

DISEÑO DEL TREN PRINCIPAL DE ATERRIZAJE TIPO TRICICLO PARA EL
PROTOTIPO DE AERONAVE REMOTAMENTE TRIPULADA, EN CONVENIO CON
LA ESCUELA DE SUBOFICIALES DE LA FUERZA AÉREA COLOMBIANA.

JHEFERSON GARCIA ARIAS 1088339711
SEBASTIAN VILLA RESTREPO 1087492894

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA – RISARALDA

2019

DISEÑO DEL TREN PRINCIPAL DE ATERRIZAJE TIPO TRICICLO PARA EL
PROTOTIPO DE AERONAVE REMOTAMENTE TRIPULADA, EN CONVENIO CON
LA ESCUELA DE SUBOFICIALES DE LA FUERZA AÉREA COLOMBIANA.

JHEFERSON GARCIA ARIAS 1088339711
SEBASTIAN VILLA RESTREPO 1087492894
Práctica conducente a trabajo de grado

Director

Técnico subjefe JHON ALEXANDER CÁRDENAS PUENTES
Programa educativo de mantenimiento aeronáutico
Escuela de suboficiales “CT ANDRÉS M. DÍAZ” de la
FUERZA AÉREA COLOMBIANA, ESUFA.

Codirector

PhD. JOSÉ LUIS TRISTANCHO REYES
Docente facultad de ingeniería mecánica
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PEREIRA – RISARALDA

2019

NOTA DE ACEPTACION

FIRMA DEL JURADO

PEREIRA, febrero 2019

AGRADECIMIENTOS

A todas las personas que nos permitieron obtener la base para el desarrollo de este proyecto, a los que se hicieron partícipes en el trayecto y la culminación de este logro, en especial a las siguientes personas:

A nuestros padres María Liliana Restrepo López, Hernando de Jesús Villa Osorio y Blanca Rocío Arias Buitrago, Selledin de Jesús García Ramírez, quienes nos enseñaron todo sobre la vida, por su incondicional apoyo, a quienes debemos este triunfo profesional.

Al doctor José Luis Tristancho hacia el cual tenemos un especial agradecimiento por su apoyo y confianza en nuestras capacidades al momento de recomendarnos para este proyecto.

Al ingeniero Carlos Andrés Mesa por su gran cooperación, asesoramiento y disposición para solucionar cualquier dificultad presentada durante el transcurso del proyecto.

A nuestros compañeros y amigos, Eduardo Aguirre Candela y Juan José Sanabria por la motivación y el acompañamiento que nos brindaron en este proceso.

De igual modo a todo el grupo de trabajo, quienes nos permitieron acceder al lugar de construcción, facilitándonos la información requerida para el desarrollo de este.

Finalmente, muchas gracias para todas aquellas personas especiales que con su tiempo, conocimiento, ayuda y su valiosa colaboración contribuyeron en este proceso para que tuviera un final exitoso y que sin ellas este proyecto no hubiera sido posible.

RESUMEN

En este proyecto se diseñará el tren de aterrizaje principal para el ART de la Escuela de Suboficiales de la Fuerza Aérea Colombiana, para esto se hará primero un estudio de la teoría que compete a este tipo de aeronaves, después de la correcta apropiación de los conceptos relacionados al diseño de dicho tren de aterrizaje, se hará el análisis de dimensionamiento de la geometría y posicionamiento del tren de aterrizaje. Esto con el fin de hacer el correcto modelamiento del tren principal de aterrizaje en SolidWorks, para así, posteriormente analizar los resultados que arrojen las herramientas de ANSYS. Se hará el cálculo de las cargas que debe soportar el tren en estado estático, en el momento del despegue y en el momento del aterrizaje, pero para la simulación en ANSYS se tomarán sólo las cargas en el momento del aterrizaje, ya que este es el estado más crítico de los tres estados de carga. Con este análisis se obtendrá el diseño óptimo del prototipo del tren de aterrizaje principal para la ART de la FAC, dando así, finalmente las conclusiones y recomendaciones de los resultados obtenidos.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aeronave: Es todo vehículo apto para el traslado de personas o cosas, y destinado a desplazarse en el espacio aéreo, el cual se sustenta por reacciones del aire con independencia del suelo.

Centro de gravedad: CG, Punto sobre el cual un avión debería estar balanceado si se encuentra suspendido.

Deformación: Variación en la forma de un determinado cuerpo, debido a la acción de fuerzas externas o por variación en su temperatura.

Dureza: Define la habilidad de un material para resistir una deformación o cambio permanente, cuando este está expuesto a una carga; o resistencia al corte, al arañado u otras formas de abrasión, por lo general entre más duro es un material mayor es su resistencia.

Energía cinética: Es una forma de energía debida al movimiento de los cuerpos. Equivale al trabajo que es necesario realizar para que el cuerpo pase del estado de reposo ($v = 0$) al estado de desplazamiento con una velocidad v .

Factor de carga: Es la relación entre la carga media y la carga máxima que soportará un dispositivo.

Fuerza: Se denomina fuerza a cualquier acción o influencia capaz de modificar el estado de movimiento de un objeto.

Fuselaje: Parte de la aeronave que incluye los "booms", las nacelas, las tapas, las vigas, las superficies aerodinámicas (incluyendo los rotores, pero excluyendo las hélices y las superficies de sustentación rotatorias).

Módulo elástico: Es un tipo de constante que involucra una medida relacionada con la tensión y la deformación.

Spoiler: En aeronáutica, un destripe, deflector o spoiler es un dispositivo que busca reducir la fuerza de sustentación de una aeronave. Los spoilers son placas montadas en la cara superior de las alas de un avión, que pueden desplegarse hacia arriba modificando el flujo laminar

Tenacidad: Es una cualidad que indica la cantidad de energía de deformación que puede absorber un material antes de que este pueda sufrir una rotura repentina; un material muy

tenaz posee una elevada resistencia a la deformación, así como una elevada ductilidad (habilidad para cambiar de forma sin llegar a quebrarse), la tenacidad se opone a la fragilidad.

Taxiing: Toda operación de desplazamiento en tierra que realiza una aeronave.

GLOSARIO DE SÍMBOLOS

ART: Aeronave Remotamente Tripulada (UAV, en inglés).

ARTC: Aeronave remotamente tripulada de Colombia.

ATA: El listado ATA 100, es una forma de organizar las distintas partes, reparaciones o tipos de sistemas de cualquier aeronave (avión o helicóptero). El capítulo de interés para trenes de aterrizaje es el ATA 32.

ESUFA: Escuela de Suboficiales de la Fuerza Aérea

FAC: Fuerza Aérea Colombiana

FAR: (Federal Aviation Regulation) Se encarga de regular las operaciones de aeronaves en los Estados Unidos

UAV: Unmanned Aerial Vehicle.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN	15
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
3. JUSTIFICACIÓN	17
4. ALCANCE	18
5. OBJETIVOS.....	19
5.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
6. MARCO TEÓRICO.....	19
6.1 INTRODUCCIÓN A LOS ART.....	19
6.2 CLASIFICACIÓN Y APLICACIONES DE LOS ART.....	20
6.3 EL TREN DE ATERRIZAJE.....	21
6.4 TIPOS DE TRENES DE ATERRIZAJE.....	22
6.5 ARREGLOS COMUNES DE LOS TRENES DE ATERRIZAJE.....	22
6.6 TIPOS DE AMORTIGUACIÓN	23
6.6.1 Amortiguación de resortes de goma	25
6.6.2 Amortiguación de resorte de hoja de acero	26
6.6.3 Amortiguación por aire	26
6.6.4 Amortiguación por aceite.....	26
6.6.5 Amortiguación Óleo Neumática	27
6.7 CONSIDERACIONES BÁSICAS	28
6.7.1 Velocidad de aterrizaje.....	28
6.7.2 Tipo de tren de aterrizaje y de amortiguación	29
6.7.3 Factor de carga.....	29
6.7.4 Factor de carga en el centro de gravedad	29
6.7.5 Carrera	31
6.7.6 Cálculo de carrera	31
6.8 SELECCIÓN DEL TREN DE ATERRIZAJE.....	33
6.8.1 Tren de aterrizaje tipo triciclo	33

6.9 DISEÑO DEL TREN DE ATERRIZAJE	35
6.10 DISEÑO DE AMORTIGUADOR TIPO BALLESTA	36
6.11 DISEÑO DEL AMORTIGUADOR DE CAUCHOS.....	36
6.11.1 cauchos acompañados de muelle helicoidal	38
6.12 MATERIALES DEL TREN DE ATERRIZAJE	39
6.12.1 ACERO 5160	39
6.12.2 ACERO 1040	40
6.12.3 ACERO 1050	40
6.12.4 ACERO 4130	40
6.12.5 6061	41
6.12.6 7075	41
6.12.7 T6	41
6.12.8 T62	42
6.12.9 CAUCHO NATURAL	43
6.12.10 CAUCHO SINTETICO.....	43
6.12.11 VULCANIZADO.....	44
7. METODOLOGÍA	47
7.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	47
7.2 INGENIERÍA DE DETALLE.....	47
7.3 CÁLCULO DE LAS CARGAS.....	47
7.4 MODELAMIENTO DEL TREN	47
7.5 SIMULACIÓN DEL TREN	¡Error! Marcador no definido.
7.6 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	47
7.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	48
7.9 ANÁLISIS INGENIERIL.....	¡Error! Marcador no definido.
7.10 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	¡Error! Marcador no definido.
7.11 RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	¡Error! Marcador no definido.
8. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	49
8.1 INTRODUCCIÓN	49
8.2 MODELO TIPO BALLESTA.....	49
8.3 MODELO TIPO APALANCADO	50
8.3.1 DISCOS DE CAUCHO	51

8.3.2 MUELLE HELICOIDAL	52
8.4 DETERMINACIÓN DE LA CARGA	56
8.4.1 Cargas estáticas en el tren principal de aterrizaje	56
8.4.2 Carga máxima estática	58
8.4.3 Carga máxima en el momento del despegue	58
8.4.4 Carga máxima en el momento del aterrizaje.....	59
9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	60
9.1 INTRODUCCIÓN	60
9.2 CARACTERÍSTICAS DEL ANÁLISIS	60
9.3 SOLUCIÓN	62
9.3.1 Teorías de falla	62
9.3.2 Falla estática.....	63
9.3.3 Falla por fatiga.....	63
9.3.4 Deformación total y direccional	65
9.3.5 Deformación elástica equivalente por von-Mises	65
9.3.6 Deformación cortante	65
9.3.7 Esfuerzo elástico equivalente de von mises	66
9.3.8 Esfuerzo cortante	66
9.3.10 Factor de seguridad.....	66
10. CONCLUSIONES	68
11. RECOMENDACIONES	70
12. BIBLIOGRAFÍA.....	71
13. ANEXOS.....	76
13.1 Anexo A. Modelado de los componentes que integran el tren de aterrizaje tipo ballesta.	76
13.2 Anexo B. Modelado de los componentes que integran el tren de aterrizaje de tipo apalancado.....	77
13.3 Anexo C. planos de los componentes que integran el tren de aterrizaje tipo apalancado.	78
13.4 Anexo D. dimensiones de los discos de cauchos.....	78
13.4 Anexo E. conceptos teóricos para el diseño de resortes.....	79
13.5 Anexo F. Resultados de la simulación del tren de aterrizaje tipo ballesta.....	86

13.6 Anexo G. Resultados de la simulación del tren de aterrizaje tipo apalancado.	92
--	----

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Arreglos comunes de trenes de aterrizaje.....	23
Figura 2. Eficiencia de amortiguador.....	24
Figura 3. Amortiguación de caucho usada en el Twin Otter de Havilland	24
Figura 4. Puntal típico de amortiguación de cauchos.	25
Figura 5. Geometría del amortiguador tipo ballesta	26
Figura 6. Amortiguador de aceite.....	28
Figura 7. Amortiguador oleo neumático	28
Figura 8. ART de ESUFA.....	35
Figura 9. Northrop N-9M.....	35
Figura 10. Típico disco de cauchos de absorción	38
Figura 11. Rueda de cola del mosquito DH.....	38
Figura 12. Captura del actual sistema de amortiguación	39
Figura 13. Skyleader 600.	51
Figura 14. Tren apalancado del Skyleader 600	51
Figura 15. Diagrama de cuerpo libre.....	53
Figura 16. Resortes helicoidales de compresión.....	53
Figura 17. Nomenclatura de los resortes helicoidales de compresión	54
Figura 18. Tipos de terminados de resorte	55
Figura 19. Estaciones del ART.	57
Figura 20. Diseño general del tren de aterrizaje de una aeronave comercial.	57

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de ART	20
Tabla 3. Ventajas y desventajas del tren tipo triciclo	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4. Propiedades mecánicas de los materiales	42

1. INTRODUCCIÓN

La Escuela de Suboficiales de la Fuerza Aérea “CT Andrés M. Díaz”, ESUFA, tiene en sus instalaciones un prototipo experimental de un ala delta o aeronave remotamente tripulada (A.R.T.), para la cual se diseñará un tren de aterrizaje capaz de aterrizar de forma convencional que permita a la aeronave regresar al suelo evitando daño alguno en su estructura, también debe facilitar el movimiento de la aeronave en la superficie, además, este debe tener la capacidad de frenado y direccionamiento.

Un tren de aterrizaje es un elemento primordial de las aeronaves, por ende, su diseño debe cumplir unas características mínimas para que este sea viable, como por ejemplo, su bajo peso, su fácil mantenimiento y la capacidad de maniobrar a altas velocidades, por mencionar algunas; una característica importante es que el tren de aterrizaje principal debe absorber la energía cinética producida por el impacto, para posteriormente entregar y distribuir las cargas generadas por dicha energía de forma segura en el fuselaje. El trabajo de investigación tiene como propósito hacer un diseño conservador del tren principal del ART de la FAC. Y para ello el proyecto tendrá dos fases, la primera consta de un análisis ingenieril, donde se recolectarán y validará la información correspondiente al ART, también se hará la recopilación de información de los trenes de aterrizaje en, datos de literatura, ejemplos, diagramas, artículos e información audiovisual enfocada al diseño de trenes de aterrizaje de aeronaves. La segunda fase, será la ingeniería de detalle, donde se harán, el análisis geométrico y estructural del ART, se precisará los componentes particulares que integran el tren de aterrizaje, se determinaran las cargas que soporta el tren principal, se hará el modelamiento de los componentes que integran dicho tren, y con la caracterización del material se seleccionara el material que se utilizara. Para la caracterización funcional y la caracterización dimensional se realizará un análisis estructural asistido por computadora, a partir de SolidWorks y ANSYS

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el área de desarrollo e innovación de la fuerza aérea colombiana, se fabricó una aeronave remotamente tripulada que contaba con cinco motores, cuatro eléctricos, cuya función era hacer que la aeronave pudiera despegar verticalmente, y uno de combustión, que hacía que la aeronave se empujara en forma horizontal. Al hacer las pruebas de dicha aeronave, el equipo encargado se dio cuenta de varios errores, uno de ellos era que la aeronave tenía mucho peso, otro, que cuando se disponían a hacer el cambio de motores para cambiar el sentido de desplazamiento, se perdía el control total de la aeronave por 0,87 segundos, algo que no se podían permitir dado el alto riesgo de perder por completo la nave en caso de que esta se precipitara. Para dar solución a estos problemas el equipo tomó la decisión de quitar los motores que accionan a la aeronave en ascenso vertical, pero al hacer esto el equipo de trabajo no contó con que el centro de masa de la aeronave se modificaría ocasionándoles problemas a la hora del despegue ya que la aeronave no disponía de un adecuado tren de aterrizaje el cual le pudiera garantizar a la aeronave un despegue y aterrizaje de forma segura; se planteó entonces el correcto diseño del tren de aterrizaje del ART, y para esto un grupo de estudiantes de la Universidad Tecnológica de Pereira se apoyarán en los conocimientos adquiridos durante el desarrollo de las actividades académicas en la universidad, además, también se contará con el apoyo de la escuela de suboficiales de la fuerza aérea colombiana. Para diseñar el tren de aterrizaje se debe tener en cuenta que aparte de la función principal, que es la de garantizar un aterrizaje seguro para la estructura de la aeronave. Este también debe permitir las siguientes funciones secundarias:

Permitir la correcta y fácil maniobra del ART en el suelo y durante los periodos de arrastre, aterrizaje y despegue; tener la capacidad de disminuir la velocidad después del aterrizaje o mientras el avión realiza maniobras en el suelo. Una de las dificultades a la hora de desarrollar el proyecto, es que los siguientes problemas deben ser resueltos antes de comenzar con el diseño del tren de aterrizaje: Definir si el tren de aterrizaje será rígido o retráctil, Tipo de absorción de choque (resorte, oleo-neumático, etc.), así como el sistema de frenado que se usará.

3. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto busca poner en práctica todos los conocimientos adquiridos durante los años de estudio en Ingeniería Mecánica, demostrando las habilidades adquiridas en los diferentes campos, los cuales son indispensables para poder conseguir un óptimo resultado en el diseño del prototipo del tren de aterrizaje. Ya que este debe permitir la estabilidad de la aeronave en tierra y durante el taxiing, facilitar el despegue disminuyendo la fricción por medio de los neumáticos, debe disminuir el impacto absorbiendo la energía cinética durante el aterrizaje, entre otras. El tren de aterrizaje es de gran importancia ya que además de absorber los esfuerzos al despegue y al aterrizaje, este debe estar diseñado para absorber las cargas en las diferentes condiciones en las que se realiza el aterrizaje, como viento cruzado o pista húmeda. Este trabajo le servirá de apoyo a estudiantes que busquen una referencia de consulta en lo relacionado al modelado y a la simulación de trenes de aterrizaje, de igual manera el documento sirve como una recopilación de los conocimientos aprendidos tanto a lo largo de la formación académica de los estudiantes de la Universidad Tecnológica de Pereira, y como una práctica de estos, además de los conocimientos aprendidos durante el desarrollo del proyecto.

4. ALCANCE

El proyecto se realizará únicamente a nivel teórico, este tendrá un plazo de seis meses donde, en la etapa inicial, se hará la recopilación de información de los trenes de aterrizaje, como son: datos de literatura, ejemplos, diagramas, artículos e información audiovisual enfocada al diseño de trenes de aterrizaje de aeronaves. Luego de esta fase se harán, el análisis geométrico y estructural del ART, se precisará los componentes particulares que integran el tren de aterrizaje, se determinaran las cargas que soporta el tren principal, se hará el modelamiento de los componentes que integran dicho tren, y con la caracterización del material se seleccionara el material a usar. Posteriormente se estudiará el comportamiento del tren de aterrizaje principal del ART de la FAC en estado estático, en el momento de despegue, y en el momento del aterrizaje; y en ANSYS se calculará la deformación, esfuerzos, factor de seguridad y análisis de fatiga de dicho tren, solo en el momento del aterrizaje, dado que este es el estado más crítico. Así se especificarán los materiales y dimensiones de cada uno de los componentes que lo integran el tren de aterrizaje.

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el diseño del prototipo del tren de aterrizaje principal para la aeronave remotamente tripulada experimental de la escuela de suboficiales de la FAC.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Hacer la caracterización de la información correspondiente al diseño tanto del ART, como al diseño del tren de aterrizaje,
- Realizar el diseño de los componentes que integran el tren principal de aterrizaje.
- Realizar modelamientos y análisis estructurales del tren de aterrizaje por medio de programas de elementos finitos.
- Realizar análisis de elementos finitos de los componentes que conforman el tren de aterrizaje principal, realizando la caracterización del material en el cual se va a fabricar los diferentes componentes del tren de aterrizaje y así poder hacer un diseño conservador.
- Documentar toda la información lograda en el desarrollo de este proyecto.
- Dar a conocer recomendaciones y conclusiones logradas a través del análisis estructural y simulaciones realizadas a las partes que componen el tren de aterrizaje principal del ART de la ESUFA.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 INTRODUCCIÓN A LOS ART

Como otros muchos avances tecnológicos, los ART se desarrollaron como instrumento de uso militar entre la primera y la segunda guerra mundial, estos fueron utilizados para entrenar a los operarios de los cañones antiaéreos. Hasta hace relativamente poco los ART se utilizaban con fines militares, realizando tareas de soporte de comunicaciones, vigilancia, reconocimiento de áreas; sin embargo, la desvalorización de las tecnologías ha facilitado que pase al uso civil. Las aeronaves no tripuladas vienen en muchos diseños y tamaños, pero todos comparten la ventaja de ofrecer una nueva dimensión en inteligencia militar, reconocimiento, vigilancia e innumerables aplicaciones, como detección de incendios. Esto hace que proyectos de esta naturaleza se conviertan en una prioridad para el conjunto de las fuerzas armadas colombianas. [1]

Los avances tecnológicos han llegado a tal punto, que se ha pensado en dotar a las próximas generaciones de los ART con inteligencia artificial, para así darle a estas máquinas la capacidad de tomar decisiones en situaciones críticas, aburridas o peligrosas que requieren un tiempo y perseverancia que los equipos de aviación tripulados no pueden proveer. Sin lugar a duda los ART tienen un gran número de ventajas con respecto a las aeronaves tripuladas, entre ellas está que los ART pueden volar mucho más tiempo y con menos consumo de combustible, entrenar operadores de ART cuesta menos que entrenar a pilotos de aeronaves convencionales, la estructura de los ART y los materiales permiten a este ejercer más fuerzas G. Los ART más recientes ya pueden despegar y aterrizar automáticamente, pueden monitorear mucho de lo que está pasando en la tierra de forma preprogramada; en Estados Unidos, por ejemplo, se planea tener un solo piloto para operar hasta cuatro aviones no tripulados al mismo tiempo. [2] “puede ser posible, de acuerdo con los visionarios militares, darle a los UAV una forma de razonamiento ético usando inteligencia artificial, así estos tendrán más tiempo para evaluar la situación con precisión, pues estos no estarán

cansados por volar tanto tiempo y serán menos afectados por la adrenalina del combate, que suele afectar a un piloto”.

6.2 CLASIFICACIÓN Y APLICACIONES DE LOS ART

Las ART se pueden clasificar:

Tabla 1. Tipos de ART

Por su tipo de misión	Por origen de la misión	Por tamaño	Por su motor
Reconocimiento, observación (aquí cabe desde control de fronteras a tráfico marítimo, vigilancia de carreteras, reconocimiento estratégico, fotografía aérea), blancos aéreos, combate investigación, salvamento, antincendios y transporte.	Civil, militar	Grandes, medianos, pequeños, micro ART	Alternativo, turbinas (turbo fan, turbohélices, turbo ejes...), eléctricos (solares, pila de combustible, pila de hidrógeno...)

Fuente: UAVs, clasificación, tendencias y normativas de espacio aéreo [3]

Las ART se han convertido en medios necesarios para garantizar la seguridad de esta nación, tanto para prevenir acciones de índole terrorista, como para vigilar los espacios fronterizos soberanos, ante la amenaza constante de delitos transnacionales. Rafael Padilla, de la Asociación de Aeronaves Remotamente Tripuladas de Colombia (ARTC) afirma que [4] “los drones actualizarán predios, levantarán planes de riesgo en los municipios, vigilarán la

deforestación, fumigarán, serán herramientas claves para la agricultura de precisión, trazarán mapas más precisos, entre muchas más funciones con gastos hasta tres veces más bajos.

La ARTC calcula que, solo en el Valle del Cauca, la utilización masiva de drones podría crear 1.400 empleos y un impacto de 25.000 millones de pesos”.

6.3 EL TREN DE ATERRIZAJE

El tren de aterrizaje está formado por un tren principal, el cual debe soportar aproximadamente el 80 % del peso de la aeronave, además este debe absorber el impacto del aterrizaje y reducir la velocidad vertical a cero; y por un tren secundario, que proporciona un apoyo estable y permite movilidad al avión en pista, este proporciona un medio para maniobrar la aeronave en el suelo y para soportar la aeronave a una altura conveniente para dar espacio a las hélices y alerones de los motores. Según Gunmundsson [5] “el propósito del tren de aterrizaje es obvio, este le permite a la aeronave regresar al suelo sin causar daño en su estructura. Para lograr esto, el tren de aterrizaje no debe solo absorber las fuerzas sustanciales y momentos, sino que proporciona un medio para distribuir la carga con seguridad al fuselaje; y un medio controlando de desaceleración a través del freno y la amortiguación”.

Una vez en el aire el tren de aterrizaje no tiene un propósito útil, por el contrario, genera resistencia aerodinámica, conocida en este campo como *drag*, además estando en el aire, el tren es peso muerto, por esto el diseño del tren de aterrizaje se debe de enfocar en aspectos como, reducir el peso y espacio que ocupan los componentes de dicho tren, la configuración del tren de aterrizaje, el arreglo del tren de aterrizaje (triciclo, convencional de cola...), la ubicación de las ruedas y neumáticos, la distancia entre ejes; el tren de aterrizaje debe ser fijo o retráctil, y detalles tales como tipo de amortiguación y tipo de sistema de frenado. [6]

6.4 TIPOS DE TRENES DE ATERRIZAJE

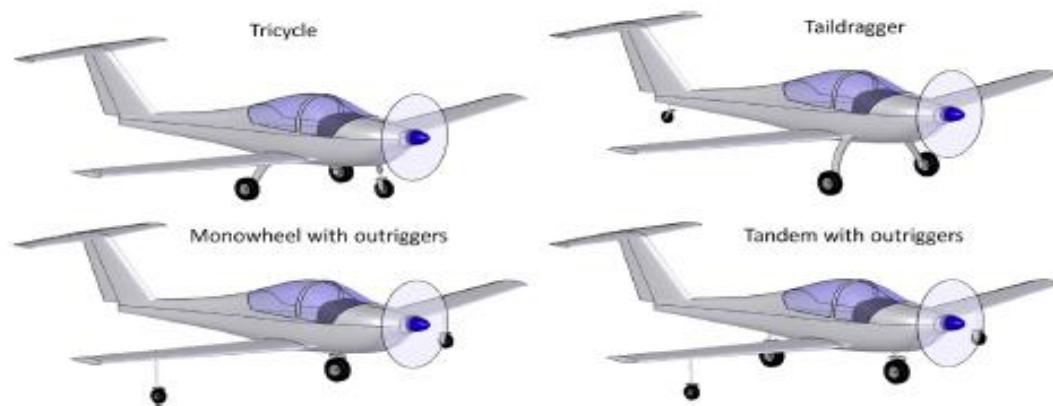
Los primeros aviones de la historia fueron dotados de trenes fijos, es decir, estos estaban anclados directamente al fuselaje o a las alas de la aeronave. Hoy este tipo de tren aún se usa en muchos aviones pequeños y livianos, donde la sencillez es una cualidad primordial de este tipo de aeronaves, aunque el hecho de que el tren permanezca expuesto mientras la aeronave está en vuelo implica pérdida de velocidad debida a la resistencia impuesta por el aire, lo que ocasiona mayor gasto de combustible para conseguir la potencia necesaria, ya que a medida que aumenta la velocidad en una aeronave también aumenta dicha resistencia. Pero esta desventaja producida por el tren extendido se compensa por la simplicidad, el mantenimiento reducido, el bajo costo inicial y su bajo peso. Además, en un avión lento la penalización de este peso adicional no se supera con la reducción de la resistencia producida por el viento, por lo que se usa el equipo fijo. Ahora hay aeronaves pesadas y veloces donde para evitar la resistencia que produce el aire se dotan de trenes carenados, o trenes retráctiles que permiten la recogida del tren en compartimentos en el fuselaje y alas que se cierran para no entorpecer el aerodinamismo de la aeronave. En conclusión, con aeronaves de alto rendimiento reducir los efectos producidos por la resistencia del aire es más importante, por ello el tren de aterrizaje se retrae hacia las alas o el fuselaje durante el vuelo; sin embargo, hay penalizaciones de mayor complicación, como mayor peso, mantenimiento más complejo y mayor costo [7]. Por todas las anteriores ventajas y por el diseño de la estructura del fuselaje de la aeronave a la cual se le planea diseñar el tren de aterrizaje (ART), figura 8, se escogerá que el tipo de tren sea fijo.

6.5 ARREGLOS COMUNES DE LOS TRENES DE ATERRIZAJE

A lo largo de la historia de la aviación se han implementado varios tipos de trenes de aterrizaje, entre ellos: Triciclo, Patín de cola (convencional), Monociclo, y ruedas en tándem. El tren de patín de cola fue el primero en desarrollarse, sin embargo, presentaba un gran problema debido a que tenía mucha inestabilidad en el aterrizaje y eran muy comunes los accidentes por un frenado brusco que provocan fácilmente un giro hacia adelante,

destrozando las hélices o la nariz de la aeronave. Seguidamente el tren tipo triciclo fue el que se consolidó en la industria aeroespacial por su estabilidad y correcta distribución de las cargas. El monociclo es un tipo de tren con ciertas dificultades para el aterrizaje por lo que es usado solo en aplicaciones muy específicas como por ejemplo el Europa XS Monowheel. Para finalizar, es el tren de ruedas en tándem uno de los más usados actualmente en la línea de la aviación comercial debido a la correcta distribución de las cargas [8]. La figura 1 muestra las configuraciones antes mencionadas.

Figura 1. Arreglos comunes de trenes de aterrizaje



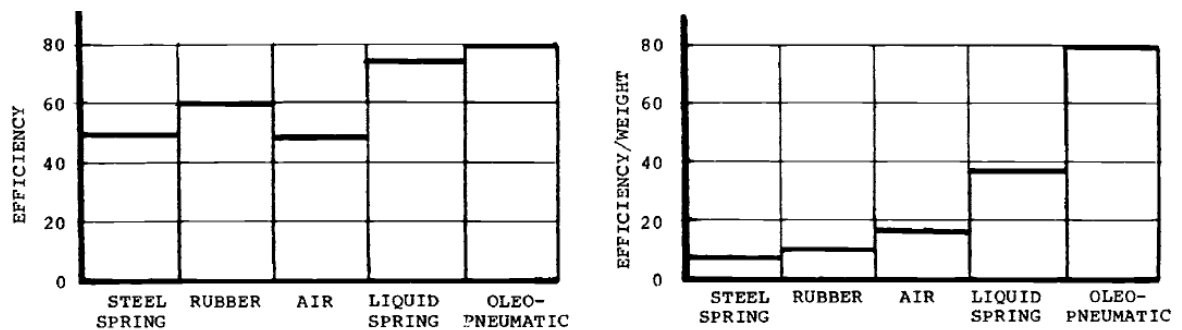
Fuente: the Anatomy of the Landing Gear, capítulo 13. [9]

6.6 TIPOS DE AMORTIGUACIÓN

Durante el aterrizaje, el tren debe de absorber la energía cinética producida por el impacto, pero no es suficiente, así el tren de aterrizaje debe de poseer un sistema de amortiguación para poder disminuir dicho impacto. Según Currey [10] En la industria existen dos tipos básicos de amortiguadores: aquellos que usan un resorte sólido de acero o caucho y aquellos que utilizan un resorte fluido con gas o aceite, o una Mezcla de los dos que generalmente se denomina oleo neumática. El gas suele ser aire seco o nitrógeno. La figura 2, compara las eficiencias y pesos relativos de los distintos tipos de amortiguadores. A la hora de seleccionar el tipo de amortiguación, se debe dar reconocimiento a la simplicidad, confiabilidad,

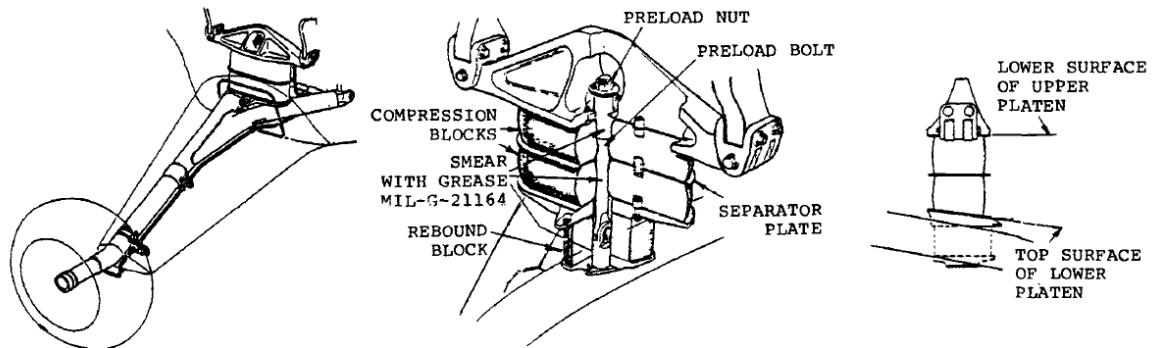
capacidad de fácil mantenimiento y costo relativamente bajo de la amortiguación de resorte sólido. En aviones de utilidad más pequeños, la penalización por peso suele ser negligente, y las ventajas observadas superan con creces las sanciones en tales casos. El avión Twin Otter de Havilland de Canadá (DHC) utiliza bloques de caucho de compresión, como se muestra en la figura 3, y puede considerarse un clásico ejemplo de bajo costo, alta confiabilidad y fácil mantenimiento en esta área.

Figura 2. Eficiencia de amortiguador



Fuente: Aircraft Landing Gear Design: Principles, Shock absorber efficiency. [11]

Figura 3. Amortiguación de caucho usada en el Twin Otter de Havilland



Fuente: Aircraft Landing Gear Design: Principles, DHC Twin otter Landing Gear. [12]

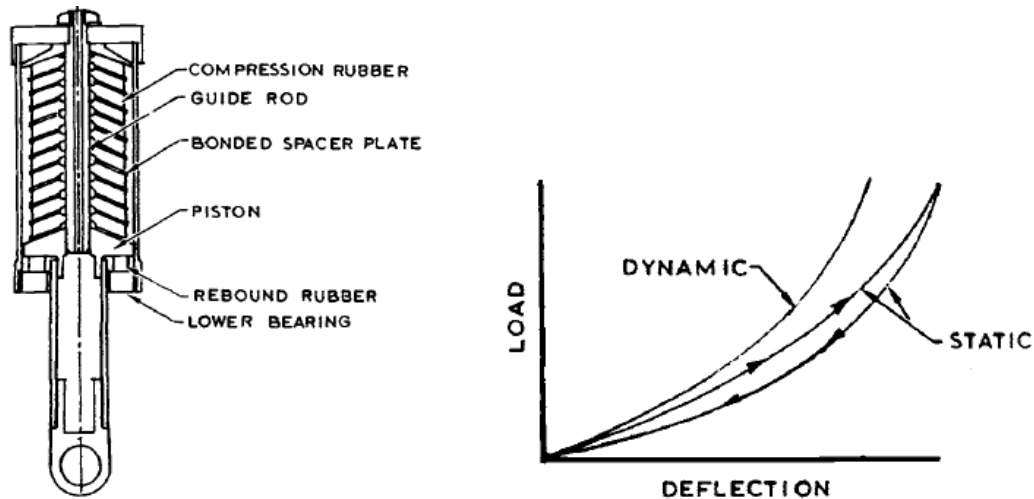
Los tipos de amortiguación que se han usado en la aviación también tienen su historia, comenzando por la inexistencia de estos, es decir, trenes totalmente rígidos usados en aviones de muy poco peso, similares incluso, a las usadas por los planeadores monoplazas; hasta los más usados en la actualidad que son los oleo neumáticos. Estos últimos cumplen con toda la

reglamentación para los vuelos comerciales, y según la figura 2 son los que poseen la mayor eficiencia de todos. A continuación, se hará una breve descripción de los diferentes tipos de amortiguación usados a través de la historia.

6.6.1 Amortiguación de resortes de goma

La eficiencia de este tipo de amortiguación depende de que el medio absorbente del impacto esté tensionado uniformemente, de esta forma se consigue alrededor del 60% de eficiencia como se muestra en la figura 2. El caucho por lo tanto se utiliza generalmente en forma de discos, estos se vulcanizan en placas y se apilan como se muestra en la figura 4. Según Currey [13] “Con el fin de permitir una vulcanización satisfactoria, cada disco generalmente no debe tener más de 1.5 pulgadas de grueso”. Estos se han utilizado ampliamente en el diseño de Twin Otter mostrado anteriormente; de acuerdo con la filosofía general de que las aeronaves eliminen en la medida de lo posible, la necesidad de utilizar materiales estratégicos, para minimizar costos, y para minimizar mecanizados de precisión.

Figura 4. Puntal típico de amortiguación de cauchos.

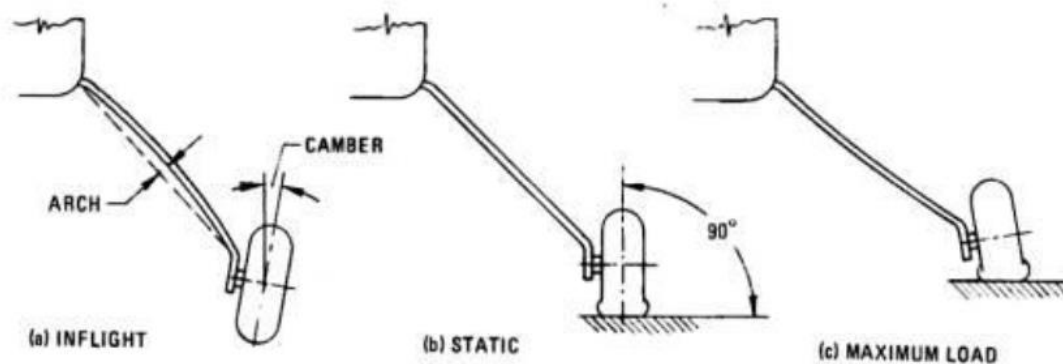


Fuente: Aircraft Landing Gear Design: Principles, Typical rubber shock strut. [14]

6.6.2 Amortiguación de resorte de hoja de acero

Estos se utilizan en algunas aeronaves ligeras equipadas con sistemas no retráctiles, estos son ideales desde el punto de vista de la simplicidad, la confiabilidad, la facilidad de mantenimiento y el bajo costo inicial [15]. Este tipo de amortiguación se usa generalmente en el tren principal donde el extremo superior está sujeto por pernos al fuselaje y el extremo inferior termina en un eje que se ensamblan la rueda y el freno.

Figura 5. Geometría del amortiguador tipo ballesta



Fuente: análisis del empote del tren de aterrizaje de la aeronave UAV BUS23, [16]

6.6.3 Amortiguación por aire

Se han utilizado amortiguadores neumáticos (por ejemplo, el diseño Turner), pero no son comunes actualmente; son similares en diseño a la amortiguación óleo neumática, pero más pesados, menos eficientes y menos confiables. Además, no tienen un medio de lubricación en los rodamientos. Dado que no se utilizan hoy en día, no se dan más detalles del mecanismo en el desarrollo de este proyecto. [17]

6.6.4 Amortiguación por aceite

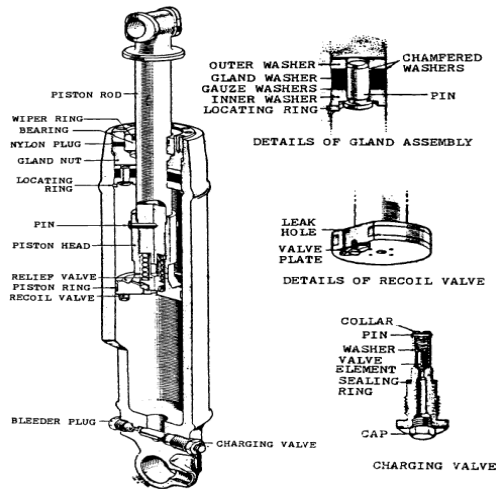
El llamado "resorte líquido" un ejemplo de un tipo de un amortiguador de aceite se muestra en la figura 6. Fue desarrollado por Dowty y se utilizó por primera vez en la Segunda Guerra

Mundial; hoy en día siguen siendo utilizados, sobre todo en los diseños de suspensión de palanca, ellos tienen entre 75-90% de eficiencia y son tan confiables como una unidad óleo neumática, aunque su peso es mayor debido al diseño robusto que se necesita para soportar las altas presiones de fluidos. Sus ventajas son la baja fatiga debido a su robustez y forma de construcción, y su tamaño relativamente pequeño; su desventaja es el hecho de que los cambios en el volumen y viscosidad del fluido debido a que las temperaturas muy altas o muy bajas afectan la eficiencia del amortiguador. [18]

6.6.5 Amortiguación Óleo Neumática

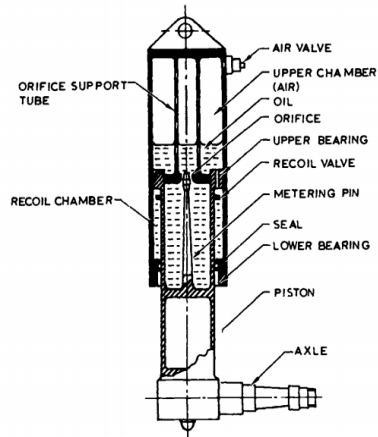
La mayoría de las aeronaves de hoy en día utilizan amortiguadores oleo neumáticos, un típico diseño de este se muestra en la figura 7. Tienen las más altas eficiencias de todos los tipos de amortiguadores, y también tienen la mejor disipación de energía; es decir, a diferencia de la amortiguación de resorte que almacena energía y luego la libera repentinamente, el aceite regresa a su estado inicial sin comprimirse y a una velocidad controlada; el espacio sobre el aceite se presuriza con aire seco o nitrógeno (un gas inerte). Cuando el avión aterriza, el aceite es forzado desde la cámara inferior a la cámara superior a través del orificio como se muestra en la figura 7, esto para maximizar la eficiencia al obtener una carga en el puntal relativamente constante durante la carga dinámica. [19]

Figura 6. Amortiguador de aceite



Fuente: Aircraft Landing Gear Desing:
Principles and Practices [20]

Figura 7. Amortiguador oleo neumático



Fuente: Aircraft Landing Gear Desing:
Principles and Practices [21]

6.7 CONSIDERACIONES BÁSICAS

En las etapas iniciales de diseño, las consideraciones básicas que afectan al amortiguador son: la velocidad de aterrizaje, el factor de carga, la carrera y el tipo de amortiguador.

6.7.1 Velocidad de aterrizaje

Según Currey [22] “Esta suele ser legislada por la autoridad de contratación y/o el aceptado reglamento perteneciente a la categoría de aeronave. Por ejemplo, una aeronave de transporte en los estados unidos normalmente tendría que soportar la amortiguación de aterrizaje a 10 ft/s con el peso de aterrizaje de diseño. Además, Un avión típico tendría aletas de gran elevación y un borde delantero inclinado o con listones para maximizar la elevación, spoilers para ayudar al dispositivo de vanguardia a levantar la nariz para mantener la altitud en el momento del aterrizaje, una pendiente de planeo de 6 grados y una velocidad de aterrizaje de unos 10 ft/s en el aterrizaje”.

6.7.2 Tipo de tren de aterrizaje y de amortiguación

Para el diseño del tren de un avión de transporte moderno, no hay duda de que tipo de amortiguador se utilizará, será oleo neumático; pero para algunas aeronaves como las avionetas ligeras o las aeronaves utilitarias, como es el caso actual, se puede usar amortiguación por hoja de acero, también llamada ballesta, o un sistema apalancado donde se podría considerar comprimir un resorte de goma, un muelle o hasta un sistema oleo neumático; como lo que se busca es la relación entre simplicidad y bajo costo, se podrían considerar bloques de caucho apilados, especialmente para un avión ligero. Si se utiliza el sistema de suspensión apaisada, un resorte líquido podría ser intercambiado contra un puntal oleo neumático. [23]

6.7.3 Factor de carga

Los factores de carga aplicados al tren de aterrizaje no deben confundirse con factores de carga de la aeronave, estos últimos resultan de maniobras de pilotaje o disturbios atmosféricos. El factor de carga del tren de aterrizaje es, hasta cierto punto, una cuestión de elección, una aproximación durante la etapa conceptual y como guía general, Currey da los siguientes son factores típicos de la carga de aterrizaje: [24]

Aviones de combate (de pistas terrestres): 3-5

Aviones pequeños: 2-3

Aviones de transporte: 0.7-1.5

Se debe tener en cuenta que los valores anteriores se refieren al factor N (de reacción) utilizado en el cálculo de la carrera. Para convertirlos en factores de carga de la aeronave en el c.g. Se debe usar la cantidad apropiada de levantamiento de ala.

6.7.4 Factor de carga en el centro de gravedad

Currey [26] afirma que, El recorrido vertical de la rueda debe ser determinado en función de las velocidades de aterrizaje y los factores locales. A excepción de los trenes de suspensión

apaisada, esta es igual que la carrera del amortiguador, por lo que se debe tomar una decisión sobre si se utilizará la suspensión apalancada, y si es así, cuánto apalancamiento se aplicará. Como ejemplo, supongamos que el tren es de un diseño telescópico, en el que la rueda y el puntal tienen los mismos recorridos, el primer paso es determinar la carga máxima que soportara el puntal del amortiguador, esta carga comprende la carga estática más la carga de reacción dinámica, cuando esa carga se divide por la carga estática, se obtiene el factor N. Esto a veces se denomina factor de carga del tren de aterrizaje o simplemente el factor de carga de aterrizaje, su valor oscila entre 0,75 y 1,5 para grandes aviones, 3.0 para aviones pequeños o utilitarios, y a 5.0 para algunos modelos caza. La magnitud permisible está determinada por los diseñadores y la estructura de la aeronave, ellos deben diseñar el fuselaje para acomodar esos factores. Durante el aterrizaje, inicialmente, se supone que la aeronave es un cuerpo rígido, sin aceleración relativa entre el c.g. y el punto de fijación del tren. Así, el factor de carga en el c.g. es el mismo que el punto de fijación. Para comprender completamente la relación entre el factor de carga en el centro de gravedad $N_{c.g.}$ y el factor de carga N del tren de aterrizaje, considérese un cuerpo libre accionado por fuerzas externas y fuerzas de sustentación en el puntal del amortiguador, como.

$$N_{c.g.} = \frac{\text{suma de todas las fuerzas externas}}{\text{masa}} = \frac{F_s + L}{\text{masa}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde F_s , es la fuerza en el amortiguador y L , la fuerza de sustentación, así.

$$N_{c.g.} = \frac{F_s}{\text{mas}} + \frac{L}{W/g} \quad \text{Ecuación 2}$$

En aeronaves utilitarias y de maniobra. Las normas FAR en su parte 23 [27], aplican una fuerza de sustentación igual a 0.67 el peso de la aeronave. $W = \frac{L}{0.67}$, como.

$N_{c.g.} = \frac{F_s}{\text{mas}} + (L * \frac{0.67g}{L})$; Si, por conveniencia, el factor de carga N del tren de aterrizaje se define como igual a F_s/masa , entonces.

$$N_{c.g.} = 0.67 + N; \quad \text{Ecuación 3} \quad \text{Fuente: FAR Part 23 aircraft. [28]}$$

Aplicando lo anterior Siendo así para nuestro caso el factor de carga será para el tren de aterrizaje de 3.67.

6.7.5 Carrera

De una forma sencilla la carrera es aproximadamente una función lineal del factor de carga y es la distancia vertical de movimiento por las ruedas. Esta distancia puede, o no, ser la carrera del amortiguador. Por ejemplo, los aviones de la Marina aterrizan a altas velocidades; entonces para mantener el factor de carga resultante dentro de límites razonables, la carrera es a menudo grande. Para obtener un tren de aterrizaje compacto que ahorra espacio, una suspensión apalancada como diseño se utiliza a menudo. El diseño de la suspensión apalancada a veces llamado tren del brazo de arrastre, es algo más complejo y probablemente un poco más pesado, pero estas características pueden ser compensadas por un espacio de almacenamiento más pequeño, lo que causa menos interrupciones de la estructura del avión. [29]

6.7.6 Cálculo de carrera

Basándonos en Currey, [30] El método para el cálculo de la carrera se basa en la relación fundamental trabajo y energía, donde al momento del aterrizaje el cambio en la energía cinética es igual al trabajo realizado por el sistema del tren de aterrizaje.

Cambio en KE = reducción de la velocidad vertical a cero

$$W \times (V_2)^2 / 2 \times g - W \times (V_1)^2 / 2 \times g = -S \times ns \times NW - St \times nt \times NW + (W - L)(S + St)$$

Ecuación 4

$-S \times ns \times NW$	Trabajo realizado por el puntal	ns	eficiencia del amortiguador
$-St \times nt \times NW$	Trabajo realizado por el neumático	N	factor de carga del tren de aterrizaje
$+W(S + St)$	Trabajo realizado por gravedad	St	deflexión del neumático
$-L(S + St)$	Trabajo realizado por elevación de ala	nt	Eficiencia del neumático.
S	desplazamiento vertical de la rueda	W	peso de la aeronave
V	Velocidad vertical de aterrizaje		

Se asume para las condiciones más conservadoras de diseño, que el peso del ART llegará como máximo a 100 kg, que el factor de carga para el cálculo de la carrera de la llanta será de 3; que la eficiencia del amortiguador según Currey será de 50% para el amortiguador tipo ballesta y 60%, para el amortiguador de cauchos; que la fuerza de sustentación L, es de 0.67W y la deflexión del neumático St, será igual a cero; tomando como referencia el Currey [31] y las recomendaciones del jefe inmediato, Jhon Cárdenas, se asumirá la velocidad de aterrizaje igual a 6 ft/s. Por lo tanto:

6.7.6.1 Para el amortiguador de ballesta:

$$0 - 100kg \times (1.83 \text{ m/s})^2/2 \times 9.8 \text{ m/s}^2 = -S \times 0.5 \times 3 \times 100kg - 0 \times nt \times NW + (100 \text{ kg} - 67)(S + 0) \quad \text{Ecuación 5}$$

Resolviendo la ecuación el desplazamiento vertical de la rueda, da como resultado 14 centímetros, pero Currey [32] señala en el capítulo 3 que generalmente se agrega al valor calculado 0.75-1.0 pulgadas para dar mayor seguridad, siendo así, el valor de la carrera para nuestro caso será de 16.5 centímetros.

6.7.6.2 Para el amortiguador de cauchos:

$$0 - 100kg \times \frac{\left(1.83\frac{m}{s}\right)^2}{2} \times 9.8\frac{m}{s^2} = -S \times 0.6 \times 3 \times 100kg - 0 \times nt \times NW +$$
$$(100 kg - 67)(S + 0) \quad \text{Ecuación 6}$$

Resolviendo la ecuación el desplazamiento vertical de la rueda, da como resultado 11.2 centímetros, pero Currey señala en el capítulo 3 que generalmente se agrega al valor calculado entre 0.75-1.0 pulgadas para dar mayor seguridad, siendo así, el valor de la carrera para nuestro caso será de 13.7 centímetros.

6.8 SELECCIÓN DEL TREN DE ATERRIZAJE

La aeronave a la cual se le planea diseñar el tren de aterrizaje es un ala delta, Figura 8; dichas aeronaves, como el *Northrop N-9M*, no poseen ni cola ni fuselaje cilíndrico en medio de las alas, sino que todo el conjunto está formado por un par de alas. Esta configuración hace que sea casi imposible usar un tren de aterrizaje diferente al de tipo triciclo. Siendo así, se respetarán los puntos de empotre en el fuselaje ya existentes en el fuselaje del ART. donde la distribución porcentual del peso es del 94% para el tren principal y 6% para el tren de nariz, como ya se había mencionado antes, se escogió que el tipo de tren fuera fijo, esto por sus ventajas en aeronaves pequeñas.

6.8.1 Tren de aterrizaje tipo triciclo

La mayoría de las aeronaves en la actualidad usan el arreglo de tren de aterrizaje tipo triciclo, el cual tiene las dos unidades de tren principales posicionadas justo después del centro de gravedad, haciendo que este soporte alrededor del el 80 por ciento del peso de la aeronave [33] y una rueda enfrente llamada rueda frontal, esta disposición hace que el tren principal absorba todas las cargas iniciales de aterrizaje. El capítulo 13 del libro “*General Aviation*

Aircraft Design” titulado como la anatomía del tren de aterrizaje, presenta en sus primeras páginas la siguiente tabla de ventajas y desventajas para un tren tipo triciclo.

Tabla 2 .Ventajas y desventajas del tren tipo triciclo

Tren tipo Triciclo	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Dinámicamente estable, por lo cual es fácil de maniobrar, buen control de tierra en vientos cruzados, hélice mejor protegida de impactos contra el suelo. Gracias a esto hay una vista delantera mucho mejor hacia el suelo para el piloto. Esta disposición también produce una plataforma mucho más nivelada para cargar, eliminando la necesidad de sustentación para elevar la aeronave a posición horizontal. - El frenado fuerte sobre las ruedas principales no ocasiona vuelco hacia delante de la aeronave, permitiendo una inclinación hacia abajo del tren principal en el aterrizaje, reduciendo la elevación. - Fácil de aterrizar debido a que hay menos rebote después del primer contacto con el suelo, radio de giro ajustado debido a una distancia entre ejes corta. - permite velocidades de aterrizajes más altas, debido a que las fuerzas que actúan sobre el centro de gravedad tienden a mantener la aeronave en movimiento en lugar de en bucle. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere una velocidad aerodinámica mínima antes de que el avión pueda ser girado para el despegue. - Mayor peso estructural debido a las tres patas del tren de aterrizaje altamente cargadas, esto también lo hace más costoso. - Mayor arrastre de crucero y se empeora la marcha en terreno irregular. - El Shimmy damper de la rueda delantera puede ser muy dañino, este puede tener más problemas que una rueda de cola. - Mayores cargas dinámicas en tierra debido a una carga más pesada del tren de nariz que una rueda de cola. - Mecanismo de dirección más complejo. - Desafío en la retracción de la rueda de nariz debido al limitado espacio. - El bajo arrastre aerodinámico en el aterrizaje requiere más esfuerzo de frenado, provocando así un frenado pesado descargado sobre las ruedas principales

Fuente: Capítulo 13 del libro “*General Aviation Aircraft Design*” titulado como The Anatomy Of the Landing Gear. [34]

Figura 8. ART de ESUFA.



Fuente: Jheferson García Arias [35]

Figura 9. Northrop N-9M.



Fuente: [36]

En la etapa inicial de diseño se escogió una amortiguación tipo ballesta, por su simplicidad, confiabilidad, facilidad de mantenimiento y el bajo costo inicial; esta se diseñó para ser construida en duro aluminio 7075, para ser sujeta a la estructura del ART mediante unos pernos ya existentes en la estructura. Pero al hacer las correctas mediciones para la ubicación de los componentes que integran el tren de aterrizaje tipo ballesta, se tuvo acceso al interior de la estructura del ART y se notó que las vigas principales que aparecían en los planos de diseño de dicha aeronave, habían sido cortadas y extraídas de la estructura; por este motivo los puntos de empotre que fueron seleccionados para sujetar el tren tipo ballesta quedaron descartados, pues una ballesta en las condiciones reales de la estructura, incurriría en daños masivos en la aeronave al momento de un aterrizaje, dadas la situación se plantea cambiar el tren de aterrizaje por uno apalancado con amortiguador de cauchos, ya que para la implementación del tren de aterrizaje tipo ballesta se tendrá que hacer un refuerzo de los puntos de sujeción, y para esto se debe hacer un estudio aparte. El tren de aterrizaje de cauchos se diseñó para ser construido en duraluminio 7075 T62.

6.9 DISEÑO DEL TREN DE ATERRIZAJE

El diseño del tren de aterrizaje hace uso de las mejores técnicas y herramientas de la ingeniería, ya que hay que satisfacer necesidades tales como: el tren debe de ser robusto y a la vez liviano, de fácil mantenimiento y de construcción sencilla; este es el que debe absorber

la energía cinética del impacto del aterrizaje, disminuir vibraciones, dar control, estabilidad y dirección, proveer la habilidad para maniobrar en tierra durante el taxiing, giro de despegue y aterrizaje; también proveer la capacidad de frenado y proteger a la estructura de la aeronave de la superficie de la tierra. Por ello el tren de aterrizaje debe poseer un sistema de amortiguación para poder disminuir el impacto. El peso de la estructura del tren no debe de ser mayor al 6% del peso total del avión, su volumen debe de ser mínimo y el dispositivo de absorción de energía o sistema de amortiguación debe de ser tal, que el impacto de los choques fuertes no sea transmitido al resto del avión. [37]

Cabe decir que la verdadera función de la amortiguación de los trenes de aterrizaje es reducir la velocidad vertical del avión a cero, en tal forma que la reacción del suelo nunca exceda de un cierto valor crítico, que se debe considerar para mantener la idoneidad estructural dentro de los márgenes de seguridad en los trenes de aterrizaje.

6.10 DISEÑO DE AMORTIGUADOR TIPO BALLESTA

Como se señaló anteriormente, este es un tipo útil de amortiguador para aviones ligeros, ya que es relativamente barato y esencialmente libre de problemas. Un minucioso análisis del diseño del tren de aterrizaje de muelle o ballesta implica un proceso iterativo; aunque el principio es elemental, el proceso es tedioso. Por ejemplo, habiendo obtenido primero una hoja resorte que es lo suficientemente fuerte, es probable que la deflexión sea demasiado pequeña o demasiado grande para que coincida con el factor de carga deseado; por lo que las dimensiones de la hoja se deben ajustar hasta que la deflexión y la resistencia sean satisfactorias.

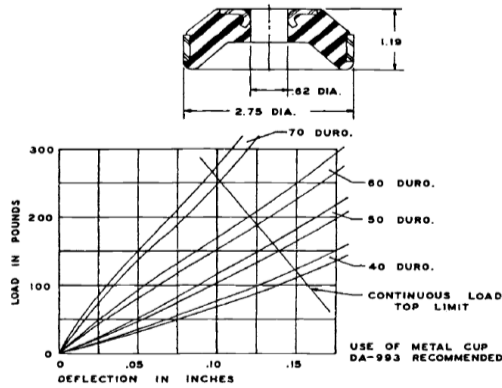
6.11 DISEÑO DEL AMORTIGUADOR DE CAUCHOS

En el capítulo 1 de Aircraft Landing Gear Design, Currey [38] muestra los primeros amortiguadores de los trenes de aterrizaje del avión, usando una cuerda elástica envuelta alrededor de los ejes de los combatientes de la Primera Guerra Mundial. Estas cuerdas se

podían estirar hasta el 200% de su longitud libre, aunque el 175% era el máximo recomendado, y debían ser pretensados al 70% de su carga estática.

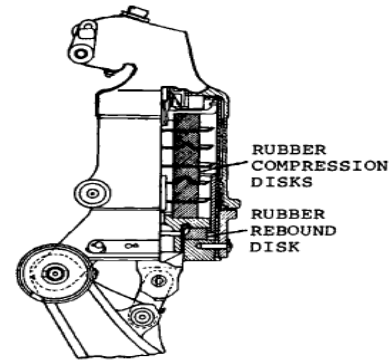
Los discos de goma se han utilizado durante muchos años, el grosor de cada disco está limitado por el grosor que es posible vulcanizar, este grosor no debería ser más de 1.50 pulgadas. Los discos se apilan en números suficientes para proporcionar la carrera requerida; aunque una declaración de la regla de oro limita las deflexiones del disco al 50%, Los valores reales de las deformaciones del material deben obtenerse de los fabricantes de discos, uno de estos fabricantes es Firestone Tire and Rubber Company, la figura 11 muestra las características de un disco típico, la figura 12 se incluye para ilustrar el diseño de una unidad típica (rueda de cola del mosquito DH) usando discos de goma apilados. El mosquito de Havilland, que pesa 8950 libras, tiene amortiguadores de disco de goma en el tren principal, comprendiendo 14 discos. Utiliza un tubo central para mantener todos los discos en línea; el agujero en el centro de cada disco está forrado con tela. Durante la compresión, estos agujeros se hacen más pequeños y la tela entra en contacto con tubo, absorbiendo así parte de la energía por medio de la fricción.

Figura 10. Típico disco de cauchos de absorción



Fuente: Aircraft Landing Gear Design:
Rubber shock-absorbing disk. [39]

Figura 11. Rueda de cola del mosquito DH

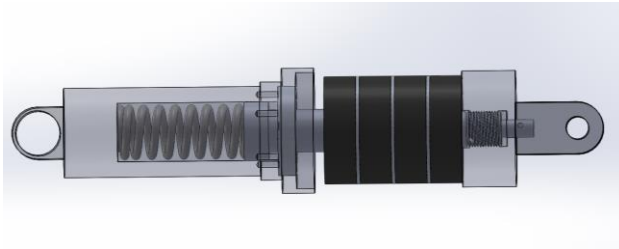


Fuente: Aircraft Landing Gear Design: DH
Mosquito tail Wheel. [40]

6.11.1 cauchos acompañados de muelle helicoidal

El tren de tipo apalancado que se diseñará tiene una ventaja sobre los trenes convencionales, la implementación de un muelle de compresión acompañará de forma solidaria al sistema de amortiguación. La idea surge para solucionar un problema en las operaciones de taxiing, pues por las condiciones de las pistas y porque no siempre la aeronave tendrá los 100 kg de peso, que se tomaron para el diseño, se pueden presentar vibraciones que lleven a futuros desajustes o fatigas en el interior de la aeronave si ésta siempre se encontrase con un contacto rígido con los amortiguadores de caucho, ya que estos por el impacto que deberán soportar, no pueden ser blandos. Con lo anterior en mente, se planeó la manera de que un muelle actuará como amortiguador en serie para los primeros 981 N de carga, equivalentes a la aeronave en reposo con un peso de 100 kg, la configuración del amortiguador permitirá que una vez sobrepasado este límite, ya sea por el impacto de aterrizaje, por un bache en la pista o sobrepeso del avión mismo, los discos de cauchos comenzaran a cumplir su tarea en el sistema de amortiguación en serie. La figura 12 muestra el actual sistema de amortiguación diseñado.

Figura 12. Captura del actual sistema de amortiguación



Fuente: Captura de SolidWorks

6.12 MATERIALES DEL TREN DE ATERRIZAJE

Se selecciona un material al adecuar sus propiedades mecánicas a las condiciones de servicio requeridas para el componente, el primer paso en el proceso de selección requiere que se analice la aplicación, a fin de determinar las características más importantes que el material debe de poseer. ¿Deberá ser resistente, rígido o dúctil? ¿Estará sometido a la aplicación de una fuerza cíclica importante o a una fuerza súbita intensa; a un gran esfuerzo y temperatura elevada o a condiciones abrasivas? [41]

Debido a la aplicación del tren de aterrizaje, expuesta anteriormente. Además, que debe soportar impactos muy fuertes, lo ideal es que el material escogido para la fabricación del tren cuente con propiedades mecánicas de gran templabilidad, tenacidad, y resistencia a la fatiga. Por otra parte, este debe garantizar un bajo peso y como es bien sabido, la manera más eficaz de reducir el peso y mejorar el rendimiento consiste en reducir la densidad y aumentar las propiedades mecánicas.

6.12.1 ACERO 5160

Acero caracterizado por su gran tenacidad, templabilidad, resistencia a la fatiga y la tracción debido a sus componentes elevados de carbono, cromo y manganeso. Este acero se usa en la industria automotriz en la fabricación de ballestas, muelles helicoidales para automóviles, arboles de transmisión, barras de torsión, grandes engranajes, cuchilla para corte en frío de metales, bielas, rotores de turbinas y piezas sometidas a desgastes. [42]

6.12.2 ACERO 1040

Es un acero de carbono medio, de tracción media, suministrado como forjado o normalizado. Este grado de acero se usa para piezas forjadas donde la resistencia del material es apropiada. 1040 se puede utilizar para la fabricación de cigüeñales y acoplamientos forjados, junto con una gama de piezas en las que las propiedades del 1040 tratado térmicamente son adecuadas para la aplicación. [43]

6.12.3 ACERO 1050

Es un acero mediano al carbono, de media tensión con una resistencia y tenacidad razonables. Este grado de acero se utiliza para la fabricación de ejes y engranajes forjados y para una amplia gama de aplicaciones que pueden hacer uso de sus propiedades mecánicas alcanzables. [44]

6.12.4 ACERO 4130

Es un acero perteneciente a la familia de los aceros 41xx (aceros al cromo-molibdeno) de baja aleación, medio carbono y alta resistencia. Es el más extensamente usado, su relativamente alta templabilidad lo hace ser considerado como una buena opción en aplicaciones en donde se requiere dureza y tenacidad. Su principal aplicación es en la industria automotriz, conectores de varillas, tubos para armaduras de avión, cigüeñales, rotulas, semiejes para remolques, flechas de transmisión y potencia. [45]

El atractivo del aluminio es que se trata de un metal de costo relativamente bajo y peso ligero, que puede ser sometido a niveles de fuerza bastante elevados en calor y es uno de los materiales de alto rendimiento de más fácil fabricación, lo que por lo general se correlaciona directamente con costos más bajos. Las principales razones para su uso son: Alta resistencia al peso, Interesantes propiedades criogénicas. Las aleaciones de aluminio no se fragilizan a bajas temperaturas y se vuelven aún más fuertes a medida que disminuye la temperatura sin

pérdidas significativas de ductilidad o Maquinabilidad. Las aleaciones de aluminio son las más fáciles de todos los metales para formar y mecanizar, además estas poseen resistencia a la corrosión en ambientes naturales. [46]

6.12.5 6061

Es la aleación de aluminio más usada no solo en componentes de ciclismo, y habitualmente es el de uso más extendido, es la que habitualmente está en los componentes más económicos y usado en componentes más genéricos. Es bastante resistente a la corrosión y de las aleaciones de aluminio más habituales es la que mejor se puede soldar. [47]

6.12.6 7075

El segundo en lista de las aleaciones usadas es el 7075, ya que es muy resistente tanto o más que el acero, aunque no se puede soldar, lo que hace que su mecanización sea generalmente en una sola pieza, sin embargo, no es muy resistente a la corrosión, por lo que habitualmente aparece recubierto o bien de fibra de carbono o pintado. Es una aleación de aluminio con Zinc, usada en la industria aeronáutica, fuselajes y estructuras de aviones. [48]

6.12.7 T6

Es el tratamiento térmico del aluminio. Solución tratada térmicamente y luego envejecido artificialmente. Esta designación se aplica a los productos que no están trabajados en frío después de la solución de tratamiento térmico, o en los que el efecto del trabajo en frío en aplanamiento o enderezamiento no afecta las propiedades mecánicas. [49]

6.12.8 T62

Para lograr este temple, se trata térmicamente la solución del metal, y se envejece artificialmente hasta que cumpla con los requisitos de las propiedades mecánicas estándar. A diferencia del temperamento T6, esto lo hace el receptor en lugar del proveedor. [50]

Tabla 3. Propiedades mecánicas de los materiales

Materia	Dureza (HV)	Módulo elástico (GPa)	Límite elástico (mpa)	Resistencia a compresión (mpa)	Esfuerzo último a tensión (mpa)	Elongación (%)	Resistencia a la fatiga. 10⁷ ciclos (mpa)	Tenacidad a la fractura (mpa.m^{0.5})	Precio (cop/kg)
SAE 5160	250	209	533	533	960	18	415	106	1023
AISI 1040	177.5	212	375	375	525	28	300	62	1075
AISI 1050	223	212	428	428	637.5	24	350	67	1075
SAE 4130	165	208	360	360	560	28	285	98.5	1145
Duraluminio 7075, O	34.7	74	105	105	225	15	51.6	37	4730
aaaaaa	160	72.5	444.5	461.5	507	6	123.9	26.7	4730
Duraluminio 7075,T6 2	143.5	72.8	424	434.5	506.5	6	149	30	4730

Fuente: CES EduPack 2013 [51]

6.12.9 CAUCHO NATURAL

También llamado NR, por sus siglas en inglés *Natural Rubber* es un hidrocarburo de gran importancia que se obtiene del látex, producido por varias moráceas y euforbiáceas intertropicales, pero solo se explota comercialmente la *Hevea Brasiliensis*. El látex se encuentra en forma de una suspensión coloidal acuosa, de aspecto lechoso, que contiene alrededor de 30% de caucho. Los cauchos naturales tienen una amplia gama, subdividida por la abrasión que pueden soportar y las durezas que poseen. Las aplicaciones de este tipo de goma generalmente son: industrias mineras, canteras, procesos de áridos, cabinas de granallado, protección de tolvas, industrias tejeras, galerías de tiro, industria alimentaria, rascadores y bandas quitanieves. [52]

6.12.10 CAUCHO SINTETICO

Los Cauchos Sintéticos poseen una resistencia a la tracción menor que los cauchos naturales y no son tan extensibles como éstos, pero en general aventajan a los naturales con su mayor resistencia a los solventes orgánicos, aceites y grasas, petróleos y sus derivados; así como por su menor envejecimiento por el calor, ozono o productos oxidantes y su baja permeabilidad a los gases.

Así que en comparación con el caucho natural NR, los cauchos sintéticos son los más adecuados para una amplia gama de servicios de protección mecánica y de Juntas de estanqueidad donde van a estar en contacto con agentes químicos agresivos, alta temperatura, aceites e hidrocarburos, gases, disolventes y con aplicaciones de exterior (ozono, rayos UV, oxidación, frío, etc.).

El caucho sintético también tiene una amplia gama, pero en este caso y a diferencia de los NR, se clasifican por la composición de este, entre sus gamas se encuentran: SBR Estireno Butadieno, TR Caucho de Polisulfuro, NBR Acrilonitrilo Butadieno, HNBR Caucho Nitrílico Hidrogenado, XNBR Caucho Nitrílico Carboxilado, CR Poli cloropreno (Neopreno), EPM/EPDM Etileno Propileno, FEPM Tetrafluoretileno y Propileno, IIR

Isobutileno Isopreno (Butyl), AME Etileno Acrilato, ACM Caucho Acrílico, CSM Polietileno Clorosulfonado, CO/ECO Epiclorhidrina, AU/EU Caucho de Poliuretano, FKM/FPM Caucho Fluorado, FFKM/FFPM Caucho Perfluorado, perfluoroelastomero y VMQ Silicona (Metil Vinil) [53]

En la industria aeronáutica es común que se use el caucho fluorado FKM, sin embargo, para esta aplicación se recomienda usar neopreno CR, la razón es que el neopreno sin siquiera estar vulcanizado supera en propiedades mecánicas y hasta en precio al FKM. La tabla 4 deja ver la comparación.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los cauchos

Materia	Dureza (Shore A)	Módulo elástico (GPa)	Límite elástico (MPa)	Resistencia a compresión (MPa)	Esfuerzo último a tensión (MPa)	Elongación (%)	Resistencia a la fatiga. 10 ⁷ ciclos (MPa)	Tenacidad a la fractura (MPa.m ^{0.5})	Precio (COP/kg)
FKM	55	0,0032	12	14,4	12	300	4,8	0,951	104000
CR	43	0,00188	18	21,6	18	850	7,2	0,849	12700

Fuente: CesEdupack. [54]

6.12.11 VULCANIZADO

La vulcanización es un proceso químico para la conversión del caucho o polímeros relacionados, en materiales más duraderos a través de la adición de azufre u otros equivalentes "curativos". Estos aditivos modifican el polímero mediante la formación de enlaces cruzados (puentes) entre las distintas cadenas de polímeros. El material vulcanizado es menos pegajoso y tiene propiedades mecánicas superiores.

El Proceso es generalmente irreversible, al igual que otros procesos de los plásticos termoestables y en contraste con los termoplásticos (el proceso de fusión y solidificación) que caracterizan el comportamiento de la mayoría de los polímeros modernos. El

entrecruzamiento se hace generalmente con azufre, pero otras tecnologías son conocidas, incluyendo sistemas basados en peróxido orgánico.

Los principales polímeros sometidos a vulcanización son poli-isopreno (caucho natural) y caucho estireno-butadieno (SBR). La técnica y conjuntos de compuestos de curado (paquete de cura) se ajusta específicamente para el sustrato y la aplicación. Los sitios de reacción (sitios de cura), son los átomos de hidrógeno alílicos. Estos enlaces CH están al lado de enlaces doble carbono-carbono. Durante la vulcanización, algunos de estos enlaces CH son reemplazados por cadenas de átomos de azufre que enlazan con un sitio de cura de otra cadena de polímero. Estos puentes contienen entre uno y ocho átomos de azufre. El número de átomos de azufre en el entrecruzamiento influye fuertemente en las propiedades físicas del artículo de caucho terminado. Entrecruzamientos cortos dan a la goma mejor resistencia al calor. Enlaces cruzados con mayor número de átomos de azufre dan a la goma buenas propiedades dinámicas pero menor resistencia al calor. Las propiedades dinámicas son importantes para los movimientos de flexión del artículo de caucho, por ejemplo, el movimiento de una pared lateral de un neumático en funcionamiento. Sin buenas propiedades de flexión estos movimientos forman rápidamente grietas y, en última instancia, hacen que el artículo de goma se quiebre. [55]

En la siguiente tabla se muestra cómo cambian las propiedades del caucho natural con el proceso de la vulcanización:

Muchos de los cauchos sintéticos también pueden “vulcanizarse” recordando que, desde la óptica química, no es más que un proceso de curado que crea puentes entre los enlaces las estructuras moleculares. Por ejemplo, La vulcanización de neopreno o policloropreno (caucho CR) se lleva a cabo usando óxidos metálicos (en particular MgO y ZnO, a veces PbO) en lugar de compuestos de azufre que se utilizan actualmente con muchos cauchos naturales y sintéticos.

Tabla 5.caucho vulcanizado

Materia l	Dureza (Shore A)	Módulo elástico (GPa)	Límite elástico (MPa)	Resiste ncia a compre sión (MPa)	Esfuerz o ultimo a tensión (MPa)	Elong ación (%)	Resistenci a a la fatiga. 10⁷ ciclos (MPa)	Tenacidad a la fractura (MPa.m^{0.5})	Precio (COP/kg)
NR	37,5	0,00165	24,5	29,4	24,5	690	9,8	0,824	7360
NR (Vulcani zado)	99	1,5	70	64	79	5,5	28	3,235	8770

Fuente: CesEdupack [56]

Además, debido a varios factores de procesamiento (principalmente quemaduras, siendo ésta la reticulación prematura de cauchos, debido a la influencia del calor), la elección del acelerador se rige por normas distintas a otros cauchos dieno. Los aceleradores utilizados para el cloropreno pueden acarrear ciertos problemas. El más importante acelerador para el curado del caucho CR (tiourea de etileno o ETU), que, a pesar de ser un excelente acelerador para policloropreno, ha sido clasificado como tóxico para la reproducción. [57]

7. METODOLOGÍA

7.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Donde se hizo el estudio del estado del arte y apoyándonos en la teoría encontrada, se hizo la recopilación de información tanto de los trenes de aterrizaje como, de los ART. Obteniendo así datos de literatura, ejemplos, diagramas, artículos e información audiovisual.

7.2 INGENIERÍA DE DETALLE

Se hizo el análisis geométrico y estructural del ART, así como, el meteorológico tanto de la estructura del ART, como del tren de aterrizaje; se hizo la recolección y validación de la información correspondiente a la aeronave. Donde se determinará el peso del ART, la ubicación y configuración del tren de aterrizaje

7.3 CÁLCULO DE LAS CARGAS

Donde se hizo el cálculo de las cargas a las que está sometido el tren de aterrizaje.

7.4 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se hizo el modelamiento de los componentes que integra el tren de aterrizaje, en Solid Works. Se hicieron las simulaciones en ANSYS del tren de aterrizaje, en los módulos, static structural, rigid dynamics, transient structural.

7.5 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Se escogió el material en el cual se diseñó el tren de aterrizaje

7.6 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se dieron las conclusiones y recomendaciones de los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto.

Actividad	RESPONSABLE	Semanas 2018																Semanas 2019							
		Agosto		Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre				Enero				Febrero	
		3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
DISEÑO DEL TR EN PRINCIPAL DE ATERRIZAJE	Jheferson García, Sebastián Villa																								
1. Recopilación de información de los trenes de aterrizajes.	Jheferson García, Sebastián Villa																								
2. Análisis geométrico y estructural de la aeronave remotamente tripulada en poder de la escuela de suboficiales.	Jheferson García, Sebastián Villa																								
3. Precisar los componentes particulares que integran el tren principal de aterrizaje.	Jheferson García, Sebastián Villa																								
4. Realizar el diseño de los componentes que integran el tren principal de aterrizaje.	Jheferson García, Sebastián Villa																								
5. Determinar las cargas que soportará el tren principal para posterior simulación y análisis finito en cada uno de los componentes que integra el tren principal de aterrizaje.	Jheferson García, Sebastián Villa																								
6. Selección de los materiales para los componentes que constituyen el tren de aterrizaje.	Jheferson García, Sebastián Villa																								
7. Validación e integración de los componentes del tren de aterrizaje.	Jheferson García, Sebastián Villa																								

8. DESARROLLO EXPERIMENTAL

8.1 INTRODUCCIÓN

“El software CAD SOLIDWORKS® es una aplicación de automatización de diseño mecánico que les permite a los diseñadores croquizar ideas con rapidez, experimentar con operaciones y cotas, y producir modelos y dibujos detallados”. [58]

En este capítulo se muestran los detalles y resultados del modelamiento de los componentes que integran el tren de aterrizaje tipo ballesta, así como los componentes que integran el tren de aterrizaje apalancado con amortiguador de cauchos, destinados a ser analizados en el siguiente capítulo en ANSYS

8.2 MODELO TIPO BALLESTA

El tren de aterrizaje en estudio corresponde al de una aeronave genérica pequeña, con una configuración de tren tipo triciclo, y de amortiguación tipo resorte de hoja de acero (ballesta). Para el diseño de los componentes que integran dicho tren de aterrizaje se ha tomado como referencia el catálogo de partes de las aeronaves Cessna [59] de los años 70, las dimensiones aplicadas al modelo de los componentes del tren han sido propuestas en base a las dimensiones y cargas que presenta la estructura del ART de la Fuerza Aérea Colombiana. Siendo así, a lo largo de este capítulo se especificarán las dimensiones de cada componente que integra el tren de aterrizaje, aunque no se incluirán partes normalizadas, como tornillos, tuercas, rodamientos, llantas... Igualmente, se suprime tanto del modelado, como del análisis, las partes del sistema de frenado. En el **anexo A** se muestra las imágenes del modelamiento de piezas que integran el tren de aterrizaje tipo ballesta.

NOTA: El diseño del tren de aterrizaje tipo ballesta debió interrumpirse debido que al hacer las correctas mediciones para la ubicación de los componentes que integran el tren de aterrizaje, se tuvo acceso al interior de la estructura del ART y se notó que las vigas principales que aparecían en los planos de diseño de dicha aeronave habían sido cortadas y

extraídas de la estructura. Esta situación repercutió en la necesidad de cambiar la propuesta de diseño.

8.3 MODELO TIPO APALANCADO

Las dimensiones aplicadas al modelo de los componentes del tren se presentan en base a las características geométricas y cargas que presenta la estructura del ART de la Fuerza Aérea Colombiana. Siendo así, a lo largo de este capítulo se especificarán las dimensiones de cada componente que integra el tren de aterrizaje, aunque no se incluirán partes normalizadas, como tornillos, tuercas, rodamientos, llantas... igualmente se suprime tanto del modelado, como del análisis, las partes del sistema de frenado

En el **anexo B** se muestra las imágenes del modelamiento de piezas que integran el tren de aterrizaje tipo apalancado, en el **anexo C** se encuentran los planos de las piezas necesarias para el ensamble del tren de aterrizaje tipo apalancado.

El tren de aterrizaje apalancado está diseñado en base al que pertenece a la aeronave Skyleader 600, figura 13, éste se tomó como referencia debido a la simplicidad que posee; a que las características geométricas del Skyleader 600 no tienen una brecha tan extensa en lo que a peso y envergadura respectan, además, de que es un modelo de aeronave relativamente moderno y estilizado. En la figura 14 se deja ver la configuración del tren principal del Skyleader 600.

Figura 13. Skyleader 600.



Fuente: Skyleader 600 [60]

Figura 14. Tren apalancado del Skyleader 600



Fuente: tren apalancado.
Skyleader.[61]

En la implementación de este tren de aterrizaje surgen algunas características adicionales como los son el uso de cauchos para que amortigüen el impacto, el apalancamiento que de forma indeseada pero inherente genera un efecto multiplicador de fuerza en la amortiguación y, por último, la implementación de un muelle de compresión el cual requiere de un diseño particular y personalizado.

Es de resaltar que, al cambiar el tipo de tren a diseñar se mejora la eficiencia en un 10% pues usar un sistema de cauchos como amortiguación representa un 60% de eficiencia, como se mostró en la figura 2.

8.3.1 DISCOS DE CAUCHO

Para el diseño de los discos de caucho, las dimensiones se tomaron en base a dos referencias, la primera fue que el espesor de los discos no superase los 38,1 mm (1,5 pulgadas), estos deben tener ese límite de tamaño para luego poder ser vulcanizados correctamente [62]. La segunda fue la forma simple que se dejó ver en la amortiguación del Skyleader 600, figura 14. Con lo anterior presente, se propone un disco simple cuyas dimensiones se muestran en el **anexo D**.

El material tentativo para el disco es el neopreno, pero esto puede cambiar luego del análisis resultados de deformación en ANSYS, en caso tal una segunda opción tentativa es el caucho

natural endurecido (vulcanizado). Las propiedades de ambos materiales se mostraron en la tabla 4.

Para hacer una simulación precisa de materiales viscoelásticos como los son los cauchos, se requieren ensayos de tracción uniaxiales y biaxiales, estos dan como respuesta en el caso de los elastómeros, coeficientes usados en los software de FEM; el modelo de Yeoh es el más común, pues solo requiere tres de esos coeficientes, C_{10} , C_{20} y C_{30} ; La curva de hiperelasticidad es la que requiere tales coeficientes, en el caso de ANSYS, este construye la gráfica luego de ingresar estos coeficientes.

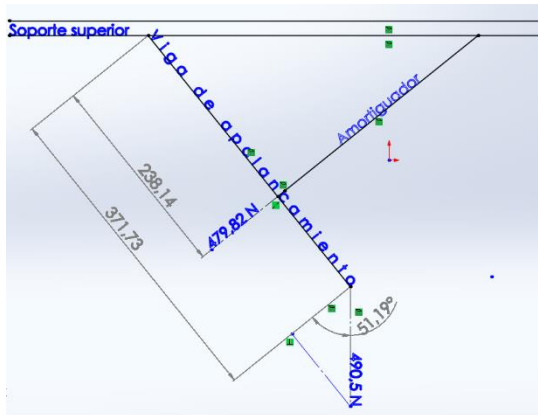
NOTA: este procedimiento se omite en nuestro análisis dado que realizar una prueba de propiedades básicas de tracción uniaxial de un elastómero cuesta, según la empresa que ANSYS recomienda, 1.155 USD. [63]

En cuanto a la cantidad de los discos, se apilaron cuatro discos separados por tres platos de espesor delgado para que el conjunto de cauchos pueda realizar el rebajo de absorción de impacto en serie.

8.3.2 MUELLE HELICOIDAL

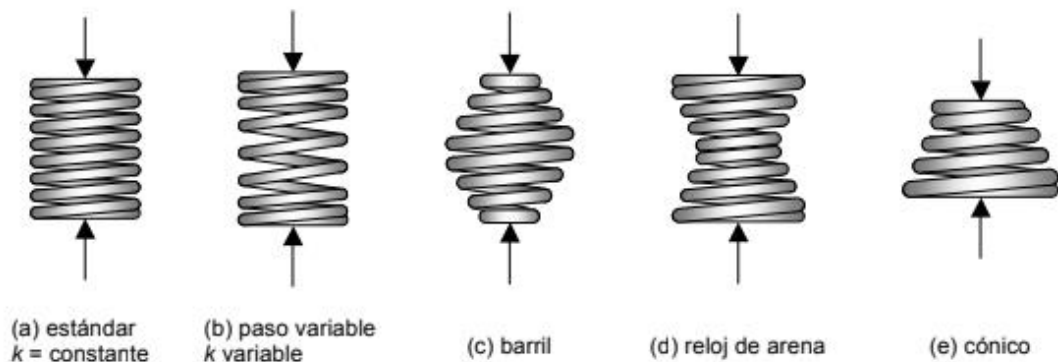
Como se menciona en apartados anteriores, la innovación de este tren de aterrizaje está en un resorte o muelle que mantendrá el ART suspendido cuando este esté en estado de reposo. Para la generación del resorte en SolidWorks primero, se hará un análisis estático del caso importante para su funcionalidad, como lo es el estado en reposo. La figura 15 muestra el diagrama de cuerpo libre de un lado del tren principal, con este se calcula la fuerza que deberá soportar el resorte; como se deja ver, la carga disminuye por efecto de la inclinación del amortiguador.

Figura 15. Diagrama de cuerpo libre



Los resortes helicoidales de compresión están hechos de alambre enrollado en forma de hélice y están diseñados para soportar cargas de compresión. Lo normal es que el alambre de un resorte helicoidal sea de sección circular, pero en la industria se pueden encontrar diversas secciones de alambre, como se muestra en la figura 16. donde el resorte estándar es de paso (p), constante, y de tasa (k), constante. El paso es la distancia entre dos puntos equivalentes de dos espiras consecutivas, y la tasa del resorte es la relación entre el incremento infinitesimal de la fuerza aplicada y la deformación axial, infinitesimal causada. [64]

Figura 16. Resortes helicoidales de compresión.



Fuente: diseño de elementos de máquinas. [65]

A la hora del diseño del amortiguador de cauchos se decidió acoplar un resorte helicoidal de compresión a la estructura del tren apalancado, esto para ayudar a soportar las cargas de

impacto y de fatiga, a las que estará sometido el tren a la hora del aterrizaje. Apoyándonos en la aplicación “spring creator calculator” del sitio web de una comercializadora de resortes [66]. Se buscó un resorte comercial que cumpliera con las características geométricas necesarias, mostradas en la figura 17, para que el resorte se acomodara al espacio disponible en el cuerpo del cilindro superior del amortiguador del tren de aterrizaje.

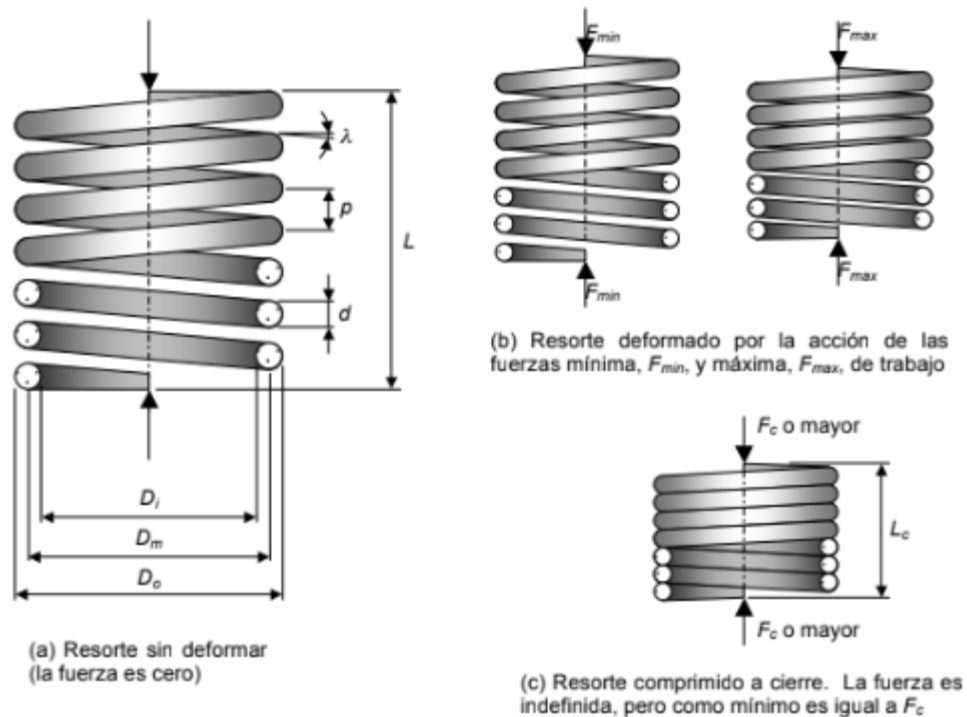
d : diámetro del alambre del resorte.

D_o : diámetro exterior del resorte.

D_m : diámetro medio del resorte. Es el diámetro del cilindro imaginario cuya superficie contiene el eje imaginario del alambre.

D_i : diámetro interior del resorte.

Figura 17. Nomenclatura de los resortes helicoidales de compresión



Fuente: nomenclatura y características geométricas. [68]

N_t : número de espiras (totales).

N_a : número de espiras activas. Es el número de vueltas del alambre que está trabajando, ya que pueden existir tramos de alambre que están apoyados sobre otros, sin trabajar.

L: longitud libre del resorte. Es el largo del resorte, medido entre dos puntos extremos, cuando el resorte no está cargado.

L_c : longitud de comprimido a cierre. Es la longitud del resorte cuando éste se ha comprimido de tal manera que todas las espiras estén en contacto con las adyacentes.

λ : ángulo de paso. Es el ángulo entre la tangente de la hélice y el plano perpendicular a la línea axial del resorte.

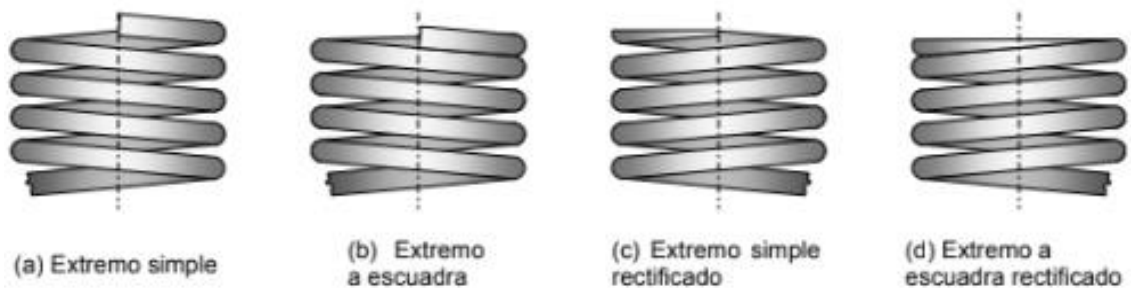
F: fuerza de trabajo. En general, un resorte puede estar sometido a una fuerza cíclica que puede variar entre un valor mínimo, F_{min} , debido a una precarga, hasta un máximo F_{max}

F_c : fuerza de comprimido a cierre. Es la fuerza mínima que se debe aplicar para que el resorte tenga una longitud L_c , es decir, para que las espiras queden en contacto con las adyacentes.

δ : deformación axial del resorte. Es la diferencia entre la longitud libre del resorte y la obtenida al aplicar la fuerza F_{max} .

δ_c : deformación axial del resorte cuando éste se ha comprimido a cierre.

Figura 18. Tipos de terminados de resorte



Fuente: diseño de elemento de máquinas, espiras activas [69]

El resorte helicoidal estará sometido a una fuerza cíclica que varía entre 480 N (carga estática) y 600 N (carga en el momento del aterrizaje). Se diseñará este resorte, usando extremos a escuadras rectificadas, según Useche “El extremo a escuadra rectificado suministra la mejor alineación, pero es costoso” la deformación axial del resorte será cerca de 30 mm cuando se aplique la fuerza máxima. El resorte debe tener una longitud libre de 76,2 mm máximo.

Para este diseño no se usó una gran exactitud, debido a que las cargas de aterrizaje serán absorbidas principalmente por los cauchos, además con la idea de ser conservadores en el diseño, se dejó como 490 N la carga mínima del resorte; Se usó la plataforma “spring creator calcuator” para encontrar el resorte en la industria y no tener que fabricarlo.

En el **anexo E** se muestran: los conceptos teóricos para el diseño de resortes tomados del libro de Useche [70]; los cálculos realizados para comprobar la viabilidad del resorte y los resultados de la búsqueda en la plataforma “spring creator calcuator”

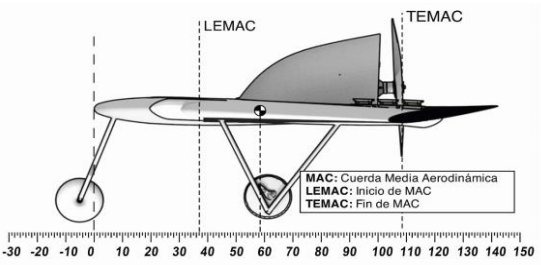
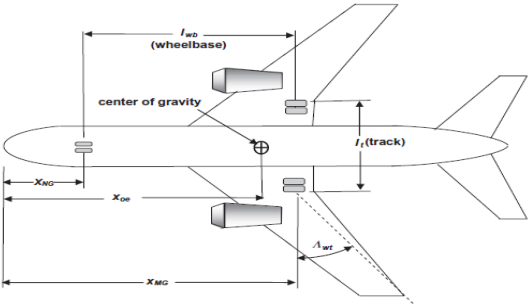
El resorte que se selecciona tiene el siguiente número de serie:

PC177-1225-10.000-MW-3.000-CG-N-IN

8.4 DETERMINACIÓN DE LA CARGA

8.4.1 Cargas estáticas en el tren principal de aterrizaje

Basándonos en el Commercial Landing Gear Design Principles [71]. Cuando el avión está parado, en rodaje a velocidad constante (taxiing), o aceleraciones muy pequeñas. La disposición simétrica del tren principal sobre la línea central del fuselaje garantiza que las fuerzas que soporta cada rueda sean iguales, con cada rueda soportando una carga igual a $F_e/2$. La mayor carga estática en el tren principal se produce en la ubicación más alejada del centro de gravedad de la parte trasera de la aeronave, y dicha carga se halla con las siguientes ecuaciones.

<p>Figura 19. Estaciones del ART.</p>  <p>fuelle:[72]</p>	<p>Figura 20. Diseño general del tren de aterrizaje de una aeronave comercial.</p>  <p>fuelle:[73]</p>
$F_a + F_e = W$ <p>Ecuación 7</p>	F_a : fuerza en el tren de nariz
$F_a (x_{oe} - x_{NG}) = F_e (x_{MG} - x_{oe})$ <p>Ecuación 8</p>	F_e : fuerza en el tren principal
$F_a = W(x_{MG} - x_{oe}) / l_{wb}$ <p>Ecuación 9</p>	W : fuerza total
$F_e = W(x_{oe} - x_{NG}) / l_{wb}$ <p>Ecuación 10</p>	

Debido a que el diseño del ART de la Fuerza Aérea Colombiana, Figura 19, varía con respecto al diseño de una aeronave comercial, figura 20. Se llegó a la conclusión de que la aplicación de las anteriores ecuaciones para determinar la carga estática del tren de aterrizaje principal del ART, arrojaría una respuesta errónea. Por esto, se escogió que para hallar la carga estática que soporta el tren principal se analizará la configuración de los trenes de aterrizaje del ART como una viga simple apoyada, donde los apoyos de dicha viga serán el tren principal y el tren de nariz respectivamente, y la carga que soporta la viga será equivalente al peso total del ART (con combustible y accesorios), aplicada en el centro de gravedad del ART.

Puede esperarse entonces que alrededor del 85-90% de la carga estática es tomada por el tren principal y el 10-15% restante por el tren de nariz. La carga útil, es decir, los pasajeros y la

carga, en la aeronave deben llevarse de tal manera que el centro de gravedad se mantenga por delante del tren principal. [74]

8.4.2 Carga máxima estática

Teniendo en cuenta la disposición simétrica del tren principal sobre la línea central del fuselaje que garantiza que las fuerzas que soporte cada rueda son iguales. Con cada rueda soportando una carga igual a $F_e/2$. En el siguiente análisis se puede observar que $F_e/2=460.75N$, siendo esta la carga máxima estática que soportara cada strut del tren principal.

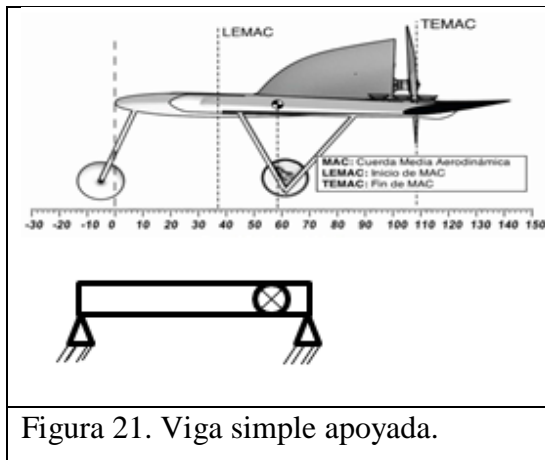


Figura 21. Viga simple apoyada.

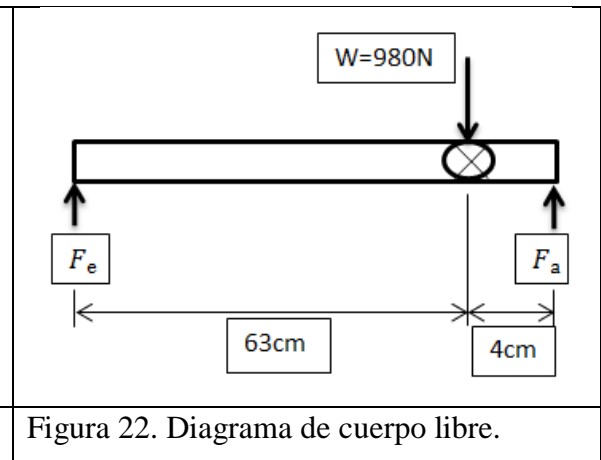


Figura 22. Diagrama de cuerpo libre.

$\sum M(F_a) = 0$ $67 F_e - 4(980N) = 0$ $F_e = \frac{4(980N)}{67} = 58,5v N$	$\sum F(y) = 0$ $F_e + F_a = 980N$ $F_a = 980N - 58,5 N$ $F_a = 921.49 N$
---	---

8.4.3 Carga máxima en el momento del despegue

Para calcular la carga a la que se someterá el tren a la hora del despegue, se propone un Ángulo de despegue de 15° , por recomendación del jefe directo Jhon Alexander Cárdenas Puentes. Dicho Ángulo representa el vector en el que se aplica la carga en el tren de aterrizaje

al momento del despegue, arrojando valores distintos en la solución. Debido a que la carga, en el momento del despegue, se distribuye únicamente entre las dos partes del tren de aterrizaje principal, la carga total es dividida entre ambas partes, aumentando el esfuerzo, respecto a la simulación de la aeronave en estado estático.

<p>Ángulo de despegue: $\alpha = 15^\circ$ $W = 980\text{N}$ $F_a = 980\text{N}/2 = 490\text{ N}$</p>	<p>Componente vertical en el eje vertical: $490\cos 15 = 473.30\text{N}$ Componente vectorial en el eje horizontal: $490\sin 15 = 126.82\text{N}$</p>
--	--

8.4.4 Carga máxima en el momento del aterrizaje

<p>Ángulo de despegue: $\alpha = 15^\circ$ $W = 980\text{N}$ $F_e = 980\text{N}/2 = 490\text{ N}$ Factor de carga en el Centro de gravedad: 3.67 (sección 1.7.3)</p>	<p>Componente vertical en el eje vertical: $473.30 \times 3.67 = 1737.02\text{ N}$ Componente vectorial en el eje horizontal: $126.82 \times 3.67 = 465.43\text{ N}$</p>
--	---

Debido a que en el momento del aterrizaje es donde se presenta la carga mayor y por ende el estado más crítico, es que la simulación en ANSYS se hará únicamente con las cargas en el momento del aterrizaje.

9. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el análisis del tren de aterrizaje tipo ballesta y del tren de aterrizaje tipo apalancado por medio del software ANSYS, específicamente en los módulos, estructura estática, dinámica rígida y estructura en estado transiente. Para la determinar la carga a la que estará sometida el conjunto del tren de aterrizaje se supone que el peso total del ART llegará como a máximo a 100 kg con todos sus componentes y combustible. Para realizar el análisis del ensamble, obtenido en el capítulo anterior, para cada uno de los trenes de aterrizaje, se estudiará el momento del aterrizaje por ser el más crítico. Es importante decir que en el cálculo de la carga no se considera el efecto del levantamiento producido por el ala de aeronave en términos de sustentación, es decir únicamente se considera que el ala produce un efecto de palanca sobre la aeronave (en un instante dado), descargando todo el peso de la aeronave en el tren principal.

9.2 CARACTERÍSTICAS DEL ANÁLISIS

El material empleado en el conjunto de ensamble del tren de aterrizaje se escogió del análisis en el capítulo anterior, este es el duraluminio 7075, definido dentro del engineering data de ANSYS, cuyas propiedades mecánicas básicas se enlistan en la tabla 3. Este se escogió porque las aleaciones tipo duraluminio son importantes aleaciones livianas empleadas, por ejemplo, en vehículos, debido a su buen compromiso de resistencia mecánica/masa. Este pesa 3 veces menos que el acero, también cuenta con un excelente pulido, y es altamente resistente a la corrosión [75]

Para la geometría del modelado del tren tipo ballesta se importó el ensamble del tren de aterrizaje desde SolidWorks el cual fue guardado como archivo tipo stp, cuyo formato es compatible con el mechanical workbench de ANSYS. A dicha geometría se le hizo una

sección de simetría, esto con el fin de reducir recursos computacionales. Para el mallado, proceso mediante el cual se calculan y obtienen los elementos empleados como base del análisis en ANSYS, para llevar a cabo el análisis mecánico mediante el análisis por elementos finitos (FEA), se establece una convergencia de tamaño de elemento de 3 mm. Dicho tamaño de malla es coherente para resultados aproximados a la realidad, además de que no tomará mucho tiempo de procesamiento. Para la configuración de cargas y soportes, el modelo de tren de aterrizaje posee dos orificios, en el soporte superior de la ballesta, los cuales se emplearán para aplicar soportes de fijación, simulando la fijación a la estructura del fuselaje; la carga de aterrizaje será aplicada en el eje, cuya magnitud fue calculada en la sección anterior. Los resultados de la simulación son expuestos en el **anexo F**.

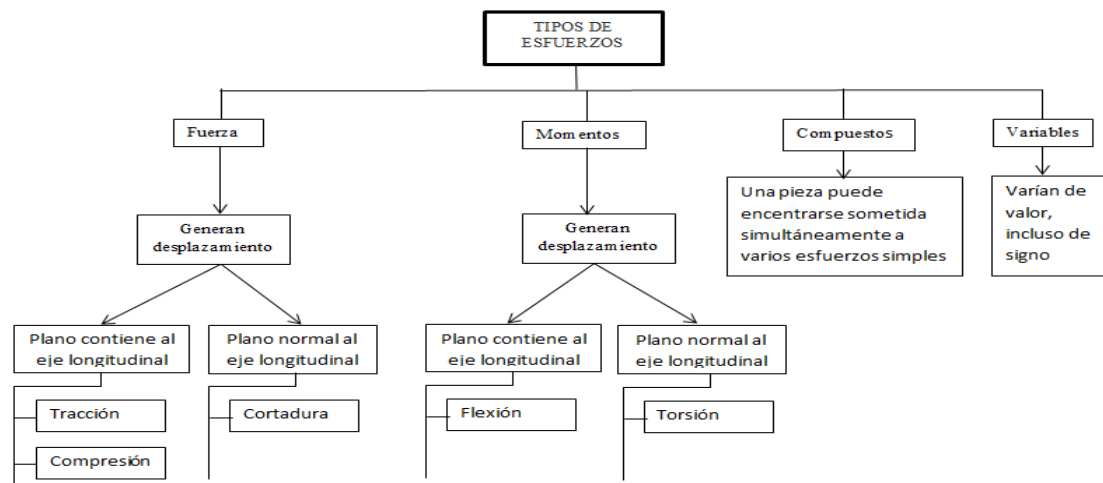
Para la geometría del modelado del tren tipo apalancado con amortiguador de cauchos, se realiza un croquizado en SolidWorks el cual posteriormente es importado en ANSYS. Con el fin de conocer el desempeño del mecanismo de amortiguación especialmente, se realiza un análisis de tipo transiente sobre la estructura, en este, se le aplica una carga en un lapso de tiempo para conocer en una línea de tiempo, la respuesta al incremento de carga de forma lineal; como se esperaba el resorte absorbe la primera etapa de carga, respectiva al peso, permitiendo además un amplio desplazamiento de amortiguación, la deformación unitaria de cada caucho empieza hacer su parte, absorbiendo también gran cantidad de energía. Sin embargo, por la mencionada selección de material en base a las opciones disponibles y no en base a las mejores opciones de diseño, la máxima fuerza lograda antes de que los cauchos de neopreno se distorsionaran, fue de 784 N en 1,5 s. Con este valor en mente para cada amortiguador y teniendo en cuenta que el material óptimo está entre el caucho natural vulcanizado y el caucho de fluoro-carbono se asumen estos resultados como satisfactorios. Dentro de las configuraciones específicas que se tuvieron en cuenta en el análisis transiente, están:

- Los tiempos de los sub-steps. Initial time step: 0,01 s, Minimum time step: 0,005, Maximum time step: 0,02.
- El muelle helicoidal se tomo como junta de resorte entre las superficies en cuestión y con la constante de resorte de 26,8 N/mm.

- De manera paulatina se realizó un incremento de los elementos analizados, esto con el fin de no saturar las simulaciones y avanzar de más rápido en este proceso.
- Se usó mallado por defecto dada la simplicidad de las geometrías analizadas y el interés por conservar el recurso computacional.

Los resultados de la simulación son expuestos en el **anexo G**.

9.3 SOLUCIÓN



9.3.1 Teorías de falla

La falla de una estructura ocurre cuando una pieza se distorsiona tanto para no funcionar adecuadamente, en esta sección se analizarán la falla por distorsión (deformación), y la falla por ruptura, el análisis de tipo de falla depende del tipo de material, pues este puede ser frágil o dúctil. Un material dúctil sometido a una carga de impacto tiende a amortiguar dicha carga al deformarse plásticamente, mientras que uno frágil, que no tiene deformación significativa, se opondrá mucho más al impacto generando mayores cargas (debido a las mayores desaceleraciones) y mayores esfuerzos, tendiéndose a partir fácilmente. Un vaso de vidrio, una broca o un buril de acero duro y una caja de hierro fundido gris tienden a quebrarse al caer al piso desde cierta altura, mientras que una barra de acero suave, una olla de aluminio

y un polímero dúctil probablemente se deformen plásticamente en las zonas donde reciben el impacto, pero no se fracturarán ni tendrán una deformación considerable. [76]

9.3.2 Falla estática

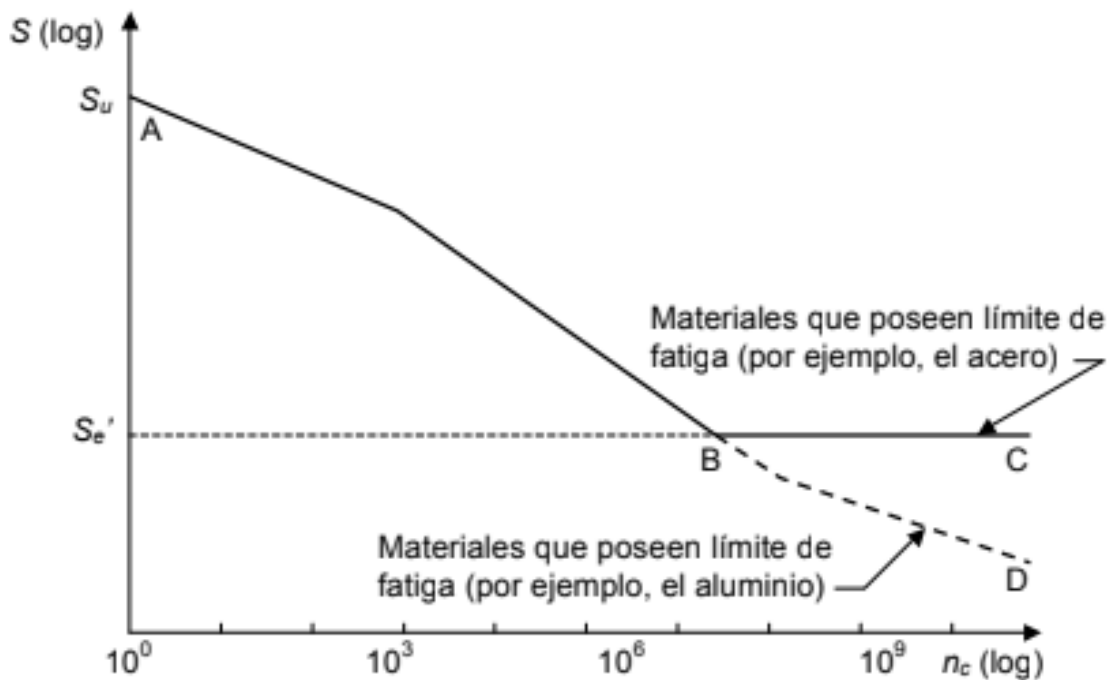
Esta es debida a cargas y/o fuerzas conocidas aplicadas a la pieza en un momento determinado. La resistencia a la rotura es mayor que la resistencia de fluencia. El resultado de un diseño basado en la resistencia de rotura debe ser similar al de un diseño basado en la fluencia, ya que no es muy lógico tener dos resultados muy diferentes que sean simultáneamente “óptimos”. Aunque el diseño con base en el criterio de rotura es válido, éste debe, de todas maneras, garantizar que no ocurra falla por fluencia. Similarmente, cuando se diseña por fluencia, se debe tener en cuenta que más allá de la resistencia de fluencia se encuentra la resistencia a la rotura. En la práctica podrían utilizarse ambos criterios de falla y tomar la decisión final haciendo una comparación y análisis de los resultados, teniendo en cuenta la seguridad o funcionalidad y los costos. [77]

Materiales dúctiles como aceros se considera la falla al pasar el límite de cedencia del material (σ_y), es decir cuando se presenta la deformación permanente del material. Hay varias teorías de falla para este tipo de material, se utiliza entonces la teoría de von mises para analizar dicha falla. Esta teoría asume que en los materiales dúctiles la resistencia a compresión es aproximadamente igual a la resistencia a tensión. En otras palabras, axialmente la resistencia es igual sin importar la dirección. Pero en este tipo de materiales la resistencia a cortante es menor, según la teoría $\tau_{max} = 0.577\sigma_y$. En conclusión, se puede decir que la falla en el caso de los materiales dúctiles con carga estática a tensión es provocada por los momentos cortantes. Entonces aplicando esta teoría se calculan los tres esfuerzos principales, el esfuerzo cortante máximo y se compara el cortante máximo con el criterio de falla y se halla el factor de seguridad.

9.3.3 Falla por fatiga

Muchos de los elementos de máquinas, tales como cigüeñales, árboles, ejes, bielas y resortes, se someten a cargas variables. El comportamiento de los materiales bajo este tipo de carga es diferente a aquel bajo cargas estáticas; mientras que una pieza soporta una gran carga estática, la misma puede fallar con una carga mucho menor si ésta se repite un gran número de veces.

Figura 21. Diagrama de Wohler



Fuente: historia de la fatiga [78]

Muchos aceros al carbono y aleados, algunos aceros inoxidables, hierros, aleaciones de molibdeno, aleaciones de titanio y algunos polímeros poseen un codo a partir del cual la pendiente de la curva es nula. Esto indica que si la probeta se somete a un esfuerzo menor que S_e' , ésta no fallará; es decir, la probeta tendrá una vida infinita. Otros materiales como aluminio, magnesio, cobre, aleaciones de níquel y algunos aceros inoxidables, así como aleaciones de aceros al carbono y de alta resistencia no poseen límite de fatiga, teniendo comportamientos similares al dado por la curva ABD de la figura 21. A pesar de que la pendiente de la curva puede ser “menor” para n_c mayor de aproximadamente 10^7 ciclos,

teóricamente no existe un nivel de esfuerzo, por pequeño que éste sea, que nunca produzca la falla en la probeta. [79]

La falla por fatiga en una pieza, empieza con una grieta microscópica y a pesar de que en materiales dúctiles los esfuerzos cortantes son los encargados de iniciar las grietas, los esfuerzos normales de tracción son los que actúan en la grieta tratando de abrirla y haciendo que crezca. La sección del material se reduce con el crecimiento gradual de la grieta, hasta que finalmente se rompe cuando la combinación del tamaño de la grieta y de la magnitud del esfuerzo nominal (que depende del tamaño remanente de la sección) produce una fractura súbita de tipo frágil [80]

9.3.4 Deformación total y direccional

El análisis de la deformación se relaciona con los cambios de la forma de la estructura que generan las cargas aplicadas, dichas cargas se distribuyen por toda el área, y se denominan esfuerzos; y es el esfuerzo el que permite comparar la resistencia de dos materiales. En este ítem se muestra la cantidad en mm que se desplaza el conjunto en todas las direcciones posibles.

9.3.5 Deformación elástica equivalente por von-Mises

Las unidades en que ANSYS presenta la deformación equivalente son mm/mm, lo que implica que la solución es adimensional, y debe ser interpretada en términos de proporciones.

9.3.6 Deformación cortante

Las deformaciones cortantes aparecen en caso de aplicación de un esfuerzo cortante o bien de un momento torsor. Bajo este criterio una pieza resistente o elemento estructural falla cuando en alguno de sus puntos sucede que el esfuerzo cortante máximo excede 0.5 o 0.577

veces (según la teoría de falla), la resistencia a la fluencia por tensión (s_y). Este ítem presenta los efectos del esfuerzo cortante sobre el modelo en términos adimensionales (mm/mm).

9.3.7 Esfuerzo elástico equivalente de von mises

Este concepto de esfuerzo equivalente o efectivo permite sustituir esfuerzos combinados multiaxiales de tensión y cortante por un único esfuerzo de tensión pura. La tensión equivalente de von mises es importante porque nos permite aplicar el criterio de von mises calculando el valor de s_y' . Si el valor de s_y' es menor o igual que s_y , entonces la pieza no plastifica, si es mayor entonces plastifica.

9.3.8 Esfuerzo cortante

Según von mises la falla ocurre cuando el esfuerzo cortante máximo excede 0.577 veces la resistencia a la fluencia por tensión (s_y). El Esfuerzo Cortante se presenta (gráficamente) de forma similar a la deformación elástica cortante, sólo que presentado en términos de MPa.

9.3.9 Fuerza de reacción

Este ítem arroja un resultado propio de una sonda o galga, de ahí el término 'Probe'. Determina una fuerza de reacción, en este caso, en un lugar específico (como un barreno, una superficie, etc.). La fuerza de reacción se visualiza en el modelo como un vector, cuya magnitud resultante y en los componentes X, Y, y Z, se localiza en la ventana 'Tabular Data' o en la ventana 'Details of "Force Reaction"'.

9.3.10 Factor de seguridad

Es muy importante considerar en el diseño de cualquier tipo de estructura, el tipo de esfuerzo y tipo de carga que es capaz de soportar un material. El factor de seguridad se halla mediante el cociente entre la resistencia verdadera y la resistencia requerida, entonces, el factor de seguridad salvaguarda muchas de las cosas que no se pueden prever en la teoría. El factor

de seguridad garantiza que la pieza diseñada sea confiable pero no eterna, ya que el diseño a vida infinita es robusto y costoso. La herramienta de cálculo de Factor de Seguridad de ANSYS arroja resultados totalmente variados entre simulación y simulación, considerando en cada caso, la geometría del modelo, las condiciones a que es sometido, la naturaleza del material empleado, etc. En términos generales, es un indicador de las áreas del modelo con mejor o peor respuesta mecánica a las condiciones impuestas en la simulación.

10. CONCLUSIONES

- Aunque por su denominación, el tren de aterrizaje parece sugerir una única función a este sistema, realmente cumple varias funciones: sirve de soporte al aeroplano, posibilita el movimiento del avión en superficie (incluyendo despegues y aterrizajes) y amortigua el impacto del aterrizaje. Las operaciones en superficie exigen del tren de aterrizaje capacidades de direccionamiento y frenado y para amortiguar el aterrizaje debe ser capaz de absorber impactos de cierta magnitud.
- Hay tres momentos en los que se debería analizar la fuerza aplicada al tren, en estado estático del ART, en el momento del despegue y en el momento de aterrizaje. Como la fuerza se hace mayor y más crítica en el momento de aterrizaje debido, al factor de carga aplicado el cálculo de dicha fuerza de aterrizaje, se escogió analizar el tren en ANSYS para esta situación en particular
- Según el análisis sobre el factor de seguridad, hay zonas en el tren de aterrizaje tipo ballesta donde se podrán hacer modificaciones, como reducción de material, en los ejes y en los soportes que anclan el tren al fuselaje, pero debido a la alta deformación que tendría la ballesta al cambiar el espesor de la misma, no se recomienda hacer dicha modificación. además, en los soportes aparece falla al hacer la reducción del espesor de los mismos.
- Como se menciona en el ítem 1.8.1, la primer propuesta de tren de aterrizaje debió ser cambiada, pero, aun así se decidió exponer los resultados obtenidos hasta la etapa de diseño en que quedó el aterrizaje tipo ballesta, como una opción de fabricación del tren de aterrizaje, siempre y cuando se haga un estudio aparte de la implementación de un refuerzo de la estructura principal del ART, un vez hechos los cambios, se tendrán que hacer más estudios para mejorar el tren de aterrizaje tipo ballesta, antes de poder ser implementado.
- Para reducir el efecto de concentración de esfuerzos por curvatura en el muelle helicoidal, debe tomarse un valor grande de C ; sin embargo, entre más alto sea el índice del resorte, mayores tenderán a ser el diámetro medio del resorte, el espacio ocupado diametralmente, la cantidad de alambre, el par de torsión y el esfuerzo en el

alambre. Teniendo en cuenta las recomendaciones de diferentes autores el índice del resorte debe estar preferiblemente entre 6 y 12, con un valor mínimo de 4

- Realizar diseños con materiales deformables representa niveles muy importantes de dificultad, pues los análisis que se requieren no son de conocimiento general en la ingeniería y, además, la caracterización de propiedades físicas para estos tiene costos elevados.
- Cuando en un análisis teórico de diseño no se cuente con datos específicos sobre algún tipo de material, es válido realizar los análisis reemplazando el material en cuestión por uno al cual se le tenga más información. Y aunque no se obtendrán respuestas 100% asertivas, si se pueden especular tendencias de respuesta con grados de confiabilidad muy aceptables.
- La idea de combinar la amortiguación histérica del resorte con la viscoelástica de los cauchos, representó más ventajas de las que se esperaban, pues como lo dictamina el análisis de la simulación, el muelle helicoidal absorbe gran cantidad de energía, reduciendo y protegiendo el desempeño de los cauchos, además permite una carrera de amortiguación mayor que si solo se implementaran cauchos, y esto hace que el tren se acerque cada vez mas a las conjeturas sobre la carrea de amortiguación que se citaron en el ítem 1.7.6.

11. RECOMENDACIONES

- En el inicio del desarrollo de un proyecto de diseño, se recomienda realizar el correcto análisis de metrología con el fin de corroborar todo tipo de documentación previa, de esta forma, quienes diseñan se familiarizan con las geometrías presentes y también, se evitarán errores catastróficos fundamentados en lapsus de la documentación inicial.
- Se recomienda hacer un análisis más profundo del tren de aterrizaje tipo ballesta, donde se hagan las correctas simulaciones en los módulos, dinámica rígida y estructura transiente del ANSYS. Así, poder garantizar de esta forma resultados más reales
- La estructura del tren de aterrizaje actual cuenta con unas rudas de diámetro exterior de 15 cm, se recomienda, cambiar estas ruedas por otras con mayor diámetro, con el fin de asegurar que en el momento del aterrizaje, el disco del freno no haga contacto con el suelo, provocando así daños en la estructura de la aeronave
- En el tren apalancado se usa un tubo central para mantener todos los discos de cauchos en línea, se recomienda forrar los agujeros en el centro de cada disco con tela. Así durante la compresión, estos agujeros se hacen más pequeños y la tela entra en contacto con tubo, absorbiendo parte de la energía por medio de la fricción.
- Se recomienda dotar los trenes de aterrizaje con carenados, esto con el fin de reducir el efecto del drag.
- Se recomienda hacer los ensayos mecánicos pertinentes para el caucho natural vulcanizado y el FKM (caucho fluorado), y, posteriormente realizar las simulaciones en ANSYS, ya que, basándonos en las propiedades mecánicas, estos serían los mas óptimos para utilizar en el tren de aterrizaje basan.

12. BIBLIOGRAFÍA

- [1] JORGE, LUIS MUNOZ BASTIDA, y CISNEROS ALVARADO NETSER. «ANÁLISIS DEL EMPOTRE DEL TREN DE ATERRIZAJE DE LA AERONAVE UAV BUS 23 (tesis de pregrado).» tesis de pregrado, INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, Mexico, 2013, 84.
- [2] MUÑOZ BASTIDA , JORGE LUIS, y NETSER CISNEROS ALVARADO. «ANÁLISIS DEL EMPOTRE DEL TREN DE ATERRIZAJE DE LA AERONAVE UAV BUS 23.» tesis de pregrado, Mexico, 2013, 84. Ibid., P.100.
- [3] Sandglass Patrol. «blog.sanglass patrol.com.» 06 de 04 de 2010. <http://blog.sandglasspatrol.com/index.php/articulos/41-militar/758-uavs-clasificacion-tendencias-y-normativa-de-espacio-aereo> (último acceso: 10 de 09 de 2018).
- [4] semana. «semana.com.» 06 de 12 de 2018. <https://www.semana.com/nacion/articulo/llegaron-los-drones-colombia/424578-3> (último acceso: 20 de 12 de 2018).
- [5] Gunmunson, snorri . The Anatomy of the Landing Gear. BUTTERWORTH-HEINEMANN, 2013.
- [6] BORJA PONCE , DANNY EDMUNDO . «CONSTRUCCIÓN Y SIMULACIÓN DE MECANISMOS DEL TREN DE ATERRIZAJE FIJO.» tesis de pregrado, latacunga-ecuador, 2001.
- [7] Gomez Rodriguez , Javier . «Tren de aterrizaje del FOCKE WULF FW 190, reconstrucción y análisis virtual.» trabajo final de carrera, catalunya, 2013.
- [8] Trallero , Rafael , Ricardo Atienza, y malte Frovel . «EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS TRENES DE ATERRIZAJE EN AERONAVES.» documento web pdf, UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO, Madrid , 2013.
- [9] Gunmundsson, Snorri. General Aviation Aircraft Desing. Editado por BUTTERWORTH-HEINEMAINN. 2013. Ibid., P.534.
- [10] Currey, Norman S. Aircarft Landing Gear Desing: Principles and Practices. Project defination phase. 1988.

- [11] Currey, Aircraft Landing Gear Design: Principles, Shock absorber efficiency, *ibid.*, P.70.
- [12] Currey, Aircraft Landing Gear Design: Principles, DHC Twin otter Landing Gear, *ibid.*, P. 71
- [13] Currey, Aircraft Landing Gear Design: Principles and practice, Rubber Springs, *Ibid.*, P. 70
- [14] Currey, Aircraft Landing Gear Design: Principles, Typical rubber shock strut, *ibid.*, P. 72
- [15] Currey, Aircraft Landing Gear Design: Steel Leaf Spring. 1988. *Ibid.*, P.69
- [16] MUÑOZ BASTIDA , JORGE LUIS , y NETSER CISNEROS ALVARADO. ANALISIS DEL EMPOTRE DEL TREN DE ATERRIZAJE DE LA AERONAVE UAV BUS 23: geometría del amortiguador tipo ballesta . MEXICO, 2013.
- [17] Currey, Aircraft Landing Gear Design: Air . 1988. Op. Cit., P. 75
- [18] Currey, Aircraft Landing Gear Design: Oil. 1988. *Ibid.*, P.75
- [19] Currey, Aircraft Landing Gear Design: gas/oil(Oleo- Pneumatic). 1988. *Ibid.*, P.75
- [20] Currey, Aircraft Landing Gear Design: amortiguador de gas. 1988. *Ibid.*, P.73
- [21] Currey, Aircraft Landing Gear Design: amortiguador oleo-neumatico. 1988. *Ibid.*, P 76
- [22] Currey, Aircraft Landing Gear Design: Sink Speed. 1988. *Ibid.*, P. 78
- [23] Currey, Aircraft Landing Gear Design:Landing Gear type. 1988. *Ibid.*, P. 78
- [24] Currey, Aircraft Landing Gear Design: load factor. 1988. *Ibid.*, P. 78
- [25] Currey, Aircraft Landing Gear Design: project definition phase 1988. *Ibid.*, P. 78
- [27] aerocivil.«aerocivil.gov.co.»octubre de 2015.
<http://www.aerocivil.gov.co/normatividad/RAC/RAC%20%2023%20-%20Est%C3%A1ndares%20Aeronav.%20Categor%C3%ADa%20Normal,%20Utilitaria,%20Acrob%C3%A1tica,%20Commuter.pdf> (último acceso: 12 de 2018).
- [28] Currey, factor de carga en el centro de gravedad Op. Cit., P. 75
- [29] Currey, Aircraft Landing Gear Design: stroke. *Ibid.*, P. 79
- [30] Currey, Aircraft Landing Gear Design: calculo de la carrera. *Ibid.*, P. 83
- [31] Currey, Aircraft Landing Gear Design:consideraciones. *Ibid.*, P. 84
- [32] Currey, Aircraft Landing Gear Design: stroke. *Ibid.*, P. 79
- [33] Roncero, Sergio Esteban. «Diseño detallado, Diseño Tren de Aterrizaje.» s.f., 65.
- [34] The Anatomy of the Landing Gear. BUTTERWORTH-HEINEMANN, 2013.
- [35] Jheferson , Garcia Arias . «ART de la fuerza aérea.» 11 de 2018.
- [36] «modelplanes.de.» s.f. <https://modelplanes.de/u-s-army-air-force/trainer-u-s-army-air-force/northrop-n-9m-2-czechmaster-resin/> (último acceso: 2018).

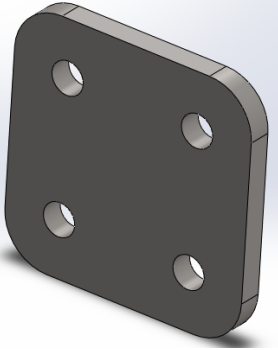
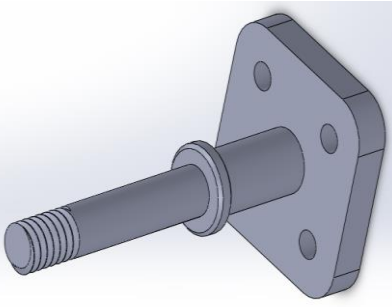
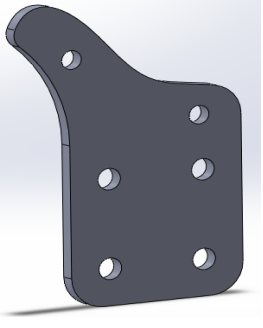

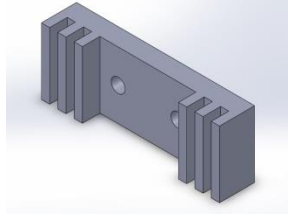
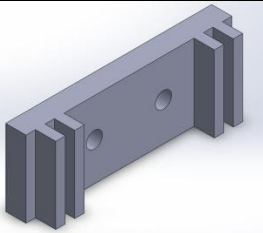

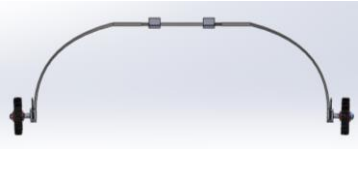
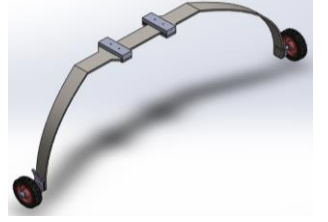
- [37] Caymans SEO. «caimansseo.com.» 07 de marzo de 2018. <https://caimansseo.com/tren-de-aterrizaje-partes-caracteristicas-como-funciona> (último acceso: 11 de 2018).
- [38] Currey, Aircraft Landing Gear Desing: capítulo 1 . 1988. Op. Cit., P. 13
- [39] Currey , Norman S. . Aircraft Landing Desing: Rubber shock-absorbing disk. Ibid., P. 85.
- [40] Currey , Norman S. . Aircraft Landing Desing: mosquito tail wheel. Ibid., P.86.
- [41] Askeland , Donald R. Ciencia e Ingenieria de los Materiaes. s.f.
- [42] reydi. «reydi.com.» s.f. <http://reydin.com.co/> (último acceso: 12 de 2018).
- [43] ALL Metals and Forge Group. «steelforge.com.» s.f. <https://www.steelforge.com/carbon-steel-1040/> (último acceso: 12 de 2018).
- [44] All metals and forge group 1050. «steelforge.» s.f. <https://www.steelforge.com/aisi-1050/> (último acceso: 12 de 2018).
- [45] CARPENTER. «acerosfortuna.com.» s.f. http://www.acerosfortuna.com.mx/hojas_tecnicas/aceros_de_baja_aleacion/4130.pdf (último acceso: 12 de 2018).
- [46] interempresas. «interempresas.net.» s.f. <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/101083-Materiales-de-alto-rendimiento-para-el-sector-mas-exigente.html> (último acceso: 12 de 2018).
- [47] Neopren 6061. «neopren.es.» s.f. https://www.neopren.es/blog/tipos-de-aluminio-usados-en-ciclismo-7075-6061-y-2014-t6/#T6_Es_tel_tratamiento_termico_del_aluminio (último acceso: 12 de 2018).
- [48] el blog de triatlón de Neopren. «neopren.es.» s.f. <http://www.neopren.es/blog/tipos-de-aluminio-usados-en-ciclismo-7075-6061-y-2014-t6/> (último acceso: 12 de 2018).
- [49] Neopren T6. «neopren.es.» s.f. <http://www.neopren.es/blog/tipos-de-aluminio-usados-en-ciclismo-7075-6061-y-2014-t6/> (último acceso: 12 de 2018).
- [50] makeltFrom. «makeltFrom.com.» s.f. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/7075-T62-Aluminum> (último acceso: 12 de 2018).
- [51] Ashby, Professor Mike. «CES EduPack 2013.» s.f.
- [52] Erica. «erica.es.» 2018. <http://www.erica.es/web/caucho-natural/> (último acceso: 12 de 2018).
- [53] Erica. «erica.es.» 2018. <http://www.erica.es/web/caucho-natural.> Ibid., A.E erica sintético
- [54] Ashby, Professor Mike. «CES EduPack 2013.» s.f.
- [55] Tecnologia de los plasticos. «tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.» s.f. <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/01/vulcanizacion.html>.

- [56] Ashby, Professor Mike. «CES EduPack 2013.» s.f.
- [57] Tecnologia de los plasticos. «tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.»s.f.
<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/01/vulcanizacion.html>.
- [58]dassaultsystemes.«my.solidworks.com.»s.f.
https://my.solidworks.com/solidworks/guide/SOLIDWORKS_Introduction_ES.pdf (último acceso: 12 de 2018).
- [59] Company, Cessna Aircraft. parts catalog. Kansas, 1975.
- [60]Skyleader.«skyleader.aero/en/product/skyleader-600/.»s.f.
<http://www.skyleader.aero/en/product/skyleader-600/> (último acceso: 12 de 2018).
- [61] Skyfreedom. «skyfreedom.co.nz.» 12 de 2018. <http://www.skyfreedom.co.nz>.
- [62] Currey, Aircraft Landing Gear Desing: capitulo 1 . 1988. Op. Cit., P. 13
- [63] Axel. «axelproducts.com.» 2018. <http://axelproducts.com/index.html> .
- [64] Useche, Libardo Vanegas. Diseño de lementos de maquinas. pereia: coleccion textos academicos, 2018. Ibid., P.419
- [65] Useche, Diseño de lementos de maquinas: coleccion textos academicos, 2018. Ibid., P.420
- [66] accesspring. «accesspring.com/.» 2018. <https://www.accesspring.com/>.
- [68] Useche, Diseño de lementos de maquinas: coleccion textos academicos, 2018. Ibid., P.424
- [69] Useche, Diseño de lementos de maquinas: coleccion textos academicos, 2018. Ibid., P.425
- [70] Useche, Diseño de lementos de maquinas: coleccion textos academicos, 2018. Ibid., P.447
- [71] Sforza, Pasquale. Comercial Landing Gear Desing Principles. s.f.
- [72] ESUFA. «manual de operacion del ART.» convocatoria colciencias , 2018.
- [73] Sforza, Pasquale. Comercial Landing Gear Desing Principles. s.f. ibid., P-253
- [74] Sforza, Pasquale. Comercial Landing Gear Desing Principles. s.f. ibid., P. 252
- [75] metalesyperfiles. «metalesyperfiles.com/.» 2018. <http://www.metalesyperfiles.com/wp-content/tablas/aluminio/aduraluminio.pdf>.
- [76] Useche, Libardo Vanegas. Diseño de lementos de maquinas. pereia: coleccion textos academicos, 2018. Ibid., P.80
- [77] Useche, Libardo Vanegas. Diseño de lementos de maquinas. pereia: coleccion textos academicos, 2018. Ibid., P.81
- [78] Useche, Libardo Vanegas. Diseño de lementos de maquinas. pereia: coleccion textos academicos, 2018. Ibid., P. 196
- [79] Useche, Libardo Vanegas. Diseño de lementos de maquinas. pereia: coleccion textos academicos, 2018. Ibid., P.197

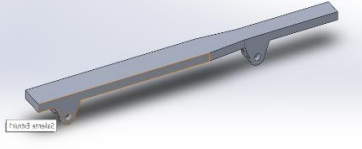
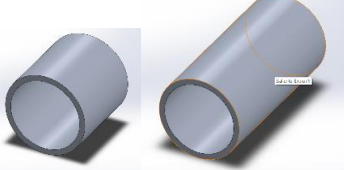


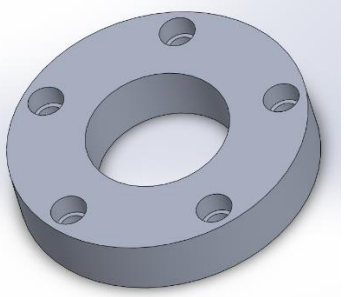

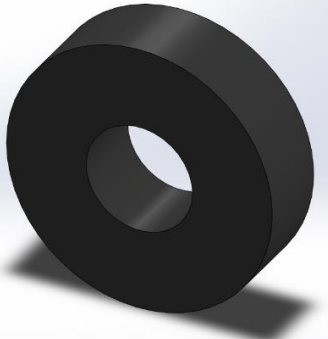
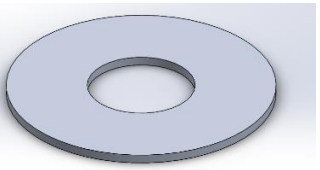
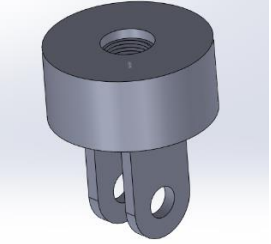
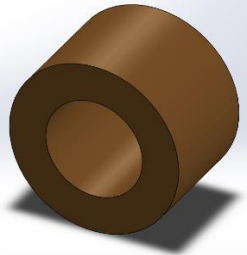
[80] Useche, Libardo Vanegas. Diseño de lementos de maquinas. pereia: coleccion textos academicos, 2018. Ibid., P.198

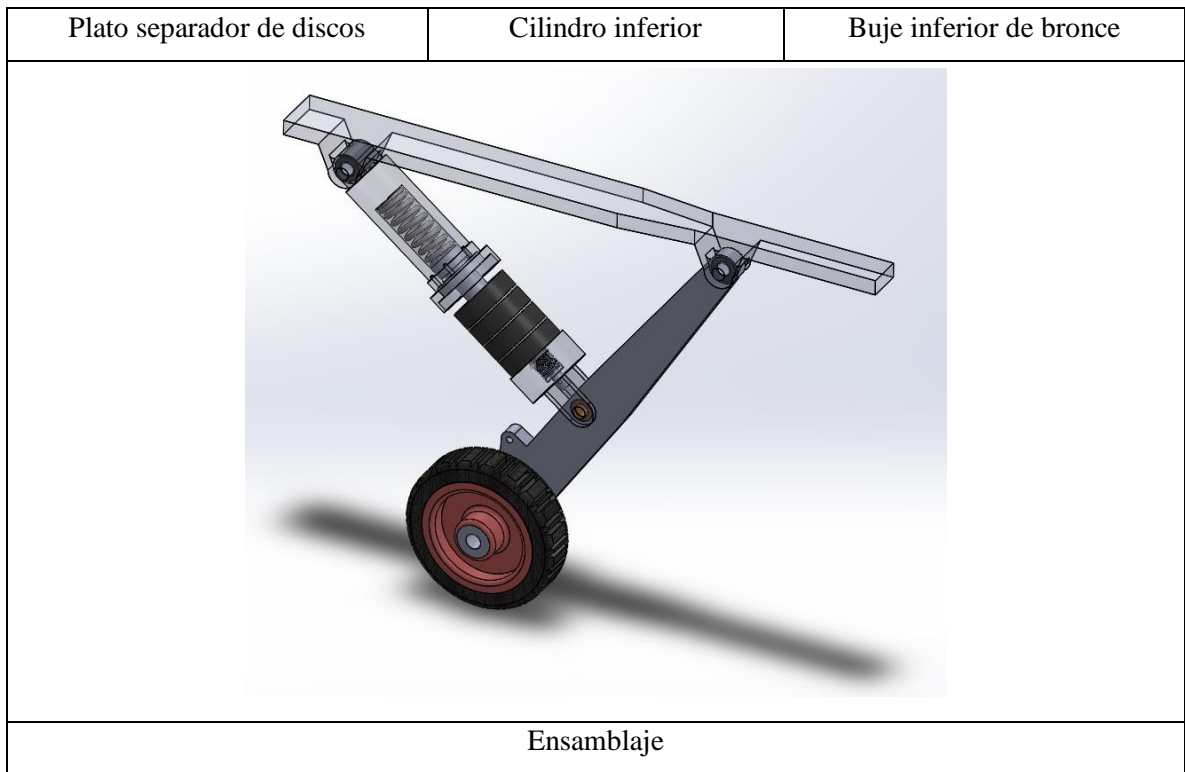
13. ANEXOS

13.1 Anexo A. Modelado de los componentes que integran el tren de aterrizaje tipo ballesta.

		
Cuña de separacion	Eje	Soporte del freno
		
Ballesta	Soporte de ballesta superior	Soporte de ballesta inferior
		
Rueda	Ensamblaje, camber 2°	Ensamblaje

13.2 Anexo B. Modelado de los componentes que integran el tren de aterrizaje de tipo apalancado.

		
<p>Soporte superior</p>	<p>Bujes superiores de caucho</p>	<p>Bujes superiores anti desgaste</p>
		
<p>Vigas de apalancamiento Izq. y Der.</p>	<p>Cilindro superior</p>	<p>Muelle helicoidal</p>
		
<p>Tope para vástago</p>	<p>Vástago</p>	<p>Discos de caucho</p>
		

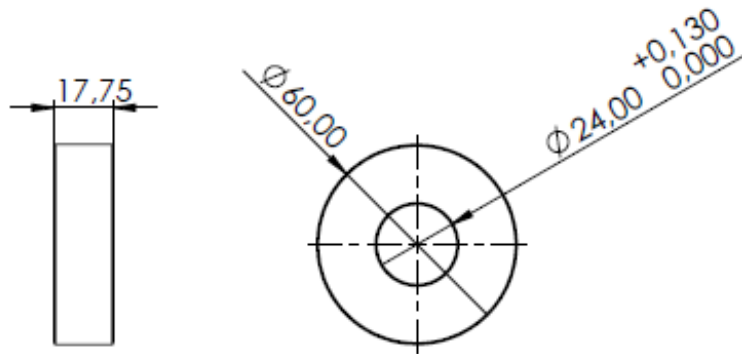


13.3 Anexo C. planos de los componentes que integran el tren de aterrizaje tipo apalancado.

NOTA: Debido a que el tamaño de hoja en el que se encuentran los planos es de grandes dimensiones y por respetar el orden del cuerpo de la presente tesis, los planos se adjuntan al final del documento

13.4 Anexo D. Dimensiones de los discos de cauchos.

Cuatro discos de caucho, con las dimensiones que se dejan ver en la siguiente imagen serán los encargados de absorber el impacto y generar una amortiguación a debido a su viscoelasticidad. La simplicidad de esta geometría está pensada teniendo en cuenta la fácil fabricación y la firmeza estructural que esta ofrece, también, cabe denotar en este anexo sin intención de redundar con el anexo C de los planos, que los bordes de estos discos tienen redondeos de 0,5 mm.



Fuente: Plano de detalle incluido en el anexo C.

13.4 Anexo E. conceptos teóricos para el diseño de resortes.

Propiedades mecánicas:

Basándonos en el libro de Diseño de elementos de máquinas del ingeniero Libardo Vicente Vanegas Useche.

Resistencia máxima a la tracción, S_u

Comúnmente, la resistencia a la tracción de un material dado se toma como un valor constante. Sin embargo, para el caso de materiales en forma de alambre, la experiencia indica que la resistencia aumenta al reducir el tamaño del alambre. Esto se debe a que durante el estirado del material, éste se endurece por deformación.

Resistencia máxima al cortante, S_{us}

De acuerdo con datos experimentales, la resistencia máxima a la torsión de materiales comunes de resortes es aproximadamente igual al 67% del esfuerzo último a tracción.

Resistencia de fluencia al cortante, S_{ys}

Para estimar la resistencia S_{ys} de resortes helicoidales de compresión de materiales comunes, la tabla 9.6 del libro de Useche suministra valores de S_{ys}/S_u . Esta relación depende del material y de si el resorte ha sido asentado o no. Los valores de la tabla 9.6 son válidos si no existe pandeo.

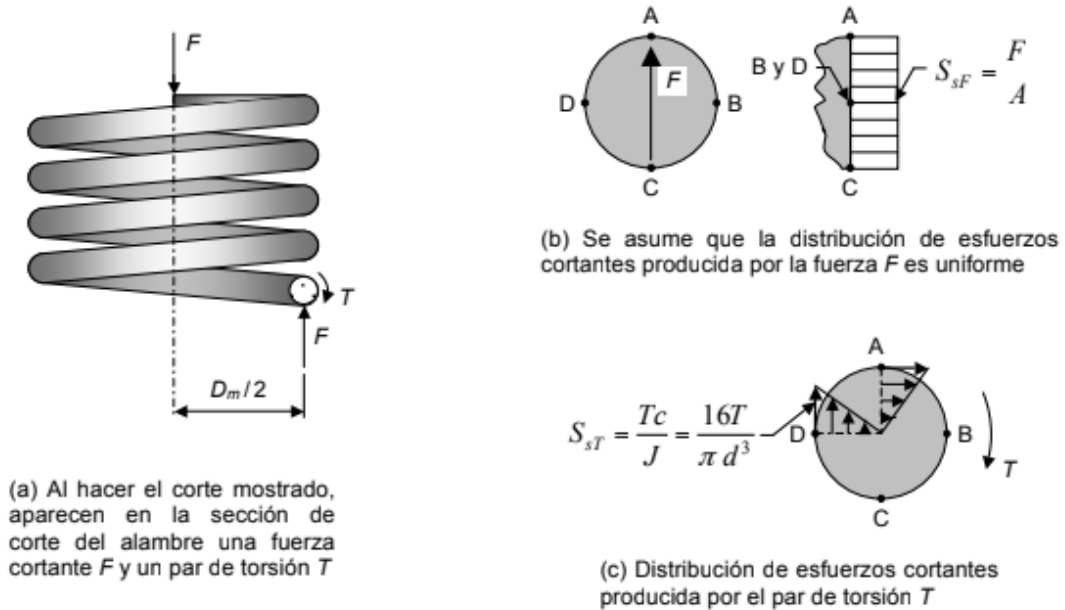
Límite de fatiga en torsión, S_{ew}'

Como se ha estudiado, los aceros parecen poseer límite de fatiga, es decir, podrían diseñarse para vida infinita. Además, la figura 5.7 y la ecuación 5.3 del capítulo 5 del libro de Useche indican que los aceros con $S_u > 1380$ MPa tienen un límite de fatiga aproximadamente constante (es decir, no depende de S_u)

Esfuerzos:

Para determinar los esfuerzos producidos en un resorte helicoidal de alambre redondo sometido a compresión, hacemos el corte mostrado en la figura 22.a. La carga externa F produce una reacción igual pero de sentido contrario en la sección de corte, de tal manera que exista equilibrio de fuerzas. El par de fuerzas forma un par de torsión anti-horario, entonces, para garantizar el equilibrio, en la sección de corte aparece un par de torsión, T , horario, cuya magnitud es igual al producto de la fuerza por la distancia perpendicular entre ellas, $Dm/2$:

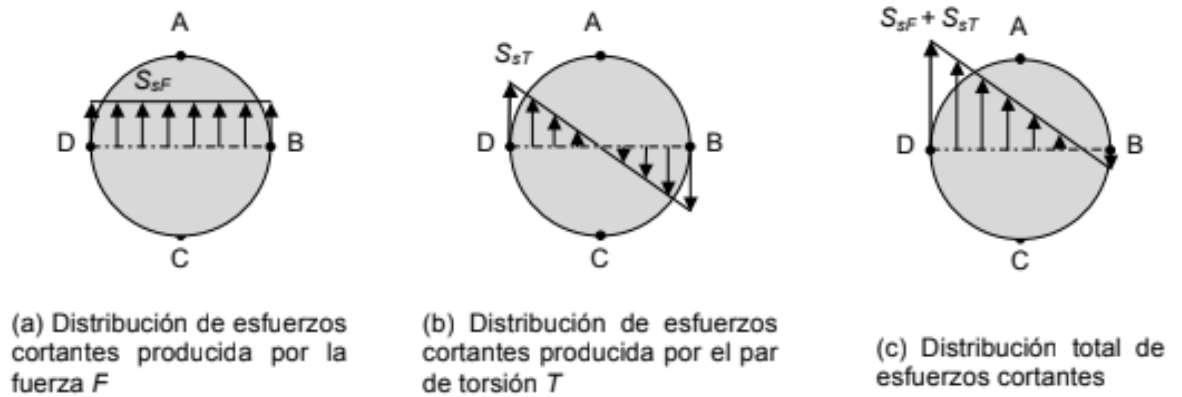
Figura 22. Cargas internas y distribuciones nominales de esfuerzos en un resorte helicoidal de alambre redondo sometido a compresión



Fuente: diseño de elementos de máquinas. Libardo Vicente Vanegas Useche

La figura 23 se muestra distribuciones de esfuerzos a lo largo de la línea DB de la sección de corte de la figura 22. En la figura 23.a se observa que el esfuerzo producido por la fuerza cortante es constante a lo largo de la línea DB. La figura 23.b muestra la distribución lineal de esfuerzos producida por el par de torsión. De acuerdo con estas distribuciones, el punto más crítico de la sección es D (que es un punto “interior” de la espira), ya que en éste se suman los dos esfuerzos máximos dados por las ecuaciones 9.2 y 9.4 del libro de Useche; esto se observa en la figura 23.c que muestra la superposición de los dos efectos.

Figura 23. Distribuciones nominales de esfuerzo a lo largo de la línea DB



Fuente: diseño de elementos de máquinas. Libardo Vicente Vanegas Useche

El esfuerzo real en el punto D es diferente al dado por la ecuación 9.9 del libro de diseño de elemento de máquina, debido a los siguientes

Factores:

- (a) El alambre es curvo, existiendo un efecto de curvatura (concentración de esfuerzos) en el interior de la espira. La figura 9.15.a del libro diseño de elemento de máquinas se muestra que la distribución del esfuerzo cortante no es lineal, debido a dicho efecto de curvatura; el esfuerzo máximo, S_{smax} , es mayor que la suma de S_sF y S_sT .
- (b) Existe un esfuerzo de compresión en el alambre. En la figura 9.15.b se puede observar que la sección de corte no es perpendicular al alambre. La fuerza F se puede descomponer en una fuerza cortante y una pequeña fuerza normal de compresión, actuando sobre la sección transversal del alambre.
- (c) Existen otros factores tales como (a) esfuerzos residuales, al curvar el alambre⁵³, (b) esfuerzos debidos a una pequeña flexión, ya que al descomponer el par de torsión T con respecto a las direcciones paralela y perpendicular al plano de la sección transversal del alambre (figura 9.15.b del mismo libro) se obtiene un pequeño momento flector, y (c) las ecuaciones 9.2 a 9.9 son aproximadas, debido a que suponen que la sección de corte es la sección transversal del alambre, cuando en realidad es una sección ovalada. De los tres factores anteriores, el efecto de curvatura es el que más incidencia tiene sobre los esfuerzos. Teniendo en cuenta esto, Wahl proporciona una ecuación para el cálculo de

resortes helicoidales de espiras muy juntas entre sí (con ángulos de paso pequeños, como se explica en la sección 9.3.3):

KW es el coeficiente de Wahl, el cual tiene en cuenta el efecto de curvatura y la acción del cortante directo:

Solución:

Como la carga es variable, se usará el procedimiento de diseño por fatiga descrito en la Sección 9.3.10 del libro de diseño de elementos de máquinas, del ingeniero Libardo Vicente Vanegas Useche.

Diámetro del alambre y diámetro del resorte:

De la tabla 9.4, se toma un diámetro de prueba para el alambre de $d = 4,5\text{mm}$. Del rango recomendado $4 \leq C \leq 12$, se selecciona un índice del resorte de $C = 5,91$. De la ecuación 9.7, el diámetro medio del resorte es $D_m = Cd = 4,5 \times 5,91 = 26,619 \text{ mm}$. De la figura 9.11.a, el diámetro interior del resorte es $D_i = D_m - d = 26,619 - 4,4959 = 22,1231 \text{ mm}$.

Material del resorte:

De la tabla 9.2, se escoge un acero alambre para cuerda musical (0.80-0.95 C) ASTM A228. Éste es el mejor, más resistente a la tracción, más resistente a la fatiga, más tenaz y más utilizado para resortes pequeños. Este también se escogió debido a que en la aplicación, este era el resorte que cumplía con las necesidades geométricas de espacio, para el correcto acoplamiento del resorte al cuerpo del amortiguador apalancado.

Propiedades mecánicas:

De la ecuación 9.23 y la tabla 9.5:

$$S_u = AR \times (d)^{bR} = 2153,5 \times (5)^{-0.1625} = 1657,91 \text{ MPa}$$

De la tabla 9.6 se estima S_{ys} , asumiendo que el resorte no va a ser asentado:

$$S_{ys} = 0.50S_u = 0.50 \times 1657,91 = 828,95 \text{ MPa}$$

De la ecuación 9.24:

$$S_{us} = 0,67S_u = 0,67 \times 1657,91 = 1110,79 \text{ MPa}$$

Para vida infinita, debe calcularse Sew' . Si los resortes no son granallados (ecuación 9.25):

$$Sew = 310 \text{ MPa}$$

La resistencia a la fatiga corregida está dada por la ecuación 9.34. Tomando $Kc = Kd = Ke = 1$

$$Snw = Kc Kd Ke Sew' = 1 \times 1 \times 1 \times 310 \text{ MPa} = 310 \text{ MPa. (para los k, mirar el cap 5)}$$

Esfuerzos:

El coeficiente de Wahl se obtiene de la ecuación 9.12:

$$Kw = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C} = \frac{(4 \times 5,91) - 1}{(4 \times 5,91) - 4} + \frac{0,615}{5,91} = 1,26$$

El factor de cortante directo es (ecuación 9.9):

$$Ks = \left(1 + \frac{1}{2C}\right) = 1 + \frac{1}{2 \times 5,91} = 1,08$$

Las fuerzas media y alternativa están dadas por (ecuación 9.31):

$$Fm = \frac{Fmax + Fmin}{2} = \frac{600 + 490}{2} = 545 \text{ N}$$

$$Fa = \frac{Fmax - Fmin}{2} = \frac{600 - 490}{2} = 55 \text{ N}$$

Los esfuerzos $Ssmin$, Sms y Sas (ecuaciones 9.35 a 9.37) son:

$$Ssmin = Ks \frac{(8FminDm)}{\pi d^3} = 1,08 \frac{(8 \times 490 \times 26,619)}{\pi \times 4,5^3} = 393,65 \text{ MPa}$$

$$Sms = Ks \frac{(8FmDm)}{\pi d^3} = 1,08 \frac{(8 \times 545 \times 26,619)}{\pi \times 4,5^3} = 437,83 \text{ MPa}$$

$$Sas = Kw \frac{(8FaDm)}{\pi d^3} = 1,26 \frac{(8 \times 55 \times 26,619)}{\pi \times 4,5^3} = 51,54 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad:

El factor de seguridad está dado por la ecuación 9.33 (la cual usa Goodman modificada y es

Válida si la fuerza mínima es constante y la máxima aumenta en caso de sobrecarga):

$$N = \frac{Sus - Ssmin}{(Sms - Ssmin) + \left(\frac{Sus}{\cos 45^\circ Snw} - 1\right) Sas}$$

$$= \frac{1110,79 - 393,65}{(437,83 - 393,65) + \left(\frac{1110,79}{\cos 45^\circ 310} - 1\right) 51,54} = 2,82$$

13.5 Anexo F. Resultados de la simulación del tren de aterrizaje tipo ballesta.

A continuación, se interpretan brevemente los datos arrojados por el análisis. De acuerdo con el reporte del proyecto emitido por ANSYS, respecto a la simulación del tren de aterrizaje tipo ballesta en el momento del aterrizaje, se ha obtenido la siguiente información:

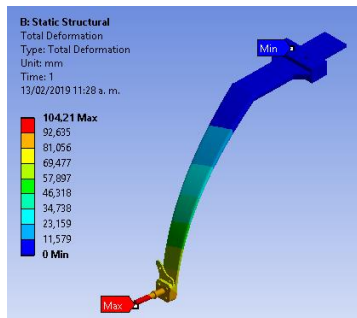
Geometría: Las dimensiones generales del cuadro delimitador (Bounding Box) del modelo son del orden de 248,64 x 423,49 x 868,25 mm (ancho, altura y profundidad, respectivamente). El volumen del modelo es de $1,40 \times 10^6$ mm³. La masa total del ensamble es de 4,18 kg.

Malla: El número de nodos creados en el Mallado, fue de 21017, con una convergencia de malla de 3mm

Hay tres momentos en los que se debería analizar la fuerza aplicada al tren, en estado estático del ART, en el momento del despegue y en el momento de aterrizaje. Como la fuerza se hace mayor en el momento de aterrizaje, por el factor de carga aplicado el cálculo de dicha fuerza de aterrizaje, se escogió analizar el tren para esta situación, la cual es la más crítica, cuyos resultados se presentan a continuación.

Deformación Total

- Deformación mínima= 0.00 mm, localizada CSUPERIOR 1
- Deformación máxima = 104,21 mm, localizada en el componente eje



Deformación Direccional en el Eje X

- Deformación Mínima = $-5,4764e-002$ mm
- Deformación Máxima = 14,295 mm

Deformación Direccional en el Eje Y

- Deformación mínima $-0,22382$ mm
- Deformación máxima = 80,787 mm

Deformación Direccional en el Eje Z

- Deformación mínima = $-0,40422$ mm
- Deformación máxima = 69,09 mm

Deformación Equivalente

- Mínima = $5,0155e-009$ mm/mm
- Máxima = $4,1173e-003$ mm/mm

Deformación Cortante respecto al plano XY

- Mínima = $4712e-003$ mm/mm
- Máxima = $1,5162e-003$ mm/mm

Deformación Cortante respecto al plano YZ

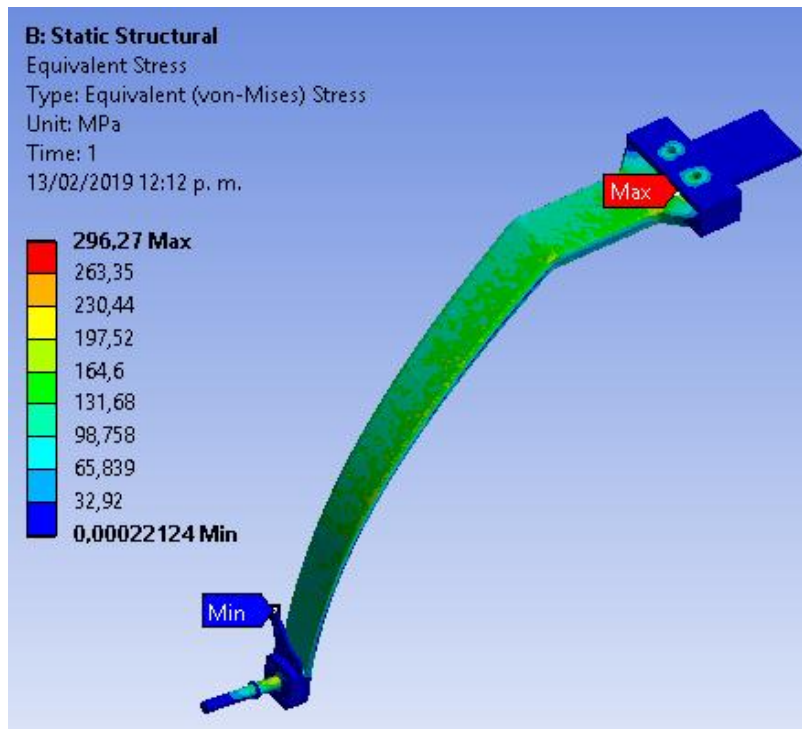
- Mínima = $-3,8725e-003$ mm/mm
- Máxima = $0559e-003$ mm/mm

Deformación Cortante respecto al plano XZ

- Mínima = $-2,1326e-003$ mm/mm
- Máxima = $6119e-003$ mm/mm

Esfuerzo Equivalente por Von-Mises

- Mínimo = $2,2124e-004$ MPa
- Máximo = 296,27 MPa



Esfuerzo Cortante respecto al plano XY

- Mínima = -39,821 MPa
- Máxima = 41,04 MPa

Esfuerzo Cortante respecto al plano YZ

- Mínima = -104,82 MPa
- Máxima = 109,78 MPa

Esfuerzo Cortante respecto al plano XZ

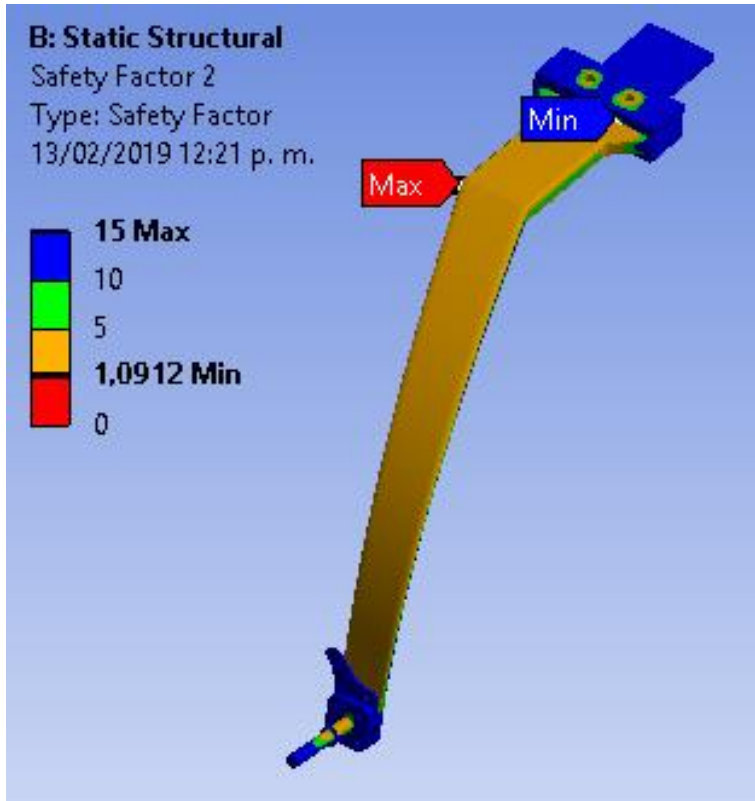
- Mínima = -57,724 MPa
- Máxima = 70,697 MPa

Factor de Seguridad: La teoría utilizada por ANSYS fue la del Esfuerzo máximo Equivalen

- Mínimo = 1.4685

Factor de seguridad por fatiga:

- Mínimo = 1.091



- La deformación máxima total ocurrida en el momento del aterrizaje, ocurre en la parte exterior del eje, con una magnitud de 104,21 mm. La deformación máxima en el eje x se presenta en el ensamble inferior de la ballesta, con una magnitud de 14,295 mm. La deformación máxima en el eje y se presenta en la parte exterior del eje, con una magnitud de 80,787 mm. La deformación máxima en el eje z se presenta en el ensamble inferior de la ballesta, con una magnitud de 69,09 mm. estos resultados se alejan de 17,14 cm, correspondiente al valor máximo de la carrera calculada en el capítulo anterior, esto debido a que se tuvo que aumentar el espesor de la ballesta para que no ocurriera falla en el momento del aterrizaje, hecho que hizo que disminuyera la deflexión de la ballesta.
- El comportamiento del tren de aterrizaje reflejo un nivel mínimo de deformación elástica equivalente de von mises en el soporte del freno, y un nivel máximo de deformación en la sección de la ballesta que hace contacto con los soportes de

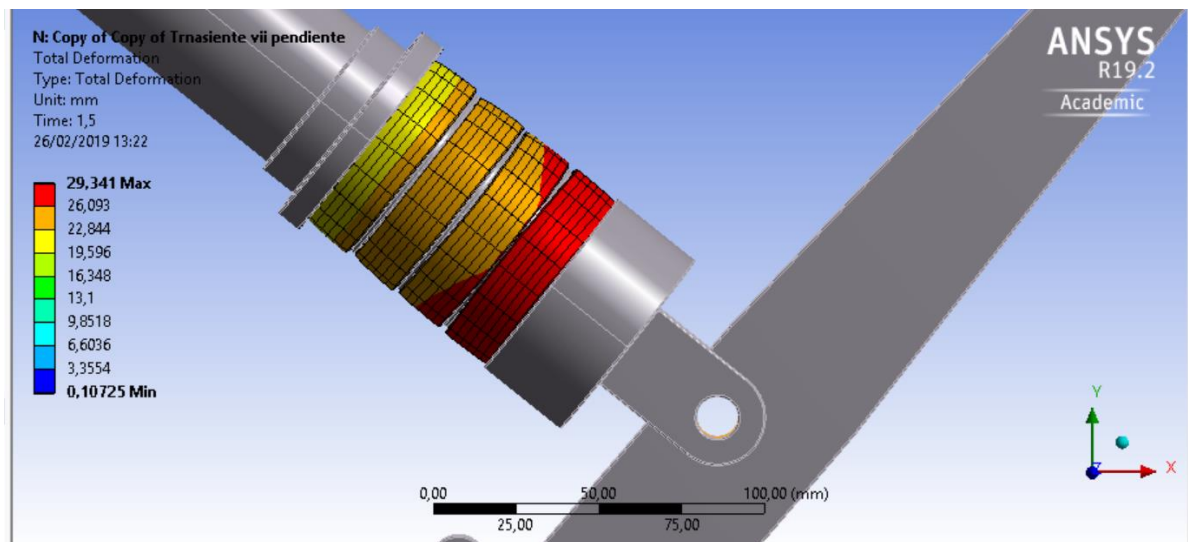
sujeción, donde se aplicaron redondeos para evitar la intersección entre vértices. El comportamiento del tren de aterrizaje reflejó un nivel mínimo y máximo de deformación elástica cortante en el plano YZ en función del plano frontal del modelo, en cuerpo de la ballesta y sección de contacto con soportes de sujeción respectivamente. El comportamiento del tren de aterrizaje reflejó un nivel mínimo y máximo de deformación elástica cortante en el plano XY en función del plano lateral del modelo, dicha deformación cortante presenta el pico máximo y mínimo, en los agujeros de sujeción del soporte de la ballesta y en la sección media de la curva de la ballesta, donde las fibras se encontrarán a tracción en el momento del aterrizaje, respectivamente. El comportamiento del tren de aterrizaje reflejó un nivel mínimo y máximo de deformación elástica cortante en el plano XZ en función del plano de planta del modelo, en los agujeros de sujeción del soporte de la ballesta y en la sección de la ballesta donde se aplicó redondeos para evitar la intersección entre vértices, respectivamente.

- El esfuerzo equivalente de von mises ofrece respuestas en unidades de MPa, las zonas que presentan un esfuerzo equivalente máximo, son las mismas zonas donde se presenta los respectivos picos de deformación equivalente. No obstante, este parámetro indica el esfuerzo máximo al que se somete el tren en áreas críticas; en la zona de conexión de la ballesta con el fuselaje del ART, se observa un esfuerzo máximo con magnitud de 296.27 MPa, este indicador al compararlo con el esfuerzo de cedencia (424 MPa para 7075 T6), da por hecho que el modelo representa deformación elástica, sin llegar a la zona plástica o de ruptura. El esfuerzo cortante en todos los planos no presenta falla, ya que según von mises la falla ocurre cuando el esfuerzo cortante máximo excede 0.577 veces la resistencia a la fluencia por tensión (424 MPa para el aluminio 7075). ANSYS arrojó los siguientes resultados de esfuerzo cortante máximo. 41.04 MPa para el plano XY, 109,78 MPa para el plano YZ, 70,697 MPa para el plano XZ,
- El análisis de fatiga arroja un resultado mínimo de $1,9237e+005$ ciclos dicho valor supera lo esperado ($1e5$), lo que indica que se podrían hacer modificaciones en los componentes, pero dichas modificaciones aumentan la deformación de la ballesta y

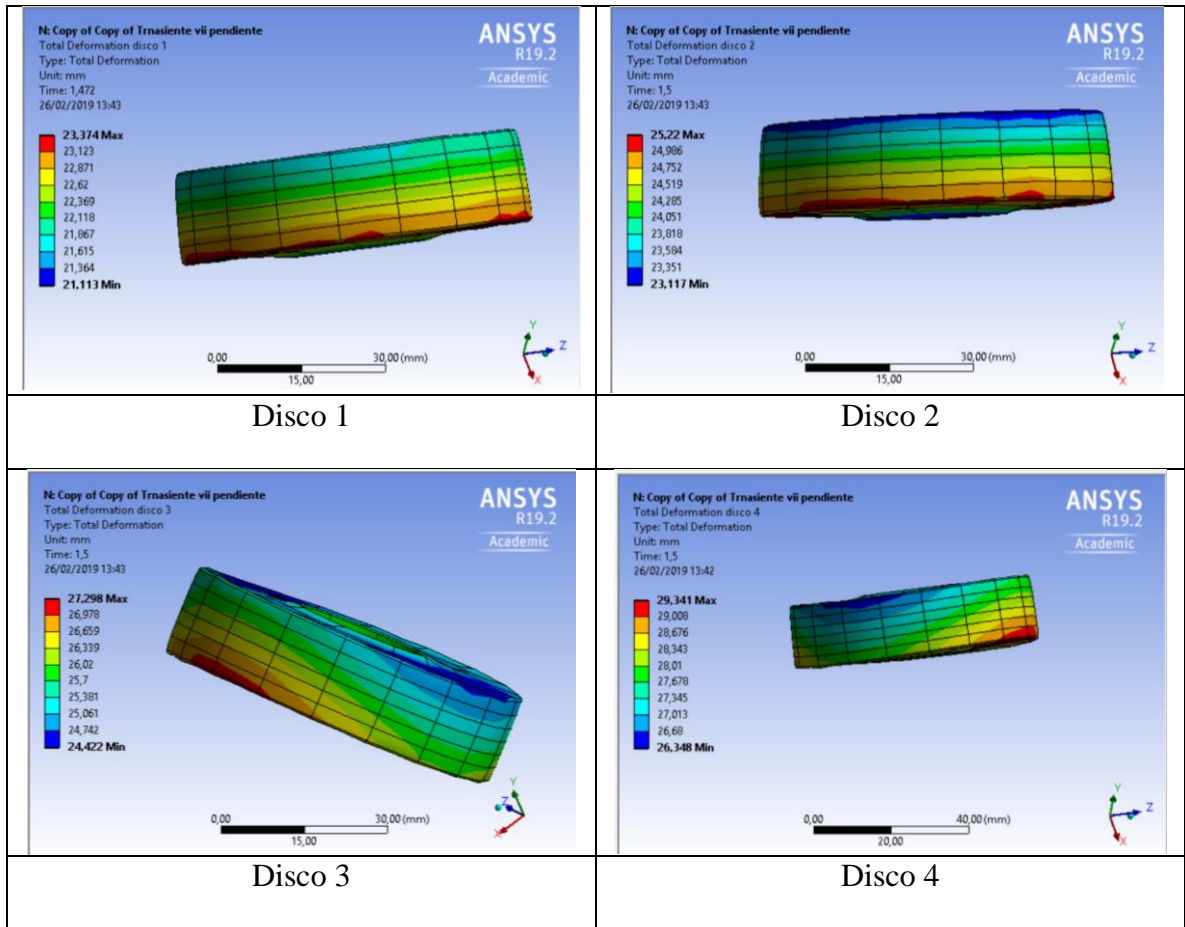
por ende aumentaría elevadamente la carrera vertical de la llanta, por dicha razón no se recomienda hacer modificación de reducción de espesor en el tren de aterrizaje tipo ballesta.

13.6 Anexo G. Resultados de la simulación del tren de aterrizaje tipo apalancado.

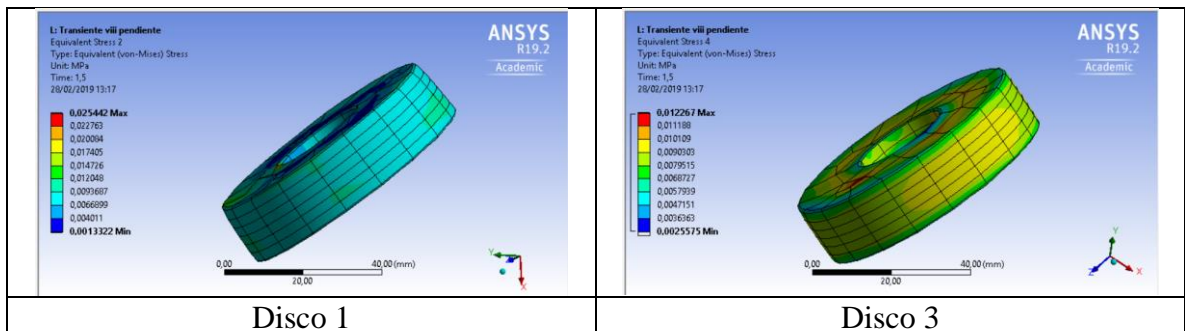
La aplicación de la carga en el análisis transiente se da en un lapso de 1,5 segundos en el cual se aplica una fuerza de 784,62 N. En este punto la deformación del sistema de amortiguación es de 29,341 mm, pero se debe tener en cuenta que el conjunto de cauchos realiza un desplazamiento de 20 mm, por tal razón se entiende que la verdadera deformación de los cauchos es de 9,341 mm.



Sin embargo, como se deja ver en las siguientes imágenes, las deformaciones de cada uno de los cauchos superan este valor, la razón es que, en la absorción de energía de los elastómeros, éstos compenentran sus desplazamientos en los discos adyacentes obteniendo así, deformaciones de 3,74 mm, 5,22 mm, 7,3 mm y 9,34 mm, en los discos desde el superior hasta el inferior, respectivamente.

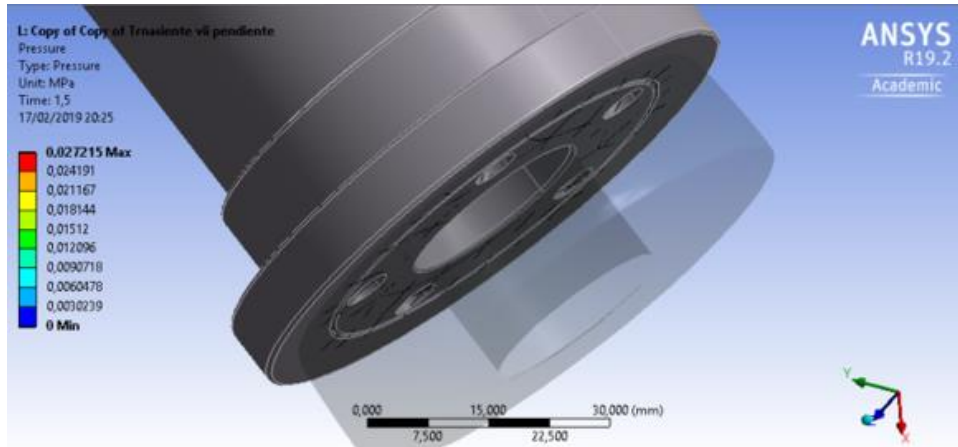


Los esfuerzos logrados en los discos fueron, para el primer disco el cual soportó más 25,4 kPa, mientras que el tercer disco fue el que menos esfuerzo soportó, con 12,2 kPa

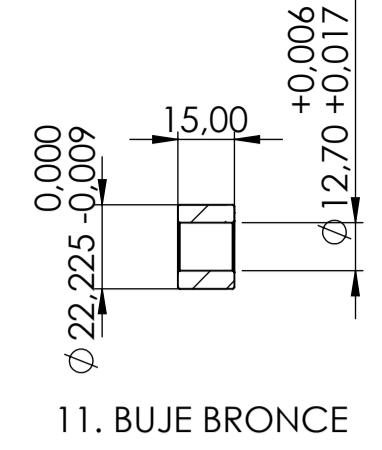


Esto, teniendo en cuenta que el esfuerzo limite que soporta el neopreno es de 22 MPa, se entiende como que para la carga aplicada no existirán fallas por sobre esfuerzos.

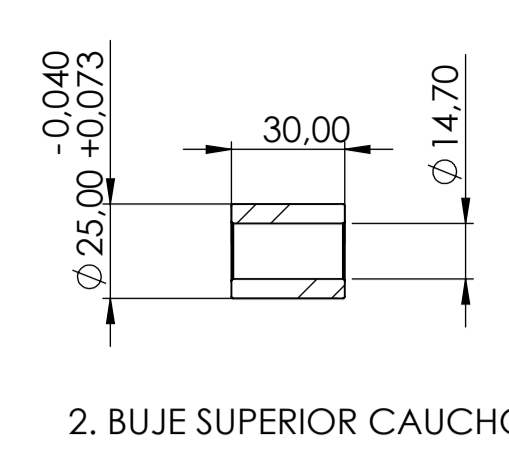
Como dato anexo, a presión lograda en el punto de contacto de los cauchos con el cilindro superior fue de: 27,2 kPa



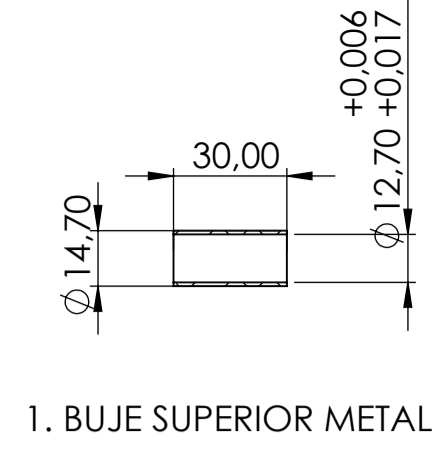
NOTA: Para conocer resultados de fatiga en el análisis de los discos de caucho, se deben tener los datos de la curva de esfuerzo vs vida, y estos deben realizarse directamente con los materiales que vayan a ser utilizados.



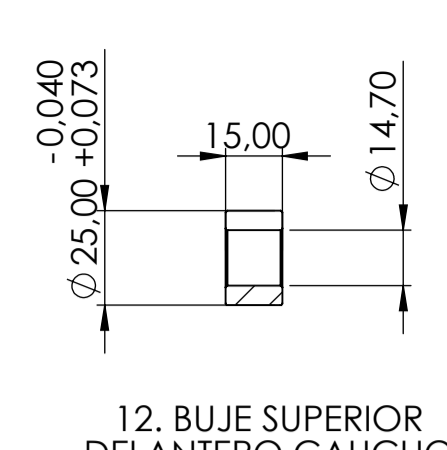
11. BUJE BRONCE



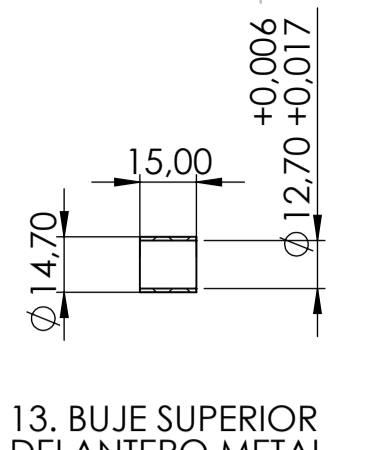
2. BUJE SUPERIOR CAUCHO



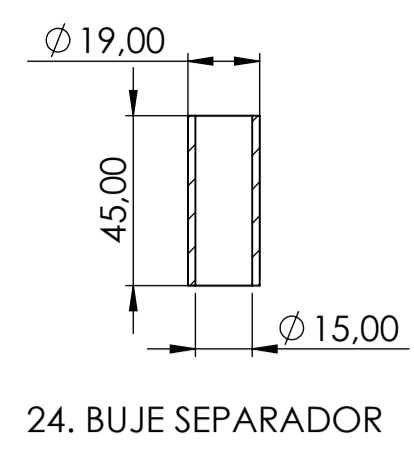
1. BUJE SUPERIOR METAL



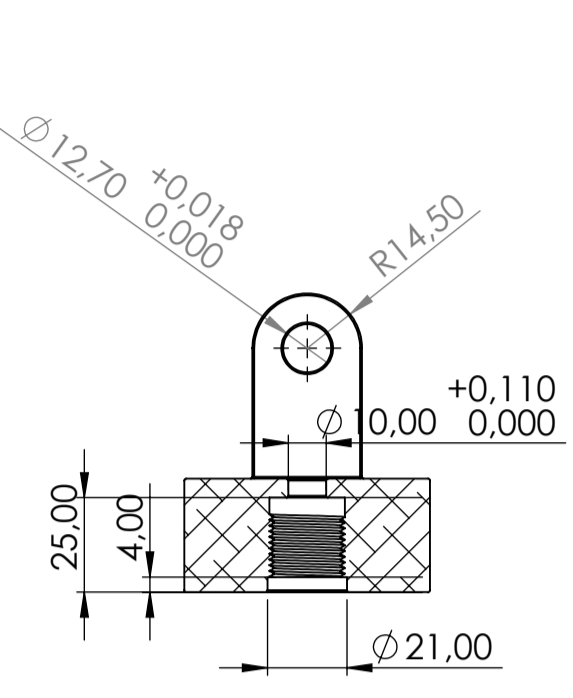
12. BUJE SUPERIOR DELANTERO CAUCHO



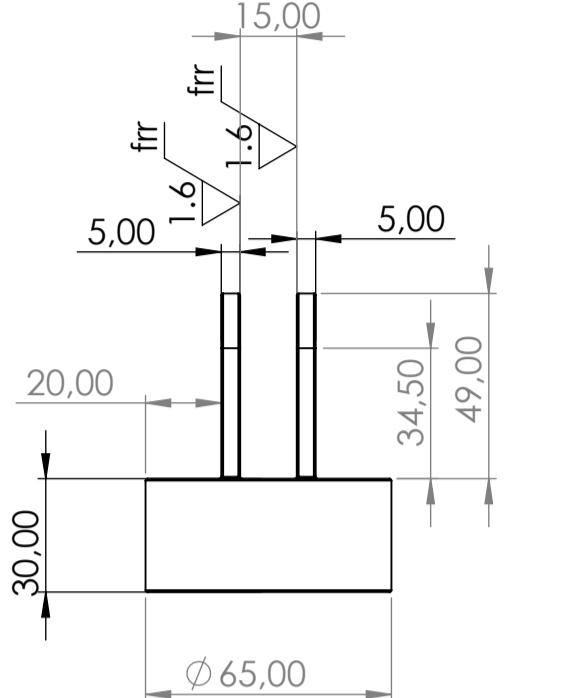
13. BUJE SUPERIOR DELANTERO METAL



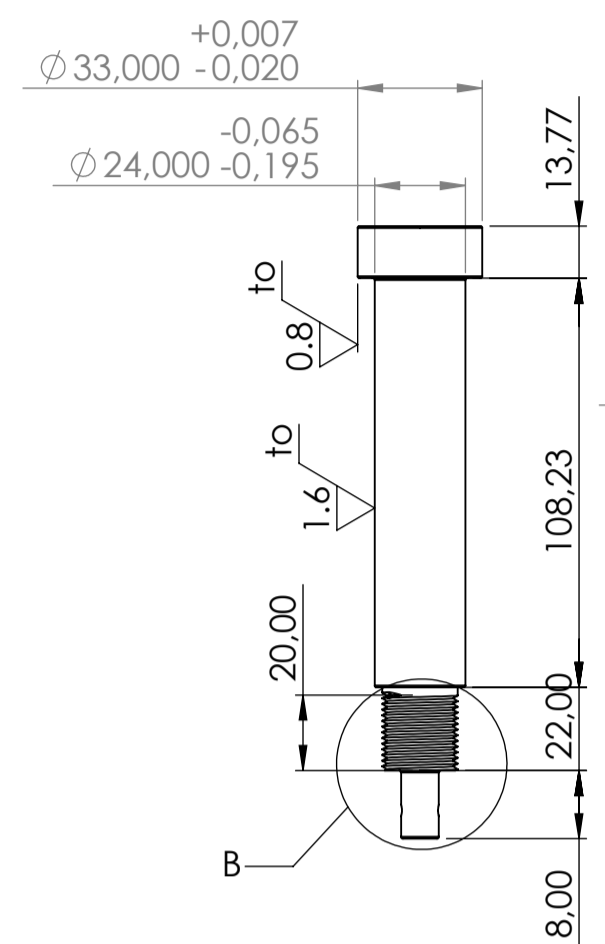
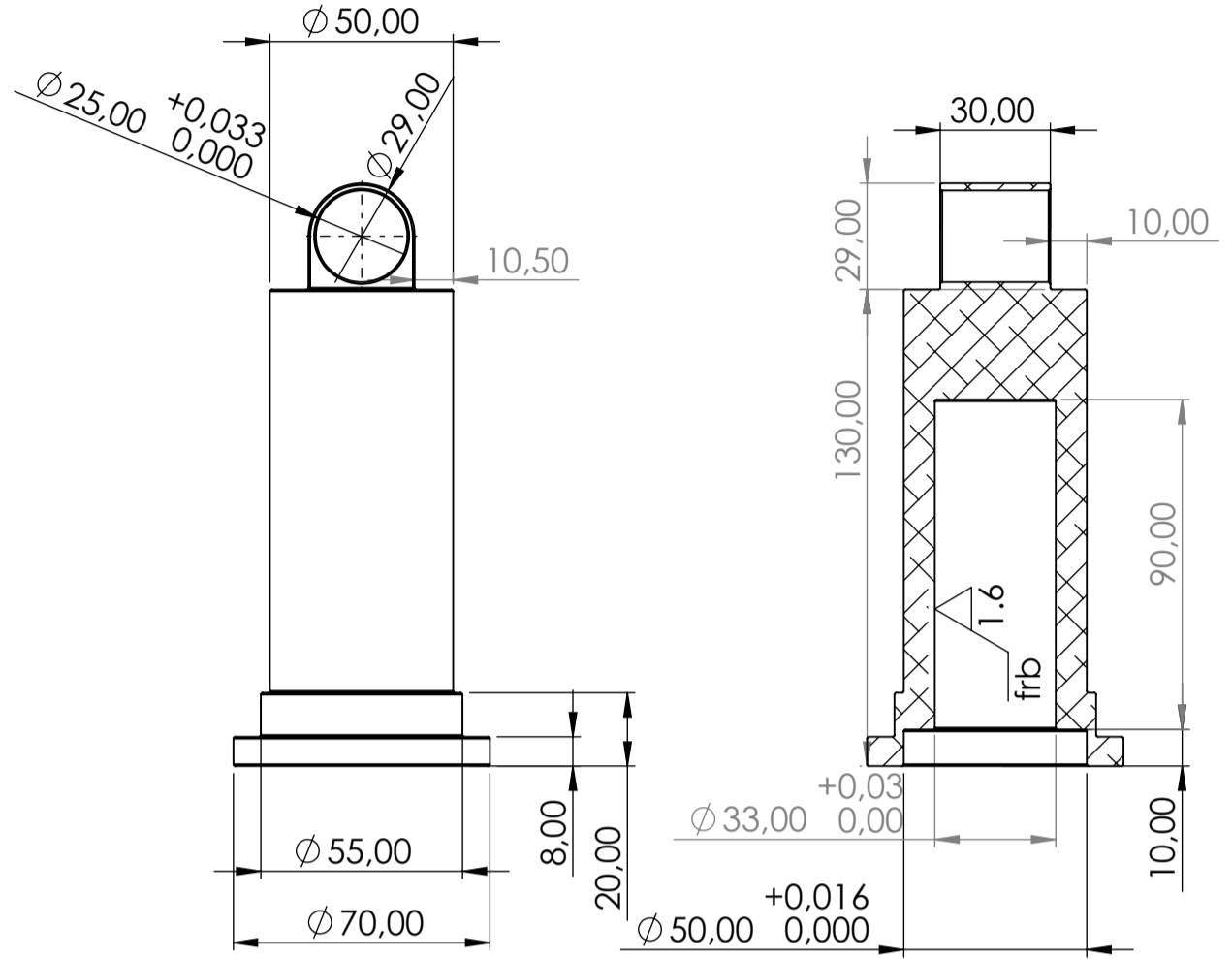
24. BUJE SEPARADOR



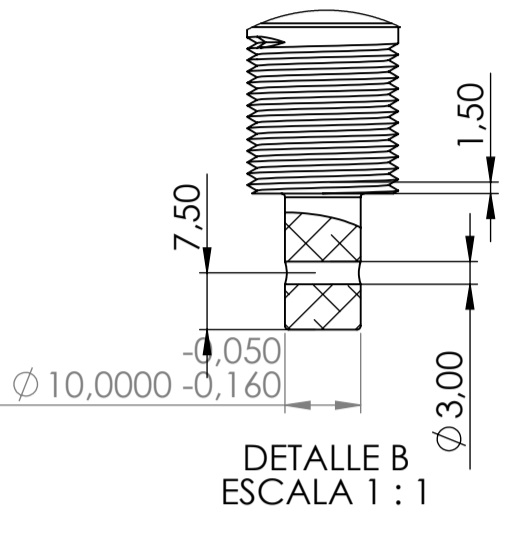
6. CILINDRO INFERIOR



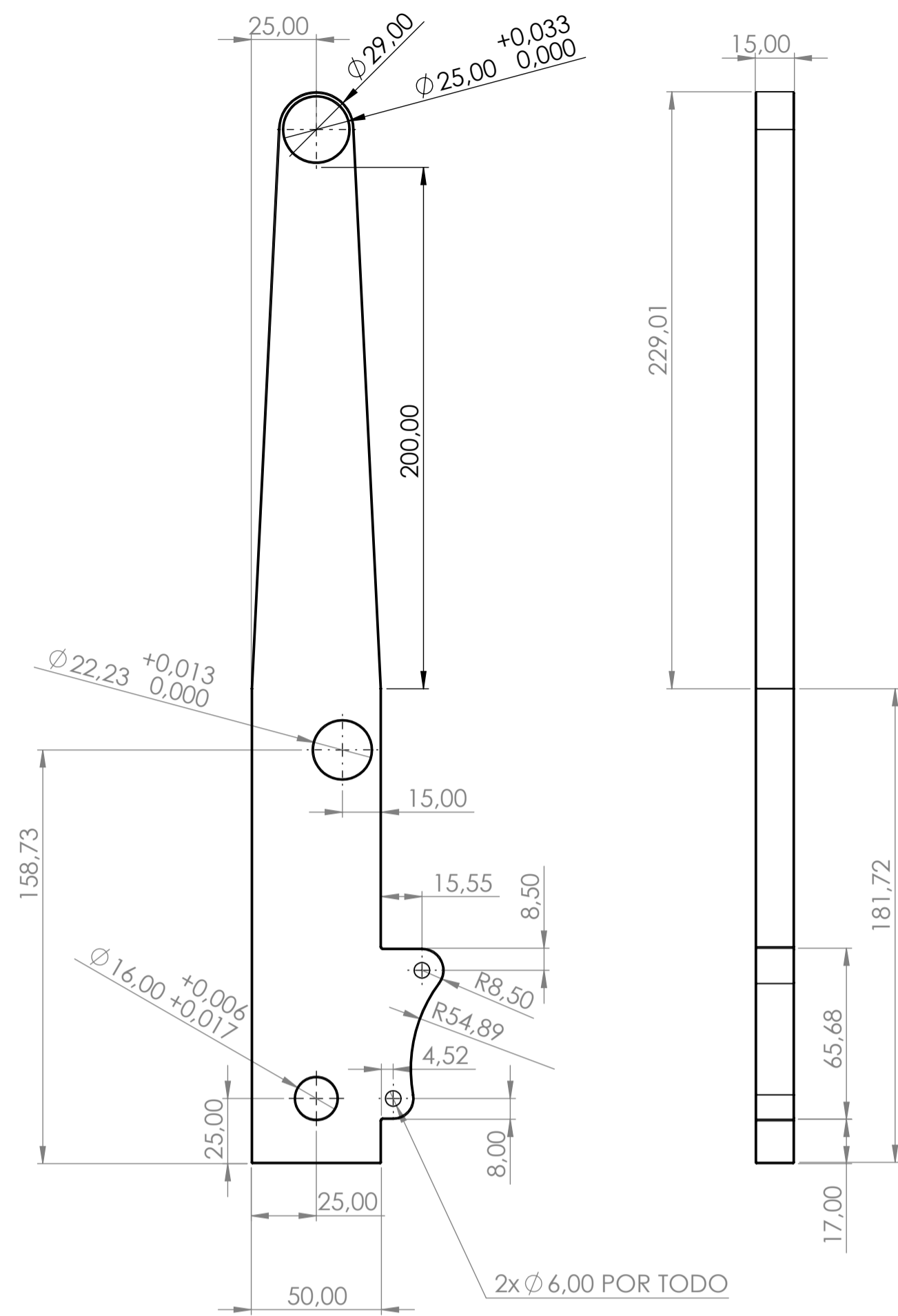
3. CILINDRO SUPERIOR



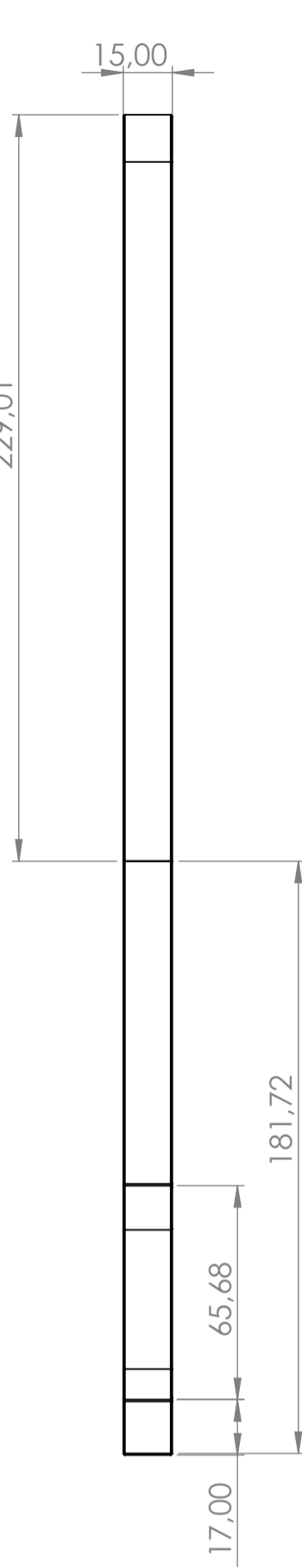
5. VASTAGO DE CAUCHOS



DETALLE B ESCALA 1:1



7. VIGA DE APALANCAMIENTO DER

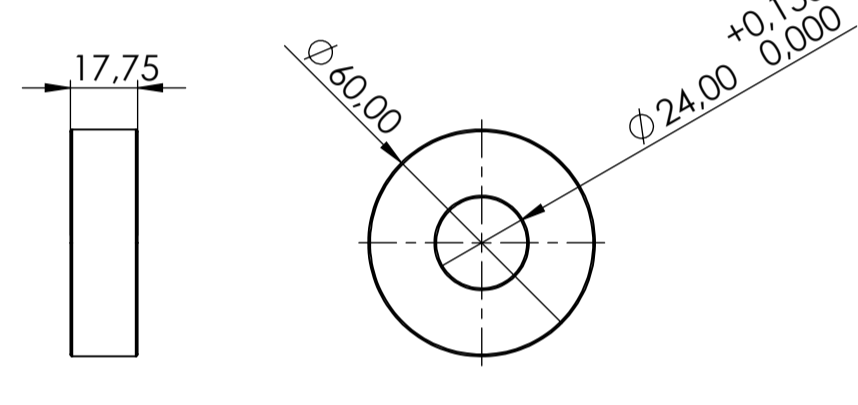


7a. VIGA DE APALANCAMIENTO IZQ

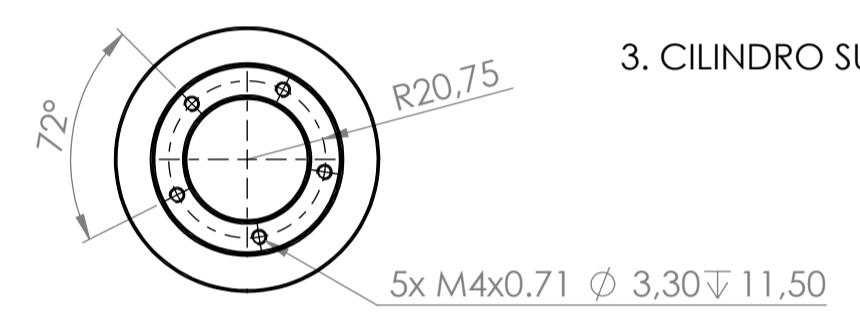
NOTA 2: SOBRE FIGURA 7a, NO SE DAN MÁS REFERENCIAS PARA NO ENTRAR EN REDUNDANCIA CON EL COMPONENTE HOMÓNIMO.

NOTA 3: TODOS LOS REDONDEOS A R 0.5.

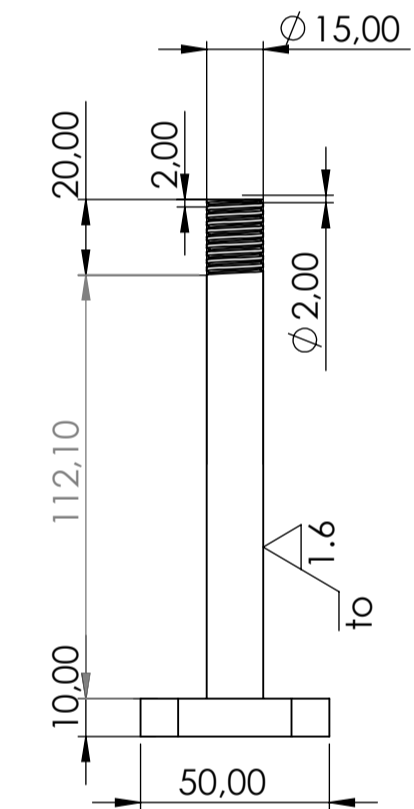
NOTA 4: LAS PIEZAS DISPONIBLES EN EL MERCADO, NO SE DETALLAN (INCLUIDO EL RESORTE).



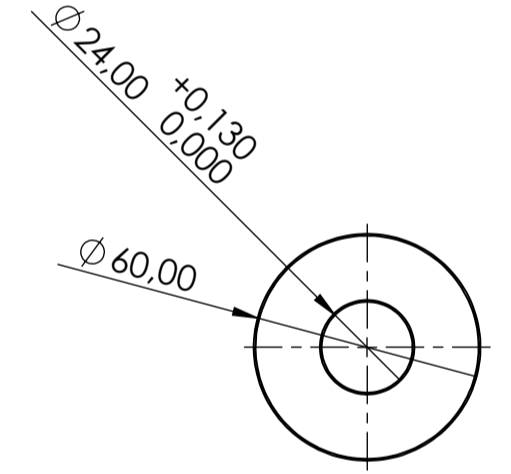
8. DISCO DE CAUCHO



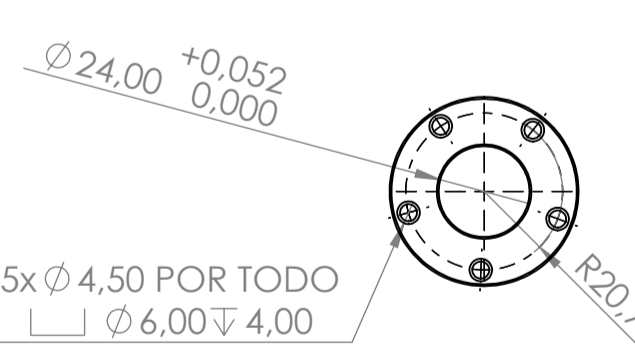
8. DISCO DE CAUCHO



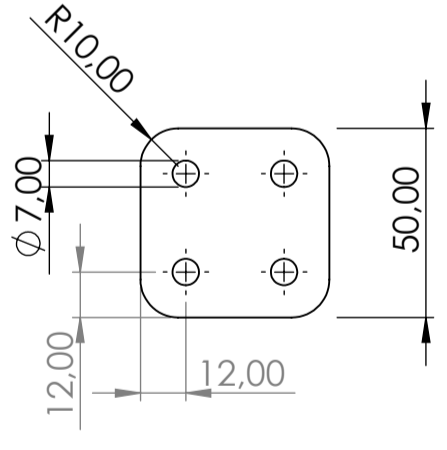
9. PLATO SEPARADOR



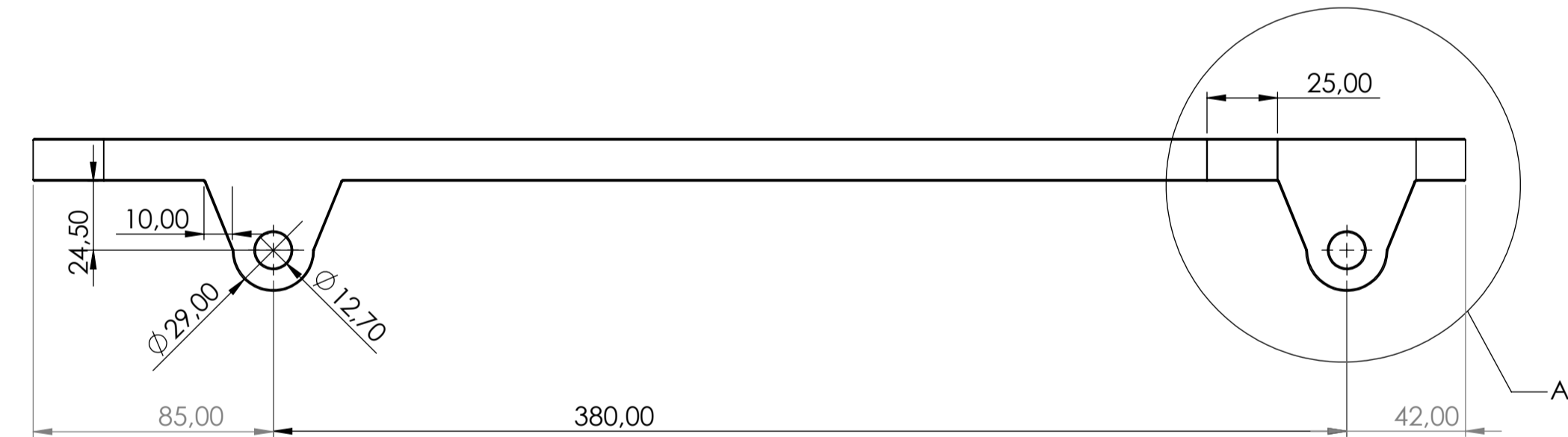
9. PLATO SEPARADOR



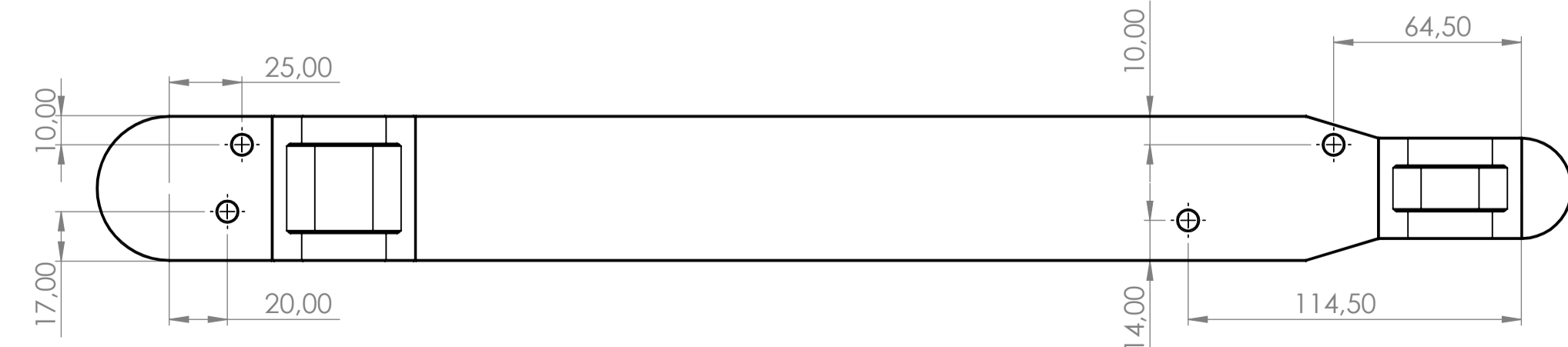
4. Tope para vástago



15. PLATINA EJE



10. SOPORTE SUPERIOR DER



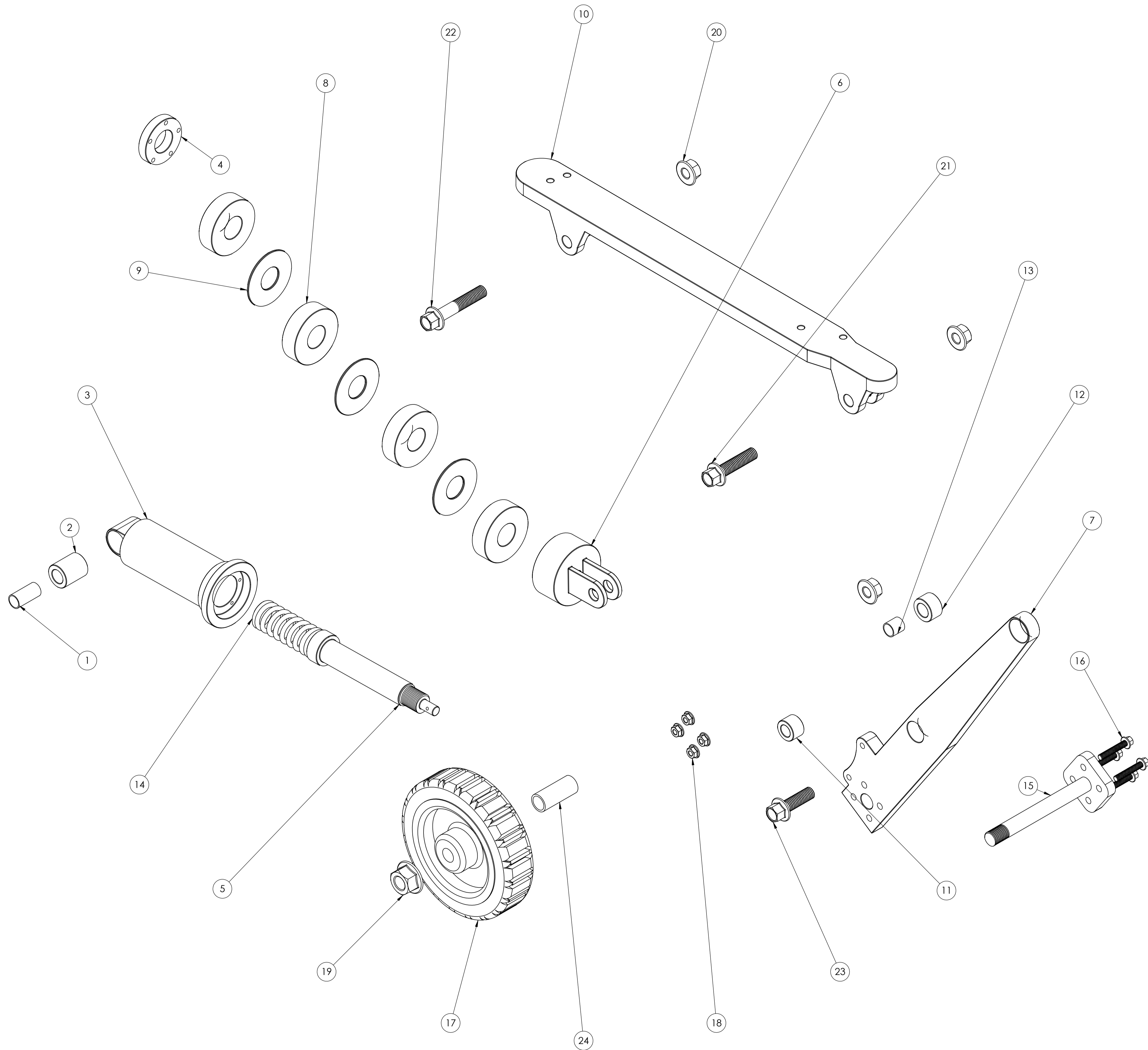
10a. SOPORTE SUPERIOR IZQ

NOTA 1: SOBRE FIGURA 10a, ENTRE EL DERECHO Y EL IZQUIERDO LA ÚNICA DIFERENCIA ES LA UBICACIÓN DE LOS AGUJEROS PARA SUJECIÓN.

JHEFERSON GARCIA ARIAS SEBASTIAN VILLA RESTREPO		UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA	
ESCALA 1:2	VISTA EN DETALLE DEL TREN APALANCADO CON AMORTIGUADOR DE CAUCHOS		FECHA 31/01/2019
MEDIDA mm			PLANO N° 3
			INGENIERIA MECÁNICA

16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

M
L
K
J
H
G
F
E
D
C
B
A



N.º DE ELEMENTO	NOMBRE DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	BUJE SUPERIOR METAL	AISI 4130	1
2	BUJE SUPERIOR CAUCHO	NR VULCANIZADO	1
3	CILINDRO SUPERIOR	7075 T6	1
4	TOPE PARA DE VASTAGO	7075 T6	1
5	VASTAGO CAUCHOS	7075 T6	1
6	CILINDRO INFERIOR	7075 T6	1
7	VIGA DE APALANCAMINETO DER	7075 T6	1
8	DISCOS DE CAUCHO	NR VULCANIZADO	4
9	PLATO SEPARADOR	7075 T6	3
10	SOPORTE SUPERIOR	7075 T6	1
11	BUJE BRONCE	BRONCE	1
12	BUJE SUPERIOR DELANTERO CAUCHO	NR VULCANIZADO	1
13	BUJE SUPERIOR DELANTERO METAL	AISI 4130	1
14	RESORTE	A 228	1
15	PLATINA EJE	7075 T6	1
16	B18.6.7M - M6 x 1.0 x 35 Indented HFMS --35S	NORMALIZADO	4
17	LLANTA	NORMALIZADO	1
18	B18.2.2.4M - Hex flange nut, M6 x 1 --N	NORMALIZADO	4
19	B18.2.2.4M - Hex flange nut, M16 x 2 --N	NORMALIZADO	1
20	B18.2.2.4M - Hex flange nut, M12 x 1.75 --N	NORMALIZADO	3
21	B18.6.7M - M12 x 1.75 x 50 Indented HFMS --50S	NORMALIZADO	1
22	B18.6.7M - M12 x 1.75 x 65 Indented HFMS --38S	NORMALIZADO	1
23	B18.6.7M - M12 x 1.75 x 40 Indented HFMS --40S	NORMALIZADO	1
24	BUJE SEPARADOR	AISI 4130	1

JHEFERSON GARCIA ARIAS SEBASTIAN VILLA RESTREPO		UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA	
ESCALA 1:2	VISTA EN EXPLOSIÓN DEL TREN APALAPANCADO CON AMORTIGUADOR DE CAUCHOS	FECHA 31/01/2019	PLANO Nº 1
MEDIDA mm		INGENIERÍA MECÁNICA	

16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1