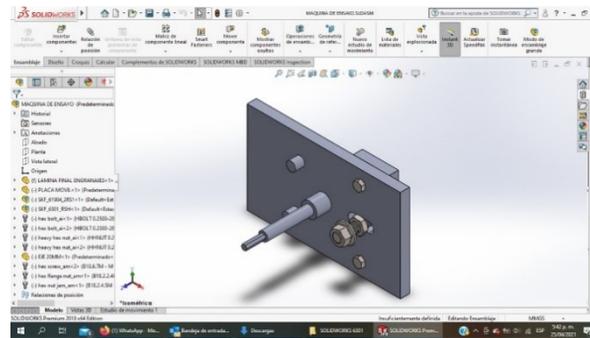
Se evidenció que los engranajes no presentaban indicios de desgaste o desprendimiento de material, los engranajes funcionaron de una manera correcta, aun teniendo en cuenta que se les dio un uso acelerado y que las condiciones de operación de la prueba corresponden a ciclos de trabajo muy elevados en comparación con los ciclos normales del motorreductor Jenbacher, cuya operación corresponde a ciclos cortos con grandes intermedios de tiempo.

3.2 Máquina de ensayo de flexión de diente y trabajo rotativo

Para poder evidenciar de una mejor manera y medir la resistencia de los engranajes de MC se diseñó un nuevo ensamble en donde se pudieran ver de manera frontal el giro de los engranajes y que fuera posible aplicar una fuerza más elevada al eje motriz esto con el fin de encontrar el punto de ruptura de los dientes del engranaje de MC. Para ello se diseñó el ensamble que se muestra en la figura 3-8. El cual permite que se ajuste la distancia entre los engranajes y poder ensayarlos de diferentes tamaños.

47 Estudio de aplicabilidad de material biocompuesto con fibra cascarilla de arroz para la fabricación de engranajes de diente recto para aplicaciones de baja carga

Figura 3-8: Diseño de ensamble para prueba de resistencia de engranajes.



Fuente: Autor.

Se fabrico el ensamble de acuerdo con las dimensiones del diseño y se adecuo un sistema de corredera con el fin de poder probar los dos tamaños de engranajes (20 y 24 dientes) de MC que se habían fabricado.

La fabricación estuvo a cargo de MG Joralberto Gutierrez a base de una placa de acero de 12 mm de espesor; parte del proceso se puede evidenciar en la figura 3-9 donde se realiza la presentación y centro puntea la placa.

Figura 3-9: Presentación, acotación y perforación placa de 12 mm.



Fuente: Autor

El proceso continuo con la instalación de los pernos los cuales van soldados a la placa y al rodamiento de 12 mm para dejar un eje movil que se ajuste a los diferentes diametros de los engranajes como se denota en la figura 3-10.

Figura 3-10: Presentación final de componentes.



Fuente: Autor.

El ensamble final se puede ver en la figura 3-11, donde se instaló un engranaje metálico el cual transmite el movimiento rotacional al de MC, con el fin de obtener el dato lo más real posible se seleccionó el engranaje metálico debido a que su índice de fatiga del diente es elevado respecto al de MC.

Figura 3-11: Máquina de prueba de engranajes.



Fuente: Autor.

3.3 Equipo de medida torcometro

Para poder determinar la fuerza de resistencia de cada diente de MC se le realiza una prueba de flexión de diente la cual fue tomada a partir de un torquímetro manual de marca Snap-on que permite tener medidas de torque ejercido desde 0 hasta 150

In-lb ver figura 3-12 el cuadrante que posee el equipo es 3/8" este fue acoplado al eje principal del equipo.

Figura 3-12: Torcometro de 0-150 in-lb, marca Snap-on



Fuente: Autor.

Este equipo de medición permite tomar la medida máxima de 150 in-lb en escalas de 0.25 in-lb. La prueba de par es una forma de determinar cómo reaccionará un objeto cuando se gira, durante el funcionamiento normal o se gira hasta que falla o se rompe deliberadamente esta fuerza de rotación puede ser "dinámica" a menudo entregada a una velocidad ultra alta o "estática" a una velocidad mucho más baja (Mecmesin, 2021).

3.4 Selección y nomenclatura de los engranajes a ensayar a base de MC

Se seleccionaron cuatro unidades de cada uno de los tamaños de engranajes de MC, los cuales se le asignó la nomenclatura EF-EMC-01 al EF-EMC-08; el prefijo EF indica el tipo de ensayo el cual es a flexión. Se seleccionaron los engranajes de mejor aspecto y con menor presencia de poros esto con el fin de disminuir la probabilidad de falla prematura del engranaje (ver figura 3-13).

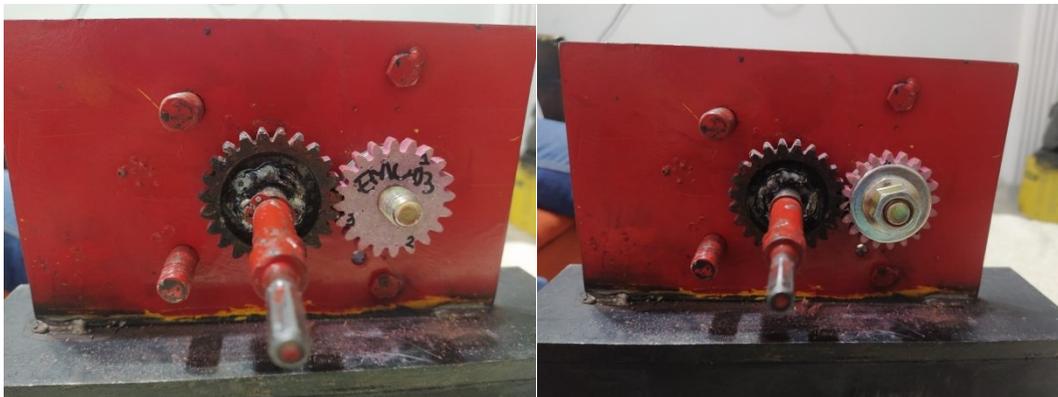
Figura 3-13: Nomenclatura de engranajes de MC

Fuente: Autor.

A cada engranaje se les realizaron pruebas a cuatro de sus dientes, se codifico el engranaje con el prefijo EMC que traduce Ensayo de Material Compuesto y se enumeraron del 1 al 8, siendo los números impares los engranajes de 24 dientes y los pares engranajes de 20 dientes.

3.5 Montaje del sistema para pruebas

Para iniciar el montaje de ensayos de los engranajes se inicia con la selección del engranaje a probar, seguido de la alineación con el piñón fijo ver figura 3-14 que se encuentra acoplado al eje de transmisión; una vez alineado se procede a ajustar mediante una arandela y una tuerca con arandela estriada que da al sistema mayor firmeza.

Figura 3-14: Presentación del montaje del sistema.

Fuente: Autor

Posteriormente se procede a acoplar el equipo de acuerdo con el tipo de prueba si es para encontrar la resistencia a flexión del diente se acopla el torque al eje de transmisión que gira el engranaje metálico y permite identificar la medida de la resistencia a torsión del engranaje de MC ver figura 3-15 en materiales compuestos la ruptura del diente está dada por el primer chasquido o muestra de fractura del diente.

Figura 3-15: Acople de torcometro al eje de ensayo.



Fuente: Autor

Como se muestra en la anterior imagen, mediante el torcometro se fue aplicando fuerza al eje del engranaje metálico para que al girar transmitiera este torque al diente del engranaje de MC que se estaba probando, se llevaba seguimiento continuo a la medición del torque aplicado con el fin de obtener el valor en el que el diente llegara al punto de ruptura, esta información se plasma en las tablas 3-1 y 3-2.

Figura 3-16: acoplamiento del equipo rotativo para ensayo dinámico.



Fuente: Autor

Para el ensayo dinámico en el ensamble de pruebas se instala el engranaje de material compuesto y se sujeta al eje por medio de una tuerca de seguridad, se verifica la alineación de los engranajes y posteriormente se acopló al eje el taladro o atornillador al eje de transmisión y se procede a realizar la prueba dinámica de rodadura para estudiar su comportamiento por un tiempo relativo, como se muestra en la anterior figura 3-16.

3.6 Validación del rpm

Para validar las velocidades de operación se tomó la medida mediante un tacómetro de marca Lutron referencia DT-2236 el cual puede medir las velocidades rotativas de los equipos por medio de un haz de luz o por contacto como se denota en la figura 3-17.

Figura 3-17: Medición de rpm por medio de tacómetro Lutron



Fuente: Autor

Las validaciones obtenidas se toman en referencia de acuerdo con la prueba dinámica de operación. Esta se hace mediante la proyección de luz sobre el eje para saber si el equipo está girando a revoluciones constantes o por el contrario presenta oscilaciones. Como se denota en la figura 3-17, el equipo está operando bajo los parámetros de ficha técnica.

3.7 Aplicación de tintas penetrantes

Se tomó la opción de comprar las tintas penetrantes y el revelador de la marca Cantesco ver anexo B, con el fin de determinar dentro de la fabricación de los

engranajes había discontinuidades grandes que pudieran generar una falla prematura; se seleccionaron los engranajes y de les aplico limpiador se dejó secar por 20 min y se aplicó la tinta penetrante de color rojo dándole un tiempo de 10 min para penetración retirándose el exceso, posteriormente se aplicó el revelador para poder determinar si habían fracturas en el engranaje o discontinuidades grandes como se denota en la figura 3-18.

Figura 3-18: Inspección por tintas penetrantes en MC.



Fuente: Autor.

Debido a que el material compuesto tiene una porosidad interna alta de por el tipo de fibra, las muestras se tornan rojizas revelando pequeños puntos donde se concentran las discontinuidades, pero ningún índice de fractura que pudiera ser relevante para el proyecto.

3.8 Ensayo de flexión de diente en engranaje recto de MC.

Se realizaron las pruebas de flexión de diente mediante la aplicación de torque al eje central y realizando la medición por medio del equipo de la sección 3.3 como se denota en la figura 3-19 se obtuvieron los resultados y se tabularon en la tabla 3.1 resultados en pulgadas libras y en la tabla 3-2 en Nm.

En las siguientes tablas de resultados se denotan mediante una escala de colores, iniciando con el rojo el cual se relaciona con los menores valores y va cambiando tonalidad a verde para representar los valores más altos.

Tabla 3-1: Resistencia a flexión en diente de MC en in-lb.

Engranaje	Torque aplicado en in-lb			
EF-EMC 01	120	50	90	100
EF-EMC 02	110	135	130	140
EF-EMC 03	75	80	90	75
EF-EMC 04	150	130	95	90
EF-EMC 05	90	125	130	100
EF-EMC 06	90	85	150	70
EF-EMC 07	130	75	120	120
EF-EMC 08	90	80	45	85

Fuente: Autor.

Después de realizar las pruebas de resistencia se obtuvieron resultados muy similares en cuanto al punto de ruptura de los diferentes dientes, encontrándose un promedio de 101 in-lb (11.46 Nm); el valor mínimo fue de 45 in-lb (5.08 Nm) y el máximo de 150 in-lb (16.95 Nm) torques medios para transmisión de potencia.

Tabla 3-2: Resistencia a flexión en diente de MC en Nm.

Engranaje	Torque aplicado en Nm			
EF-EMC 01	13,56	5,65	10,17	11,30
EF-EMC 02	12,43	15,25	14,69	15,82
EF-EMC 03	8,47	9,04	10,17	8,47
EF-EMC 04	16,95	14,69	10,73	10,17
EF-EMC 05	10,17	14,12	14,69	11,30
EF-EMC 06	10,17	9,60	16,95	7,91
EF-EMC 07	14,69	8,47	13,56	13,56
EF-EMC 08	10,17	9,04	5,08	9,60

Fuente: Autor.

Se evidencia que tiene buena aplicabilidad para transmisión de torques de hasta 16.95 Nm casos donde el equipo estuviera totalmente detenido o arranque en seco esto lo podremos corroborar en la sección 3-9 con la prueba dinámica.

3.9 Ensayo dinámico rotativo de engranaje recto de MC.

Para la prueba dinámica se utilizaron dos equipos rotativos ambos de la marca Black + Decker un atornillador eléctrico que entrega un torque de 11.3 Nm y 600 rpm y un taladro que entrega 10 Nm a 2800 rpm.

Figura 3-19: Equipos rotativos para prueba dinámica.



Fuente: Autor.

Se realizaron pruebas dinámicas de intervalos de 20 min a 2761 rpm constantes donde se monitoreo la temperatura de los engranajes y su desgaste visual una vez concluida la prueba, para el examen visual se determinó hacerlo cualitativo debido a que no se contaba con un equipo para poder realizar una medición exacta de los dientes de los engranajes.

Cabe aclarar que las pruebas dinámicas se realizaron por lapsos de 20 minutos debido a que esta investigación está enfocada en engranajes de baja carga, en este tiempo se sometió a los engranajes a un esfuerzo y condiciones de rodamiento excesivos, comparados con las condiciones de operación de baja carga que tienden a estar cerca de 150 rpm y a torques pequeños por debajo de 8 Nm. Esto se hace para acelerar el desgaste del engranaje y simular de manera prematura el comportamiento de este durante mucho tiempo en condiciones normales de operación.

Para las pruebas dinámicas se asignó la nomenclatura ER-EMC-09 al ER-EMC-14 las siglas ER por ensayo rotativo; también se le asignó nomenclatura a los engranajes metálicos de 23 y 26 dientes ER-EM-23 y ER-EM-26 como se indica en la tabla 3-3 temperatura de operación a intervalos de 4 minutos.

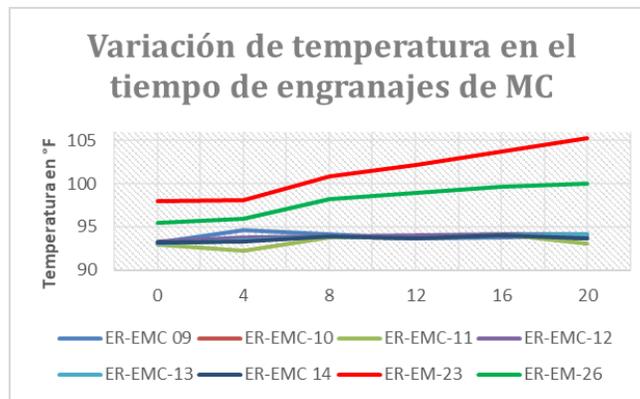
Tabla 3-3: Temperatura de operación a intervalos de 4 min en °F

Engranaje	Temperatura de operación en °F a 2800 rpm					
	0 min	4 min	8 min	12 min	16 min	20 min
ER-EMC 09	93,2	94,6	94,1	93,7	93,8	94
ER-EMC-10	93,1	93,4	93,9	93,7	94	93,7
ER-EMC-11	93	92,3	93,8	93,8	94,2	93,1
ER-EMC-12	93,3	93,8	93,9	94	94,2	94,1
ER-EMC-13	93,1	93,4	93,9	93,7	94	94,1
ER-EMC 14	93,2	93,3	93,9	93,7	94	93,7
ER-EM-23	98	98,1	100,8	102,2	103,7	105,3
ER-EM-26	95,5	95,9	98,2	98,9	99,6	100

Fuente: Autor.

La variación de la temperatura se puede denotar en el gráfico 3-1 donde se evidencia que los engranajes metálicos poseen un índice mayor de fricción lo que se traduce en un incremento de casi 8 °F (4 °C) con respecto a la menor temperatura promedio del engranaje de MC.

Gráfico 3-1: Variación de temperatura en el tiempo de engranajes de MC



Fuente: Autor.

Una vez terminada la prueba se procede a realizar la inspección de los engranajes como se puede denotar en la figura 3-20 y se procede a realizar una valuación cualitativa de acuerdo con su apariencia, daño de dientes, índice de fractura y

alineación de engrane para esto fue necesario aplicarlo en la tabla 3-4 la cual se le hace una valoración iniciando desde Malo (M) regular (R) bueno (B) y aceptable (A)

Tabla 3-4: Valoración cualitativa de engranajes después de prueba dinámica.

Engranaje	Estado de engranaje después de 20 min de operación			
	M	R	B	A
ER-EMC 09		X		
ER-EMC 10			X	
ER-EMC 11		X		
ER-EMC-12			X	
ER-EMC 13			X	
ER-EMC-14			X	
ER-EM-23				X
ER-EM-26				X

Fuente: Autor.

En la figura 3-20 se denota la falla en el lateral de un diente que no compromete su funcionamiento, puede inferirse por el brillo es el exceso de resina o concentración de esta en ese punto específico; en la figura 3-21 se puede denotar el asentamiento uniforme de los dientes del engrane.

Figura 3-20: Falla en lateral del diente MC



Fuente: Autor

Figura 3-21: huella de rodadura de engranaje recto.



Fuente: Autor

En las pruebas dinámicas realizadas solo se encontró un desperfecto en el engranaje de la imagen 3-20 la cual presenta daño parcial de los engranes este factor puede deberse a la concentración de resina en ese sector específico o al tema de alta concentración de burbujas de aire dentro de estos dientes.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Durante el estudio de la aplicación del material compuesto con cascarilla de arroz a la fabricación de engranajes de diente recto se logró evidenciar diferentes aspectos importantes y que se deben tener en cuenta en el momento de fabricar piezas como engranajes de un material con características tan propias de un MC, al aprovechar estas propiedades se puede obtener excelentes resultados para aplicaciones de ingeniería, por lo cual a la hora de pasar por las etapas de planeación, diseño, fabricación y prueba de los engranajes de MC con CA se logró llegar a diferentes conclusiones, las cuales se listan a continuación:

- El método de fabricación seleccionado para la elaboración de engranajes de material compuesto fue el maquinado, debido a que el MC con cascarilla de arroz presenta una buena maquinabilidad, mediante arranque de viruta y se pueden conformar los engranajes con mayor facilidad en comparación con otros métodos de fabricación como el vacío o el troquelado que requieren equipos más complejos y costosos.
- La proporción usada para la fabricación de material compuesto fue 60% fibra – 40% matriz, debido a que se obtiene una mezcla homogénea tanto de matriz como de fibra, disminuyendo las zonas con concentración de resina o zonas con baja presencia de fibra.
- A pesar de que el MC tiene un 40% de matriz poliéster, la cual presenta un comportamiento rígido, al mezclarse con la fibra de CA esta disminuye presentando un comportamiento similar al de los materiales dúctiles, esto se logró evidenciar en las pruebas de resistencia del diente, donde antes de llegar al punto de fractura se presentaba una deformación plástica antes de llegar a la fractura del diente, en promedio el torque aplicado fue de 11.46 Nm.

- El método que se usó para disminuir las burbujas de aire fue el prensado, donde se comprimió el material dentro del molde cilíndrico con el fin de reducir el espacio entre las fibras y saturar todos los vacíos con la resina, además de eliminar el exceso de esta.
- Para la realización de los ensayos de ruptura del diente y prueba dinámica de giro se diseñó un banco de prueba, en el cual se instalaron los engranajes al permitiendo variar la distancia entre centros. Este banco permitió simular condiciones de trabajo para encontrar el punto de falla de los diferentes engranajes ensayados y la temperatura que se generaba durante el contacto de los mismos.
- En el ensayo dinámico de giro de los engranajes de material compuesto se obtuvo una temperatura promedio de operación para el engranaje metálico de 101.35 °F (38.52 °C) y para los engranajes de MC de 93,68 °F (34.26 °C), presentando una diferencia de tan solo de 7,67 °F (4.26 °C). Esto hace ver que para esta aplicación se puede aprovechar la capacidad de aislamiento térmico que tiene la cascarilla de arroz, esto se debe a que el calor se genera por la fricción que hay entre los dientes de los engranajes y no por un aporte externo de calor al material. A pesar de que la diferencia es muy pequeña se evidencia una diferencia de casi 5°C.
- Después de someter los engranajes de MC a la prueba de resistencia del diente se logra determinar que estos engranajes son capaces de desempeñarse en aplicaciones de baja carga, se obtuvo que el promedio del torque soportado al punto de ruptura de los engranajes fue de 11,45 Nm, si a esto le aplicamos un factor de seguridad de 2, podemos afirmar que los engranajes de material compuesto pueden ser utilizados en aplicaciones de baja potencia para transmitir torques nominales de hasta 5,72 Nm.
- Las fallas presentadas en los engranajes de MC guardan cierta similitud a las fallas de los engranajes metálicos, aunque en el caso de los MC, al igual que en los plásticos hay que tener en cuenta variables tan importantes como la temperatura, el ablandamiento y deformación del material.
- Se evidenció que el modo de falla de estos engranajes de MC es el desprendimiento del diente desde la raíz, cuando las cargas de operación superan la capacidad nominal del diente, este esfuerzo se concentra en la raíz del diente y genera una fractura total del mismo.

4.2 Recomendaciones

Durante el desarrollo del proyecto se encontraron algunas oportunidades de mejora y aspectos que se pueden tener en cuenta para futuros estudios.

- La temperatura, el ablandamiento y la deformación del material son variables que pueden afectar el desempeño de los engranajes de MC, estos fenómenos pueden ser evaluados en futuros ensayos con el fin de determinar el comportamiento del material bajo condiciones de operación críticas.
- Uno de los aspectos que se pueden tener en cuenta para mejorar el desempeño de los engranajes de material compuesto es buscar el tipo de lubricante más adecuado para estos.
- Es necesario seguir profundizando en el uso de los biocompuestos en el campo de la ingeniería y la transmisión de movimiento, a pesar de que con los engranajes de MC se obtuvo buenos resultados, estas propiedades se pueden mejorar con la integración de otra fibra sintética de refuerzo como la fibra de vidrio.

A. Anexo: Ficha técnica resina de poliéster altos sólidos.

	FICHA TÉCNICA	CÓDIGO: FI-P-1-365
	QSI RP-055T	VERSIÓN: 0
	SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL	FECHA: 25/Oct/2016
	I+D INDUSTRIA	

1. NOMBRE

QSI RP-055T

2. DESCRIPCIÓN

QSI RP-055T es una resina poliestérica, insaturada, isoftálica, de reactividad media y tixotrópica.

QSI RP-055T es una resina de muy buenas características de color y retención del mismo, además de tener buen desempeño en cuanto a resistencia química, comparada con las resinas ortoftálicas.

QSI RP-055T es fabricada con tecnología y asesoría de apoyo permanente de ingeniería en la construcción de todo tipo de piezas en plástico reforzado.

3. CARACTERÍSTICAS

QSI RP-055T por sus características de desempeño, es apropiada para la fabricación de piezas que demanden un comportamiento de resistencia química y mecánica mejorado.

Su controlada temperatura exotérmica permite la aplicación de varias capas consecutivas de resina y refuerzo permitiendo la optimización de la producción y el mejor aprovechamiento de los recursos del proceso.

1. Formulación

Para curado en frío se recomienda la fórmula siguiente:

Materiales-----Partes por peso

QSI RP-055T-----100

Peróxido orgánico (9% Ox.)-----1 a 2.5 mls.

Requiere solo la adición del catalizador (Peróxido orgánico) para iniciar el curado, puesto que viene preacelerada.

2. Curado

La temperatura ambiente y la cantidad de catalizador controlan el tiempo de gel de la resina.

No se recomienda trabajar a temperaturas inferiores a 15°C ya que las propiedades mecánicas se ven seriamente afectadas.

Con el curado a temperatura ambiente se obtienen laminados satisfactorios para muchas aplicaciones; sin embargo, cuando se requieren óptimas propiedades y buen desempeño a largo plazo, el laminado se debe post curar durante un periodo de aproximadamente 4 horas a 70°C.

3. Aditivos especiales

QSI RP-055T se puede pigmentar hasta con 5% (por peso) de pastas pigmentarias. Para el uso de otros aditivos es necesario realizar pruebas funcionales previamente, ya que se pueden afectar adversamente las características especiales de manejo de la resina.

4. ESPECIFICACIONES

ESPECIFICACION	VALOR	METODO DE ANALISIS
Apariencia física:	Líquido viscoso rosado opaco	I-CC-M-G-030
Índice de acidez:	40 - 50	I-CC-M-G-014
% Sólidos	55 - 60 %	I-CC-M-G-015
Viscosidad Brookfield c P (Aguja:2, Velocidad:20) a 25°C	300 - 450 c P	I-CC-E-I-017
Índice tixotrópico (A:2, V:2 y A:2, V:20) a 25°C	2.0 - 2.5	I-CC-M-I-070
Estabilizar la medición durante 10 minutos		
Tiempo de Gel (25°C)*	15 - 20 minutos	I-CC-M-I-066

*Tiempo de gel

QSI RP-055T: 100 gramos

Mek-peróxido: 1.5 gramos



	FICHA TÉCNICA	CÓDIGO: FT-P-I-365
	QSI RP-055T	
	SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRAL	VERSIÓN: 0
	I+D INDUSTRIA	FECHA: 25/Oct/2016

5. APLICACIONES Y USOS

Los vaciados y encapsulados de QSI RP-055T tienen excepcional resistencia al agua y excelentes propiedades mecánicas lo cual hace esta resina muy apropiada para la fabricación de este tipo de piezas productos de propósito general. Agitar la resina antes de su uso.

6. PRESENTACIÓN

QSI RP-055T se suministra en tambores metálicos de 230 kilos o en otras presentaciones, según requerimiento del cliente.

QSI RP-055T tiene un tiempo de vida en almacenamiento y vencimiento de tres meses desde el momento de su fabricación.

7. CONDICIONES DE SEGURIDAD EN EL ALMACENAMIENTO Y LA MANIPULACIÓN

La información detallada para el manejo seguro de este material se encuentra en la respectiva "Hoja de Seguridad de Materiales".

QSI RP-055T está clasificado como "líquido inflamable" según norma Icontec 1.692 (división 3.3), pues tiene un punto de inflamación de 31°C (crisol cerrado) y por tanto debe mantenerse alejado de llamas abiertas.

Se recomienda almacenarlo a temperaturas inferiores a 25°C para obtener la máxima estabilidad. **Téngase en cuenta que esta resina está disuelta en estireno monómero y por lo tanto tiene estabilidad limitada.**

8. CONSIDERACIONES AMBIENTALES

Es importante en el manejo de este producto o material conocer la información de uso y seguridad y utilizar todo el contenido para evitar la generación de desperdicios. Se debe evitar verter este producto por los canales de aguas lluvias o al suelo.

En todo el ciclo se debe cumplir con la normatividad vigente relacionada con el manejo, uso y disposición de este producto o material en aras de prevenir la afectación del medio ambiente.

9. GARANTÍA

Este producto cuenta con todo el respaldo y la asistencia técnica que **QSI S.A.S** ofrece como acompañamiento de sus productos y garantía para sus clientes.

Nuestros productos se encuentran respaldados por el Centro Tecnológico, el cual cuenta con los recursos humanos y tecnológicos idóneos y suficientes para garantizar a nuestros clientes el conocimiento completo de los procesos que trabajamos; con una amplia variedad de equipos que nos permiten proveer los datos necesarios para obtener así el mejor desempeño de nuestros productos.

La información y recomendaciones que aparecen en esta publicación son, a nuestro entender enteramente confiables. Las sugerencias ofrecidas para usos o aplicaciones son solamente la opinión de nuestro departamento técnico.

Los consumidores deberán hacer sus propias pruebas para determinar el comportamiento de estos productos en sus objetivos específicos.

No damos garantías de tipo alguno exceptuando las que se ajustan a las especificaciones estándar del producto.

ELABORO	REVISÓ	APROBO
Profesional Cargo: Tecnológico II Industria Fecha: 14/Sep/2016	Cargo: Líder Tecnológico Industria Fecha: 24/Oct/2016	Cargo: Sistema De Gestión Integral Fecha: 25/Oct/2016



B. Anexo: Ficha técnica de la tinta penetrante y revelador.

INFORMACIÓN TÉCNICA - ANÁLISIS TÍPICO

PRODUCTO INSPECCIÓN DE TINTURA PENETRANTE CANTESCO® – TINTURA PENETRANTE VISIBLE P101S-A – LAVABLE CON SOLVENTE

APLICACIÓN Tintura roja penetrante, lavable con solvente indica las fallas superficiales contra el fondo del polvillo blanco de revelado. Sin solventes clorinados, cumple con los requisitos de contenido de halógeno y cloruro de la sección V de la ASME. Se recomienda que tanto 40°F (4°C) como 125°F (52°C) para la inspección de colorantes penetrantes.

COMPOSICIÓN Tintura penetrante roja basada en solventes de hidrocarburos de petróleo. Los siguientes resultados son un análisis típico del P101S-A:

PRUEBA	RESULTADOS	MÉTODO
Azufre	<1% por peso	ASTM D-129 / D-516 (B)
Fluoruro	<1% por peso	ASTM D-808 / D-1179 (B)
Cloruro	<1% por peso	ASTM D-808 / D-512
Halógeno Total	<1% por peso	ASME T-641

ENVASE Formato listo para usar, disponible en tarros de aerosol

ITEM	CÓDIGO	TAMAÑO	CANTIDAD POR CAJA
P101S-A	699913-10020	Tarros de aerosol de 16 oz	12 tarros por caja

DURACIÓN La duración de este producto es actualmente tres años desde la fecha de fabricación. El número de lote está en forma legible (AAAAMM####) y los últimos cuatro dígitos representan el número de lote de un mes dado.

SDS Existe una Hoja de Datos de Seguridad del Material (SDS) disponible para este producto. Para recibir una copia, envíenos un e-mail a msds@cantesco.com y solicite una hoja SDS para P101S-A AEROSOL.

P y R Para respuestas sobre cómo usar los materiales de INSPECCIÓN POR TINTURA PENETRANTE CANTESCO® pida una copia de nuestro folleto INSTRUCCIONES PARA EL USO DE TINTURAS PENETRANTES. Para obtener una lista completa de productos solicite una copia de nuestro CATÁLOGO DE PRODUCTOS DE SOLDADURA. Para información adicional visítenos en www.cantesco.com. Para recibir una copia de los métodos de prueba ASTM para el contenido de halógeno y cloruro (azufre, fluoruro y cloruro) tome contacto con www.astm.org de ASTM.

CERTIFICACIONES Kemper System es una empresa certificada bajo las denominaciones ISO 9001: 2015 y ISO 14001: 2015.

CANTESCO®
welding chemical products



FORMULARIO:
P101S-TECH.SPA
REV. 04/19

POR FAVOR TOMAR NOTA: El uso del producto y las condiciones de su uso están más allá del control de KEMPER SYSTEM AMERICA. La garantía de los materiales está limitada a los resultados de pruebas de desempeño del producto según se detalla en los certificados de cumplimiento. La interpretación de los resultados de pruebas es responsabilidad del usuario final. No se otorgan otras garantías, ni expresas ni implícitas. Para obtener detalles adicionales sobre nuestros términos y condiciones solicite una copia de nuestro formulario QSF 319 New Account Package.

KEMPER SYSTEM AMERICA, INC. • WELDING PRODUCTS DIVISION • WWW.CANTESCO.COM

PENETRANT

INFORMACIÓN TÉCNICA - ANÁLISIS TÍPICO

PRODUCTO INSPECCIÓN POR TINTURA PENETRANTE CANTESCO® – POLVILLO DE REVELADO D101 – HÚMEDO NO ACUOSO

APLICACIÓN El aerosol D101-A es un polvo de revelado húmedo, no acuoso, que se rocía en blanco para indicaciones de tinturas rojas. El producto cumple con las reglamentación sobre porcentajes de halógenos y cloruro del Artículo V del ASME. Se recomienda que tanto 40°F (4°C) como 125°F (52°C) para la inspección de colorantes penetrantes.

COMPOSICIÓN Polvillo de revelado blanco suspendido en base de solvente. Los siguientes resultados son un análisis típico del D101-A:

PRUEBA	RESULTADOS	MÉTODO
Azufre	<1% por peso	ASTM D-129 / D-516 (B)
Fluoruro	<1% por peso	ASTM D-808 / D-1179 (B)
Cloruro	<1% por peso	ASTM D-808 / D-512
Halógeno Total	<1% por peso	ASME T-641

ENVASE Formato listo para usar disponible en prácticos tarros en aerosol

ITEM	CÓDIGO	TAMAÑO	CANTIDAD POR CAJA
D101-A	699913-10370	Tarro de aerosol de 16 oz	12 tarros por caja

DURACIÓN La duración de este producto es actualmente tres años desde la fecha de fabricación. El número de lote está en forma legible (AAAAMM####) y los últimos cuatro dígitos es el número de lote de un mes dado.

SDS Existe una Hoja de Datos de Seguridad del Material (SDS) disponible para este producto. Para recibir una copia, envíenos un e-mail a msds@cantesco.com y solicite una hoja SDS para D101-A AEROSOL .

P y R Para respuestas sobre cómo usar los materiales de INSPECCIÓN POR TINTURA PENETRANTE CANTESCO® pida una copia de nuestro folleto INSTRUCCIONES PARA EL USO DE TINTURAS PENETRANTES. Para obtener una lista completa de productos solicite una copia de nuestro CATÁLOGO DE PRODUCTOS DE SOLDADURA. Para información adicional visítenos en www.cantesco.com. Para recibir una copia de los métodos de prueba ASTM para el contenido de halógeno y cloruro (azufre, fluoruro y cloruro) tome contacto con www.astm.org de ASTM.

CERTIFICACIONES Kemper System es una empresa certificada bajo las denominaciones ISO 9001: 2015 y ISO 14001: 2015.

CANTESCO®
welding chemical products



FORMULARIO:
D101-TECH.SPA

REV: 04/19

POR FAVOR TOMAR NOTA: El uso del producto y las condiciones de su uso están más allá del control de KEMPER SYSTEM AMERICA. La garantía de los materiales está limitada a los resultados de pruebas de desempeño del producto según se detalla en los certificados de cumplimiento. La interpretación de los resultados de pruebas es responsabilidad del usuario final. No se otorgan otras garantías, ni expresas ni implícitas. Para obtener detalles adicionales sobre nuestros términos y condiciones solicite una copia de nuestro formulario QSF 319 New Account Package.

KEMPER SYSTEM AMERICA, INC. • WELDING PRODUCTS DIVISION • WWW.CANTESCO.COM

Bibliografía

- Andrade Tacca, C. A., Veliz Llayqui, N. E., & Medina- Caceres, C. F. (2019). ANÁLISIS DE DUREZA Y RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE UN COMPUESTO DE MATRIZ METÁLICA Al-SiO₂, UTILIZANDO LATAS DE ALUMINIO Y CÁSCARA DE ARROZ COMO MATERIA PRIMA. *Revista Boliviana de Química*, 2(36.2). <https://doi.org/10.34098/2078-3949.36.2.1>
- Arias, L. S., & Vanegas, L. (2004). Falla de los materiales compuestos laminados. *Scientia et Technica*, 25, 113–118.
- Besednjak, A. (n.d.). *Los materiales compuestos*. 1–9.
- Castro, V. I., & Silva, H. O. (2018). *Caracterización de perfiles cilíndricos de material compuesto con refuerzo natural de cascarilla de arroz*. <http://www.elsevier.com/locate/scp>
- CONABIO. (2020). *Fibras de origen animal*. Comisión Nacional Para El Conocimiento y Uso de La Biodiversidad. <https://www.biodiversidad.gob.mx/diversidad/fibras-naturales/origen-animal>
- DED Goya ETP. (2015). *Tecnología de los materiales*. <https://sites.google.com/site/dedgoyaetpmateriales/clasificacion-de-los-materiales-compuestos>
- Díaz, F. (2013). Engranajes: Historia, Fabricación y Fallas. *Lecturas de Ingeniería.*, 209–213. <http://132.248.9.195/ptd2014/enero/0707541/0707541.pdf>
- Edil, C., Velasco, F., Manuel, J., & Castelló, T. (2015). *Materiales compuestos de matriz metálica* . 36, 179–192.
- Eduardo, L., & Hernandez, B. (1985). Las fallas en los engranajes. *Ingeniería e Investigación*, 0(12), 40–52.
- FINNING SUDAMÉRICA. (2010). *ANALISIS DE FALLAS 1*. 113.
- ICONTEC. (2018). *NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1140*. 1–18.
- Ingenieria Mercafenix. (2019). *¿Qué es un engrane y qué tipos existen?* - *Ingeniería Mecafenix*. <https://www.ingmecafenix.com/mecanica/tipos-de->

engrane/

- John, M. J., & Thomas, S. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate Polymers*, 343–364.
- Juarez, D., Ferrandiz, S., Balart, R., & García, D. (2012). Estudio, análisis y clasificación de elastómeros termoplásticos. *Estudio, Análisis y Clasificación de Elastómeros Termoplásticos*, 1(2), 22–41.
- Kalia, S., Kaith, B. S., & Kaur, I. (2009). *Pretreatments of Natural Fibers and their Application as Reinforcing Material in Polymer Composites-A Review*.
<https://doi.org/10.1002/pen.21328>
- Kalpakistan, S., & Schmid, S. R. (2014). *Manufactura, ingeniería y tecnología. Volumen 1. Tecnología de materiales* (Séptima ed). Pearson Educación.
- Ligero, J. A. (2008). Engranajes. Fundamentos de KBE (Knowledge Based Engineering). *Escuela Superior de Ingenieros Departamento de Ingeniería Gráfica*.
- Ligero, J. A. (2018). Fundamentos de KBE (Knowledge Based Engineering). *Escuela Superior de Ingenieros Departamento de Ingeniería Gráfica*, 6, 189–268.
- Marín, C. V., & Monroy, B. G. (2013). FIBRAS TEXTILES NATURALES SUSTENTABLES Y NUEVOS HÁBITOS DE CONSUMO. *Revista Legado de Arquitectura y Diseño*, 13, 31–46.
<https://www.redalyc.org/html/4779/477947372003/%0Ahttp://www.redalyc.org/pdf/4779/477947372003.pdf>
- Michelena, J. A. S. (2017). *Deterioro y modo de fallo en engranajes*.
- Mecmesin. (2021). Retrieved 25 May 2021, from
<https://www.mecmesin.com/es/prueba-de-torque>
- Naval Composite. (2016). *MATERIALES COMPUESTOS*.
<https://www.navalcomposites.com/materiales-compuestos/>
- Naval composites. (2010). *MATERIALES COMPUESTOS*. Naval Composites.
- Omran, E., Menezes, P. L., & Rohatgi, P. K. (2016). State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19(2), 717–736. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.10.007>
- Pawar, P. B., & Utpat, A. A. (2015). Analysis of Composite Material Spur Gear Under Static Loading Condition. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 2968–

2974. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.278>
- Pérez, M. A., & Sánchez, M. (2014). Fundamentos de la mecánica de los materiales compuestos. *Aplicaciones Avanzadas de Los Materiales Compuestos En La Obra Civil y La Edificación*, 19–50.
<https://doi.org/10.3926/oms.200>
- Pino Rivero, L. (2017). *MATERIALES COMPUESTOS*. Naval Composites.
- Rajan, V. S., Govindaraju, M., Ramu, M., & Satheeshkumar, V. (2020). Influence of Metal Foam Properties on Performance of Polymer Composite Spur Gear. *Materials Today: Proceedings*, 24, 1244–1250.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.439>
- Rodríguez, J. L. M., Vilchez, T. R. V., Pérez, J. A. V., & Cerón, R. M. (2019). *Diferentes fallas y métodos de cálculo de tensiones en engranajes cilíndricos de dientes rectos de material plástico*. September.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10915.20008>
- Romero, D., & Mora, J. S. (2019). *Desarrollo de cubierta tipo teja de material bio-compuesto con fibra de cascarilla de arroz*.
- Sharma, A., Aggarwal, M. L., & Singh, L. (2017). Experimental investigation into the effect of noise and damping using composite spur gear. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 2777–2782. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.156>
- Universal Laser Systems, I. (2018). *Compuesto de matriz cerámica*.
<https://www.ulsinc.com/es/materials/compuesto-matriz-cerámica>
- Universidad Politécnica de Valencia. (2018). *Compuestos reforzados con partículas*. https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/pfcm15_9_1.html
- Valverde, A., Sarria, B., & Monteagudo, J. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica*, 37, 6.