

**CONSTRUCCIÓN DE UN MECANISMO TORNILLO SIN FÍN - CORONA
FABRICADO EN RESINAS EPÓXICAS PARA EVALUAR SU DESEMPEÑO**

Gerardo Andrés Salazar Hoyos

Código: 1.054.921.638

Juan Carlos Ramírez Ospina

Código: 1.113.039.283

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGÍAS

ESCUELA DE TECNOLOGÍA MECÁNICA

PEREIRA

2015

**CONSTRUCCIÓN DE UN MECANISMO TORNILLO SINFIN - CORONA
FABRICADO EN RESINAS EPÓXICAS PARA EVALUAR SU DESEMPEÑO**

Gerardo Andrés Salazar Hoyos

Código: 1.054.921.638

Juan Carlos Ramírez Ospina

Código: 1.113.039.283

**Trabajo de grado para optar el título de:
Tecnólogo mecánico**

LUZ ADRIANA CAÑAS MENDOZA

Directora

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGÍAS

ESCUELA DE TECNOLOGÍA MECÁNICA

PEREIRA

2015

Pereira, Diciembre 2014

Nota de aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Pereira, Diciembre 2014

DEDICATORIA

Gerardo.

A mis padres y a mi abuela por confiar y depositar toda su fe en mí, por ayudarme a cumplir mis metas y por apoyar todas mis decisiones, a mi hermana por ser un ejemplo a seguir en toda mi vida, a mis amigos por acompañarme en mis mejores momentos y a todas aquellas personas que de una u otra forma han logrado contribuir en mi formación profesional y personal.

Juan.

A mi familia y a todos aquellos que de una forma u otra me apoyaron e hicieron posible que yo lograra cumplir esta meta.

A mi madre María Teresa Ramírez quien luchó contra las adversidades para que yo siempre pudiese asistir a la universidad; para todos ellos solo me queda decirles Gracias.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestras familias, amigos, compañeros y demás personas que han ayudado a cumplir una etapa más de nuestra vida, y que sabemos que siempre estuvieron, están y estarán con toda la disposición que exista para ayudarnos a seguir creciendo.

A nuestra directora Luz Adriana Cañas Mendoza por brindarnos ayuda durante este proceso y por no ser más que un solo docente, sino una compañera en esta experiencia.

A los ingenieros Carlos Alberto Romero Piedrahita y Dairo Hernán Mesa Grajales por ser guías en la realización de nuestro proyecto y ayudarnos a alcanzar un logro más en nuestra formación profesional.

CONTENIDO

pág.

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
1. MARCO TEORICO.....	3
1.1 REDUCTORES DE VELOCIDAD.....	3
1.1.1 Reductor de velocidad de tornillo sinfin-corona	4
1.1.2 Materiales usados para la fabricación de un tornillo sin fin-corona.	8
1.2 RESINAS EPOXICAS	9
1.2.1 Generalidades	9
1.2.2 Propiedades de los epóxicos.	10
2. OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	12
3.1 MODELO DE ESTUDIO.....	12
3.1.1 Caracterización de las piezas	12
3.1.2 Elaboración de planos tecnológicos.....	13
3.2 SELECCIÓN DE RESINAS Y CARGA METÁLICA.....	15
3.2.1 Selección de resinas	15
3.2.1 Selección de carga.....	16
3.3 FABRICACIÓN DE LAS PIEZAS EN FORMA DE MATERIA PRIMA BRUTA	19
3.3.1 Obtención de los bloques de compuesto	19
3.3.2 Mecanizado de los tornillos sin fin y las coronas.....	25
3.3.3 Fabricación del disco de freno de bicicleta en resina epóxica	28
3.3.4 Fabricación de las pastillas de freno en los diferentes materiales compuestos	29
3.3.5 Obtención de las probetas de tracción con los diferentes compuestos de resina-viruta de bronce.	32
3.3.6 Obtención de las probetas para las pruebas de dureza shore D	35
3.3.7 Obtención de la probeta para la prueba de capacitancia térmica:	37
3.4 PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL	38
3.4.1 Prueba de la prueba de dureza shore D:.....	38
3.4.2 Prueba de tracción:	39
3.4.3 Prueba de desgaste de material:	41
3.4.4 Prueba de conductividad térmica:	44
3.4.5 Prueba de capacitancia térmica:	47
3.4.6 Prueba del comportamiento mecánico del mecanismo sin lubricante:.....	51
3.5 SELECCIÓN DEL COMPUESTO PARA LA EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL MECANISMO CON LUBRICANTE Y SU LUBRICANTE.....	55
3.5.1 Selección del compuesto:	55
3.5.2 Selección del lubricante:.....	55
3.5.3 Procedimiento del comportamiento mecánico del mecanismo con lubricante:.....	56

3.6 DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL	57
4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....	64
4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA RESINA Y LOS COMPUESTOS	64
4.1.1 Resultados Prueba dureza Shore D:	64
4.1.2 Resultados Prueba de tracción:	67
4.1.3 Prueba de desgaste de material:	73
4.1.4 Prueba de conductividad térmica:	80
4.1.5 Prueba de capacitancia térmica:	80
4.2 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL MECANISMO SIN LUBRICANTE.....	82
4.2.1 Evaluación del comportamiento mecánico del mecanismo del compuesto del 20% sin lubricante:	82
4.2.2 Evaluación del comportamiento mecánico del mecanismo del compuesto del 30% sin lubricante.	83
4.2.3 Evaluación del comportamiento mecánico del mecanismo del compuesto del 40% sin lubricante.	85
4.3 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL MECANISMO CON LUBRICANTE	86
4.4 DETERMINACIÓN DE LA VIDA ÚTIL	87
4.4.1 Cálculo de la velocidad de deslizamiento del tornillo (Vs):	87
4.4.2 Cálculo del rendimiento de la transmisión:	88
4.4.3 Cálculo de las fuerzas que actúan en el engrane:	89
4.4.4 Cálculo de la resistencia a la fatiga de las superficies activas de los dientes de la rueda sinfín: ...	91
4.4.5 Cálculo de revisión de los dientes a la resistencia a la fatiga a la flexión:	92
4.4.6 Cálculo de los esfuerzos permisibles $[\sigma_H]$ y $[\sigma_F]$:	94
5. CONCLUSIONES.....	97
6. RECOMENDACIONES	99
7. BIBLIOGRAFÍA	100
ANEXO A.....	101
ANEXO B.....	102
ANEXO C.....	103
ANEXO D.....	104
ANEXO E.....	105
ANEXO F	106

CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

pág.

FIGURA 1: REDUCTOR COAXIAL.....	3
FIGURA 2: REDUCTOR CÓNICO.....	3
FIGURA 3: REDUCTOR PARALELO.....	4
FIGURA 4: REDUCTOR TORNILLO SIN FIN.....	4
FIGURA 5: REDUCTOR DE TORNILLO SIN FIN-CORONA.....	6
FIGURA 6: VARIACIONES DEL REDUCTOR DE TORNILLO SINFIN-CORONA.....	7
FIGURA 7: REDUCTOR DE TORNILLO SINFIN-CORONA, NUEVO DISEÑO DE NORD.....	8
FIGURA 8: REDUCTOR DE VELOCIDAD.....	12
FIGURA 9: TORNILLO SIN FIN DEL REDUCTOR.....	13
FIGURA 10: CORONA DEL REDUCTOR.....	13
FIGURA 11: PLANO TORNILLO SIN FIN DEL REDUCTOR.....	14
FIGURA 12: PLANO CORONA DEL REDUCTOR.....	15
FIGURA 13: FICHA TÉCNICA DE LA RESINA EPÓXICA R-1248.....	16
FIGURA 14: LAVADO DE LA VIRUTA.....	17
FIGURA 15: SECADO DE LA VIRUTA.....	17
FIGURA 16: TAMICES UTILIZADOS.....	17
FIGURA 17: TAMIZADO DE LA VIRUTA.....	17
FIGURA 18: TAMAÑO DE GRANOS OBTENIDOS.....	18
FIGURA 19: DISTRIBUCIÓN TAMAÑO DE GRANO VS MASA DE GRANO.....	19
FIGURA 20: ELEMENTO DE VACÍO.....	20
FIGURA 21: MOLDE PARA FABRICACIÓN DEL COMPUESTO CON SU DESMOLDANTE.....	21
FIGURA 22: RESINA R-1248 Y CATALIZADOR E-648.....	22
FIGURA 23: COMPUESTOS (RESINA R-1248, CATALIZADOR E-648, VIRUTA DE BRONCE).....	22
FIGURA 24: MEZCLA DE LOS COMPUESTOS.....	23
FIGURA 25: MECANISMO DE VACÍO.....	24
FIGURA 26: MOLDES OBTENIDOS (CORONAS Y TORNILLOS).....	24
FIGURA 27: TORNO CONVENCIONAL.....	25
FIGURA 28: FRESADORA UNIVERSAL.....	26
FIGURA 29: PROCESO DE MECANIZADO.....	27
FIGURA 30: TORNILLOS SIN FIN Y CORONAS OBTENIDAS EN LOS MATERIALES COMPUESTOS.....	27
FIGURA 31: PLANO DEL DISCO DE BICICLETA.....	28
FIGURA 32: DISCO DEL FRENO DE BICICLETA EN RESINA R-1248.....	29
FIGURA 33: SILICONA PARA LA IMPRESIÓN DE ALTA PRECISIÓN.....	30
FIGURA 34: PLANO PASTILLA DE BICICLETA.....	31
FIGURA 35: PASTILLAS DE FRENO DE DISCO FABRICADAS CON LOS DIFERENTES COMPUESTOS.....	31
FIGURA 36: MOLDE PARA LAS PROBETAS DE TRACCIÓN.....	32
FIGURA 37: FRESADORA CNC DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA.....	33
FIGURA 38: PLANO DE LA PROBETA DE TRACCIÓN.....	34
FIGURA 39: PROBETA PARA LAS PRUEBAS DE TRACCIÓN.....	35
FIGURA 40: MOLDES PARA OBTENER LAS PROBETAS DE DUREZA.....	36
FIGURA 41: VACIADO DEL COMPUESTO EN EL MOLDE.....	36
FIGURA 42: PROBETAS PARA EVALUACIÓN DE LA DUREZA SHORE D DE LOS DIFERENTES COMPUESTOS FABRICADOS.....	36
FIGURA 43: PLANO DE LAS DIMENSIONES PARA LA PROBETA DE LA PRUEBA DE CAPACITANCIA TÉRMICA.....	37
FIGURA 44: PLACA PARA LA PRUEBA DE CAPACITANCIA TÉRMICA.....	38

FIGURA 45: DURÓMETRO PARA PRUEBAS SHORE D.....	39
FIGURA 46: VISUALIZADOR DEL DURÓMETRO.....	39
FIGURA 47: MÁQUINA UNIVERSAL PARA PRUEBAS DE RESISTENCIA DE MATERIALES.....	40
FIGURA 48: BANCO DE PRUEBAS PARA EL DESGASTE.....	42
FIGURA 49: BALANZA.....	43
FIGURA 50: PIRÓMETRO.....	43
FIGURA 51: RESISTENCIA ELÉCTRICA.....	45
FIGURA 52: PIRÓMETRO.....	45
FIGURA 53: PLACA RESINA R-1248 SOLAPADA A LA PLACA DE ACERO 1020.....	46
FIGURA 54: ESQUEMA DEL MONTAJE PARA LA PRUEBA DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	46
FIGURA 55: TERMÓMETRO DE MERCURIO.....	48
FIGURA 56: BEAKER.....	48
FIGURA 57: PINZAS DE EXTRACCIÓN.....	49
FIGURA 58: HORNO TIPO MUFLA.....	49
FIGURA 59: PROBETA UTILIZADA PARA LA PRUEBA DE CAPACITANCIA TÉRMICA.....	50
FIGURA 60: ACEITE UTILIZADO PARA LA PRUEBA DE CAPACITANCIA TÉRMICA.....	50
FIGURA 61: PARES DE TORNILLO SIN FIN-CORONA CON SUS RESPECTIVOS COMPUESTOS.....	52
FIGURA 62: BANCO DE PRUEBAS PARA EL DESGASTE DEL PAR.....	53
FIGURA 63: LUBRICANTE (GRASA).....	55
FIGURA 64: CARACTERÍSTICAS Y COMPOSICIÓN DEL LUBRICANTE (GRASA).....	55
FIGURA 65: LUBRICACIÓN DEL MECANISMO TORNILLO SIN FIN CORONA.....	57
FIGURA 66: FALLA DE LOS MECANISMOS CON LUBRICANTE Y SIN LUBRICANTE DE LOS COMPUESTOS EVALUADOS.....	58
FIGURA 67: VELOCIDADES EN LA TRANSMISIÓN SIN FIN.....	59
FIGURA 68: FUERZAS QUE ACTÚAN EN LA TRANSMISIÓN SIN FIN.....	61
FIGURA 69: PROBETAS DE TRACCIÓN FRACTURADAS.....	67
FIGURA 70: GRÁFICA FUERZA VS ELONGACIÓN PROBETA RESINA SIN CARGA.....	68
FIGURA 71: GRÁFICA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA RESINA SIN CARGA.....	69
FIGURA 72: GRAFICA FUERZA VS ELONGACIÓN PROBETA RESINA CON 20% DE CARGA.....	70
FIGURA 73: GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA PROBETA RESINA CON 20% DE CARGA.....	70
FIGURA 74: GRAFICA FUERZA VS ELONGACIÓN PROBETA RESINA CON 30% DE CARGA.....	72
FIGURA 75: GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA PROBETA RESINA CON 30% DE CARGA.....	72
FIGURA 76: GRAFICA FUERZA VS DEFORMACIÓN PROBETA RESINA CON 40% DE CARGA.....	72
FIGURA 77: GRAFICA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA PROBETA RESINA CON 40% DE CARGA.....	72
FIGURA 78: GRÁFICA PRUEBA DE DESGASTE DISCO – PATILLAS 20%.....	75
FIGURA 79: GRAFICA PRUEBA DE DESGASTE DISCO – PATILLAS 30%.....	77
FIGURA 80: GRAFICA PRUEBA DE DESGASTE DISCO – PATILLAS 40%.....	79
FIGURA 81: ASPECTO DE FALLA DEL PAR TORNILLO SIN FIN-CORONA, EL PRIMERO CON REFUERZO DE 20% Y LA CORONA SIN REFUERZO, SIN USO DE LUBRICANTE.....	82
FIGURA 82: FALLA DE LA CORONA SIN REFUERZO.....	83
FIGURA 83: FALLA DEL TORNILLO SINFIN FABRICADO CON 20% DE CARGA DE REFUERZO.....	83
FIGURA 84: MECANISMO DE FALLA DEL PAR TORNILLO SIN FIN-CORONA DEL COMPUESTO DE 30% SIN LUBRICANTE.....	84
FIGURA 85: FALLA DE LA CORONA DEL TORNILLO DE 30% DE CARGA.....	84
FIGURA 86: FALLA DEL TORNILLO SIN FIN DEL 30% DE CARGA.....	84
FIGURA 87: MECANISMO DE FALLA DEL PAR TORNILLO SIN FIN-CORONA DEL COMPUESTO DE 40% SIN LUBRICANTE.....	85
FIGURA 88: FALLA DE LA CORONA DEL TORNILLO DE 40% DE CARGA.....	86
FIGURA 89: FALLA DEL TORNILLO SIN FIN DEL 40% DE CARGA.....	86

FIGURA 90: MECANISMO DE FALLA DEL PAR TORNILLO SIN FIN-CORONA DEL COMPUESTO DE 20% CON LUBRICANTE..... 86

FIGURA 91: FALLA DE LA CORONA DEL TORNILLO DE 40% DE CARGA CON LUBRICANTE..... 87

FIGURA 92: FALLA DEL TORNILLO SIN FIN DE 40% DE CARGA CON LUBRICANTE. 87

CONTENIDO DE TABLAS

	pág.
TABLA 1: PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES EPÓXICOS.	10
TABLA 2: DISTRIBUCIÓN DE GRANO DE VIRUTA DE BRONCE.	19
TABLA 3: ESFUERZOS PERMISIBLES DE FLEXIÓN.	63
TABLA 4: DUREZA SHORE D PARA LA PROBETA SIN REFUERZO.	64
TABLA 5: DUREZA SHORE D PROBETA CON 20% DE REFUERZO.	64
TABLA 6: DUREZA SHORE D PROBETA CON 30% DE REFUERZO.	65
TABLA 7: DUREZA SHORE D PROBETA CON 40% DE REFUERZO.	66
TABLA 8: FUERZA VS ELONGACIÓN.	68
TABLA 9: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA.	68
TABLA 10: FUERZA VS ELONGACIÓN.	69
TABLA 11: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA.	69
TABLA 12: FUERZA VS ELONGACIÓN.	71
TABLA 13: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA.	71
TABLA 14: FUERZA VS ELONGACIÓN.	73
TABLA 15: ESFUERZO VS DEFORMACIÓN UNITARIA.	73
TABLA 16: TABLA COMPARATIVA DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS DEL CÁLCULO DE LAS PRUEBAS DE TRACCIÓN DE LAS PROBETAS REFORZADAS.	73
TABLA 17: TABLA RESULTADOS DE DESGASTE ENTRE EL DISCO DE RESINA Y LAS PASTILLAS CARGADAS CON EL 20% DE REFUERZO.	74
TABLA 18: TABLA PRUEBA DE DESGASTE DISCO DE RESINA Y PASTILLAS CARGADAS CON EL 30% DE REFUERZO.	76
TABLA 19: TABLA PRUEBA DE DESGASTE DISCO DE RESINA Y PASTILLAS CARGADAS CON EL 20% DE REFUERZO.	78
TABLA 20: TABLA DE RESULTADOS DE LA PRUEBA DE DESGASTE DE LAS COMBINACIONES DISCO-PASTILLAS.	80
TABLA 21: TABLA PARA HALLAR EL VALOR DE ρ'	88
TABLA 22: COEFICIENTES K_A , K_D Y K_E DE LOS MATERIALES DEL PIÑÓN Y LA RUEDA.	90
TABLA 23: COEFICIENTES DE DEFORMACIÓN DEL SIN FIN (θ).	91
TABLA 24: COEFICIENTE DE FORMA DEL DIENTE DE LA RUEDA SIN FIN.	93
TABLA 25: TABLA PARA EL COEFICIENTE C_V	94

RESUMEN

En este documento se presenta el estudio de las resinas epóxicas con refuerzo utilizadas en la construcción de un mecanismo tornillo sin fin-corona para la evaluación de su desempeño a través de ensayos de tracción, dureza, desgaste superficial, capacidad térmica y conductividad térmica; Las resinas fueron reforzadas con viruta de bronce en porcentajes de 20%, 30% y 40%, obteniéndose bloques de compuestos resina- viruta.

Se efectuó el vacío de los bloques para garantizar uniformidad interna de estos y reduciendo así las porosidades a causa de burbujas dentro de la mezcla

Estos bloques fueron previamente mecanizados por el método de arranque de viruta y obteniendo así los pares de tornillo sin fin-corona con sus diferentes porcentajes de refuerzo.

Se construye un banco de pruebas en la cuales se realizaron las pruebas de desgaste de material y desgaste del mecanismo tornillo sin fin-corona, el banco se compone de motor eléctrico, dinamómetro, soporte para mordazas, variador de velocidades; esto con el fin de realizar el estudio de la vida útil de los compuestos y poder concluir que compuesto se comportó mejor y tuvo mayor vida útil.

Con la realización de las pruebas anteriormente mencionadas y con el desarrollo de los cálculos previamente establecidos en el capítulo 12 transmisiones de tornillo sin fin-corona del libro de diseño de elementos de máquinas del ingeniero Carlos Alberto Romero Piedrahita se efectuó la evaluación mecánica de estos compuestos y se obtuvo que el par con porcentaje de refuerzo del 20% es el que mejor desempeño y mayor vida útil presenta.

INTRODUCCIÓN

Las cajas reductoras son mecanismos ampliamente utilizados para el accionamiento de infinidad de máquinas a nivel industrial; su propósito general es reducir velocidades y transmitir potencia. En el caso de las cajas reductoras de tornillo sin fin – corona, lo que se busca es, por medio de un mecanismo sencillo, acondicionar la velocidad de un motor, a una velocidad requerida, para el funcionamiento óptimo de la máquina que se requiere poner en funcionamiento.

La industria, a través de los años, ha venido transformándose mediante la innovación de productos, maquinaria y nuevos materiales, por lo tanto, en el caso de los procesos de transformación, se requiere de la investigación y desarrollo de elementos de máquinas fabricados en materiales no convencionales, entre los cuales se pueden citar los polímeros y los compuestos.

En algunos procesos se involucra el transporte de carga liviana, por lo cual se puede pensar en la construcción de cajas reductoras de tornillo sin fin-corona, aprovechando las propiedades de algunas resinas de alta resistencia como las resinas epóxicas y así realizar una construcción más rápida de algunos elementos a un menor costo, reduciendo los tiempos de fabricación, siempre y cuando, bajo condiciones de trabajo, el material epóxico cumpla con los requerimientos a los cuales irá a ser sometido.

Uno de los aspectos relevantes en el trabajo propuesto, consiste en que cada uno de los mecanismos formulados y construidos serán sometidos a condiciones reales de funcionamiento para observar el desempeño de los componentes en servicio, de esta manera se tendrá una caracterización inicial de la respuesta de los diferentes materiales.

Mediante la ejecución de este proyecto se fortalecen las líneas de investigación, alrededor de los materiales y procesos de manufactura en la Escuela de Tecnología Mecánica. El trabajo está enmarcado en el Grupo de Investigación en Materiales de Ingeniería GIMI-UTP, haciendo parte de las líneas de investigación en polímeros y tribología.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Reductores de velocidad.

Los reductores de velocidad son sistemas de transmisión de potencia que permiten que los motores eléctricos y mecánicos funcionen a diferentes velocidades con el objetivo principal de entregar una velocidad menor a la velocidad de entrada.

La mayoría de máquinas trabajan a velocidades mucho más bajas que las que entregan los motores, así los reductores de velocidad, aparte de que suplen esta necesidad, agregan potencia y torque permitiendo el funcionamiento eficiente de las máquinas, por esta razón, es indispensable que los reductores de velocidad sean correctamente diseñados y fabricados ya que las máquinas pueden presentar fallas, deficiencias en su funcionamiento, ruido, recalentamiento, entre otras deficiencias si no se usa el reductor de velocidad correcto.

Los reductores se caracterizan por la potencia y la velocidad de entrada y salida, por el par que entregan a la salida y por la relación de reducción. Su clasificación se realiza por la tipología de sus engranajes. Una de las clasificaciones más usuales es el reductor de velocidad sin fin – Corona, el cual se describirá a continuación (1).

En las figuras 1 a 4 se presentan algunos tipos de reductores de velocidad (1):

Figura 1: reductor coaxial.



Fuente: (1)

Figura 2: reductor cónico.



Fuente: (1)

En el motor reductor de la figura 1 el eje del motor y el del reductor están

En el motor reductor de la figura 2, el eje

alineados. Transmisión mediante engranajes rectos. El eje de salida siempre es recto.

del motor y del reductor están en planos paralelos. Transmisión mediante engranajes rectos. Permite múltiples ejes de salida.

Figura 3: reductor paralelo.



Fuente: (1)

En el motor reductor de la figura 3 el eje del motor y del reductor está a 90° . Transmisión mediante engranajes cónicos. El engranaje cónico es siempre la parte más débil.

Figura 4: reductor tornillo sin fin.



Fuente: (1)

En el motor reductor de la figura 4 el eje del motor y del reductor está a 90° . Transmisión mediante engranajes. Una sola etapa de reducción.

Para poder realizar la correcta selección de un reductor, el cual logre satisfacer las necesidades presentes, se deben tener en cuenta, de forma general, los siguientes parámetros: (1)

- Par necesario: el par que debe soportar el reductor.
- Revoluciones a la entrada y a la salida y en su defecto, la relación de transmisión deseada.
- Factor de servicio: depende de las características de trabajo de la máquina, del número de arranques por hora, del número de horas de funcionamiento al día y de la vida total.

1.1.1 Reductor de velocidad de tornillo sin fin-corona

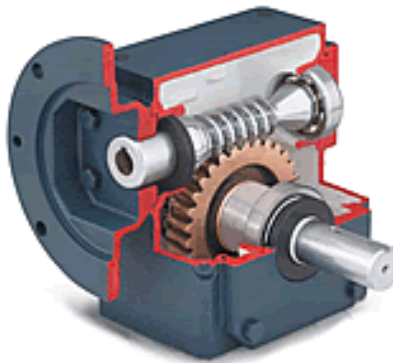
1.1.1.1 Generalidades.

Como su nombre lo indica, estos reductores utilizan un tornillo sin fin y una corona como elementos de transmisión. Es considerado como el tipo de reductor más simple y el más usado en la industria. La relación de velocidad entre el número de vueltas del tornillo y el número de vueltas del árbol es muy grande; una vuelta del

tornillo sin fin indica el avance de un diente de la corona, este funcionamiento reduce drásticamente la velocidad de giro del eje conducido lo cual, a su vez, genera una elevada ganancia mecánica.

Como se muestra en la Figura 5, los reductores de velocidad de este tipo no ocupan mucho espacio, esto se convierte en una ventaja al momento de implementarlos en la industria, además brindan un cambio de posición de eje de 90° que en muchos casos es requerido por la configuración de la máquina o el espacio disponible.

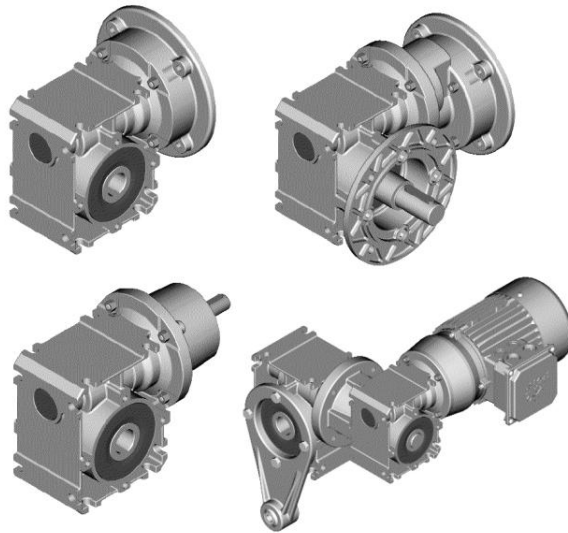
Figura 5: reductor de tonillo sin fin-corona.



Fuente: (1)

La Figura 6 muestra algunas variaciones del reductor de tornillo sin fin-corona.

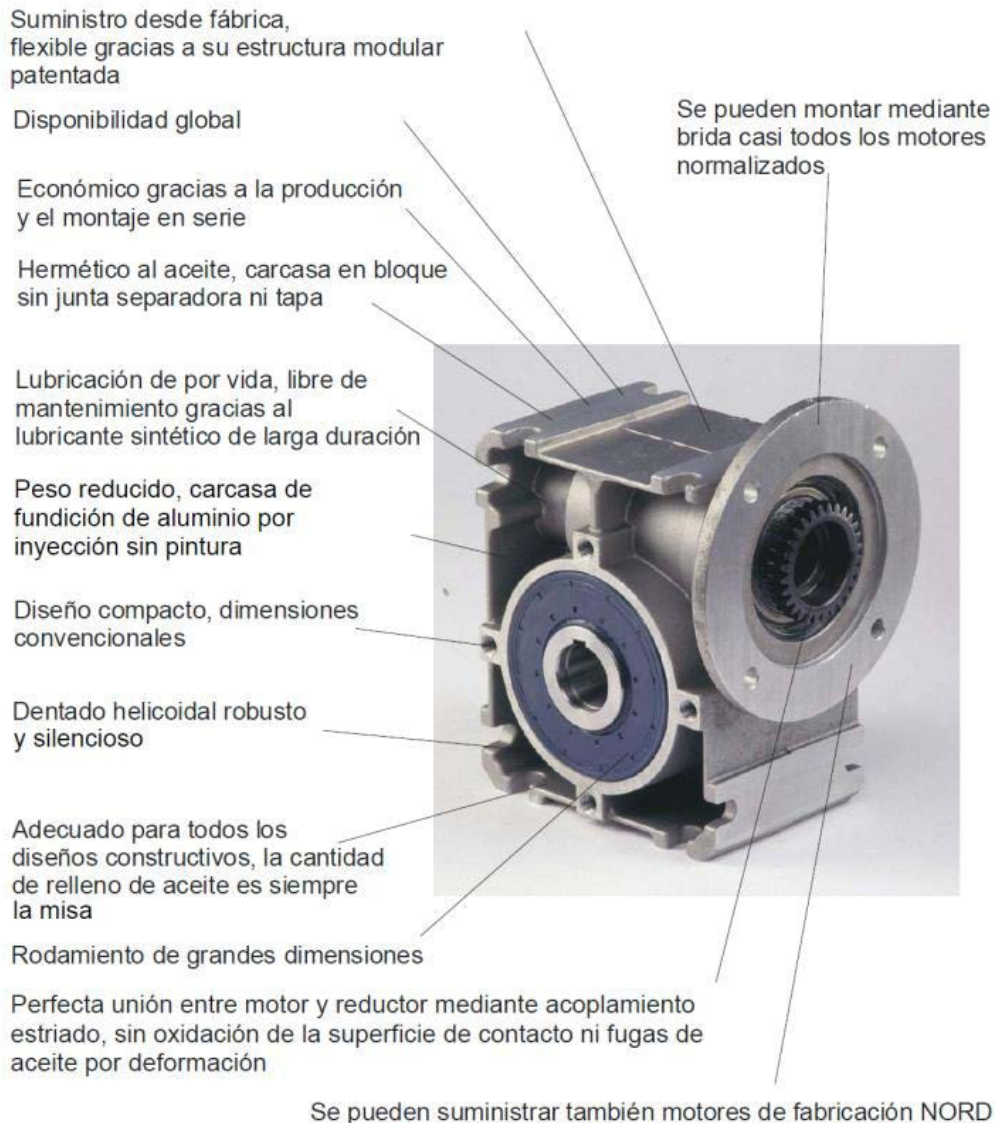
Figura 6: Variaciones del reductor de tornillo sinfín-corona.



Fuente: (2)

La Figura 7 presenta un tipo de diseño de un reductor de tornillo sinfín-corona; en la fotografía se muestran las características de diseño que puede tener un reductor de este tipo. (2)

Figura 7: Reductor de tornillo sinfín-corona, nuevo diseño de NORD.



Fuente: (2)

1.1.2 Materiales usados para la fabricación de un tornillo sin fin-corona.

Los materiales preferidos para la fabricación de las ruedas de estos engranes son los bronce, especialmente de estaño y níquel-estaño (que pueden ser o no fundidos en coquilla, un proceso que produce endurecimiento superficial), pero también se emplean frecuentemente otros bronce, por ejemplo al plomo (para alta velocidad) y los de aluminio y silicio (para engranes de baja velocidad y carga

pesada). Para reducir los costos, especialmente en ruedas grandes, se utiliza una llanta o corona de bronce fija a un núcleo central de hierro fundido o acero moldeado. (3)

Según Industrias FAMA (Empresa colombiana dedicada a la fabricación de cajas reductoras), indica que el tornillo sinfín, fabricados en acero al cromo-níquel, tiene una dureza de 55 a 57 HRC (acero con alto contenido de carbono). El material es tratado térmicamente por medio de un temple y un revenido, estos procesos son los que proporcionan la dureza al tornillo.

Según *Reshetov* (3), se deben utilizar para fabricar transmisiones sin fin- corona los siguientes materiales:

- Aceros cementados con dureza HRC después del temple entre 56 a 63.
- Aceros de contenido medio de carbono con temple superficial hasta una dureza HRC entre 45 a 55 con rectificado y pulido posterior.
- Aceros nitrurados sin rectificado posterior, solamente pulido.

El tornillo sin-fín convencionalmente utilizado es fabricado en acero AISI 4140, este acero cumple todas las características necesarias para el funcionamiento de la caja reductora. (3)

1.2 RESINAS EPÒXICAS

1.2.1 Generalidades

Los compuestos de resinas epoxídicas han tenido amplia aceptación en actividades donde se requieren materiales ligeros pero de alta resistencia mecánica como lo son los polímeros. Son materiales termofraguables que se tornan duros y no fusibles bajo la acción de agentes acelerantes. (4)

Se utilizan desde colados, laminados, moldeados, envasado (preservación de partes eléctricas en una envoltura), como ingredientes para pinturas y como adhesivos; tienen poco encogimiento, buena resistencia a las sustancias químicas, excelentes características eléctricas, propiedades físicas firmes y se adhieren bien, tanto al vidrio como al metal. Como adhesivos se emplean en estructuras de aviones para sustituir otras formas de unión. Igualmente, en la fabricación de laminados se usan con fibras de vidrio para hacer tableros de circuitos eléctricos impresos, depósitos, plantillas y matrices. Debido a su resistencia al desgaste y al impacto, últimamente se han empleado extensamente las resinas de epoxy, en la fabricación de estampas para prensas usadas en operaciones para darle forma al metal. (4)

1.2.2 Propiedades de los epóxicos.

Las resinas epóxicas se basan en un grupo químico llamado *epóxicos*. La formulación más simple de los epóxicos es el óxido de etileno (C_2H_3O), la epiclorhidrina (C_3H_5OCl), es un epóxico mucho más utilizado para producir resinas epóxicas. Los epóxicos no curados tienen un bajo grado de polimerización. Se necesita usar un agente de curado para incrementar el peso molecular y encadenar transversalmente al epóxico. Los posibles agentes de curado incluyen a las poliamidas y a los anhídridos ácidos. Los epóxicos curados son notables por su resistencia, adhesión, resistencia al calor y a los agentes químicos. Sus aplicaciones incluyen recubrimientos superficiales, pisos industriales, compuestos reforzados con fibra de vidrio y adhesivos.

Las propiedades aislantes de los epóxicos termofijos los hacen útiles en varias aplicaciones electrónicas como el encapsulado de transistores y en la laminación de tarjetas para circuitos impresos. (5)

Algunas de las propiedades mecánicas de los epóxicos se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Propiedades mecánicas de los materiales epóxicos.

PROPIEDADES MECÁNICAS	
Ejemplo de composición química	Epiclorhidrina (C_3H_5OCl) más un agente de curado como la Trietilamina [$C_6H_5-CH_2N-(CH_3)_2$].
Método de polimerización	Por pasos.
Módulo de elasticidad	1000000 lb/pulg ² (7000 MPa).
Resistencia a la tensión	10000 lb/pulg ² (70 MPa).
Elongación	0%
Gravedad específica	1.1
Participación Aproximada en el Mercado	Cerca del 11 %

Fuente: (6)

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general.

Construir un mecanismo tornillo sinfín - corona utilizando resinas epóxicas con diferentes cargas metálicas y evaluar, a través de pruebas mecánicas y tribológicas (desgaste y lubricación), su comportamiento en servicio. Utilizando como proceso de fabricación el maquinado por arranque de viruta.

2.2 Objetivos específicos.

- Documentar la información alrededor de los temas relacionados con las resinas epóxicas y los mecanismos tornillo sinfín – corona, en cuanto a materiales usos y procesos de manufactura.
- Construir el tornillo y la corona de un mecanismo previamente seleccionado, con materiales compuestos a base de resinas epóxicas con diferentes porcentajes de cargas metálicas.
- Determinar la vida útil de cada mecanismo tornillo sin fin – corona, evaluando el efecto de la presencia y ausencia de lubricante, mediante la determinación de la vida útil de cada sistema.
- Evaluar y analizar el efecto de la variación de la carga aplicada en la pieza fabricada con el compuesto que presentó mayor vida útil en las condiciones de trabajo.
- Documentar las características del material seleccionado y hacer un análisis de costos frente al uso de materiales convencionales.
- Escribir y realizar la sustentación del trabajo.

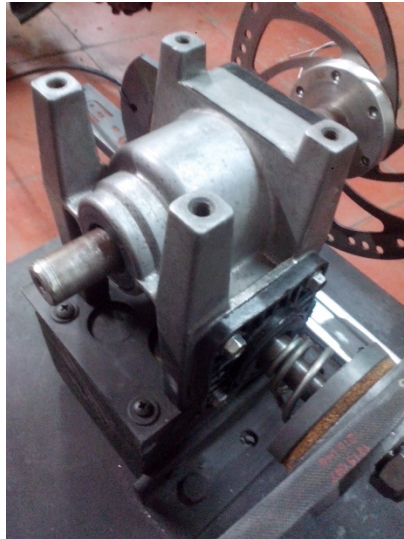
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Modelo de estudio

3.1.1 Caracterización de las piezas

La figura 8 muestra el sistema mecánico (moto-reductor), usado en este estudio para realizar las pruebas de desgaste; el reductor de tornillo sinfín-corona fue facilitado por el ingeniero Carlos Alberto Romero Piedrahita; equipo ubicado en el laboratorio de motores de la UTP.

Figura 8: reductor de velocidad.



Fuente: autores.

El reductor consta de un tornillo sinfín de una entrada y hélice derecha, fabricado en un acero al carbono y una corona de bronce vaciada, que consta de 23 dientes como se observa en las figuras 9 y 10 respectivamente.

Figura 9: tornillo sin fin del reductor.



.Fuente: autores.

Figura 10: corona del reductor.



Fuente: autores.

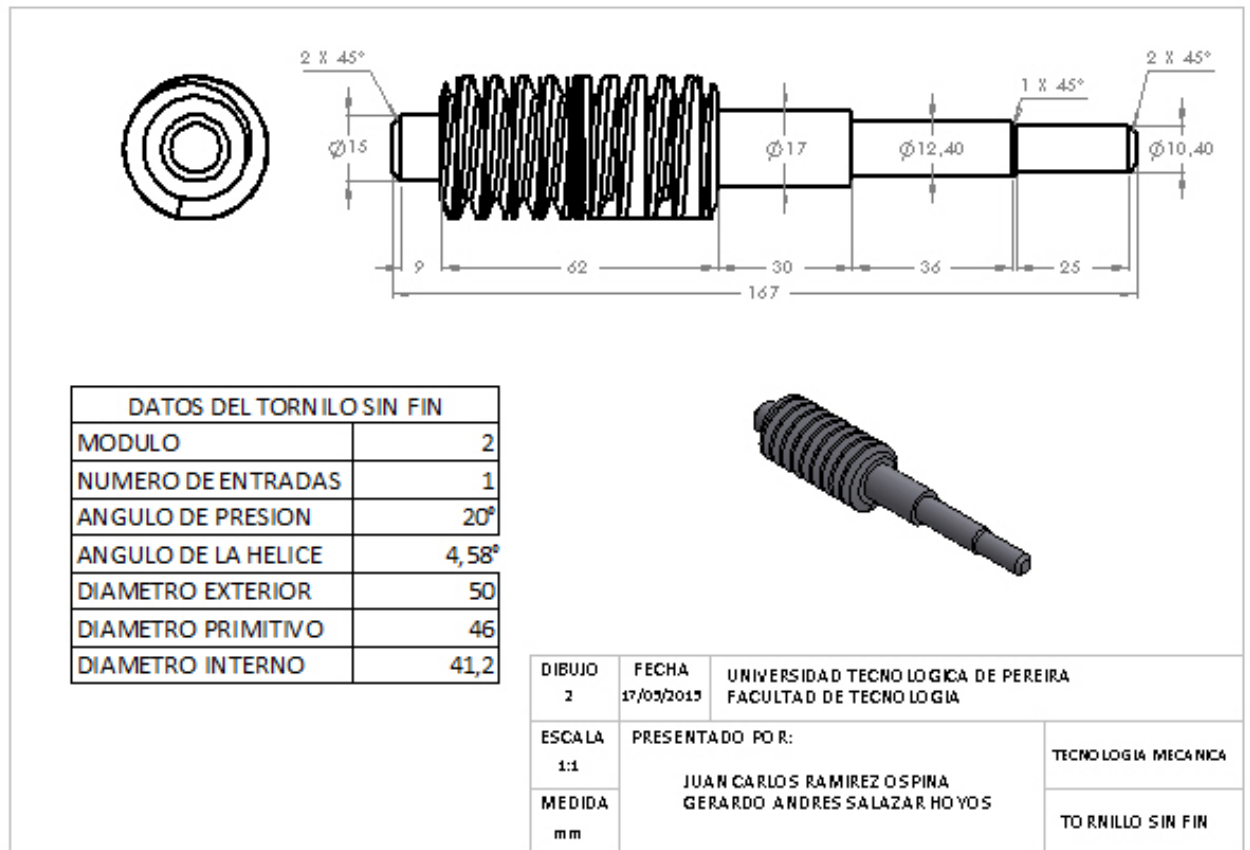
3.1.2 Elaboración de planos tecnológicos.

Se elaboraron los planos tecnológicos de las piezas del mecanismo que se fabricó en resinas epóxicas reforzadas.

Para la elaboración de los planos tecnológicos se contó con la ayuda de un software de dibujo CAD Autodesk Inventor.

3.2.1.1 Plano del tornillo sin fin.

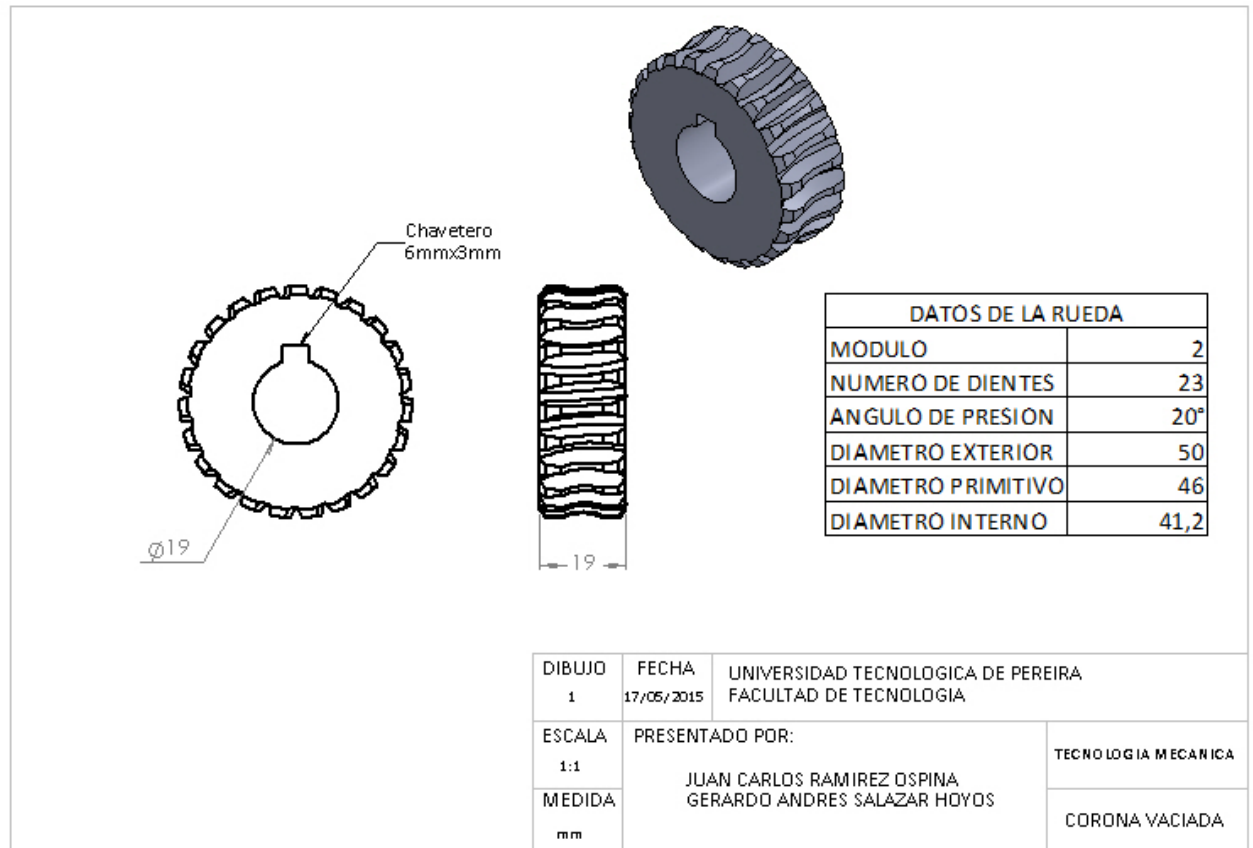
Figura 11: plano tornillo sin fin del reductor.



Fuente: autores.

3.2.1.2 Plano corona vaciada.

Figura 12: plano corona del reductor.



Fuente: autores.

3.2 Selección de resinas y carga metálica

3.1.1 Selección de resinas

Para el estudio se requería de un material que ofreciera una buena resistencia al desgaste y a la alta temperatura, fenómenos asociados a las partes que engranan dentro del reductor tornillo sinfín-corona, y que al mismo tiempo sea más liviano en comparación de los materiales convencionales del par sinfín-corona y además que se pueda fabricar por métodos de arranque de viruta tradicionales.

En el laboratorio de polímeros de la Escuela de Tecnología Mecánica de la universidad Tecnológica de Pereira se tenía a disposición la resina epóxica marca sintepox R-1248, la cual, a partir de los datos obtenidos por el fabricante, se seleccionó como material de estudio; la figura 13 muestra la ficha técnica de dicho material.

Figura 13: Ficha técnica de la resina epóxica R-1248.

SINTEPOX LTDA.
RESINA : R - 1248
ENDURECEDOR: E - 648
 SINTEPOX
 RESINAS EPOXICAS

GENERALIDADES:	Sistema epóxico de alta viscosidad en base a una resina epóxica tipo Bifenol A con cargas metálicas y un endurecedor tipo amina aromática.	
APLICACIONES:	Sistema usado para capas de superficie en moldes en donde se requiera alta resistencia a la temperatura y gelificado a temperatura ambiente, tales como los moldes para poliuretano y termoformado.	
CARACTERÍSTICAS:	RESINA	ENDURECEDOR
Viscosidad a 20 ° C.	500 - 1000 P.	10-15 P
Color:	Gris	Ambar
Proporciones:	100 P. P.	10 P. P.
Tiempo de gelificado:	40-50 min. a 25 ° C.	100 gr.
Curado mínimo:	12 horas a 25 ° C.	
PROPIEDADES:	Después de poscurado a 120 ° C durante 8 horas. Temperatura de deflexión: 130 ° C Dureza Shore D: 85 - 92	
PRESENTACIÓN:	El envase original es de la resina es de 1 kilo y el del endurecedor es de 0.1 kilos y pueden conservarse por 12 meses manteniendo los productos entre 18 y 23° C. en lugares secos y teniendo bien cerrados los recipientes.	

5-8223

Fuente: autores.

3.2.1 Selección de carga

Como material para la carga, se reutilizó la viruta de bronce que resultaba del desarrollo de las prácticas de mecanizado de material por medio de arranque de viruta (torno, fresadora), dentro del taller de mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira.

Se realizó el lavado y secado de la viruta recolectada con el fin de eliminar las impurezas resultantes del proceso de mecanizado (taladrina, grasas, polvo), para su posterior tamizado. En la figura 14 y 15 muestra el lavado y secado de la viruta de bronce.

Figura 14: lavado de la viruta.



Fuente: autores.

Figura 15: secado de la viruta.



Fuente: autores.

Las figuras 16 y 17 muestran el tamizado de la viruta de bronce para la obtención del tamaño de grano del material de refuerzo, garantizando un tamaño homogéneo.

Figura 16: tamices utilizados.



Fuente: autores.

Figura 17: tamizado de la viruta.

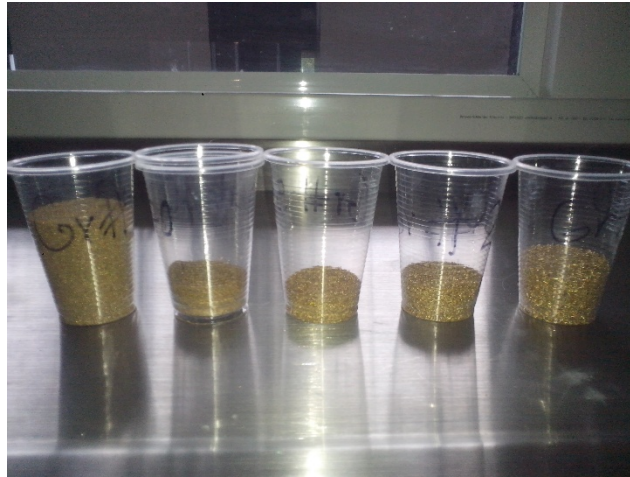


Fuente: autores.

Se utilizaron varios tamices para así obtener un tamaño de grano específico, mediante una distribución de Gaussiana, con el fin de crear un compuesto con una distribución óptima de resina-carga metálica. La figura 18 muestra los tamaños de

granos obtenidos por el tamizado y que se muestran en la tabla 2, junto con el peso de cada muestra obtenida.

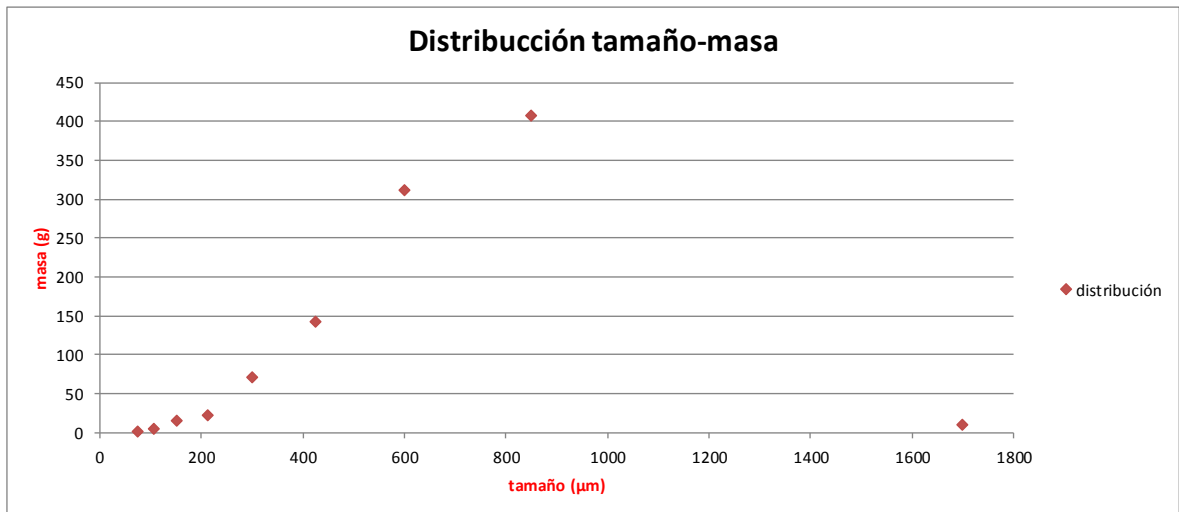
Figura 18: tamaño de granos obtenidos.



Fuente: Autores.

A partir de las distintas cantidades obtenidas durante el tamizado, se elaboró la curva de distribución de tamaño vs masa, como se mostrada la figura 19.

Figura 19: distribución tamaño de grano vs masa de grano.



Fuente: Autores.

La tabla 2 muestra la distribución de tamaño vs masa de la cual se obtuvo el valor del grano utilizado para el compuesto de resina-viruta de bronce.

Tabla 2: distribución de grano de viruta de bronce.

masa (g)	tamaño (µm)
10,7	1700
407	850
311	600
142,9	425
71	300
21,8	212
15,6	150
4,5	106
1,5	75

Fuente: autores.

3.3 Fabricación de las piezas en forma de materia prima bruta

3.3.1 Obtención de los bloques de compuesto

Para la fabricación de estos bloques, por medio de la colaboración de la directora del proyecto de grado se sugirieron los valores de compuesto resina- viruta, los cuales se decidieron por estudiar:

- El compuesto de resina/catalizador con 20 % en masa de viruta de bronce.
- El compuesto de resina/catalizador con 30 % en masa de viruta de bronce.
- El compuesto de resina/catalizador con 40 % en masa de viruta de bronce.

Acordados los porcentajes de cara para conformar los materiales compuestos a utilizar en este estudio, se procedió al vaciado de estos. Para el vaciado del compuesto se vio la necesidad de diseñar un elemento que facilite generar un vacío al compuesto para mantener una distribución uniforme de la viruta con respecto a la resina y así evitar problemas de asentamiento de la viruta y burbujas de aire dentro del compuesto. La figura 20 muestra el sistema con el cual se le hizo vacío a los bloques de compuesto.

Figura 20: elemento de vacío.



Fuente: autores

Para los moldes de los compuestos se utilizaron tubos de PVC de 1 ½” de diámetro, a los que se les aplicó una capa de alcohol poli-vinílico para su posterior desmoldeo. La figura 21 muestra el molde para fabricación de materiales compuestos.

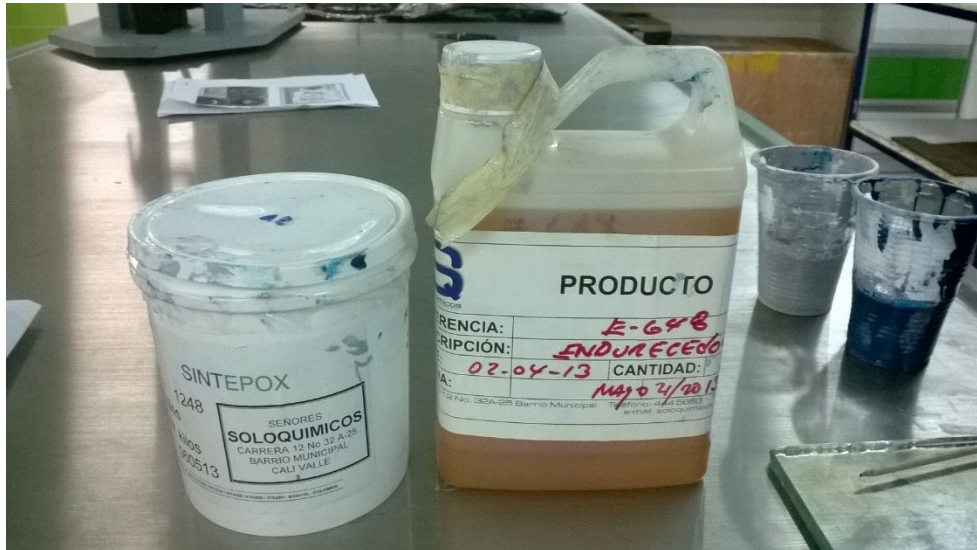
Figura 21: molde para fabricación del compuesto con su desmoldante.



Fuente: Autores

Después de tener los moldes listos con su desmoldante, se procedió a realizar la mezcla de resina R-1248 con su respectivo catalizador E-648 en los porcentajes establecidos por el proveedor. Estos porcentajes están en la ficha técnica de la resina R-1248 (SINTEPOX), donde se indica que la proporción de resina-catalizador es de 100-10. Esto implica que a una cierta cantidad de masa de resina R-1248 se le agrega el 10% de masa del catalizador E-648. La figura 22 muestra la resina y catalizador mencionados.

Figura 22: resina R-1248 y catalizador E-648.



Fuente: Autores.

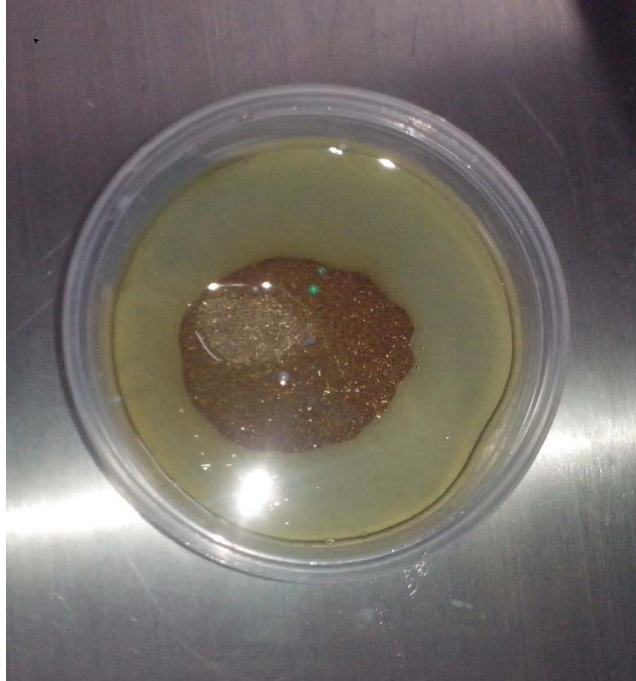
Para su mezclado se disponibilizaron los tres componentes con sus respectivos porcentajes de resina, catalizador y el porcentaje de viruta de bronce para cada tornillo sin fin a fabricar, esto es: 20%, 30% y 40% de viruta, de acuerdo con la masa de resina utilizada en la mezcla. En un recipiente se mezclaron los componentes con una cuchara plástica durante un tiempo aproximado de 8 a 10 minutos, tiempo establecido por el proveedor. Las figuras 23 y 24 muestran los compuestos y la mezcla de estos.

Figura 23: compuestos (resina R-1248, catalizador E-648, viruta de bronce).



Fuente: Autores.

Figura 24: mezcla de los compuestos.



Fuente: Autores.

Luego del mezclado esto, se realizó el vaciado en el molde y se introdujo en el elemento de vacío, se conectó la bomba haciéndose el vacío del aire durante 15 minutos aproximadamente, al cabo del cual se cerró la llave del sistema y se dejó en este durante 24 horas hasta garantizar que el compuesto se había solidificado. La figura 25 muestra el mecanismo de vacío aplicado a los moldes con sus respectivos compuestos.

Figura 25: mecanismo de vacío.



Fuente: Autores.

La figura 26 muestra, a la izquierda, el molde con el material compuesto para fabricar las coronas y a la derecha el molde con el material compuesto para fabricar uno de los tornillos sin fin.

Figura 26: moldes obtenidos (coronas y tornillos).



Fuente: autores

3.3.2 Mecanizado de los tornillos sin fin y las coronas

Se fabricaron 7 bloques de material compuesto de resina-viruta de bronce de los cuales se describen a continuación:

- 1 bloque de resina-catalizador, sin compuesto, para el mecanizado de las 6 coronas.
- 2 bloques de resina-catalizador, con el 20% de masa de viruta de bronce, para el mecanizado de dos tornillos sin fin.
- 2 bloques de resina-catalizador, con el 30% de masa de viruta de bronce, para el mecanizado de dos tornillos sin fin.
- 2 bloques de resina-catalizador con el 40% de masa de viruta de bronce, para el mecanizado de dos tornillos sin fin.

Todos ellos (coronas y tornillos), mecanizados por el proceso de arranque de viruta (fresado y torneado), con el fin de estudiar su comportamiento frente al desgaste de este mecanismo tornillo sin fin-corona, en sus respectivos compuestos, con lubricante y sin lubricante.

El mecanizado de estos bloques se hizo en el torno y fresadora del taller Tolima de la ciudad de Pereira Risaralda. Las figuras 27 y 28 muestran las máquinas utilizadas al momento de mecanizar las piezas, y la figura 29 muestra uno de los momentos del proceso de mecanizado.

Figura 27: torno convencional.



Fuente: autores

Figura 28: fresadora universal.



Fuente: autores.

Figura 29: proceso de mecanizado.



Fuente: autores.

Los tornillos sin fin y las coronas obtenidas con los materiales compuestos descrito son los que muestran la figura 30.

Figura 30: tornillos sin fin y coronas obtenidas en los materiales compuestos.



Fuente: autores

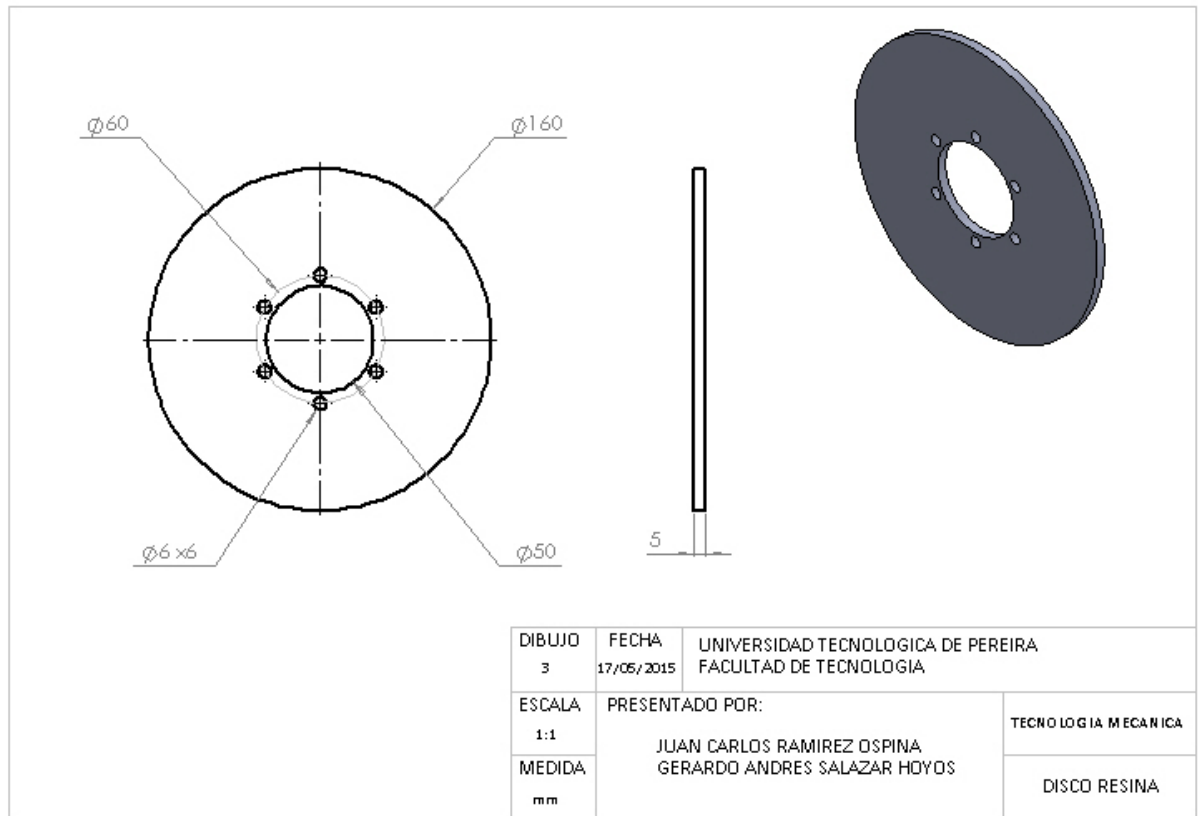
3.3.3 Fabricación del disco de freno de bicicleta en resina epóxica

Se tuvo la necesidad de fabricar un disco en resina R-1248 con su respectivo catalizador E-648, para el estudio del comportamiento del desgaste de este material.

Se realizó el vaciado de la resina-catalizador en un molde circular de un diámetro mayor a 180 mm para su posterior mecanizado, el cual se fabricó por el método de arranque de viruta en un torno convencional.

El plano del disco con sus respectivas dimensiones para su mecanizado se muestra en la siguiente figura 31.

Figura 31: plano del disco de bicicleta.



Fuente: autores.

La figura 32 muestra el disco obtenido a través del proceso de mecanizado realizado, y que fue utilizado en las pruebas de desgaste del material.

Figura 32: disco del freno de bicicleta en resina R-1248.



Fuente: autores.

3.3.4 Fabricación de las pastillas de freno en los diferentes materiales compuestos

De igual manera que con el disco, se tuvo la necesidad de fabricar unas pastillas de freno de bicicleta en el compuesto formulado de resina R-1248 con su respectivo catalizador E-648 y mezcla de viruta de bronce en los porcentajes estimulados (20%, 30% y 40%), para el estudio del comportamiento del desgaste de este material.

Se realizó el compuesto de la resina-catalizador con su respectivo porcentaje, en masa, de viruta de bronce, para cada una de las pastillas a estudiar, la cantidad de estas pastillas fueron:

- 2 pastillas de resina-catalizador con el 20% en masa de viruta de bronce.
- 2 pastillas de resina-catalizador con el 30% en masa de viruta de bronce.
- 2 pastillas de resina-catalizador con el 40% en masa de viruta de bronce.

Luego, se utilizó una silicona de impresión de alta precisión (speedex putty), para la fabricación del molde de las pastillas, posteriormente, en este molde se hizo el

vaciado del compuesto y se dejó 24 horas en el molde para su solidificación; por último, se hizo el desmoldeo para su posterior mecanizado, el cual fue realizado por el método de arranque de viruta en un torno convencional.

La silicona utilizada para la parte del molde de las pastillas se muestra en la siguiente figura 33.

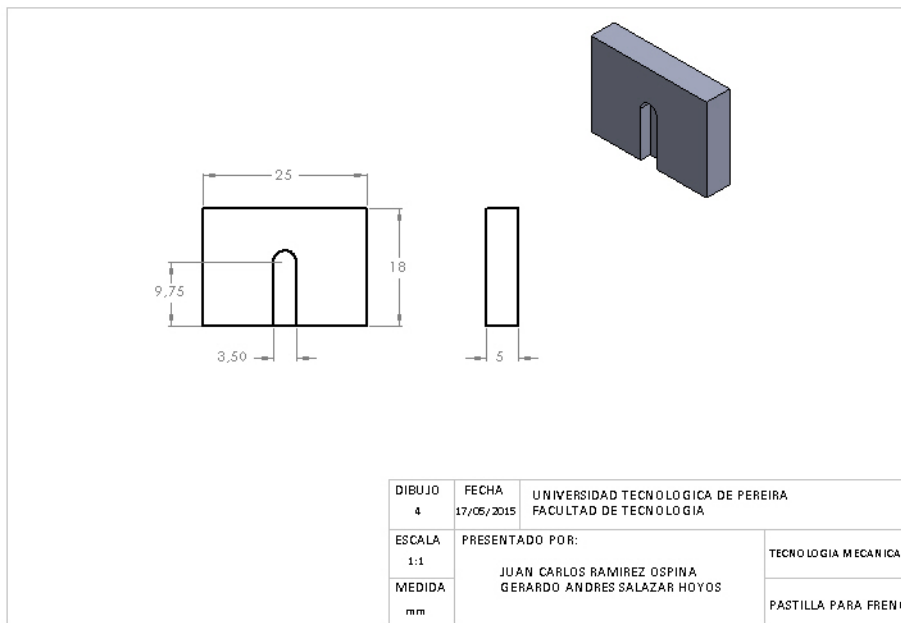
Figura 33: silicona para la impresión de alta precisión.



Fuente: autores.

El plano tecnológico con las dimensiones de las pastillas para su mecanizado se muestra en la figura 34.

Figura 34: plano pastilla de bicicleta.



Fuente: autores.

Las pastillas con sus respectivos compuestos, finalmente mecanizadas, se muestran en la figura 35.

Figura 35: pastillas de freno de disco fabricadas con los diferentes compuestos.



Fuente: autores.

3.3.5 Obtención de las probetas de tracción con los diferentes compuestos de resina-viruta de bronce.

Para la fabricación de las probetas de tracción se tomó como base la información de la norma ASTM D638-10 "*Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*" (método de prueba estándar para evaluación de propiedades de tracción de plásticos); dicha norma se puede ver en el ANEXO A...

Siguiendo las especificaciones de la norma en mención, se fabricaron 4 probetas con las siguientes características:

- 1 probeta de resina-catalizador sin material de refuerzo.
- 1 probeta de resina-catalizador con el 20% en masa de viruta de bronce.
- 1 probeta de resina-catalizador con el 30% en masa de viruta de bronce.
- 1 probeta de resina-catalizador con el 40% en masa de viruta de bronce.

Para cada probeta se realizó la mezcla de la resina-catalizador con su respectivo porcentaje en masa de viruta de bronce (20%, 30% y 40%).

Cada compuestos fue vaciado en un molde con la forma de una caja de madera, el cual se le aplicó una capa de desmoldante (alcohol polivinílico). La figura 36 muestra el molde en el cual fue vaciado cada compuesto para obtener las probetas de tracción.

Figura 36: molde para las probetas de tracción.



Fuente: autores.

Vaciado el compuesto en los moldes, estos fueron mantenidos durante 24 horas para asegurar su solidificación por endurecimiento de la resina. Después de esto, las probetas de compuesto se sacaron de su molde para proceder a su mecanizado, el cual se hizo en el fresadora CNC, marca Hass, modelo *** de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica, con ayuda del profesor Yesid Moreno, por el método de arranque de viruta. La imagen 37 muestra una fotografía de la fresadora CNC utilizada para dicho proceso.

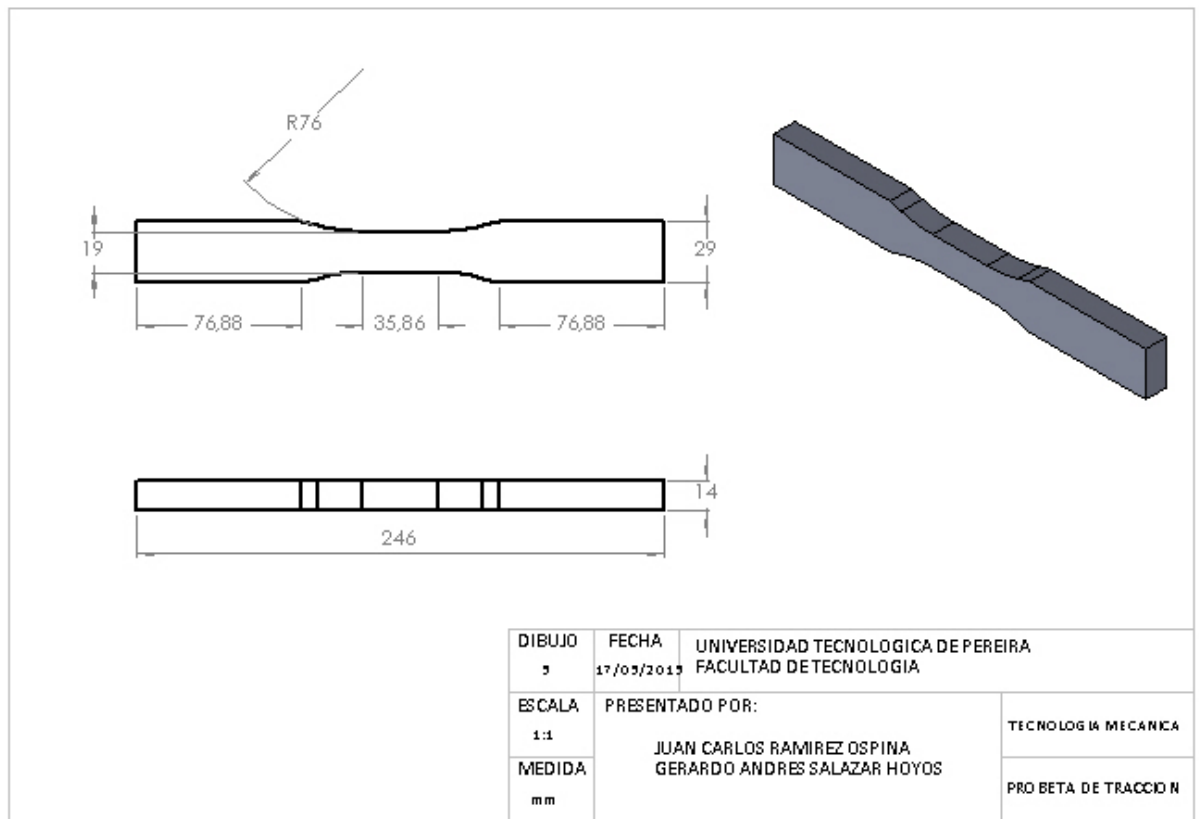
Figura 37: fresadora CNC de la Universidad Tecnológica de Pereira.



Fuente: autores.

Después del mecanizado se obtuvieron 4 probetas con las dimensiones establecidas por la norma ASTM D638-10 como las mostradas en el plano de la figura 38.

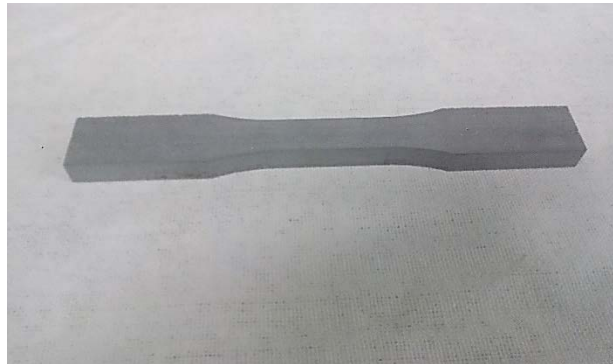
Figura 38: plano de la probeta de tracción.



Fuente: autores

La figura 39 muestra el estado final de una de las probetas obtenidas para las pruebas de tracción.

Figura 39: probeta para las pruebas de tracción.



Fuente: autores.

3.3.6 Obtención de las probetas para las pruebas de dureza shore D

Para la fabricación de las probetas para la medida de dureza shore D, se tomó como referencia la norma ASTM D2240-05 “*Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness*” (Método de prueba estándar para evaluación de la dureza para Cauchos). Esta norma puede ser vista en el ANEXO B...

Siguiendo las especificaciones de la norma en cuestión, se construyeron 4 probetas con las siguientes características:

- 1 probeta de resina-catalizador sin material de refuerzo.
- 1 probeta de resina-catalizador con el 20% en masa de viruta de bronce.
- 1 probeta de resina-catalizador con el 30% en masa de viruta de bronce.
- 1 probeta de resina-catalizador con el 40% en masa de viruta de bronce.

Para cada probeta se realizó la mezcla de la resina-catalizador con su respectivo porcentaje en masa de viruta de bronce (20%, 30% y 40%).

Después de realizar la mezcla de los diferentes componentes del compuesto, esta fue vaciada en un molde fabricado en tubo de PVC de $\frac{1}{2}$ " de diámetro y de 10 mm de altura, ubicado sobre una superficie plana de vidrio. Las figuras 40 y 41 muestran los moldes y el vaciado del compuesto.

Figura 40: moldes para obtener las probetas de dureza.



fuelle: autores.

Figura 41: vaciado del compuesto en el molde.



Fuelle: autores.

Las figura 42 muestra las probetas obtenidas para las pruebas de dureza shore D.

Figura 42: probetas para evaluación de la dureza shore D de los diferentes compuestos fabricados.



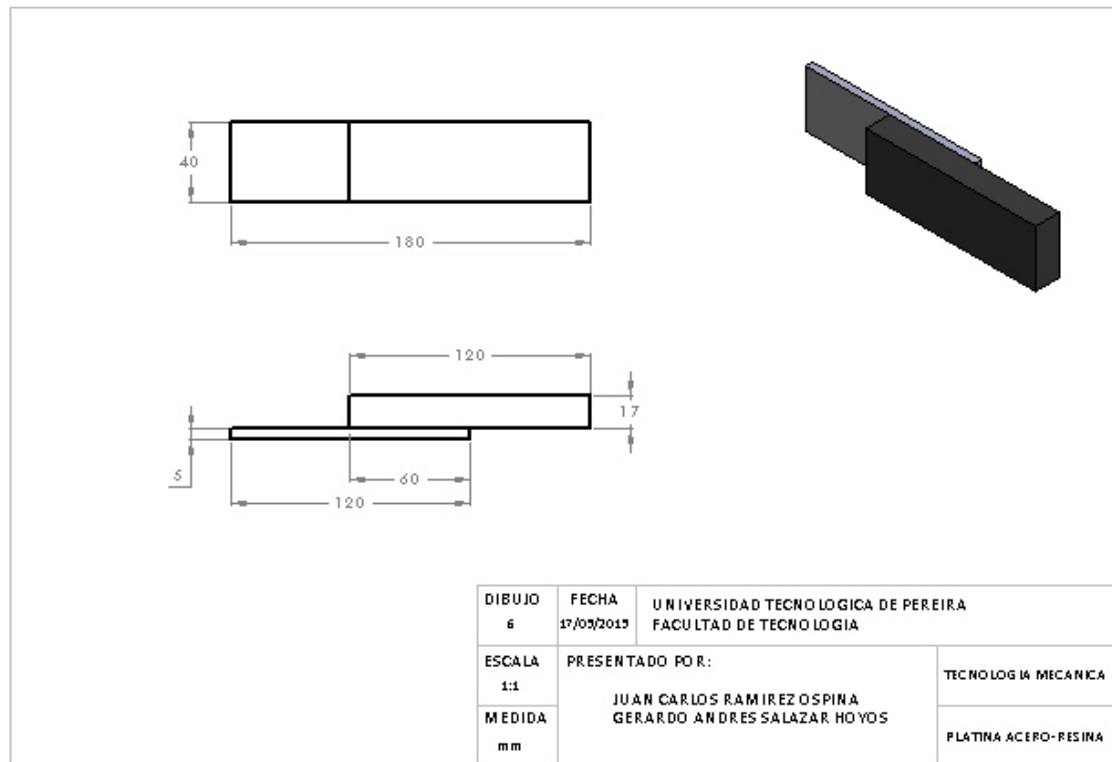
Fuelle: autores.

3.3.7 Obtención de la probeta para la prueba de capacitancia térmica:

Para la prueba de capacitancia térmica se construyó una placa de resina-catalizador solapada con una placa de acero AISI SAE 1020.

La figura 43 muestra el plano con las dimensiones y forma de solapamiento de las placas.

Figura 43: plano de las dimensiones para la probeta de la prueba de capacitancia térmica.



Fuente: autores.

El proceso por el cual se obtuvo la placa fue por medio de un vaciado de la resina-catalizador sobre la placa metálica, con el fin de que la resina solidificara sobre la placa metálica y así asegurar su solapamiento. La figura 44 muestra la placa obtenida.

Figura 44: placa para la prueba de capacitancia térmica.



Fuente: autores.

3.4 Procedimiento de caracterización del material

3.4.1 Prueba de la prueba de dureza shore D:

Las pruebas de dureza Shore D se realizaron en el laboratorio de pruebas dinámicas de la Universidad Tecnológica de Pereira, para las cuales se utilizó un durómetro y un visualizador de dureza Shore D, marca Baxlo. Las figuras 45 y 46 muestran el durómetro y el visualizador utilizados en la prueba.

Figura 45: durómetro para pruebas shore D



Fuente: autores.

Figura 46: visualizador del durómetro.



Fuente: autores.

Se toman los datos de la dureza superficial de las probetas en diferentes puntos de la cara plana y lisa, se utilizó una masa de 5 kg para penetrar el indentador en el material y con un umbral de tiempo de 15 s entre indentaciones, con el fin de realizar un promedio de durezas que en total fueron entre 10 a 20 mediciones.

3.4.2 Prueba de tracción:

Las pruebas de tracción se realizaron en el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Tecnológica de Pereira, en la máquina universal de pruebas, la cual es mostrada en la figura 47.

Figura 47: máquina universal para pruebas de resistencia de materiales.



Fuente: autores.

Se sometieron las probetas a tracción hasta que se nota la falla por fractura se anotaron los valores de fuerza y elongación para su posterior análisis.

Con estos datos se construyeron gráficas de esfuerzo-deformación y se identificaron los valores de esfuerzo último y permisible y se calculó el módulo de elasticidad o módulo Young (E) de los materiales estudiados.

A partir de las ecuaciones de esfuerzo permisible, esfuerzo último y módulo de Young se obtienen los datos para su posterior análisis en el cálculo de la vida útil de cada compuesto.

El cálculo del esfuerzo permisible es el cálculo del límite de proporcionalidad, el cual hace referencia al esfuerzo correspondiente a un alargamiento residual del 0,2 Lo.

Alargamiento residual de 0,2:

$$\Delta_{0,2} = 0,2 \frac{(L_0)}{100}$$

Reemplazamos el alargamiento en cada ecuación de las gráficas fuerza vs deformación de las probetas de tracción.

De la ecuación de esfuerzo calculamos $\sigma_{0,2}$:

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0}$$

El cálculo del esfuerzo último se da de la siguiente manera.

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0}$$

Para el cálculo del módulo de Young establecemos que:

$$\sigma = E \epsilon$$

Donde E es la pendiente del tramo de recta en la gráfica esfuerzo vs deformación unitaria.

Tomamos dos puntos de esta recta para calcular la pendiente (x_1, y_1) y (x_2, y_2) respectivamente.

$$E = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

3.4.3 Prueba de desgaste de material:

Para evaluar el desgaste del material se construyó un banco de pruebas, el cual consistió de un motor, acoplado a un reductor de velocidades por medio de una polea y una banda de caucho; el motor se conectó al eje del tornillo sin fin del reductor de velocidades al que llegaba la potencia del motor transmitiéndose a una corona de 23 dientes; este mecanismo contaba con una relación de transmisión de $(1/23)$. Por otra parte, al eje de la corona se acopló un disco de resina R-1248, el cual era frenado por las pastillas fabricadas en materiales compuestos cargadas con 20%, 30%, y 40% ubicadas dentro de una mordaza y accionadas por un sistema de freno bybre, el cual era controlado por una correa gradual. El sistema de freno de la mordaza se sujetó a una platina y esta a su vez fue soldada a una guía patín, todo este acople se deslizaba al someter el disco a una carga constante de 2 kgf, esta platina, al mismo tiempo, lleva un dinamómetro (balanza romana), la cual estaba unida por medio de un gancho, al acople que se desliza, con el fin de medir la fuerza accionada por el freno de disco patín, y al mismo tiempo medir torque, esfuerzo y vida útil del material; como el motor estaba conectado a un variador de velocidades, con el cual se puede graduar la velocidad del motor en su rango de velocidades. Por último, en todo este sistema del banco se utilizó, adicionalmente, un pirómetro (pistola para la medición de temperaturas), con el que se pudo medir la temperatura máxima de calentamiento del disco de resina y consecutivamente medir el desgaste, tanto del disco de resina como el de las pastillas del compuesto encontradas dentro del sistema de freno de mordaza, todo esto en un tiempo determinado.

En la figura 48 se puede observar el banco utilizado para realizar las pruebas de desgaste del material.

Figura 48: banco de pruebas para el desgaste



Fuente: autores.

Para estas pruebas se tuvo en cuenta la pérdida de masa del disco en resina y el de las pastillas de los compuestos, la velocidad de giro del eje de salida del reductor, la fuerza de frenado del disco en resina indicado en el dinamómetro, la temperatura máxima de desgaste del disco en resina y el tiempo en cada prueba.

Las figuras 49 y 50 muestran la balanza utilizada para la medición del desgaste de masa y el pirómetro para la medición de la temperatura máxima de desgaste del disco.

Figura 49: balanza.



Fuente: autores.

Figura 50: pirómetro.



Fuente: autores.

Para cada prueba se realizó una gráfica de esfuerzo vs deformación, tanto del disco en resina como la de las pastillas de cada compuesto, en un régimen de altas y bajas velocidades.

Se hizo el análisis de cada una de las gráficas obtenidas en cada régimen para así encontrar un esfuerzo óptimo de desgaste en el conjunto disco-pastillas.

3.4.3.1 Procedimiento para obtener esfuerzo óptimo de desgaste:

Para el cálculo de los esfuerzos óptimos, para cada compuesto, se tomaron las ecuaciones de las gráficas de desgaste del disco y de las pastillas, a bajas y altas revoluciones y se igualan para cada caso disco y pastillas.

De los valores obtenidos, se seleccionó el menor valor, el cual corresponde al esfuerzo óptimo de desgaste para el par disco-pastillas y el cual se tomó como el esfuerzo límite para las pruebas del mecanismo sin lubricante.

3.4.4 Prueba de conductividad térmica:

En las pruebas de conductividad térmica se utilizó una placa de acero AISI SAE 1020 y una placa de resina R-1248, las cuales se encontraban solapadas, se utilizó una fuente de calor de tipo resistencia eléctrica.

Se procedió a hacer un montaje en el cual se encuentra presente la transferencia de calor desde la resistencia eléctrica pasando por la placa de acero y la placa de resina para así, por medio del cálculo, hallar el coeficiente de conductividad térmica (K), de la resina R-1248.

Para esta prueba se utilizaron los siguientes elementos:

- Resistencia eléctrica.
- Pirómetro.
- Placa de acero-resina.

En las figuras 51, 52, y 53 se muestran los elementos previamente nombrados para realizar la prueba.

Figura 51: resistencia eléctrica.



Fuente: autores.

Figura 52: pirómetro.



Fuente: autores.

Figura 53: placa resina R-1248 solapada a la placa de acero 1020.

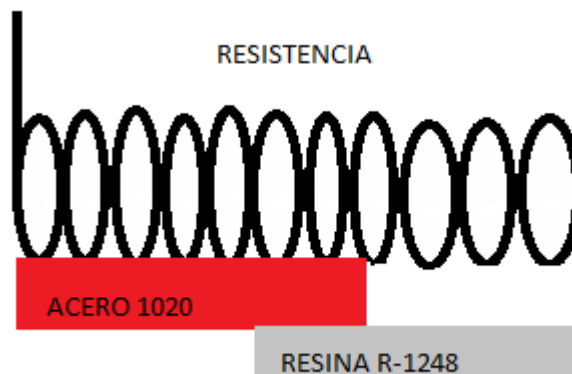


Fuente: autores.

3.4.4.1 Procedimiento para hallar el coeficiente de conductividad térmica:

Para el cálculo del coeficiente de conductividad térmica se hizo el montaje mostrado en la figura 54.

Figura 54: esquema del montaje para la prueba de la conductividad térmica.



Fuente: autores.

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la conductividad térmica fueron: tomadas del libro de transferencia de calor Cengel tercera edición: (7)

$$q = \frac{\Delta T}{R(\text{total})}$$

Donde:

$$\Delta T = T(\text{resistencia}) - T(\text{resina})$$
$$R(\text{total}) = R(\text{acero}) + R(\text{aire}) + R(\text{resina})$$

Datos:

$$q = 1100 \text{ W}$$

$$T(\text{resistencia}) = 275 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T(\text{resina}) = 129,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$L(\text{acero}) = 5 \text{ mm}$$

$$A(\text{acero}) = 24 \text{ cm}^2$$

$$K(\text{acero}) = 52 \frac{\text{W}}{\text{m} \times \text{ }^\circ\text{C}}, \text{ este valor se obtiene en el...ANEXO C...}$$

$$h \text{ convección}(\text{aire}) = 93,02443641 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \times \text{K}}, \text{ este valor se obtiene en el...ANEXO D...}$$

$$A(\text{resina}) = 48 \text{ cm}^2$$

$$A(\text{aire}) = 24 \text{ cm}^2$$

$$L(\text{resina}) = 17 \text{ mm}$$

3.4.5 Prueba de capacitancia térmica:

Para la prueba de capacitancia térmica se utilizaron los siguientes elementos:

- 1 Termómetro de mercurio.
- 2 Beakers.
- 1 pinza de extracción.
- Horno tipo mufla.
- 2 probetas de resina R-1248
- Agua y aceite.

Las figuras 55, 56, 57 58, 59 y 60 muestran cada uno de estos elementos utilizados.

Figura 55: termómetro de mercurio.



Fuente: autores.

Figura 56: beaker.



Fuente: autores.

Figura 57: pinzas de extracción.



Fuente: autores.

Figura 58: horno tipo mufla.



Fuente: autores.

Figura 59: probeta utilizada para la prueba de capacitancia térmica.



Fuente: autores.

Figura 60: aceite utilizado para la prueba de capacitancia térmica.



Fuente: autores

La prueba se hizo utilizando una probeta de resina R-1248, la cual se introdujo dentro de un horno tipo mufla, precalentado a 100 °C; la probeta permaneció durante 10 minutos dentro del horno, se sacó la probeta del horno y se midió su temperatura. Inmediatamente, después de salir del horno la probeta se introdujo a un fluido conocido (agua, aceite) y se y se tomó el tiempo que tarda el fluido en igualar la temperatura de la probeta, con la ayuda del termómetro de mercurio, se visualizó esta temperatura de estabilización en las fases resina-agua y resina-aceite, con los respectivos coeficientes de capacitancia térmica del agua y del aceite y conociendo los valores en masa de la resina y de los fluidos.

3.4.5.1 Procedimiento para hallar el coeficiente de la capacitancia térmica.

Para realizar el cálculo del coeficiente de capacitancia térmica se utilizó la ecuación de transferencia de calor, en la cual interviene la masa, el cambio de temperatura y la capacitancia térmica: (8)

$$Q = mc\Delta T$$

En la realización de la prueba se llevó un proceso de igualación de condiciones donde:

$$m(\text{resina}) c(\text{resina}) \Delta T(\text{resina}) = m(\text{fluido}) c(\text{fluido}) \Delta T(\text{fluido})$$

Se tienen dos combinaciones para la prueba, la primera combinación es resina-agua y la segunda combinación es resina-aceite:

3.4.6 Prueba del comportamiento mecánico del mecanismo sin lubricante:

Para la evaluación del mecanismo sin lubricante, se realizó el montaje en la carcasa del reductor de velocidades de los pares tornillo sin fin-corona fabricados con los compuestos (20%, 30% y 40%) de refuerzo de viruta de bronce, para cada tornillo respectivamente y resina sin carga en las coronas, a la salida del reductor se acopló un freno de disco de bicicleta y así poder aplicar una carga constante de trabajo. Con el fin de observar la falla de rotura de cada uno de los elementos en los montajes.

La figura 61 muestra los pares para la prueba de desgaste, cada uno con su respectivo compuesto.

Figura 61: pares de tornillo sin fin-corona con sus respectivos compuestos.



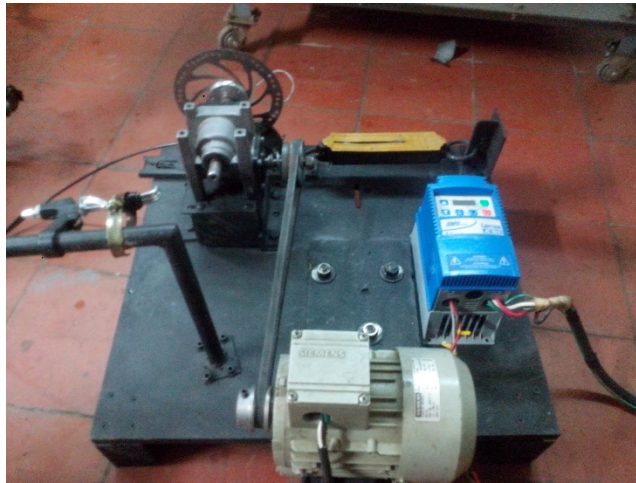
Fuente: autores.

Para cada uno de los montajes se utilizaron los siguientes elementos:

- Reductor de velocidad.
- Motor eléctrico marca siemens.
- Mecanismo de frenado (disco, mordaza, freno bybre)
- Guía patín.
- Dinamómetro.
- Cronometro.

La figura 62 muestra el banco de pruebas con los elementos mencionados.

Figura 62: banco de pruebas para el desgaste del par.



Fuente: autores.

3.4.6.1 Procedimiento del comportamiento mecánico del mecanismo del compuesto del 20% sin lubricante:

Inicialmente se realizó la prueba con el par tornillo sin fin fabricado con 20% de carga de viruta de bronce y la corona sólo fabricada de resina, los cuales se evaluaron a velocidad baja constante y sin carga durante 2 minutos. Al cabo de ese tiempo, el mecanismo no presentó ninguna alteración de forma aunque se escuchaba un leve sonido dentro del reductor. Se procedió a aplicar una carga de frenado, la cual sólo se podía llevar hasta los 8 kgf, puesto que al aplicar más carga el mecanismo se bloqueaba, Se, aplicó una carga constante de 4 kgf y se procedió a observar hasta que ocurrió la falla (rotura). Este proceso sólo duro 8 minutos con carga de 4 kgf y velocidad constante de 15 rpm?

Al ocurrir la falla, se procedió a desmontar los elementos tornillo sin fin y corona para analizar la falla ocurrida, la cual se da por agarramiento puesto que los hilos del tornillo quedaron prendidos de los espacios entre dientes de la corona y esta a su vez sufrió un aplastamiento en la sección longitudinal de sus dientes; además, se pudo observar como la falta de lubricante influye en el calentamiento de los elementos, puesto que al sacarlos del reductor aún se encontraban calientes (97°C a causa de la fricción).

3.4.6.2 Procedimiento del comportamiento mecánico del mecanismo del compuesto del 30% sin lubricante.

Se realizó la prueba con el par tornillo sin fin de 30% de carga de viruta de bronce y la corona solo resina los cuales se evaluaron a velocidad baja constante y sin carga durante 2 minutos el mecanismo no presentó ninguna alteración y no se escucha sonido dentro del reductor como en la prueba con el tornillo de 20%, se procedió a aplicar una carga de frenado la cual solo llega hasta los 6 Kgf puesto que al aplicar más carga el mecanismo se bloquea, aplicamos una carga constante de 4 kgf y se procedió a observar hasta que ocurrió la falla (rotura), este proceso solo duro 5 minutos con carga de 4 kgf y velocidad constante.

Al ocurrir la falla se procede a desmontar los elementos tornillo sin fin y corona para analizar la falla ocurrida, la cual se da por agarramiento puesto que los hilos del tornillo quedaron prendidos de los espacios entre dientes de la corona y esta a su vez sufre un aplastamiento en la sección longitudinal de sus dientes además se pudo observar como la falta de lubricante influye en el calentamiento de los elementos puesto que al sacarlos del reductor aún se encontraban calientes 83°C a causa de la fricción.

3.4.6.3 Procedimiento del comportamiento mecánico del mecanismo del compuesto del 40% sin lubricante.

Se realizó la prueba con el par tornillo sin fin de 40% de carga de viruta de bronce y la corona solo resina los cuales se evaluaron a velocidad baja constante y sin carga durante 2 minutos el mecanismo no presenta ninguna alteración y no se escucha sonido dentro del reductor como en la prueba con el tornillo de 20%, se procedió a aplicar una carga de frenado la cual solo llega hasta los 6 Kgf puesto que al aplicar más carga el mecanismo se bloquea, aplicamos una carga constante de 4 Kgf y se procedió a observar hasta que ocurrió la falla (rotura), este proceso solo duro 2 minutos con carga de 4 Kgf y velocidad constante.

Al ocurrir la falla se procede a desmontar los elementos tornillo sin fin y corona para analizar la falla ocurrida, la cual se da por agarramiento puesto que los hilos del tornillo quedaron prendidos de los espacios entre dientes de la corona y esta a su vez sufre un aplastamiento en la sección longitudinal de sus dientes además se pudo observar como la falta de lubricante influye en el calentamiento de los elementos puesto que al sacarlos del reductor aún se encontraban calientes 64 °C a causa de la fricción.

3.5 Selección del compuesto para la evaluación del comportamiento mecánico del mecanismo con lubricante y su lubricante

3.5.1 Selección del compuesto:

Al realizar la prueba anterior se observó que al tenerse ausencia de lubricante existen muchos factores que influyen en el deterioro o falla de los elementos que conforman la transmisión, por esto y para dar mejor manejo a los resultados y pruebas, se decidió escoger el par que mejor se comportó en la prueba anterior y se realizó una prueba de este con lubricante para observar su funcionamiento en mejores condiciones de fricción y deslizamiento.

El par seleccionado para la prueba del mecanismo con lubricante es el del tornillo de 20% de carga de viruta de bronce y la corona fabricada en sólo resina.

3.5.2 Selección del lubricante:

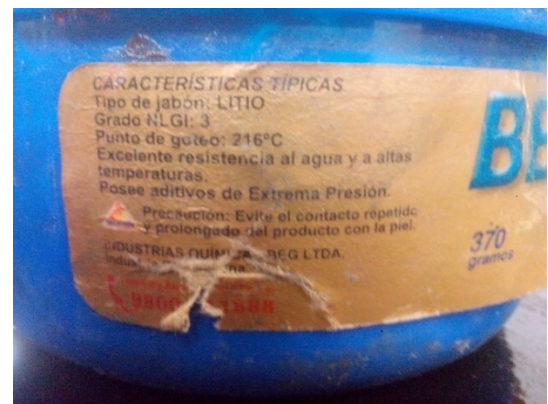
Para la prueba de la evaluación del mecanismo con lubricante fue necesario utilizar un lubricante que cumpla con las características típicas para la puesta en marcha de un reductor de velocidades a altas presiones y temperaturas, por ende, se seleccionó un lubricante (grasa) que cumpla con las características necesarias para la realización de esta prueba. Las figuras 63 y 64 muestran el lubricante (grasa) seleccionado con sus características y composición.

Figura 63: lubricante (grasa).



Fuente: autores.

Figura 64: características y composición del lubricante (grasa).



Fuente: autores.

3.5.3 Procedimiento del comportamiento mecánico del mecanismo con lubricante:

Al realizar la prueba se observó que, al tenerse de por medio un lubricante, el sonido de la transmisión se hace nulo y se mueve más suave que con ausencia de lubricante, además de esto, el mecanismo presentó mayor fuerza de arrastre que en las pruebas sin lubricante para el tornillo de 30% y 40%, puesto que hay muy baja fricción se aprovechó mejor la potencia entregada por el motor y a su vez por el reductor de tornillo sinfín-corona.

Se procedió a aplicar una carga de frenado, la cual sólo podía llegar hasta los 8 kgf, puesto que al aplicar más carga el mecanismo se bloquea, aplicamos una carga constante de 4 kgf y se procedió a observar hasta que ocurrió la falla (rotura), este proceso sólo duró 20 minutos con carga de 4 kgf y velocidad constante.

No ocurrió la falla por rotura sino que después de pasados los 20 minutos el mecanismo comenzó a bloquearse. Se procedió a desmontar los elementos tornillo sin fin y corona para analizar la falla ocurrida, la cual se da por agarramiento, puesto que una parte de los hilos del tornillo se fracturaron pero no quedaron prendidos de los espacios entre dientes de la corona y esta a su vez sufre un desgaste en sus dientes; además, se pudo observar como el lubricante influyó en el calentamiento de los elementos, puesto que al sacarlos del reductor, estos se encontraban calientes pero a una temperatura de 48°C, a causa de la fricción.

Figura 65: lubricación del mecanismo tornillo sin fin corona.



Fuente: autores.

3.6 Determinación de la vida útil.

Para el cálculo de la vida útil, se tomaron las ecuaciones y los cálculos del capítulo 12 “transmisiones de tornillo sinfín-corona” del libro diseño de elementos de máquinas. (9)

Se realizó el cálculo para el par del 20 % de refuerzo, el cual fue sometido a pruebas sin lubricante y con lubricante por presentar mayor duración y mejor comportamiento que los otros dos pares del 30% y 40%.

La figura 66 muestra la falla de los mecanismos con lubricante y sin lubricante de los compuestos evaluados.

Figura 66: falla de los mecanismos con lubricante y sin lubricante de los compuestos evaluados.



Fuente: autores.

Para entrar al cálculo de la vida útil, primero se calcularon ciertos parámetros como la velocidad de deslizamiento (V_s) del tornillo sinfín, y el rendimiento de la transmisión. (9)

Velocidad de deslizamiento (V_s):

Los vectores de las velocidades periféricas del tornillo sinfín $v_1 = \pi d_1 n_1 / 60$ y de la rueda $v_2 = \pi d_2 n_2 / 60$ difieren en magnitud y dirección (figura 12.9), por eso sus cilindros primitivos no ruedan, sino que deslizan. En la figura 12.9 se ve que $v_2 =$

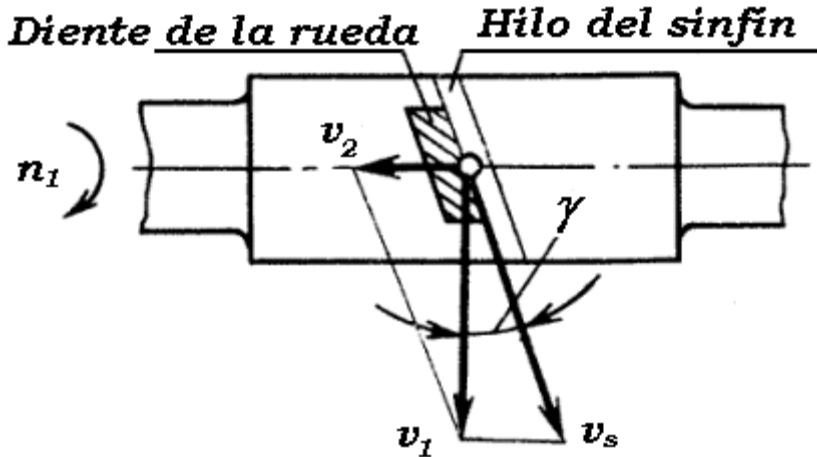
$v_1 \operatorname{tg} \gamma$. Teniendo en cuenta que $\operatorname{tg} \gamma = \frac{z_1}{q}$, al confrontarlas se obtiene el número de

transmisión de la transmisión $u = \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_1 d_2}{v_2 d_1} = \frac{z_2}{z_1}$. Generalmente se toma $z_{2\text{mín}} = 17$

... 18, con $z_1 = 1$ para las transmisiones cinemáticas. Para las transmisiones de potencia, con el fin de evitar el recorte de los dientes durante el maquinado, se toma $z_{2\text{min}} = 28 \dots 26$. Es conveniente que $z_2 = 32 \dots 63$, pero que no sea superior a 80, aunque se conocen transmisiones con $z_2 = 1000$. (9)

En la figura 67 se muestra las velocidades presentes en la transmisión del tornillo sin fin-corona.

Figura 67: velocidades en la transmisión sin fin.



Fuente: (9)

El rendimiento de la transmisión sinfín se determina por la relación típica para las transmisiones de engranajes $\eta = \eta_e \cdot \eta_{ac} \cdot \eta_r$. Por cuanto la transmisión sinfín es dentada de tornillo (o helicoidal), entonces el rendimiento de la transmisión sinfín se puede determinar por la ecuación, derivada para el par tornillo:

$$\eta_e = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg}(\gamma + \rho')},$$

Donde ρ' es el ángulo reducido de fricción, el cual depende de los materiales del tornillo y de la corona de la rueda, de la calidad del aceite o material lubricante, de los parámetros de rugosidad de las superficies de trabajo, de la velocidad de deslizamiento v_s . (9)

Fuerzas en el engrane. Por lo general el ángulo reducido de fricción ρ' es menor de 3 grados. Por eso con suficiente exactitud para los cálculos prácticos, pueden despreciarse las fuerzas de fricción en la transmisión, tomar la fuerza normal F_n dirigida a lo largo de la normal a las superficies de trabajo del hilo y el diente de la rueda, concentrada y aplicada en el polo P .

La fuerza F_n puede descomponerse en tres componentes mutuamente ortogonales F_{t1} , F_{t2} , F_r (figura 68):

$$F_{t1} = F_{a2} = \frac{2M_{T1}}{d_1}; \quad F_{t2} = F_{a1} = \frac{2M_{T2}}{d_2} = \frac{2M_{T1} \cdot u \cdot \eta}{d_2};$$

$$F_r = F_{t2} \cdot \operatorname{tg} \alpha;$$

$$F_n = \frac{F_n'}{\cos \gamma} = \frac{F_{t2}}{\cos \alpha \cdot \cos \gamma}.$$

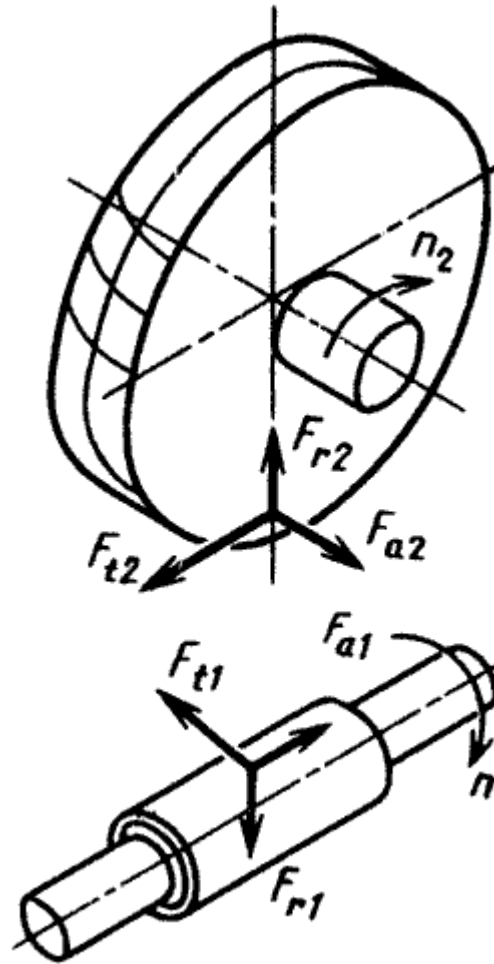
F_n' es la proyección de la fuerza F_n sobre el plano axial del sinfín.

Longitud total de las líneas de contacto: La longitud b del arco de la circunferencia d_1 (longitud de la línea convencional de contacto), correspondiente al ángulo de abrazamiento δ (radianes) está dada por $b = \delta \cdot d_1 / 2$.

La longitud total de las líneas de contacto crece de manera inversamente proporcional al $\cos \gamma$ y de manera proporcional al coeficiente de solapo lateral ε_α . De esta manera,

$$l_\Sigma = b \cdot \varepsilon_\alpha \xi / \cos \gamma,$$

Figura 68: fuerzas que actúan en la transmisión sin fin



Fuente: (9)

Donde $\varepsilon_{\alpha} = \sqrt{(0,17 \cdot z_2 + 0,34)^2 - (0,16 \cdot z_2)^2} - 0,058 \cdot z_2 + 1,01$, para transmisiones con parámetros estándar con $\alpha = 20^\circ$ y $X = 0$

Con parámetros estándar, con $\alpha = 20$ y $x = 0$.

Si se toma el valor medio $\varepsilon_\alpha = 1,8$, $\alpha = 20^\circ$, $\gamma = 10^\circ$, $\xi = 0,75$, $\delta = 0,55\pi$, entonces, después de reemplazar los valores q y ρ_{red} en la ecuación 12.2 se llega a la condición de resistencia de contacto:

$$\sigma_H = \frac{32,4Z_E}{d_2} \sqrt{\frac{M_{T2} \cdot K_{H\beta} \cdot K_{Hv}}{d_1}} \leq [\sigma_H]$$

Teniendo en cuenta que los pares sinfín tienen como característica su buen asentamiento y por eso la influencia del dinamismo de la carga es débil, se puede tomar para las transmisiones, fabricadas con suficiente exactitud, para $v_2 < 3$ m/s = 1,0 y para $v_2 > 3$ m/s, $K_{Hv} = 1,0 \dots 1,3$. La velocidad circular de la rueda $v_2 = \pi d_2 n_2 / 60$. Para los cálculos previos se puede tomar, para una carga constante, $K_{H\beta} = 1$, para cargas variables $K_{H\beta} = 1,05 \dots 1,2$. Los valores mayores se asumen con q bajos y elevados z_2 . En los cálculos de corrección $K_{H\beta}$ se determina teniendo en cuenta el carácter de variación de la carga y de la deformación total del sinfín por la ecuación.

$$K_{H\beta} = 1 + \left(\frac{Z_2}{\theta} \right)^2 (1 - x),$$

Con los valores promedio tomados anteriormente de γ , ε_α , ξ , se obtienen los coeficientes $Y_\varepsilon = 1/(\varepsilon_\alpha \cdot \xi) = 0,74$; $Y_\beta = 1 - \gamma/140 = 0,93 \approx \cos\gamma$. En este caso:

$$\sigma_F = 1,72 \frac{M_{T2} \cdot Y_F \cdot K_{F\beta} \cdot K_{Fv} \cdot \cos\gamma}{d_1 \cdot d_2 \cdot m} \leq [\sigma_F]$$

Para las transmisiones sinfín se toma aproximadamente $K_{F\beta} = K_{H\beta}$ y $K_{Fv} = K_{Hv}$.

$$[\sigma_H] = K_{HL} \cdot C_v [\sigma_{H0}],$$

$K_{HL} = \sqrt[8]{10^7 / N_H} \geq 0,67$, pero $\leq 1,15$; $[\sigma_{H0}] = (0,75 \dots 0,9)\sigma_u$ es el esfuerzo de contacto permisible correspondiente al límite de resistencia al desgaste para un número de ciclos de variación de la carga de 10^7 . Los valores más bajos de $[\sigma_{H0}]$ se asignan a los tornillos templados por inducción e hilos rectificadas; los valores mayores se toman para los tornillos cementados, templados y rectificadas; C_v es

un coeficiente que tiene en cuenta la intensidad del desgaste de los dientes de las ruedas en función de la velocidad de deslizamiento v_s , en (m/s).

Tabla 3: esfuerzos permisibles de flexión.

Material de la corona de la rueda	Carga no reversible	Carga reversible (transmisión de cara simétrica)
Bronce, latón	$[\sigma_F] = (0,08\sigma_u + 0,25\sigma_y)K_{FL}$	$[\sigma_F] = 0,16\sigma_u K_{FL}$
Fundición de hierro	$[\sigma_F] = 0,12\sigma_{uF} \cdot K_{FL}$	$[\sigma_F] = 0,075\sigma_{uF} \cdot K_{FL}$

Nota: $\sigma_{uF} = 274$ MPa es el límite de resistencia en flexión. $K_{FL} = \sqrt[3]{10^6 / N_F} \leq 0,543$, pero ≥ 1 es el coeficiente de longevidad durante el cálculo a la fatiga por flexión.

En caso de una carga estacionaria $N_F = 60 \cdot n_2 \cdot L_h$.

Para prevenir la destrucción frágil o las deformaciones residuales de los dientes, se debe garantizar el cumplimiento de la condición:

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \sigma_F \frac{M_{Tpico}}{M_{T2}} \leq [\sigma_F]_{m\acute{a}x},$$

Donde σ_F se determina por la ecuación (12.5); M_{T2} es el momento de cálculo en el árbol de la rueda; $[\sigma_F]_{m\acute{a}x}$ es el esfuerzo permisible de comprobación a las sobrecargas de corta duración. Para bronce $[\sigma_F]_{m\acute{a}x} = 0,8\sigma_y$, para fundiciones $[\sigma_F]_{m\acute{a}x} = 0,75\sigma_{uF}$.

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 Caracterización de la resina y los compuestos

4.1.1 Resultados Prueba dureza Shore D:

Las tablas de 4 a 7 muestran las mediciones de la dureza shore D de las probetas con y sin refuerzo.

Tabla 4: dureza shore D para la probeta sin refuerzo.

DUREZA SHORE D DE LA PROBETA DE RESINA R-1248 SIN REFUERZO DE VIRUTA			
No de indentación	Valor obtenido	No de indentación	Valor obtenido
1	82	6	84
2	80	7	83
3	85	8	80
4	81	9	85
5	84	10	80
Dureza Promedio: 82,4			

Fuente: autores.

Tabla 5: dureza shore D probeta con 20% de refuerzo.

DUREZA SHORE D DE LA PROBETA DE RESINA R-1248 CON 20% DE VIRUTA			
No de indentación	Valor obtenido	No de indentación	Valor obtenido
1	80	11	80
2	81	12	80
3	80	13	82

4	80	14	85
5	80	15	85
6	85	16	82
7	83	17	82
8	80	18	82
9	83	19	84
10	85	20	85
Dureza Promedio: 82,2			

Fuente: autores.

Tabla 6: dureza shore D probeta con 30% de refuerzo.

DUREZA SHORE D DE LA PROBETA DE RESINA R-1248 CON 30% DE VIRUTA			
No de indentación	Valor obtenido	No de indentación	Valor obtenido
1	85	11	88
2	84	12	86
3	85	13	87
4	86	14	85
5	86	15	84
6	85	16	86
7	84	17	88
8	87	18	88
9	88	19	88
10	86	20	86
Dureza Promedio: 86,1			

Fuente: autores.

Tabla 7: dureza shore D probeta con 40% de refuerzo.

DUREZA SHORE D			
DE LA PROBETA DE RESINA R-1248 CON 40% DE VIRUTA			
No de indentación	Valor obtenido	No de indentación	Valor obtenido
1	84	11	85
2	80	12	87
3	88	13	85
4	84	14	82
5	83	15	82
6	85	16	82
7	82	17	82
8	82	18	82
9	85	19	85
10	82	20	85
Dureza Promedio: 83,6			

Fuente: autores.

Pudimos observar que los valores obtenidos en la pruebas de dureza para cada una de las probetas están alrededor de los 80 y 90 en la escala shore D, un valor muy aproximado a los de la ficha técnica del fabricante (figura 13), y se analizó que los porcentajes de refuerzo afectaban los valores de la dureza de acuerdo a la concentración superficial de estos al momento de realizar las indentaciones.

4.1.2 Resultados Prueba de tracción:

En la figura 69 se muestra las probetas traccionadas de los diferentes compuestos.

Figura 69: probetas de tracción fracturadas.



Fuente: autores.

4.1.2.1 Datos obtenidos para la probeta sin carga:

En las tablas 8 y 9 se muestran los datos de (fuerza vs elongación) y (esfuerzo vs deformación unitaria) de la probeta sin carga calculados con la ecuaciones previamente mencionadas.

Tabla 8: fuerza vs elongación.

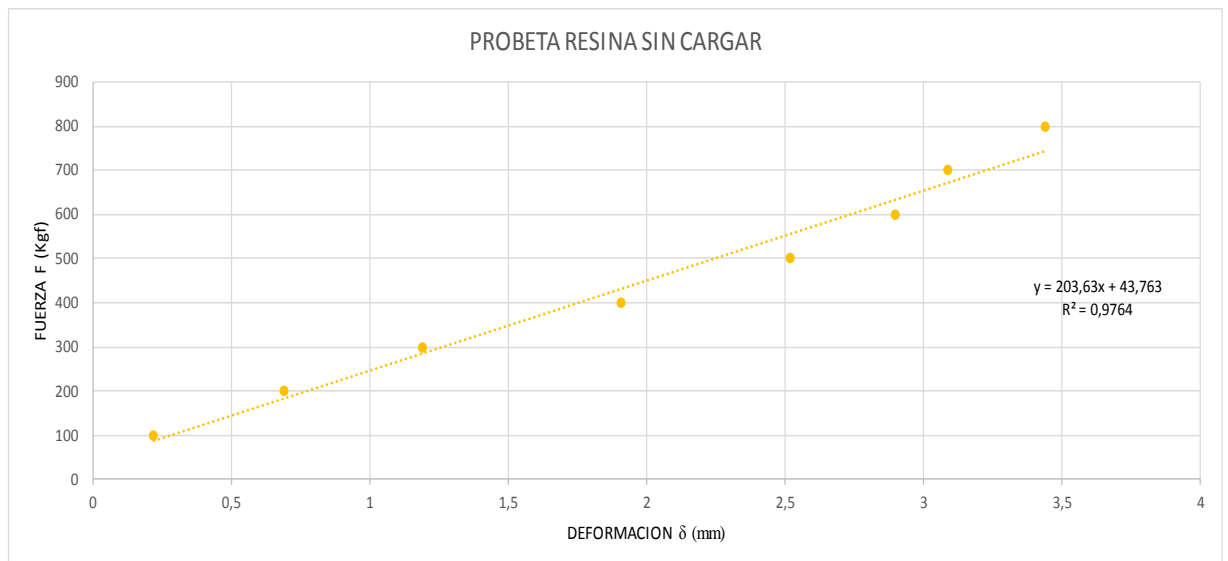
PROBETA RESINA SIN CARGAR	
FUERZA (Kgf)	ELONGACION (mm)
100	0,22
200	0,69
300	1,19
400	1,91
500	2,52
600	2,9
700	3,09
800	3,44
884	

Tabla 9: esfuerzo vs deformación unitaria.

PROBETA RESINA SIN CARGAR	
esfuerzo (Kgf/cm ²)	deformacion unitaria (ε)
37,59398496	0,006165919
75,18796992	0,019338565
112,7819549	0,033352018
150,3759398	0,05353139
187,9699248	0,070627803
225,5639098	0,081278027
263,1578947	0,086603139
300,7518797	0,096412556
332,3308271	

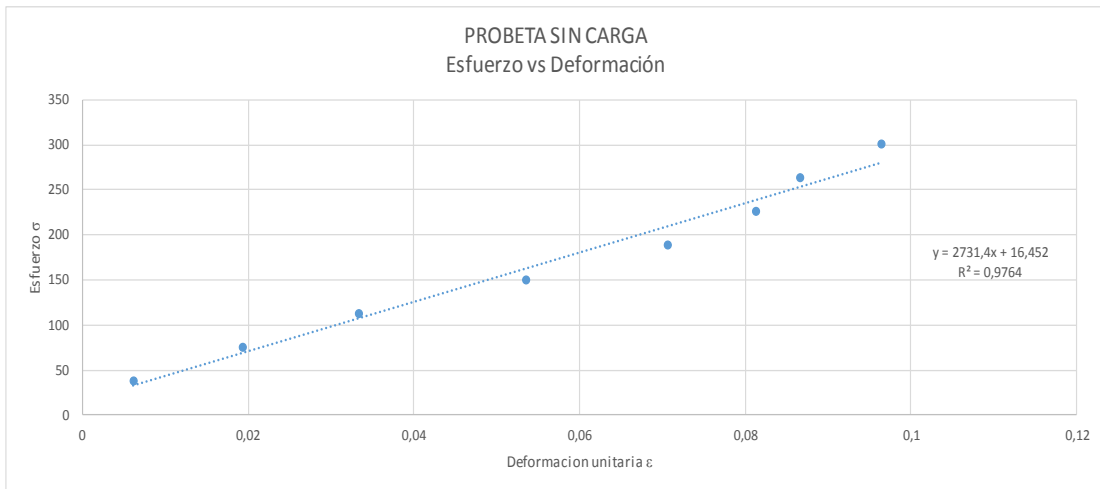
La figuras 70 y 71 muestran la gráfica (fuerza vs deformación) y (esfuerzo deformación unitaria), usada para obtener el esfuerzo permisible del material, el esfuerzo último y el módulo de Young.

Figura 70: gráfica fuerza vs elongación probeta resina sin carga.



Fuente: autores.

Figura 71: gráfica esfuerzo vs deformación unitaria resina sin carga.



Fuente: autores.

4.1.2.2 Datos obtenidos para la probeta del 20% de carga:

En las siguientes tablas se muestran los datos de (fuerza vs elongación) y (esfuerzo vs deformación unitaria) de la probeta.

Tabla 10: fuerza vs elongación.

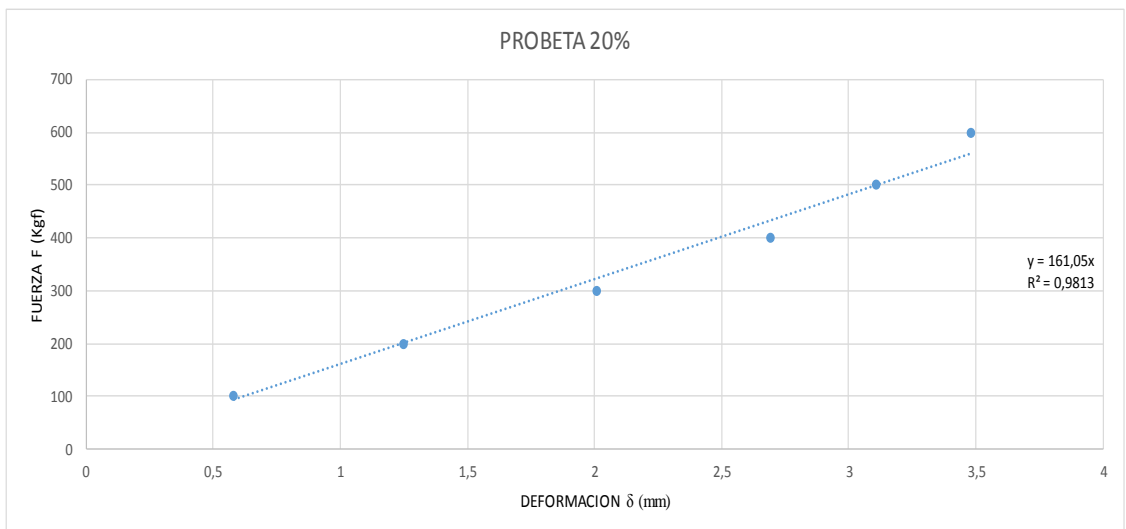
PROBETA 20%	
FUERZA (Kgf)	ELONGACION (mm)
100	0,58
200	1,25
300	2,01
400	2,69
500	3,11
600	3,48
670	

Tabla 11: esfuerzo vs deformación unitaria.

PROBETA 30%	
esfuerzo (Kgf/cm ²)	deformacion unitaria (ϵ)
37,59398496	0,021300448
75,18796992	0,042881166
112,7819549	0,067825112
150,3759398	0,08632287
187,9699248	0,099495516
210,5263158	

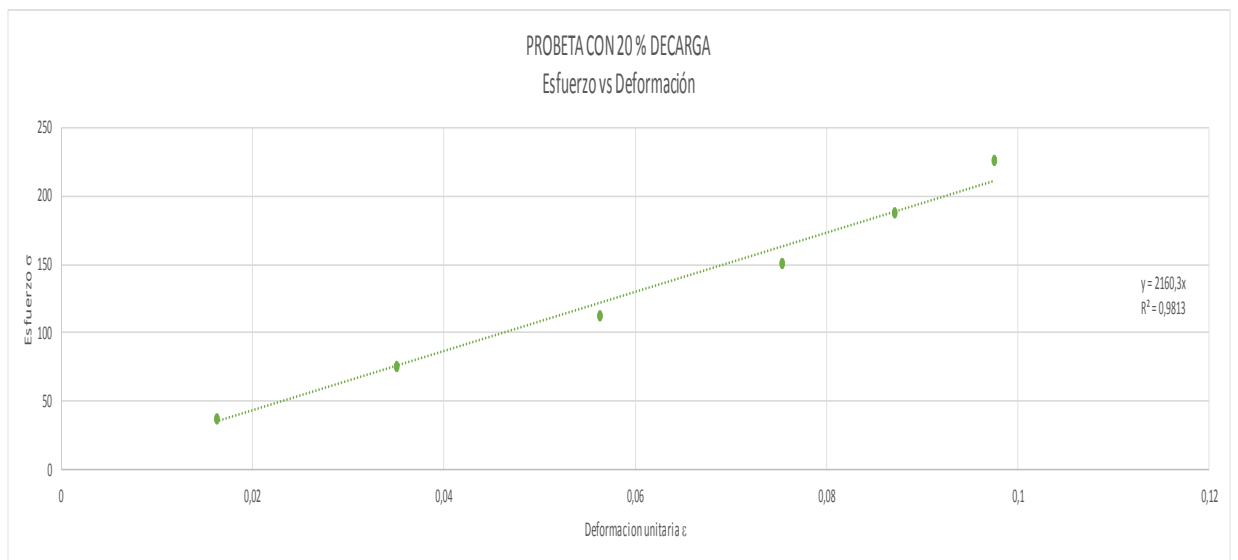
Las figuras 72 y 73 muestran la gráfica (fuerza vs deformación) y (esfuerzo vs deformación unitaria) para obtener el esfuerzo permisible del material, esfuerzo último y módulo de Young.

Figura 72: grafica fuerza vs elongación probeta resina con 20% de carga.



Fuente: autores.

Figura 73: grafica esfuerzo vs deformación unitaria probeta resina con 20% de carga



Fuente: autores.

4.1.2.3 Datos obtenidos para la probeta del 30% de carga:

En las siguientes tablas se muestran los datos de (fuerza vs elongación) y (esfuerzo vs deformación unitaria) de la probeta.

Tabla 12: fuerza vs elongación.

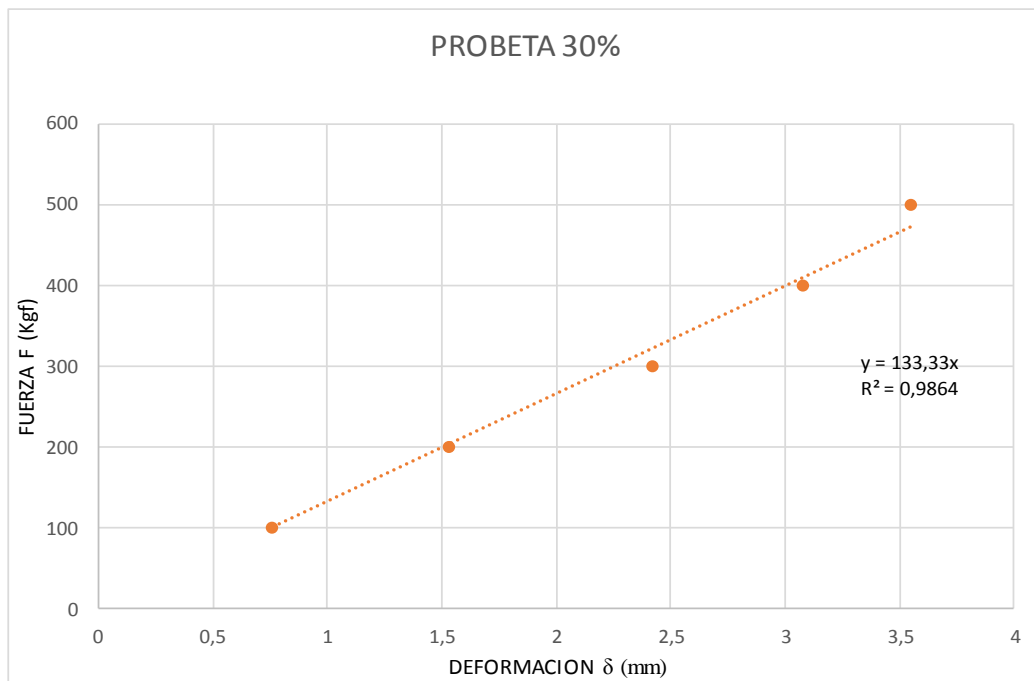
PROBETA 30%	
FUERZA (Kgf)	ELONGACION (mm)
100	0,76
200	1,53
300	2,42
400	3,08
500	3,55
560	

Tabla 13: esfuerzo vs deformación unitaria.

PROBETA 30%	
esfuerzo (Kgf/cm ²)	deformacion unitaria (ϵ)
37,59398496	0,021300448
75,18796992	0,042881166
112,7819549	0,067825112
150,3759398	0,08632287
187,9699248	0,099495516
210,5263158	

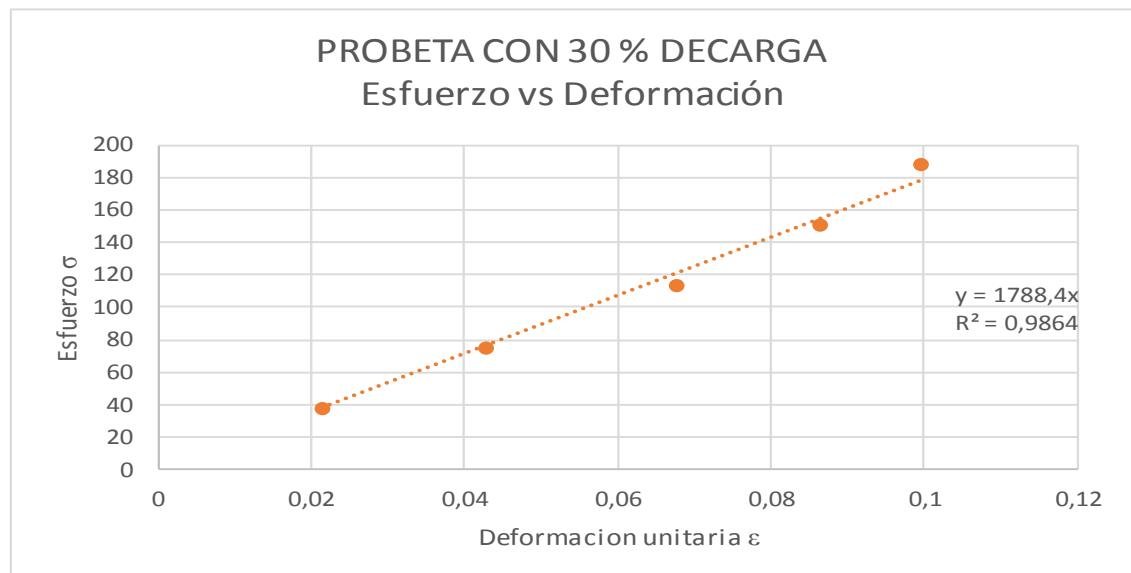
La figuras 74 y 75 muestran la gráfica (fuerza vs deformación) y (esfuerzo deformación unitaria) para obtener el esfuerzo permisible del material, esfuerzo ultimo y módulo de Young.

Figura 74: grafica fuerza vs elongación probeta resina con 30% de carga.



Fuente: autores.

Figura 75: grafica esfuerzo vs deformación unitaria probeta resina con 30% de carga.



Fuente: autores.

4.1.2.4 Datos obtenidos para la probeta del 40% de carga:

En las siguientes tablas se muestran los datos de (fuerza vs elongación) y (esfuerzo vs deformación unitaria) de la probeta sin carga.

Tabla 14: fuerza vs elongación.

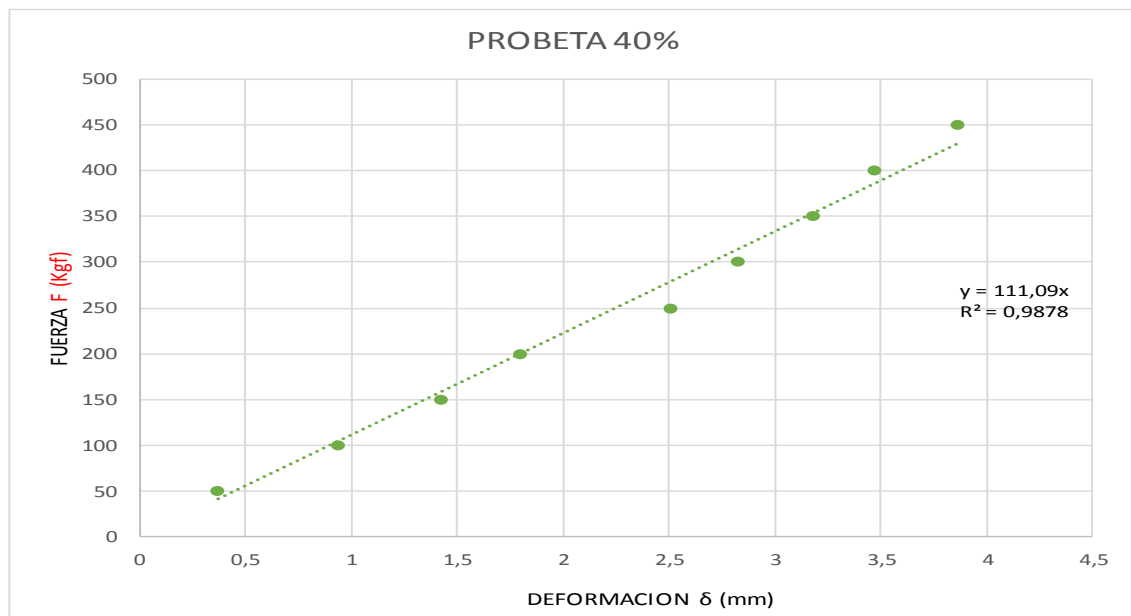
PROBETA 40%	
FUERZA (Kgf)	ELONGACION (mm)
50	0,37
100	0,94
150	1,42
200	1,8
250	2,51
300	2,82
350	3,18
400	3,47
450	3,86
480	

Tabla 15: esfuerzo vs deformación unitaria.

PROBETA 40%	
esfuerzo (Kgf/cm ²)	deformacion unitaria (ϵ)
18,79699248	0,010369955
37,59398496	0,026345291
56,39097744	0,039798206
75,18796992	0,05044843
93,98496241	0,070347534
112,7819549	0,079035874
131,5789474	0,089125561
150,3759398	0,097253363
169,1729323	0,108183857
180,4511278	

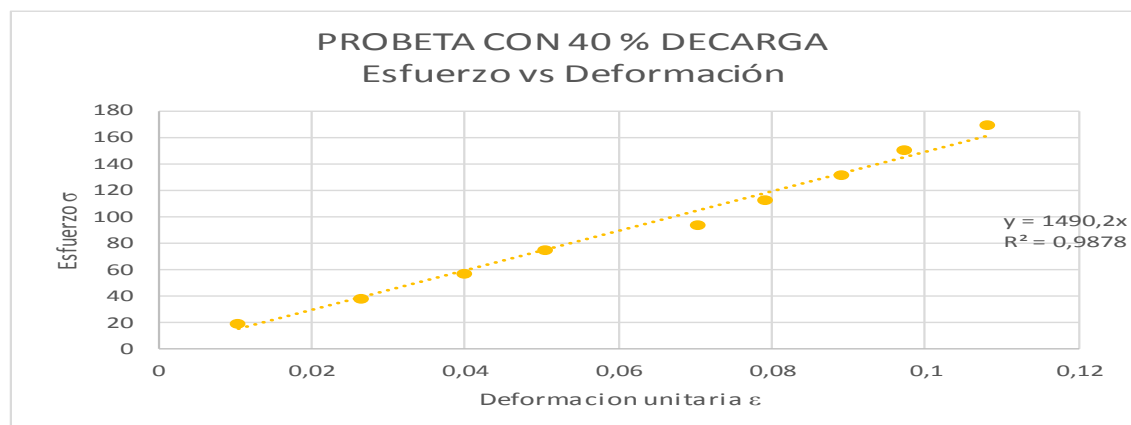
Las figuras 76 y 77 muestran la gráfica (fuerza vs deformación) y (esfuerzo vs deformación unitaria) para obtener el esfuerzo permisible del material, esfuerzo último y módulo de Young.

Figura 76: grafica fuerza vs deformación probeta resina con 40% de carga.



Fuente: autores.

Figura 77: grafica esfuerzo vs deformación unitaria probeta resina con 40% de carga.



Fuente: autores.

4.1.2.5 Resultados obtenidos del cálculo de las pruebas de tracción:

La tabla 16 presenta los valores obtenidos del cálculo de las pruebas de tracción de las probetas respectivamente reforzadas, para su posterior comparación y análisis.

Tabla 16: tabla comparativa de los resultados obtenidos del cálculo de las pruebas de tracción de las probetas reforzadas.

TABLA COMPARATIVA PROPIEDADES MECANICAS PROBETAS DE TRACCION		
PROPIEDADES	PROBETA SIN REFUERZO	PROBETA CON 20% DE REFUERZO
FUERZA ALARGAMIENTO 0.2 (Kgf)	58,3673	11,5506
ESFUERZO PERMISIBLE (MPa)	2,74	0,42
ESFUERZO ULTIMO (MPa)	32,59	24,71
MODULO DE YOUNG (MPa)	271,22	183,97
PROPIEDADES	PROBETA CON 30% DE REFUERZO	PROBETA CON 40% DE REFUERZO
FUERZA ALARGAMIENTO 0.2 (Kgf)	9,5624	7,9673
ESFUERZO PERMISIBLE (MPa)	0,35	0,29
ESFUERZO ULTIMO (MPa)	20,64	17,69
MODULO DE YOUNG (MPa)	170,83	152,95

Fuente: autores.

De la tabla anterior analizamos que a mayor porcentaje de refuerzo, menor resistencia a la tracción presenta la probeta.

Esto se debe a que internamente la probeta contiene mayor discontinuidad de la resina causada por los espacios que ocupa el refuerzo.

4.1.3 Prueba de desgaste de material:

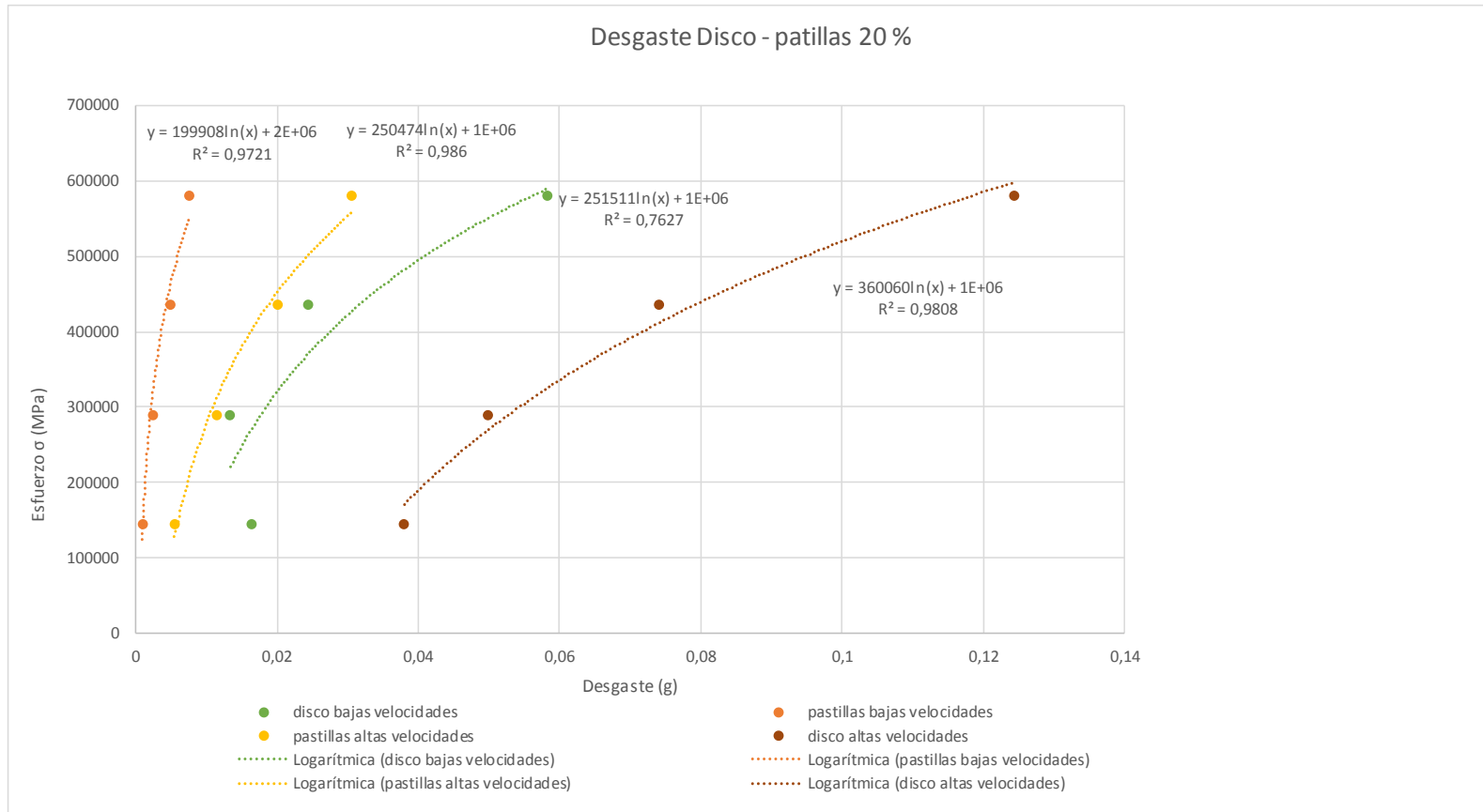
En las tablas 17, 18 y 19 y gráficas de las figuras 78, 79 y 80 se muestran los datos y el comportamiento de las pruebas de desgaste realizadas al disco de resina y a las pastillas de cada compuesto.

Tabla 17: tabla resultados de desgaste entre el disco de resina y las pastillas cargadas con el 20% de refuerzo.

PRUEBA DE DESGASTE DISCO DE RESINA Y PASTILAS CARGADAS CON EL 20% DE REFUERZO					
Fuerza (N)	Velocidad de Deslizamiento del Disco (m/s)	Temperatura a Altas Revoluciones (°C)	Tiempo (s)	Desgaste (g)	
	Revoluciones Altas			Disco a Altas Revoluciones	Pastillas a Altas Revoluciones
30	9. 74025974	41.4	300	0.0380	0.0055
60	9. 74025974	54.8	300	0.0499	0.0114
90	9. 74025974	70.1	300	0.0740	0.0200
120	9. 74025974	110.5	300	0.3044	0.0306
Fuerza (N)	Velocidad de Deslizamiento del Disco (m/s)	Temperatura a Bajas Revoluciones (°C)	Tiempo (s)	Desgaste (g)	
	Revoluciones Bajas			Disco a Bajas Revoluciones	Pastillas a Bajas Revoluciones
30	3. 246753247	31.3	300	0.0164	0.0075
60	3. 246753247	37.7	300	0.0134	0.0024
90	3. 246753247	42.8	300	0.0244	0.0009

Fuente: autores.

Figura 78: gráfica prueba de desgaste disco – patillas 20%.



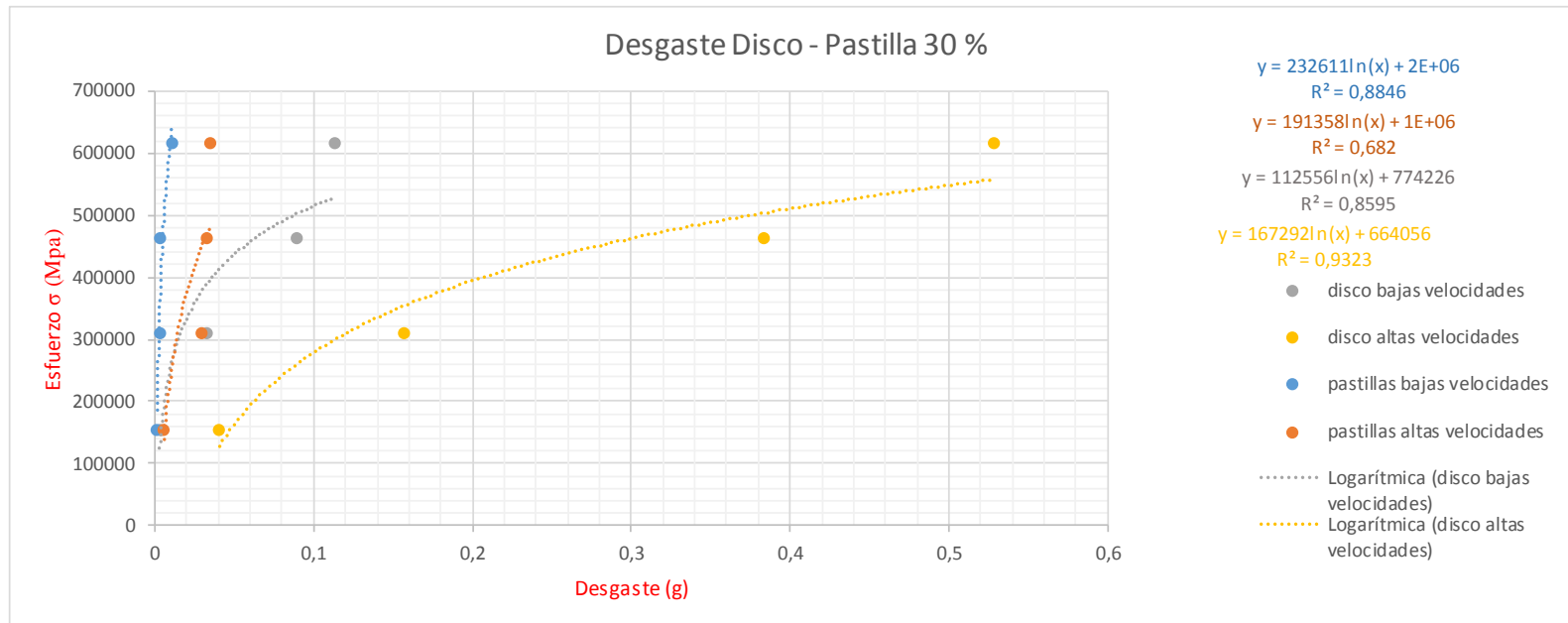
Fuente: autores.

Tabla 18: tabla prueba de desgaste disco de resina y pastillas cargadas con el 30% de refuerzo.

PRUEBA DE DESGASTE DISCO DE RESINA Y PASTILAS CARGADAS CON EL 30% DE REFUERZO						
Fuerza (N)	Velocidad de Deslizamiento del Disco (m/s)		Temperatura a Altas Revoluciones (°C)	Tiempo (s)	Desgaste (g)	
	Revoluciones Altas				Disco a Altas Revoluciones	Pastillas a Altas Revoluciones
30	9. 74025974		42.9	300	0.0405	0.0058
60	9. 74025974		64.3	300	0.1571	0.0352
90	9. 74025974		79.7	300	0.5287	0.0294
120	9. 74025974		110.7	300	0.3839	0.0322
Fuerza (N)	Velocidad de Deslizamiento del Disco (m/s)		Temperatura a Bajas Revoluciones (°C)	Tiempo (s)	Desgaste (g)	
	Revoluciones Bajas				Disco a Bajas Revoluciones	Pastillas a Bajas Revoluciones
30	3. 246753247		32.7	300	0.0031	0.0105
60	3. 246753247		39.3	300	0.0326	0.0015
90	3. 246753247		47.4	300	0.1128	0.0031
120	3. 246753247		53.5	300	0.0889	0.0032

Fuente: autores.

Figura 79: grafica prueba de desgaste disco – patillas 30%.



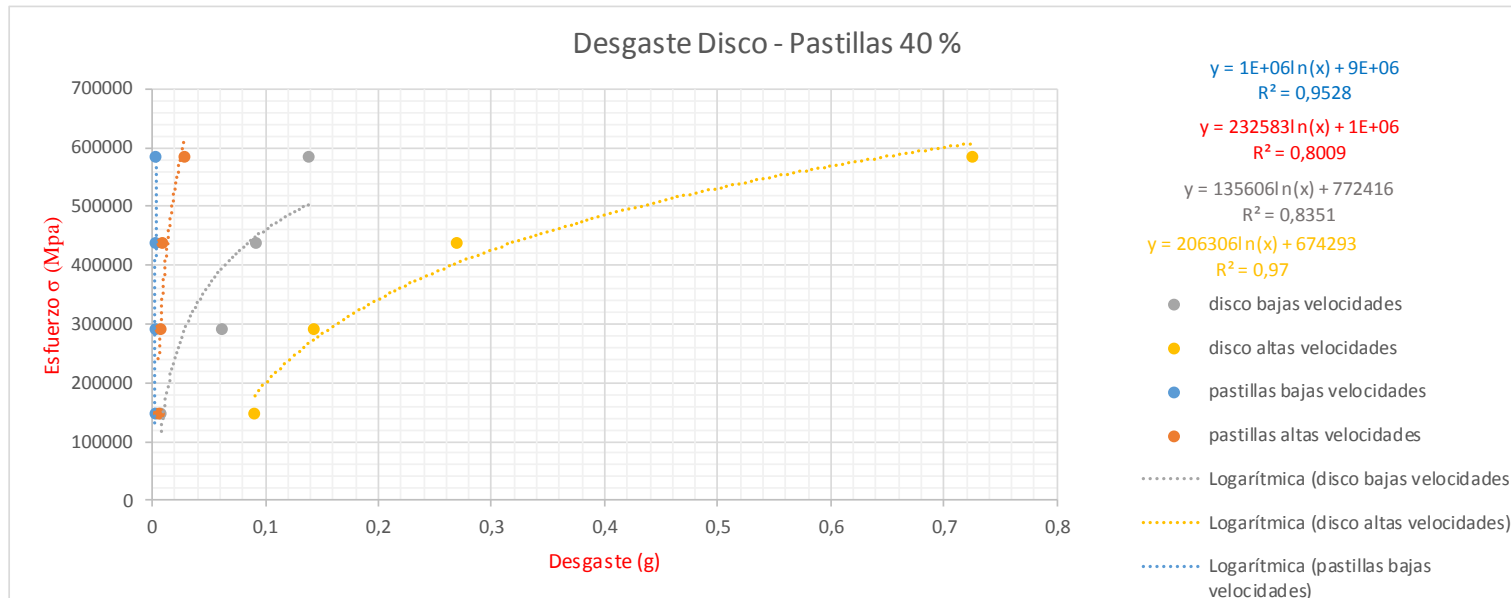
Fuente: autores.

Tabla 19: tabla prueba de desgaste disco de resina y pastillas cargadas con el 20% de refuerzo.

PRUEBA DE DESGASTE DISCO DE RESINA Y PASTILAS CARGADAS CON EL 40% DE REFUERZO					
Fuerza (N)	Velocidad de Deslizamiento del Disco (m/s)	Temperatura a Altas Revoluciones (°C)	Tiempo (s)	Desgaste (g)	
	Revoluciones Altas			Disco a Altas Revoluciones	Pastillas a Altas Revoluciones
30	9. 74025974	54.1	300	0.0904	0.0067
60	9. 74025974	73.2	300	0.1430	0.0058
90	9. 74025974	90.6	300	0.2687	0.0086
120	9. 74025974	112.8	300	0.7251	0.0286
Fuerza (N)	Velocidad de Deslizamiento del Disco (m/s)	Temperatura a Bajas Revoluciones (°C)	Tiempo (s)	Desgaste (g)	
	Revoluciones Bajas			Disco a Bajas Revoluciones	Pastillas a Bajas Revoluciones
30	3. 246753247	35.9	300	0.0079	0.0033
60	3. 246753247	45.5	300	0.0611	0.0029
90	3. 246753247	51	300	0.0918	0.0024
120	3. 246753247	55.1	300	0.1389	0.0028

Fuente: autores.

Figura 80: grafica prueba de desgaste disco – pastillas 40%.



Fuente: autores.

4.1.3.1. Resultados prueba de desgaste:

La tabla 20 muestra los valores del esfuerzo óptimo de las combinaciones disco sin refuerzo-pastillas cargadas con 20%, 30% y 40%

Tabla 20: tabla de resultados de la prueba de desgaste de las combinaciones disco-pastillas.

PRUEBA DESGASTE DEL MATERIAL	
COMPUESTO	ESFUERZO OPTIMO (MPa)
DISCO	1
PASTILLA 20%	
DISCO	1,000773328
PASTILLA 30%	
DISCO	0,960620632
PASTILLA 40%	

Fuente: autores.

4.1.4 Prueba de conductividad térmica:

Al desarrollar el cálculo de la transferencia de calor, con los datos presentados en el capítulo de procedimiento, y siguiendo el procedimiento de la figura 54, se obtuvo un coeficiente de conductividad térmica k para la resina de.

$$K(\text{resina}) = 1,161706044 \frac{W}{m \times ^\circ C}$$

4.1.5 Prueba de capacitancia térmica:

- combinación resina-agua:

Utilizando la fórmula mencionada en el capítulo de procedimiento y con los datos obtenidos en la prueba, se realizó el cálculo del coeficiente de capacitancia térmica de la resina con respecto al agua.

$$m(\text{resina}) c(\text{resina}) \Delta T(\text{resina}) = m(\text{agua}) c(\text{agua}) \Delta T(\text{agua})$$

Los datos son los siguientes:

m (resina): 49,8 g

T caliente (resina): 75 °C

T fria (resina): 33 °C

m (agua): 100 g

c (agua): $1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$, el valor de este se encuentra en el...ANEXO E...

T caliente (agua): 33 °C

T fria (agua): 25 °C

Al reemplazar los datos en la formula anterior se obtuvo el coeficiente de capacitancia térmica de la resina con respecto al agua, cuyo resultado es:

c (resina): $0,38248231 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

- combinación resina-aceite:

Utilizando la formula () y con los datos obtenidos en la prueba se realiza el cálculo del coeficiente de capacitancia térmica de la resina con respecto al aceite.

$$m(\text{resina}) c(\text{resina}) \Delta T(\text{resina}) = m(\text{aceite}) c(\text{aceite}) \Delta T(\text{aceite})$$

Los datos son los siguientes:

m (resina): 66,3 g

T caliente (resina): 80 °C

T fria (resina): 42 °C

m (aceite): 71 g

c (aceite): $0,454 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$ @ 25 °C, el valor de este se encuentra en el...ANEXO F...

T caliente (aceite): 42 °C

T fria (aceite): 25 °C

Al reemplazar los datos en la formula anterior, se obtuvo el coeficiente de capacitancia térmica de la resina con respecto al aceite, cuyo resultado es:

c (resina): $0,230475183 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$

4.2 Evaluación del comportamiento mecánico del mecanismo sin lubricante

4.2.1 Evaluación del comportamiento mecánico del mecanismo del compuesto del 20% sin lubricante:

La figura 81 muestra el mecanismo de falla de los elementos sometidos a la prueba de desgaste sin lubricante.

Figura 81: Aspecto de falla del par tornillo sin fin-corona, el primero con refuerzo de 20% y la corona sin refuerzo, sin uso de lubricante.



Fuente: autores.

En las figuras 82 y 83 se muestra la apariencia de la falla del tornillo sin fin y la corona respectivamente.

Figura 82: falla de la corona sin refuerzo.



Fuente: autores.

Figura 83: falla del tornillo sinfín fabricado con 20% de carga de refuerzo.



Fuente: autores.

4.2.2 Evaluación del comportamiento mecánico del mecanismo del compuesto del 30% sin lubricante.

La figura 84 muestra el mecanismo de falla de los elementos sometidos a la prueba de desgaste con lubricante.

Figura 84: mecanismo de falla del par tornillo sin fin-corona del compuesto de 30% sin lubricante.



Fuente: autores.

En las figuras 85 y 86 se muestra la falla del tornillo sin fin y la corona respectivamente.

Figura 85: falla de la corona del tornillo de 30% de carga.



Fuente: autores.

Figura 86: falla del tornillo sin fin del 30% de carga.



Fuente: autores.

4.2.3 Evaluación del comportamiento mecánico del mecanismo del compuesto del 40% sin lubricante.

La figura 87 muestra el mecanismo de falla de los elementos sometidos a la prueba de desgaste sin lubricante.

Figura 87: mecanismo de falla del par tornillo sin fin-corona del compuesto de 40% sin lubricante.



Fuente: autores.

En las figuras 88 y 89 se muestra la falla del tornillo sin fin y la corona respectivamente.

Figura 88: falla de la corona del tornillo de 40% de carga.



Fuente: autores.

Figura 89: falla del tornillo sin fin del 40% de carga.



Fuente: autores.

4.3 Evaluación del comportamiento mecánico del mecanismo con lubricante

La figura 90 muestra el aspecto de falla de los elementos sometidos a la prueba de desgaste con lubricante.

Figura 90: mecanismo de falla del par tornillo sin fin-corona del compuesto de 20% con lubricante.



Fuente: autores.

En las figuras 91 y 92 se muestra aspecto de la falla del tornillo sin fin y la corona respectivamente.

Figura 91: falla de la corona del tornillo de 40% de carga con lubricante.



Fuente: autores.

Figura 92: falla del tornillo sin fin de 40% de carga con lubricante.



Fuente: autores.

4.4 Determinación de la vida útil

4.4.1 Cálculo de la velocidad de deslizamiento del tornillo (Vs):

$$v_s = v_l / \cos \gamma; \text{ donde } v_l = 0,451007826 \frac{m}{s} \text{ y } \gamma = 4,58^\circ$$

$$\text{Entonces } v_s = 0,452452592 \frac{m}{s}$$

Con el valor de v_s se calcula ρ' interpolando de la tabla 20.

Tabla 21: tabla para hallar el valor de ρ'

v_s , m/s	ρ'	v_s , m/s	ρ'
0,1	4° 30' ... 5° 10'	2,5	1° 40' ... 2° 20'
0,5	3° 10' ... 3° 40'	3	1° 30' ... 2° 00'
1,0	2° 30' ... 3° 10'	4	1° 20' ... 1° 40'
1,5	2° 20' ... 2° 50'	7	1° 00' ... 1° 30'
2,0	2° 00' ... 2° 30'	10	0° 55' ... 1° 20'

[Fuente: (9)]

Se tiene que $\rho' = 3^\circ 19' 30,57 \dots 3^\circ 19' 30,57$; seleccionando el menor valor ya que es el óptimo para las coronas de estaño y como nuestra corona no está cargada es en gran medida menos resistente.

4.4.2 Cálculo del rendimiento de la transmisión:

$$\eta_e = \frac{\operatorname{tg}\gamma}{\operatorname{tg}(\gamma + \rho')}; \text{ donde } \gamma = 4,58^\circ \text{ y } \rho' = 3^\circ 19' 30,57$$

$$\text{Entonces } \eta_e = 0,576916886$$

Condición de auto bloqueo $\gamma = \rho'$

$$\eta_e = \frac{\operatorname{tg}\gamma}{\operatorname{tg}(\gamma + \rho')} = \frac{\operatorname{tg}\gamma}{\operatorname{tg}2\gamma} < 0,5$$

De la siguiente condición se tiene que:

$$0,496791452 < 0,5$$

Por tanto, esta transmisión cumple con la condición de auto bloqueo, lo cual revela que el mecanismo es irreversible, el tornillo es la entrada el movimiento solo sigue un sentido desde el tornillo hacia la corona.

4.4.3 Cálculo de las fuerzas que actúan en el engrane:

La fuerza F_n puede descomponerse en tres componentes mutuamente ortogonales F_{t1} , F_{t2} , F_r de la siguiente manera: (9)

$$F_{t1} = F_{a2} = \frac{2M_{T1}}{d_1}; \quad F_{t2} = F_{a1} = \frac{2M_{T2}}{d_2} = \frac{2M_{T1} \cdot u \cdot \eta}{d_2};$$

$$F_r = F_{t2} \cdot \operatorname{tg} \alpha;$$

$$F_n = \frac{F_n'}{\cos \gamma} = \frac{F_{t2}}{\cos \alpha \cdot \cos \gamma}.$$

Donde $M_{t1} = 10,01 \text{ N}\cdot\text{m}$, $u = 23$, $\eta_e = 0,576916886$, $\alpha = 20^\circ$, $\gamma = 4,58^\circ$, $d_1 = 0,024967 \text{ m}$ y $d_2 = 0,046 \text{ m}$; entonces.

$$F_{t1} = 801,8584532 \text{ N}$$

$$F_{t2} = 5774,938029 \text{ N}$$

$$F_n = 6165,247479 \text{ N}$$

Se calcula l_e , el cual está dado por la siguiente ecuación.

$$l_\Sigma = b \cdot \varepsilon_\alpha \xi / \cos \gamma; \text{ Donde } b = \delta \cdot d_1 / 2 \quad (9)$$

Entonces de la expresión $\sin \phi = b_2 / da_1 - 0,5 \text{ m}$, hallamos δ ; donde $b_2 = 19 \text{ mm}$, $da_1 = 28,967 \text{ mm}$ y $m = 2$; tenemos:

$$\delta = 0,237747764 \text{ JI}$$

Así con los valores de $\delta = 0,237747764 \text{ JI}$, $d_1 = 24,967 \text{ mm}$; tenemos que:

$$b = 9,324008901 \text{ mm}$$

De la ecuación $\varepsilon_\alpha = \sqrt{(0,17 \cdot z_2 + 0,34)^2 - (0,16 \cdot z_2)^2} - 0,058 \cdot z_2 + 1,01$; donde $z_2 = 23$ entonces:

$$\varepsilon_\alpha = 1,80205368 \text{ para } \alpha = 20^\circ \text{ y } X = 0$$

El valor medio de $\xi = 0,75$ para garantizar que la huella de contacto se ubique simétrica en el plano medio y no a un costado.

De esta manera la carga específica q se reescribe así:

$$q = \frac{F_n \cdot K_{H\beta} \cdot K_{Hv}}{l_e} = \frac{2M_{T2} \cdot K_{H\beta} \cdot K_{Hv}}{d_1 \cdot d_2 \cdot \delta \cdot \varepsilon_\alpha \cdot \xi \cdot \cos \alpha}$$

Al calcular q se necesita conocer los valores de K_{Hv} y $K_{H\beta}$

$v_2 < 3$ m/s, $K_{Hv} = 1,0$ y para $v_2 > 3$ m/s, $K_{Hv} = 1,0 \dots 1,3$.

La velocidad circular de la rueda $v_2 = \pi d_2 n_2 / 60$; donde $d_2 = 0,046$ m y $n_2 = 0,576916886 \text{ min}^{-1}$

$v_2 = 1,38 \times 10^{-3}$ m/s < 3 m/s, $K_{Hv} = 1,0$

Para los cálculos previos se puede tomar, para una carga constante, $K_{H\beta} = 1$

Entonces con $M_{T2} = 132,8235747 \text{ N}\cdot\text{m}$, $K_{H\beta} = 1$, $K_{Hv} = 1,0$, $d_1 = 0,024967$ m, $d_2 = 0,046$ m, $\delta = 0,237747764$, $\varepsilon_\alpha = 1,8$, $\xi = 0,75$ y $\alpha = 20^\circ$ se tiene que:

$$q = 244115,3384 \text{ N/m}$$

Se calcula $\rho_{red} = \frac{\rho_1 \cdot \rho_2}{\rho_1 + \rho_2} \cong \rho_2 = \frac{d_2 \cdot \sin \alpha}{2 \cos^2 \alpha}$; donde $d_2 = 0,046$ m y $\alpha = 20^\circ$

$$\rho_{red} = 0,008908567 \text{ m}$$

Para hallar el valor de Z_E se depende del material de la rueda. De la tabla 22 se selecciona el menor valor de Z_E . (9)

Tabla 22: coeficientes K_a , K_d y K_E de los materiales del piñón y la rueda.

Coeficiente	Tipo de ruedas	Materiales del piñón y la rueda					
		Acero-acero	Acero-fundición	Acero-bronce	Fundición-fundición	Textolita-acero	Caprolon-acero
K_a	Rectos	495	445	430	415	200	155

MPa ^{1/3}	Helicoidales y bihelicoidales	430	390	375	360	170	135
K _d , MPa ^{1/3}	Rectos	770	700	680	645	310	240
	Helicoidales y bihelicoidales	675	610	600	565	270	210
Z _E , MPa ^{1/2}	-	192	166	160	148	49	34

Fuente: (9)

4.4.4 Cálculo de la resistencia a la fatiga de las superficies activas de los dientes de la rueda sinfín:

$$\sigma_H = Z_E \cdot \sqrt{\frac{q}{\rho_{red}}}; \text{ Donde } q = 244115,3384 \text{ N/m}, \rho_{red} = 0,008908567 \text{ m}, Z_E = 34 \text{ MPa}^{1/2}$$

Se tiene que:

$$\sigma_H = 177,9805423 \text{ MPa} \leq [\sigma_H], \text{ este es el cálculo preliminar.}$$

$$\text{Para la corrección del cálculo } K_{H\beta} = 1 + \left(\frac{Z_2}{\theta}\right)^2 (1-x),$$

Donde θ es el coeficiente de deformación del sinfín y x depende del gráfico escalonado del régimen de carga.

El valor de θ se obtiene de la tabla 23. (9)

Tabla 23: coeficientes de deformación del sin fin (θ).

θ para q				
z ₁	8	10	12,5	16
1	72	108	147	194
2	57	86	117	163
4	47	70	94	131

Fuente: (9)

$$x = \sum_I^n \frac{M_{Ti} \cdot L_{hi}}{M_T \cdot L_h}$$

Como la carga y las revoluciones son constantes, entonces:

$$N_{LE} = N_{\Sigma} = 60L_h n_v$$

Donde $n_v = n \text{ RPM} = 345$, $L_h = \text{longevidad en horas} = 8760L K_a K_d$, $L = \text{número de años en servicio proyectadas} = 1$, $N_{\Sigma} = \text{número total de ciclos de carga}$, $K_a = 240$, $K_d = 210$.

Calculamos L_h para hallar N_{Σ} y x entonces:

$$L_h = 441504000 \text{ h}$$

$$N_{\Sigma} = 9,1391328 \times 10^{12}$$

Para hallar x tenemos $M_{Ti} = 0.75$ (10.01N·m) y $L_{hi} = \text{número de horas de operación a la frecuencia } n_v = 1/3$

Entonces:

$$X = 5,662462854 \times 10^{-10}$$

Con $\theta = 10$ y $X = 5,662462854 \times 10^{-10}$ calculamos $K_{H\beta}$, entonces:

$$K_{H\beta} = 6,289999997$$

Realizamos de nuevo el cálculo de σ_H pero con $K_{H\beta} = 6,289999997$ este será el cálculo de corrección:

$$\sigma_H = 446372,9292 \text{ MPa} \leq [\sigma_H]$$

4.4.5 Cálculo de revisión de los dientes a la resistencia a la fatiga a la flexión:

Si $b_w = b = 0,5\delta \cdot d_1$; donde $\delta = 0,237747764\pi$ y $d_1 = 0,024967 \text{ m}$ entonces de lo anterior se dice que:

$$b_w = b = 0,009324008 \text{ m}$$

Se calcula:

$$Y_{\varepsilon} = 1/(\varepsilon_{\alpha} \cdot \xi) = 0,74; \text{ con } \varepsilon_{\alpha} = 1,8, \xi = 0,75$$

$$Y_{\beta} = 1 - \gamma/140 = 0,967285714; \text{ con } \gamma = 4,58^{\circ}$$

La ecuación para el cálculo de la revisión es la siguiente:

$$\sigma_F = 1,72 \frac{M_{T2} \cdot Y_F \cdot K_{F\beta} \cdot K_{Fv} \cdot \cos\gamma}{d_1 \cdot d_2 \cdot m} \leq [\sigma_F]$$

Donde Y_F es el coeficiente de forma del diente de la rueda sinfín, el cual es dependiente del número equivalente de dientes: $z_{v2} = z_2/\cos^3\gamma$: sabiendo que $z_2 = 23$ y $\gamma = 4,58^\circ$

$z_{v2} = 23,22174458$, el valor de Y_F se obtiene interpolando de la tabla 24. (9)

Tabla 24: coeficiente de forma del diente de la rueda sin fin.

Z_{v2}	20	24	26	28	30	32	35	37	40	45	50	60	80	10	150	300
Y_F	1,98	1,88	1,85	1,8	1,76	1,71	1,64	1,61	1,55	1,48	1,45	1,4	1,34	1,3	1,27	1,24

Fuente: (9)

$$Y_F = 1,899456386$$

Para las transmisiones sinfín se toma aproximadamente $K_{F\beta} = K_{H\beta} = 1$ y $K_{Fv} = K_{Hv} = 1$. Para el cálculo preliminar se tiene que:

$$\sigma_F = 0,188317095 \text{ MPa} \leq [\sigma_F]$$

Para la corrección del cálculo se toma $K_{F\beta} = K_{H\beta} = 6,289999997$ resultando en:

$$\sigma_F = 1,184514527 \text{ MPa} \leq [\sigma_F]$$

Calculando la inercia a partir de la siguiente ecuación:

$I = 0,05d_{f1}^4(0,36 + 0,64d_{a1}/d_{f1})$; donde: $d_{f1} = 0,028967$ m y $d_{a1} = 0,020167$ m entonces:

$$I = 2,835883381 \times 10^{-8}$$

Al calcular la deflexión, esta no debe superar los 0,01m, entonces:

$$M/EI < 0,01\text{m}, \text{ donde } M= 10,01 \text{ N}\cdot\text{m}, E= 183,9745868 \times 10^6 \text{ y } I=2,835883381 \times 10^{-8}$$

De lo anterior se tiene que:

$$1,918615169 \text{ m} < 0,01 \text{ m NO SE CUMPLE.}$$

4.4.6 Cálculo de los esfuerzos permisibles $[\sigma_H]$ y $[\sigma_F]$:

4.4.6.1 Cálculo del esfuerzo permisible $[\sigma_H]$

Para el cálculo del esfuerzo $[\sigma_H]$ se tiene que $v_s = 4,5 \cdot 10^{-4} n_1$

Donde $M_{t2} = 132,8235747 \text{ N}\cdot\text{m}$ y $n_1 = 345 \text{ min}^{-1}$ de lo anterior se dice que:

$$v_s = 0,792118209 \text{ m/s}$$

Partiendo de la ecuación: (9)

$$[\sigma_H] = K_{HL} \cdot C_v \cdot [\sigma_{H0}]$$

Donde: $K_{HL} = \sqrt[8]{10^7 / N_H} \geq 0,67$, pero $\leq 1,15$; $[\sigma_{H0}] = (0,75 \dots 0,9)\sigma_u$

C_v es un coeficiente que tiene en cuenta la intensidad del desgaste de los dientes de las ruedas en función de la velocidad de deslizamiento v_s , en (m/s). El valor de C_v se toma de la tabla 25. (9)

Tabla 25: tabla para el coeficiente C_v

$v_s \leq$	1	2	3	4	5	6	7	≥ 8
C_v	1,33	1,21	1,11	1,02	0,95	0,88	0,83	0,8

Fuente: (9)

Para el régimen estacionario de carga, el número de ciclos de cálculo se determina como:

$$N_H = 60 \cdot n_2 \cdot L_h, \text{ donde } L_h = 365 \cdot K_d \cdot K_a \cdot 24 \cdot L$$

Calculando L_h y N_H para poder tener K_{HL} y así hallar $[\sigma_H]$.

$$L_h = 365 \cdot K_d \cdot K_a \cdot 24 \cdot L$$

Donde L=número de años en servicio proyectadas=1, $K_a = 240$, $K_d=210$. Entonces se tiene que:

$$L_h = 441504000 \text{ h}$$

Con $n_2 = 15 \text{ min}^{-1}$ y $L_h = 441504000 \text{ h}$ se halla N_H :

$$N_H = 3,973536 \times 10^{11}$$

Entonces K_{HL} así:

$$K_{HL} = 0,000003145 \geq 0,67 \text{ NO SE CUMPLE}$$

Al calcular $[\sigma_H]$ de la ecuación $[\sigma_H] = K_{HL} \cdot C_v \cdot [\sigma_{H0}]$ con $K_{HL} = 0,000003145$, $C_v = 1,33$ y $[\sigma_{H0}] = 0,75$ (2470095984 MPa) se tiene que:

$$[\sigma_H] = 77,4903074 \times 10^{-6} \text{ MPa}$$

Entonces del cálculo de la resistencia a la fatiga de las superficies activas de los dientes de la rueda sinfín preliminar y de corrección se tiene que:

$$\sigma_H = 177,9805423 \text{ MPa} \leq 77,4903074 \times 10^{-6} \text{ MPa NO SE CUMPLE}$$

$$\sigma_H = 446372,9292 \text{ MPa} \leq 77,4903074 \times 10^{-6} \text{ MPa NO SE CUMPLE}$$

4.9.6.2 Cálculo del esfuerzo permisible $[\sigma_F]$.

Para el cálculo $[\sigma_F]$ se tiene que:

$$[\sigma_F] = (0,08\sigma_u + 0,25\sigma_y)K_{FL}$$

Donde $K_{FL} = \sqrt[3]{10^6 / N_F} \leq 0,543$, pero ≥ 1 es el coeficiente de longevidad durante el cálculo a la fatiga por flexión.

En caso de una carga estacionaria $N_F = 60 \cdot n_2 \cdot L_h$, donde $N_F = N_H = 3,973536 \times 10^{11}$ entonces:

$$K_{FL} = 0,000000279 \leq 0,543 \text{ SI SE CUMPLE pero } K_{FL} = 0,000000279 \geq 1 \text{ NO SE CUMPLE}$$

Calculando $[\sigma_F]$ de la ecuación $[\sigma_F] = (0,08\sigma_u + 0,25\sigma_y)K_{FL}$

con $K_{FL} = 0,000000279$, $N_F = 3,973536 \times 10^{11}$, $\sigma_u = 25,70095984$ MPa y $\sigma_y = 0,425833721$ MPa, entonces se tiene que:

$$[\sigma_F] = 0,581027325 \text{ MPa}$$

Entonces, del cálculo de revisión de los dientes a la resistencia a la fatiga durante la flexión preliminar y de corrección se tiene que:

$$\sigma_F = 0,188317095 \text{ MPa} \leq 0,581027325 \text{ MPa SI SE CUMPLE.}$$

$$\sigma_F = 1,184514527 \text{ MPa} \leq 0,581027325 \text{ MPa NO SE CUMPLE.}$$

Para prevenir la destrucción frágil o las deformaciones residuales de los dientes, se debe garantizar el cumplimiento de la condición:

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = \sigma_F \frac{M_{Tpico}}{M_{T2}} \leq [\sigma_F]_{m\acute{a}x}$$

Donde $[\sigma_F]_{m\acute{a}x} = 0,75$ (25,70095984 MPa), $M_{Tpico} = 0,75$ (132,8235747 MPa), $M_{T2} = 132,8235747$ MPa entonces se tiene que:

$$\sigma_{Fm\acute{a}x} = 0,141237821 \text{ MPa} \leq 18,52571988 \text{ MPa SI SE CUMPLE.}$$

5. CONCLUSIONES

- Se realizó la revisión bibliográfica sobre el tema de reductores sinfín-corona y resinas epóxica, en la cual se definieron sus antecedentes y se logró comprender el funcionamiento y aplicaciones más comunes de los reductores sinfín-corona fabricados en resinas epóxica
- Se realizó el cálculo de la vida útil de los mecanismos con mejor comportamiento de las pruebas sin lubricante obteniéndose que el material con 20% de carga presentó el mejor comportamiento
- Se establecieron los porcentajes de carga para cada compuesto y así poder estudiar su comportamiento en diversas pruebas, y al mismo tiempo escoger el que mejor se comporta para los cálculos de vida útil.
- Se fabricó un elemento que permitiera generar un vacío a cada compuesto y así garantizar la homogeneidad interna de los bloques y reducir las porosidades a causa de burbujas de aire en la mezcla.
- Se fabricaron los bloques para el posterior mecanizado de las piezas que se utilizaron en cada una de las pruebas.
- Se realizaron las pruebas de dureza shore D para cada compuesto y así poder comprobar estas con los datos dados por el fabricante.
- Se realizaron las pruebas de tracción para hallar los respectivos esfuerzos permisibles y de rotura (σ_y , σ_u) y el módulo de Young (E) para cada compuesto.
- Se realizaron las pruebas de desgaste de material para poder obtener un punto óptimo de esfuerzo de desgaste entre los compuestos y la resina.

- Se realizaron las pruebas de conductividad térmica y capacitancia térmica para así poder encontrar los coeficientes C_p y K de la resina respectivamente.
- Se realizaron las pruebas del comportamiento mecánico del mecanismo sin lubricante.
- Se seleccionó el mecanismo con el mejor comportamiento de las pruebas del comportamiento mecánico del mecanismo sin lubricante.
- Se seleccionó un lubricante que permitiera mejorar las condiciones de funcionamiento del mecanismo tanto desgaste como deslizamiento.
- Se realizó la prueba del comportamiento mecánico del mecanismo con lubricante del mecanismo con mejor comportamiento de las pruebas sin lubricante.
- Al momento de seleccionar la carga metálica, se recomienda un tamaño de grano más pequeño, ya que a menor tamaño ayuda a que no aparezcan porosidades dentro de la matriz resina-carga metálica y a su vez hace que los elementos fabricados sean más resistentes a la rotura.

6. RECOMENDACIONES

- Antes de fabricar los bloques de material compuesto, se recomienda hacer un análisis visual de la resina, ya que esta puede estar en mal estado o muy asentada en este caso se debe revolver dicho problema antes que nada.
- Al momento de preparar los moldes donde se vaciarán los compuestos, se recomienda aplicar una buena capa de alcohol polivinílico y dejar secar, ya que así se hace más fácil el desmoldeo de los bloques.
- Antes de utilizar la carga metálica, se recomienda lavarla con thinner y secarla, ya que si se realiza la mezcla con la resina, esta no cataliza por que ocurren otras reacciones con las suciedades de la carga metálica (taladrina, grasa, polvo).
- Se recomienda inducir vacío a los bloques puesto que así se compacta mejor la mezcla y se eliminan las burbujas de aire internas en esta.
- Al momento de mecanizar los bloques, se recomienda utilizar una herramienta de corte de alta dureza puesto que el compuesto no es muy dúctil.
- Al momento de seleccionar el lubricante (grasa), se recomienda una con contenido de litio, ya que este no afecta el comportamiento de la resina y el compuesto cuando se encuentran en funcionamiento.
- Se recomienda el uso de estos elementos en mecanismos con aplicaciones didácticas, ya que estos no soportan altas exigencias de funcionamiento.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. **C.F., Amado.** *Diseño y construcción de una caja reductora de velocidad de engranaje y tonillo sin fin en baño de aceite con relación de 40:1.* Guatemala : Universidad San Carlos de Guatemala, 2003.
2. **motorreductores, NORD.** Reductores de sinfín serie universal. [En línea] [Citado el: 21 de noviembre de 2013.] https://www5.nord.com/cms/media/documents/bw/G1035_60Hz_ES_2908.pdf.
3. **Reshetov, D.** *Diseño de elementos de máquinas.* Cuba : Ed. de la Habana, 1987.
4. **Donald R, Askeland y Pradeep P, Phulé.** *Ciencia e ingeniería de los materiales.* MEXICO : Thomson, 2004.
5. **Carbonel, D.** Coderch Ibermutuamur. [En línea] Fco javier, 01 de diciembre de 1999. [Citado el: 13 de octubre de 2013.] http://www.ibermutuamur.es/IMG/pdf/Seguridad_bip20.pdf.
6. **Luis, Jose.** POLÍMEROS. [En línea] 2013 de abril de 2013. [Citado el: 15 de noviembre de 2013.] <http://www.scribd.com/doc/137128074/POLIMEROS>.
7. **Yunus A, Cengel.** *Trasferencia de calor y masa.* monterrey, MEXICO : Mc Graw-hill interamericana, 2007.
8. **Frank P, Incropera y David P, Dewitt.** *fundamentos de tranferencia de calor.* MEXICO : Pearson, 1999.
9. **Gabriel Calle trujillo, Carlos Alberto Romero Piedrahita.** *Diseño de elementos de maquina.* Pereira, COLOMBIA : Universidad tecnologica de pereira, 2000.
10. **Internacional, ASTM.** ASTM website. [En línea] [Citado el: 17 de septiembre de 2014.] <http://www.astm.org/COPYRIGHT/>.
11. **upc.** upcommons.upc.edu. [En línea] [Citado el: 15 de marzo de 2015.] <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3891/14/34039-14.pdf>.
12. **wikipedia.** wikipedia la enciclopedia. [En línea] [Citado el: 16 de marzo de 2015.] http://es.wikipedia.org/wiki/Capacidad_calor%C3%ADfica.
13. **Materias.fi.uba.** propiedades termícas de aceites y glicerinas. [En línea] [Citado el: 20 de marzo de 2015.] <http://materias.fi.uba.ar/6731/Tablas/Tabla7.pdf>.

ANEXO A

Norma ASTM D638-10 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics
(método de pruebas estándar para propiedades de tracción de los plásticos).

Fuente: (10)

ANEXO B

Norma ASTM D2240-05 Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness (Método de prueba estándar para Caucho Inmuelle-Durómetro Dureza).

Fuente: (10)

ANEXO C

Tabla de algunas propiedades del acero AISI 1020.

DENSITAT	7860 Kg / m ³
MÒDUL YOUNG	207 GPa.
COEFICIENT DILATACIÓ	11,7 °C ⁻¹ · 10 ⁻⁶ .
CONDUCTIVITAT TÈRMICA	52 W / m · °C.
CALOR ESPECIFIC	500 J / Kg · °K.
MÒDUL TALLANT	8·10 ⁹ N / m ²
RESISTÈNCIA FLUÈNCIA	295 (MPa).
COEFICIENT POISSON	0,3.

Fuente: (11) traducir

ANEXO D

Tabla de coeficientes para el cálculo del h de convección.

Apéndice A ■ Propiedades termofísicas de la materia B.39

TABLA A.4 Propiedades termofísicas de gases a presión atmosférica^a

T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg · K)	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m · K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Aire							
100	3.5562	1.032	71.1	2.00	9.34	2.54	0.786
150	2.3364	1.012	103.4	4.426	13.8	5.84	0.758
200	1.7458	1.007	132.5	7.590	18.1	10.3	0.737
250	1.3947	1.006	159.6	11.44	22.3	15.9	0.720
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700
400	0.8711	1.014	230.1	26.41	33.8	38.3	0.690
450	0.7740	1.021	250.7	32.39	37.3	47.2	0.686
500	0.6964	1.030	270.1	38.79	40.7	56.7	0.684
550	0.6329	1.040	288.4	45.57	43.9	66.7	0.683
600	0.5804	1.051	305.8	52.69	46.9	76.9	0.685
650	0.5356	1.063	322.5	60.21	49.7	87.3	0.690
700	0.4975	1.075	338.8	68.10	52.4	98.0	0.695
750	0.4643	1.087	354.6	76.37	54.9	109	0.702
800	0.4354	1.099	369.8	84.93	57.3	120	0.709
850	0.4097	1.110	384.3	93.80	59.6	131	0.716
900	0.3868	1.121	398.1	102.9	62.0	143	0.720
950	0.3666	1.131	411.3	112.2	64.3	155	0.723
1000	0.3482	1.141	424.4	121.9	66.7	168	0.726
1100	0.3166	1.159	449.0	141.8	71.5	195	0.728
1200	0.2902	1.175	473.0	162.9	76.3	224	0.728
1300	0.2679	1.189	496.0	185.1	82	238	0.719
1400	0.2488	1.207	530	213	91	303	0.703
1500	0.2322	1.230	557	240	100	350	0.685
1600	0.2177	1.248	584	268	106	390	0.688
1700	0.2049	1.267	611	298	113	435	0.685
1800	0.1935	1.286	637	329	120	482	0.683
1900	0.1833	1.307	663	362	128	534	0.677
2000	0.1741	1.337	689	396	137	589	0.672
2100	0.1658	1.372	715	431	147	646	0.667
2200	0.1582	1.417	740	468	160	714	0.655
2300	0.1513	1.478	766	506	175	783	0.647
2400	0.1448	1.558	792	547	196	869	0.630
2500	0.1389	1.665	818	589	222	960	0.613
3000	0.1135	2.726	955	841	486	1570	0.536
Amoniaco (NH₃)							
300	0.6894	2.158	101.5	14.7	24.7	16.6	0.887
320	0.6448	2.170	109	16.9	27.2	19.4	0.870
340	0.6059	2.192	116.5	19.2	29.3	22.1	0.872
360	0.5716	2.221	124	21.7	31.6	24.9	0.872
380	0.5410	2.254	131	24.2	34.0	27.9	0.869

Fuente: (7)

ANEXO E

Tabla del coeficiente de capacidad calorífica de algunos materiales.

Material	Calor específico kcal/kg °C	Densidad kg/m³	Capacidad calorífica volumétrica kcal/m³ °C
Agua	1	1000	1000
Acero	0,12	7850	950
Tierra seca	0,44	1500	660
Granito	0,19	2645	529
Madera de roble	0,57	750	430
Ladrillo	0,20	2000	400
Madera de pino	0,6	640	384
Piedra arenisca	0,17	2200	374
Piedra caliza	0,22	2847	484
Hormigón	0,16	2300	350
Mortero de yeso	0,2	1440	288
Tejido de lana	0,32	111	35
Poliestireno expandido	0,4	25	10
Poliuretano expandido	0,38	24	9
Fibra de vidrio	0,19	15	2,8
Aire	0,24	1,2	0,29

Fuente: (12)

ANEXO F

Propiedades térmicas de algunos aceites y glicerinas.

ACEITE DE MOTOR SIN USAR

Temperatur. °C	Densidad ρ (Kg/m ³)	Calor especifico c_p J/Kg°C	Conductiv. térmica "k" W/m°C	Dif. térmica $\alpha \cdot 10^{10}$ (m ² /seg)	Visc. dinám. $\eta \cdot 10^3$ (N.seg/m ²)	Visc. cinem. $\nu \cdot 10^6$ (m ² /seg)	Nº de Prandt Pr	$\left(\frac{g}{v^2} \cdot 10^{-10}\right)$
0	899,1	1796	0,147	911	3848	4280	47100	
20	888,2	1880	0,145	872	799	900	10400	8475
40	876,1	1964	0,144	834	210	240	2870	
60	864	2047	0,14	800	72,5	83,9	1050	
80	852	2131	0,138	769	32	37,5	490	
100	840	2219	0,137	738	17,1	20,3	276	
120	829	2307	0,135	710	10,3	12,4	175	
140	816,9	2395	0,133	686	6,54	8	116	
160	805,9	2483	0,132	663	4,51	5,6	84	

Fuente: (13)