

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA EL ESTUDIO DEL
DESGASTE EN COMPONENTES LUBRICADOS CON
MOVIMIENTO ROTATIVO**

REALIZADO POR:

Br. HÉCTOR JOSÉ MARTÍNEZ ARRIOJAS

Br. CARLOS JOSÉ G. MORANTES CARVAJAL

Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito
parcial para optar al título de:

INGENIERO MECÁNICO

BARCELONA, FEBRERO DE 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA EL ESTUDIO DEL
DESGASTE EN COMPONENTES LUBRICADOS CON
MOVIMIENTO ROTATIVO**

ASESOR ACADÉMICO:

PROF. HENRY ESPINOZA

COASESOR ACADÉMICO:

PROF. YAMILE LARA

BARCELONA, FEBRERO DE 2010

**UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**



**CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA EL ESTUDIO DEL
DESGASTE EN COMPONENTES LUBRICADOS CON
MOVIMIENTO ROTATIVO**

EL JURADO HACE CONSTAR QUE ASIGNÓ A ESTA TESIS LA
CALIFICACIÓN DE:

APROBADO

PROF. HENRY ESPINOZA
(ASESOR ACADÉMICO)

PROF. JOHNNY MARTÍNEZ
(JURADO PRINCIPAL)

PROF. LINO CAMARGO
(JURADO PRINCIPAL)

BARCELONA, FEBRERO 2010

RESOLUCIÓN

De Acuerdo al Artículo 41 del Reglamento de Trabajos de Grado:

“Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y sólo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quién deberá participarlo previamente al Consejo Universitario, para su autorización”

DEDICATORIAS

La culminación de este trabajo representa para mí una motivación e impulso a otros logros, desvelos y sacrificios realizados en ayuda de personas que representan para mí un gran significado y que gracias a dios tengo la fortuna de tenerlas a mi lado viviendo junto a mí la materialización de este maravilloso sueño.

Antes que nada, este logro no hubiese sido posible sin el apoyo y presencia de mi *Madre Gredis Carvajal y Padre Carlos Morantes*, mis dos mejores amigos, quienes siempre me han inculcado tan buenos valores, un gran amor y significado a los estudios. Siempre fueron y serán mi gran fuente de admiración, son un gran ejemplo de lucha a seguir, les debo la vida y este logro se los dedico con todo mi corazón y gran orgullo “Los Amo”.

A mis *Abuelos José Morantes, Clara Carvajal y Rafaela Alloca* porque siempre pude contar con su apoyo y me han regalado a lo largo de la vida muchos momentos de alegría y felicidad, le doy gracias a Dios que los tengo con vida para celebrar a mi lado este gran triunfo.

A mis *Hermanas Karla, Karleni y Gredis “Chiquito”* quienes han sido mis grandes amigas y compañeras; nunca se rindan ante una meta propuesta y siempre luchan por sus sueños, ya que no hay mayor satisfacción que algún día poder alcanzarlos y verlos materializados.

A mi *Gran Amor Karina Doria “La Flaca”* por siempre creer en mí y tener confianza en mis capacidades, me has ayudado a crecer cada día como ser humano y me has enseñado que las cosas tienen una razón de ser. Te Amo mi amor y esta dedicatoria quiero extenderla a tu familia por siempre apoyarme y extenderme las manos en los momentos que los he necesitado.

Este logro se lo dedico a un *Gran Amigo José Manuel “Súper”* con quien tuve la oportunidad de compartir numerosos momentos de alegría y felicidad, eres una persona que siempre recordaré y que se, hoy día estarías muy contento por esta meta que pude alcanzar, y se que en donde estés lo celebrarás junto a mí.

A mis *Tíos: José Morantes “Cheo”, Tubalcain Moreno “Mango Tino”* y *Tías: Griselda, Zarita, María, Yoslany, Raiza* porque a su lado he podido alcanzar una gran meta de la que ustedes forman parte, ya que por sus buenos consejos me han impulsado a llegar y lograr este sueño anhelado.

A mis *Primos: José Rafael “Ñato” José Balbino “Pan dulce”, Fredito, Felix, Ranses, José Eduardo* y *Primas: Mayela, Luzmarie, Yolly, Luisana, Ana María, María José, Clara Andreina, Adriana, Griselis, Clarmarid, María Sofía, Monseraht*, porque ustedes significan mucho para mí y espero que también puedan alcanzar sus metas y puedan cumplir sus sueños. Los quiero mucho y recuerden “nunca es tarde para lograr un sueño”.

A mis *Amigos y Amigas de Crianza, Compañeros y Compañeras de Estudio, Vecinos y Vecinas*, cuyos nombres no mencionare para así no menospreciar a aquellas personas que por algún u otro motivo pueda olvidar su nombre en este momento pero que le dejo dicho que de alguna u otra forma son parte de mi vida ya que me regalaron a lo largo de este tiempo momentos muy gratos, que de alguna manera me ayudaron a alcanzar esta meta; para mí su amistad tiene un gran significado y siempre los veré como mis hermanos y hermanas. Muchachos siempre recuerden que las metas que uno se propone siempre son alcanzables solo debemos ser constantes.

Carlos Morantes

AGRADECIMIENTOS

Este logro alcanzado no hubiese sido posible sin la contribución de muchas personas las cuales me guiaron siempre por un buen camino y me prestaron su apoyo y colaboración.

Ante todo, quiero agradecerle a *Dios Todopoderoso* por darles vida y salud a mis familiares y amigos; por siempre ser esa guía y muestra de esperanza que muchas veces necesitamos para alcanzar nuestras metas y logros.

A mi *Madre Gredis Carvajal* quien para mi siempre será una gran mujer y gran amiga y siempre será mi fuente de inspiración, eres una persona admirable, luchadora que siempre supiste estar en los momentos que te necesite dándome buenos consejos y prestándome un apoyo incondicional; gracias mamá por enseñarme en la vida tan buenos valores e inculcarme ese espíritu de lucha, los cuales han sido un gran pilar para la culminación de las metas que me he propuesto a lo largo de la vida. Te Amo.

A mi *Padre Carlos Morantes* y mi mejor amigo quien siempre me enseñó lo importante que son los estudios, siempre supiste estar a mi lado y estar pendiente de mí, dándome tu apoyo incondicional e impulsándome con tus buenos consejos para lograr mis sueños y alcanzar mis más grandes metas. Gracias papá por poder contar contigo.

A mis *Abuelos José Morantes, Clara Carvajal y Rafaela Alloca* por formar parte de mi vida, por inculcarme junto a mis padres muy buenos valores y por llenar mi vida siempre de mucha dicha y felicidad.

A mis *Hermanas Karla, Karleni y Gredis “Chiquito”* por brindarme muchos momentos de alegría y felicidad, darme su apoyo como amigas y

compañeras, y siempre estar a mi lado en el logro de mis sueños y metas. Gracias Hermanas las quiero mucho.

A mi *Novia y Gran Amor Karina Doria “La Flaca”* quien siempre ha estado a mi lado a lo largo de toda mi carrera académica y en numerosos momentos donde la he necesitado, has sido parte de mis sueños, siempre he podido contar contigo y espero que este sea uno de los muchos pasos que demos juntos; gracias mi amor por ser parte de mi vida, por tu paciencia y por siempre creer en mí.

A la *Universidad de Oriente* por ser la institución que contribuyó en mi formación académica y por ser un segundo hogar para mí.

A mi *compañero de tesis Héctor Martínez* por ser un gran amigo y luchar a mi lado porque las cosas se hicieran de una buena manera. Gracias hermano porque juntos pudimos alcanzar esta maravillosa meta.

A *Todos aquellos Profesores de la Universidad que compartieron sus conocimientos e ideas y que se esforzaron a formarnos como buenos profesionales*. Y en especial a nuestro *Asesor Henry Espinoza* y *Co-Asesora Yamile Lara* por ofrecernos tan valiosa colaboración y una gran amistad.

A mis *Tíos: José Morantes “Cheo”, Tubalcain Moreno “Mango Tino”* y *Tías: Griselda, Zarita, María, Yoslany, Raiza*, por siempre apoyarme, brindarme tan gratos momentos, darme numerosos consejos y ser parte de mi vida.

A mis *Primos: José Rafael “Ñato” José Balbino “Pan dulce”, Fredito, Felix, Ranses, José Eduardo* y *Primas: Mayela, Luzmarie, Yolly, Luisana, Ana María, María José, Clara Andreina, Adriana, Griselis, Clarmarid, María Sofía, Monseraht*, por estar a mi lado y porque siempre he podido contar con ustedes;

gracias primos y primas por darme su apoyo y brindarme muchos momentos de dicha y felicidad.

A mi *Suegra, Cuñado, Cuñada y Abuela María*, por siempre estar tan pendiente de mí y prestarme su apoyo e infinita colaboración, gracias por tratarme y hacerme sentir como uno más de su familia.

A mis *Amigos y Amigas de Crianza, Compañeros y Compañeras de Estudio, Vecinos y Vecinas*, cuyos nombres no mencionare para así no menospreciar a aquellas personas que por algún u otro motivo pueda olvidar su nombre en este momento pero quienes son personas que nunca podré olvidar, ya que son personas maravillosas con quien tuve la suerte de compartir, estudiar e intercambiar conocimientos. Gracias muchachos por regalarme tan valiosa y gran amistad, junto a ustedes pude aprender buenos valores, fueron parte de mi crianza y pude compartir momentos de mucha felicidad.

Gracias a todos.

Carlos Morantes

DEDICATORIAS

Desde el 12 de Abril del año 2004, día en que llegue por primera vez a la Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui soñé con el momento en que escribiría estas palabras. Ese sueño que nació aquel día Lunes fue el que durante todo este tiempo me dio fuerzas para vencer y superar todos los obstáculos y dificultades que se me presentaron. Ese sueño que estuvo conmigo siempre fue mi fiel compañero y me permitió vivir momentos felices en compañía de mi familia, amigos y compañeros de estudio.

Este gran logro está dedicado a mi *Madre Eunice Arrijoja de Martínez*, madre con estas palabras solo quiero decirte que fuistes la mujer que más he amado y que amare por siempre. Has sido y seras la fuerza que me hace luchar y salir adelante, nunca olvidare todos tus consejos y tus sabias palabras, las cuales me acompañaron y me seguirán guiando en la vida, sin ti nada de esto hubiera sido posible. Espero que desde el cielo te sientas orgullosa de mi. Hoy cumplo tu gran sueño que fue verme graduado de Ingeniero y sé que donde quiera que estés te debes de estar sintiendo tan feliz como me siento yo. Este triunfo es para ti querida madre. Te amare hoy, mañana y siempre.

A mis *Abuelos Héctor Rafael Martínez y José de los Santos Arrijoja*, que siempre soñaron con verme triunfar y que día a día me guiaron por el camino del bien. Cada una de sus palabras las llevo en el corazón y espero que desde el cielo siempre me manden sus bendiciones. Siempre los recordare, los amo.

A mi *Abuela Carmen Arrijoja (Faña)*, que para mi significo una madre mas, inculcándome buenos valores y enseñándome que toda lucha en la vida tiene su recompensa, se que desde el cielo me estas cuidando abuela, te amo.

Nunca los olvidare, los amo

Héctor Martínez

AGRADECIMIENTOS

Gracias Dios todo poderoso por darme fuerzas y salud para alcanzar este gran logro y por bendecirme a mí y a toda mi familia.

A mis *Tías Josefina Arrijoja, Aida Arrijoja y Neida Arrijoja, Arelis Landaeta*, de verdad no tengo palabras para agradecerles todo lo que han hecho por mí, a cada una de ustedes las considero una madre para mí. Gracias por sus consejos, su apoyo incondicional, su ayuda y sus palabras. Todos los días le pido a Dios que me les de mucha salud para que me acompañen en todos mis triunfos y logros, sin ustedes nada de esto hubiera sido posible, las amo.

A mi *Padre Héctor Martínez*, por su apoyo y por los excelentes valores que me inculco, por soñar junto a mí con este gran logro, por todas tus enseñanzas, por todos tus regaños y consejos que hoy y siempre me servirán para ser un hombre de bien... gracias papa te amo.

A mi *Hermano Orlando Martínez*, por ser mi compañero durante todo este tiempo, por ayudarme y apoyarme, por vivir conmigo momentos tristes y momentos de alegría, por guiarme en esos primeros días que camine los pasillos de la Universidad, para ti un abrazo, quiero verte triunfar y espero que Dios nos de mucha salud para juntos salir adelante y lograr todos nuestros sueños y los de nuestra querida madre... Te amo.

A mis *Tíos Raul Arrijoja (wichi wichi), Magno Arrijoja, Freddy Arrijoja (coco), Andres Arrijoja, Jose Manuel Herrera*, por el apoyo, por todos sus consejos y palabras de aliento en los momentos mas difíciles, por su cariño, sus locuras y gran humor que más de una vez me hicieron reír, y que aun lo siguen haciendo. A todos y cada uno de ustedes los quiero ver salir adelante hoy, mañana y siempre, este triunfo es mío y de ustedes.

A mi *Novia Maria Alexandra Galindo*, que pienso que esta dedicatoria se va a quedar corta por todo lo que tengo que agradecerte.... Por tus palabras de aliento que nunca olvidare, por tu ayuda, por tu apoyo incondicional, por tus consejos, por tus regaños. Llegaste a mi vida en el momento indicado, te has convertido en parte de este sueño, gracias por hacerme entender que todo tiene su razón de ser, gracias por ayudarme a nunca darme por vencido y por decirme siempre *Nene quédate tranquilo que todo va a salir bien*. Quiero verte triunfar y salir adelante, y sabes que para ello cuentas conmigo. Quiero que sepas que te amo y que no tengo palabras para agradecer todo lo que has hecho por mí.

A mis *Primos Ernesto Arrijoja, Raul Arrijoja (Raulito), Fabiola Herrera, Maria Jose Herrera, Ruben Arrijoja, Antonieta Arrijoja, Angy Arrijoja, Antonella Arrijoja, Harold Prescott*, con ustedes me crie, con ustedes viví mi infancia y eso para mí tiene un valor incalculable, a todos y cada uno de ustedes los llevo en el corazón. Sigán adelante, luchen por todas sus metas que la vida tiene oportunidades maravillosas que solo con esfuerzo y dedicación se pueden alcanzar, cuentan conmigo para lo que sea.

A mis *amigos Luis Alfredo Perez y Manuel Perez*, que más que amigos los considero mis hermano, gracias muchachos por el apoyo durante todo este tiempo, por ser mis compañeros y por darme su ayuda incondicional, y excelentes consejos, a su lado viví momentos gratos que nunca olvidare, los quiero mucho.

A los *Profesores Henry Espinoza y Yamile Lara*, por todo el apoyo, por todos sus regaños y por darnos consejos que nos servirán cada día para ser mejores profesionales, mis agradecimientos por entregarnos sus conocimientos, de verdad fue un verdadero placer trabajar con ustedes. Espero que esta bonita amistad que logramos perdure en el tiempo. Se les quiere mucho.

A mi *compañero de tesis Carlos Morantes*, que mas que un compañero de estudio es un gran amigo para mí, de verdad muchas gracias por tu ayuda, gracias

por tu apoyo, gracias por tus consejos en aquellos momentos donde más los necesite. Juntos logramos nuestro gran sueño, con esfuerzo, trasnochos y sacrificios, espero verlo triunfar y salir adelante siempre hermano, se que será así.

A la *Familia Galindo Chacín*, que desde el día que los conocí me abrieron las puertas de su casa y me entregaron su cariño y confianza, de verdad se quedan cortas las palabras para agradecerles todo lo que han hecho por mí, ustedes se ganaron mi cariño y mi respeto, se les quiere mucho.

A mis grandes *amigos de la Universidad de oriente*, **Rodrigo Mendez (chicho)**, **Simon Bittar**, **Rusmary Gonzales**, **Eloy Montes**, **Santiago Barreto (sucun sucun)**, **Jesús Rodríguez (chuchu)**, **Williams Acosta**, **Oswaldo Perez**, y a todos aquellos que por algún motivo olvide nombrar, mis más sinceros agradecimiento por brindarme su amistad y apoyo. Nunca olvidare todos los momentos que vivimos en las aulas de clase del Dpto. de Mecánica.

Gracias a todas aquellas personas que de una u otra manera compartieron y vivieron conmigo momentos gratos en la Universidad de Oriente.

Gracias a todos

Héctor Martínez

RESUMEN

Se diseñó y construyó un equipo compacto y ligero, para el estudio del desgaste en componentes mecánicos, práctico de utilizar, con una capacidad máxima de ensayo de 15 kgf, el cual se caracteriza por poseer una parte dinámica (disco de desgaste de diferentes diámetros) y una parte estática representada por: cojinetes de contacto deslizante de diámetros comprendidos entre 40 y 90 mm y espesores variables entre 1 y 4 mm, así como también muestras de metal de 15 mm de longitud y 10 mm de diámetro. El equipo cuenta con un sistema de palancas que permite incrementar la carga de ensayo 4,21 veces y transmitirla satisfactoriamente a la zona donde ocurre el contacto entre la parte estática y dinámica. Para el diseño de los componentes que conforman el equipo se utilizó el software Solidworks 2008, en donde se simuló los diferentes análisis de esfuerzos, deformaciones y fatiga a los que estarán sometidos los componentes durante los ensayos; se seleccionaron pernos y rodamientos necesarios para el ensamble y buen funcionamiento del equipo, comparando la carga máxima a la que estos se encuentran sometidos, con la recomendada por los fabricantes. Una vez obtenida una condición segura de diseño, se realizaron planos de los componentes que conforman el equipo, para así facilitar su construcción, la cual se llevó a cabo mediante procesos básicos de mecanizado. Una vez ensamblados todos los componentes del equipo, se realizaron las diferentes pruebas de desgaste con lubricación en cojinetes de contacto deslizante (y muestras de aluminio, para así verificar el buen funcionamiento del equipo, estos elementos (cojinete y muestra de aluminio) se les determinó el peso antes y después de cada prueba, variando la carga (entre 5 y 15 kgf) y el tiempo de ensayo (entre 3 y 6 min), obteniéndose que a un mayor tiempo de ensayo produce un mayor desgaste en los cojinetes, mientras que en la muestra de aluminio resultó ser más perjudicial la carga de ensayo. Se tomaron muestras del lubricante usado en los ensayos y fueron analizados en un espectrómetro de emisión atómica, con la finalidad de determinar la cantidad de partículas contaminantes presentes en el mismo.

ÍNDICE

	Pág.
RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIAS	v
AGRADECIMIENTOS	x
RESUMEN	xiv
ÍNDICE	xv
LISTA DE FIGURAS	xxiv
LISTA DE TABLAS	xxxii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	34
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	34
1.2 OBJETIVOS.....	36
1.2.1 Objetivo general.....	36
1.2.2 Objetivos específicos.....	36
1.3 ALCANCE Y LIMITACIONES.....	37
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	38
2.1 ANTECEDENTES.....	38
2.2 FUNDAMENTOS DE DISEÑO MECÁNICO.....	41
2.2.1 Esfuerzos en elementos mecánicos.....	41
2.2.1.1 Esfuerzo normal.....	41
2.2.1.2 Esfuerzo flexionante.....	42
2.2.1.3 Esfuerzo cortante.....	43
2.2.1.4 Esfuerzo de aplastamiento.....	44

2.2.2 Deformación en elementos mecánicos.....	45
2.2.2.1 Deformación normal	45
2.2.2.2 Deformación por torsión	46
2.2.3 Deformación plástica y elástica	48
2.2.3.1 Deformación plástica	48
2.2.3.2 Deformación elástica.....	48
2.2.4 Fatiga de metales.....	49
2.2.5 Criterio de falla de Von Mises	52
2.2.6 Factor de seguridad	53
2.2.7 Elementos mecánicos	54
2.2.7.1 Vigas	54
2.2.7.2 Sujetadores mecánicos	55
2.2.7.3 Ejes de transmisión de potencia	57
2.2.7.4 Cojinetes.....	57
2.3 DISEÑO Y SIMULACIÓN COMPUTARIZADA DE ELEMENTOS	
MECÁNICOS UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	
(MEF)	59
2.3.2 Método de elementos finitos	59
2.3.2.1 Principio de operación del MEF para elementos estructurales ...	60
2.3.2.2 Tipos de análisis con el MEF para elementos sólidos.....	60
2.3.3 Software comercial usado para el diseño de componentes mecánicos	
y simulación por MEF	61
2.4 MANUFACTURA DE ELEMENTOS MECÁNICOS	61

2.4.1 Torneado	62
2.4.2 Taladrado.....	62
2.4.3 Cepillado y Planeado	62
2.4.4 Fresado	62
2.4.5 Brochado	63
2.4.6 Esmerilado	63
2.4.7 Oxicorte.....	63
2.5 DESGASTE EN ELEMENTOS MECÁNICOS.....	64
2.5.1 Desgaste	64
2.5.1.1 Desgaste por adhesión.....	64
2.5.1.2 Desgaste por abrasión	64
2.5.1.3 Desgaste por fatiga de superficies.....	65
2.5.1.4 Reacción triboquímica	65
2.6 ANÁLISIS DE ACEITE LUBRICANTE USADO POR SISTEMAS	
 TRIBOLÓGICOS.....	65
2.6.1 Análisis de lubricante por espectrometría de emisión atómica.....	66
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DEL TRABAJO.....	67
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	67
3.2 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	67
3.2.1 ETAPA 1. DISEÑO DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN EL	
EQUIPO	68
3.2.1.1 Establecimiento de variables y condiciones de operación que debe	
tener el equipo	68

3.2.1.2 Selección de los materiales propios del diseño y que serán utilizados en la fabricación de piezas	68
3.2.1.3 Motor eléctrico que será utilizado en el equipo	68
3.2.1.4 Cálculos de reacciones en el sistema de transmisión de carga del equipo	70
3.2.1.5 Diseño de la geometría del eje de transmisión de potencia del equipo	71
3.2.1.6 Selección de rodamientos.....	72
3.2.1.7 Diseño de la geometría de los discos de desgaste.....	73
3.2.1.8 Diseño de la geometría de gancho superior y ganchos laterales de agarre.....	74
3.2.1.9 Diseño de la geometría del porta cojinete.....	75
3.2.1.10 Diseño de la geometría del porta muestra.....	76
3.2.1.11 Diseño de la geometría de la barra de carga	77
3.2.1.12 Diseño de la geometría de los soportes verticales.....	77
3.2.1.13 Diseño de la geometría de los pasadores para porta cojinete y barra de carga	77
3.2.1.14 Diseño de la geometría de la plataforma base del equipo.....	77
3.2.1.15 Selección de pernos, arandelas y tuercas	78
3.2.1.16 Diseño del sistema de lubricación para pruebas de desgaste	79
3.2.1.17 Análisis esfuerzo-deformación a los componentes del equipo	79
3.2.1.17.1 Análisis de esfuerzo-deformación al ensamble de los componentes del equipo.....	79

4.1 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN EL EQUIPO PARA EL ESTUDIO DEL DESGASTE Y LUBRICACIÓN	88
4.1.1 Establecimientos de variables y condiciones de operación que debe tener el equipo	88
4.1.2 Materiales seleccionados y utilizados para el diseño y fabricación de las piezas	89
4.1.3 Motor utilizado.....	90
4.1.4 Cálculos de reacciones en el sistema transmisión.....	93
4.1.5 Diseño del eje de transmisión de potencia	96
4.1.6 Rodamientos seleccionados	99
4.1.7 Diseño de los discos de desgaste.....	100
4.1.8 Diseño del gancho superior y ganchos laterales de agarre.....	102
4.1.9 Diseño del porta cojinete.....	105
4.1.10 Diseño del porta muestra.....	106
4.1.11 Diseño de la barra de carga	107
4.1.12 Diseño de soportes verticales	107
4.1.13 Diseño de pasadores para porta cojinete y barra de carga	108
4.1.14 Diseño de la plataforma base del equipo.....	109
4.1.15 Pernos, tuercas y arandelas seleccionadas	110
4.1.16 Sistema de lubricación para pruebas de desgaste.....	113
4.4 VALIDACIÓN DEL SOFTWARE SOLIDWORKS 2008	115
4.2 ANÁLISIS ESFUERZO-DEFORMACIÓN A LOS COMPONENTES DEL EQUIPO.....	119

4.2.1 Análisis de esfuerzo-deformación al ensamble de los componentes del equipo. Modalidad de ensayo de desgaste en cojinetes de contacto deslizante.....	119
4.2.1.1 Análisis esfuerzo-deformación del modelo. Utilizando disco de desgaste N° 1 (37 mm)	122
4.2.1.2 Deformación unitaria (m/m)	123
4.2.1.3 Factor de seguridad	125
4.2.1.4 Trazado de percepción de diseño	126
4.2.1.5 Resumen de resultados obtenidos de la simulación utilizando disco de desgaste de 37mm	126
4.2.1.6 Análisis esfuerzo-deformación del modelo. Discos de desgastes N° 2 (57 mm), N° 3 (67mm), N° 4 (77mm), y N° 5 (87mm)	127
4.2.2 Análisis de esfuerzo-deformación al ensamble de los componentes del equipo. Modalidad de ensayo de desgaste en muestra de metal	130
4.2.2.1 Esfuerzos Von Mises (N/m ²)	132
4.2.2.2 Trazado de percepción de diseño	133
4.2.3 Análisis de esfuerzo-deformación a la plataforma base del equipo	134
4.2.3.1 Esfuerzos Von Mises (N/m ²)	136
4.2.3.2 Deformación unitaria (m/m)	136
4.2.3.4 Trazado de percepción de diseño	138
4.2.4 Carga máxima que pueden resistir los componentes del equipo para el estudio del desgaste.....	139

4.2.4.1 Carga máxima a aplicar en el equipo considerando falla en el rodamiento de la chumacera 1	139
4.2.4.2 Carga máxima a aplicar en el equipo considerando falla en la plataforma base del equipo	139
4.2.4.3 Carga máxima a aplicar en el equipo considerando falla en los componentes principales del equipo.....	140
4.3 ANÁLISIS DE FATIGA A LOS COMPONENTES DEL EQUIPO	140
4.3.1 Vida total y daños en el equipo bajo efectos de fatiga.....	141
4.3.2 Análisis de fatiga bajo esfuerzos invertidos al eje de transmisión de potencia	142
4.3.2.1 Vida total y daños del eje bajo efectos de fatiga.....	143
4.3.3 Análisis de fatiga en la plataforma base del equipo.....	145
4.3.3.1 Vida total y daños en la plataforma del equipo bajo efectos de fatiga.....	145
4.5 ELABORACIÓN DE PLANOS	146
4.6 CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO	147
4.6.1 Fabricación de los elementos constitutivos del equipo	147
4.7 MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL EQUIPO.....	154
4.7.2 Instrucciones de seguridad que deben tenerse en cuenta antes de utilizar el equipo	154
4.8 PRUEBAS DE DESGASTE REALIZADAS EN EL EQUIPO	161
4.8.1 Pruebas de desgaste en cojinetes de contacto deslizante	161
4.8.2 Pruebas de desgaste realizadas en muestras de metal	163

4.9 ANÁLISIS DEL LUBRICANTE USADO EN LOS ENSAYOS DE DESGASTE UTILIZANDO LA TÉCNICA DE ESPECTROMETRÍA POR EMISIÓN ATÓMICA	165
4.9.1 Análisis del lubricante usado para ensayos de desgaste en cojinetes de contacto deslizante	165
4.9.2 Análisis del lubricante usado para ensayos de desgaste en muestra de metal.....	167
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	169
5.1 CONCLUSIONES	169
5.2 RECOMENDACIONES	171
BIBLIOGRAFÍA.....	172
ANEXO A. TABLAS Y FIGURAS DE SELECCIÓN;	Error! Marcador no definido.
ANEXO B. CERTIFICADOS DE CALIDAD.....	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO C. MANUAL DE OPERACIÓN DEL EQUIPO ...	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO D. PLANOS DE LOS COMPONENTES	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO E. MUESTRA DE CÁLCULO	¡Error! Marcador no definido.
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSOS...	174

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1.Elemento sometido a carga axial.	42
Figura 2.2.Elemento AB sometido a esfuerzo flexionante debido al par.....	42
Figura 2.3.Elemento sometido a esfuerzo cortante.	43
Figura 2.4.Fuerzas y/o reacciones que se generan en el área de aplastamiento....	44
Figura 2.5.Diferencia (δ) en la barra BC tras ser sometida a una carga axial P....	46
Figura 2.6.Deformación por torsión ocasionada, por la acción de un par de torsión T en el extremo libre de un eje circular	47
Figura 2.7.Diagrama tensión-deformación, que muestra la intersección de la curva con la línea paralela a la zona elástica	49
Figura 2.8.Curvas S-N correspondiente a la fatiga del Acero 1047 y el Aluminio 2014-T6	50
Figura 2.9. Zona segura y zona de fallo según el criterio de Soderberg.....	51
Figura 2.10.Área de elipse que indica la zona segura para el diseño de un componente estructural según el criterio de Von Mises.	53
Figura 2.11.Diferentes tipos de vigas.....	55
Figura 2.12.Partes principales de una rosca.	56
Figura 2.13.Representación de pasadores. a) Pasador liso y b) pasador con cabeza.....	57
Figura 2.14.Partes de un cojinete de contacto deslizante.....	58
Figura 2.15.Partes de un cojinete de contacto rodante.....	58
Figura 2.16. a) Espectrómetro de Emisión Atómica, b) cámara de análisis.	66
Figura 3.1.Ventana del software Solidworks 2008, mostrando el croquizado de una geometría.	71
Figura 3.2.Ventana del software Solidworks 2008, mostrando la extrusión por revolución de saliente/base.	72
Figura 3.3.Ventana del software Solidworks 2008, mostrando la extrusión de saliente/base	75
Figura 3.4.Ventana del software Solidworks 2008, mostrando la aplicación de la herramienta asistente para taladrado en un sólido.....	76

Figura 3.5. Torno control numérico computarizado (CNC)	83
Figura 3.6. Centro de mecanizado asistido por computadora: a) Panel de control y b) Vista completa de la máquina herramienta.....	83
Figura 3.7. Máquinas herramientas semiautomáticas utilizadas: a) Taladro de banco, b) fresadora y c) brochadora.....	83
Figura 3.8. Reloj comparador, marca: Mitutoyo, apreciación: 0,001 mm, rango 0-10 mm.....	84
Figura 4.1. Motor eléctrico empleado en el equipo para el estudio del desgaste: a) Motor, b) Base de anclaje y c) Eje de salida	91
Figura 4.2. Esquema de reacciones en el sistema de transmisión de carga.	93
Figura 4.3. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando el Croquizado y extrusión del eje de transmisión de potencia.....	96
Figura 4.4. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando las reacciones generadas en el eje de transmisión de potencia.....	97
Figura 4.5. Ventana del software Solidworks, mostrando el croquizado y extrusión de los disco de desgaste.....	101
Figura 4.6. Conjunto disco-cojinete. a) Ensamble disco-cojinete y b) Diferencia entre el diámetro interno del cojinete de deslizamiento y el diámetro externo del disco de desgaste.....	102
Figura 4.7. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando el croquizado y extrusión de los ganchos laterales de agarre.	103
Figura 4.8. Variación de la zona de agarre de los ganchos laterales en función del espesor de pared de los cojinetes, a) 1,5 mm, b) 3 mm y c) 4 mm.....	103
Figura 4.9. Ventana del software Solidworks 2008 mostrando el croquizado y extrusión del gancho superior.....	104
Figura 4.10. Esquema de sujeción para cojinetes, a) Ganchos laterales de agarre, b) Gancho superior y c) Cojinete de contacto deslizante..	104
Figura 4.11. Ventana del software Solidworks 2008 mostrando el croquizado y extrusión del porta cojinete, a) Agujeros roscados para alojar pernos empujadores, b) Agujero para alojar pasador pivote.	105

Figura 4.12. Ensamble digital de componentes, a) Pernos empujadores laterales, b) Perno empujador superior, c) Ganchos laterales de agarre, d) Gancho superior, e) Cojinete de contacto deslizante y f) Porta cojinete.	106
Figura 4.13. a) Agujero para alojar muestras, b) Agujero para el prisionero de ajuste y c) Agujero para alojar el perno empujador superior.	106
Figura 4.14. Modelo en 3D de la barra de carga 1) Vista trimétrica frontal. 2) Vista trimétrica trasera), a) Agujero para pasador pivote, b) Agujero para perno sujetador de guía y c) Zona de contacto entre la barra de carga y el porta cojinete.....	107
Figura 4.15. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando el croquizado y extrusión de los soportes verticales, a) Agujero para alojar pasador de cabeza, b) Agujero para alojar perno de fijación.	108
Figura 4.16. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando el croquizado y extrusión de los pasadores para porta cojinete y barra de carga, a) Agujero para alojar clavija o reten.	109
Figura 4.17. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando el croquizado y extrusión de la plataforma base del equipo, a) Agujeros para alojar pernos de sujeción de los respectivos elementos constitutivos del equipo.....	110
Figura 4.18. Ensamble de todos los elementos constitutivos del equipo para el estudio del desgaste.....	114
Figura 4.19. Ensamble para la modalidad de ensayo para cojinetes de contacto deslizante.....	115
Figura 4.20. Ensamble para la modalidad de ensayo para muestras de metal. ...	115
Figura 4.21. Cargas y restricciones del modelo. a) Restricción 1, b) Restricción 2, c) Carga 1, d) Carga 2 y e) Restricción 3.	120
Figura 4.22. Mallado de los elementos para análisis esfuerzo-deformación.	120
Figura 4.23. Esfuerzos Von Mises en el modelo simulado (vista isométrica frontal).....	123

Figura 4.24. Esfuerzos Von Mises en el modelo simulado (vista isométrica trasera).....	123
Figura 4.25. Deformación unitaria en el modelo simulado (vista isométrica frontal).....	124
Figura 4.26. Deformación unitaria en el modelo simulado (vista trasera).....	124
Figura 4.27. Distribución del factor de seguridad en el modelo simulado (vista isométrica frontal).	125
Figura 4.28. Distribución del factor de seguridad en el modelo simulado (vista trimétrica trasera).	125
Figura 4.29. Trazado de percepción de diseño del modelo.....	126
Figura 4.30. Esfuerzos Von Mises en el perno empujador. Utilizando disco de desgaste de 37mm.	129
Figura 4.31. Esfuerzo Von Mises en el perno empujador. Utilizando el disco de desgaste de 87mm.	129
Figura 4.32. Comportamiento del esfuerzo Von Mises en función del diámetro de disco.....	130
Figura 4.33. Esfuerzos Von Mises del modelo simulado.....	132
Figura 4.34. Trazado de percepción de diseño del modelo simulado.....	133
Figura 4.35. Cargas y restricciones del modelo simulado.	135
Figura 4.36. Esfuerzos Von Mises en el modelo simulado.....	136
Figura 4.37. Deformación unitaria del modelo simulado.	137
Figura 4.38. Factor de seguridad del modelo simulado.	137
Figura 4.39. Trazado de percepción de diseño del modelo simulado.....	138
Figura 4.40. Ciclos del modelo, 1001000,063 ciclos o números de ensayos que resiste el equipo antes de presentar algún daño por fatiga.	141
Figura 4.41. Porcentaje de daño en el modelo, 0,001 %, para un número de 1001000,063 ensayos.	141
Figura 4.42. Cargas y restricciones del modelo en estudio.....	143
Figura 4.43. Ciclos del modelo, 933038,750 ciclos o revoluciones del eje, antes de presentar algún daño por fatiga.....	143

Figura 4.44. Porcentaje de daño en el modelo, 0.001072 %, para un número de 933038,750 revoluciones del eje.....	144
Figura 4.45. Vida total del modelo en ciclos, 1001000,01 o números de ensayos que resiste la plataforma base del equipo antes de presentar algún daño por fatiga.	145
Figura 4.46. Porcentaje de daño en el modelo, 0.001 %, luego de 1001000,01 ensayos en el equipo.	146
Figura 4.47. Esfuerzo Von Mises ($1,770 \times 10^8$ N/m ² ó Pa) en la barra de acero AISI 1045 estirado en frío	116
Figura 4.48. Deformación unitaria ($7,424 \times 10^{-4}$) alcanzada en la barra de acero AISI 1045 estirado en frío.....	117
Figura 4.49. Factor de seguridad mínimo (8,082) en la barra de acero AISI 1045 estirado en frío.....	117
Figura 4.50. Puntos donde se realizaron las mediciones de desalineación del eje.	151
Figura 4.51. Instalación del reloj comparador en el equipo.....	152
Figura 4.52. Instalación del reloj comparador en los diferentes puntos del eje de transmisión de potencia.....	152
Figura 4.53. Equipo una vez ensamblado todos sus componentes.	153
Figura 4.54. Cojinete de contacto deslizante utilizado en los ensayos de desgaste.	161
Figura 4.55. Balanza analítica utilizada para determinar el peso de los cojinetes de contacto deslizante.....	162
Figura 4.56. Muestra de aluminio ensayada en el equipo.....	163
Figura 4.57. Representación de los resultados del análisis del lubricante utilizado en ensayo de desgaste para cojinetes de contacto deslizante.....	166
Figura A1.1. Ventana del software Solidworks 2008 mostrando las propiedades del material utilizado para el diseño y fabricación del porta cojinete, barra de carga, porta muestra, soportes verticales, eje de transmisión de potencia, gancho superior,	

- ganchos laterales y pasadores para la barra de carga y porta
cojinete. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura A1.2. Ventana del software Solidworks 2008 mostrando las
propiedades del material utilizado para el diseño y fabricación
de los discos de desgaste del equipo. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura A1.3. Ventana del software Solidworks 2008 mostrando las
propiedades del material utilizado para el diseño y fabricación
de la plataforma base del equipo. ... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura A2.1. Catálogo EBERLE para motores eléctricos de inducción
monofásico donde se muestra las características del motor
seleccionado. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura A5.3. Ventana de la página SKF que nos muestra las características de
los rodamientos seleccionados y que serán utilizados en el
equipo **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura B1.2. Certificado de calidad de acero AISI 1045 estirado en frío
emitido por la empresa THYSSEN FRANCE S.A. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura B1.2. Certificado de calidad de acero especial AISI 4140 emitido por la
empresa ACCIAIERIE BERTOLI SAFAU SpA. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.1. Bases de goma colocadas en la plataforma base del equipo. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.2. Apertado del motor eléctrico a la plataforma base del equipo. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.3. Apertado del soporte vertical para la barra de carga a la
plataforma base del equipo. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.4. Ensamble realizado entre la barra de carga y el pasador con su
respectivo reten. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.5. Apertado del soporte vertical para el porta cojinete a la
plataforma base del equipo. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.6. Pasador colocado al porta cojinete y soporte vertical. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.7. Reten colocado al pasador del porta cojinete y soporte vertical. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.8. Apertado realizado a las chumaceras a la plataforma base del
equipo. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.9. Eje acoplado al motor eléctrico. **¡Error! Marcador no definido.**

- Figura C1.10. Ajuste del prisionero del eje del equipo al motor eléctrico. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.11. Ajuste de los prisioneros de la chumacera al eje del equipo. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.12. Interruptor eléctrico colocado al equipo. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.13. Desalojo del tapón de aceite de la chumacera. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.14. Fotografía del llenado de aceite realizado a la chumacera. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.15. Ajuste de la guía de pesas a la barra de carga. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura C1.16. Fotografía del equipo de desgaste ya ensamblado. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura E2.3. Representativo de las reacciones generadas en la barra de carga. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura E2.4. Representativo del diagrama de fuerza cortante y momento flector generado en la barra de carga. **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura E3.1. Representativo de las reacciones producidas en el eje de transmisión de potencia..... **¡Error! Marcador no definido.**
- Figura E3.2. Representativo de la fuerza cortante y momento flector producido en el eje de transmisión de potencia. **¡Error! Marcador no definido.**

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1. Condición para las pruebas de desgaste en cojinete de contacto deslizante de 40 mm y espesor 1,5 mm. Lubricante aceite mineral 20 W-50.....	86
Tabla 3.2. Condición para las pruebas de desgaste en muestra de aluminio. Lubricante aceite mineral 20 W-50.....	86
Tabla 4.1. Materiales seleccionados para el diseño y fabricación de los elementos constitutivos del equipo para el estudio del desgaste.....	90
Tabla 4.2. Especificaciones técnicas del motor empleado en el equipo para el estudio del desgaste.....	91
Tabla 4.3. Fuerzas tangenciales en cada disco de desgaste.....	92
Tabla 4.4. Fuerzas normales de frenado (F_n) correspondientes a cada disco de desgaste.	92
Tabla 4.5. Reacciones en el sistema de transmisión de carga.....	95
Tabla 4.6. Relación de carga en el banco de pesas y la zona de colocación de cojinetes o muestras de metal.....	95
Tabla 4.7. Reacciones en el eje de transmisión de potencia del equipo.....	98
Tabla 4.8. Diámetro de los discos de desgaste que deben utilizarse en el equipo según el diámetro de cojinete de deslizamiento a ensayar.....	101
Tabla 4.9. Ganchos laterales de agarre que deben usarse en función al espesor del cojinete que se va a ensayar.	103
Tabla 4.10. Condiciones de simulación para la modalidad de desgaste conjunto disco-cojinete.	121
Tabla 4.11. Resultados de simulación disco de desgaste N°1 (37 mm).....	126
Tabla 4.12. Resultados del análisis esfuerzo-deformación para los diferentes discos de desgaste.....	127
Tabla 4.13. Condiciones de simulación para la modalidad de desgaste en muestra de metal.....	130
Tabla 4.14. Resultados del análisis esfuerzo-deformación en el modelo.	133

Tabla 4.15. Condiciones de simulación para la plataforma base del equipo.	134
Tabla 4.16. Resultados del análisis esfuerzo-deformación en la plataforma base del equipo.	138
Tabla 4.17. Condiciones de simulación para el análisis de fatiga.....	140
Tabla 4.18. Condiciones de simulación para el análisis de fatiga del eje.....	142
Tabla 4.19. Condiciones de simulación para el análisis de fatiga en la plataforma base del equipo.....	145
Tabla 4.20. Piezas fabricadas, procesos empleados y material de fabricación para la construcción del equipo.....	147
Tabla 4.21. Componentes y piezas prefabricadas adquiridas para el ensamble del equipo.	149
Tabla 4.22. Valores de desalineación en el eje de transmisión de potencia en diferentes puntos.....	153
Tabla 4.23. Pesos de los cojinetes de contacto deslizante antes y después de cada prueba de desgaste.	162
Tabla 4.24. Peso de la muestras de aluminio antes y después de cada ensayo en el equipo.	164
Tabla 4.25. Concentraciones de los elementos encontrados en el lubricante después de realizar los diferentes ensayos en los cojinetes.....	165
Tabla A 3.1. Factor de fricción dinámico (μ_k) utilizado para el cálculo de la fuerza normal de frenado (F_n).....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla A 4.1. Cuña seleccionada en función del diámetro nominal del eje para la transmisión de potencia entre el eje y los discos de desgaste .	¡Error! Marcador no
Tabla A 5.1. Tiempo en servicio u operación seleccionado para cálculo de los rodamientos a utilizar en el equipo.	¡Error! Marcador no definido.
Tabla A 5.2. Ventana de la página SKF que nos muestra el catálogo para la selección de los rodamientos a utilizar en el equipo	¡Error! Marcador no definido.
Tabla A 6.1. Pernos seleccionados para el ajuste de los componentes (motor eléctrico, soportes verticales y rodamientos tipo chumacera) a la plataforma base del equipo.....	¡Error! Marcador no definido.

- Tabla A 6.2. Tuercas hexagonales seleccionadas para el apriete o ajuste de los componentes del equipo (motor eléctrico, soportes verticales, rodamientos tipo chumacera y conjunto eje-disco de desgaste), las dimensiones de la tabla se encuentra en pulgadas;**Error! Marcador no definido.**
- Tabla A 6.3. Arandelas seleccionadas para soportar la carga de apriete generada al ajustar los componentes del equipo, todas las dimensiones de la tabla se encuentra en pulgadas;**Error! Marcador no definido.**
- Tabla E 4.1. Fuerza a la que se encuentran los pernos según el cálculo de reacciones realizado en el sección E.2 y E.3.**Error! Marcador no definido.**
- Tabla E 4.2. Fuerza ejercida en un perno según el cálculo de reacciones realizado anteriormente y consideraciones tomadas;**Error! Marcador no definido.**
- Tabla E 4.3 Factor de seguridad obtenido para los pernos. ...**Error! Marcador no definido.**

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A simple vista dos superficies pulidas pueden verse perfectamente lisas, pero a nivel microscópico incluso hasta las superficies más pulidas presentan irregularidades denominadas rugosidades. Esta condición hace que el esfuerzo producido al poner dos superficies en contacto pueda tener diversos valores que están relacionados con las microáreas que conforman el contacto de las rugosidades presentes en ambas superficies. Por esta razón, es que algunas veces las condiciones operacionales aplicadas en un sistema tribológico, incluso a valores que no pasan los calculados en el diseño, pueden producir niveles de esfuerzos tales que resultan perjudiciales en las piezas en contacto y que acrecientan el fenómeno de desgaste.

Lo anteriormente expuesto, y otros casos de estudios reseñados en la literatura científica, muestran la importancia de la evaluación del desgaste en la práctica de ingeniería, el cual es considerado, uno de los principales fenómenos que limita la vida útil de los componentes mecánicos y que compromete su funcionalidad. Un caso que ejemplifica esto, es el desgaste existente entre el conjunto cojinete y eje de un equipo rotativo, y el cual se debe en la mayoría de los casos, a la inexistencia de la cantidad de aceite lubricante necesaria para separar las microrugosidades que poseen ambas superficies.

Es importante destacar que la verdad sobre el desgaste que ocurre entre los cojinetes y el eje de equipos rotativos (pomotors, compresores, entre otros), aún no está dicha. Por lo que se sugieren técnicas, procedimientos y normas que incluyen diversas pruebas tecnológicas, para determinar el origen del desgaste, los mecanismos presentes y cualquier información que garantice una intervención oportuna del equipo que presenta la falla. En el área de tribología se

ha considerado el análisis de aceite lubricante como una de las técnicas más utilizadas para evaluar el desgaste de máquinas rotativas. Esta consiste básicamente en evaluar características químicas y físicas del aceite usado por una máquina rotativa en un periodo de tiempo dado. La tecnología que se usa mayormente para el estudio del desgaste es la espectrometría, la cual es una técnica que permite determinar la concentración de las partículas metálicas presentes en el lubricante usado. La evaluación del desgaste en un componente de un sistema tribológico, como el conjunto cojinete-eje de un equipo rotativo, mediante el análisis de aceite lubricante usado, presenta su dificultad al tratar de discriminar cuan porcentaje de materia pertenece a este conjunto, ya que se estaría midiendo las cantidades de materia contenida en el aceite que está circulando por dicho equipo y que está recogiendo partículas de todas las piezas contenidas en el mismo. Por esta razón, es que se deben diseñar o construir equipos que permitan simular las condiciones reales de operación de cualquier componente de máquina y mediante el cual se puedan obtener valores cada vez mas aproximados de desgaste en este tipo de componentes.

El Centro de Termofluidodinámica y Mantenimiento (CTYM) ubicado en el Departamento de Mecánica de la Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui, realiza investigaciones sobre el análisis de lubricantes usados, para evaluar el desgaste con fines de diagnóstico y predicción de fallas. Las investigaciones de este centro, están orientadas en: la búsqueda de modelos matemáticos que permitan la evaluación y cuantificación del desgaste de equipos rotativos, el estudio de los mecanismos de desgaste presentes en las etapas inicial, normal y anormal que presenta todo equipo mecánico. En base a estas líneas de investigación de este centro (CTYM) el objetivo de este trabajo de grado es diseñar y construir un equipo compacto, ligero, y versátil que pueda realizar pruebas de desgaste en cojinetes de contacto deslizante de diferentes diámetros (de 40 a 90 mm), así como en pequeñas muestras de metal de características específicas (15 mm de longitud y 10 mm de diámetro, dureza menor a 320HB).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Construir un equipo para el estudio del desgaste en componentes lubricados con movimiento rotativo bajo distintas condiciones de operación.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Diseñar los elementos que componen el equipo para el estudio de desgaste y lubricación.
2. Elaborar los planos donde se especifiquen las distintas dimensiones de los componentes que conforman el equipo.
3. Crear un manual de operación y mantenimiento para el correcto uso del equipo y aprovechamiento máximo de su vida útil.
4. Realizar diferentes pruebas de desgaste y lubricación para la comprobación del correcto funcionamiento del equipo con el fin de que este cumpla los requerimientos para los cuales fue diseñado y construido.

1.3 ALCANCE Y LIMITACIONES

Esta investigación está orientada al diseño y la construcción de un equipo destinado al estudio del desgaste de componentes lubricados con movimiento rotativo, enfocándose principalmente al conjunto eje-cojinete y a la generación de desgaste en muestras de metal de dimensiones específicas (15 mm de longitud x 10 mm de diámetro), todo esto en presencia de aceite lubricante.

Entre las limitantes que siempre existen en cualquier investigación, se encontraron: falta de material bibliográfico y escasa información sobre antecedentes de la investigación, y dificultades en la ubicación a corto plazo de algunos materiales necesarios para la construcción del equipo.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Para el desarrollo de este Trabajo de Grado se han citado algunas literaturas referentes al desgaste producido en los componentes mecánicos de los equipos rotativos; las cuales se mencionan a continuación:

En el año 2001, Barrientos, Jorge [1] construyó una máquina para determinar los diferentes factores que influyen en la contaminación del aceite lubricante usado en función de analizar el fenómeno de tribodesgaste y de validar los modelos de corrección de Espinoza [2]. El equipo construido permitió realizar estudios a diversas velocidades de desgaste, así como determinar el efecto del filtro de aceite, de los añadidos y de las fugas sobre la contaminación del aceite, facilitando de ésta manera el desarrollo y validación de modelos de tribodiagnóstico y fallas en máquinas lubricadas. Para verificar el funcionamiento de la máquina, Barrientos realizó tres tipos de pruebas de contaminación: una a velocidad constante, otra con contaminación normal y otra en condición de desgaste anormal. De las cuales observó respectivamente, que a velocidad constante la concentración no varía con respecto al tiempo, que en presencia de una contaminación normal hay un comportamiento de desgaste lineal con el tiempo y de poco incremento de la concentración, y que existen incrementos pronunciados de contaminación en una condición de desgaste anormal.

En el año 2001, Hernández, Juana [2] realizó pruebas utilizando la máquina para el estudio de desgaste construida por Barrientos [1]. Estos ensayos estaban enfocados en el estudio de la condición de lubricación inadecuada, reduciendo el flujo de aceite con que lubricaban las probetas de desgaste, también se desalinearon las superficies de contactos de las probetas. Se utilizó la técnica de

espectrometría de emisión atómica para realizar el análisis del aceite lubricante usado en los diferentes ensayos. Concluyendo que en presencia de una condición de lubricación inadecuada se produce un aumento de la velocidad de contaminación del aceite, en comparación con una condición de lubricación adecuada, y que en un proceso de condición de desalineación, la velocidad de desgaste puede ser menor debido a la reducción del área de contacto, siempre que no se produzca dentro de ese proceso una condición de lubricación inadecuada.

En el año 2003, Rojas, Patricia [3] realizó ensayos de desgastes en cojinetes de bancadas y biela de motores diesel utilizando el equipo de tribodesgaste construido por Barrientos [1]. Las pruebas fueron realizadas modificando distintos parámetros, como: la falta de lubricación y la desalineación de los componentes en estudio. Se utilizó la técnica de espectrometría de emisión atómica para analizar el lubricante usado en los diferentes ensayos y se verificó entre otras cosas que condiciones como la carga y disminución del flujo lubricante propician el deterioro del lubricante a través de un aumento de la velocidad de desgaste.

En el año 2006, Ukonsaari, Jan y Kassfeldt, Elisabet [4] estudiaron el efecto del uso de un lubricante sintético de éter (polyol) en la fricción y desgaste de un cojinete liso que oscila contra un eje de acero templado bajo condiciones cargas medias y pesadas. Las cargas utilizadas fueron 15, 30 y 50 MPa y los cojinetes fueron lubricados en un baño de aceite a una temperatura constante de 12-15 °C. El dispositivo para prueba, consta de dos mitades de cojinete que se presionan contra un eje de rotación, y que tienen en cuenta la velocidad, la carga, la fricción, el desplazamiento entre las cáscaras del cojinete liso y la temperatura. Una vez realizado los diferentes ensayos se encontró entre otras cosas que para el buen funcionamiento del lubricante sintético, la presión media del cojinete debe estar alrededor de 15 MPa, que los valores de la fricción aumentaron para el lubricante sintético cuando el conjunto fue sometido a las máximas cargas y que las aleaciones de cobre que contienen cantidades bajas de elementos aleantes,

proporcionaron una mejor resistencia de desgaste en contactos tribológicos al usar este lubricante sintético.

Los trabajos realizados por Barrientos, Hernández, Rojas, Ukonsaari y Kassfeldt servirán de ayuda para lograr el diseño y construcción de un equipo donde se puedan realizar ensayos en cojinetes de contacto deslizante de dimensiones específicas, variando la carga y lubricación a la que se encontraran sometidos durante el tiempo de estudio. Luego por medio de un análisis de espectrometría analizar la concentración de partículas metálicas presentes en el lubricante usado.

2.2 FUNDAMENTOS DE DISEÑO MECÁNICO

La siguiente sección recoge aspectos de carácter teórico que fueron necesarios para el diseño y la construcción del equipo para el estudio del desgaste en componentes lubricados, así como la realización de las diferentes pruebas o ensayos.

2.2.1 Esfuerzos en elementos mecánicos

En general, el esfuerzo es la carga por unidad de área o intensidad de las fuerzas distribuidas sobre una sección dada, se designa por la letra griega *sigma* (σ) y se obtiene dividiendo la magnitud P de la carga aplicada sobre el área A , tal como se muestra en la Ec. (2.1) [5]:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Donde:

P = Carga aplicada (N) (lbf)

A = Área (m^2) ($pulg^2$)

σ = Esfuerzo (Pa) (psi)

2.2.1.1 Esfuerzo normal

El esfuerzo se considera normal cuando un elemento es sometido a una fuerza o carga axial, la cual actúa a lo largo de su eje principal.

Este tipo de esfuerzo puede ser a *tensión*, el cual resulta cuando la dirección de la fuerza aplicada es saliente de la superficie. También puede ser a *compresión*, el cual resulta cuando la dirección de la fuerza es entrante a la superficie [5].

En la Fig. 2.1 se muestra en ejemplo del esfuerzo normal.

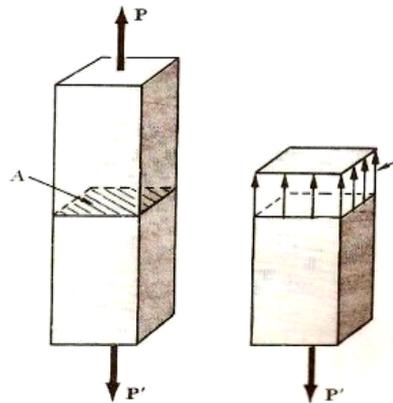


Figura 2.1. Elemento sometido a carga axial [5].

2.2.1.2 Esfuerzo flexionante

El esfuerzo flexionante ocurre cuando la acción de una o más fuerzas aplicadas en un elemento inducen a la aparición de esfuerzos compresivos en una parte del elemento, y esfuerzos a tensión en la parte opuesta del mismo elemento.

En la Fig. 2.2 se puede observar como un momento M aplicado en los extremos del elemento AB tiende a producir una flexión en el mismo, provocando así que la parte superior se encuentre sometida a esfuerzos compresivos y la parte inferior u opuesta del elemento este sometido a esfuerzos tensores [5].

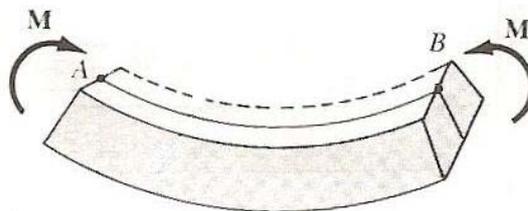


Figura 2.2. Elemento AB sometido a esfuerzo flexionante debido al par M [5].

El esfuerzo flexionante se define a través de la Ec. (2.2).

$$\sigma_m = \frac{Mc}{I} \quad (2.2)$$

Donde:

M = Momento originado por la carga (N·m) (lb.pulg)

c = Distancia de la superficie neutra hasta las fibras más alejadas (m) (pulg)

I = Momento de inercia del solido o segundo momento de la sección transversal con respecto al eje centroidal perpendicular al plano del par M (m⁴) (pulg⁴)

σ_m = Esfuerzo flexionante (Pa)

2.2.1.3 Esfuerzo cortante

El esfuerzo cortante es el esfuerzo interno o resultante de las tensiones paralelas a la sección transversal de un elemento, causado por la acción de una fuerza que actúa tangencialmente a la superficie de la sección como si tratase de deslizar esta sección respecto de una muy próxima, separándola o cortándola.

En la Fig. 2.3, la carga P tiene una dirección perpendicular a la superficie del elemento AB produciendo de esta forma, el seccionamiento del elemento en el punto C . Deben existir fuerzas internas en el plano de la sección (plano de corte) donde la resultante de estas fuerzas es igual a la carga P . Estas fuerzas internas son las llamadas fuerzas cortantes.

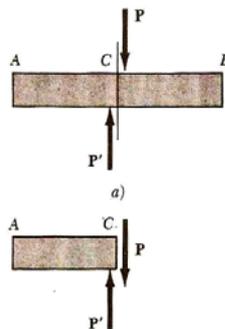


Figura 2.3. Elemento sometido a esfuerzo cortante [5].

El esfuerzo cortante se designa con la letra griega *tau* (τ) y se obtiene dividiendo la fuerza cortante P entre el área A de la sección transversal del elemento como se muestra en la Ec. (2.3) [5]:

$$\tau = \frac{P}{A} \quad (2.3)$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante (Pa) (psi)

P = Carga aplicada (N) (lb)

A = Área (m^2) ($pulg^2$)

2.2.1.4 Esfuerzo de aplastamiento

Un esfuerzo normal producido por la compresión de una superficie contra otra se denomina *esfuerzo de aplastamiento*. Si este esfuerzo es demasiado grande, puede aplastar o deformar localmente una o ambas superficies en contacto. Comúnmente tanto pernos como pasadores y remaches crean esfuerzos en los elementos que conectan, producto de la fuerza que los aplasta contra esta superficie, la cual es conocida como *superficie de aplastamiento*. En la Fig. 2.4 se muestra la fuerza P que ejerce el remache CD sobre el elemento A , igual y opuesta a la fuerza F que ejerce el elemento A sobre el remache CD .

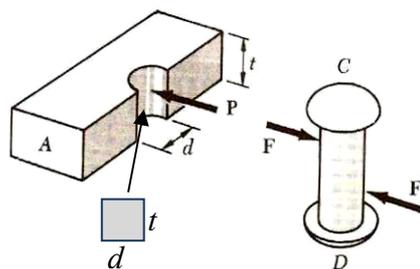


Figura 2.4. Fuerzas y/o reacciones que se generan en el área de aplastamiento td [5].

La fuerza P es la resultante de la fuerza distribuida en la superficie interior de un semicilindro de diámetro d y longitud t igual al espesor del elemento A . El valor de esfuerzo de aplastamiento se obtiene por la Ec. (2.4), dividiendo la carga P por el área proyectada del remache CD en el elemento A . Esta área es igual a td [5].

$$\sigma_b = \frac{P}{A} = \frac{P}{td} \quad (2.4)$$

Donde:

σ_b = Esfuerzo de aplastamiento (Pa) (psi)

A = Área (m^2) ($pulg^2$)

t = Espesor del elemento A (m) (pulg)

d = Diámetro del semicilindro en el elemento A (m) (pulg)

2.2.2 Deformación en elementos mecánicos

Comúnmente los elementos mecánicos están sometidos a deformaciones, las cuales son relevantes en los cálculos propios del equipo diseñado. A continuación se presentan los diferentes tipos de deformación, a los que se encuentran propensos los elementos mecánicos.

2.2.2.1 Deformación normal

La deformación normal es el alargamiento por unidad de longitud en un elemento, que se encuentra sometido a una carga P , que actúa perpendicular a su área transversal y que ocasiona una traslación de la sección transversal del mismo. En la Fig. 2.5 se observa la diferencia entre la barra CB antes y después de la aplicación de la carga P , esta diferencia se designa con la letra δ (*delta*) y representa el alargamiento de la barra.

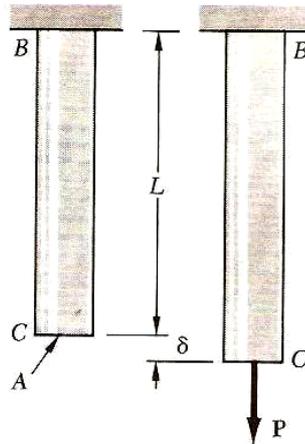


Figura 2.5. Diferencia (δ) en la barra BC tras ser sometida a una carga axial P [5].

La relación entre el alargamiento (δ) sufrido por la barra y la longitud inicial (L) de la misma, se define como deformación normal y se designa con la letra ϵ (*épsilon*); la cual matemáticamente se calcula usando la Ec. (2.5) [5]:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.5)$$

Donde:

ϵ = Deformación normal

δ = Alargamiento (m) (pulg)

L = Longitud del elemento (m) (pulg)

2.2.2.2 Deformación por torsión

Esta deformación se presenta cuando a un eje circular se le aplica un momento o par de torsión, generando una rotación de su sección transversal, tal como se observa en la Fig. 2.6.

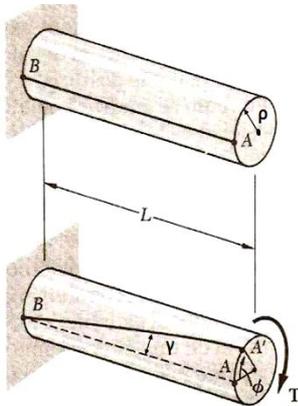


Figura 2.6. Deformación por torsión ocasionada, por la acción de un par de torsión T en el extremo libre de un eje circular [5].

El eje circular mostrado se encuentra unido a un soporte fijo en uno de sus extremos. Si se le aplica un torque T en el otro extremo este queda sometido a torsión y su extremo libre rota un determinado ángulo llamado ángulo de torsión ϕ (*phi*), el cual es proporcional al torque T y a la longitud L .

Una manera de calcular el ángulo de torsión (ϕ) es por medio del ángulo de deformaciones cortantes γ (*gamma*), usando la Ec. (2.6), donde ρ es el radio de la sección transversal del eje [5]:

$$\phi = \frac{\gamma L}{\rho} \quad (2.6)$$

Donde:

ϕ = Angulo de torsión (°)

γ = Angulo de deformaciones cortante (°)

L = Longitud (m) (pulg)

ρ = Radio de la sección transversal (m) (pulg)

2.2.3 Deformación plástica y elástica

Las deformaciones se pueden clasificar en deformaciones elásticas y deformaciones plásticas, dependiendo de la carga a la que es sometido un determinado elemento y las propiedades mecánicas que este posee [6].

2.2.3.1 Deformación plástica

La deformación se dice que es plástica si por ejemplo una pieza de metal se somete a una fuerza de tracción uniaxial y al eliminar la fuerza actuante, la pieza no recupera sus dimensiones originales, donde a nivel atómico los átomos del metal se desplazan permanentemente desde sus posiciones iniciales hasta nuevas posiciones [6].

2.2.3.2 Deformación elástica

La deformación se dice que es elástica si por ejemplo una pieza de metal se somete a una fuerza de tracción uniaxial y al eliminar la fuerza actuante la pieza recupera sus dimensiones originales, donde a nivel atómico los átomos del metal se desplazan de sus posiciones originales pero sin llegar a alcanzar nuevas posiciones [6].

2.2.3.2.1 Modulo de elasticidad

Físicamente, el modulo de elasticidad representa, la rigidez (resistencia a la deformación) del material cuando es sometido a una carga. El valor del modulo de elasticidad es una propiedad bien definida de cada material y el cual se designa con la letra E y se calcula con la Ec. (2.7) [6]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.7)$$

Donde:

σ = Representa el esfuerzo (Pa) (lb/pulg²)

ε = Representa la deformación

E = Es la constante del modulo de elasticidad (Pa) (psi)

2.2.3.2.2 Límite elástico

El límite elástico es aquella tensión a la que se produce una deformación plástica definida. En muchas ocasiones se determina el límite elástico cuando se produce una deformación del 0,2 %, el cual gráficamente se obtiene trazando una línea paralela a la zona elástica (lineal) del diagrama convencional (Ver Fig. 2.7) a una deformación de 0,002 m/m, luego se traza una línea horizontal desde el punto de intersección entre la línea anterior y la parte superior de la curva tensión-deformación hasta que alcance el eje de las tensiones tal como se muestra en la Fig. 2.7 [6].

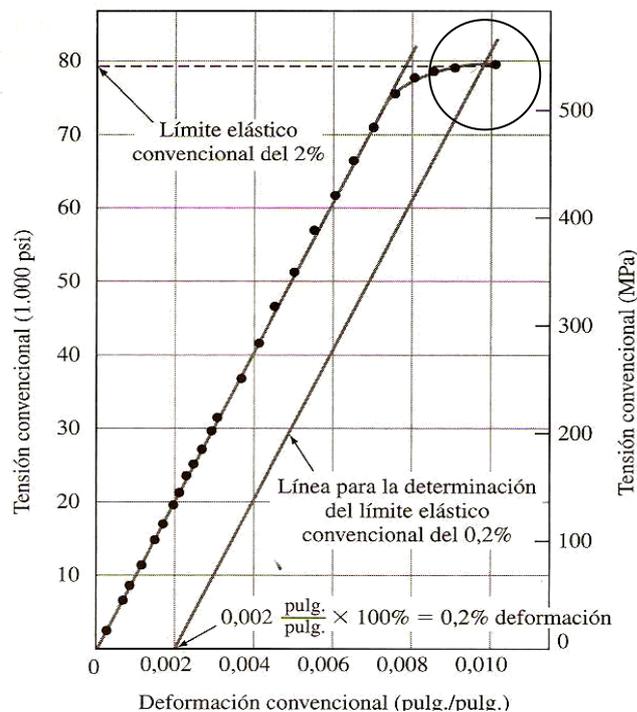


Figura 2.7. Diagrama tensión-deformación, que muestra la intersección de la curva con la línea paralela a la zona elástica [6].

2.2.4 Fatiga de metales

La fatiga en metales es un fenómeno que conduce a la fractura de un metal sometido a tensiones fluctuantes con un valor máximo de tensión, inferior a la resistencia a la tracción del metal. El fallo por fatiga es común en componentes de máquinas como ejes de transmisión de movimiento, bielas y engranajes, y se

origina en un punto de concentración de tensiones como lo es un extremo afilado, una entalla, una inclusión o un defecto.

En la Fig. 2.8 se muestra una curva Tensión vs Número de ciclos (curvas S-N) correspondiente a un fallo por fatiga de una aleación de aluminio 2014 y un acero de medio carbono 1047 [6].

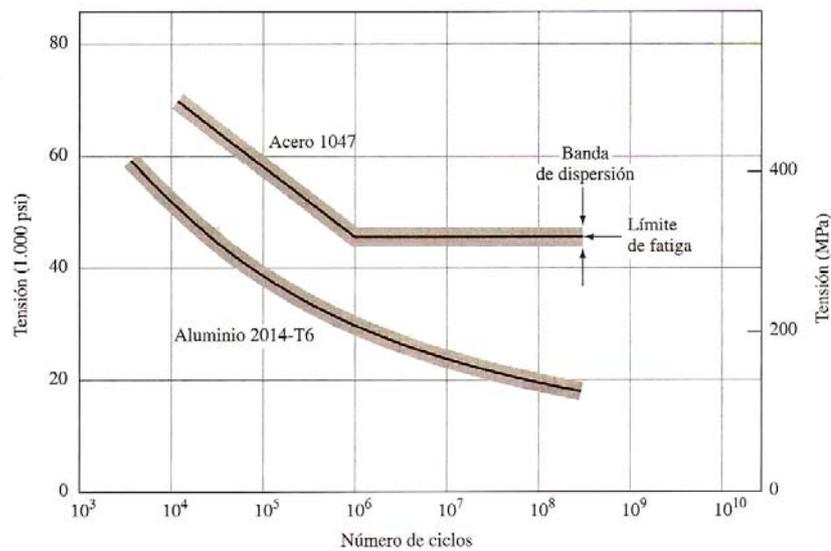


Figura 2.8. Curvas S-N correspondiente a la fatiga del Acero 1047 y el Aluminio 2014-T6 [6].

Los métodos de análisis de fatiga más utilizados para el diseño de componentes mecánicos son el de Goodman y Soderberg. Estos métodos definen la relación más relevante entre los esfuerzos aplicados a un componente y la resistencia del material con que se va a fabricar, para así obtener un N que garantice la seguridad del componente a diseñar.

El criterio de Soderberg utilizado para el análisis de la resistencia de piezas sometidas a tensiones fluctuantes con componente de tensión media positiva,

establece que la pieza resistirá en el punto analizado siempre que se cumpla con lo establecido en la Ec. (2.8):

$$\frac{\sigma_m}{S_y} + \frac{\sigma_a}{S_e} \leq 1 \quad (2.8)$$

Donde:

σ_m = Esfuerzo medio (Pa) (psi)

σ_a = Esfuerzo alternante (Pa) (psi)

S_y = Fluencia del material (Pa) (psi)

S_e = Resistencia real estimada del material (Pa) (psi)

Gráficamente el criterio se representa por una línea recta en el gráfico de tensión media frente a tensión alternante, denominada línea de Soderberg, que indica la frontera del fallo. Cualquier punto con una combinación de tensiones media y alternante a la izquierda de la línea resistirá, mientras que uno a la derecha de la línea fallará según este criterio, tal como se muestra en la Fig. 2.9 [7].

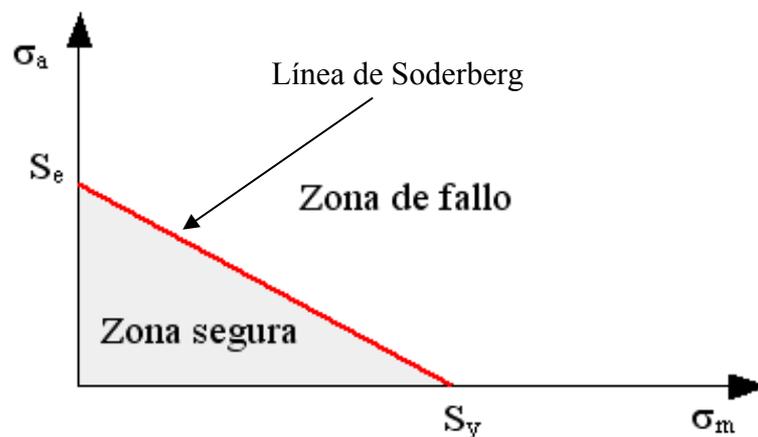


Figura 2.9. Zona segura y zona de fallo según el criterio de Soderberg

2.2.5 Criterio de falla de Von Mises

Se basa en el cálculo de la energía de distorsión en un material dado, es decir, de la energía asociada con cambios en la forma del material. De acuerdo con este criterio, también conocido como el Criterio de Von Mises, debido al matemático germano-americano, Richard Von Mises (1883-1953), un componente estructural dado es seguro siempre que el valor máximo de la energía de distorsión por unidad de volumen en ese material permanezca por debajo de la energía de distorsión por unidad de volumen requerida para hacer fluir una probeta del mismo material sometida a tensión.

En la Ec. (2.9), se muestra la energía de distorsión por unidad de volumen, en un material isotrópico bajo esfuerzo plano:

$$Ud = \frac{1}{6G} (\sigma_a^2 - \sigma_a \sigma_b - \sigma_b^2) \quad (2.9)$$

Donde:

σ_a y σ_b = Son los esfuerzos principales (Pa) (psi)

G = Es el modulo de rigidez del material (Pa) (psi)

Ud = Energía de distorsión (Pa) (psi)

En el caso particular de una probeta de tensión que empieza a fluir, se tiene esfuerzo $\sigma_a = \sigma_y$, $\sigma_b = 0$, y $(Ud)_y = \sigma_y^2 / 6G$. Así el criterio de la máxima energía de distorsión indica que el componente estructural es seguro siempre que $Ud < (Ud)_y$, o se cumpla lo expresado en la Ec. (2.10):

$$(\sigma_a^2 - \sigma_a \sigma_b - \sigma_b^2) < \sigma_y^2 \quad (2.10)$$

Es decir, siempre que el punto de coordenadas σ_a y σ_b se encuentre dentro del área mostrada en la Fig. 2.10, la cual interseca los ejes coordenados en $\sigma_a = \pm \sigma_y$ y $\sigma_b = \pm \sigma_y$ [5].

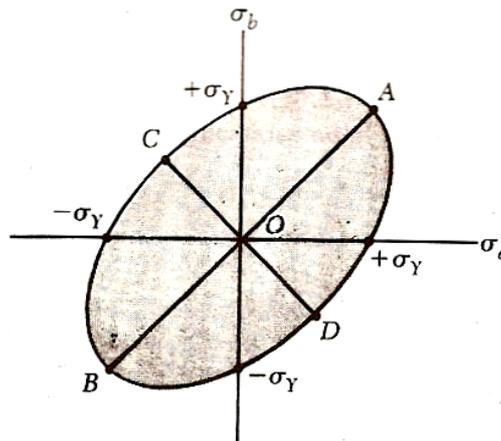


Figura 2.10. Área de elipse que indica la zona segura para el diseño de un componente estructural según el criterio de Von Mises [5].

2.2.6 Factor de seguridad

Un elemento estructural o componente de máquina debe diseñarse de modo que su *carga o esfuerzo último* sea mayor que la *carga o esfuerzo* que la estructura o componente llevará en condiciones normales de uso, la cual se denomina *carga admisible* y, a veces la *carga de trabajo* o de *diseño*; así solo se utiliza una fracción de la carga última del elemento cuando se aplica la carga admisible. Por lo que la restante capacidad de carga que puede soportar el elemento se deja en reserva para garantizar un diseño seguro. La relación entre la carga última y la carga admisible se define como *factor de seguridad* y se muestra por la Ec. (2.11):

$$\text{Factor de seguridad} = F.S = \frac{\text{carga ultima}}{\text{carga admisible}} \quad (2.11)$$

En muchas aplicaciones existe una relación lineal entre la carga y el esfuerzo generado por la misma. Cuando tal es el caso el factor de seguridad queda representado por la Ec. (2.12) [5]:

$$\text{Factor de seguridad} = F.S = \frac{\text{Esfuerzo ultimo}}{\text{Esfuerzo admisible}} \quad (2.12)$$

2.2.7 Elementos mecánicos

A continuación se muestra información de los principales elementos mecánicos utilizados en la construcción del equipo para el estudio del desgaste, estos elementos constituyen uno de los aspectos fundamentales en cualquier sistema o máquina por más sencilla que esta sea.

2.2.7.1 Vigas

Una viga se considera un elemento mecánico donde su longitud es mucho mayor que su sección transversal y está sujeto a cargas aplicadas en forma normal a su eje longitudinal. Las vigas se clasifican con respecto al tipo de apoyo aplicado a las mismas, de forma siguiente:

- *Viga simple con extremos acoplados con pasadores:* en esta configuración (ver Fig. 2.11a), se permite la rotación de los extremos pero la traslación se restringe de tal modo que se desarrollan reacciones verticales y horizontales.
- *Viga simple con rodillos:* en esta configuración (ver Fig. 2.11b), se permite la rotación de los extremos y solo se desarrollan reacciones verticales.
- *Viga simple con parte volada:* en esta configuración (ver Fig. 2.11c), la viga sobresale de los apoyos en uno de los extremos o en ambos.
- *Viga continua:* en esta configuración (ver Fig. 2.11d), se presenta una viga que tiene más de dos apoyos simples.

En la Fig. 2.11 se muestran diagramas de las vigas antes mencionadas, donde P representa las cargas a las cuales están sometidos los elementos [8].

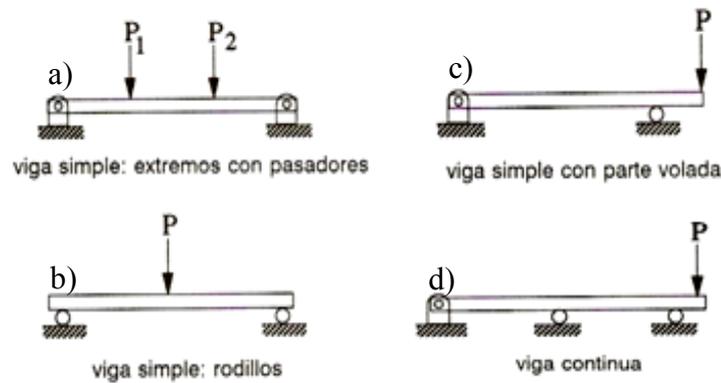


Figura 2.11. Diferentes tipos de vigas [8].

2.2.7.2 Sujetadores mecánicos

Se llama sujetador mecánico a un elemento que permite la unión entre dos o más piezas y/o componentes de un sistema.

La selección correcta de los sujetadores van en función de una serie de aspectos tales como: las piezas que se están uniendo, las limitaciones de espacio, las cargas severas de operación que incluyen cargas estáticas, cíclicas e inducidas térmicamente, y las necesidades de montaje y mantenimiento. Los sujetadores se clasifican de acuerdo al esfuerzo al cual se encuentran sometidos, si este es a tensión se llama sujetador roscado o si el esfuerzo es a cortante el sujetador se denomina pasador [8].

2.2.7.2.1 Sujetadores roscados

Los sujetadores roscados incluyen los tornillos, pernos y espárragos. Los aspectos de las roscas que deberían considerarse en el diseño o selección de sujetadores roscados son las siguientes:

- *Paso de la rosca:* es la distancia entre formas de roscas adyacentes
- *Diámetro de paso:* diámetro de una línea imaginaria trazada a través del perfil de la rosca en tal forma que el ancho del diente de esta y el de la ranura sean iguales.

- *Diámetro mayor:* es el diámetro mayor de la rosca en el perno.
- *Diámetro menor:* es diámetro menor de la rosca o diámetro interno.

En la Fig. 2.12 se muestran las partes principales de la rosca antes mencionadas para un sujetador roscado [8].

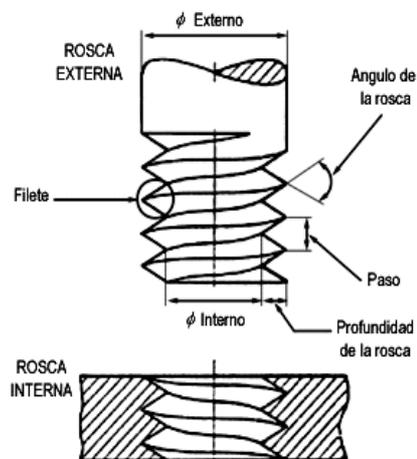


Figura 2.12. Partes principales de una rosca [8].

2.2.7.2.2 Pasadores

Un pasador es un sujetador mecánico sencillo para situaciones en donde la unión esta principalmente cargada con esfuerzo cortante. Los pasadores se clasifican en: pasadores semipermanentes y pasadores de extracción rápida.

Los pasadores semipermanentes incluyen los pasadores estándar para máquinas, los cuales se agrupan en cuatro categorías: espiga, cuña, horquilla y clavija hendida. En general, estos pasadores no deben alinearse de modo que la dirección de las carga de vibración sea paralela de los ejes de los mismos. Así mismo, el plano del esfuerzo no debe encontrarse a más de un diámetro del extremo del pasador. En la Fig. 2.13 se muestran algunos ejemplos de pernos utilizados en ingeniería [8].

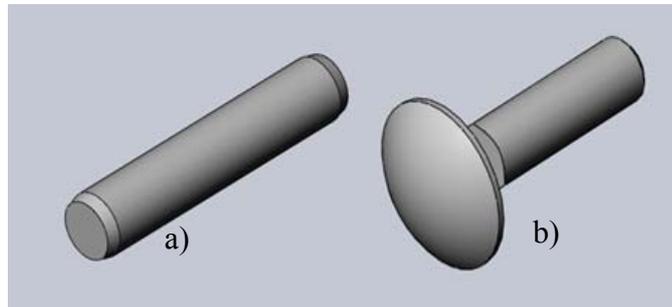


Figura 2.13. Representación de pasadores. a) Pasador liso y b) pasador con cabeza.

2.2.7.3 Ejes de transmisión de potencia

Un eje es un elemento destinado a guiar el movimiento de rotación a una pieza o conjunto de piezas, como una rueda o un engranaje. Los ejes frecuentemente están acoplados a rodamientos donde el diámetro interior del rodamiento y el diámetro exterior del eje presentan una cierta tolerancia para su ajuste. Una de las formas más comunes de lograr la transmisión de potencia entre un eje y un determinado componente es por medio de un conjunto ranura-chaveta [9].

2.2.7.4 Cojinetes

Los cojinetes son elementos mecánicos que permiten el giro entre piezas fijas y móviles y se utilizan comúnmente en maquinarias como puntos de apoyo de ejes para sostener su peso y guiarlos en su rotación [9].

2.2.7.4.1 Clasificación de los cojinetes

Los cojinetes se clasifican en: cojinetes de contacto deslizante y cojinetes de contacto rodante. En los cojinetes de contacto deslizante, el eje gira sobre el cojinete por medio de un deslizamiento entre ambos. En cambio en los cojinetes de contacto rodante no existe deslizamiento con respecto al eje, sino lo que hay es un contacto de rodadura, que se logra a traves de esferas, conos o rodillos [9].

A continuación en las Figs. 2.14 y 2.15 respectivamente se muestran las partes de un cojinete de contacto deslizante y de contacto rodante.

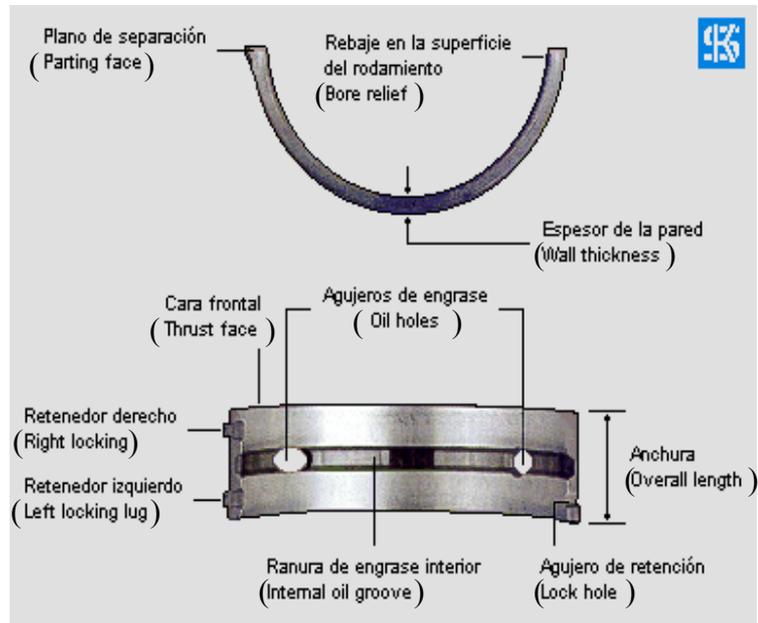


Figura 2.14. Partes de un cojinete de contacto deslizante [9].

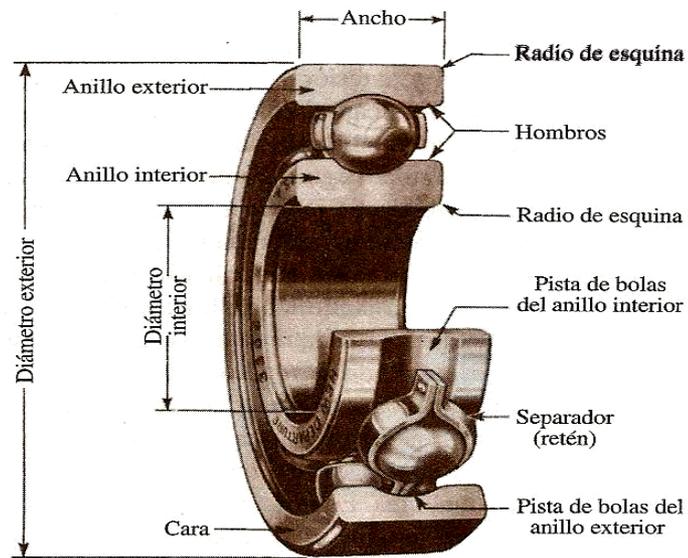


Figura 2.15 Partes de un cojinete de contacto rodante [9].

2.3 DISEÑO Y SIMULACIÓN COMPUTARIZADA DE ELEMENTOS MECÁNICOS UTILIZANDO EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

El diseño de elementos mecánicos a través de herramientas computarizadas ha permitido un gran desarrollo en el campo de la ingeniería, ya que permite en muchos casos lograr una predicción del comportamiento que puede tener una pieza o elemento mecánico en un determinado escenario y bajo ciertas condiciones de operación. Otra de las grandes ventajas que presenta el diseño de piezas mecánicas utilizando software y/o herramientas computacionales es la facilidad y rapidez a la hora de realizar cálculos complejos de ingeniería, lo cual juega un papel fundamental en el campo del diseño.

2.3.2 Método de elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en la solución de diversos problemas de ingeniería y física.

El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) sobre el que están definidas ciertas ecuaciones integrales que caracterizan el comportamiento físico del problema, en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados *elementos finitos*.

Este conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio denominada *discretización*. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados *nodos*. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se denomina *malla* [8].

2.3.2.1 Principio de operación del MEF para elementos estructurales

Previo al análisis de un elemento o sólido utilizando el MEF, se debe construir una malla, la cual se utiliza para contener las propiedades del material y la geometría del elemento, y así poder estudiar el comportamiento del mismo bajo ciertas condiciones de carga. A los nodos que conforman la malla se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de tensión (esfuerzo) anticipado en un área. Las regiones que recibirán gran cantidad de tensión (esfuerzo) tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimentan poco o ninguno. Los puntos de interés consisten en: puntos de fractura previamente testeados del material, entrantes, esquinas, detalles complejos, y áreas de elevada tensión (esfuerzo). La malla actúa como la red de una araña en la que desde cada nodo se extiende un elemento de malla a cada nodo adyacente. Este tipo de red vectorial es la que lleva las propiedades del material al objeto, creando varios elementos [8].

2.3.2.2 Tipos de análisis con el MEF para elementos sólidos

A continuación se explica de manera detallada los diferentes análisis con el MEF que pueden ser realizados a los sólidos [8]:

- *Análisis estructural*, comprende modelos lineales y no lineales. Los modelos lineales usan simples parámetros y asumen que el material no es deformado plásticamente. Los modelos no lineales consisten en tensionar el material más allá de sus capacidades elásticas. La tensión en el material varía con la cantidad de deformación.
- *Análisis vibracional*, es usado para testar el material contra vibraciones aleatorias, choques e impactos. Cada uno de estos incidentes puede actuar en la frecuencia natural del material, que en cambio, puede causar resonancia y el consecuente fallo.
- *Análisis de fatiga*, ayuda a los diseñadores a predecir la vida del material o de la estructura, mostrando el efecto de los ciclos de carga sobre el espécimen.

Este análisis puede mostrar las áreas donde la propagación de la grieta es más posible que ocurra. El fallo por fatiga puede también enseñar la tolerancia al fallo del material.

2.3.3 Software comercial usado para el diseño de componentes mecánicos y simulación por MEF

Entre los software para el diseño y simulación por elementos finitos se tiene, SolidWorks (Cosmos Works), Ansys, Algor, FEAP, Catia V5, CAELinux, Phase2, entre otros.

El software de automatización de diseño mecánico SolidWorks, es una herramienta de diseño de modelado sólido paramétrica, basada en operaciones que saca provecho a la facilidad de aprendizaje de la interfaz gráfica del usuario de Windows. Puede crear modelos sólidos en 3D totalmente asociativos con o sin restricciones al tiempo que utiliza las relaciones automáticas o definidas por el usuario para capturar la intención del diseño.

El programa permite modelar piezas, conjuntos, y extraer de ellos tanto planos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasladar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Además, a través de la aplicación CosmoWorks se pueden realizar simulaciones de esfuerzo, fatiga, vibración, temperatura, entre otras, a elementos o piezas a través del MEF [10].

2.4 MANUFACTURA DE ELEMENTOS MECÁNICOS

Los procesos de manufactura o producción, son un conjunto de operaciones necesarias para modificar las características de la materia prima. Dichas características pueden ser de naturaleza muy variada tales como: la forma, la resistencia, el tamaño o la estética. Los procesos de manufactura con la llegada de

las nuevas tecnologías son cada vez más precisos y exactos, gracias a la ayuda computarizada, sin embargo la base fundamental de estos procesos sigue siendo la misma. A continuación se definen algunos de los procesos básicos de mecanizado por arranque de viruta y corte de materiales.

2.4.1 Torneado

Es un proceso de mecanizado que consiste en el desprendimiento de material o viruta por medio de un filo o herramienta, la cual posee dos movimientos principales, en el primero, avanza de forma transversal al eje longitudinal de la pieza para así producir una penetración en la misma, en el segundo movimiento puede avanzar de forma paralela al eje longitudinal de la pieza, arrancando o removiendo material a lo largo de la misma, bien sea las especificaciones o el acabado que se le quiera dar, todo esto se efectúa mientras la pieza a mecanizar gira a una velocidad angular específica, accionadas por el torno [11].

2.4.2 Taladrado

El taladrado se realiza por lo general con una herramienta cilíndrica rotatoria, conocida como broca, la cual posee dos bordes cortantes en sus extremos y se hace incidir sobre el material de forma perpendicular perforando a este y produciendo el agujero deseado [11].

2.4.3 Cepillado y Planeado

Es un proceso de mecanizado con desprendimiento de viruta en donde el movimiento de corte realizado por la herramienta es un movimiento alternativo y paralelo a la superficie que se desea mecanizar. Se pueden mecanizar superficies planas, horizontales, verticales o en ángulo y pueden arreglarse para mecanizar superficies curvadas y ranuras [11].

2.4.4 Fresado

Es un proceso de mecanizado en donde se produce arranque de viruta por acción de una herramienta rotativa muy filosa y que incide en la pieza de trabajo bien sea

perpendicularmente o lateralmente; dependiendo de la herramienta de corte a usar las cuales se denominan *fresas*. Casi todas las superficies planas o curvadas, interiores o exteriores de casi todas las formas y tamaños pueden maquinarse, por este método. Durante este proceso la pieza de trabajo puede alimentarse hacia la herramienta de corte o pudiera darse el caso contrario que la herramienta de corte se alimente hacia la pieza de trabajo [11].

2.4.5 Brochado

El brochado es un proceso en el cual una herramienta larga de puntas múltiples se hace penetrar en un agujero o pasar sobre la superficie de la pieza de trabajo. La brocha tiene una serie de dientes consecutivos, y la altura de cada hilera aumenta en forma progresiva. La altura variable de los dientes de la brochadora permite remover el material con la profundidad deseada de corte. El brochado se utiliza para producir superficies internas y externas, planas e irregulares. Este proceso es utilizado en la mayoría de los casos para producir ranuras en ejes (chaveteros) [11].

2.4.6 Esmerilado

Es un proceso que por lo general se utiliza para la eliminación de cantidades reducidas de material, se considera un proceso de acabado medio que se realiza previo al pulido [11].

2.4.7 Oxicorte

El oxicorte es un proceso que consiste en el seccionamiento o corte de aceros al carbono por medio de un soplete alimentado con un gas combustible (propano o acetileno) y un gas comburente (oxígeno). El proceso de oxicorte, al contrario de lo que pueda parecer, no consiste en una fusión del metal, el corte se produce por una literal combustión del mismo y un proceso de oxidación del hierro. En otras palabras al cortar quemamos el metal a medida que avanzamos con el soplete [11].

2.5 DESGASTE EN ELEMENTOS MECÁNICOS

El desgaste constituye un campo de estudio fundamental en la ingeniería mecánica, debido a que de este derivan la gran mayoría de las fallas en componentes mecánicos de los equipos rotativos, por lo que está dado a un ámbito de investigación de gran amplitud en función a mejorar la confiabilidad de las máquinas, mediante acciones preventivas y correctivas [12].

2.5.1 Desgaste

El desgaste es una pérdida progresiva de material en la superficie de un cuerpo sólido, producida por sollicitación tribologica (sollicitación de un cuerpo sólido por el contacto y movimiento relativo contra otro cuerpo sólido, gaseoso o líquido). El desgaste se manifiesta en forma de partículas sueltas del desgaste así como también en alteraciones de material y de la forma de la superficie sollicitada tribologicamente. El desgaste es normalmente indeseado, ya que desmejora la funcionalidad de cualquier componente; sin embargo los procesos de ajuste o adaptación son una excepción [12].

2.5.1.1 Desgaste por adhesión

Es la transferencia de partículas metálicas entre las dos superficies frotantes debido a la formación y separación de uniones (atómicas) por adhesión de superficies límites. Implica naturalmente una pérdida de peso y desgaste mayor para el metal más blando cuando aquellas partículas quedan adheridas al metal más duro, pero constituye una pérdida de materia para el conjunto. La adhesión producida se debe al íntimo contacto de las dos piezas por la falta de una película de aceite de suficiente espesor para separarlas. Técnicamente, a este tipo de falla cuando el contacto es cojinete-eje se le denomina “fundida del cojinete” [12].

2.5.1.2 Desgaste por abrasión

Es el efecto de limado que desarrolla la superficie dura sobre otras más blandas, o bien las partículas duras libres existente entre ambas. Este tipo de desgaste es

producido por el trabajo mecánico que las microirregularidades del eje (parte de mayor dureza) realiza sobre el cojinete (parte con menor dureza), donde las partículas duras ubicadas entre las dos superficies de trabajo, se incrustan en una de ellas y realizan deformaciones en la otra logrando un desgaste en uno o en ambos componentes [12].

2.5.1.3 Desgaste por fatiga de superficies

Este tipo de desgaste es producido por la repetición de cargas que acumulan tensiones en las capas superficiales. Estas tensiones producen fisuras que al extenderse terminan por producir el desprendimiento del material. El proceso de fatiga durante el período en que las tensiones son acumuladas en las capas subsuperficiales no produce cambios visibles en el material [12].

2.5.1.4 Reacción triboquímica

Solicitud tribológica que lleva a la reacción del cuerpo base o el cuerpo contrario con el material intermedio y el medio circundante [12].

2.6 ANÁLISIS DE ACEITE LUBRICANTE USADO POR SISTEMAS TRIBOLÓGICOS

El análisis de lubricante consiste en una serie de pruebas de laboratorio que se utilizan para evaluar la condición de sistemas tribológicos en cualquier momento de operación. Con los resultados de este análisis, se puede predecir una condición de desgaste del equipo o de sus componentes, lo cual permite la mejor planificación del mantenimiento [13].

Para el análisis de aceite existen varias tecnologías, entre ellas se destaca la espectrometría de emisión atómica, siendo esta una de las técnicas más utilizadas.

2.6.1 Análisis de lubricante por espectrometría de emisión atómica

Esta técnica se basa en la excitación de las partículas metálicas encontradas en una muestra de aceite por medio de un arco eléctrico lo que ocasiona que cada partícula metálica emita una longitud de onda característica. Dicha longitud de onda es captada por una rejilla de difracción óptica utilizada para separar las longitudes de onda discreta y de donde surgen una serie de rayos con una separación angular que es función de la longitud de onda de la radiación emergente, donde un dispositivo electrónico permite medir la radiación emitida y que será función de la concentración de las partículas metálicas existentes.

Este análisis se lleva a cabo por medio de un espectrómetro de emisión atómica cuyo arco eléctrico es producido por dos electrodos en una cámara de estudio especial y que consta de un electrodo circular (electrodo 1) giratorio sumergido parcialmente en el aceite o lubricante a estudiar y que gira a velocidad constante por la acción de un eje, este electrodo o como se le denomina “*rotrodo*” debido a su forma circular, posee en su superficie porosidades las cuales son útiles para que este al estar en movimiento pueda arrastrar una película del lubricante sobre su diámetro exterior. A una distancia de 3 mm se sitúa el extremo de un electrodo cilíndrico (electrodo 2) y entre ambos electrodos (circular y cilíndrico) se genera una diferencia de potencial produciéndose de esta manera un arco eléctrico, necesario para la quema de la muestra. En la Fig. 2.16 se muestra un espectrómetro de emisión atómica con su respectiva cámara de análisis [13].



Figura 2.16. a) Espectrómetro de Emisión Atómica, **b)** cámara de análisis [13].

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA DEL TRABAJO

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo a los objetivos planteados, el tipo de investigación usada para el desarrollo de este trabajo de grado es aplicada, ya que se generó una propuesta de diseño de un sistema mecánico mediante cálculos y herramientas propias de una ingeniería básica, conceptual y de detalle. Esta propuesta fue desarrollada y posteriormente se construyó un equipo que permitirá estudiar el comportamiento del desgaste en un conjunto cojinete-eje y pequeñas muestras de metal sometidas a diferentes cargas.

3.2 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

Para el cumplimiento de los objetivos establecidos en el capítulo 1 de este informe y propio de esta investigación, a continuación se presentan por etapas todas las actividades que se realizaron y permitieron la construcción del equipo destinado al estudio del desgaste en componentes lubricados con movimiento rotativo. Cada una de las etapas requirió de la búsqueda, recopilación, y revisión de diferentes fuentes bibliográfica como: antecedentes de trabajos similares, textos de diseño de máquinas, textos de lubricación y desgaste, revisión de manuales, revistas, entre otros; con la finalidad de adquirir los conocimientos necesarios para alcanzar cada uno de los objetivos planteados en el desarrollo del presente trabajo de grado.

3.2.1 ETAPA 1. DISEÑO DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN EL EQUIPO PARA EL ESTUDIO DEL DESGASTE Y LUBRICACIÓN

Para el diseño de los elementos que componen el equipo, se desarrollaron las siguientes actividades:

3.2.1.1 Establecimiento de variables y condiciones de operación que debe tener el equipo

Para el desarrollo de esta actividad, se realizaron entrevistas no estructuradas a los tutores y usuarios del equipo y se determinó en forma general las consideraciones técnicas, las limitaciones económicas, y los requisitos de mantenimiento y seguridad que eran necesarias para el inicio del diseño. Estas consideraciones fueron tabuladas y luego de acuerdo a la teoría básica de diseño mecánico, se determinaron los elementos que deberían conformar el equipo.

3.2.1.2 Selección de los materiales propios del diseño y que serán utilizados en la fabricación de piezas

Luego del establecimiento de los parámetros propios del diseño, se seleccionaron los materiales para la fabricación de los componentes, así como también los elementos que deberían ser adquiridos. Para esto se consideró factores como: costos, disponibilidad en tiempo, facilidad de mecanizado y que cumplieran con las exigencias propias del diseño.

En cuanto a los materiales, estos fueron seleccionados de un catalogo digital, disponible en la biblioteca del software Solidworks 2008 (ver Anexo A, Fig. A 1.1, Fig. A 1.2, Fig. A 1.3)

3.2.1.3 Motor eléctrico que será utilizado en el equipo

Será utilizado un motor eléctrico de inducción monofásico el cual esta disponible en el Centro de Termofluidodinámica y Mantenimiento (CTYM) cuyas especificaciones técnicas se encuentran en el Anexo A, Fig. A 2.1.

Una vez conocidas todas las especificaciones técnicas del motor eléctrico, se realizó el cálculo del torque producido por el mismo, este cálculo se inicio con la potencia del motor, la cual fue indicada por el fabricante. El valor del torque se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$T = \frac{\text{Potencia}}{W} \quad (3.1)$$

Donde:

W = Velocidad angular máxima del motor (rad)

T = Torque (N.m) (lbf.m)

Conocido el torque del motor se calculó la fuerza tangencial (Ft) producida en la periferia de cada uno de los discos de desgaste acoplados al mismo, esto con el fin de conocer la fuerza normal (Fn), la cual actúa de manera perpendicular al eje de giro y que es necesaria para frenar el motor. Esta fuerza representa la carga máxima de ensayo para cojinetes y muestras de metal, y se determinó con la siguiente ecuación:

$$F_t = \frac{T}{r} \quad (3.2)$$

Donde:

r = Radio desde el centro de giro del motor hasta la periferia del disco de desgaste (m) (pulg)

Ft = Fuerza tangencial (N) (lbf)

Es importante destacar que para el cálculo de la fuerza normal, se utilizó un coeficiente de fricción dinámico (μ_k) para superficies metálicas lubricadas y se consideró un factor de seguridad de carga (FSC) con la finalidad de no frenar por

completo el motor durante los ensayos. El FSC es determinado de la siguiente manera:

$$F_n = \frac{F_t}{\mu_k} \cdot FSC \quad (3.3)$$

Donde:

μ_k = Coeficiente de fricción dinámica

F_n = Fuerza normal (N) (lbf)

FSC = Factor de seguridad de carga

3.2.1.4 Cálculos de reacciones en el sistema de transmisión de carga del equipo

Uno de los requerimientos para el diseño es que las cargas de ensayo para los cojinetes y muestras de pequeños metales no serán aplicadas directamente sobre ellos. Para esto, al equipo se le diseñó un mecanismo de palanca con la finalidad de convertir pequeños pesos en grandes cargas, para lo cual se realizaron cálculos de momentos y reacciones.

Para estos cálculos se usó el valor de la fuerza normal (F_n) determinada por la Ec. (3.2), con su FSC, esto con el objeto de determinar la fuerza que era necesaria aplicar al mecanismo de palanca.

El cálculo de las reacciones se realizó mediante un análisis estático de vigas, utilizando la Ec. (3.4), y definiendo en qué puntos de la viga se aplicaría.

$$\begin{aligned} \Sigma M &= 0 \quad + \curvearrowright \\ F \times D &= 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Donde F es la fuerza aplicada en un punto de la viga en estudio y D es la distancia que hay desde el punto de aplicación de la fuerza hasta un punto definido que se encuentra a lo largo de la viga.

3.2.1.5 Diseño de la geometría del eje de transmisión de potencia del equipo

En primer lugar fueron calculadas todas las reacciones en el eje de transmisión de potencia, mediante un análisis estático de vigas.

Para el diseño de la geometría del eje se utilizó la herramienta *Fracture Manager* del software *Solidworks 2008*, croquizando en un plano la geometría y posteriormente realizando una “extrusión por revolución de saliente/base” del mismo, para crear un sólido en tres dimensiones. En las Figs. 3.1 y 3.2 se muestran ejemplos de croquizado y extrusión de sólidos, donde el conjunto de líneas de color azul representa el croquis (ver Fig. 3.1) y el cilindro de color amarillo la extrusión (ver Fig. 3.2).

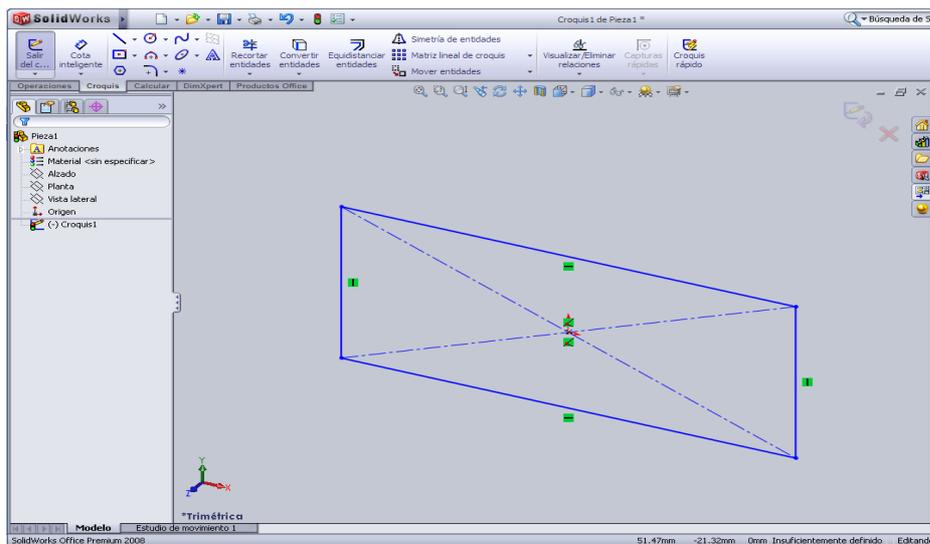


Figura 3.1. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando el croquizado de una geometría.

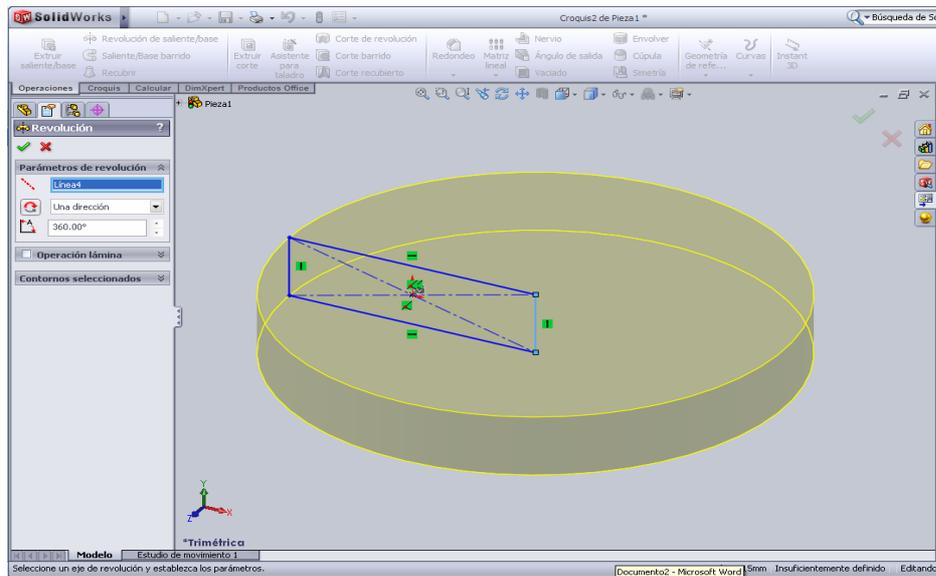


Figura 3.2. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando la extrusión por revolución de saliente/base.

Para el cálculo de las reacciones del eje se determinaron la cantidad de rodamientos que servirían de soporte del mismo, tomando en cuenta la estabilidad del eje con el fin de evitar el pandeo del mismo, así como las condiciones de carga y la velocidad de giro. Para determinar cuanta carga soportaría cada uno de los rodamientos se calcularon las reacciones a lo largo del eje, mediante un análisis de viga utilizando la Ec. (3.4). Luego, con el objeto de lograr la transmisión de potencia entre el eje y los discos de desgaste se seleccionó una cuña en función al diámetro del eje.

3.2.1.6 Selección de rodamientos

La selección de los rodamientos se llevo a cabo siguiendo los pasos que se mencionan a continuación:

1. Se seleccionó la reacción más crítica en el eje.
2. Se estableció el diámetro del rodamiento en función del diámetro del eje.

3. Se estableció el valor de K, el cual es una constante que depende del elemento rodante que tenga el rodamiento, es decir si el rodamiento es de bola el valor de K = 3 y si el rodamiento es de rodillo el valor de K = 3,33. Esta consideración fue tomada según la fuente bibliográfica [9].
4. Se seleccionaron las horas (h) de servicio del rodamiento según su aplicación (ver Anexo A. Tabla A 5.1).
5. Se calculó la vida estimada del cojinete en revoluciones (L_d), utilizando las horas de servicio (h) y la velocidad de giro del eje (rpm), a través de la Ec. (3.5)

$$L_d = (h)(\text{rpm})(60\text{min/h}) \quad (3.5)$$

6. Se calculó la carga dinámica (C) del rodamiento, utilizando la reacción de carga más crítica (P) calculada a través del análisis de viga en los puntos donde se encuentran ubicados los rodamientos por medio de la Ec. (3.6).

$$C = P \left(\frac{L_d}{10^6} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.6)$$

7. Conocida la carga dinámica se seleccionaron los rodamientos por medio de un catálogo de una marca comercial (ver Anexo A Tabla A. 5.2).

3.2.1.7 Diseño de la geometría de los discos de desgaste

Para el diseño de la geometría de los discos de desgaste se realizó un estudio de los cojinetes de contacto deslizante con el fin de determinar qué cantidad de área interna de los cojinetes presentaba mayor deterioro, y que mediante el diseño propuesto se pudiera emular el régimen de trabajo a los que están sometidos los cojinetes de las máquinas rotativas. Esto se logró evaluando 30 cojinetes usados

en motores de combustión interna, de diferentes diámetros internos (entre 40 y 90 mm), provenientes de varios talleres mecánicos de la zona de Puerto la Cruz. Estado Anzoátegui.

Para el diseño de la geometría de los discos de desgaste se utilizó la herramienta *Fracture Manager del software Solidworks 2008*, croquizando en un plano la geometría y posteriormente realizando una “extrusión por revolución de saliente/base” del mismo, para crear un sólido en tres dimensiones.

3.2.1.8 Diseño de la geometría de gancho superior y ganchos laterales de agarre

La función de estos elementos es servir como mecanismo de sujeción para los cojinetes durante los ensayos. Para el diseño de la geometría de los ganchos laterales se consideró el estudio de diferentes tipos de cojinetes, los cuales oscilaban entre 1 y 4 mm de espesor de pared y entre 10 y 30 mm de anchura. Mientras que el gancho superior, se diseñó como universal para sostener y evitar el ascenso de cualquiera de los cojinetes durante las pruebas, siempre considerando cojinetes entre 40 y 90 mm. Para diseñar la geometría de los ganchos se utilizó la herramienta *Fracture Manager del software Solidworks 2008*, croquizando en un plano la geometría y posteriormente realizando una “extrusión saliente/base”. En la Fig. 3.3 se muestra un ejemplo de una extrusión saliente/base.

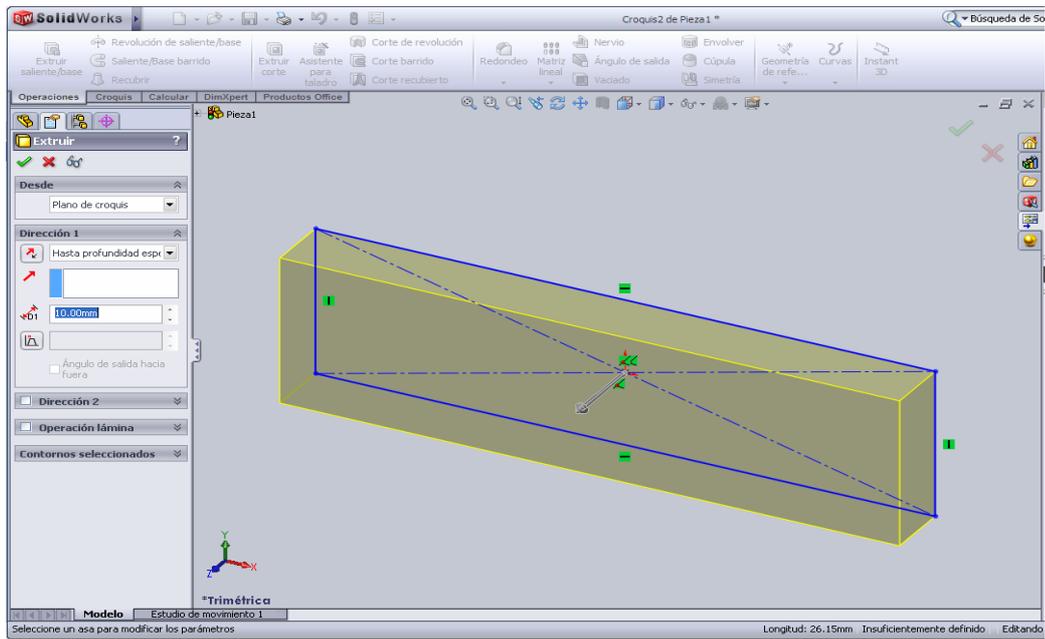


Figura 3.3. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando la extrusión de saliente/base

3.2.1.9 Diseño de la geometría del porta cojinete

Un porta cojinete recibe la carga de ensayo y la transmite a los cojinete. Teóricamente, es un mecanismo de sujeción donde se instalaran los ganchos laterales y superior por medio de pernos colocados en agujeros roscados en el porta cojinete, ubicados en su parte superior, derecha e izquierda. Estos pernos cumplen la función de empujar a los ganchos laterales y el gancho superior con el objetivo de ejecutar un apriete sobre el cojinete a ensayar e impedir que este se libere cuando se estén realizando las pruebas. Para el diseño de la geometría del porta cojinete se utilizó la herramienta *Feature Manager del software Solidworks 2008*, croquizando en un plano la geometría y posteriormente realizando una “extrusión saliente/base”. Para realizar los agujeros roscados donde serian colocados los pernos empujadores, se utilizó la aplicación “asistente para taladrado” de la herramienta *Feature Manager del software Solidworks 2008*.

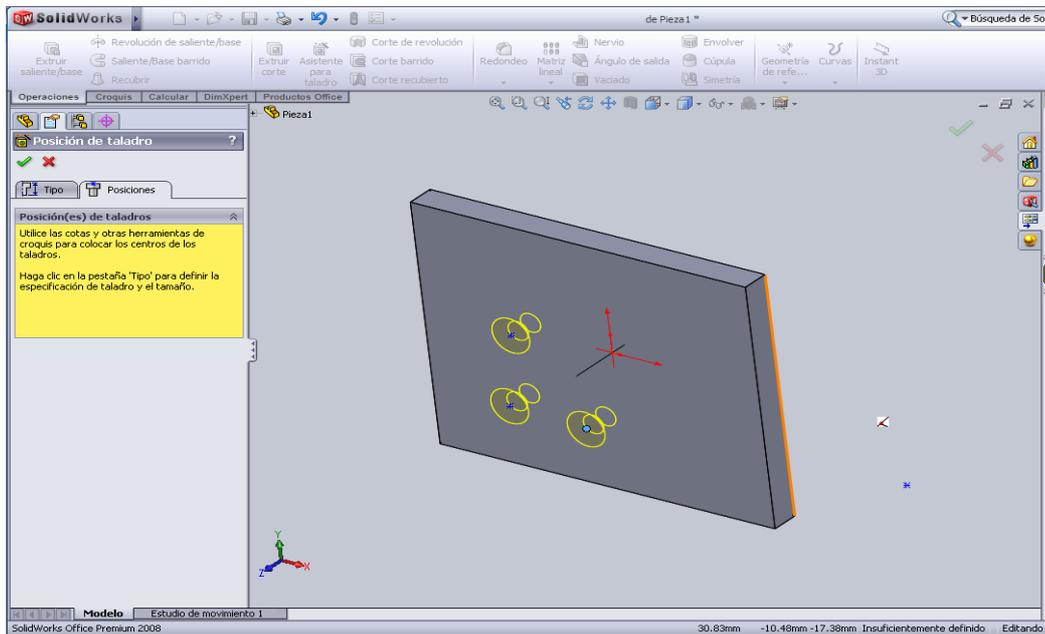


Figura 3.4. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando la aplicación de la herramienta asistente para taladrado en un sólido.

3.2.1.10 Diseño de la geometría del porta muestra

Uno de los requerimientos del equipo para el estudio del desgaste es que no solo se le pueden hacer pruebas a los cojinetes de contacto deslizantes, sino que también pueden ensayarse piezas pequeñas de cualquier metal que requiera el investigador siempre y cuando su dureza no sobrepase a la presentada por los discos de desgaste. Para el diseño de la geometría del porta muestra en primer lugar se determinó el tamaño de la muestra de metal que debía ensayarse, así como también la facilidad que implicaría su fabricación. Una vez establecidas todas las consideraciones, la geometría del porta muestra fue diseñada utilizando la herramienta *Fracture Manager* del software *Solidworks 2008*, croquizando en un plano la geometría y posteriormente realizando una “extrusión saliente/base”. Para realizar el agujero donde sería colocada la muestra de metal, se utilizó la aplicación “asistente para taladrado” de la herramienta *Fracture Manager* del software *Solidworks 2008*.

3.2.1.11 Diseño de la geometría de la barra de carga

Como parte del sistema de transmisión de carga del equipo para el estudio del desgaste, se diseñó la barra de carga, la cual sería la encargada de soportar los diferentes pesos que se utilizaran durante los ensayos, y transmitirlo al porta cojinete que a su vez los trasmite a la zona de ensayo donde son colocados los cojinetes o las muestras de metal. La geometría de la barra de carga fue diseñada utilizando la herramienta *Feature Manager del software Solidworks 2008*, croquizando en un plano la geometría y posteriormente realizando una “extrusión saliente/base”.

3.2.1.12 Diseño de la geometría de los soportes verticales

Se diseñaron dos soportes verticales que servirían para sujetar la barra de carga y el porta cojinete a la plataforma base del equipo por medio de pernos. Para el diseño de la geometría de estos soportes se consideraron formas sencillas y que a su vez fueran un mecanismo de pivote para la barra de carga y el porta cojinete. El diseño de la geometría de los soportes verticales se realizó utilizando la herramienta *Feature Manager del software Solidworks 2008* donde se incluye la aplicación “asistente para taladrado” y “extrusión saliente/base”.

3.2.1.13 Diseño de la geometría de los pasadores para porta cojinete y barra de carga

A fin de sujetar el porta cojinete y la barra de carga a sus respectivos soportes verticales se diseñaron pasadores de cabeza, tomando en cuenta ciertas tolerancias para lograr el ajuste adecuado de los componentes. La geometría de estos pasadores fue diseñada utilizando la herramienta *Feature Manager del software Solidworks 2008*, croquizando en un plano la geometría y posteriormente realizando una “extrusión por revolución de saliente/base” de los mismo.

3.2.1.14 Diseño de la geometría de la plataforma base del equipo

Se diseñó una plataforma base donde se instalaran por medio de pernos sujetadores todos los elementos constitutivos del equipo para el estudio del

desgaste. Las principales consideraciones tomadas para el diseño de la plataforma base fueron: en primer lugar el volumen de la misma y en segundo lugar la versatilidad y facilidad a la hora de ensamblar todos los componentes del equipo. Para el diseño de la geometría de la plataforma base se utilizó la herramienta *Feature Manager del software Solidworks 2008*, croquizando en un plano la geometría y posteriormente realizando una “extrusión saliente/base”. Para realizar los agujeros en la plataforma base donde serían colocados los pernos para sujetar todos los componentes del equipo, se utilizó la aplicación “asistente para taladrado” de la herramienta *Feature Manager del software Solidworks 2008*.

3.2.1.15 Selección de pernos, arandelas y tuercas

Se seleccionaron los pernos y arandelas adecuados, a fin de sujetar los elementos constitutivos del equipo a la plataforma base, así como también la sujeción de los discos de desgaste al eje de transmisión de potencia. La selección de los pernos fue llevado a cabo de la siguiente manera:

1. Se escogió el material de fabricación de los pernos (ver Anexo A. Tabla A. 6.1) tomando en cuenta el costo, la disponibilidad y la resistencia.
2. Se verificó que el diámetro de los pernos estuviera comprendido en las medidas especificadas en la Tabla A. 6.1 Anexo A.
3. Se asignó la carga que soportaría cada perno, en función al cálculo de las reacciones realizado en la sección 3.2.1.4 y 3.2.1.5
4. Luego se calculó el esfuerzo de diseño que ocurre en cada perno mediante la ecuación:

$$\sigma_{\text{diseño}} = \frac{\text{Fuerza ejercida}}{\text{Área nominal}} \quad (3.7)$$

5. El esfuerzo de diseño se comparó con la esfuerzo de fluencia del material del perno (F_v), verificando así si este cumplió con un diseño satisfactorio.
6. Se calculó el factor de seguridad de cada uno de los pernos mediante la ecuación:

$$F.S = \frac{\text{Esfuerzo de fluencia } (F_v)}{\text{Esfuerzo de diseño } (\sigma_{\text{diseño}})} \quad (3.8)$$

7. Se seleccionó la arandela y la tuerca más adecuada para cada uno de los pernos (ver Anexo A. Tablas A 6.2 y A. 6.3 respectivamente).

3.2.1.16 Diseño del sistema de lubricación para pruebas de desgaste

Se diseñó un sistema para lubricar los cojinetes y muestras de metal de manera sencilla, económica y práctica. El sistema de lubricación consiste en aprovechar durante los ensayos la acción de giro de los discos de desgaste y la propiedad adherente que poseen los aceites lubricantes. Los discos de desgastes al estar parcialmente sumergidos en un depósito de lubricante ubicado en la parte inferior de ellos, logran recoger el fluido, lubricando el conjunto disco-cojinete o disco-muestra de metal. Este depósito de lubricante cuenta con un mecanismo de ascenso y descenso a manera de ajustar el depósito de lubricante en la posición deseada.

3.2.1.17 Análisis esfuerzo-deformación a los componentes del equipo

Se llevo a cabo el análisis esfuerzo-deformación a los elementos que conforman el equipo para el estudio del desgaste, a través de las siguientes actividades:

3.2.1.17.1 Análisis de esfuerzo-deformación al ensamble de los componentes del equipo

Ya diseñada todas las geometrías de los componentes del equipo de desgaste y utilizando las relaciones de posición correspondiente (concéntrica, tangencial,

perpendicular y coincidente) se ensamblaron digitalmente las siguientes piezas: eje de transmisión de potencia, barra de carga, porta cojinete, soportes verticales, pasadores para porta cojinete y barra de carga, disco de desgaste, gancho superior, ganchos laterales de agarre y porta muestra. Este ensamble se llevó a cabo utilizando la herramienta *Milimeter Ratio of Position del Software Solidworks 2008*.

Se establecieron las condiciones requeridas para las simulaciones, utilizando el método de elementos finitos (MEF), seleccionando el tipo de estudio a realizar al conjunto ensamblado, características del mallado (tolerancia, calidad de malla y tipo de elemento), modos de restricción (ejes coordenados X, Y y Z), cargas aplicadas (dirección, ubicación y magnitud). Esto fue llevado a cabo utilizando la herramienta *CosmoWorks Designer del Software Solidworks 2008*.

Las simulaciones se realizaron utilizando los diferentes discos de desgaste, así como también la modalidad de ensayo con muestra de metal, a fin de determinar con cuál de ellas se alcanzaba el mayor esfuerzo en los componentes del equipo para el estudio del desgaste, y así conocer la condición mas crítica de ensayo.

3.2.1.17.2 Análisis de esfuerzo-deformación a la plataforma base del equipo

Mediante el cálculo de reacciones en el sistema de transmisión de carga y el eje de transmisión de potencia del equipo, se obtuvieron las reacciones que actúan en la plataforma base del equipo. Se establecieron las condiciones requeridas para las simulaciones, utilizando el método de elementos finitos (MEF), seleccionando el tipo de estudio a realizar a la plataforma base, características del mallado (tolerancia, calidad de malla y tipo de elemento), modos de restricción (ejes coordenados X, Y y Z) y cargas aplicadas (dirección, ubicación y magnitud). Esto fue llevado a cabo utilizando la herramienta *CosmoWorks Designer del Software Solidworks 2008*.

3.2.2 ETAPA 2. ANÁLISIS DE FATIGA A LOS COMPONENTES DEL EQUIPO

Para el análisis de fatiga se llevaron a cabo las siguientes actividades:

3.2.2.1 Análisis de fatiga al ensamble de los componentes y plataforma base del equipo

Una vez efectuado el análisis esfuerzo-deformación de los componentes del equipo nombrados en la sección 3.2.2.1, se realizó un análisis de fatiga estableciéndose el método de análisis (Soderberg o Goodman), curva S-N característica de cada materia, lo cual representa un aspecto imprescindible para realizar la corrida de la simulación y el tipo de carga, todos estos parámetros fueron seleccionados de la base de datos de la aplicación *CosmoWorks Designer del Software Solidworks 2008*, editando las propiedades del estudio respectivamente para cada simulación.

Considerando el eje de transmisión de potencia como uno de los elementos más críticos en cualquier máquina rotativa, y aun habiendo realizado un análisis de fatiga a este componente junto con el resto de las piezas (descrito en la sección anterior), se realizó un segundo análisis de fatiga únicamente al eje pero esta vez variando el tipo de carga a la que este se encuentra sometido, a fin de simular las condiciones dinámicas de operación del mismo. Para este análisis al igual que el anterior, se estableció el método de análisis, curva S-N propia del material y tipo de carga.

El análisis de fatiga de la plataforma se ejecutó de igual manera a lo anteriormente mencionado. Este estudio se realizó con la finalidad de determinar el número de ciclos o ensayo que resistirá el equipo antes de presentar algún daño por fatiga.

3.2.3 ETAPA 3. ELABORACIÓN DE PLANOS DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO

Para la elaboración de los planos de cada uno de los elementos constitutivos del equipo se utilizó el Software Solidworks 2008, específicamente la aplicación *Solidworks CAD 2D*, la cual permitió realizar en detalle el acotado de todas las piezas que componen el equipo a diseñar. Todo el acotado fue realizado en unidades del Sistema Internacional de medidas (SI), utilizando un formato de plano A-4, encontrado en la base de datos del software.

3.2.4 ETAPA 4. CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO PARA EL ESTUDIO DEL DESGASTE

Luego de la elaboración de los planos, la fabricación de los elementos constitutivos del equipo fueron llevados a cabo en el Taller Lago ubicado en la Av. Miranda N° 16, Calle Junin. Pto La Cruz, Estado Anzoátegui. Para el ensamble del equipo fue considerado la disponibilidad de materiales y piezas prefabricadas.

Todos los elementos que requerían ser fabricados según los planos se hicieron utilizando máquinas herramientas semiautomáticas, así como también torno de control numérico computarizado (CNC) y centro de mecanizado asistido por computadora. En las Figs 3.4, 3.5 y 3.6 se muestran las máquinas herramientas utilizadas para la fabricación de los componentes.



Figura 3.5. Torno control numérico computarizado (CNC)



Figura 3.6. Centro de mecanizado asistido por computadora: a) Panel de control y b) Vista completa de la máquina herramienta.



Figura 3.7. Máquinas herramientas semiautomáticas utilizadas: a) Taladro de banco, b) fresadora y c) brochadora.

Luego de tener todas las piezas fabricadas del equipo para el estudio del desgaste, se realizó el ensamble utilizando herramientas manuales tales como, destornilladores, llaves allen, raches, dados para tuercas hexagonales y pernos hexagonales, nivel de burbuja, vernier y cinta métrica.

A fin de realizar un centrado preciso en el conjunto rodamientos-eje-motor, se utilizó un reloj comparador el cual fue colocado en varios puntos del eje en las coordenadas X y Y mientras se encontraba en movimiento, para así determinar un valor aproximado de la desalineación e ir ajustando el eje, con el objetivo de lograr que dicho valor fuera lo más cercano a cero (0) y así reducir las vibraciones en el sistema. En la Fig. 3.8 se muestra el reloj comparador utilizado en el ajuste de la desalineación del eje de transmisión de potencia del equipo.



Figura 3.8. Reloj comparador, marca: Mitutoyo, apreciación: 0,001 mm, rango 0-10 mm.

3.2.5 ETAPA 5. ELABORACIÓN DEL MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PARA EL CORRECTO FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO

Con la finalidad de facilitar al operador el manejo del equipo para ensayos de desgaste, se elaboró un manual de usuario donde se dan a conocer las especificaciones, funcionamiento, ensamble de componentes precauciones y

mantenimiento del equipo. A fin de que la lectura del manual sea bien entendida, se incluyeron ilustraciones explicativas (fotografías) en todo el contenido del mismo.

3.2.6 ETAPA 6. REALIZACIÓN DE PRUEBAS DE DESGASTE EN EL EQUIPO

Las pruebas de desgastes fueron realizadas con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del equipo de acuerdo a las solicitaciones y condiciones preestablecidas, y así verificar que el equipo cumplía con los requerimientos bajo los cuales fue diseñado y construido, siguiendo los pasos descritos en el manual de usuario y mantenimiento (ver Anexo C). Para llevar a cabo las pruebas de desgaste se realizaron las siguientes actividades:

3.2.6.1 Ensayo de desgaste en cojinetes de contacto deslizante lubricados bajo condición de carga y tiempo variable medidos por pérdida de masa

Las pruebas de desgaste se llevaron a cabo variando el tiempo y la carga de ensayo. Se realizaron seis pruebas, donde en cada una se reemplazó el cojinete y el lubricante. Todo esto con el fin de observar el porcentaje (%) de pérdida de masa que sufrían los cojinetes, para esto antes y después de cada prueba se pesaron cada uno de los cojinetes utilizando una balanza analítica, para así poder determinar que factor (tiempo o carga) resultaría más crítico durante los ensayos.

A continuación en la Tabla 3.1 se presenta la estructura bajo la cual se realizaron los ensayos de desgaste en los cojinetes de contacto deslizante.

Tabla 3.1. Condición para las pruebas de desgaste en cojinete de contacto deslizante de 40 mm y espesor 1,5 mm. Lubricante aceite mineral 20 W-50.

Prueba	Carga (kgf)	Tiempo (min)	Cantidad de lubricante (ml)
<i>Cojinete 1</i>	5	3	200
<i>Cojinete 2</i>	5	6	200
<i>Cojinete 3</i>	10	3	200
<i>Cojinete 4</i>	10	6	200
<i>Cojinete 5</i>	15	3	200
<i>Cojinete 6</i>	15	6	200

3.2.6.2 Ensayo de desgaste en muestra de metales lubricados bajo condición de carga y tiempo variable medidos por pérdida de masa

Se ensayaron cuatro muestras de aluminio, cuyas medidas fueron 15 mm de diámetro x 10 mm de longitud aproximadamente, las cuales fueron sometidas a desgaste bajo distintas condiciones de carga y tiempo. Todo esto con el fin de observar el porcentaje (%) de pérdida de masa que sufrían estas muestras, para esto antes y después de cada prueba se pesaron cada una de las muestras utilizando una balanza analítica, para así poder determinar que factor (tiempo o carga) resultaría más crítico durante los ensayos.

En la Tabla 3.2 se muestra el esquema de ensayo de desgaste para muestras de metal de aluminio.

Tabla 3.2. Condición para las pruebas de desgaste en muestra de aluminio. Lubricante aceite mineral 20 W-50.

Prueba	Carga (kgf)	Tiempo (min)	Cantidad de lubricante (ml)
<i>Aluminio 1</i>	5	3	200
<i>Aluminio 2</i>	5	6	200
<i>Aluminio 3</i>	10	3	200
<i>Aluminio 4</i>	10	6	200

3.2.7 ETAPA 7. ANÁLISIS DEL LUBRICANTE USADO EN ENSAYOS DE DESGASTE UTILIZANDO LA TÉCNICA DE ESPECTROMETRÍA POR EMISIÓN ATÓMICA

Se realizó el análisis de lubricante por espectrometría de emisión atómica, según lo establecido en el manual de operación del espectrómetro de emisión atómica utilizado. Esto se realizó con el fin de conocer la concentración de partículas metálicas presentes en el lubricante usado en los ensayos una vez que el desgaste se hace presente en las partes en contacto (cojinete-disco de desgaste o muestra-disco de desgaste), todo esto a fin de determinar cuáles de las partes en contacto está sufriendo el mayor desgaste o daño. Para el análisis del lubricante se llevaron a cabo las siguientes actividades:

1. Condiciones para el análisis del lubricante utilizado en los ensayos de desgaste para cojinetes de contacto deslizante:
 - Carga constante de 15 kgf.
 - Tomando muestras de lubricante cada 2 min sin detener el equipo por un periodo de 12 min.
 - Analizando en un espectrómetro de emisión atómica 2 muestras de cada toma y promediándolas.

2. Condiciones para el análisis del lubricante utilizado en los ensayos de desgaste para muestra de metal.
 - Cargas de ensayo : 5 y 10 kgf
 - Tomando muestras de lubricante cada 3 y 6 min para cada carga sin detener el equipo.
 - Analizando en un espectrómetro de emisión atómica 2 muestras de cada toma y promediándola.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los análisis de los resultados obtenidos luego que se ejecutaran todas las etapas mencionadas en el capítulo 3.

La presentación de estos análisis se hace en correspondencia de cada una de las etapas del desarrollo del proyecto las cuales están enmarcadas dentro del objetivo de esta investigación.

4.1 DISEÑO DE LOS ELEMENTOS QUE COMPONEN EL EQUIPO PARA EL ESTUDIO DEL DESGASTE Y LUBRICACIÓN

4.1.1 Establecimientos de variables y condiciones de operación que debe tener el equipo

Las variables y condiciones de operación establecidas para el diseño del equipo fueron las siguientes:

- Con el equipo se debe generar desgaste significativo tanto en los cojinetes de contacto deslizante como en pequeñas muestras de metal, cuya dureza no exceda la de los disco de desgaste.
- El principio de operación es hacer incidir los cojinetes o las pequeñas muestras de metal contra la parte periférica de un cilindro rotativo (disco de desgaste), a una velocidad constante, bajo condiciones de carga y lubricación.
- Los materiales de fabricación del equipo deben ser económicos, de gran disponibilidad y fáciles de mecanizar.

- Las geometrías de las piezas del equipo deben ser simples para facilitar su fabricación, unión y acople.
- El equipo debe ser de fácil mantenimiento, que facilite el armado y desarmado o el reemplazo de alguno de sus componentes.
- Debe ser un equipo de poco peso y volumen (portátil).

De acuerdo a los estándares básicos de diseño y tomando en cuenta las consideraciones previas, se determinó que el equipo debería estar conformado por los siguientes elementos: porta cojinete, pernos empujadores, porta muestras, ganchos, barra de carga, soportes, depósito de lubricante, eje, disco de desgaste y una plataforma base. Todos los elementos mencionados anteriormente surgieron ante la necesidad de lograr un sistema de sujeción para los cojinetes y muestras de metal, obtener un sistema para transmitir satisfactoriamente y de manera segura la carga a los cojinetes y muestras de metal y conseguir un sistema de lubricación y transmisión de potencia acorde a las condiciones operativas del equipo.

4.1.2 Materiales seleccionados y utilizados para el diseño y fabricación de las piezas

Se seleccionó un acero AISI 4140 para diseñar y fabricar los discos ya que este acero es altamente resistente al desgaste, y cuya composición química se asemeja a la de los aceros con los que son fabricados los cigüeñales y ejes de equipos rotativos. Por otra parte fue tomado en cuenta que la dureza de este acero fuera mayor a la dureza de los cojinetes de ensayo y las muestra de metal. Este acero es altamente comercial y fácil de mecanizar, lo que representa una gran ventaja para todo diseño y proceso de fabricación. Para el diseño y construcción de la plataforma base del equipo, se escogió un acero ASTM A-36, debido a que la gran mayoría de las láminas metálicas que se venden en el mercado están fabricadas en este acero, lo que representa una gran disponibilidad, además de brindar buenas propiedades mecánicas y facilidad a la hora de ser mecanizado. Se utilizó un acero

AISI 1045 para el diseño y fabricación de los soportes verticales, barra de carga, porta cojinete, porta muestra, eje, pasadores, gancho superior y ganchos laterales de agarre.

La selección de este acero estuvo orientada a que presenta gran disponibilidad en el mercado, facilidad a la hora de ser mecanizado y buenas propiedades mecánicas. En la Tabla 4.1 se muestra los materiales seleccionados para el diseño y fabricación de los elementos constitutivos del equipo para el estudio del desgaste.

Tabla 4.1. Materiales seleccionados para el diseño y fabricación de los elementos constitutivos del equipo para el estudio del desgaste.

Elemento	Material
Plataforma base	Acero ASTM A-36
Eje	Acero AISI 1045 estirado en frío
Soportes verticales	Acero AISI 1045 estirado en frío
Porta cojinete	Acero AISI 1045 estirado en frío
Porta muestra	Acero AISI 1045 estirado en frío
Pasadores de barra de carga y porta cojinete	Acero AISI 1045 estirado en frío
Barra de carga	Acero AISI 1045 estirado en frío
Ganchos laterales y gancho superior	Acero AISI 1045 estirado en frío
Disco de desgaste	Acero AISI 4140

4.1.3 Motor utilizado

Según lo especificado en el capítulo 3, sección 3.2.1.3, se utilizó un motor eléctrico de inducción monofásico, 4 polos, de potencia ½ hp.

A continuación en la Fig. 4.1 se muestra una fotografía del motor eléctrico empleado para el equipo.



Figura 4.1. Motor eléctrico empleado en el equipo para el estudio del desgaste: a) Motor, b) Base de anclaje y c) Eje de salida

En la Tabla 4.2 se muestra las especificaciones técnicas del motor eléctrico indicadas por el fabricante.

Tabla 4.2. Especificaciones técnicas del motor empleado en el equipo para el estudio del desgaste.

Marca	Eberle
Modelo	CD48 VA
Peso	9,62 Kgf
Potencia	½ hp (373 watt)
Velocidad máx. de giro	1800 rpm (189 rad/s)
Tipo de corriente y voltaje	60Hz -230-100 V
Numero de polos	4

Con los datos indicados por el fabricante del motor eléctrico se calculó el torque que este produce, utilizando la Ec. (3.1), donde se obtuvo un *Torque* = 1,97 N.m.

Una vez obtenido el torque que produce el motor eléctrico del equipo se calcularon las fuerzas tangenciales producidas en cada una de los discos de desgaste usando la Ec. (3.2) y cuyos resultados se muestran a continuación en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Fuerzas tangenciales en cada disco de desgaste.

Nº	Diámetro del disco de desgaste (m)	Ft (N)
1	0,037	106,48
2	0,057	69,12
3	0,067	58,81
4	0,077	51,17
5	0,087	45,29

En la Tabla 4.3 se observa que la mayor fuerza tangencial es registrada en el disco de desgaste de menor diámetro, este comportamiento se debe a que el valor de la Ft es inversamente proporcional al radio de los discos de desgaste.

El valor de cada una de las fuerzas tangenciales (Ft) correspondientes a los discos de desgaste se utilizó para el cálculo de la fuerza normal de frenado (Fn). Para esto se usó la Ec. (3.3), donde se escogió un factor de seguridad de carga FSC = 0,85 y un coeficiente dinámico de fricción $\mu_k = 0,06$ el cual corresponde a el factor de fricción de superficies metálicas en contacto lubricadas con aceite mineral (ver Anexo A. Tabla A 3.1). Los resultados de la fuerza normal de frenado para cada uno de los discos de desgaste se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Fuerzas normales de frenado (Fn) correspondientes a cada disco de desgaste.

Nº	Diámetro de disco de desgaste(m)	Ft (N)	Fn (N) sin FSC	Fn (N) con FSC	Fn (kgf) con FSC
1	0,037	106,48	1774,67	1508,47	153,93
2	0,057	69,12	1152	979,2	99,92
3	0,067	58,81	980,17	883,14	85,01
4	0,077	51,17	852,83	724,91	73,97
5	0,087	45,29	754,83	641,60	65,47

Los resultados mostrados en la Tabla 4.4 indican que un aumento de la fuerza tangencial incrementa el valor de la fuerza normal de frenado, siendo estas dos magnitudes directamente proporcionales. Es por ello que cuando es utilizado el conjunto disco-cojinete de menor diámetro el motor resiste una fuerza normal de frenado de aproximadamente 1774,67 N, mientras que cuando es utilizado el conjunto disco-cojinete de mayor diámetro el motor resiste una carga normal de frenado de aproximadamente 754,83 N.

4.1.4 Cálculos de reacciones en el sistema transmisión

Se tomó como carga máxima de diseño la fuerza normal de frenado necesaria para detener el motor cuando es utilizado el disco de desgaste de mayor diámetro (754,83 N). A esta carga máxima de diseño se le fue aplicado el FSC, obteniéndose un valor de 641,60 N, esto con la finalidad de lograr un diseño del sistema de transmisión de carga que garantice que el motor no se detenga durante las pruebas, aun cuando se utilice cualquiera de los discos de desgaste. Basado en esta condición y mediante el cálculo de reacciones en todas las vigas del equipo, se determinó cuanto peso sería necesario colocar en la barra de carga para lograr dicha fuerza normal máxima de diseño en los cojinetes y muestras de metal. En la Fig. 4.2 se muestra el esquema de reacciones en el sistema de transmisión de carga del equipo para el estudio del desgaste.

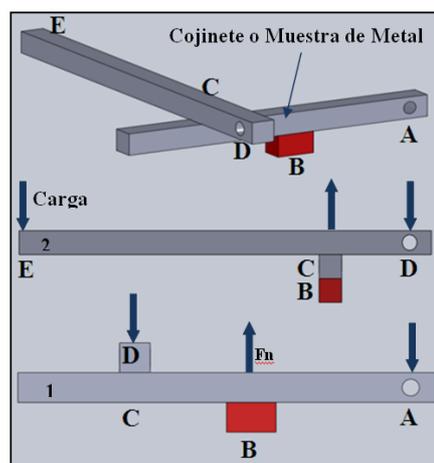


Figura 4.2. Esquema de reacciones en el sistema de transmisión de carga.

El cálculo de las reacciones se realizó mediante un análisis estático de utilizando la Ec. (3.4).

- *Elemento 1*

Donde F_n = Fuerza en el punto B (FB) y d_{CA} corresponde a la distancia entre el punto C y el punto A.

$$\begin{aligned} \Sigma M_A = 0 \quad \curvearrowright + \\ FC \times d_{CA} - FB \times d_{BA} = 0 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Por sumatorias de fuerzas en el elemento 1, tomando en cuenta solo las reacciones en el eje Y.

$$\begin{aligned} \Sigma F_y = 0 \quad \uparrow + \\ -FC + FB - FA = 0 \end{aligned} \quad (4.2)$$

- *Elemento 2*

$$\begin{aligned} \Sigma M_D = 0 \quad \curvearrowright + \\ -FC \times d_{CD} + FE \times d_{ED} = 0 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Por sumatorias de fuerzas en el elemento 2, tomando en cuenta solo las reacciones en el eje Y.

$$\begin{aligned} \Sigma F_y = 0 \quad \uparrow + \\ -FE + FC - FD = 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

El punto C tanto para el elemento 1 y 2 es un punto en común.

En Tabla 4.5 se muestran los resultados de las reacciones en todos los puntos del sistema de transmisión de carga del equipo para el estudio del desgaste que fue mostrado en la Fig. 4.2.

Tabla 4.5. Reacciones en el sistema de transmisión de carga.

Sistema de transmisión de carga	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)
Punto A (Pasador del porta cojinete)	33,94	332,61
Punto B (Zona de colocación de cojinetes o muestra de metal)	65,47	641,60
Punto C (Zona de transmisión de carga. Contacto entre barra de carga y porta cojinete)	31,52	308,90
Punto D (Pasador de la barra de carga)	15,56	152,49
Punto E (Banco de pesas de la barra de carga)	15,56	152,49

Los resultados mostrados en la Tabla 4.5 indican que para lograr una carga de ensayo máxima en cojinetes o muestra de metal de 65,47 Kgf, es necesario colocar en la barra de carga del banco de pesas 15,56 Kgf. Es decir el sistema de palanca diseñado para el equipo logra aumentar aproximadamente 4,21 veces la carga colocada en la barra de carga y transmitirla a los cojinetes o muestras de metal durante los ensayos. A continuación en la Tabla 4.6 se muestra la relación de carga, es decir el aumento que ocurre entre la carga colocada en el banco de pesas y la zona de colocación de los cojinetes o muestras de metal, esto debido al sistema de transmisión de carga diseñado.

Tabla 4.6. Relación de carga en el banco de pesas y la zona de colocación de cojinetes o muestras de metal.

Banco de pesas en la barra de carga (Carga en kgf)	Zona de colocación de muestras (Carga en kgf)
5	21
10	42
15	63

4.1.5 Diseño del eje de transmisión de potencia

La principal función del eje en el equipo es servir de mecanismo de transmisión de potencia y acople entre el motor y los discos de desgaste. El sistema de soporte del eje consta de dos rodamientos de 25,4 mm de diámetro, tipo chumacera, ubicados el primero de estos a 155 mm y el segundo a 45 mm del acople motor-eje respectivamente. Estos rodamientos están sometidos a una determinada condición de carga por reacción y velocidad de giro las cuales serán tomadas en cuenta posteriormente para la selección de los mismos. En la Fig. 4.3 se muestra el croquizado y extrusión del eje de transmisión de potencia. Todas las dimensiones del eje se encuentran en el Anexo D.

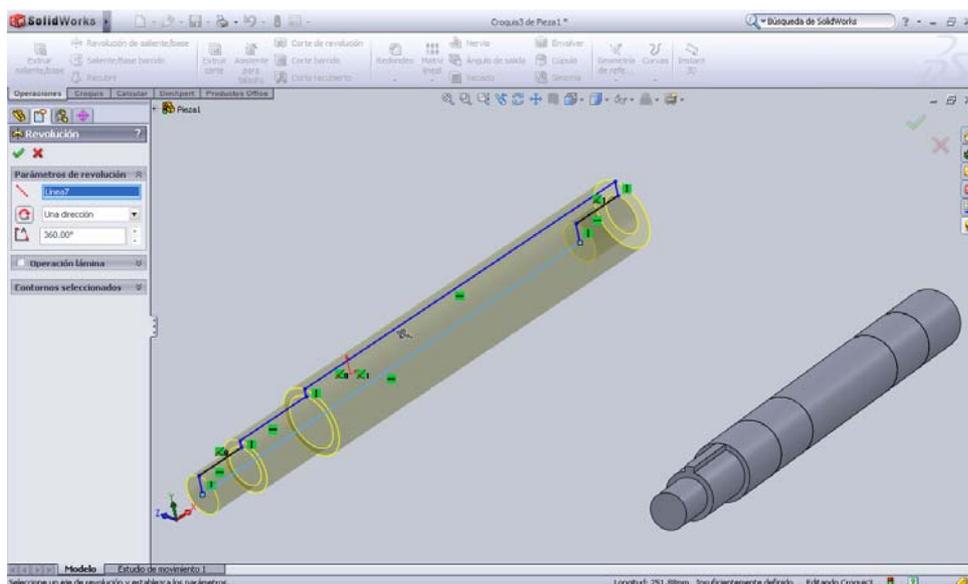


Figura 4.3. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando el Croquizado y extrusión del eje de transmisión de potencia.

El eje de transmisión de potencia se encuentra sometido a una carga a flexión igual a la carga máxima de ensayo (65,47 Kgf ó 641,60 N) ubicada en el

punto A₁, ya que en este punto es donde esta acoplado el eje con los discos de desgaste. Esta carga en el punto A₁ produce reacciones a lo largo del eje las cuales son mostrados en la Fig. 4.4, donde el punto C₁ y C₂ representan la zona de colocación de los rodamientos 1 y 2 respectivamente, mientras que el punto M representa el acople del eje de transmisión de potencia con el eje de salida del motor eléctrico.

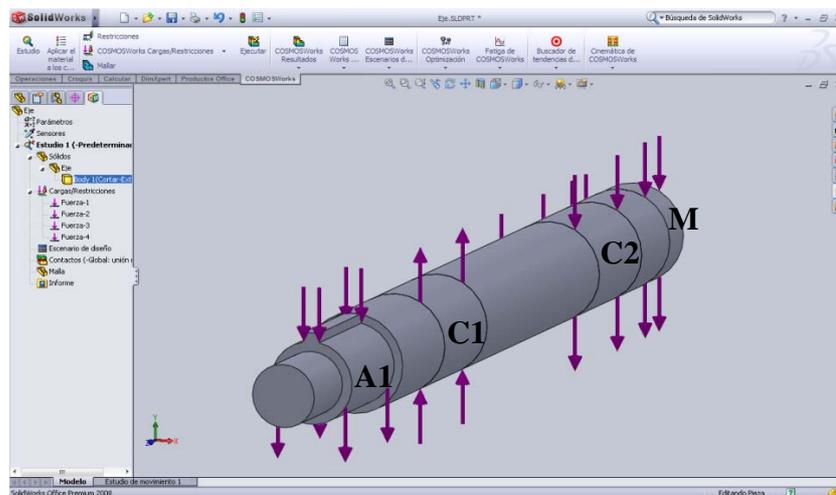


Figura 4.4. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando las reacciones generadas en el eje de transmisión de potencia.

A fin de determinar las reacciones que se generaban en los puntos de apoyo del eje (C₁, C₂ y M), se calcularon las reacciones a lo largo del eje, mediante un análisis de viga, utilizando Ec. (3.4):

$$\begin{aligned} \Sigma M_{FM} &= 0 \quad \curvearrowright \\ (FA1 \times dA1M) - (FC1 \times dC1M) + (FC2 \times dC2M) &= 0 \end{aligned} \quad (4.5)$$

Luego por sumatoria de momento en FC2, se obtiene la Ec. (4.6):

$$\begin{aligned} \Sigma M_{FC2} &= 0 \quad \curvearrowright \\ (FA1 \times dA1C2) - (FC1 \times dC1C2) - (FM \times dMC2) &= 0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Y por sumatoria de momento en FC1 obtenemos la Ec. (4.7):

$$\Sigma M_{FC1} = 0 \quad \curvearrowright$$

$$(FA1 \times dA1C1) - (FC2 \times dC2C1) - (FM \times dC1M) = 0 \quad (4.7)$$

Ya obtenidas las Ec. (4.5), (4.6) y (4.7) se realizó las sustituciones y despejes necesarios para así obtener los resultados de las reacciones en el eje.

En la Tabla 4.7 se muestran los resultados de las reacciones en los puntos, C₁, C₂ y M del eje de transmisión de potencia que fue mostrado en la Fig. 4.3. Donde el máximo valor de carga por reacción se encuentra en el rodamiento 1, por tanto este valor será tomado como referencia para posteriormente seleccionar los rodamientos adecuados para eje de transmisión de potencia del equipo.

Tabla 4.7. Reacciones en el eje de transmisión de potencia del equipo.

Eje de transmisión	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)
Punto A ₁	65,47	641,60
Punto C ₁ (chumacera 1)	101,175	991,51
Punto C ₂ (chumacera 2)	35,691	349,77
Punto M (acople con el motor)	0,0141	0,14

Según lo descrito en el capítulo 3, sección 3.2.1.5 se seleccionó una cuña Woodruff para lograr la transmisión de potencia entre el eje y los discos de desgaste, ya que este tipo de cuñas producen una mejor concentricidad entre los discos de desgaste y el eje una vez ensamblados, lo cual es un factor importante durante el funcionamiento del equipo. La cuña fue seleccionada en función al diámetro nominal del eje en la zona donde serán colocados los discos de desgaste (ver Apéndice A. Tabla A 4.1), esta zona posee un diámetro de 21 mm y en función a este valor se seleccionó la cuña con las siguientes características:

- *Tipo de cuña:* cuadrada Woodruff
- *Rango de diámetro nominal del eje:* 9/16" hasta 7/8" (14,29 mm - 22,23 mm).
- *Ancho de la cuña:* 3/16" (4,77 mm).
- *Altura de la cuña:* 3/16" (4,77 mm).
- *Longitud de cuña:* 1^{9/50}" (30 mm), según la dimensión de la zona de colocación.
- *Profundidad de la ranura en el eje:* 1/16" (1,6 mm).

4.1.6 Rodamientos seleccionados

El mecanismo de soporte está conformado por dos rodamientos tipo chumaceras, que fueron seleccionados en función a la carga que estos reciben y a la velocidad máxima de giro del eje de transmisión de potencia. Los rodamientos fueron seleccionados de un catalogo de la marca comercial SKF, tomando en cuenta la disponibilidad, calidad, durabilidad y economía de los mismos.

A continuación se presentan los datos que fueron utilizados para la selección de los rodamientos, los cuales fueron obtenidos siguiendo los pasos descritos en el capítulo 3, sección 3.2.1.6.

- *Carga crítica:* 101,175 kgf
- *Tiempo en servicio:* 10.000 horas
- *Numero de revoluciones (Ld):* 1,08 x 10⁹ revoluciones
- *Factor de rodamiento K:* 3 (rodamientos de bola)
- *Carga dinámica (C):* 10,037 kN
- *Velocidad de giro:* 1800 rpm

A continuación se presentan las características y especificaciones técnicas de los rodamientos seleccionados (Anexo A Tablas A 5.2 y 5.3):

- *Marca de rodamiento:* SKF

- *Modelo:* SY1. RM
- *Peso:* 0,69 kgf
- *Carga dinámica máxima:* 14 kN
- *Velocidad máxima de giro:* 7000 rpm
- *Modelo del rodamiento:* YAT205-100
- *Modelo del soporte del rodamiento:* SY505U
- *Diámetro interno del rodamiento:* 25,4 mm (1")
- *Altura del soporte del rodamiento:* 70 mm

4.1.7 Diseño de los discos de desgaste

Utilizando la metodología descrita en el capítulo 3, sección 3.2.1.7 se diseñaron los discos de desgaste de varios tamaños, ya que el objetivo fue ensayar cojinetes de diferentes dimensiones que van desde 40 a 90 mm de diámetro interno y un máximo de 30 mm de anchura. A fin de permitir la transmisión de potencia entre el eje y los discos de desgaste, se realizó el extruido de una ranura a los discos de desgaste tomando en cuenta las dimensiones de la cuña seleccionada para el eje (sección 4.1.5). En la Fig. 4.5 se muestra el croquizado y extrusión de los discos de desgastes utilizando el software Solidworks 2008. Donde: a) representa la zona periférica de desgaste (30 mm de ancho), b) diámetro interno del disco de desgaste (21 mm) y c) ranura para cuña cuadrada Woodruff.

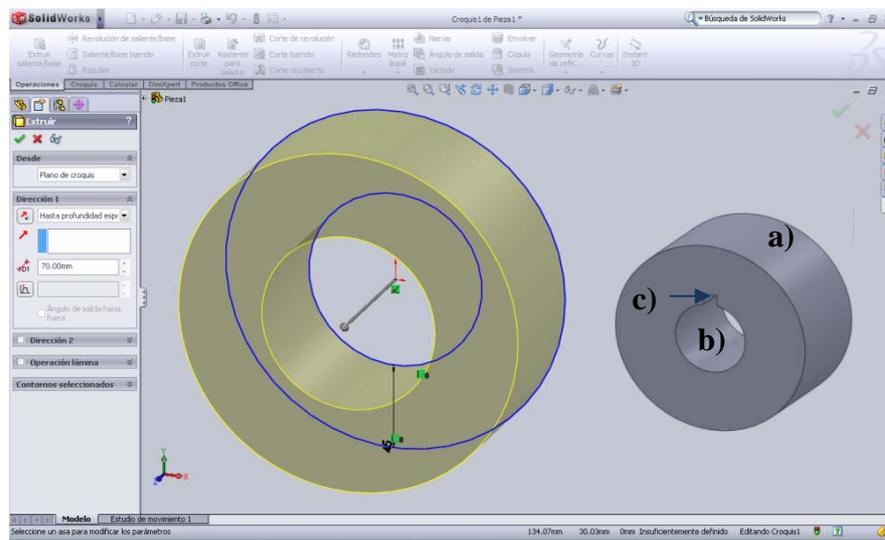


Figura 4.5. Ventana del software Solidworks, mostrando el croquizado y extrusión de los disco de desgaste.

Según lo descrito en capítulo 3, sección 3.2.1.7 se observó desgaste en aproximadamente el 93 % de la zona interna de cada uno de los cojinetes, este comportamiento se debe a que estos elementos de sacrificio no se desgastan uniformemente en la zona interna, debido a la distribución no uniforme de la carga a la que están sometidos, sobre todo en los periodos de arranque de las máquinas rotativas donde son instalados. Es por ello que se tomó en cuenta solo el 93 % del diámetro interno nominal de cojinetes comerciales para diseñar los discos de desgaste, y así lograr que el desgaste producido por estos fuera lo más parecido al que en realidad estos sufren en las máquinas rotativas donde son instalados. En la Tabla 4.8 se muestra la selección del disco de desgaste en función al diámetro nominal de cojinetes comerciales.

Tabla 4.8. Diámetro de los discos de desgaste que deben utilizarse en el equipo según el diámetro de cojinete de deslizamiento a ensayar.

Diámetro de la discos de desgaste (mm)	Diámetro de cojinetes de deslizamiento (mm)
37	40 hasta 45
57	60 hasta 65
67	70 hasta 75
77	80 hasta 85
87	90 hasta 95

En la Fig. 4.6 se muestra la diferencia de diámetros que existe entre los discos de desgaste y los cojinetes de deslizamiento. El elemento de color azul representa el cojinete y el elemento de color gris el disco de desgaste.

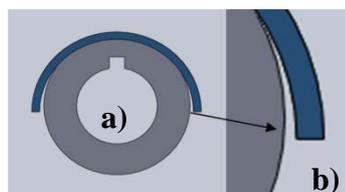


Figura 4.6. Conjunto disco-cojinete. **a)** Ensamble disco-cojinete y **b)** Diferencia entre el diámetro interno del cojinete de deslizamiento y el diámetro externo del disco de desgaste.

Todas las dimensiones de los discos de desgaste se encuentran en el Anexo D del presente trabajo.

4.1.8 Diseño del gancho superior y ganchos laterales de agarre

Tal como se menciona en el capítulo 3, sección 3.2.1.8 para el diseño de los ganchos laterales de agarre se tomó en cuenta el espesor nominal de los cojinetes de deslizamiento presentes en el mercado. Se tomó un rango de espesores comprendidos entre 1 y 4 mm, partiendo de esto se diseñaron ganchos laterales con distintas zonas de agarre. En la Fig. 4.7 se muestra el croquizado y la extrusión de los ganchos laterales de agarre. Donde: a) zona de empuje donde encajan los pernos empujadores laterales (10 mm de diámetro) y b) Zona de agarre del gancho para anchura de cojinetes no mayor a 30 mm y espesor de pared entre 1 y 4 mm. En la Fig. 4.8 se muestra la variación de la zona de agarre del gancho lateral en función del espesor de pared del cojinete de contacto deslizante.

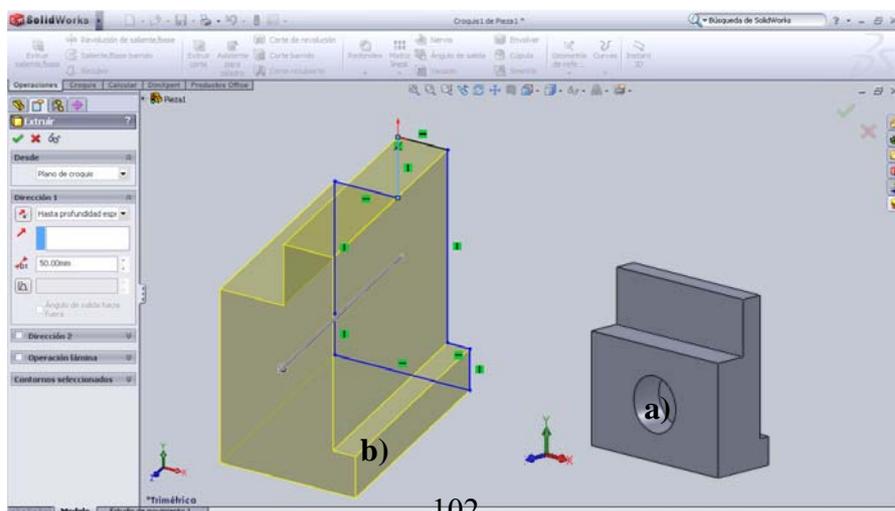


Figura 4.7. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando el croquizado y extrusión de los ganchos laterales de agarre.

A continuación en la Fig. 4.8 se muestra la zona de agarre que poseen los ganchos laterales diseñados.

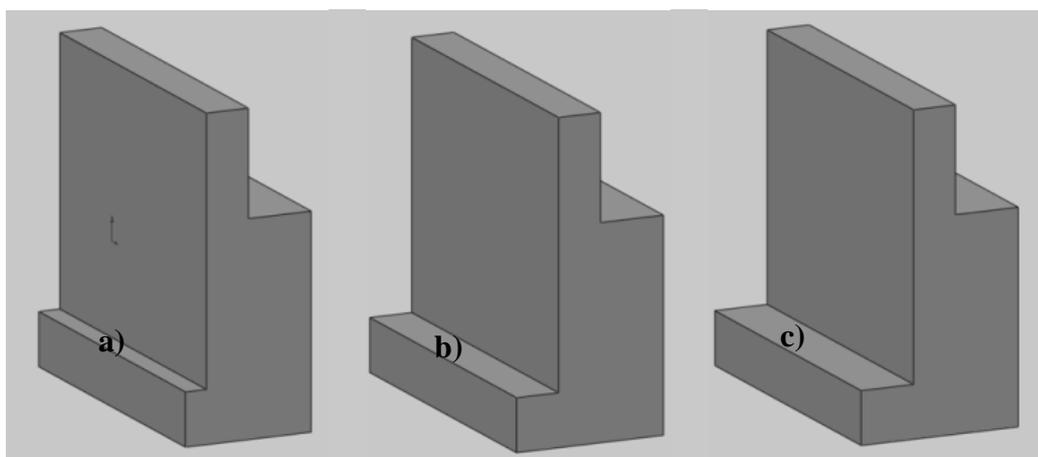


Figura 4.8. Variación de la zona de agarre de los ganchos laterales en función del espesor de pared de los cojinetes, **a)** 1,5 mm, **b)** 3 mm y **c)** 4 mm

En la Tabla 4.9 se muestra la selección de los ganchos de agarre en función del espesor de pared de los cojinetes de contacto deslizante que se van a ensayar.

Tabla 4.9. Ganchos laterales de agarre que deben usarse en función al espesor del cojinete que se va a ensayar.

Espesores de cojinetes (mm)	Espesor de la zona de agarre del gancho lateral (mm)
1 hasta 1,5	1,5
1,5 hasta 3	3
3 hasta 4 (max 6)	4

Como se describió en el capítulo 3, sección 3.2.1.8 el gancho superior fue diseñado de manera universal, es decir este puede ser utilizado para sujetar cojinetes de cualquier diámetro, espesor de pared y anchura no mayor a 30 mm. A

continuación en la Fig. 4.9 se muestra el croquizado y la extrusión del gancho superior.

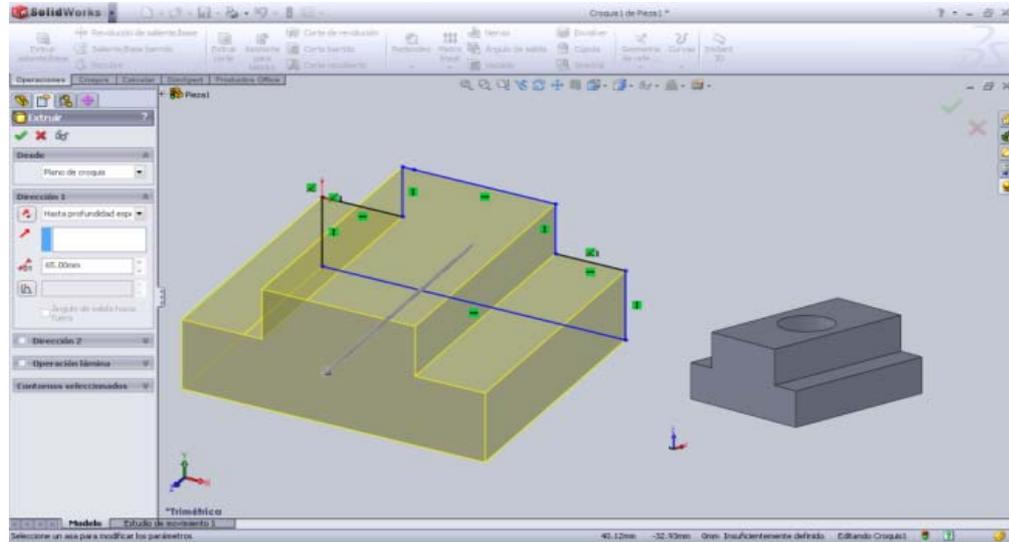


Figura 4.9. Ventana del software Solidworks 2008 mostrando el croquizado y extrusión del gancho superior.

En la Fig. 4.10 se muestra la manera como el gancho superior y los ganchos laterales de agarre sujetan el cojinete de contacto deslizante para evitar que este se libere durante los ensayos de desgaste. En el Anexo D del presente informe se encuentran todas las dimensiones tanto de los ganchos laterales de agarre como del gancho superior.

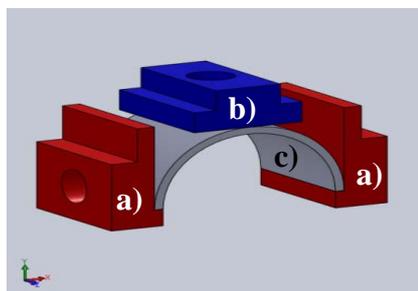


Figura 4.10. Esquema de sujeción para cojinetes, a) Ganchos laterales de agarre, b) Gancho superior y c) Cojinete de contacto deslizante.

4.1.9 Diseño del porta cojinete

Como fue descrito en el capítulo 3, sección 3.2.1.9, el porta cojinete es el encargado de recibir la carga de ensayo y transmitirla a los cojinetes de contacto deslizante o muestras de metal. El porta cojinete cuenta con agujeros roscados de 10 mm de diámetro para alojar al perno empujador superior y pernos empujadores laterales, así como también un agujero para alojar un pasador de 10 mm de diámetro que servirá como pivote del mismo.

En la Fig. 4.11 se muestra el croquizado y extrusión del porta cojinete, al igual que los agujeros roscados donde serán alojados los pernos empujadores y el agujero pasante donde será alojado el pasador de cabeza. Todas las dimensiones del porta cojinete se encuentran en el Anexo D del presente informe.

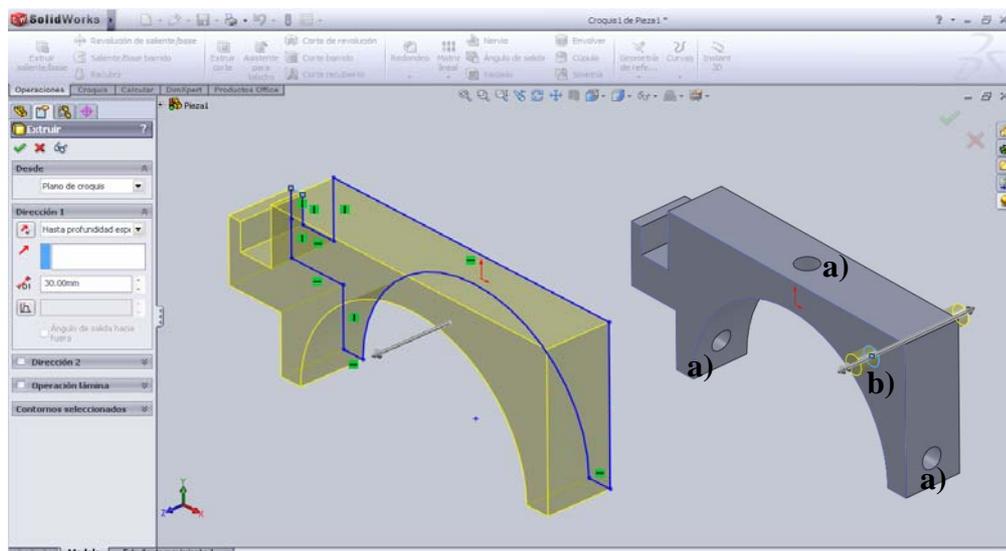


Figura 4.11. Ventana del software Solidworks 2008 mostrando el croquizado y extrusión del porta cojinete, **a)** Agujeros roscados para alojar pernos empujadores, **b)** Agujero para alojar pasador pivote.

A continuación en la Fig. 4.12 se muestra un ensamble digital del porta cojinete, ganchos laterales de agarre, gancho superior, cojinete de contacto deslizante y pernos empujadores (superior y laterales).

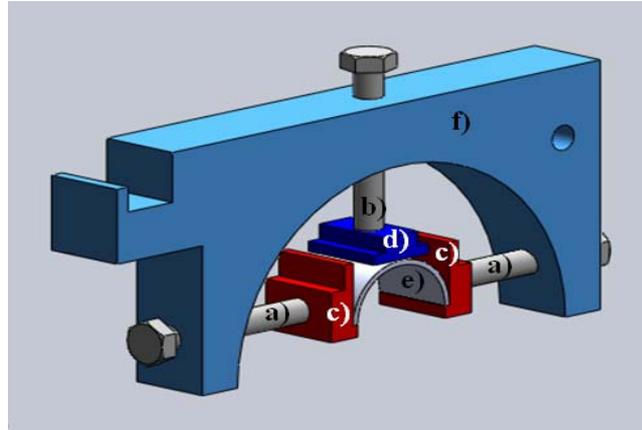


Figura 4.12. Ensamble digital de componentes, a) Pernos empujadores laterales, b) Perno empujador superior, c) Ganchos laterales de agarre, d) Gancho superior, e) Cojinete de contacto deslizante y f) Porta cojinete.

4.1.10 Diseño del porta muestra

Adicionalmente para el equipo de estudio del desgaste fue diseñado un dispositivo para ensayar pequeñas muestras de metal de 10 mm de diámetro y 15 mm de longitud. Este cuenta con dos agujeros, uno en su parte superior de 10 mm de diámetro para ser instalado en el perno empujador superior del porta cojinete y un agujero en su parte inferior donde son alojadas las muestras de metal que se van a ensayar, y que a su vez son sujetadas con un tornillo prisionero. En la Fig. 4.12 se muestra el porta muestra con todas las partes descritas anteriormente, donde: 1) es la vista en perspectiva del porta muestra y 2) la vista de líneas ocultas. En el Anexo D se encuentran todas las dimensiones del porta muestra.

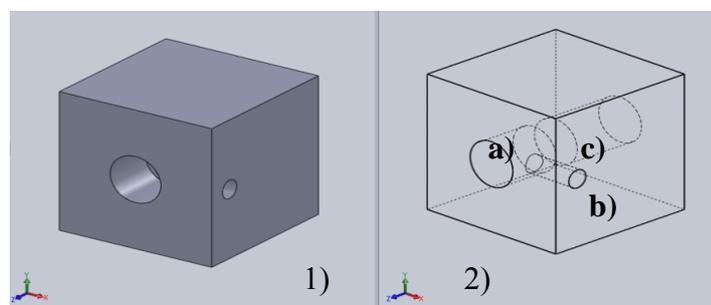


Figura 4.13. a) Agujero para alojar muestras, b) Agujero para el prisionero de ajuste y c) Agujero para alojar el perno empujador superior.

4.1.11 Diseño de la barra de carga

Tal y como se describió en el capítulo 3, sección 3.2.1.11 se diseñó la barra de carga como parte del sistema de transmisión de carga del equipo para el estudio del desgaste. Este elemento transforma bajas cantidades de peso en grandes cargas y las transmite al porta cojinete mediante un contacto entre ambas partes. La barra de carga cuenta con un agujero de 10 mm de diámetro en uno de sus extremos donde se aloja un pasador que sirve como pivote a la misma. En otro de sus extremos posee un agujero de 10 mm de diámetro que servirá para alojar un perno que sujetara una guía para los pesos que serán colocados en la misma durante los ensayos. En la Fig. 4.14 se muestra el modelo en tres dimensiones de la barra de carga con las características antes mencionadas. Todas las dimensiones de la barra de carga se encuentran en el Anexo D del presente informe.

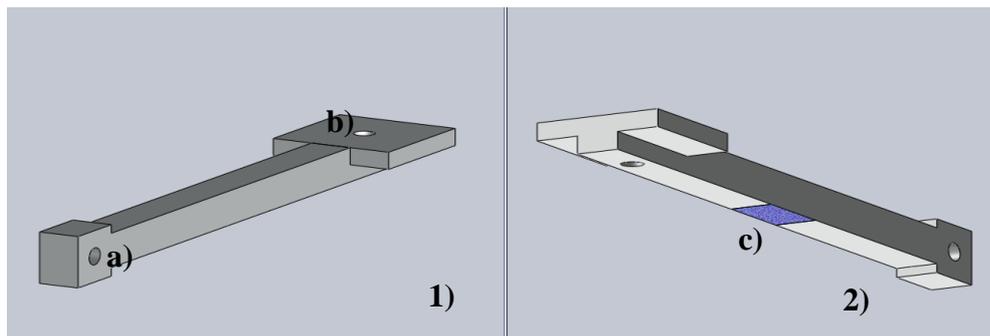


Figura 4.14. Modelo en 3D de la barra de carga 1) Vista trimétrica frontal. 2) Vista trimétrica trasera), a) Agujero para pasador pivote, b) Agujero para perno sujetador de guía y c) Zona de contacto entre la barra de carga y el porta cojinete.

4.1.12 Diseño de soportes verticales

Según lo descrito en el capítulo 3, sección 3.2.1.12 estos elementos servirían para el soporte de la barra de carga y el porta cojinete. Para esto se les diseñó un agujero en su parte superior donde sería alojado un pasador de 10 mm para ensamblar ambas partes (porta cojinete-soporte vertical y barra de carga soporte-vertical) y otro agujero en la parte inferior de 3/8" de diámetro para ser sujetados a la plataforma base del equipo por medio de pernos.

En la Fig. 4.15 se muestra el croquizado y extrusión de los soportes verticales, también se puede observar los agujeros donde será alojado el pasador y el agujero roscado donde será alojado el pernos de fijación. En el Anexo D del presente informe se encuentran todas las dimensiones de los soportes verticales.

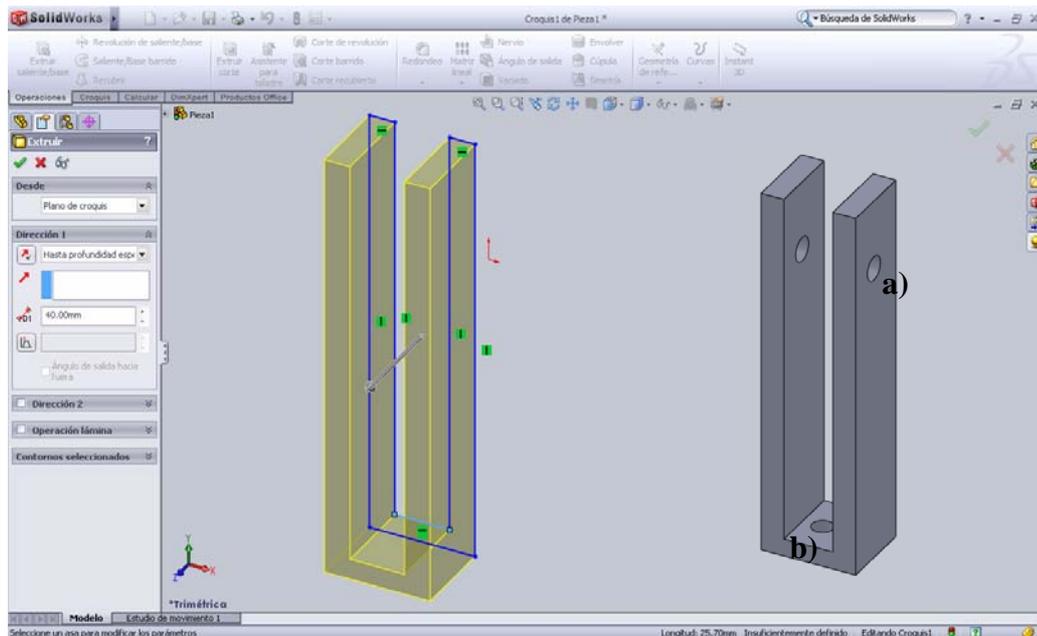


Figura 4.15. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando el croquizado y extrusión de los soportes verticales, **a)** Agujero para alojar pasador de cabeza, **b)** Agujero para alojar perno de fijación.

4.1.13 Diseño de pasadores para porta cojinete y barra de carga

Fueron diseñados pasadores de 10 mm de diámetro de geometría bastante sencilla a fin de facilitar su fabricación. Estos pasadores de cabeza están provistos de un agujero de 1/8" de diámetro en su extremo de menor diámetro, paralelo a la sección transversal de los mismos, esto con la finalidad de alojar una clavija o reten. La razón de esto es evitar que las vibraciones del equipo liberen los pasadores de los soportes verticales durante los ensayos.

En la Fig. 4.16 se muestra el croquizado y extrusión de los pasadores de cabeza con su respectivo agujero para alojar la clavija o reten. En el Anexo D del presente informe se encuentran todas las dimensiones de pasadores de cabeza.

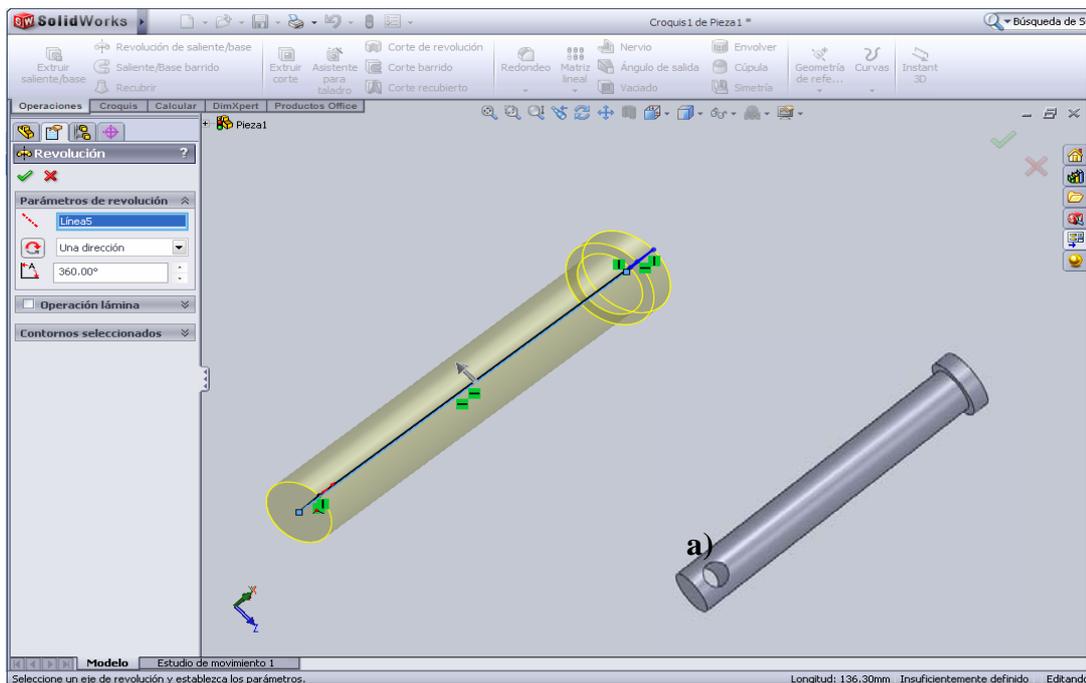


Figura 4.16. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando el croquizado y extrusión de los pasadores para porta cojinete y barra de carga, a) Agujero para alojar clavija o reten.

4.1.14 Diseño de la plataforma base del equipo

En la plataforma base, serán sujetos todos los componentes del equipo mediante pernos de fijación. La plataforma base de 6 mm de espesor cuenta con agujeros de: 3/8" para la sujeción de los soportes verticales, 1/2" para la sujeción de las chumaceras que soportan el eje y 1/4" para la sujeción de la bases del motor eléctrico.

En la Fig. 4.17 se muestra el croquizado y extrusión de la plataforma base del equipo para el estudio del desgaste, así como los agujeros realizados para alojar los diferentes componentes del equipo. En el Anexo D del presente informe se encuentran todas las dimensiones de la plataforma base.

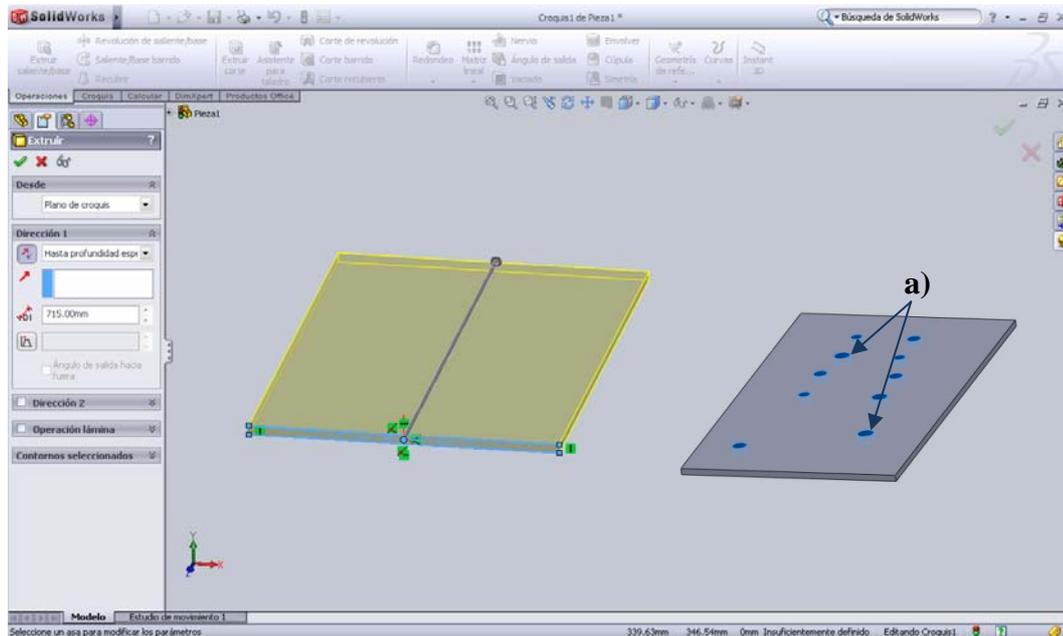


Figura 4.17. Ventana del software Solidworks 2008, mostrando el croquizado y extrusión de la plataforma base del equipo, **a)** Agujeros para alojar pernos de sujeción de los respectivos elementos constitutivos del equipo.

4.1.15 Pernos, tuercas y arandelas seleccionadas

Siguiendo los pasos descritos en el capítulo 3, sección 3.2.1.15 se seleccionaron los pernos para la sujeción de los componentes del equipo cuyas características son las siguientes:

- *Material:* Acero ASTM-A325
- *Esfuerzo de fluencia (F_v) del material:* 1480 kgf/cm^2
- *Tipos de pernos:* 1/4" (sujeción del motor, recomendado por el fabricante del motor), 3/8" (sujeción de los soportes verticales) y 1/2" (sujeción de las chumaceras).
- *Rosca:* UNC, de paso medio- basto

Las cargas que recibe cada perno fueron tomadas de los resultados obtenidos del cálculo de reacciones en el sistema de transmisión de carga y eje, los cuales se presentan en las Tablas 4.5 y 4.7 del presente capítulo. Las cargas críticas seleccionadas fueron las siguientes:

- Pernos de 3/8" de diámetro, para sujeción de los soportes verticales
Carga crítica = 33,94 kgf (332,61 N).
- Pernos de 1/2" de diámetro, para sujeción de las chumaceras
Carga crítica = 17,85 kgf (174,93 N) en cada perno.

A pesar de que la reacción en el punto C_1 (zona de colocación de la chumacera 1) es mayor a la reacción del punto C_2 (zona de colocación de la chumacera 2), se tomó como carga crítica para el diseño de los pernos de sujeción de las chumaceras la reacción en el punto C_2 . Esto se debe a que la reacción en el punto C_1 ejerce una carga de compresión sobre la chumacera 1 y por ende sobre la plataforma base del equipo en ese punto, por tanto la reacción en el punto C_1 afecta más a la plataforma base del equipo que a los pernos de sujeción de la chumacera 1. Mientras que la reacción en el punto C_2 del eje de transmisión de potencia ejerce una carga a tensión la cual afecta directamente a los pernos que sujetan la chumacera 2. Es por ello que se considera esta última como la carga más crítica para los pernos de sujeción de ambas chumaceras.

Una vez conocidas las cargas que actúan en cada perno se comparó el esfuerzo de diseño (σ_d) con el esfuerzo de fluencia del material (F_v). Esto con la finalidad de determinar el factor de seguridad (F_s) de cada uno de los pernos. A continuación se muestran los resultados:

- σ_d para perno de 3/8" = 47,66 kgf/cm², $F_v = 1480$ kgf/cm², $F_s = 31$
- σ_d para perno de 1/2" = 14,09 kgf/cm², $F_v = 1480$ kgf/cm², $F_s = 105$

Los resultados mostrados indican que los pernos comerciales disponibles en el mercado que fueron utilizados en el equipo, presentan una condición segura de diseño.

Ya seleccionados los pernos, y verificando una condición de diseño segura para los mismos, se seleccionaron las tuercas y arandelas correspondiente a cada perno. Tal y como se mencionó en el capítulo 3, sección 3.2.1.15 también se seleccionó la tuerca y arandela para la sujeción de los discos de desgaste al eje de transmisión de potencia. Los resultados de esta selección se muestran a continuación:

- Arandela para perno 1/4" (3,175 mm):
 - Tamaño de arandela* = 1/4" (3,175 mm) W
 - Diámetro interno* = 5/16" (7,937 mm)
 - Diámetro externo* = 47/64" (18,651 mm)
 - Espesor* = 1/16" (1,587 mm)
- Tuerca hexagonal regular para perno 1/4" (3,175 mm):
 - Tamaño nominal del perno* = 1/4" (3,175 mm)
 - Ancho W* = 7/16" (11,112 mm)
 - Tamaño de tuerca* = 7/32" (5,556 mm)
- Arandela para perno 3/8" (9,525 mm):
 - Tamaño de arandela* = 3/8" (9,525 mm) W
 - Diámetro interno* = 7/16" (11,112 mm)
 - Diámetro externo* = 1" (25,4 mm)
 - Espesor* = 1/12" (2,116 mm)
- Tuerca hexagonal regular para perno 3/8" (9,525 mm):
 - Tamaño nominal del perno* = 3/8" (9,525 mm)
 - Ancho W* = 9/16" (14,287 mm)
 - Tamaño de tuerca* = 21/64" (8,334 mm)
- Arandela para perno 1/2" (12,7 mm):
 - Tamaño de arandela* = 1/2" (12,7 mm) W
 - Diámetro interno* = 9/16" (14,287 mm)
 - Diámetro externo* = 1^{3/8}" (34,925 mm)

Espesor = 7/64" (2,778 mm)

- Tuerca hexagonal regular para perno 1/2" (12,7 mm):

Tamaño nominal del perno = 1/2" (12,7 mm)

Ancho W = 3/4" (19,05 mm)

Tamaño de tuerca = 7/16" (11,112 mm)

- Arandela para punta de eje de transmisión de potencia 7/8" (22,225 mm) :

Tamaño de arandela = 7/8" (22,225 mm) W

Diámetro interno = 15/16" (23,812 mm)

Diámetro externo = 1^{3/4}" (44,45 mm)

Espesor = 5/32 (3,968 mm)

- Tuerca hexagonal regular para punta de eje de transmisión de potencia 7/8" (22,225 mm):

Tamaño nominal del eje roscado = 7/8" (22,225 mm)

Ancho W = 1^{5/16}" (33,337 mm)

Tamaño de tuerca = 3/4" (19,05 mm)

Todas las tuercas y arandelas seleccionadas garantizan un ajuste y/o apriete adecuado en todos los elementos constitutivos del equipo para el estudio del desgaste.

4.1.16 Sistema de lubricación para pruebas de desgaste

Tal y como se menciona en el capítulo 3, sección 3.2.16 se diseñó un sistema para lubricar los cojinetes de contacto deslizante y las muestras de metal durante los ensayos. El sistema de lubricación resulta bastante sencillo ya que los discos de desgaste son sumergidos en un depósito de lubricante durante las pruebas logrando que estos creen una película de aceite en su periferia y lubriquen el cojinete o muestra a ensayar. El depósito de lubricante cuenta con una capacidad máxima de 200 ml de lubricante. Además, este depósito de lubricante cuenta con un elemento que puede ascender o descender de acuerdo a la cantidad de lubricante con el que se desee realizar el ensayo. En la Fig. 4.18 se muestra un

ensamble digital de todo el equipo para el estudio del desgaste donde se incluye el sistema de lubricación, donde: a) Motor eléctrico, b) Porta cojinete, c) soporte vertical, d) Deposito de lubricante, e) Plataforma base, f) Banco de pesas, g) Guia de pesas, h) Elemento de ascenso-descenso, i) Gomas antiresbalantes, j) Soporte vertical, k) Barra de carga, m) Eje de transmisión y n) Chumacera.

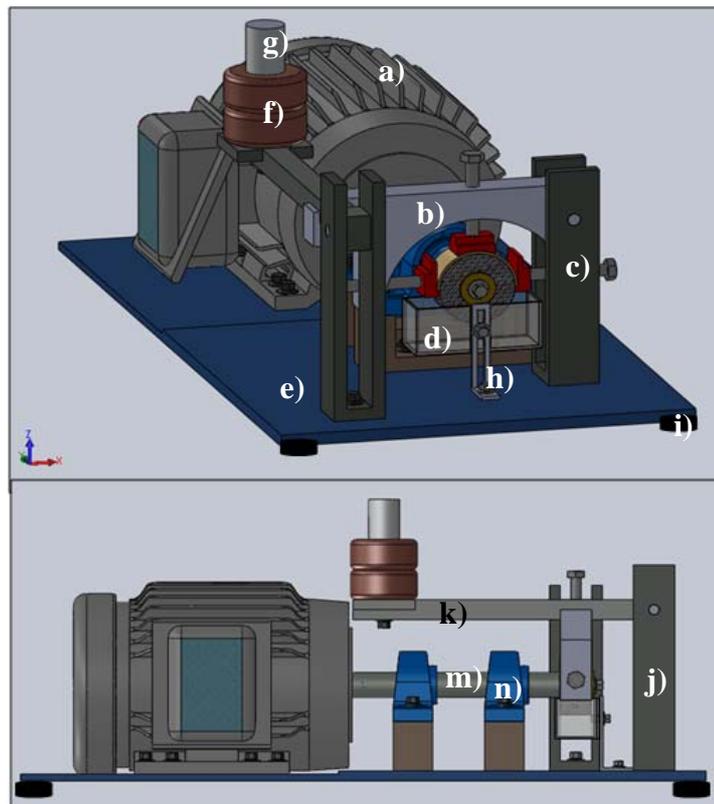


Figura 4.18. Ensamble de todos los elementos constitutivos del equipo para el estudio del desgaste.

En la Fig. 4.19 se muestra el sistema de lubricación para la modalidad de desgaste en cojinetes de contacto deslizante, donde: a) Ganchos laterales de agarre, b) Gancho superior, c) Disco de desgaste, d) Deposito de lubricante, e) Cojinete de contacto deslizante, g) Pasadores de cabeza y f) Tuerca y arandela de sujeción disco de desgaste-eje de transmisión. En la Fig. 4.20 se muestra el sistema de lubricación para la modalidad de desgaste en muestra de metal, donde:

a) Porta muestra, b) Tornillo prisionero para ajuste de muestra y c) Muestra de metal que se va a ensayar.

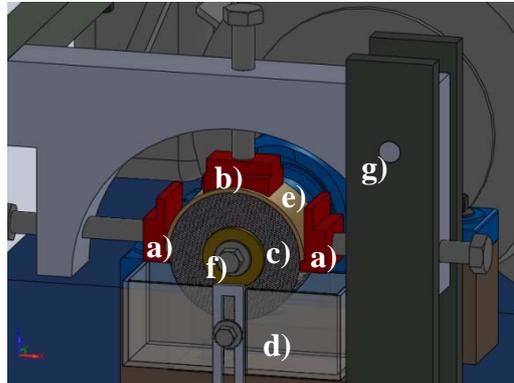


Figura 4.19. Ensamble para la modalidad de ensayo para cojinetes de contacto deslizante.

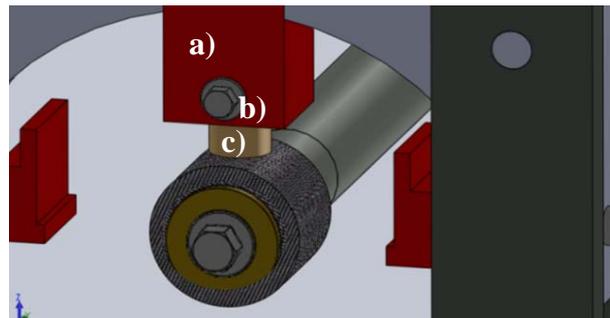


Figura 4.20. Ensamble para la modalidad de ensayo para muestras de metal.

4.2 VALIDACIÓN DEL SOFTWARE SOLIDWORKS 2008

Previo al análisis esfuerzo-deformación de los componentes del equipo para el estudio del desgaste, se llevo a cabo la verificación de los resultados que arroja el Software Solidworks 2008. Esto fue realizado mediante una comparación entre: los resultados obtenidos con ecuaciones de diseño básico de ingeniería y los resultados arrojados por el Software. Esto con la finalidad de observar la diferencia de resultados por ambos métodos y así verificar que tan buenos son los resultados obtenidos por el Software.

La validación de los resultados con el Software Solidworks 2008 se llevó a cabo mediante un ejemplo, el cual consistió en: una barra de acero AISI 1045 estirada en frío, cuyas dimensiones son las siguientes: 100 mm de longitud y 10 mm de diámetro. Esta barra de acero fue restringida en uno de sus extremos en las coordenadas X, Y y Z, mientras que en su otro extremo fue sometida a una carga a tracción de 10000 N. Las propiedades del acero AISI 1045 estirado en frío se describen en la Tabla 4.12.

En las Figs 4.21, 4.22 y 4.23 se muestran los resultados del esfuerzo Von Mises, deformación unitaria y factor de seguridad respectivamente, obtenidos en la simulación de la barra de acero bajo las condiciones descritas anteriormente.

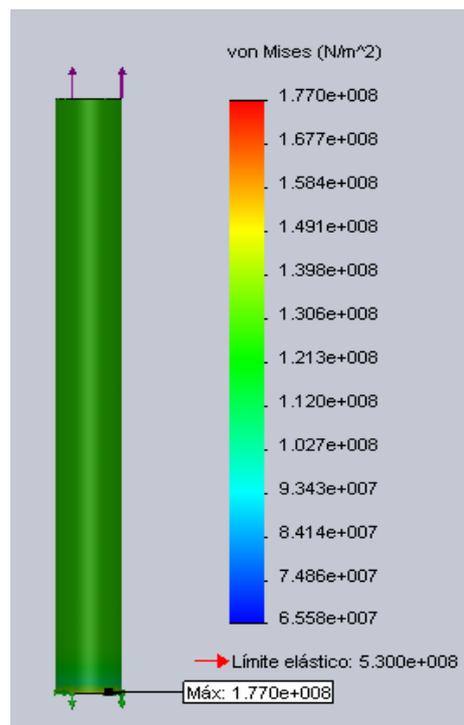


Figura 4.21. Esfuerzo Von Mises ($1,770 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ó Pa) en la barra de acero AISI 1045 estirado en frío.

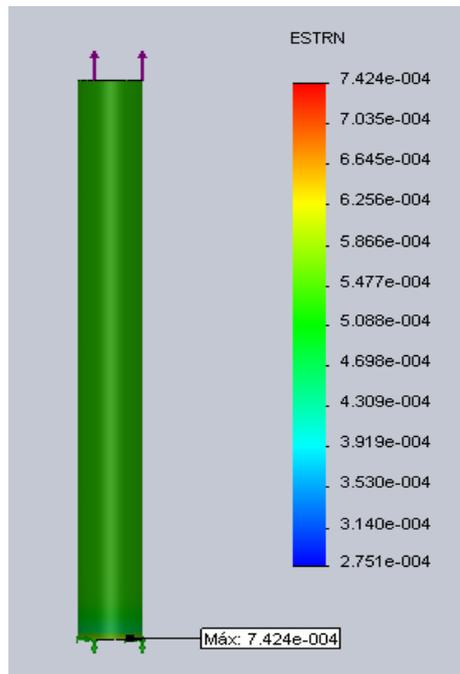


Figura 4.22. Deformación unitaria ($7,424 \times 10^{-4}$) alcanzada en la barra de acero AISI 1045 estirado en frío.

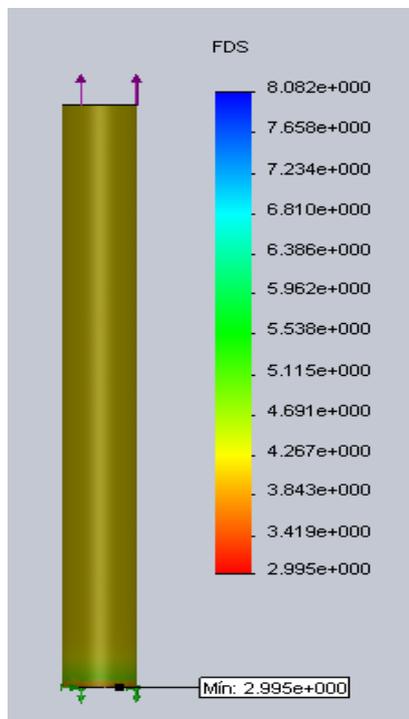


Figura 4.23. Factor de seguridad mínimo (2,995) en la barra de acero AISI 1045 estirado en frío.

Una vez obtenidos los resultados con en el software Solidworks 2008, se realizo el calculó del esfuerzo, la deformación y factor de seguridad de la barra de acero, utilizando ecuaciones básicas de diseño mecánico, cuyos resultados se muestras a continuación:

Utilizando la Ec. (2.1) se calculó el esfuerzo de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{10000 \text{ N}}{3, \frac{14}{4} * (0,01\text{m})^2}$$

$$\sigma = 1,271 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \text{ (Pa)}$$

Utilizando la Ec. (2.7) se calculó la deformación de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{1,27 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{2,05 \times 10^{11} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}$$

$$\varepsilon = 6,195 \times 10^{-4}$$

Utilizando la Ec. (2.12) descrita en el capítulo 2 se calculó el factor de seguridad de la siguiente manera:

$$F_s = \frac{5,03 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{1,27 \times 10^8 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}$$

$$F_s = 3,96$$

Una vez obtenidos los resultados del esfuerzo, la deformación y el factor de seguridad con el software Solidworks 2008 y las ecuaciones básicas de diseño mecánico, se observa una diferencia de los valores obtenidos por ambos métodos ($\sigma_{\text{solidworks}} = 1,770 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, $\sigma_{\text{calculado}} = 1,271 \times 10^8 \text{ N/m}^2$, $\varepsilon_{\text{solidworks}} = 7,424 \times 10^{-4}$, $\varepsilon_{\text{calculado}} = 6,195 \times 10^{-4}$, $F_{s\text{Solidworks}} = 2,995$, $F_{s\text{calculado}} = 3,96$). Este comportamiento

se debe a que el Software Solidworks 2008 utiliza el Método de Elementos Finitos lo cual representa una aproximación de la geometría del sólido que se está simulando y que a través de ecuaciones e iteraciones logran crear un escenario de diseño bastante cercano a la realidad. Mientras que con el cálculo basado solo en ecuaciones básicas de diseño se obtienen resultados de un comportamiento ideal del esfuerzo y las deformaciones, ya que no se toman en cuenta aspectos importantes que pueden producir una variación en los valores obtenidos. En el mismo orden de ideas se observa que los resultados que se obtienen por el Software Solidworks 2008 son más conservadores que los calculados por las ecuaciones básicas de diseño, lo que indica que dichos resultados obtenidos mediante esta herramienta computacional son confiables a la hora de llevar a cabo el diseño de un determinado elemento mecánico.

4.3 ANÁLISIS ESFUERZO-DEFORMACIÓN A LOS COMPONENTES DEL EQUIPO

4.3.1 Análisis de esfuerzo-deformación al ensamble de los componentes del equipo. Modalidad de ensayo de desgaste en cojinetes de contacto deslizante

En la Fig. 4.24 se muestra el esquema de cargas y restricciones realizado, las restricciones 1 y 2 simulan los pernos utilizados para la sujeción de los soportes verticales la plataforma base del equipo. La restricción 3 (en X, Y y Z) simula el soporte que ejercen dos chumaceras colocadas en el eje. La carga 1 simula el peso colocado en el banco de pesas de la barra de carga y la carga 2 el torque máximo que entrega el motor empleado en el equipo.

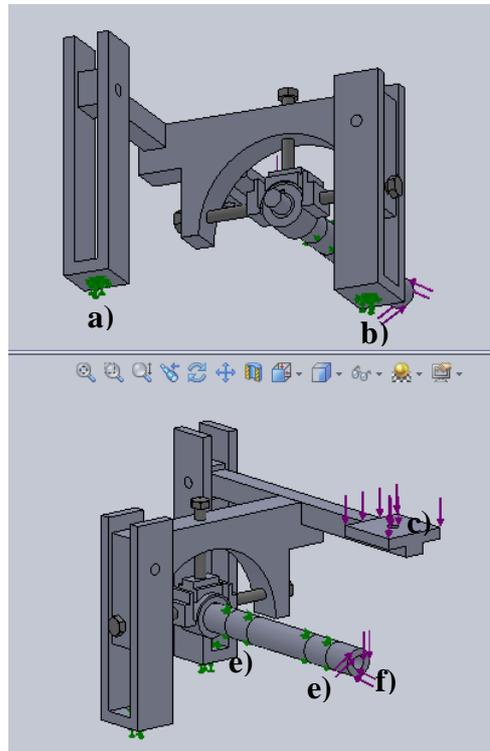


Figura 4.24. Cargas y restricciones del modelo. **a)** Restricción 1, **b)** Restricción 2, **c)** Carga 1, **d)** Carga 2 y **e)** Restricción 3.

A continuación en la Fig. 4.25 se muestra un esquema del mallado del modelo, cuyas especificaciones serán descritas en la Tabla 4.21.

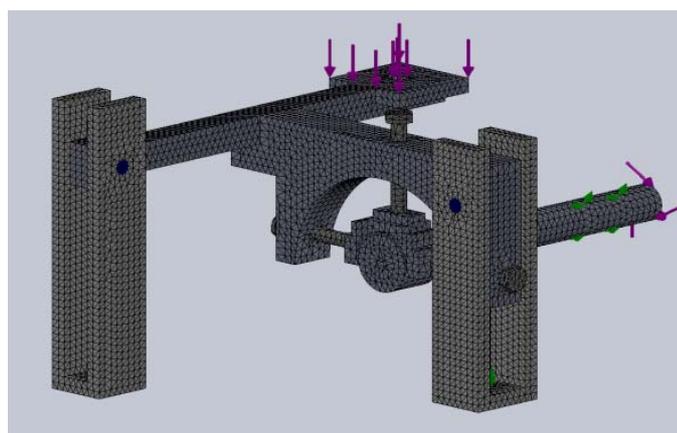


Figura 4.25. Mallado de los elementos para análisis esfuerzo-deformación.

Para la simulación de los componentes del equipo se establecieron las condiciones de estudio descritas en la Tabla 4.10. Las simulaciones se realizaron para cada uno de los tamaños del conjunto disco-cojinete.

Tabla 4.10. Condiciones de simulación para la modalidad de desgaste conjunto disco-cojinete.

Propiedades del estudio	
<i>Tipo de análisis</i>	Estático
<i>Tipo de malla</i>	Malla solida
<i>Unidades</i>	SI. (N/m ² , m)
Materiales	
<i>Acero AISI 1045</i> Barra de carga, eje, porta cojinete, ganchos laterales, gancho superior, pernos empujadores, pasadores, soportes verticales.	<i>Acero AISI 4140</i> Disco de desgaste
Propiedades de material. Acero AISI 1045	
<i>Modulo elástico</i>	2,05 x10 ¹¹ N/m ²
<i>Modulo cortante</i>	8 x10 ¹⁰ N/m ²
<i>Densidad</i>	7850 kg/m ³
<i>Limite de tracción</i>	6,25 x10 ⁸ N/m ²
<i>Limite elástico</i>	5,3 x10 ⁸ N/m ²
<i>Dureza</i>	163 HB
Propiedades de material. Acero AISI 4140	
<i>Modulo elástico</i>	2,01 x10 ¹¹ N/m ²
<i>Modulo cortante</i>	7 x10 ¹⁰ N/m ²
<i>Densidad</i>	7850 kg/m ³
<i>Limite de tracción</i>	9 x10 ⁸ N/m ²
<i>Limite elástico</i>	6,89 x10 ⁸ N/m ²
<i>Dureza</i>	320 HB

Tabla 4.10. Condiciones de simulación para la modalidad de desgaste conjunto disco-cojinete (continuación).

Características del mallado	
<i>Tipo de malla</i>	Malla solida
<i>Mallador utilizado</i>	Estándar
<i>Verificación jacobiana</i>	4 puntos
<i>Tamaño de elementos</i>	4,97 mm
<i>Tolerancia</i>	0,25 mm
<i>Calidad</i>	Alta
<i>Número de elementos</i>	63363
<i>Numero de nodos</i>	101972
<i>Tipo de elemento</i>	Tetraedro de 4 puntos
Cargas y restricciones	
<i>Restricción 1(X,Y,Z) (perno)</i>	Soporte vertical del porta cojinete
<i>Restricción 2 (X,Y,Z) (perno)</i>	Soporte vertical de la barra de carga
<i>Restricción 3(X,Y,Z) (Chumaceras)</i>	Doble restricción en el eje
<i>Carga 1 = 15,56 kgf</i>	Banco de pesas-barra de carga
<i>Carga 2 =1,97 N.m</i>	Torque en el extremo del eje (acople con el motor)

4.3.1.1 Análisis esfuerzo-deformación del modelo. Utilizando disco de desgaste N° 1 (37 mm)

4.3.1.1.1 Esfuerzos Von Mises (N/m²)

A continuación en las Figs. 4.26 y 4.27 se muestran los esfuerzos Von Mises del conjunto bajo las condiciones de simulación descritas en la Tabla 4.9. Nótese el punto máximo de esfuerzo localizado en el perno empujador del gancho superior (Fig. 4.27), con un valor de $1,813 \times 10^{-7} \text{ N/m}^2$.

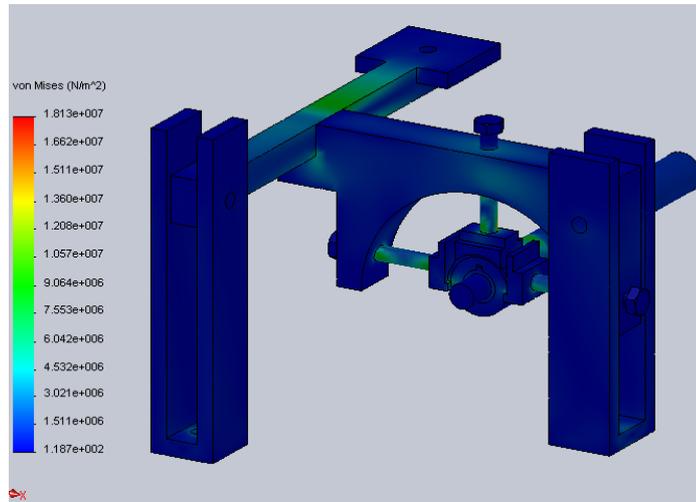


Figura 4.26. Esfuerzos Von Mises en el modelo simulado (vista isométrica frontal).

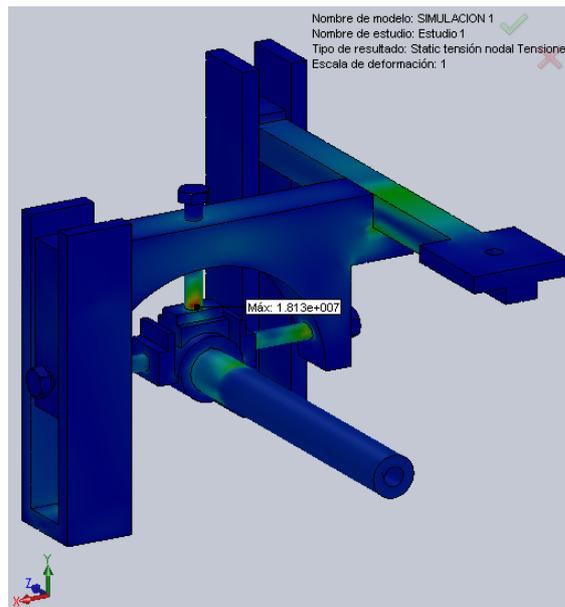


Figura 4.27. Esfuerzos Von Mises en el modelo simulado (vista isométrica trasera).

4.3.1.2 Deformación unitaria (m/m)

En las Figs. 4.28 y 4.29 se muestran la deformación unitaria. Nótese el punto máximo de deformación localizado en el perno empujador del gancho superior (Fig. 4.29), con un valor de $6,784 \times 10^{-5}$ m/m.

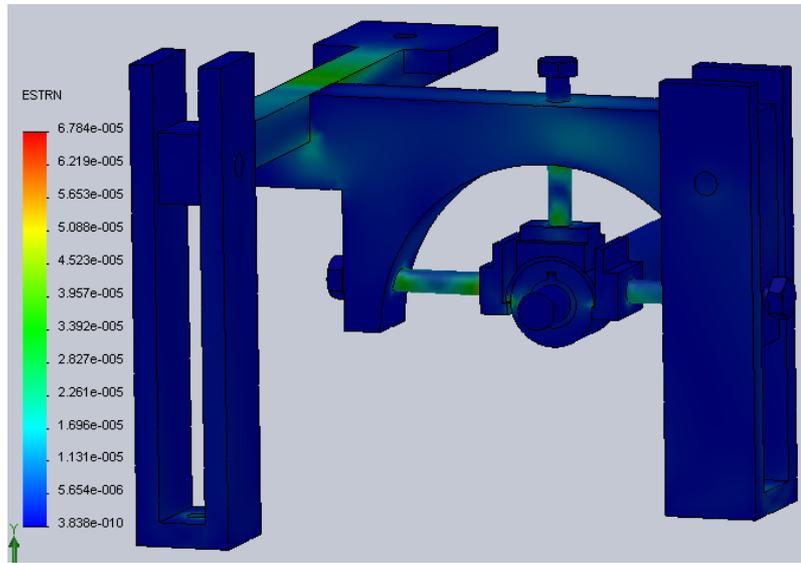


Figura 4.28. Deformación unitaria en el modelo simulado (vista isométrica frontal).

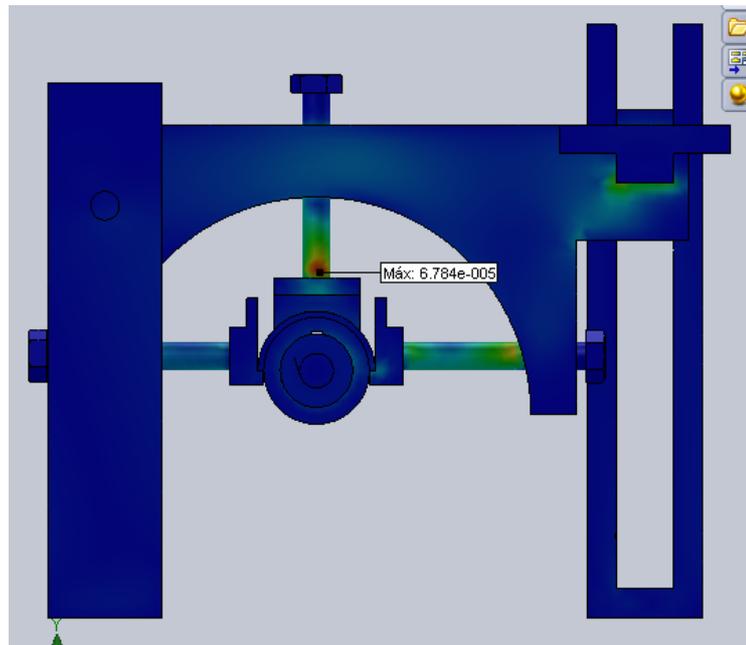


Figura 4.29. Deformación unitaria en el modelo simulado (vista trasera).

4.3.1.3 Factor de seguridad

Las Figs. 4.30 y 4.31 muestran la distribución del factor de seguridad en el conjunto. Nótese el punto mínimo de factor de seguridad localizado en el perno empujador del gancho superior (Fig. 4.31), con un valor de 32,77.

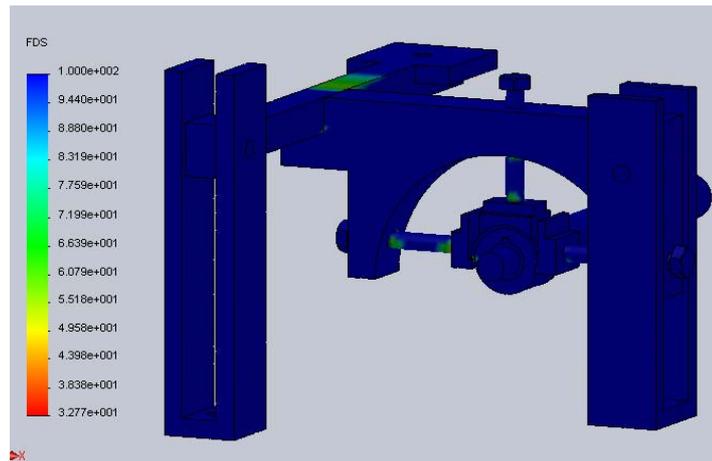


Figura 4.30. Distribución del factor de seguridad en el modelo simulado (vista isométrica frontal).

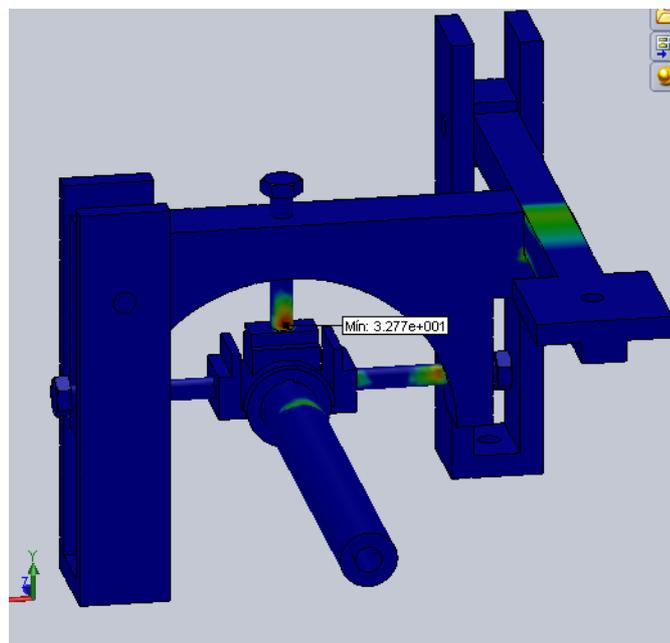


Figura 4.31. Distribución del factor de seguridad en el modelo simulado (vista trimétrica trasera).

4.3.1.4 Trazado de percepción de diseño

En la Fig. 4.32 se muestra un trazado de percepción de diseño, el cual es una herramienta que posee el software Solidworks 2008, que ayuda a conocer las zonas más críticas y no críticas del modelo o aquellas zonas donde puede fallar algunos de los elementos del sistema.

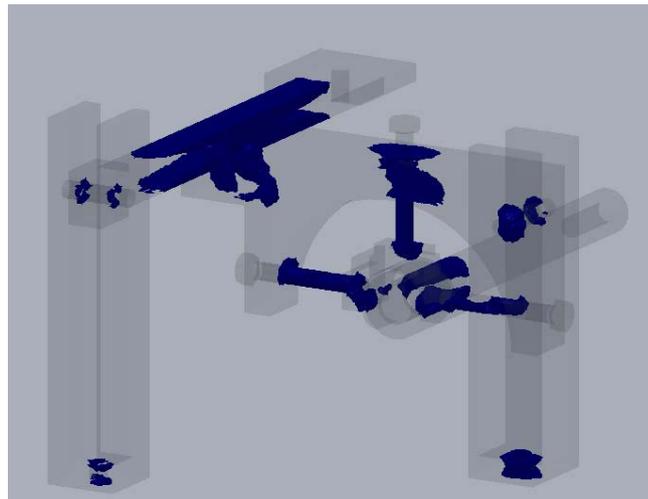


Figura 4.32. Trazado de percepción de diseño del modelo.

4.3.1.5 Resumen de resultados obtenidos de la simulación utilizando disco de desgaste de 37mm

En la Tabla 4.11 se muestra un resumen de los resultados obtenidos de la simulación modalidad ensayo de desgaste en cojinetes de contacto deslizante, utilizando el disco de desgaste de 37 mm.

Tabla 4.11. Resultados de simulación disco de desgaste N°1 (37 mm).

<i>Elemento crítico</i>	Perno empujador del gancho superior
<i>Esfuerzo máximo Von-Mises</i>	$1,813 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
<i>Ubicación</i>	Nodo: 35199. (5.33762 mm, -3.58902 mm, 10.1036 mm)
<i>Deformación unitaria máxima</i>	$6,784 \times 10^{-5} \text{ m/m}$
<i>Ubicación</i>	Elemento: 21293. (4.67381 mm, -3.18288 mm, 11.7951 mm)
<i>Factor de seguridad mínimo</i>	32,77

Los resultados mostrados en la Tabla 4.11, indican que el elemento más crítico del conjunto en el análisis esfuerzo-deformación, resulto ser el perno empujador del gancho superior. Este comportamiento se debe a que en esta zona es donde se registra la mayor fuerza de reacción del ensamble generando un esfuerzo de flexo-compresión en el perno empujador superior, cuyo valor es el es el máximo del modelo. Debido a esto los cálculos mostrados anteriormente en la Tabla 4.5, indican que es en el punto B donde se localiza la mayor fuerza según el análisis de viga realizado. Por otra parte al ser el perno empujador superior el elemento más crítico del conjunto es allí donde registra el mayor grado de deformación unitaria. El factor de seguridad indica que el modelo esta sobre diseñado en gran medida, es decir este resiste mucha más carga de ensayo que a la que estará sometido.

4.3.1.6 Análisis esfuerzo-deformación del modelo. Discos de desgastes N° 2 (57 mm), N° 3 (67mm), N° 4 (77mm), y N° 5 (87mm)

Una vez realizado el análisis esfuerzo-deformación para el disco de desgaste N°1, se realizó bajo las mismas condiciones de simulación mostradas en la Tabla 4.9, el análisis del modelo utilizando los demás discos de desgaste, cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Resultados del análisis esfuerzo-deformación para los diferentes discos de desgaste.

Disco de desgaste N° 2 (57mm)	
<i>Elemento crítico</i>	Perno empujador del gancho superior
<i>Esfuerzo máximo Von-Mises</i>	$1,609 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
<i>Ubicación</i>	Nodo: 35199. (5.33762 mm, -3.58902 mm, 10.1036 mm)
<i>Deformación unitaria máxima</i>	$5,086 \times 10^{-5} \text{ m/m}$
<i>Ubicación</i>	Elemento: 21293. (4.67381 mm, -3.18288 mm, 11.7951 mm)
<i>Factor de seguridad mínimo</i>	33

Tabla 4.12. Resultados del análisis esfuerzo-deformación para los diferentes discos de desgaste (continuación).

Disco de desgaste N° 3 (67mm)	
<i>Elemento crítico</i>	Perno empujador del gancho superior
<i>Esfuerzo máximo Von-Mises</i>	$1,501 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
<i>Ubicación</i>	Elemento: 21293. (4.67381 mm, -3.18288 mm, 11.7951 mm)
<i>Deformación unitaria máxima</i>	$4,092 \times 10^{-5} \text{ m/m}$
<i>Factor de seguridad mínimo</i>	35
Disco de desgaste N° 4 (77mm)	
<i>Elemento crítico</i>	Perno empujador del gancho superior
<i>Esfuerzo máximo Von-Mises</i>	$1,396 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
<i>Ubicación</i>	Nodo: 35199. (5.33762 mm, -3.58902 mm, 10.1036 mm)
<i>Deformación unitaria máxima</i>	$3,269 \times 10^{-5} \text{ m/m}$
<i>Ubicación</i>	Elemento: 21293. (4.67381 mm, -3.18288 mm, 11.7951 mm)
<i>Factor de seguridad mínimo</i>	38
Disco de desgaste N° 5 (87mm)	
<i>Elemento crítico</i>	Perno empujador del gancho superior
<i>Esfuerzo máximo Von-Mises</i>	$1,227 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
<i>Ubicación</i>	Nodo: 35199. (5.33762 mm, -3.58902 mm, 10.1036 mm)
<i>Deformación unitaria máxima</i>	$2,667 \times 10^{-5} \text{ m/m}$
<i>Ubicación</i>	Elemento: 21293. (4.67381 mm, -3.18288 mm, 11.7951 mm)
<i>Factor de seguridad mínimo</i>	43

Los resultados presentados en la Tabla 4.11 indican que un aumento de diámetro del disco de desgaste, genera un decremento del valor de esfuerzo en el perno empujador del gancho superior. Este comportamiento se debe a que cuando se emplean discos de desgaste de mayor diámetro, el perno empujador del gancho superior tiene que desenroscarse del porta cojinete, por ende esto genera que su longitud disminuya y sea menos esbelto (se desplaza el perno hacia arriba), reduciendo el pandeo y la flexo compresión del mismo, generando esfuerzos cada vez menores, aun cuando este sigue siendo el elemento más crítico del conjunto

utilizando cualquiera de los discos de desgaste. La disminución de los esfuerzos ocasiona una disminución en la deformación unitaria y un incremento del factor de seguridad. En las Figs. 4.33 y 4.34 se presentan los esfuerzos en el perno empujador para un ensayo con el disco 1 (Fig. 4.33) y el disco 5 (Fig. 4.34) respectivamente.

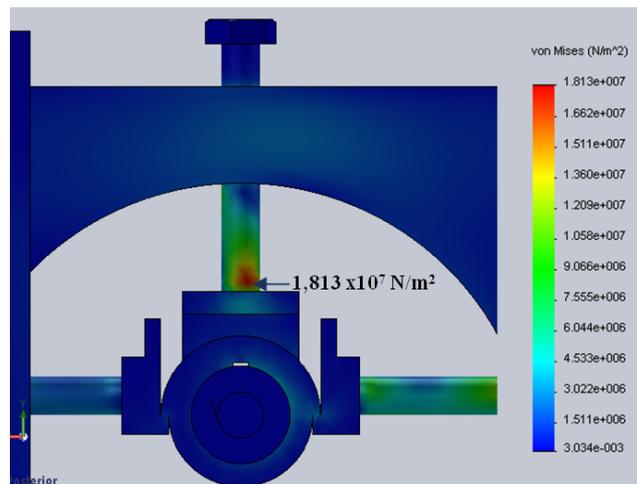


Figura 4.33. Esfuerzos Von Mises en el perno empujador. Utilizando disco de desgaste 1 de 37mm.

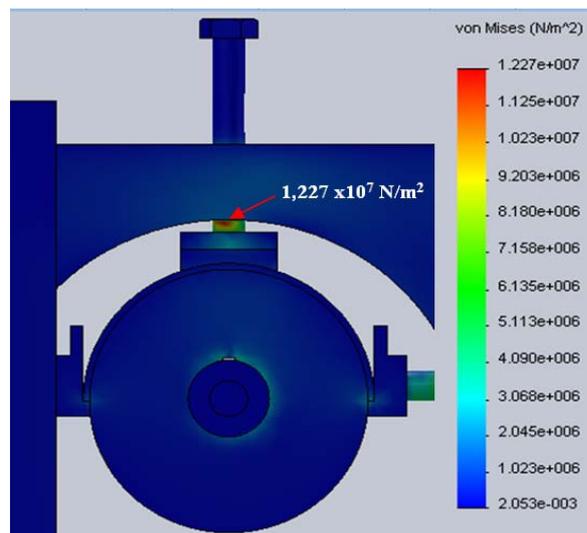


Figura 4.34. Esfuerzo Von Mises en el perno empujador. Utilizando el disco de desgaste 5 de 87mm.

En la Fig. 4.35 se muestra el comportamiento del esfuerzo en el perno empujador del gancho superior en función del diámetro del disco de desgaste.

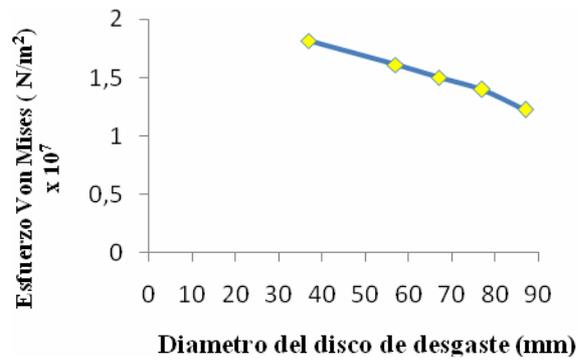


Figura 4.35. Comportamiento del esfuerzo Von Mises en función del diámetro de disco.

La Fig. 4.35 muestra un comportamiento decreciente del esfuerzo en función del diámetro del disco de desgaste, indicando que el ensayo más crítico en la modalidad de desgastes en cojinetes de deslizamiento se presenta cuando se utiliza el disco de desgaste de 37 mm.

4.3.2 Análisis de esfuerzo-deformación al ensamble de los componentes del equipo. Modalidad de ensayo de desgaste en muestra de metal

Las condiciones bajo las cuales se realizó el análisis esfuerzo-deformación para la modalidad de desgaste usando muestras de metales se encuentran descritas en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Condiciones de simulación para la modalidad de desgaste en muestra de metal.

Propiedades del estudio	
Tipo de análisis	Estático
Tipo de malla	Malla solida
Unidades	SI. (N/m ² , m)

Tabla 4.13. Condiciones de simulación para la modalidad de desgaste en muestra de metal (continuación).

Materiales	
<i>Acero AISI 1045</i>	<i>Acero AISI 4140</i>
Barra de carga, eje, porta cojinete, porta muestra, perno empujador superior, pasadores, soportes verticales, disco de desgaste.	Discos de desgaste
Propiedades de material. Acero AISI 1045	
<i>Modulo elástico</i>	$2,05 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
<i>Modulo cortante</i>	$8 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
<i>Densidad</i>	7850 Kg/m^3
<i>Limite de tracción</i>	$6,25 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
<i>Limite elástico</i>	$5,3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
<i>Dureza</i>	163 HB
Propiedades de material. Acero AISI 4140	
<i>Modulo elástico</i>	$2,01 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
<i>Modulo cortante</i>	$7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
<i>Densidad</i>	7850 Kg/m^3
<i>Limite de tracción</i>	$9 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
<i>Limite elástico</i>	$6,89 \times 10^8 \text{ N/m}^2$
<i>Dureza</i>	320 HB
Características del mallado	
<i>Mallador utilizado</i>	Estándar
<i>Verificación jacobiana</i>	4 puntos
<i>Tamaño de elementos</i>	4,97 mm
<i>Tolerancia</i>	0,25 mm
<i>Calidad</i>	Alta
<i>Número de elementos</i>	63105
<i>Numero de nodos</i>	101689
<i>Tipo de elemento</i>	Tetraedro 4 puntos

Tabla 4.13. Condiciones de simulación para la modalidad de desgaste en muestra de metal (continuación).

Cargas y restricciones	
Restricción 1(X,Y,Z) (perno)	Soporte vertical del porta cojinete
Restricción 2(X,Y,Z) (perno)	Soporte vertical de la barra de carga
Restricción 3(X,Y,Z) (Chumaceras)	Doble restricción en el eje
Carga 1 = 15,56 Kgf	Banco de pesas-barra de carga
Carga 2 = 2,413 N.m	Torque en el extremo del eje (acople)

4.3.2.1 Esfuerzos Von Mises (N/m²)

En la Fig. 4.36 se muestra los esfuerzos Von Mises del modelo bajo las condiciones de simulación descritas en la Tabla 4.12. De igual manera que en la modalidad de ensayo para cojinetes, el elemento donde se registra el mayor esfuerzo Von Mises es el perno empujador superior, con un valor de $1,376 \times 10^7$ N/m².

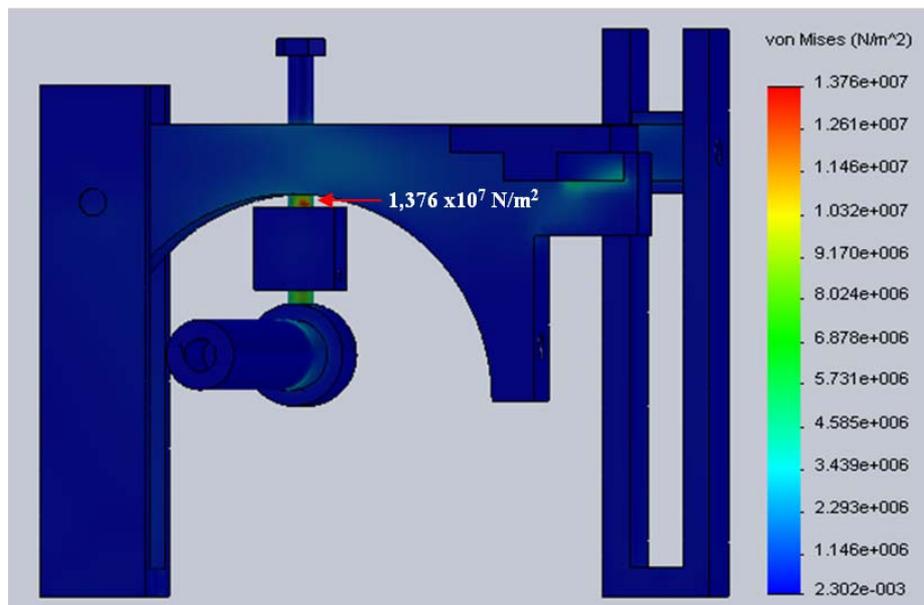


Figura 4.36. Esfuerzos Von Mises del modelo simulado.

4.3.2.2 Trazado de percepción de diseño

En la Fig. 4.37 se muestran las zonas más críticas del modelo, en la modalidad de ensayo de desgaste en muestras de metal, por medio de la herramienta de trazado de percepción del software Solidworks 2008.

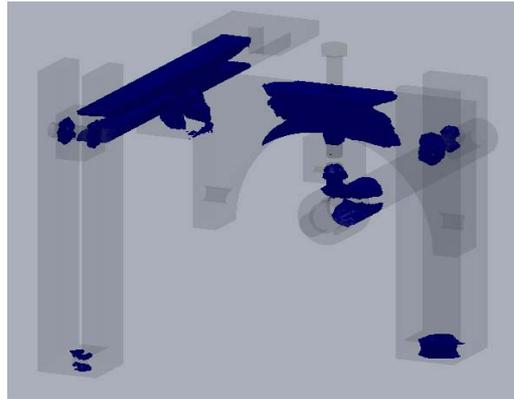


Figura 4.37. Trazado de percepción de diseño del modelo simulado.

En la Tabla 4.14 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en el análisis esfuerzo-deformación para la modalidad de ensayos de desgaste en muestras de metal.

Tabla 4.14. Resultados del análisis esfuerzo-deformación en el modelo.

<i>Elemento crítico</i>	Perno empujador del gancho superior
<i>Esfuerzo máximo Von-Mises</i>	$1,376 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
<i>Ubicación</i>	Nodo: 29119. (5.1733 mm, 19.706 mm, 10.141 mm)
<i>Deformación unitaria máxima</i>	$3,105 \times 10^{-5} \text{ m/m}$
<i>Ubicación</i>	Elemento: 20687. (4.67381 mm, 19.188 mm, 11.7951 mm)
<i>Factor de seguridad mínimo</i>	38

Los resultados mostrados indican que esta modalidad de ensayo es menos crítica en términos de esfuerzo-deformación, a la modalidad de ensayo para desgastes en cojinetes de deslizamiento utilizando el disco de desgaste de 37 mm.

Este comportamiento se debe a que el perno empujador superior se encuentra menos esbelto (es decir menos desenroscado) en la modalidad de ensayo de desgastes en muestra de metal, lo que ocasiona que los esfuerzos de flexo-compresión sean menores.

Se observa entonces que la modalidad de ensayo de desgastes en cojinetes de deslizamiento con el disco de desgastes de 37 mm resulta ser el ensayo más crítico, tanto para los diferentes tamaños del conjunto disco-cojinete, así como también para la modalidad de ensayos de desgaste en muestras de metal.

4.3.3 Análisis de esfuerzo-deformación a la plataforma base del equipo

Para el análisis esfuerzo-deformación de la plataforma base del equipo se establecieron las condiciones de estudio, las cuales son descritas en la Tabla 4.15.

Tabla 4.15. Condiciones de simulación para la plataforma base del equipo.

Propiedades del estudio	
<i>Tipo de análisis</i>	Estático
<i>Tipo de malla</i>	Malla solida
<i>Unidades</i>	SI. (N/m ² , m)
Material	
Acero estructural ASTM- A36	
Propiedades de material	
<i>Modulo elástico</i>	2 x10 ¹¹ N/m ²
<i>Modulo cortante</i>	7,93 x10 ¹⁰ N/m ²
<i>Densidad</i>	7850 kgf/m ³
<i>Limite de tracción</i>	4 x10 ⁸ N/m ²
<i>Limite elástico</i>	2,5 x10 ⁸ N/m ²
Características del mallado	
<i>Tipo de malla</i>	Malla solida
<i>Mallador utilizado</i>	Estándar
<i>Verificación jacobiana</i>	4 puntos
<i>Tamaño de elementos</i>	4,97 mm
<i>Tolerancia</i>	0,25 mm

Tabla 4.15. Condiciones de simulación para la plataforma base del equipo (continuación)

<i>Calidad</i>	Alta
<i>Número de elementos</i>	72709
<i>Numero de nodos</i>	131495
<i>Tipo de elemento</i>	Tetraedro 4 puntos
Cargas y restricciones	Ubicación
<i>Restricción (X,Y,Z) (4 puntos de restricción)</i>	En cada base de la plataforma base
<i>Carga 1 = 15,56 kgf</i>	Fuerza a tracción ejercida por el perno sujetador del soporte vertical de la barra de carga
<i>Carga 2 = 33,94 kgf</i>	Fuerza a tracción ejercida por el perno sujetador del soporte vertical del porta cojinete
<i>Carga 3 = 101,175 kgf</i>	Fuerza a compresión ejercida por la chumacera 1
<i>Carga 4 = 35,691 kgf</i>	Fuerza a tracción ejercida por la chumacera 2
<i>Carga 5 = 9,62 kgf</i>	Peso del motor

En la Fig. 4.38 se muestra el esquema de cargas y restricciones en la plataforma base del equipo.

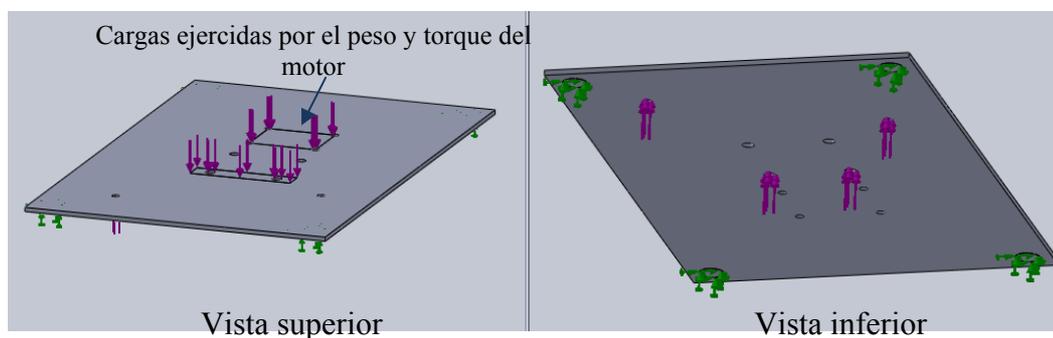


Figura 4.38. Cargas y restricciones del modelo simulado.

4.3.3.1 Esfuerzos Von Mises (N/m^2)

En la Fig. 4.39 se muestran los resultados de los esfuerzos Von Mises bajo las condiciones de simulación descritas en la Tabla 4.14. Donde se observa que la zona donde se registra el mayor esfuerzo Von Mises corresponde al área donde está colocada la chumacera 1 del eje de transmisión de potencia, con un valor de $4,973 \times 10^7 \text{ N/m}^2$.

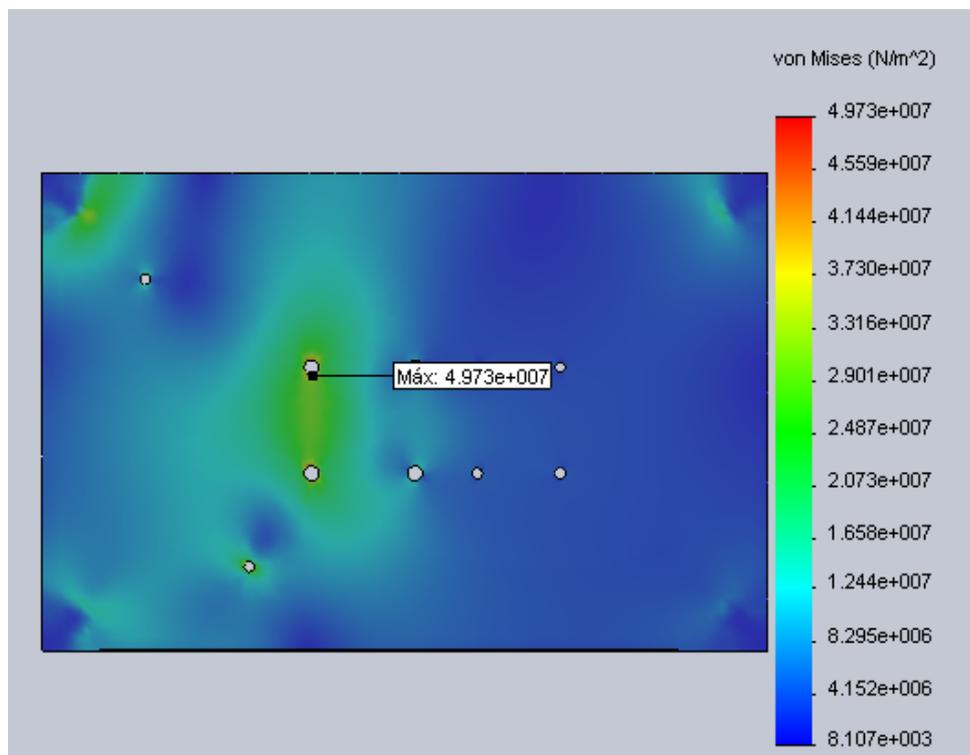


Figura 4.39. Esfuerzos Von Mises en el modelo simulado.

4.3.3.2 Deformación unitaria (m/m)

En la Fig. 4.40 se muestran los resultados de la deformación unitaria. Nótese el punto máximo de deformación en la zona donde está colocada la chumacera 1 del eje de transmisión de potencia, con un valor de $2,089 \times 10^{-4} \text{ m/m}$.

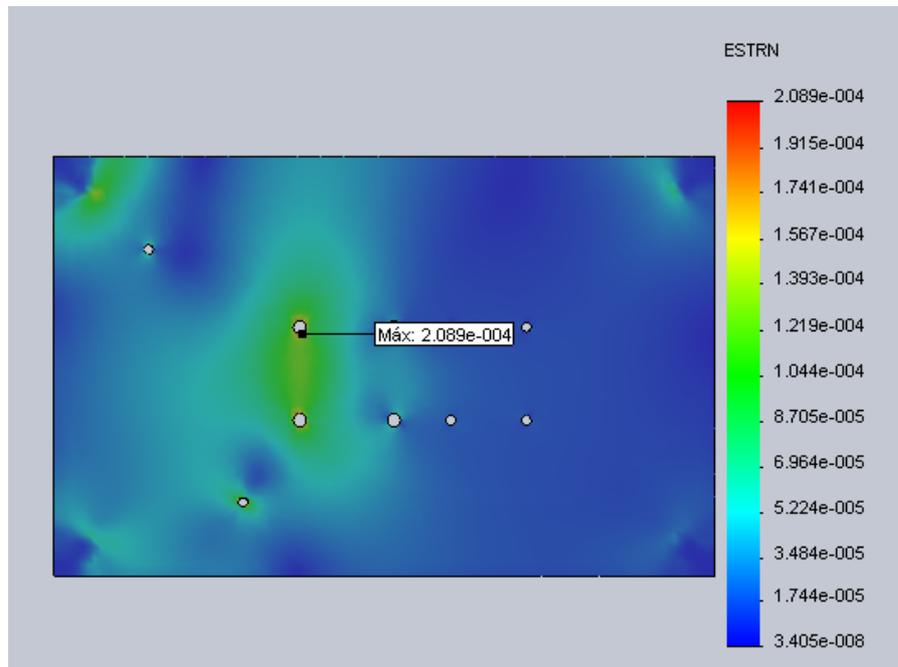


Figura 4.40. Deformación unitaria del modelo simulado.

4.3.3.3 Factor de seguridad

En la Fig. 4.41 se muestra la distribución del factor de seguridad en la zona crítica de la plataforma base, con un valor de 5,027.

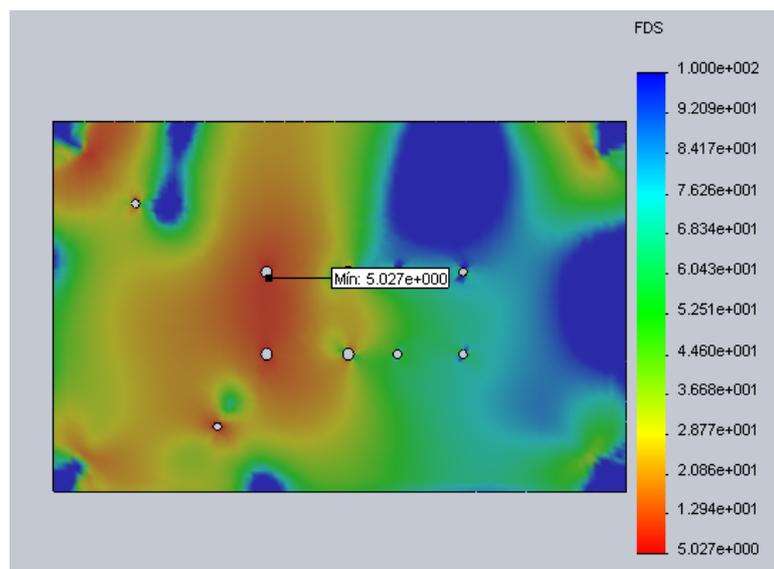


Figura 4.41. Factor de seguridad del modelo simulado.

4.3.3.4 Trazado de percepción de diseño

En la Fig. 4.42 se muestra un trazado de percepción de diseño, el cual representa las zonas más críticas la plataforma base.



Figura 4.42. Trazado de percepción de diseño del modelo simulado.

En la Tabla 4.16 se muestran los resultados obtenidos del análisis esfuerzo-deformación en la plataforma base del equipo.

Tabla 4.16. Resultados del análisis esfuerzo-deformación en la plataforma base del equipo.

Plataforma base del equipo	
<i>Zona crítica</i>	Zona de colocación-chumacera 1
<i>Esfuerzo máximo Von-Mises</i>	$4,9173 \times 10^7 \text{ N/m}^2$
<i>Ubicación</i>	Nodo: 130264. (-35.0173 mm, 5.9999 mm, 113.784 mm)
<i>Deformación unitaria máxima</i>	$2,089 \times 10^{-4} \text{ m/m}$
<i>Ubicación</i>	Elemento: 22661. (-33.2059 mm, 5.39561 mm, 113.155 mm)
<i>Factor de seguridad mínimo</i>	5

Los resultados mostrados en la Tabla 4.16, indican que el mayor esfuerzo Von Mises se encuentra en la zona donde es colocada la chumacera 1. Este comportamiento se debe a que según el cálculo de reacciones en el eje de

transmisión del equipo, en la chumacera 1 se registra mayor carga de reacción (101,175 kgf), esta carga es transmitida a la plataforma base del equipo generando un esfuerzo de flexo-compresión mayor que en las demás zonas de la plataforma base. La deformación unitaria es proporcional al esfuerzo Von Mises, por ende en la zona de mayor esfuerzo también se registra la mayor deformación. La plataforma base presenta un factor de seguridad bastante conservador, es decir esta se encuentra diseñada bajo una condición segura.

4.3.4 Carga máxima que pueden resistir los componentes del equipo para el estudio del desgaste

Para la determinación de la carga máxima que soporta el equipo se tomaron en cuenta varios aspectos, el primero de estos fue tomando como elemento más crítico el rodamiento de la chumacera 1, segundo tomando como elemento más crítico la plataforma base del equipo y tercero tomando en cuenta los componentes principales.

4.3.4.1 Carga máxima a aplicar en el equipo considerando falla en el rodamiento de la chumacera 1

- *Carga dinámica máxima del rodamiento(C) = 14000 N*
- *Carga P soportada = 141,42 kgf*
- *Carga máxima que puede ser colocada en la barra de carga antes que el rodamiento de la chumacera 1 falle = 21,62 kgf*

4.3.4.2 Carga máxima a aplicar en el equipo considerando falla en la plataforma base del equipo

- *Carga máxima que soporta la plataforma base en la zona más crítica = 350 kgf*
- *Carga máxima que puede ser colocada en la barra de carga antes que falle la plataforma base = 54,63 kgf*

4.3.4.3 Carga máxima a aplicar en el equipo considerando falla en los componentes principales del equipo

- Carga máxima que resiste el elemento más crítico (perno empujador del gancho superior) = 1263 kgf
- Carga máxima que puede ser colocada en la barra de carga antes que el perno empujador del gancho superior falle = 300 kgf

4.4 ANÁLISIS DE FATIGA A LOS COMPONENTES DEL EQUIPO

El análisis de fatiga en los componentes principales del equipo para el estudio del desgaste, fue ejecutado tomando en cuenta la modalidad de ensayo de desgaste en cojinetes de deslizamiento, utilizando el disco de desgaste de menor diámetro (disco N°1), ya que como se explicó anteriormente, resultó ser el ensayo más crítico en el equipo, en términos de esfuerzo y deformación para los componentes. Cabe destacar que las condiciones de cargas y restricciones del modelo son las mismas que las descritas en la sección 4.2.1 del presente capítulo, Tabla 4.9.

En la Tabla 4.17 se muestran las condiciones bajo las cuales se realizó el análisis de fatiga.

Tabla 4.17. Condiciones de simulación para el análisis de fatiga.

Propiedades del estudio	
<i>Calculador de tensiones alternas</i>	Tensiones equivalentes (Von Mises)
<i>Criterio de estudio (Corrección de tensiones medias)</i>	Método Soderberg
<i>Cargas (relación de esfuerzos)</i>	Relación de esfuerzo, LR = 0
Curva S-N de fatiga	
<i>Interpolación</i>	Log-log
<i>Derivativa a partir del modelo de elasticidad del material</i>	Basado en curva ASME para aceros al carbono

4.4.1 Vida total y daños en el equipo bajo efectos de fatiga

En las Figs. 4.43 y 4.44 se muestran los efectos de la fatiga en los componentes del equipo, donde cada ciclo representa un ensayo realizado. El análisis de fatiga se realizó utilizando la carga máxima de ensayo (15,56 Kgf) y el disco de desgaste N°1 (37mm).

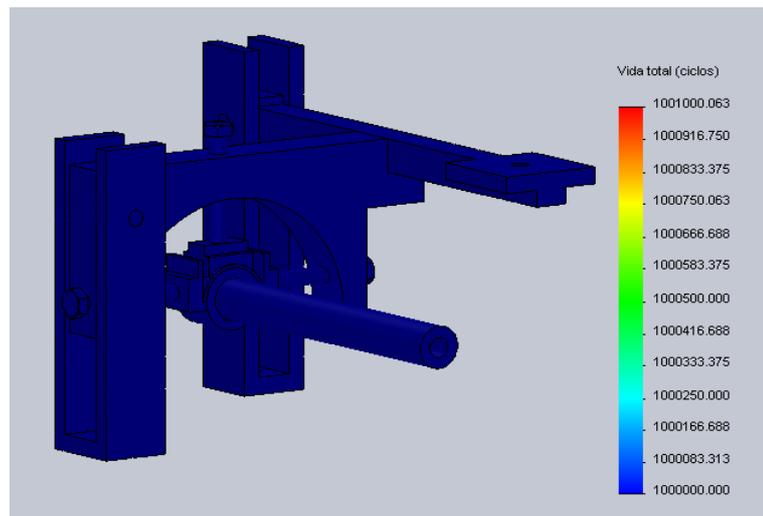


Figura 4.43. Ciclos del modelo, 1001000,063 ciclos o números de ensayos que resiste el equipo antes de presentar algún daño por fatiga.

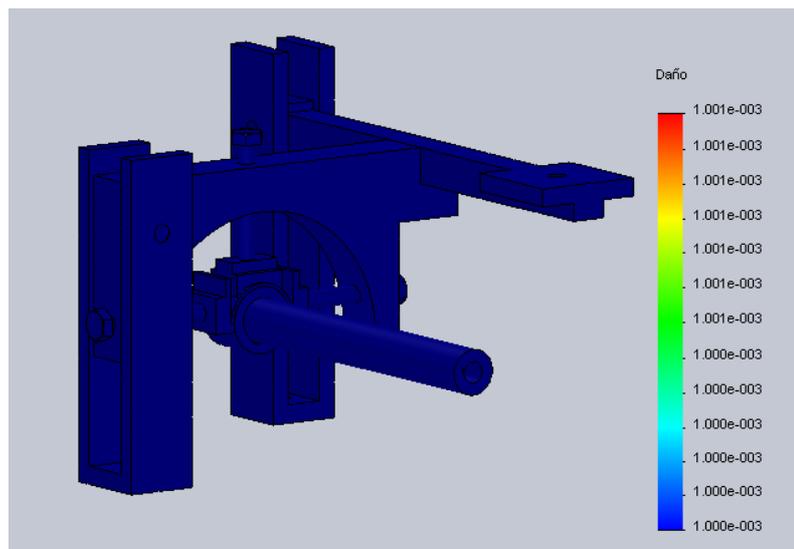


Figura 4.44. Porcentaje de daño en el modelo, 0,001 %, para un número de 1001000,063 ensayos.

4.4.2 Análisis de fatiga bajo esfuerzos invertidos al eje de transmisión de potencia

Como se menciona en el capítulo anterior, el eje de transmisión de potencia representa uno de los elementos más críticos en cualquier equipo rotativo, por esto es importante incluir un segundo análisis de fatiga bajo esfuerzos invertidos en cada ciclo. En la Tabla 4.18 se muestran las condiciones bajo las cuales se realizó el estudio.

Tabla 4.18. Condiciones de simulación para el análisis de fatiga del eje.

Propiedades del estudio	
<i>Calculador de tensiones alternas</i>	Tensiones equivalentes (Von Mises)
<i>Criterio de estudio (Corrección de tensiones medias)</i>	Método Soderberg
<i>Cargas (relación de esfuerzos)</i>	Relación de esfuerzo, completamente invertido, LR = -1
Curva S-N de fatiga	
<i>Interpolación</i>	Log-log
<i>Derivativa a partir del modelo de elasticidad del material</i>	Basado en curva ASME para aceros al carbono
Cargas y restricciones del modelo	
<i>Carga 1 = 1,97 N-m</i>	Torque en el acople del eje con el motor
<i>Carga 2 = 65,47 kgf</i>	(Fuerza máxima de ensayo(Fn) Punto A1, normal al eje de giro, transmitida por el perno empujador del gancho superior)
<i>Restricciones (X,Y,Z)(chumaceras)</i>	Doble restricción, en los puntos C ₁ y C ₂

En la Fig. 4.45 se muestra el esquema de cargas y reacciones, para el análisis de fatiga en el eje de transmisión de potencia.

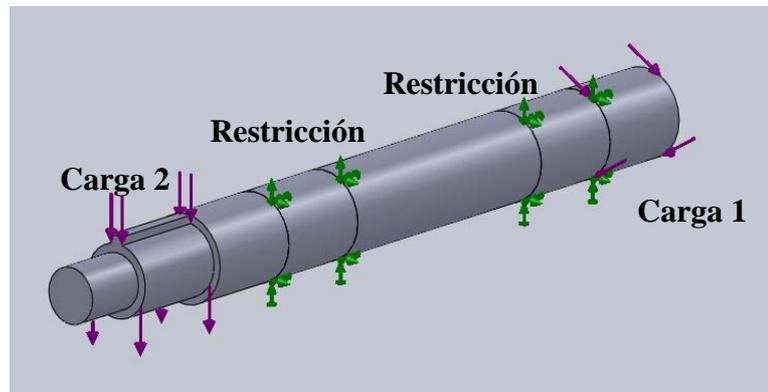


Figura 4.45. Cargas y restricciones del modelo en estudio.

4.4.2.1 Vida total y daños del eje bajo efectos de fatiga

En las Figs. 4.46 y 4.47 se muestran los efectos de la fatiga sobre el eje de transmisión de potencia, expresados en números de ciclos, donde cada ciclo es una revolución que realiza el eje.

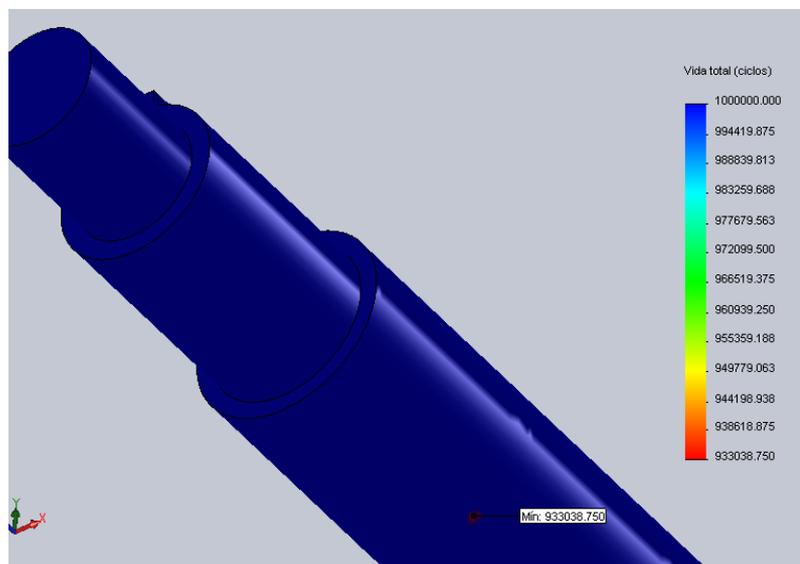


Figura 4.46. Ciclos del modelo, 933038,750 ciclos o revoluciones del eje, antes de presentar algún daño por fatiga.

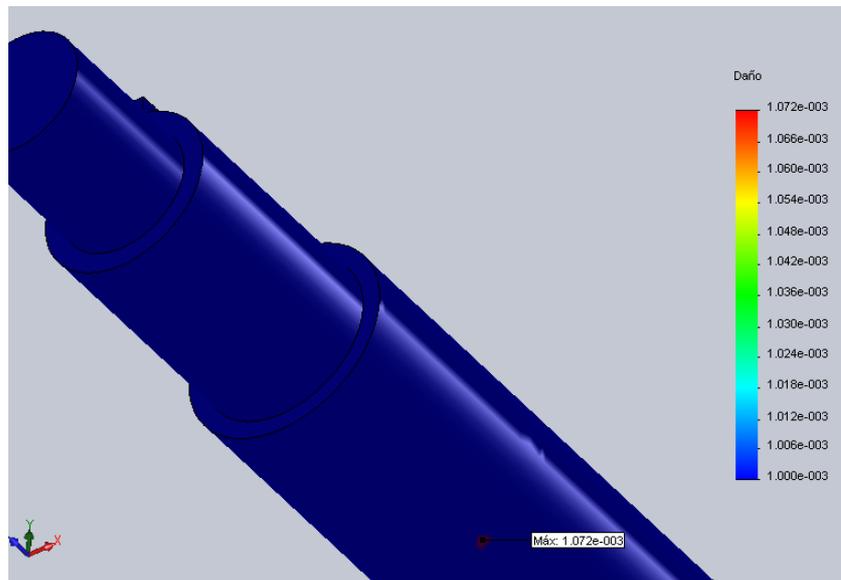


Figura 4.47. Porcentaje de daño en el modelo, 0.001072 %, para un número de 933038,750 revoluciones del eje.

Los resultados mostrados para el análisis de fatiga de los componentes principales del equipo para el estudio del desgaste, indican que el número de ciclos que resisten los componentes corresponden a una condición segura de diseño (ciclos ≥ 1000000), por tanto las piezas del equipo sometidas a cargas se espera que no tengan un fallo temprano por efectos de fatiga. Por su parte, el segundo análisis de fatiga realizado al eje bajo esfuerzos alternantes completamente invertido, muestran de igual manera que este se encuentra bajo una condición segura de diseño, lo cual nos indica que este componente es muy poco probable que falle por efectos de fatiga. Aproximadamente el daño ocasionado por la fatiga a los elementos principales del equipo en promedio corresponden al 0,001 %, lo cual es un valor prácticamente despreciable. Todos estos comportamientos obedecen al alto factor de seguridad de poseen los componentes del equipo.

4.4.3 Análisis de fatiga en la plataforma base del equipo

Tomando en cuenta el análisis esfuerzo-deformación descrito en la Tabla 4.15, se realizó el análisis de fatiga en la plataforma base del equipo, cuyas condiciones de estudio se muestran a continuación en la Tabla 4.19.

Tabla 4.19. Condiciones de simulación para el análisis de fatiga en la plataforma base del equipo.

Propiedades del estudio	
<i>Calculador de tensiones alternas</i>	Tensiones equivalentes (Von Mises)
<i>Criterio de estudio (Corrección de tensiones medias)</i>	Método Soderberg
<i>Cargas (relación de esfuerzos)</i>	Relación de esfuerzo, LR = 0
Curva S-N de fatiga	
<i>Interpolación</i>	Log-log
<i>Derivativa a partir del modelo de elasticidad del material</i>	Basado en curva ASME para aceros al carbono

4.4.3.1 Vida total y daños en la plataforma del equipo bajo efectos de fatiga

En las Figs. 4.48 y 4.49 se muestran los efectos de la fatiga sobre la plataforma base del equipo, expresados en números de ciclos, donde cada ciclo corresponde a un ensayo realizado en el equipo.

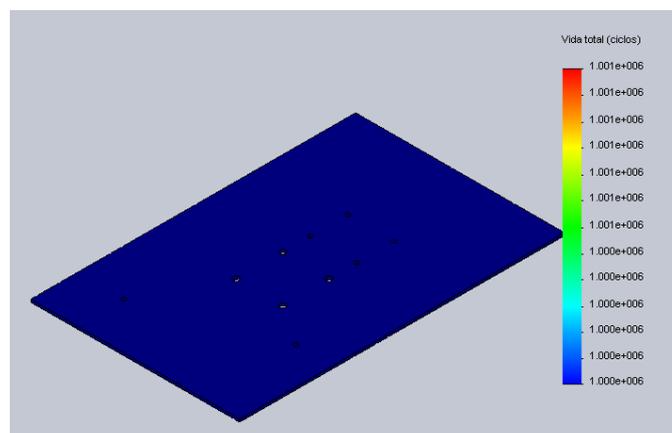


Figura 4.48. Vida total del modelo en ciclos, 1001000,01 o números de ensayos que resiste la plataforma base del equipo antes de presentar algún daño por fatiga.

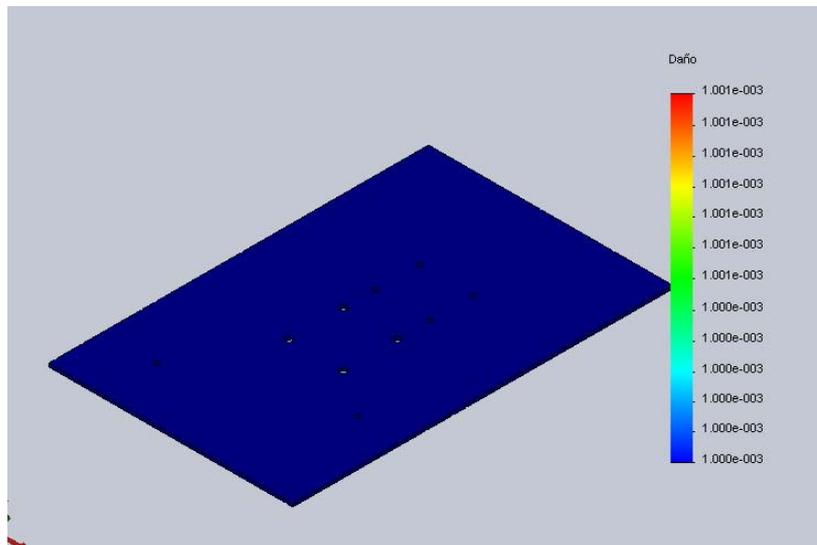


Figura 4.49. Porcentaje de daño en el modelo, 0.001 %, luego de 1001000,01 ensayos en el equipo.

Los resultados obtenidos en el análisis de fatiga de la plataforma base del equipo, muestran que este está diseñado bajo una condición segura y que la vida en ciclo de este elemento es de aproximadamente 1001000,01 ciclos, lo cual indica que no se produce un fallo temprano por fatiga del mismo. El porcentaje de daño del elemento debido a la fatiga es de 0,001 %, lo cual representa un valor prácticamente despreciable. Este comportamiento es debido al alto factor de seguridad con el cual se diseñó este elemento.

4.5 ELABORACIÓN DE PLANOS DE LOS COMPONENTES DEL EQUIPO

Como parte del proceso de diseño, se elaboraron planos de cada una de las piezas que conforman el equipo, esto a fin de garantizar facilidad, precisión y exactitud a la hora de llevar a cabo el proceso de fabricación de las partes. En el Anexo D del presente informe, se encuentran los planos de cada una de las piezas que conforman el equipo para el estudio del desgaste.

4.6 CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

4.6.1 Fabricación de los elementos constitutivos del equipo

Todos los componentes del equipo fueron fabricados mediante procesos de mecanizado con arranque de viruta, llevados a cabo mediante máquinas herramientas automáticas y semiautomáticas.

En la Tabla 4.20 se muestran los componentes fabricados, proceso de mecanizado y material de fabricación, seguido a esto en la Tabla 4.20 se muestran los materiales prefabricados que fueron adquiridos para el ensamble del equipo.

Tabla 4.20. Piezas fabricadas, procesos empleados y material de fabricación para la construcción del equipo.

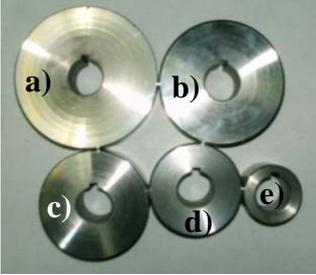
Componente	Proceso de Mecanizado	Material de Fabricación
<p><i>Eje de transmisión de potencia. a) Tuerca de sujeción y arandela para acople discos de desgaste-eje</i></p> 	<p><i>Cilindrado Refrentado Taladrado Roscado Brochado</i></p>	<p><i>Acero AISI 1045, estirado en frío</i></p>
<p><i>Discos de desgaste. Ø ext: a) 87mm, b) 77mm, c) 67mm, d) 57 mm, e) 37mm</i></p> 	<p><i>Cilindrado Taladrado Refrentado Brochado</i></p>	<p><i>Acero AISI 4140</i></p>

Tabla 4.20. Piezas fabricadas, procesos empleados y material de fabricación para la construcción del equipo (continuación).

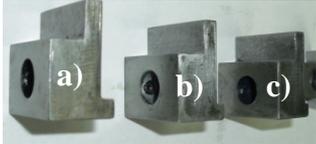
<p><i>Porta cojinete</i></p> 	<p><i>Fresado Taladrado Roscado</i></p>	<p><i>Acero AISI 1045, estirado en frio</i></p>
<p><i>Ganchos laterales de agarre para cojinetes de espesor: a) 1mm, b) 2-3 mm y c) 4mm</i></p> 	<p><i>Fresado Taladrado Roscado</i></p>	<p><i>Acero AISI 1045, estirado en frio</i></p>
<p><i>Gancho superior</i></p> 	<p><i>Fresado Taladrado Roscado</i></p>	<p><i>Acero AISI 1045, estirado en frio</i></p>
<p><i>Porta muestra</i></p> 	<p><i>Fresado Taladrado Roscado</i></p>	<p><i>Acero AISI 1045, estirado en frio</i></p>
<p><i>Barra de carga</i></p> 	<p><i>Fresado Taladrado</i></p>	<p><i>Acero AISI 1045, estirado en frio</i></p>

Tabla 4.20. Piezas fabricadas, procesos empleados y material de fabricación para la construcción del equipo (continuación).

<p style="text-align: center;"><i>Soporte vertical</i></p> 	<p style="text-align: center;"><i>Fresado Taladrado</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>Acero AISI 1045, estirado en frio</i></p>
--	---	---

Tabla 4.21. Componentes y piezas prefabricadas adquiridas para el ensamble del equipo.

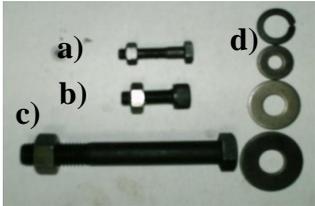
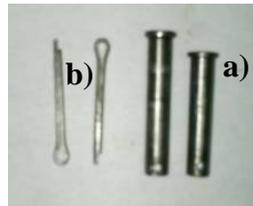
Componentes y piezas prefabricadas
<p><i>a) Pernos de sujeción para motor, b) Pernos de sujeción para soportes verticales, c) Pernos de sujeción para chumaceras, d) Arandelas planas</i></p> 
<p style="text-align: center;"><i>Pernos empujadores</i></p> 

Tabla 4.21. Componentes y piezas prefabricadas adquiridas para el ensamble del equipo (continuación).

a) Pasadores de sujeción de soporte verticales con porta cojinetes y barra de carga, b) Reten para pasadores



Lamina metálica para la plataforma base del equipo



Deposito acrílico para lubricante



Pesas tipo disco, para barra de carga



Rodamientos tipo Chumaceras para soporte del eje



El equipo fue ensamblado siguiendo todas las normas de seguridad correspondiente. Los pasos para el ensamble del equipo son descritos en el manual de usuario. (Anexo C, sección C.1).

El ajuste de la desalineación del eje del equipo fue llevado a cabo utilizando un reloj comparador, el cual fue colocado en seis puntos diferentes del eje (en las coordenadas X y Y), mientras este se encontraba en movimiento y sin carga aplicada en el equipo, donde en cada uno de los puntos de colocación se tomo el valor de desalineación del mismo, y luego se fue ajustando hasta aproximar dichos valores a cero. Todo esto con la finalidad de reducir las vibraciones en el sistema. En las Figs. 4.50, 4.51, y 4.52 se muestran, la manera como se instaló el instrumento en el equipo y los diferentes puntos de medición de la desalineación del eje.

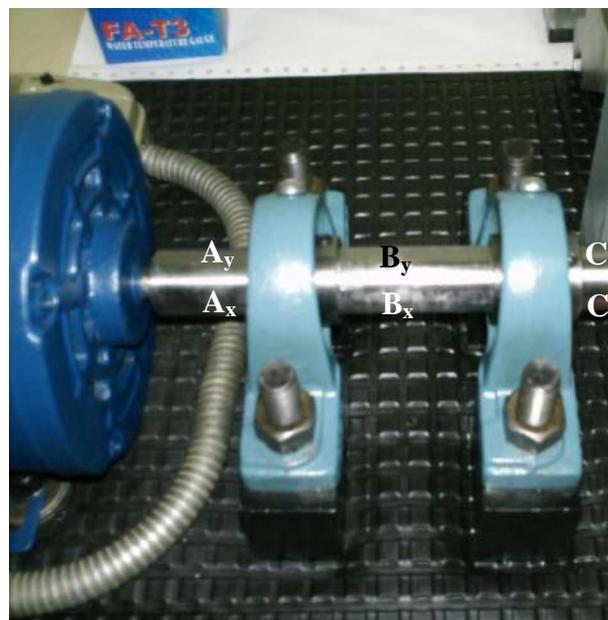


Figura 4.50. Puntos donde se realizaron las mediciones de desalineación del eje.



Figura 4.51. Instalación del reloj comparador en el equipo.



Figura 4.52. Instalación del reloj comparador en los diferentes puntos del eje de transmisión de potencia.

A continuación en la Tabla 4.22 se muestran los valores de desalineación del eje de transmisión de potencia para los puntos $A_{(x,y)}$, $B_{(xy)}$ y $C_{(x,y)}$.

Tabla 4.22. Valores de desalineación en el eje de transmisión de potencia en diferentes puntos.

Punto A_x	0,005 mm
Punto A_y	0,008 mm
Punto B_x	0,009 mm
Punto B_y	0,007 mm
Punto C_x	0,012 mm
Punto C_y	0,017 mm

En los resultados mostrados se observa que los valores de desalineación en el eje son bastante cercanos a cero, lo que trae como consecuencia una reducción significativa de la vibración en el equipo a la hora de que esta sea puesta en marcha, este comportamiento es satisfactorio para el equipo ya que evita el desajuste en los elementos así como también la vibración del sistema, mejorando significativamente el funcionamiento del mismo. El incremento del valor de desalineación a medida que se toman puntos más lejos del acople eje motor- eje de transmisión de potencia (Puntos C_(x,y)), corresponde a que el eje se va haciendo más esbelto en esos punto con respecto a dicho acople, presentando una mayor desalineación y por ende mayor vibración en esa zona.

A continuación en la Fig. 4.53 se muestra una fotografía del equipo para el estudio del desgaste.



Figura 4.53. Equipo una vez ensamblado todos sus componentes.

4.7 MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL EQUIPO

El manual de operación y mantenimiento del equipo para el estudio del desgaste, contiene las especificaciones técnicas del equipo, los pasos para su operación y las medidas de prevención que hay que tomar en cuenta para el manejo de forma segura.

4.7.1 Especificaciones técnicas del equipo

- Potencia máxima = $\frac{1}{2}$ hp (1800 rpm)
- Peso total del equipo = 35 kgf
- Carga máxima de ensayo = 15 kgf
- Dimensiones básicas = 75 cm (largo), 45 cm (ancho) y 25 cm (alto)
- Voltaje = 90-120 V
- Capacidad de ensayo en cojinetes de contacto deslizante = 40 a 90 mm.
- Capacidad de ensayo en muestras de metal = 10 mm de diámetro y 15 mm de longitud.

4.7.2 Instrucciones de seguridad que deben tenerse en cuenta antes de utilizar el equipo

- Evitar la colocación de objetos sobre cualquier superficie del equipo.
- Asegurarse que la disco de desgaste este bien ajustada al eje antes de poner en marcha el equipo.
- Asegurarse que el cojinete o muestra de metal se encuentre bien ajustado antes de realizar el ensayo.
- Asegurarse que los prisioneros de las chumaceras y el eje se encuentren bien ajustados antes de cada ensayo.
- No utilizar cojinetes o muestras de metales con dimensiones fuera de las especificaciones indicadas.

- No utilizar ningún tipo de prendas largas en brazos y torso.
- No debe ponerse nunca en marcha el equipo si algunos o todos los dispositivos del mismo se encuentran desajustado.
- Asegurarse que las chumaceras se encuentren bien lubricadas.
- Asegurarse de que exista contacto entre la disco de desgaste y el lubricante a usar.
- Asegurarse que todos los pernos de los diferentes componentes del equipo se encuentren bien ajustados.
- Limpiar muy bien el depósito de lubricante una vez culminado el ensayo.
- No tocar de ninguna manera el eje del equipo cuando se encuentra en marcha.
- Apagar y desconectar el equipo una vez culminado el ensayo.

4.7.3 Manual de operación del equipo

4.7.3.1 Objetivo

Elaborar un manual de operación y mantenimiento para el correcto uso del equipo y aprovechamiento máximo de su vida útil.

4.7.3.2 Alcance

El alcance del manual de operación y mantenimiento incluirá detalladamente cómo deben realizarse los ensayos para cojinetes deslizantes y muestras de

metales, así como las actividades que deben realizársele al equipo en busca de aumento de su vida útil.

4.7.3.3 Responsabilidades

Es responsabilidad de todos los usuarios u operadores que utilizaran el equipo para el estudio del desgaste seguir las instrucciones de seguridad y cumplir con el mantenimiento necesario, para así poder obtener resultados confiables al momento de realizar los ensayos para los cuales fue diseñado y construido el equipo.

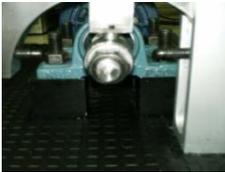
	MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	
TÍTULO: MANUAL DE OPERACIÓN PARA REALIZAR ENSAYO DE DESGASTE EN COJINETES DE CONTACTO DESLIZANTE		PAG: 1 DE: 4

Imágenes	Responsable	Descripción de Actividad
	Operador	1. Acoplar los ganchos laterales y superior al porta cojinete
	Operador	2. Ajustar los ganchos a los pasadores del porta cojinete utilizando una llave tipo alen de 3/32".
	Operador	3. Ensamblar el cojinete y centrarlo con los pernos empujadores del porta cojinete.
	Operador	4. Seleccionar el disco de desgaste según el cojinete a ensayar.
	Operador	5. Acoplar la disco de desgaste al eje del equipo.
	Operador	6. Ajustar el disco de desgaste al eje insertando inicialmente la arandela y posteriormente enroscar la tuerca hexagonal al eje.

MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO**TÍTULO:** MANUAL DE OPERACIÓN PARA REALIZAR ENSAYO DE DESGASTE EN COJINETES DE CONTACTO DESLIZANTE**PAG: 2 DE: 4**

Imágenes	Responsable	Descripción de Actividad
	Operador	1. Hacer incidir el porta cojinete con el disco de desgaste.
	Operador	2. Agregar el lubricante para el ensayo en su respectivo depósito.
	Operador	3. Ascender el depósito de aceite por medio de la bandeja hasta que exista contacto entre el disco de desgaste y el lubricante. Ajustar la bandeja.
	Operador	4. Deslizar suavemente la barra de carga sobre el porta cojinete hasta que exista un contacto entre ambos.
	Operador	5. Deslizar suavemente las pesas (carga de ensayo) por la guía vertical de la barra de carga.
	Operador	6. Una vez realizado todos los pasos anteriores, el equipo de desgaste se encuentra preparado para realizar los ensayos en cojinetes de deslizamiento.

MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	
TÍTULO: MANUAL DE OPERACIÓN PARA REALIZAR ENSAYO DE DESGASTE EN MUESTRA DE METAL	PAG: 3 DE: 4

Imágenes	Responsable	Descripción de Actividad
	Operador	1. Introduzca la muestra de metal en el porta muestra.
	Operador	2. Ajustar la muestra de metal con el uso de una llave tipo alen de 3/32".
	Operador	3. Colocar el disco de desgaste de menor diámetro en el eje y ajustar la tuerca hexagonal.
	Operador	4. Acoplar y ajustar el porta muestra al perno empujador superior del porta cojinete.
	Operador	5. Hacer incidir el porta cojinete con la disco de desgaste.
	Operador	6. Agregar el lubricante para el ensayo en su respectivo depósito.

MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	
TÍTULO: MANUAL DE OPERACIÓN PARA REALIZAR ENSAYO DE DESGASTE EN MUESTRA DE METAL	PAG: 4 DE: 4

Imágenes	Responsable	Descripción de Actividad
	Operador	7. Ascender el depósito de aceite por medio de la bandeja hasta que exista contacto entre el disco de desgaste y el lubricante. Ajustar la bandeja.
	Operador	8. Deslizar suavemente la barra de carga sobre el porta cojinete hasta que exista un contacto entre ambos.
	Operador	9. Deslizar suavemente las pesas (carga de ensayo) por la guía vertical de la barra de carga.
	Operador	10. Ya seguido todos los pasos anteriores, el equipo de desgaste se encuentra preparado para realizar los ensayos en muestras de metales.

4.7.4 Manual de mantenimiento propuesto para el equipo

Actividad	Duración estimada de la actividad (min)	Frecuencia	Personal calificado (estimado)
Limpieza general del equipo	10	Después de cada ensayo	01 Operador
Lubricación de chumaceras	10	Mensual	01 Mecánico
Servicio general del motor eléctrico	4320	Anual	01 Mecánico
			02 Ayudantes
Servicio general de pintura	180	Semestral	01 Mecánico
Servicio de las conexiones eléctricas del equipo	120	Anual	01 Electricista

El procedimiento de ensamble y desensamble del equipo se encuentra en el Anexo C, del presente Trabajo de grado.

4.8 PRUEBAS DE DESGASTE REALIZADAS EN EL EQUIPO

4.8.1 Pruebas de desgaste en cojinetes de contacto deslizante

Para los ensayos de desgaste se escogió el disco de desgaste de 57 mm y cojinetes de 60 mm de diámetro, hechos en una aleación de metales blandos compuestos por aluminio (Al), plomo (Pb) y estaño (Sn) mostrado en la Fig. 4.54.



Figura 4.54. Cojinete de contacto deslizante utilizado en los ensayos de desgaste.

En primera instancia se determinó el peso de los cojinetes antes y después de cada una de las pruebas, a fin de determinar el porcentaje de masa que se perdía en cada ensayo, esto con la ayuda de una balanza analítica digital, marca: Denver, modelo: Apx 200, apreciación: 0,0001 gramo, capacidad máxima: 200 gramo. En la Fig. 4.55 se muestra parte del proceso de pesado de los cojinetes.



Figura 4.55. Balanza analítica utilizada para determinar el peso de los cojinetes de contacto deslizante.

A continuación en la Tabla 4.23 se muestran los pesos de los cojinetes de contacto deslizante antes y después del ensayo realizado.

Tabla 4.23. Pesos de los cojinetes de contacto deslizante antes y después de cada prueba de desgaste.

Cojinete	Carga de ensayo(kgf)	Tiempo de ensayo(min)	Peso antes del ensayo (g)	Peso después del ensayo (g)	Porcentaje de Pérdida de masa
1	5	3	43,1786	42,0965	2,51 %
2	5	6	42,1564	40,9085	2,96 %
3	10	3	43,8855	42,7006	2,70 %
4	10	6	41,2017	39,6236	3,83 %
5	15	3	43,3719	41,6803	3,90 %
6	15	6	44,0021	41,9736	4,61 %

Los resultados mostrados en la Tabla 4.23 indican una fuerte tendencia a que el porcentaje de masa que se pierde es mayor a medida que se aumenta la carga y el tiempo de ensayo. Sin embargo se observa que el tiempo de ensayo resulto ser el factor más crítico durante las pruebas, ya que se logra apreciar que un aumento de dicha variable incrementaba en gran medida la pérdida de masa de los cojinetes después de cada prueba. Comparando el porcentaje de masa que se pierde en los cojinetes 1 y 2 a carga constante, variando el tiempo, se obtiene un 0,45% de pérdida de masa, en cambio al comparar el cojinete 1 y 3 a tiempo constante, pero diferente carga, se obtiene un 0,19% de pérdida de masa, corroborando lo anteriormente expuesto. Este comportamiento se debe a que a un mayor tiempo de ensayo ocasiona la creación de un gran número de partículas metálicas en el lubricante, que actúan como abrasivos, ocasionando un incremento del desgaste en los cojinetes.

4.8.2 Pruebas de desgaste realizadas en muestras de metal

Para los ensayos de desgaste en muestras de metal se utilizó el disco de desgaste de 37 mm y probetas de aluminio comercial de 10 mm (\varnothing) x 15 mm (L) aproximadamente. Una de estas muestras de aluminio se muestra a continuación en la Fig. 4.56.



Figura 4.56. Muestra de aluminio ensayada en el equipo.

En la Tabla 4.24 se muestra el peso de la muestra de aluminio antes y después de cada ensayo de desgaste en el equipo.

Tabla 4.24. Peso de la muestras de aluminio antes y después de cada ensayo en el equipo.

Muestra de aluminio	Carga de ensayo (kgf)	Tiempo de ensayo (min)	Peso antes del ensayo (g)	Peso después del ensayo (g)	Porcentaje de Pérdida de masa
1	5	3	3,2115	3,1241	2,72 %
2	5	6	3,7469	3,6135	3,56 %
3	10	3	2,8644	2,7180	5,11 %
4	10	6	3,9298	3,6590	6,89 %

Los resultados mostrados en la Tabla 4.24 indican que la pérdida de masa en cada una de las muestras de aluminio luego de los ensayos, corresponde en gran parte al aumento de carga. Comparando el porcentaje de pérdida de masa de la muestra de aluminio 1 y 2, a carga constante y variando el tiempo, se obtiene un 0,84 %, mientras que al comparar la pérdida de masa en las muestras de aluminio 1 y 3, para un mismo tiempo y variando la carga, se obtiene un 2,39 % de pérdida. Este comportamiento se debe, a que a medida que se incrementa la carga de ensayo se dificulta el paso de lubricante hacia la zona de contacto entre la muestra de aluminio y el disco de desgaste, ocasionando posiblemente un desgaste adhesivo. La razón de esto, es que el área de la muestra de aluminio que está en contacto con el disco de desgaste es bastante pequeña, lo que ocasiona que toda la carga del ensayo tenga que distribuirse en esa pequeña área, esto conduce a grandes esfuerzos entre ambas partes (muestra de aluminio y disco de desgaste), creando un contacto prácticamente sin lubricación, lo que acelera en gran medida el desgaste.

4.9 ANÁLISIS DEL LUBRICANTE USADO EN LOS ENSAYOS DE DESGASTE UTILIZANDO LA TÉCNICA DE ESPECTROMETRÍA POR EMISIÓN ATÓMICA

4.9.1 Análisis del lubricante usado para ensayos de desgaste en cojinetes de contacto deslizante

Para los ensayos de desgaste se escogió el disco de desgaste de 57 mm y un cojinete de contacto deslizante de 60 mm.

En la Tabla 4.25 se muestran los resultados obtenidos para el análisis del lubricante utilizado en los ensayos de desgaste en cojinetes de contacto deslizante, los cuales son expresados en unidades de parte por millón (PPM).

Tabla 4.25. Concentraciones de los elementos encontrados en el lubricante después de realizar los diferentes ensayos en los cojinetes.

Condición	Fe	Cr	Pb	Sn	Al	Mo
Lubricante nuevo	0,000	0,432	10,501	3,302	1,940	0,000
Desgaste a los 2 min	0,370	0,464	11,116	7,924	2,863	0,000
Desgaste a los 4 min	0,487	0,469	10,585	6,381	3,110	0,000
Desgaste a los 6 min	0,510	0,449	10,630	6,187	3,058	0,000
Desgaste a los 8 min	0,533	0,479	11,030	6,053	3,236	0,000
Desgaste a los 10 min	0,584	0,471	11,143	5,880	3,425	0,000
Desgaste a los 12 min	0,879	0,500	11,579	5,222	3,448	0,000

En la Fig. 4.57 se muestra una representación grafica de los resultados mostrados en la Tabla 4.25.

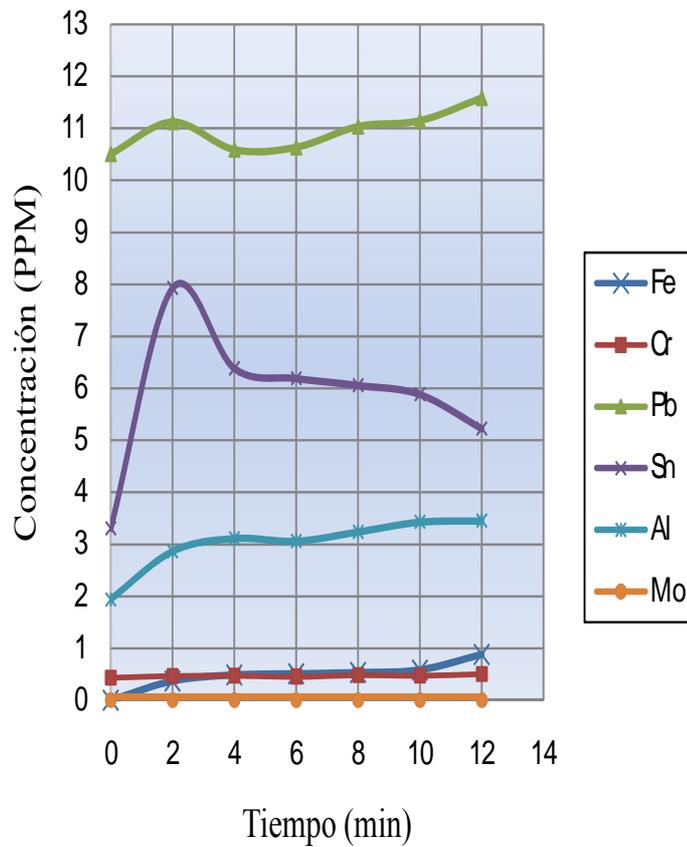


Figura 4.57. Representación de los resultados del análisis del lubricante utilizado en ensayo de desgaste para cojinetes de contacto deslizante.

Observando los resultados mostrados en la Tabla 4.25 y Fig. 4.57, se puede apreciar que a medida que aumenta el tiempo de ensayo, existe una cierta tendencia a incrementarse la concentración de partículas en el lubricante de los componentes Fe, Cr, Pb y Al. Por otra parte el comportamiento que sufre el Sn es de un incremento en un primer ensayo y posteriormente un decremento. Es posible que este comportamiento del estaño (Sn) se deba a que por ser el componente metálico más blando de todos, sus partículas hayan quedado adheridas al disco de desgastes, ya que las microrugosidades de este componente (Sn) sufren una deformación plástica a causa de la fricción y aumento de temperatura entre ambas partes en contacto (discos de desgaste y cojinetes deslizante), pero este fenómeno requiere mayor investigación y se escapa del

alcance de este trabajo de grado. Cabe destacar que las cantidades de Cr, Mo y Fe (composición química del acero AISI 4140 del disco de desgaste) encontradas en el aceite son menores, incluso cero, con respecto a la concentración de partículas de Al, Pb y Sn (composición química de los cojinetes de contacto deslizante), lo que indica que hubo un mayor desgaste en los cojinetes que en el disco de desgaste, como era de esperarse.

4.9.2 Análisis del lubricante usado para ensayos de desgaste en muestra de metal

En la Tabla 4.26 se muestran los resultados obtenidos del análisis de aceite utilizado en el ensayo de desgaste para una misma muestra de aluminio a diferente carga y tiempo de ensayo. Para este ensayo se utilizó el disco de desgaste de desgaste de 37 mm.

Tabla 4.26. Concentraciones de los elementos encontrados en el lubricante después de realizar los diferentes ensayos en las muestras de Aluminio (Al).

Condición	Fe	Cr	Mo	Al
Lubricante nuevo	0,000	0,422	0,000	1,477
Ensayo 1 (C = 5 kg y T = 3 min)	0,000	0,494	0,000	14,807
Ensayo 2 (C = 5 kg y T = 6 min)	0,072	0,519	0,000	26,727
Ensayo 3 (C = 10 kg y T = 3 min)	0,572	0,469	0,000	55,422
Ensayo 4 (C = 10 kg y T = 6 min)	1,75	0,562	0,000	70,698

En las Fig. 4.58 se muestra gráficamente los resultados presentados en la Tabla 4.26, donde se logra apreciar un marcado aumento de las partículas de aluminio presentes en el aceite una vez que es aumentado la carga y el tiempo de ensayo, debido a que el aluminio posee una menor dureza (23 HB) que el acero AISI 4140 (320 HB) de los discos de desgaste. También se observa que las cantidades de hierro, cromo y molibdeno, principales componentes del disco de desgaste, son prácticamente despreciables con respecto a la cantidad de aluminio

presente, lo que indica que el mayor porcentaje de desgaste ocurrió en la muestra de metal (Al) y no en el disco de desgaste, como era de esperarse.

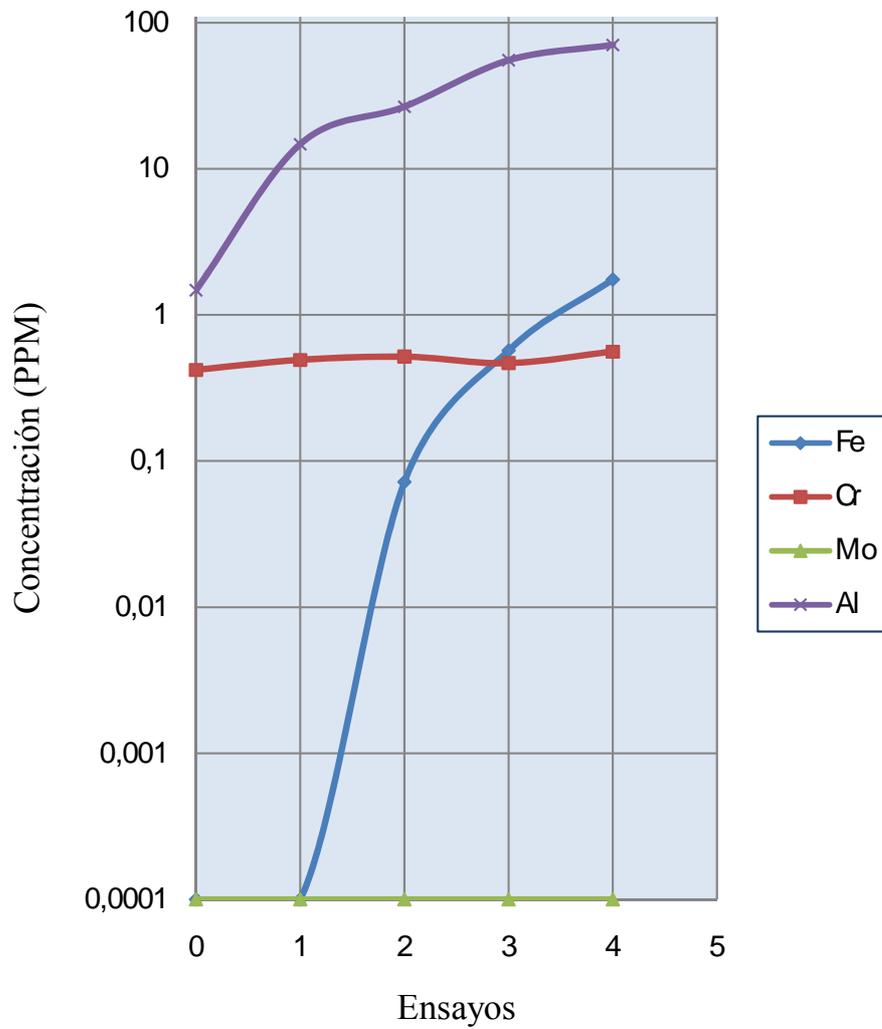


Figura 4.58. Representación de los resultados del análisis de lubricante utilizado para ensayo de desgaste en muestras de aluminio (Al).

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

1. Se diseñó y construyó un equipo para estudiar de forma experimental el comportamiento del desgaste en cojinetes de contacto deslizante de 40 a 90 mm de diámetro interno, espesor de pared entre 1,5 y 4 mm, anchura no mayor a 30 mm, así como también muestras de metal de 10 mm de diámetro y 15 mm de longitud.
2. La dureza tanto de los cojinetes de contacto deslizante como de las muestras de metal a ensayar en el equipo, no deben sobre pasar la dureza de los discos de desgaste (320 HB).
3. El análisis estático de esfuerzo-deformación realizado en los componentes del equipo indican que el menor factor de seguridad obtenido es igual a 5, correspondiente a la plataforma base.
4. El análisis de fatiga realizado a los componentes del equipo indica que el eje de transmisión de potencia presenta un daño del 0,001072 % para un número de 933038,750 ciclos o revoluciones del eje.
5. La carga máxima que puede ser colocada en el equipo para realizar ensayos en muestras de metal y cojinetes de contacto deslizante es de 15 kgf.
6. Los planos realizados a cada uno de los componentes del equipo para el estudio del desgaste permitieron una exitosa fabricación y ensamble del mismo..

7. Todos los materiales y componentes adquiridos para la construcción del equipo son de gran disponibilidad comercial en el país.
8. Se elaboró un manual de operación y mantenimiento, que incluye todas las normas de seguridad para el ensamble y correcto uso del equipo.
9. Se logró verificar mediante ensayos de desgaste en cojinetes de contacto deslizante y muestras de metal que el equipo opera correctamente y de manera segura.
10. El sistema de lubricación del equipo para los ensayos de desgaste garantiza la presencia del lubricante entre las partes en contacto (disco de desgaste-cojinete y/o disco de desgaste-muestra de metal).

5.2 RECOMENDACIONES

- Colocar un variador de frecuencia en el equipo para motores de $\frac{1}{2}$ hp monofásico o diseñar una caja reductora de velocidad, para así poder realizar ensayos y observar el comportamiento del desgaste a diferentes regímenes de giro.
- El uso del equipo para el estudio del desgaste debe estar sujeto al manual de operación y mantenimiento descrito en este Trabajo de Grado.
- Verificar que exista un contacto apropiado entre los cojinetes y muestra de metal con el disco de desgaste antes de realizar los ensayos.
- Verificar que el eje del equipo se encuentre bien alineado antes de realizar los ensayos para así evitar posibles vibraciones.
- Verificar que todos los componentes del equipo se encuentren bien ajustado antes de cada ensayo.
- Cumplir con el plan de mantenimiento especificado para así lograr una larga vida útil de los componentes del equipo.

BIBLIOGRAFÍA

1. Barrientos, J. **Diseño y Construcción de un Banco de Prueba para Estudio del Desgaste en Equipos Rotativos**, tesis de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui (2001).
2. Hernández, J. **Estudio Experimental del Efecto de la Desalineación y Lubricación Inadecuada sobre la Concentración de Contaminantes en el Aceite**, tesis de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Oriente, Núcleo de Anzoátegui (2001).
3. Rojas, P. **Determinación del Patrón de Contaminación del Lubricante Causado por el Desgaste de Cojinete de Bancada de Biela de Motores Diesel**, tesis de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui (2003).
4. Ukonsaari, J. y Kassfeldt E. **Tribological studies on oscillating bronze bearings lubricated with environmentally adapted lubricants (EALs)**, Journal of tribology Vol. 128/181 (2006).
5. Beer, F. y Johnston E, R, Jr. **Mecánica de Materiales**, Editorial McGraw - Hill, Segunda Edición, Colombia (1993).
6. Smith, W. **Ciencia e Ingeniería de Materiales**, Editorial McGraw-Hill, Tercera Edición, Colombia (2004).
7. Shigley, J. y Mischke, C. **Diseño e Ingeniería Mecánica**, Editorial McGraw Hill, Quinta Edición, México (1990).

8. Avallone, E. y Baumeister, T. **Manual del Ingeniero Mecánico**, Vol. I y Vol. II, Editorial McGraw -Hill, Novena Edición, México (1999).
9. Mott, R. **Diseño de Elementos de Máquinas**. Segunda Edición. Editorial Prentice Hall. México (1992).
10. Pereira, A. **Análisis de esfuerzos computarizado**. Disponible en la página web: www.cimatech.com/web/cimanews/Solidworks2008.htm (2008).
11. Doyle, L. y Keyser, C. **Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros** Editorial Prentice Hall, Tercera Edición, México (1988).
12. Benlloch, M. **Los Lubricantes**. Primera Edición. Editorial Ceac, S.A. España (1990).
13. Raiwin, Z. **Análisis de lubricantes por espectrometría**. Disponible en la página web: www.noria.com/sp/home.asp (2006).
14. Rotomotor. **Eberle Industrial Motor Catalogue**. Disponible en la página web: <http://www.alltemp.ca/pdfs/eberle.pdf> (1997).
15. Empresa SKF. “**Catalogo general SKF**”. Disponible en la página web: <http://www.skf.com/portal/skf/home/products?newlink=first=es> (1989)
16. Fratelli, M. **Diseño de pernos para estructuras metálicas**. Edición Provisional. Caracas. Venezuela (1991).

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSOS**

TÍTULO	“CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA EL ESTUDIO DEL DESGASTE EN COMPONENTES LUBRICADOS CON MOVIMIENTO ROTATIVO”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Martínez Arriojas Héctor José	CVLAC: 18.274.134 EMAIL: martinezhector22@hotmail.com
Morantes Carvajal Carlos José G.	CVLAC: 18.569.915 E MAIL: morante_15@hotmail.com

PALABRAS O FRASES CLAVES:

-
1. Desgaste
 2. Lubricación
 3. Diseño de componentes mecánicos
 4. Esfuerzo Von Mises
 5. Análisis de aceite
-

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSOS

ÁREA	SUB ÁREA

RESUMEN (ABSTRACTO):

Se diseño y construyo un equipo compacto, ligero, sencillo de utilizar el cual se caracteriza por poseer una parte dinámica y una parte estática. El equipo cuenta con un sistema de palancas que permite transmitir a la zona donde ocurre el contacto entre la parte estática y dinámica, 4.21 veces la carga que se coloca en el equipo, este sistema se calculó a través de un detallado análisis de vigas. Para el diseño de los componentes que conforman el equipo se utilizo el software Solidworks 2008, en donde se simularon los diferentes análisis de esfuerzos, deformaciones y fatiga a los que estarán sometidos los componentes durante los ensayos; se seleccionaron pernos y rodamientos necesarios para el ensamble y buen funcionamiento del equipo. Una vez ensamblados todos los componentes del equipo, se realizaron las diferentes pruebas de desgaste con lubricación de aluminio, para así verificar el buen funcionamiento del equipo, las muestras estudiadas fueron pesadas antes y después de cada prueba, variando la carga y el tiempo de ensayo, obteniéndose que a un mayor tiempo de ensayo produce un mayor desgaste en los cojinetes, mientras que en la muestra de aluminio resulto ser más perjudicial la carga de ensayo.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSOS**

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO / CVLAC / E-MAIL				
Prof. Henry Espinoza	ROL	CA	AS (X)	TU	JU
	CVLAC:	4.363.950			
	E_MAIL	hjespinozab@gmail.com			
	E_MAIL				
Prof. Yamile Lara	ROL	CA (X)	AS	TU	JU
	CVLAC:	14.468.768			
	E-MAIL	yamilelara@gmail.com			
	E-MAIL				
Prof. Johnny Martínez	ROL	CA	AS	TU	JU (X)
	CVLAC:	8.340.871			
	E-MAIL	johnnymartinr@hotmail.com			
	E-MAIL				
Prof. Lino Camargo	ROL	CA	AS	TU	JU (X)
	CVLAC:	11.496.426			
	E-MAIL	lcamargos@cantv.net			
	E-MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	02	26
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSOS

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS. Construcción de Equipo.doc	Application/MS Word

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

INGENIERO MECÁNICO

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

PREGRADO

ÁREA DE ESTUDIO:

DEPARTAMENTO DE MECÁNICA

INSTITUCIÓN:

UNIVERSIDAD DE ORIENTE – NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSOS

DERECHOS:

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de grado:

“Los Trabajos de Grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de
Oriente, y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento
del Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al
Consejo Universitario, para su autorización”

Br. Martínez A. Héctor J.
C.I: 18.274.134
AUTOR

Br. Morantes C. Carlos J.
C.I: 18.569.915
AUTOR

Prof. Henry Espinoza
C.I: 4.363.950
TUTOR

Prof. Johnny Martínez
C.I: 8.340.871
JURADO

Prof. Lino Camargo
C.I: 11.496.426
JURADO

Prof. Diógenes Suarez

POR LA COMISIÓN DE TESIS