

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
UNIDAD PROFESIONAL Ticomán

## INGENIERÍA AERONÁUTICA

**"DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL ESFUERZO DE UNA PIERNA PRINCIPAL DEL TREN  
DE ATERRIZAJE DE UNA AERONAVE CUATRIPLAZA"**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN AERONÁUTICA**

**P R E S E N T A N :**

**FUNES CANIZALEZ CUAUHTÉMOC**

**RIVERA MALDONADO RAÚL ABUNDIO**



**MÉXICO D. F. JULIO 2007**

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
UNIDAD TICOMÁN

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE: INGENIERO EN AERONÁUTICA  
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN: SEMINARIO  
DEBERÁN PRESENTAR: LOS C.C. PASANTES:  
FUNES CANIZALEZ CUAUHTÉMOC  
RIVERA MALDONADO RAÚL ABUNDIO

## SEMINARIO DE TITULACIÓN “INGENIERÍA Y MANUFACTURA ASISTIDA POR COMPUTADORA”

### DETERMINACIÓN DE LA DIRECCIÓN DEL ESFUERZO DE UNA PIERNA PRINCIPAL DEL TREN DE ATERRIAJE DE UNA AERONAVE CUATRIPLAZA”

	ÍNDICE
	GLOSARIO DE TÉRMINOS
	LISTA DE TABLAS Y FIGURAS
	INTRODUCCIÓN
	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA
	CONTEXTO
	OBJETIVOS GENERALES
	OBJETIVOS ESPECÍFICOS
	JUSTIFICACIÓN
	ALCANCE
	METODOLOGÍA UTILIZADA
CAPÍTULO I	ANTECEDENTES
CAPÍTULO II	MODELADO
CAPÍTULO III	ANÁLISIS DE ESFUERZOS USANDO ANSYS WORKBENCH V10
CAPÍTULO IV	ANÁLISIS DE RESULTADOS
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
	REFERENCIAS
	ANEXOS

México, D.F., 01 de Agosto del 2007.

A S E S O R E S

M. EN C. MARIO MÉNDEZ RAMOS

ING. ADELAIDO ILDEFONSO MATIAS  
DOMINGUEZ



I. P. N.  
ESCUELA SUPERIOR DE  
INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
UNIDAD TICOMÁN  
DIRECCIÓN

ING. MIGUEL ALVAREZ MONTALVO  
DIRECTOR

## **AGRADECIMIENTOS**

## **Cuauhtémoc Funes Canizalez**

A mis padres, a mis hermanos y a todas las personas importantes en mi vida.

A mis amigos y compañero de tesina.

Y sobre todo a la mujer más importante de mi vida.

## **Raúl Abundio Rivera Maldonado**

A mis padres:

Raúl Rivera Islas  
Patricia Maldonado Ávila

Por todo el apoyo, confianza y consejos durante toda mi vida académica para poder alcanzar un sueño que ahora es realidad y forma parte importante de mi vida, gracias a ustedes.

A mis hermanos:

Eduardo Rivera Maldonado  
Patricia Guadalupe Rivera Maldonado

Por su compañía durante mi vida estudiantil.

A mi tío:

Juan Rivera Islas

Por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias

A la mujer más importante de mi vida:

Amira Anguiano Jurado

Por todo su tiempo y apoyo brindado.

A mis maestros:

Por transmitirme sus conocimientos y experiencias.

A mis amigos y compañero de tesina

Cuauhtémoc Funes Canizalez  
Emmanuel Iván García Botello  
Javier Vázquez Trejo  
Luís López Reyes  
Raymundo Zaldívar González

Por todos los momentos que pasamos juntos durante mi vida y mi carrera.

A mi familia:

Familia Rivera  
Familia Maldonado

Por su apoyo y sus consejos.

TÍTULO:

**“Determinación de la dirección del esfuerzo de una  
pierna principal del tren de aterrizaje de una aeronave  
cuatriplaza.”**

# Índice

	Pág.
Glosario de términos	12
Introducción	15
Planteamiento del problema	17
Contexto	17
Objetivo general	18
Objetivos específicos	19
Justificación	20
Alcance	21
Metodología a seguir	22
 Capítulo I	 24
Antecedentes	
1.1 Nota histórica en el desarrollo del tren de aterrizaje	25
1.2 Tipos de tren de aterrizaje	25
1.3 Clasificación para aeronaves de ala fija	27
1.4 Disposición del tren de aterrizaje	27
1.5 Sistemas de amortiguación	30
1.6 Materiales aplicados a la construcción de trenes de aterrizaje	32
 Capítulo II	 35
Modelado	
2.1 Características y especificaciones	36
2.2 Justificación del perfil lateral del tren de aterrizaje	37
2.3 Modelado Paramétrico	38
2.4 Modelado de un prototipo	38
 Capítulo III	 41
Análisis de esfuerzos usando ANSYS Workbench V10	
3.1 Elemento finito	42

3.2 Propiedades del material	44
3.3 Restricciones y cargas	46
3.4 Mallado	49
3.5 Solución	50
Capítulo IV	51
Análisis de resultados	
4.1 Visualización de esfuerzos	56
4.2 Determinación de la dirección de los esfuerzos	60
Conclusiones	61
Recomendaciones	65
Referencias	67
Anexos	
A1 - Modelado de un prototipo	



## Índice de tablas

Tab.	Pág.
Capítulo I	
1.1 Tabla comparativa para la selección de materiales	33
1.2 Tabla de nomenclatura	33
1.3 Tabla de parámetros calificados	33
Capítulo III	
3.1 Componentes del acero AISI 4027	45
3.2 Propiedades mecánicas del acero AISI 4027	45
3.3 Factores de carga sugeridos	46
Capítulo IV	
4.4 Componentes del esfuerzo normal máximo para cada modelo	56
4.5 Propiedades del perfil rectangular	60
4.6 Propiedades del perfil de herradura	60
4.7 Comparación de resultados	60
C8 Vector unitario de los modelos	62
C9 Componentes de mayor magnitud	63

## Índice de figuras

	Pág.
J1 Uso de materiales compuestos en diversas industrias	20
M1 Diagrama de flujo del proyecto	23
Capítulo I	
1.1 Cessna 172 Tren de tipo triciclo	25
1.2 P-44 Proctor Tren de patín de cola	25
1.3 B-727 Tren de triciclo	26
1.4 P-47 Tren de patín de cola	26
1.5 Bell 206B Tren fijo	26
1.6 Bell 230 Tren retráctil	26
1.7 Beriev 200 Hidroavión	26
1.8 Piper 18-150 Hidroavión	26
1.9 Ato1 500 Tren de "ski"	26
1.10 R22	26
1.11 Configuración y nomenclatura del tren de patín de cola	28
1.12 Nomenclatura del tren de triciclo	29
1.13 Disposición del tren en diversas condiciones	30
1.14 Sujeción del tren tipo resorte	30
1.15 Sujeción del tren tipo resorte al fuselaje	31
1.16 Configuración y nomenclatura del tren tipo triciclo	31
1.17 Nomenclatura del tren de patín de cola	34
Capítulo II	
2.1 Sección transversal del tren	37
2.2 Modelo de tren de perfil rectangular	39
2.3 Modelo de tren de perfil de herradura.	40
Capítulo III	
3.1 Tipo de simulación	43
3.2 Barra "outline"	44
3.3 Propiedades del nuevo material	46
3.4 Soportes fijos (empotre) tren plano	48
3.5 Carga debida al peso de la aeronave	48
3.6 Malla y tamaño del elemento finito	49
3.7 Barra "Required steps" (solución)	50
Capítulo IV	
4.1 Listado de resultados	52
4.2 Visualización del esfuerzo normal en el eje X para el tren plano	53
4.3 Visualización del esfuerzo normal en el eje Y para el tren plano	53
4.4 Visualización del esfuerzo normal en el eje Z para el tren plano	54
4.5 Visualización del esfuerzo normal en el eje X para el tren de herradura	54
4.6 Visualización del esfuerzo normal en el eje Y para el tren de herradura	55
4.7 Visualización del esfuerzo normal en el eje Z para el tren de herradura	55
4.8 Posición de los ejes coordenado respecto al modelo	58
4.9 Vector unitario	59

4.10 Vector unitario respecto a su posición en la pierna	59
Conclusiones	
C1 Plano de las componentes de mayor magnitud	63
C2 Vector formado por las componentes de mayor magnitud	64
Anexo 1	
A Plano de Referencia para el Modelado del una pierna del tren de aterrizaje con perfil rectangular	70
A1 Perfil rectangular principal	71
A2 Ubicación de capa "Layer"	72
A3 Selección del elemento	72
A4 Base perfil secundario	73
A5 "Datum plane" base para el perfil secundario	73
A6 "Sketch" base para perfil secundario	74
A7 Barra "Sketch operation"	74
A8 Proyección completa	75
A9 Perfil curvo para guía	76
A10 Complemento del perfil guía	76
A11 Guía finalizada	77
A12 Operación barrido a través de una curva	77
A13 Selección de una guía	78
A14 Visualización del modelo sólido y alambre	79
A15 Extrusión para base de fijación	80
A16 Base de fijación extruida	80
A17 Chaflán	81
A18 Parámetros de chaflán	82
A19 Redondeo de punta	82
A20 "Sketch" para barrenos de empotre	83
A21 Guía para barrenos	83
A22 "Sketch" finalizado	84
A23 "Sketch" base para barrenos de sujeción	84
A24 Modelo finalizado	85

## Glosario de términos

**Ski:**

Elemento que sustituye la rueda en el tren de aterrizaje de algunas aeronaves.

**Outline:**

Espacio destinado para el historial de la parte analizada en el programa de análisis y que no pertenece a la pantalla.

**Required steps:**

Lista de pasos requeridos para la solución de una parte a analizar.

**Layer:**

Capa que puede ser asignada a cualquier elemento.

**Datum plane:**

Plano de referencia para el diseño de alguna parte.

**Sketch:**

Herramienta destinada para la generación de bocetos a base de líneas.

**Sketch operation:**

Barra de herramientas con diferentes operaciones con la capacidad de hacer modificaciones a un sketch.

**Software:**

Programa de computadora.

**CAD:**

Diseño Asistido por Computadora por sus siglas en ingles (Computer Aided Desing)

**CAE:**

Ingeniería Asistida por Computadora por sus siglas en ingles (Computer Aided Engineering)

**FAR:**

Regulaciones para la Aviación Federal por sus siglas en ingles (Federal Aviation Regulations)

**Sandow:**

Sistema de amortiguación más elemental de un tren de aterrizaje.

**Spring:**

Sistema de amortiguación más elemental de un tren de aterrizaje.

Modelado paramétrico:

Modelado definido por relaciones entre sus dimensiones.

Run:

Instrucción para inicializar el programa de análisis.

Mesh:

Malla asignada a la parte a analizar.

Global control:

Control global para los parámetros de la malla.

Advanced:

Control avanzado para los parámetros de la malla.

Preview mesh:

Visualización previa de la malla.

AISI:

Instituto Americano del Hierro y del Acero por sus siglas en ingles  
(American Iron and Steel Institute)

Verify material:

Paso que es requerido en el programa de análisis.

New material:

Material nuevo para el programa de análisis.

Simulation:

Ventana de simulación en el programa de análisis.

Insert loads:

Instrucción de inserción de cargas en el programa de análisis.

Structural:

Tipo de simulación en el programa de análisis.

Modeling:

Ventana de modelado en el programa de diseño.

Form feature:

Barra de herramientas para generar operaciones básicas en el programa de diseño.

Format:

Menú principal en el programa de diseño.

Layer category:

Categoría de capa asignada a un objeto en el programa de diseño.

Move to layer:

Mover a una capa asignada en el programa de diseño.

Project:

Instrucción de proyectar una línea en un sketch.

Surface:

Barra de herramientas para generar superficies en el programa de diseño.

Swept.

Instrucción de generar una superficie a través de una curva.

Extrude:

Instrucción de generar sólidos por medio de líneas.

Feature operation:

Barra de herramientas para generar operaciones en un sólido.

Edge chamfer:

Operación para generar chaflanes.

Duoble offset:

Parámetros de un chaflán por medio de dos lados.

Edge blend:

Operación de redondeo de aristas.

Hole:

Operación de generar barrenos.

## Introducción

Desde el inicio de la aviación, alrededor del mundo, ha existido la necesidad de desarrollar e implementar en las aeronaves un sistema de aterrizaje que sea seguro y acorde con las características del suelo en donde dichas aeronaves sean operadas, un sistema que cumpla con los requerimientos de diseño tomando en cuenta factores que no son constantes, y dependen de la región, el tipo de aeronave y el uso de la misma, entre otras cosas, estos factores influyen directamente en el diseño del tren de aterrizaje de una aeronave dando como resultado una gran variedad de formas y tamaños, la tecnología de hace cien años ha evolucionado y en la actualidad usa muchos métodos que antes no existían, tal es el caso de la producción de partes de materiales compuestos que con sus características tan especiales ha logrado hacerse presente en muchos campos de aplicación, en el ámbito aeronáutico ha tenido un impacto de gran magnitud debido a sus características principales tales como alta resistencia y bajo peso que los hacen ideales para su explotación en el medio. Uno de estos métodos de producción, es el de partes de fibra de carbono, el cual en la actualidad es, sin temor a equivocación, el mas utilizado por la industria ya que al final del proceso obtiene características mecánicas que en comparación con otros materiales son de mejores propiedades, en particular, en la aviación una propiedad fundamental de los materiales utilizados en la construcción de aeronaves es la relación que exista entre la resistencia y el peso llamada resistencia especifica, la cual es determinante para la selección de los materiales con los cuales se construye una aeronave, pues entre mas resistentes y ligeros, mejor, pero siempre cuidando la relación entre estas dos características.

En este trabajo se aborda el problema del diseño estructural de las piernas principales de un tren de aterrizaje fijo de una aeronave para cuatro personas con la finalidad de optimizar la resistencia específica haciendo uso de herramientas que en la actualidad son parte importante del proceso de diseño de partes de aeronaves tales como la teoría del diseño, el modelado en tres dimensiones y el análisis del modelo por medio de “software” y computadores especializados.



# Planteamiento del problema

## Contexto

El presente trabajo surgió con el fin de colaborar en el desarrollo de una aeronave de materiales compuestos, proponiendo la configuración óptima de la disposición de los refuerzos en un tren de aterrizaje fijo hecho de estos materiales, para una aeronave de 4 pasajeros, basado en los requerimientos indispensables de acuerdo a normas aeronáuticas, esta aeronave se está diseñando en la ESIME TICOMAN en colaboración con la empresa AEROMARMI con la cual se tiene un convenio general.

En la actualidad no existe ningún aparato con la capacidad de volar que no tenga un sistema propio (específico y especializado) para la transición que existe entre estar en el suelo y el aire, en el caso particular de las aeronaves, existe un sistema encargado de esta función, que es de vital importancia para la operación de las mismas en la etapa de despegue y aterrizaje, este sistema llamado tren de aterrizaje, que en sus diversas formas cumple con la finalidad de hacer posible dicha transición de manera segura y eficaz.

Desde las últimas décadas del siglo XX los investigadores se han preocupado por desarrollar tecnologías que ayuden a resolver problemas y hacer más eficientes los sistemas que operan en la industria, en este caso una manera de eficientar la operación de una aeronave es por medio de la utilización de materiales más ligeros y resistentes de acuerdo a su uso, con la finalidad de que el avión sea más ligero, eficiente y pueda llevar una mayor carga útil.

El tren de aterrizaje principal de una aeronave de ala fija es un elemento que debe resistir diversos esfuerzos estructurales, además de ser ligero, sobre todo para una aeronave de materiales compuestos, es por esto que nos proponemos analizar a lo largo de este trabajo dos configuraciones de modelos sometidos a una de las condiciones críticas que se puedan presentar con ayuda de las herramientas de CAD con el “software” NX 3 y CAE con el “software” ANSYS con que cuenta la escuela, para poder definir la configuración óptima de la disposición de los refuerzos en la pierna principal de un tren de aterrizaje fijo para un avión de 4 plazas, lo cual permita en el futuro fabricar este en materiales compuestos.

## Objetivo general

Obtener la dirección de los esfuerzos máximos normales, generados por las cargas sobre la pierna principal del tren de aterrizaje fijo de una aeronave para cuatro pasajeros, analizado en sólo una de las condiciones críticas de operación, específicamente con el peso máximo de despegue y en una sola pierna del tren principal, proponiendo así la dirección de los refuerzos para futuros trabajos.

### Objetivos específicos

- Diseñar y modelar, la geometría de las piernas principales de un tren de aterrizaje fijo de una aeronave de cuatro pasajeros haciendo uso de las herramientas de ingeniería del “software” NX3.
- Analizar el modelo haciendo uso de las herramientas de ingeniería asistida por computadora del “software” ANSYS Workbench.
- Comparar los modelos y resultados analizados con la finalidad de determinar la geometría más adecuada para el uso especificado.

## Justificación

La solución de este problema, surge a partir de la necesidad de implementar nuevos métodos y tecnologías en la construcción de aeronaves cada vez más eficientes, por eso, en este trabajo, se contribuye con una pequeña parte del proceso en la construcción de una aeronave con el diseño conceptual de las piernas principales de un tren de aterrizaje fijo de una aeronave de cuatro pasajeros en colaboración con la empresa AEROMARMI con el fin de optimizar su operación, proponiendo de esa manera un diseño más seguro y resistente a un costo relativamente más bajo con respecto a sus similares de materiales tradicionales, tomando como referencia diseños y literatura existentes en la actualidad, pudiendo definir su comportamiento en una determinada circunstancia. Las fibras de alto rendimiento en los materiales compuestos son relativamente nuevas en el mundo de las estructuras, fueron descubiertas en los años '60 por ingenieros electrónicos que trataban de encontrar la causa de misteriosos cortocircuitos en los primeros dispositivos basados en semiconductores. La causa resultó ser que finos filamentos de estaño aparecían entre las capas aislantes. Estos filamentos tenían una estructura cristalina pura muy regular y ofrecían una resistencia mecánica excepcional, el peso de los materiales compuestos con respecto a los tradicionales es una reducción superior al 50% sin sacrificar sus prestaciones, pero con un costo relativamente más alto, aun así, los materiales compuestos están presentes en la industria, en la fig. J1 se muestra el % de utilización de los materiales compuestos en la industria.



Fig. J1: Uso de Materiales Compuestos en diversas industrias

## Alcance

El trabajo está limitado a determinar la dirección del esfuerzo normal generado en las piernas principales de un tren de aterrizaje fijo, con geometría definida en base a diferentes criterios de diseño y analizado en una sólo de las condiciones críticas de operación especificada en los capítulos subsecuentes, basados exclusivamente en el uso del “software” de simulación de esfuerzos ANSYS Workbench V10, se deja el cálculo teórico y experimental a futuros trabajos similares

### **Metodología a seguir**

- Recopilación de información respecto a tipos y usos de tren de aterrizaje
- Definición de características y especificaciones del tipo de tren de aterrizaje a diseñar.
- Levantamiento dimensional de trenes de aterrizaje de referencia y visualización de planos descriptivos.
- Definición de los criterios de diseño a utilizar basados en la viabilidad de manufacturación
- Modelado paramétrico del diseño en 3D con ayuda de las herramientas del “software” NX3
- Análisis estructural del modelo con ayuda del “software” ANSYS Workbench V10
- Análisis de resultados y determinación de la geometría óptima
- Conclusiones.

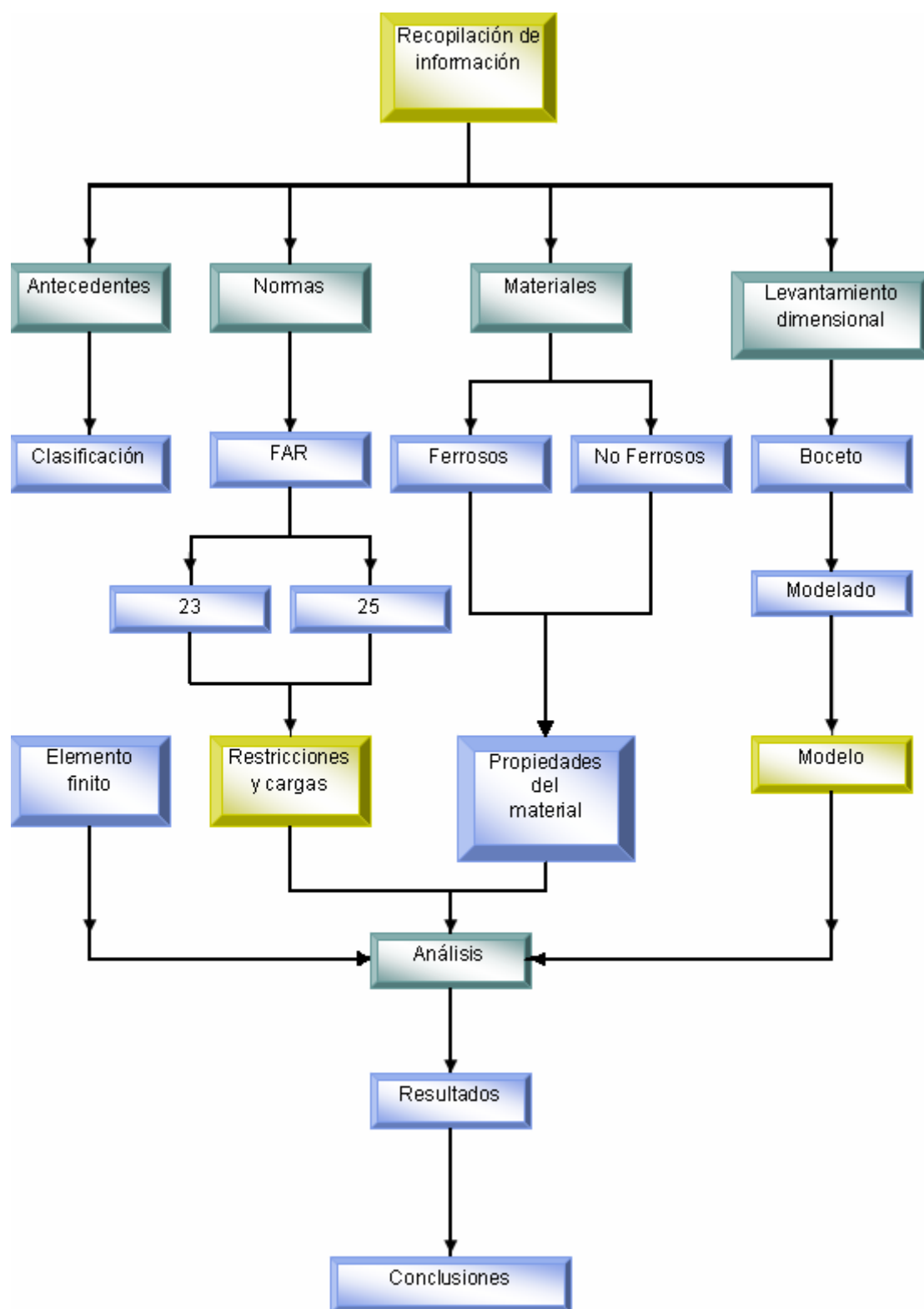


Fig. M1: Diagrama de Flujo del Proyecto

## **Capítulo I:**

### **Antecedentes**



## 1.1 Nota histórica en el desarrollo del tren de aterrizaje

La aeronave más antigua fue hecha con una configuración de tren de aterrizaje de tres ruedas de bicicleta en un simple patín tubular de madera, antes de la guerra de 1914, el arreglo de los trenes de aterrizaje en una aeronave en lo general es de tres piernas elementales, dos principales cerca del centro de gravedad de la aeronave en elevación, y una pierna auxiliar en la cola o en la parte frontal del fuselaje como en la nariz, la disposición de rueda de cola fue la más popular hasta que gradualmente fue suprimida por la configuración de rueda de nariz de 1938 en adelante. Casi todas las aeronaves modernas cuentan con tren de aterrizaje de nariz debido a varios problemas que presentaba con respecto a la operación de la aeronave, entre otros, la visibilidad en el taxeo.

## 1.2 Tipos de tren de aterrizaje

Los trenes de aterrizaje se dividen principalmente en dos grandes grupos, los cuales se dividen en diversos ramos según la aeronave y el uso de la misma.

Según la aeronave:

Aeronaves de ala fija

Tren fijo



Fig. 1.1: Tren triciclo  
Cessna 172



Fig. 1.2: Tren de Patín de cola  
P – 44 Proctor

## Tren retráctil



Fig. 1.3: Tren tipo Triciclo B – 727



Fig.1.4: De Patín de cola P - 47

## Aeronaves de ala rotativa



Fig. 1.5: Tren fijo Bell 206 B



Fig. 1.6: Tren retractil Bell 230

## De tipo especial



Fig. 1.7: Beriev 200



Fia. 1.8: Piper 18 - 150



Fig. 1.9: Atol 500



Fig. 1.10: R22

### 1.3 Clasificación para aeronaves de ala fija

Los trenes de aterrizaje de los aviones pueden ser clasificados en:

- 1) Trenes fijos.
- 2) Trenes retráctiles.

Los trenes fijos son los que, durante el vuelo se encuentran permanentemente expuestos a la corriente de aire. Se usan solamente en aviones pequeños, de baja velocidad donde el aumento de peso por agregado de un sistema de retracción influirá desfavorablemente sobre el peso total y la ganancia en velocidad no mejoraría mucho los rendimientos.

### 1.4 Disposición del tren de aterrizaje

Existen dos disposiciones de tren de aterrizaje a saber:

- 1) *Tren Convencional Patín de Cola*
- 2) *Tren Triciclo*

A su vez existen variantes a los dos anteriores que puede ser denominado como tren biciclo.

El tren Convencional:

Esta constituido por dos montantes de aterrizaje debajo del ala o del fuselaje a la altura del ala y una rueda o patín de cola.

Este tipo de tren de aterrizaje posee varios inconvenientes que son:

- 1) No permite buena visibilidad del piloto.

- 2) Para decolar o despegar el empenaje tiene que producir una cierta sustentación para que el avión quede en posición horizontal o sea la rueda de cola en el aire.
- 3) Cuando el avión aterriza se puede correr el riesgo que un mal frenado pueda hacer capotar o darse vuelta. Entonces cuando aterriza lo hace en dos puntos o sea que tocan los dos montantes delanteros.

El sistema de dirección se realiza por medio del patín de cola comandado por cables o también se puede lograr el cambio de dirección aplicando el freno en uno de los montantes principales y dándole potencia en el caso del bimotor al motor opuesto al que se aplicó el freno.

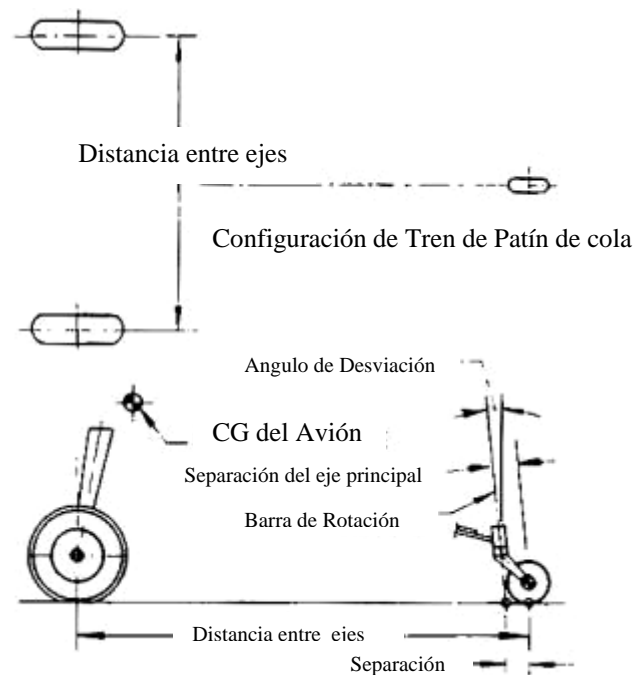


Fig. 1.11: Configuración y Nomenclatura del tren de patín de cola Ref.(4)

El tren Triciclo:

Está constituido por dos montantes principales debajo del ala o del fuselaje y un montante en la nariz del avión. El montante de nariz posee un dispositivo de dirección.

En realidad todos los aviones son triciclos, pero ésta denominación se ha generalizado para los que llevan la tercera rueda en la proa.

El tren triciclo tiene la misma misión que el tren convencional, pero, simplifica la técnica del aterrizaje y permite posar el avión en tierra en posición horizontal, eliminando el peligro del capotaje, aún cuando se apliquen los frenos durante el aterrizaje.

La estabilidad que proporciona el tren triciclo en el aterrizaje con viento de cola o viento cruzado, es gracias a la posición del centro de gravedad (c.g.) delante de las ruedas principales, el recorrido en línea recta en el aterrizaje y decolaje, son las ventajas más importantes. Esta condición es de especial importancia para los aviones que deben aterrizar o decolar en pistas pequeñas, con viento de costado.

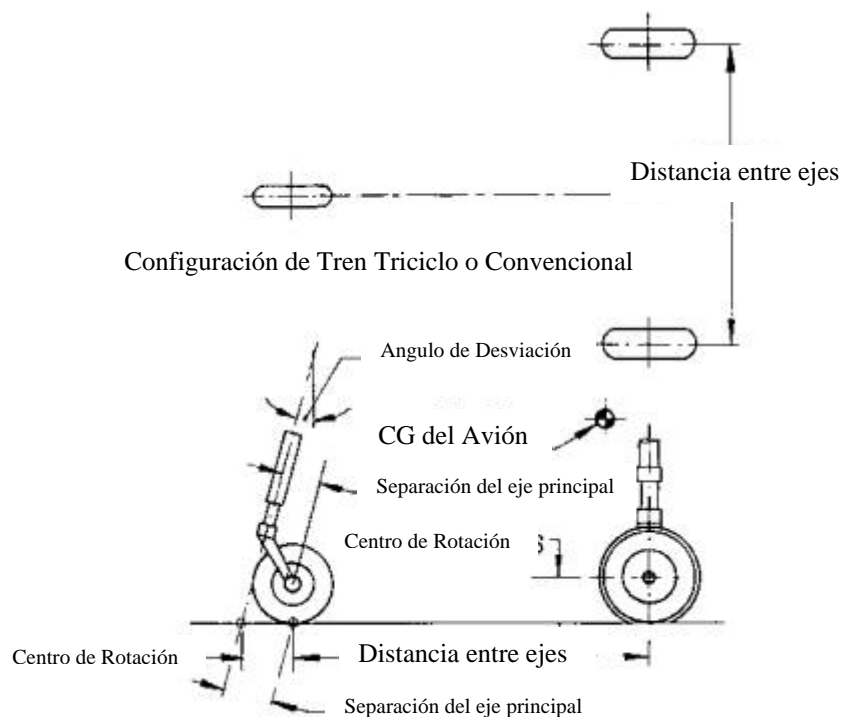


Fig. 1.12: Nomenclatura del tren Triciclo Ref.(4)

## 1.5 Sistemas de amortiguación

El sistema de amortiguación más elemental, está constituido por el conjunto de cordones elásticos llamados comúnmente “SANDOW” o “SPRING” (monomotores pequeños).

El movimiento de las piernas del tren hace estirar este elástico produciéndose el efecto de amortiguación, en la fig. 1.13 se muestra el comportamiento de las piernas del tren principal en todas sus condiciones de operación.

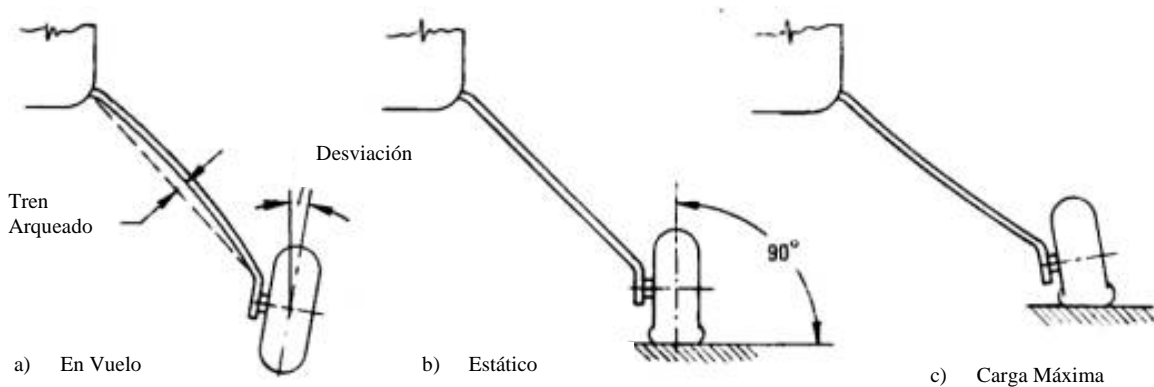


Fig. 1.13: Disposición del tren en diversas condiciones Ref.(2)

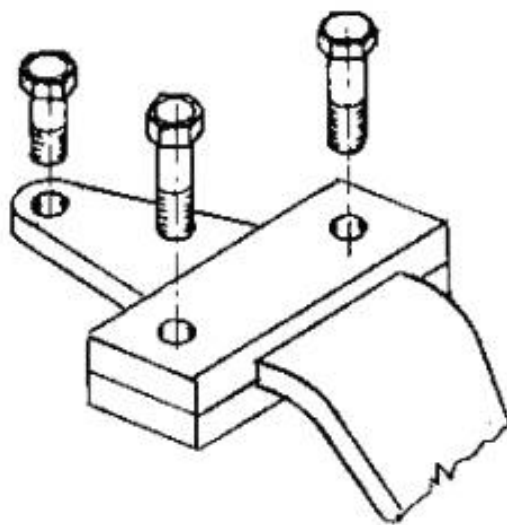


Fig. 1.14: Sujeción del tren tipo Resorte Ref.(1)

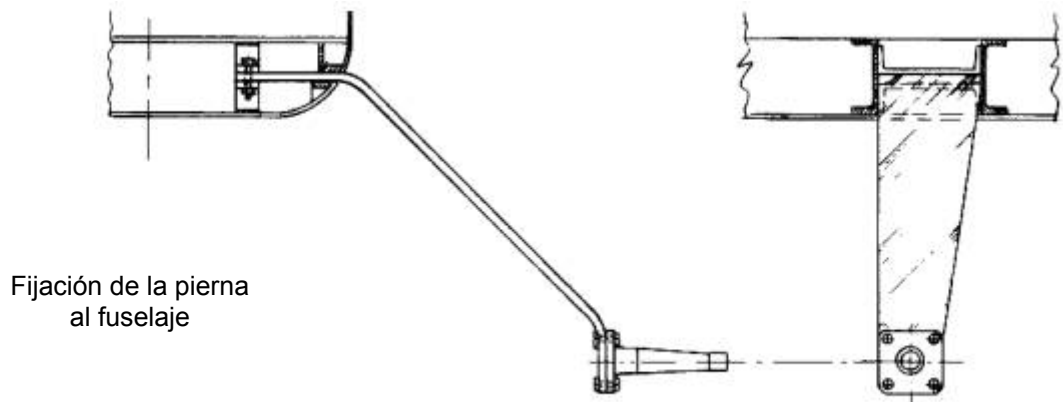


Fig. 1.15: Sujeción del tren tipo Resorte al fuselaje Ref.(1)

Existen sistemas de amortiguación como los usados actualmente, constituidos por un cilindro donde juega un pistón cargado a resorte para acompañar el retorno del mismo, y de una mezcla de aire comprimido y líquido hidráulico para evitar los movimientos bruscos.

En aviones pequeños, el tren de aterrizaje, que cumple también las funciones de amortiguación, es el llamado tipo “CESSNA”, sumamente efectivo y muy simple. En la fig. 1.16 se muestra un diagrama del tren de aterrizaje tipo Cessna.

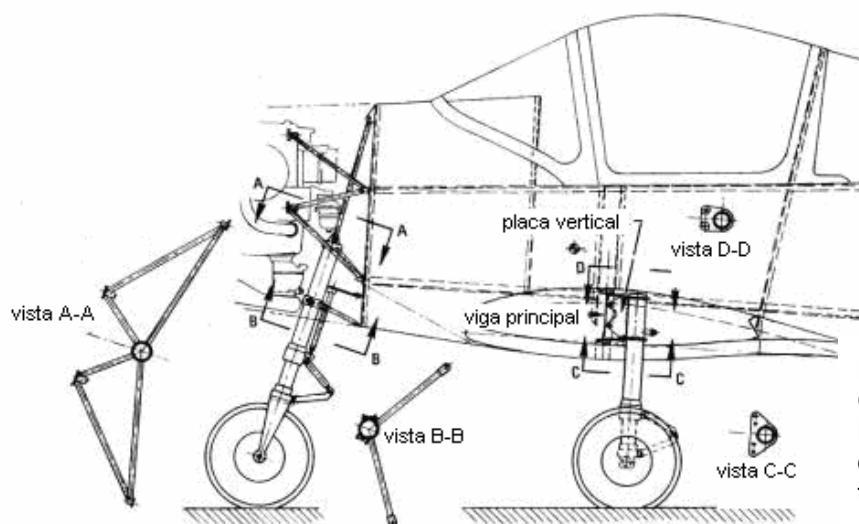


Fig. 1.16: Configuración y Nomenclatura del tren de triciclo Ref.(4)

El montante del tren de aterrizaje principal está constituido por los siguientes elementos:

Montante amortiguador:

El cual tiene la función de transformar la energía cinética de descenso en incremento de presión de un líquido y un gas que se encuentra dentro de este (en el momento que el avión aterriza).

Este montante amortiguador está constituido por un cilindro que en su parte superior va tomado a la estructura del avión y por su parte inferior posee un pistón hueco que a su vez en su interior se desplaza otro pistón. En la parte superior del pistón hueco existen dos válvulas que permiten el paso de cierta cantidad de líquido.

La empaquetadura es una goma que permite que el líquido no salga y se encuentre entre la pared del cilindro y el pistón y además previene el contacto metal a metal del conjunto.

## **1.6 Materiales Aplicados a la construcción de los Trenes de aterrizaje**

Los materiales que se ocupan en la fabricación de trenes de aterrizaje son diversos dependiendo las necesidades, principalmente se ocupan Aluminio 7075 T6, Aluminio 2024, Aluminio 6061 T6, Acero 4041, Acero 401.

En la tabla 1.1 se muestra un estudio comparativo de diversos parámetros con los cuales basamos la selección del material más adecuado para el análisis de esfuerzos que vamos a realizar.



Tabla comparativa para la selección de Materiales							
Material	Resistente a la		PROPIEDADES GENERALES				
	corrosión (4)	fatiga (3)	Maquinabilidad (3)	modulo de young (2)	relación poisson (2)	esfuerzo de cedencia (2)	costo (1)
Aluminio 2024 - T6	D	C	B	B	B	A	B
Aluminio 6061 - T6	B	D	C	C	B	C	C
Acero 4027	B	A	B	A	B	C	B

Tabla. 1.1: Tabla comparativa para la selección de materiales

nomenclatura	
A	EXCELENTE
B	BUENO
C	REGULAR
D	MALO
E	PESIMO

Tabla: 1.2: Tabla de nomenclatura

En la tabla 1.2 se muestra la relación de calificaciones que asignamos para poder hacer un estudio cuantificable.

	Aluminio 2024 - T6	Aluminio 6061 - T6	Acero 4027
costo por KG	150	300	180
esfuerzo de cedencia	524Mpa	386MPa	917MPa
modulo de young	72.4 Gpa	69 Gpa	205 Gpa
relación de poisson	0.33	0.33	0.29
Resistencia a la fatiga	138MPa	96.5 MPa	325 MPa
Maquinabilidad	70%	50%	70%
Resistencia a la corrosión	pobre	bueno	bueno

Tabla: 1.3: Tabla de parámetros calificados

En la tabla anterior se muestran los diversos valores de los materiales que tomamos como referencia para hacer el estudio anteriormente nombrado

Nosotros proponemos como materiales de estudio el Acero 4027

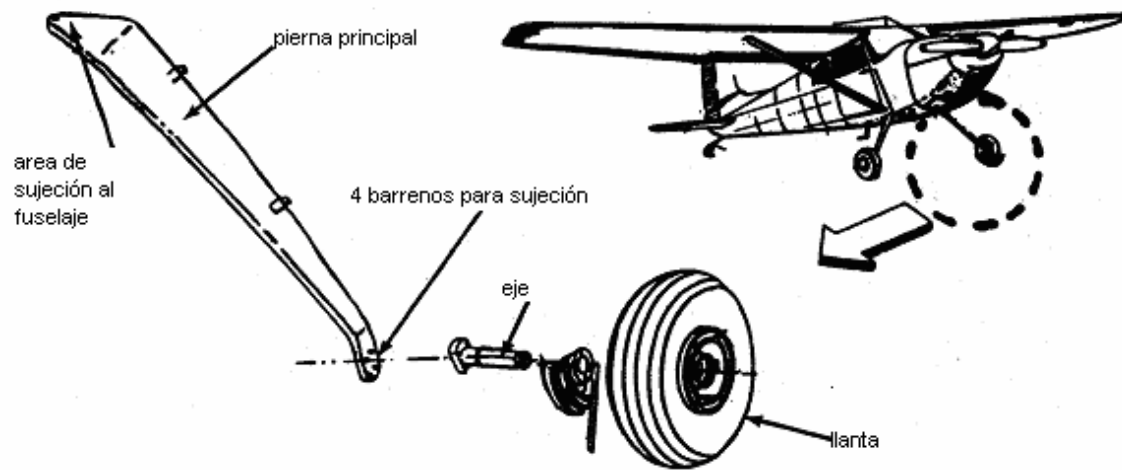


Fig. 1.17: Nomenclatura del tren de patín de cola Ref.(4)

## **Capítulo II**

### **Diseño**

## 2. 1 Características y especificaciones

El tren de aterrizaje que vamos a modelar debe tener lo siguiente:

### 1. Tren fijo:

Se propone un tren fijo por las siguientes restricciones con las que cuenta una aeronave como de la que se esta hablando:

- Bajo Peso

Por el uso de materiales compuestos en el fuselaje entendemos que la aeronave tendrá un peso reducido en comparación con las demás aeronaves del mercado.

- Economizar el mayor espacio del cual se dispone

Debido a que el espacio que tendrá la aeronave suponemos que se destinará en su mayor parte al uso de los pasajeros y la carga útil, debido a esto el uso de un tren de aterrizaje retráctil aumentaría bastante el peso.

- Baja velocidad operativa

La resistencia inducida provocada por la configuración del tren de aterrizaje es mínima en aeronaves que operen en el rango de velocidades bajas.

### 2. Piernas principales del tren:

Son los elementos que soportan la mayor parte de la estructura del avión.

### 3. Sin amortiguador de fluido:

Como la estructura del tren de aterrizaje será el elemento deformable que resista las cargas operativas no hay necesidad de un amortiguador.

### 4. De materiales Ligeros

Para que pueda ser lo más ligero posible, además de resistente

5. Levantamiento dimensional del tren de aterrizaje de la aeronave Chac como referencia inmediata de una aeronave con proporciones similares a las que suponemos que tendrá la de la propuesta que estamos complementando.

6. Perfil lateral definido por el diseñador

Con base a los tipos de perfiles estructurales que más resistan las cargas a las cuales será sometido el modelo, inspirándonos en la información descrita en el capítulo I.

Por todo lo descrito anteriormente nosotros proponemos un tren de aterrizaje fijo, con amortiguación de Tipo “SANDOW” o “SPRING”, en la cual los elementos deformables serán las piernas principales del tren, en la fig. 2.1 se muestra la sección transversal de las piernas del tren principal que será empleada en el modelado.

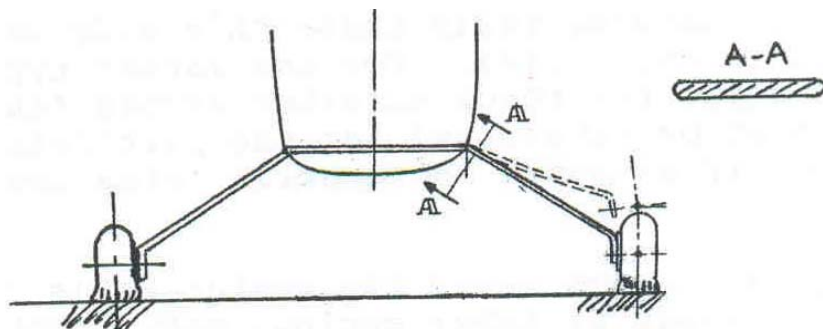


Fig. 2.1: Sección transversal del tren Ref.(1)

## 2.2 Justificación del perfil lateral del tren de aterrizaje

Dentro del ámbito de la ingeniería, se conoce con el nombre de estructura a toda construcción destinada a soportar su propio peso y la presencia de acciones externas (fuerzas, momentos, cargas térmicas, etc.) sin perder las condiciones de funcionalidad para las que fue concebida. La ingeniería estructural es la rama de la ingeniería que abarca el proyecto de estructuras y el cálculo de su equilibrio y resistencia. Los materiales tienen intrínseca una

resistencia debida a su composición química, y a lo largo de los años, la experiencia y en la actualidad, la ciencia, nos han ayudado a definir la forma y la disposición de los materiales para poder aumentar su resistencia inherente de acuerdo con nuestras necesidades.

Una de las formas más resistentes, dentro de las estructuras es el arco, basándonos en la resistencia natural de esta geometría, que a su vez es bastante estética, proponemos que sea utilizada en el diseño del tren de aterrizaje.

## 2.3 Modelado Paramétrico

Se utiliza un modelado paramétrico para poder aprovechar las ventajas que ofrece este tipo de herramientas pues es mucho más efectivo en términos de tiempo y proceso el diseñar y modelar elementos mecánicos que se puedan ajustar a las necesidades que se proponen y así poder obtener de manera más rápida y confiable un prototipo virtual que sea la base para un prototipo funcional o inclusive la misma pieza terminada

## 2.4 Modelado de un prototipo

El modelo de la pierna del tren de aterrizaje se mostrará desglosado en cada una de sus etapas a lo largo del Anexo 1: Modelado de un prototipo, como se mencionó anteriormente, todo el modelado se realizó en el “software” de ingeniería concurrente NX3. En las fig. 2.2 y 2.3 se muestran los modelos generados en dicho programa de ingeniería.

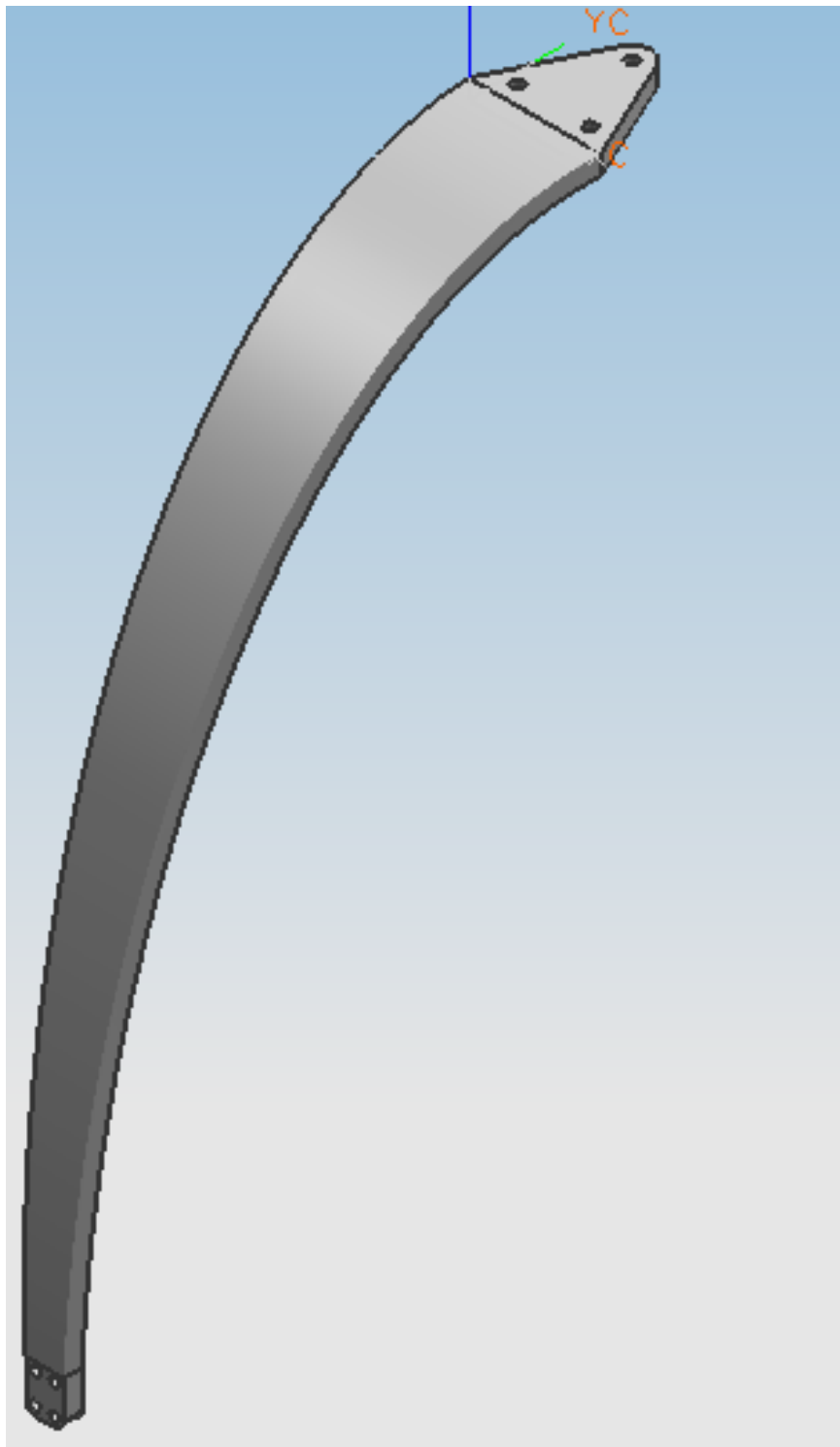


Fig. 2.2: Modelo del tren de perfil rectangular Ref. (10)



Fig. 2.3: Modelo del tren de perfil de herradura. Ref. (10)



## **Capítulo III**

### **Análisis de esfuerzos usando ANSYS Workbench V10**

### 3.1 Elemento finito

El método de los elementos finitos es un método numérico muy general para la resolución de ecuaciones diferenciales, muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. El método se basa en dividir el cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) en una serie de subdominios no intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «malla». Los cálculos se realizan sobre una malla o discretización creada a partir del dominio con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con éstas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos. Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de difusión del calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones o campos electromagnéticos. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de éstos problemas, con frecuencia en la práctica los métodos numéricos y, en

particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

### ANSYS Workbench

Una vez que la geometría aparece en la pantalla de Workbench seleccionamos el tipo de análisis que queremos hacer, el tipo de material que estamos analizando y el número de pasos del análisis, con estos parámetros podemos iniciar nuestro análisis presionando el botón “Run”.

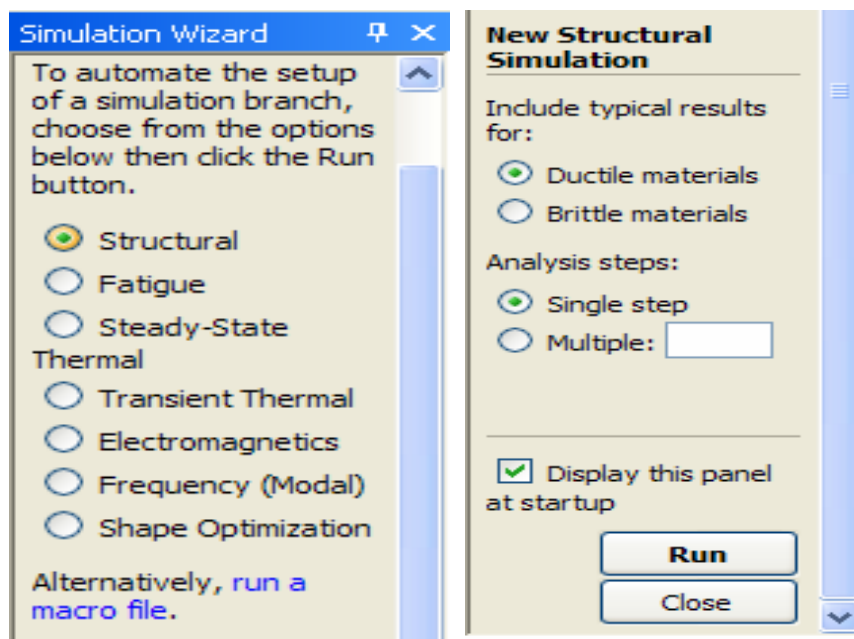


Fig. 3.1: Tipo de simulación Ref. (9)

El tipo de elemento finito que utilizamos es determinado por el programa, en este caso, solo podemos definir el tamaño del elemento, esto es posible seleccionando en el área del “Outline” la palabra “Mesh”, enseguida damos clic en “Global control” y cambiamos a “Advanced”, en esta zona tenemos la posibilidad de manipular algunos parámetros que son de utilidad, una vez que éstos parámetros son definidos a nuestra conveniencia de nuevo seleccionando la palabra “Mesh” y con el botón derecho elegimos “Preview mesh” este proceso puede tardar desde unos minutos hasta unas cuantas horas según las características que elijamos.

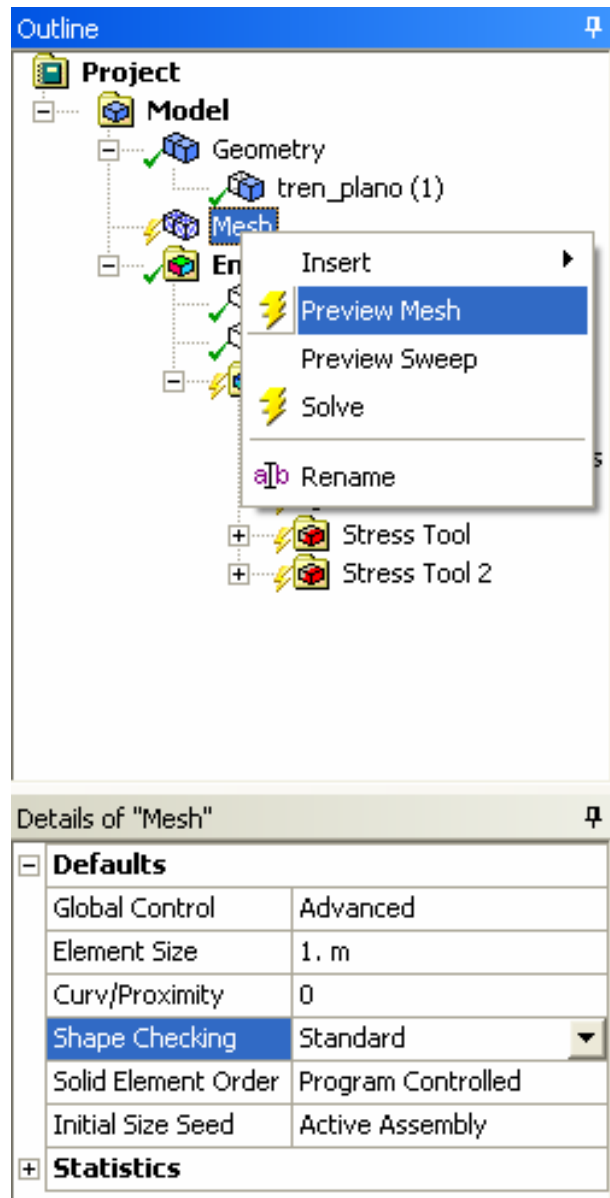


Fig. 3.2: Barra "Outline" Ref. (9)

## 3.2 Propiedades del material

En la aviación existen diversos materiales utilizados de acuerdo con sus características, en este caso, hay materiales específicamente para usar en la construcción del tren de aterrizaje, de tipo ferroso, con el 92 % en peso de Fe, o no ferroso, con un 78.2 % en peso de Cu, titanio con un 86.8 % de peso, estos materiales tienen propiedades diferentes y de todos ellos seleccionamos uno que cumpla con las necesidades del proyecto, en esta ocasión el material a utilizar es un acero AISI de la serie 4000 cuyas propiedades son mostradas en la tabla 3.1 y 3.2.

## Acero AISI 4027

Subcategoría: Acero AISI serie 4000, Metal ferroso, Acero de baja aleación, Acero de bajo carbono.

Componentes del material:

Componente	Peso (%)
<b>C (Carbono)</b>	<b>0.25 - 0.3</b>
<b>Fe (Fierro)</b>	<b>97.08 - 97.8</b>
<b>Mn (Manganeso)</b>	<b>0.7 - 0.9</b>
<b>Mo (Molibdeno)</b>	<b>0.2 - 0.3</b>
<b>P (Fosforo)</b>	<b>Max 0.035</b>
<b>S (Azufre)</b>	<b>Max 0.04</b>
<b>Si (Silicio)</b>	<b>0.15 - 0.35</b>

Tabla. 3.1: Componentes del acero AISI 4027 <sup>Ref.(4)</sup>

Propiedades Físicas y mecánicas:

Propiedades Físicas	Métrico	Ingles	Comentarios
Densidad	7.85 g/cc	0.284 lb/in <sup>3</sup>	
<b>Propiedades mecánicas</b>			
Dureza Brinell	311	311	
Dureza Knoop	338	338	Convertido desde Dureza Brinell
Dureza Rockwell B	99	99	Convertido desde Dureza Brinell
Dureza Rockwell C	34	34	Convertido desde Dureza Brinell
Dureza Vickers	329	329	Convertido desde Dureza Brinell
Esfuerzo último a la tensión	1035 MPa	150000 psi	
Esfuerzo de cedencia	917 MPa	133000 psi	
Elongación a la fractura	16 %	16 %	50 mm
Reducción de Área	57.8 %	57.8 %	
Módulo de Elasticidad	205 GPa	29700 ksi	Típica para el acero
Relación de Poisson	0.29	0.29	Calculado
Maquinabilidad	70 %	70 %	Recocido y rolado en frío. De acuerdo con la manufacturabilidad 100% para el acero AISI 1212.
Módulo de Corte	80 GPa	11600 ksi	

Tabla. 3.2: Propiedades mecánicas del acero AISI 4027 <sup>Ref.(4)</sup>

Ahora en la zona de “Required steps” seleccionamos “Verify material” y del lado derecho de la pantalla seleccionamos “New material”, en la nueva pantalla asignamos las propiedades al material tales como Módulo de elasticidad, Relación de Poisson, Densidad, etc., una vez definidas las características del material, en las pestañas de arriba seleccionamos “Simulation”. La fig. 3.3 muestra los parámetros asignados al material.

New Material		
Structural		Add/Remove Properties
<input type="checkbox"/> Young's Modulus	2.05e+011 Pa	
<input type="checkbox"/> Poisson's Ratio	0.29	
<input type="checkbox"/> Density	7850. kg/m³	
<input type="checkbox"/> Tensile Yield Strength	9.17e+008 Pa	
<input type="checkbox"/> Tensile Ultimate Strength	1.035e+009 Pa	

Fig. 3.3: Propiedades del nuevo material Ref.(9)

### 3.3 Restricciones y cargas

El análisis está hecho bajo cargas presentadas en una de las condiciones más crítica de aterrizaje, esto es, con el peso máximo de despegue y en una sóla pierna del tren de aterrizaje y de acuerdo con lo especificado en el FAR 25 para aeronaves de transporte, en lo que corresponde a tren de aterrizaje y cargas, plantea que existen cargas que deben ser consideradas, una dispuesta verticalmente debida al peso de la aeronave al hacer contacto con el suelo, otra en dirección opuesta al movimiento de la aeronave debida a la fricción de los neumáticos con el suelo, en la tabla 3.3 se muestran estos factores.

Factores de carga sugeridos para un tren de aterrizaje		
Certificación base	Factor de carga (Ng)	Tipo de aeronave
FAR 23	de 3.0	Utilitarias y acrobaticas
FAR 25	de 1.5 a 2.0	Transporte de pasajeros
Combate y entrenadores	de 3.0 a 8.0	Caza y entrenadores
Militar	de 1.5 a 2.0	Militares

Tabla. 3.3 Factores de Carga sugeridos Ref.(1)

Cargas en el aterrizaje:

Carga vertical: Máxima reacción del suelo  $C_v = 2$  veces Peso máximo de despegue multiplicado por la gravedad, esto debido al factor de seguridad sugerido por el FAR 25 para aeronaves de transporte de pasajeros.

Carga en dirección opuesta al movimiento  $C_o = 0.8$  multiplicado por  $C_v$ , debido a la fricción de los neumáticos con el suelo, sugerido por el FAR 25 para aeronaves de transportes de pasajeros.

Las cargas que actúan en una de las condiciones especificadas por el FAR 25 se toman en cuenta los siguientes parámetros:

El peso máximo de despegue de la aeronave,  $P_{\text{máx}} = 1800 \text{ Kg.}$

La carga vertical ( $C_v$ ) dispuesta de forma perpendicular al suelo y con dirección positiva hacia arriba, es decir en dirección del eje (+) Z, y se calcula multiplicando dos veces el  $P_{\text{máx}}$  por la aceleración de la gravedad:

$$C_v = (2) (1800 \text{ Kg.}) (9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$C_v = 35316 \text{ N.}$$

La carga opuesta al movimiento ( $C_o$ ) esta dispuesta de forma paralela al suelo y con sentido positivo en dirección opuesta al movimiento de la aeronave, es decir en dirección del eje (+) Y, y se calcula multiplicando 0.8 por  $C_v$ :

$$C_o = (0.8) (35316 \text{ N.})$$

$$C_o = 28253 \text{ N.}$$

Haciendo uso de lo anterior procedemos a ingresar los valores obtenidos de la siguiente manera:

En la barra de “Required steps” seleccionamos la opción “insert loads” y en “Structural” seleccionamos “Insert support”, después seleccionamos la geometría en la parte de donde esta fija, ésto es, donde está empotrada, y damos clic en “Apply”. La fig. 3.4 muestra los soportes fijos (empotres).

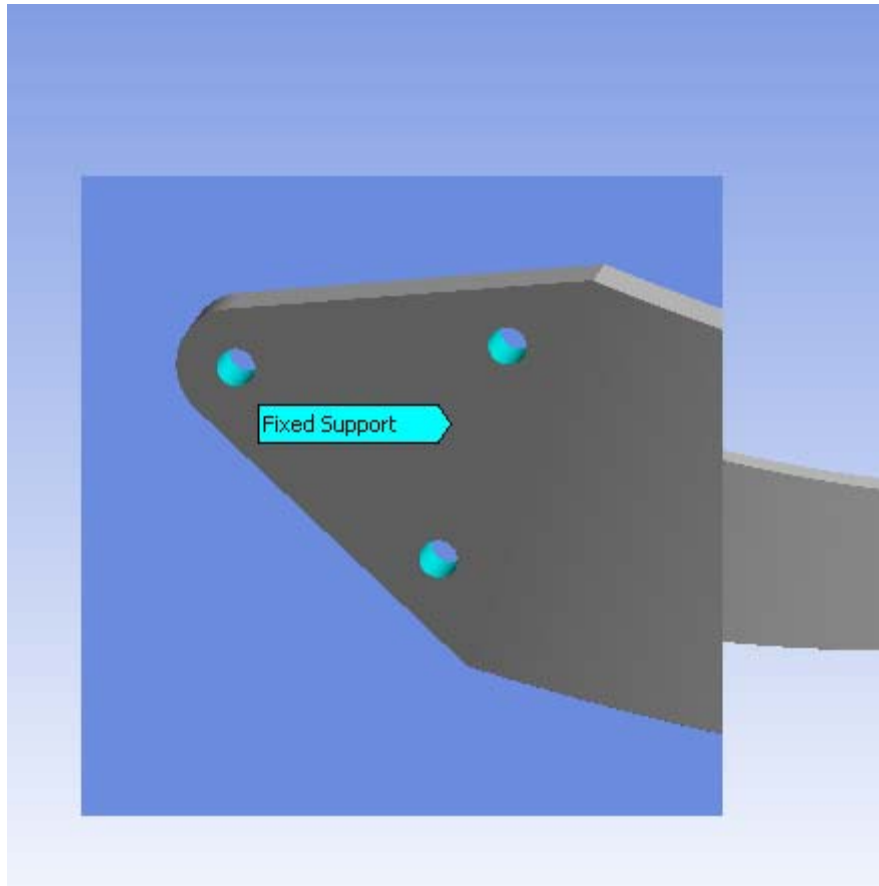


Fig. 3.4: Soportes fijos (empotres) tren plano Ref.(9)

En la misma lista de opciones esta “Insert load”, hacemos el mismo procedimiento para determinar la posición de las cargas. En la fig. 3.5 se muestra la carga aplicada debida al peso.

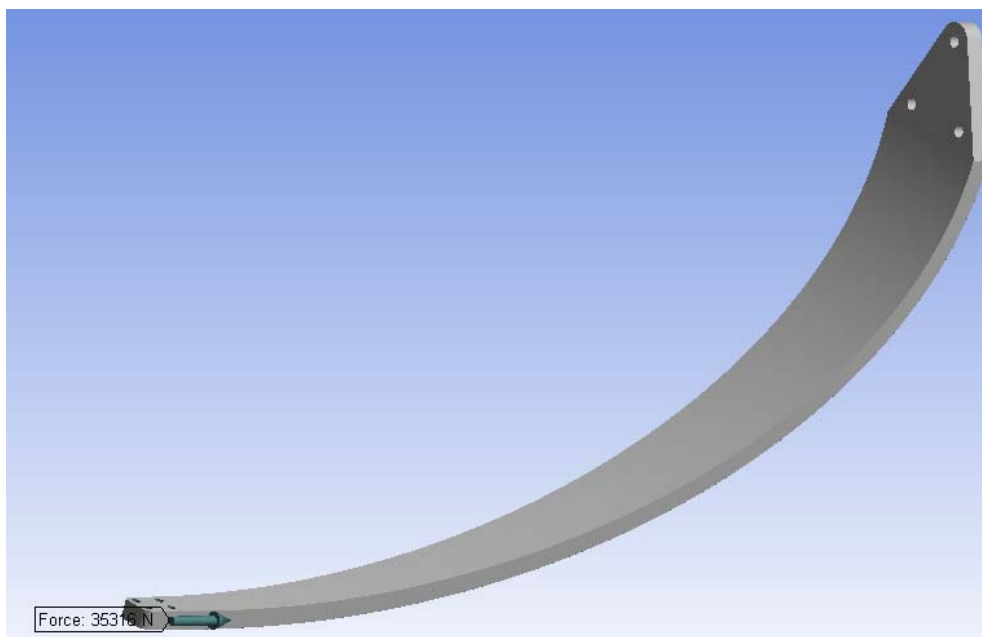


Fig. 3.5: Carga debida al peso de la aeronave en dirección del eje + Z Ref.(9)



### 3.4 Mallado

La malla como se menciono anteriormente, es la discretización del continuo que se esta analizando, una malla para un mismo problema puede ser de diferentes maneras y formas, esto depende de el grado de exactitud que queramos manejar, es decir, para una exactitud baja tendremos que generar una malla grande y para una exactitud grande tendremos que generar una malla pequeña, esto implica hacer más grande o pequeño el elemento finito, otra característica es el orden de los elementos, ésto quiere decir que podemos definir el orden de los elementos finitos según nuestra conveniencia para tener un mejor control de los puntos que queremos analizar en particular, en este caso, estamos trabajando un sistema de coordenadas de tres dimensiones y por tanto el tipo de elemento finito que debemos usar debe ser tridimensional, todos estos factores son los que definen las características de la malla según sea necesario, cuando damos todas estas características a la malla puede aumentar o disminuir el numero de nodos que la conforman y por ende aumentan el numero de ecuaciones que se tienen que resolver, en la actualidad las herramientas computacionales han facilitado el trabajo de manera significativa y el tiempo se ha reducido en unos cuantos minutos con las herramientas indicadas. La fig. 3.6 ejemplifica el tamaño de la malla seleccionado.

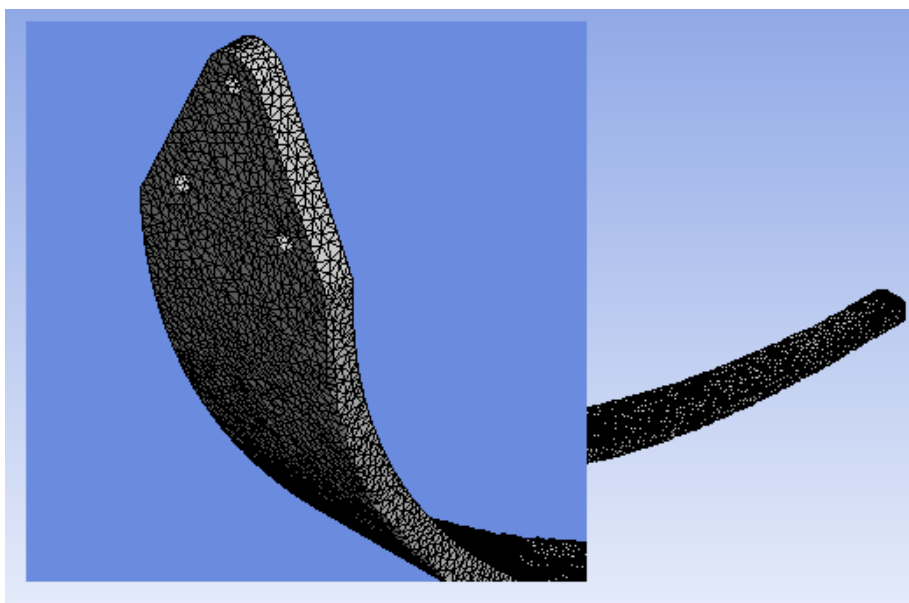


Fig. 3.6: Malla y tamaño del elemento finito Ref.(9)

### 3.5 Solución

Una vez que se han definido todas las características del problema debemos verificar en la barra “Required steps” que todas las opciones que hemos utilizado estén en círculo verde, si es así, seleccionamos la opción “Solve” para generar la solución del problema, este proceso puede tardar desde unos pocos minutos hasta unas cuantas horas incluso días dependiendo de las características de la malla.

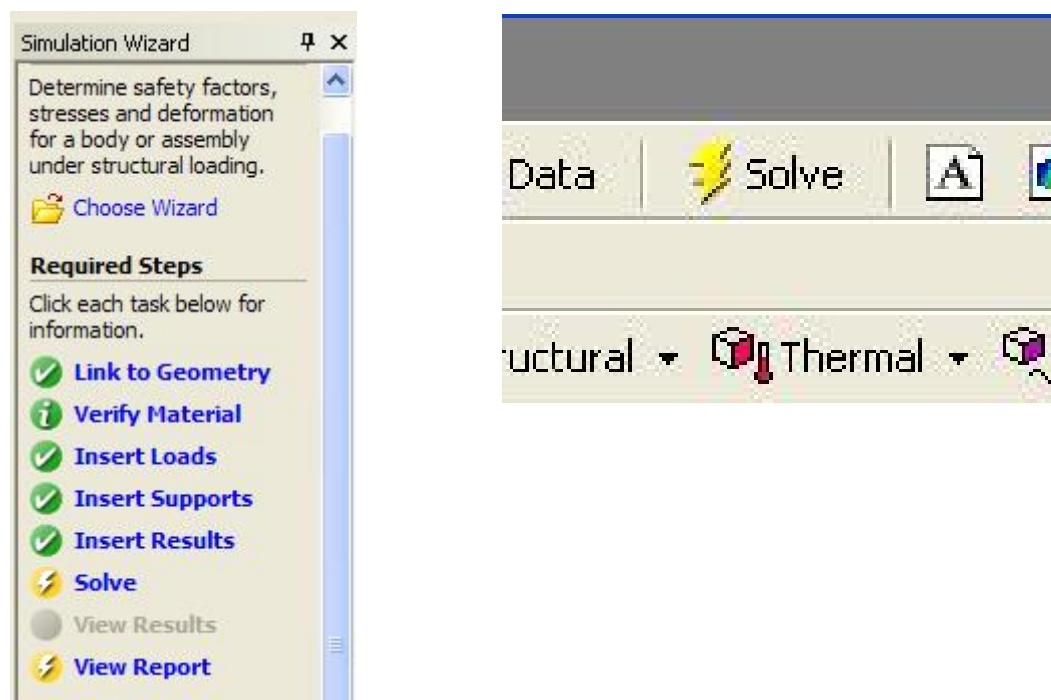


Fig. 3.7: Barra “Required steps” (solución) Ref. (9)

## **Capítulo IV**

### **Análisis de resultados**

## 4.1 Visualización de esfuerzos

Ya generada la solución dentro del “Outline” se despliegan los resultados, para ver alguno de ellos, sólo tenemos que seleccionarlo y automáticamente se despliega en la pantalla. La fig. 4.1 muestra la lista de resultados obtenidos en el análisis.

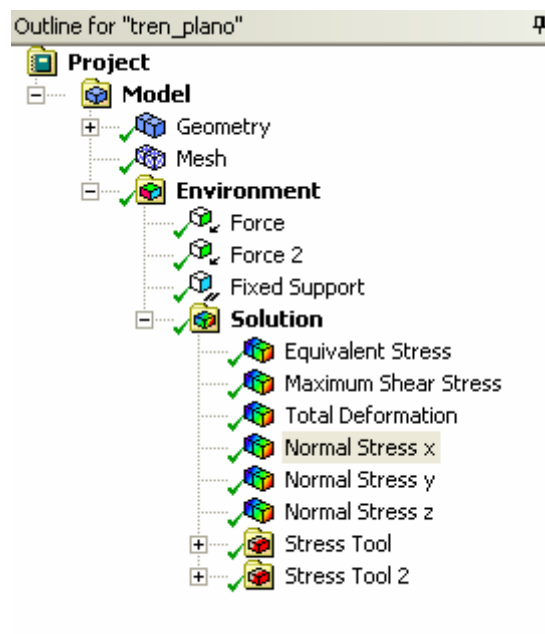


Fig. 4.1: Listado de resultados Ref.(9)

Este procedimiento se repite para cada tipo de solución, en este caso la solución que nos interesa es la del esfuerzo normal en sus tres ejes, éstas soluciones se pueden visualizar dentro del “Outline” haciendo clic en esfuerzo normal. En las figuras de la 4.2 a la 4.7 se muestra la distribución del esfuerzo normal en cada uno de los ejes coordenados.

Tren plano:

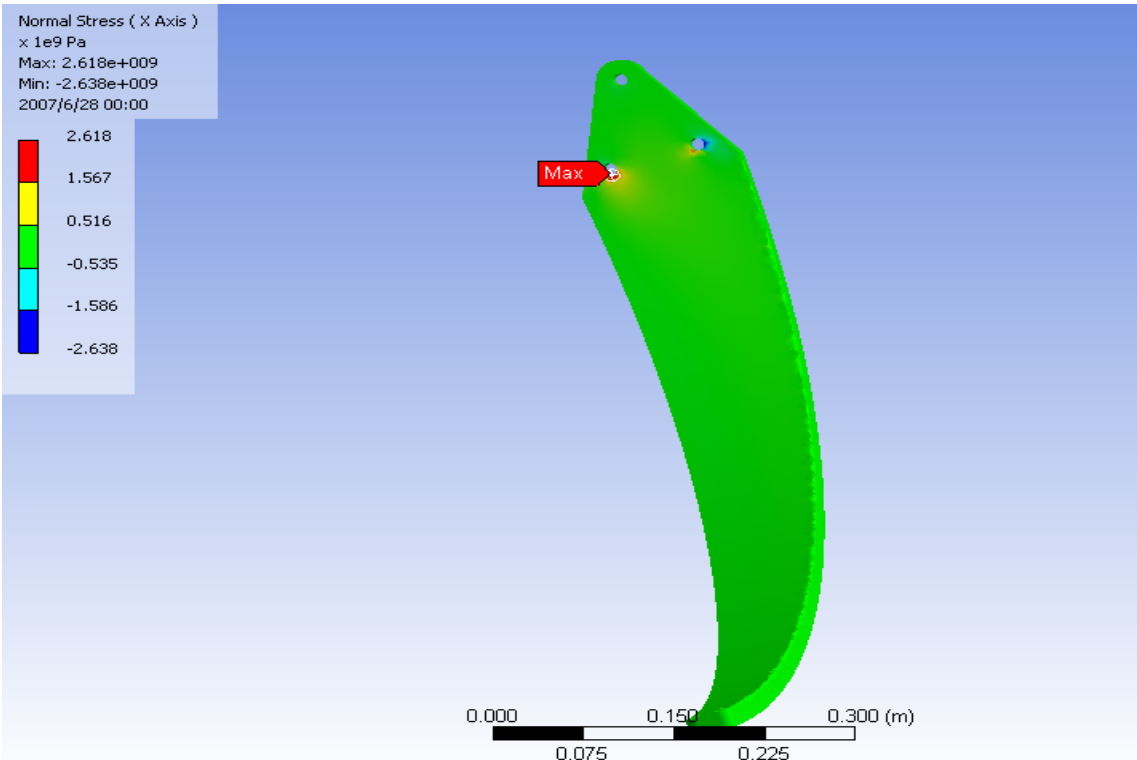


Fig. 4.2: Visualización del esfuerzo normal en el eje x tren plano Ref.(9)

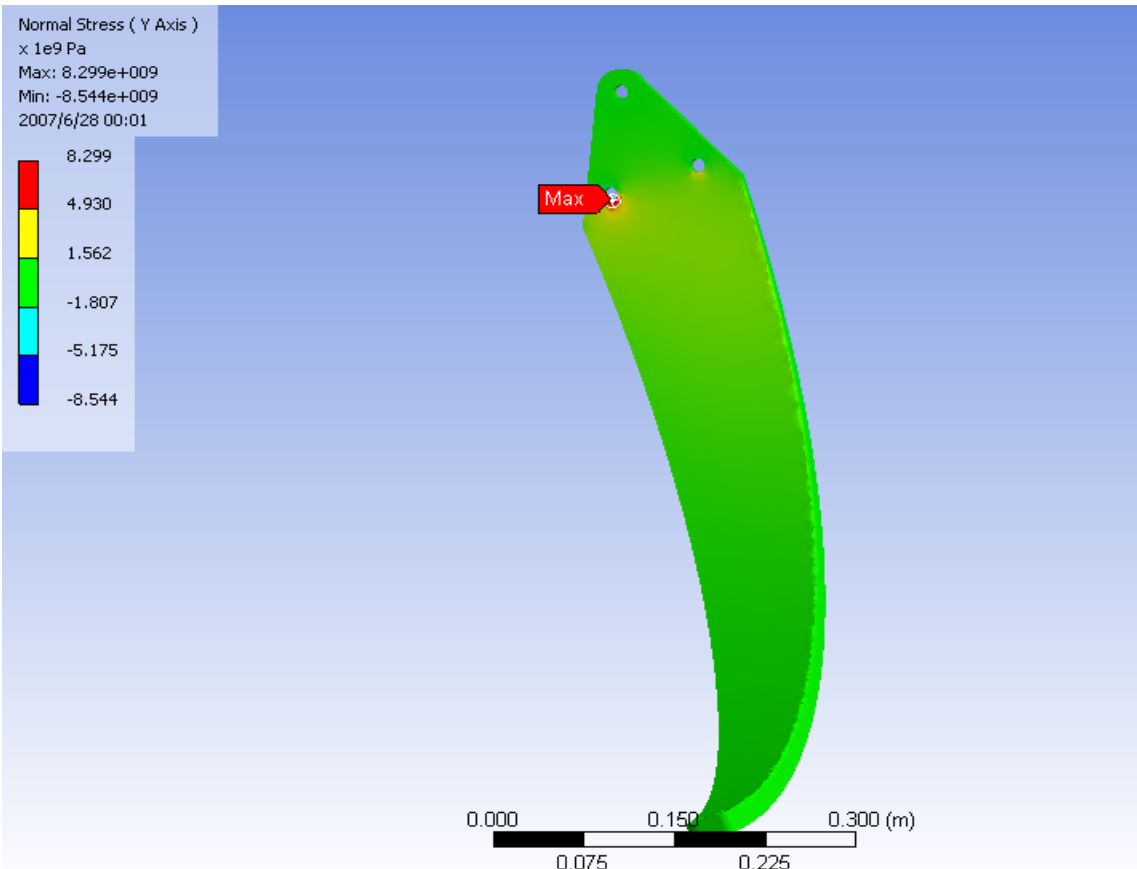


Fig. 4.3: Visualización del esfuerzo normal en el eje y tren plano Ref.(9)

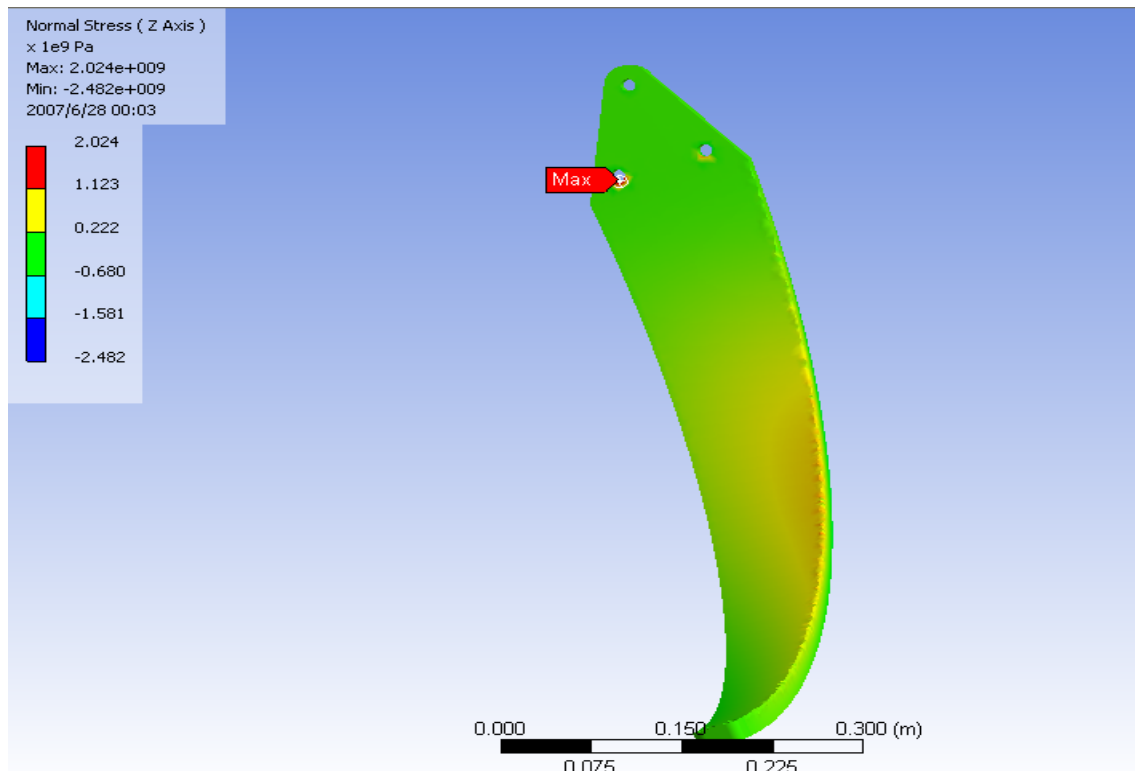


Fig. 4.4: Visualización del esfuerzo normal en el eje z tren plano Ref.(9)

Tren de herradura:

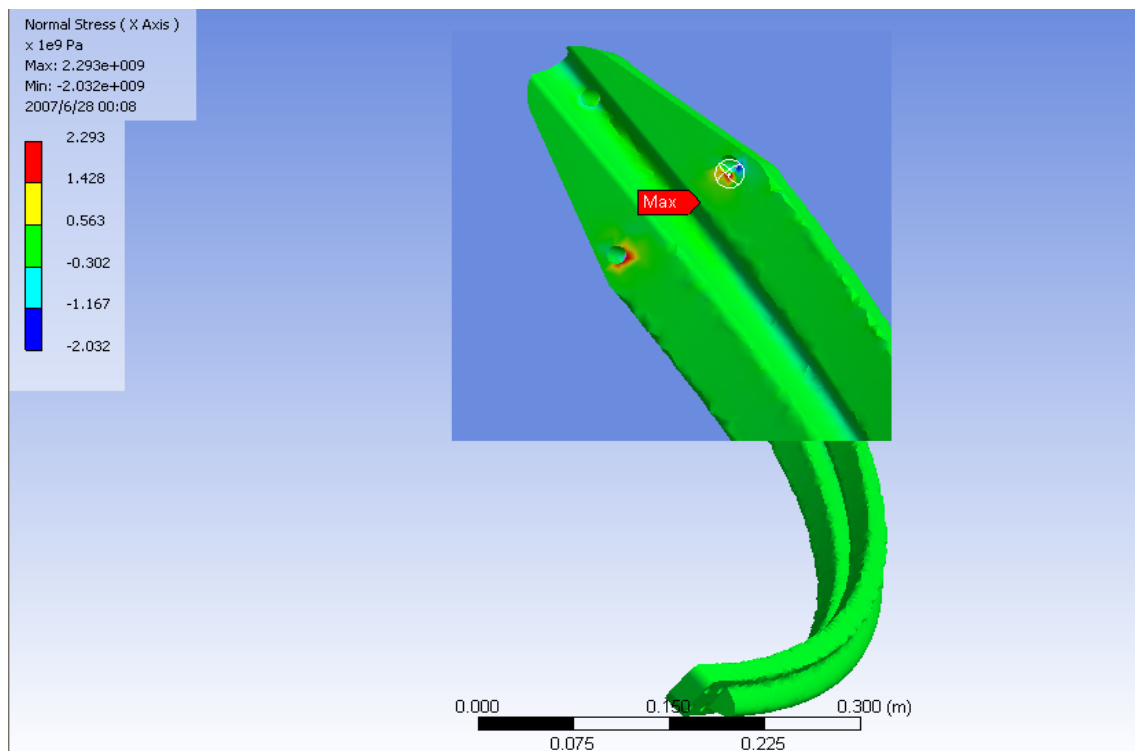


Fig. 4.5: Visualización del esfuerzo normal en el eje x tren de herradura Ref.(9)

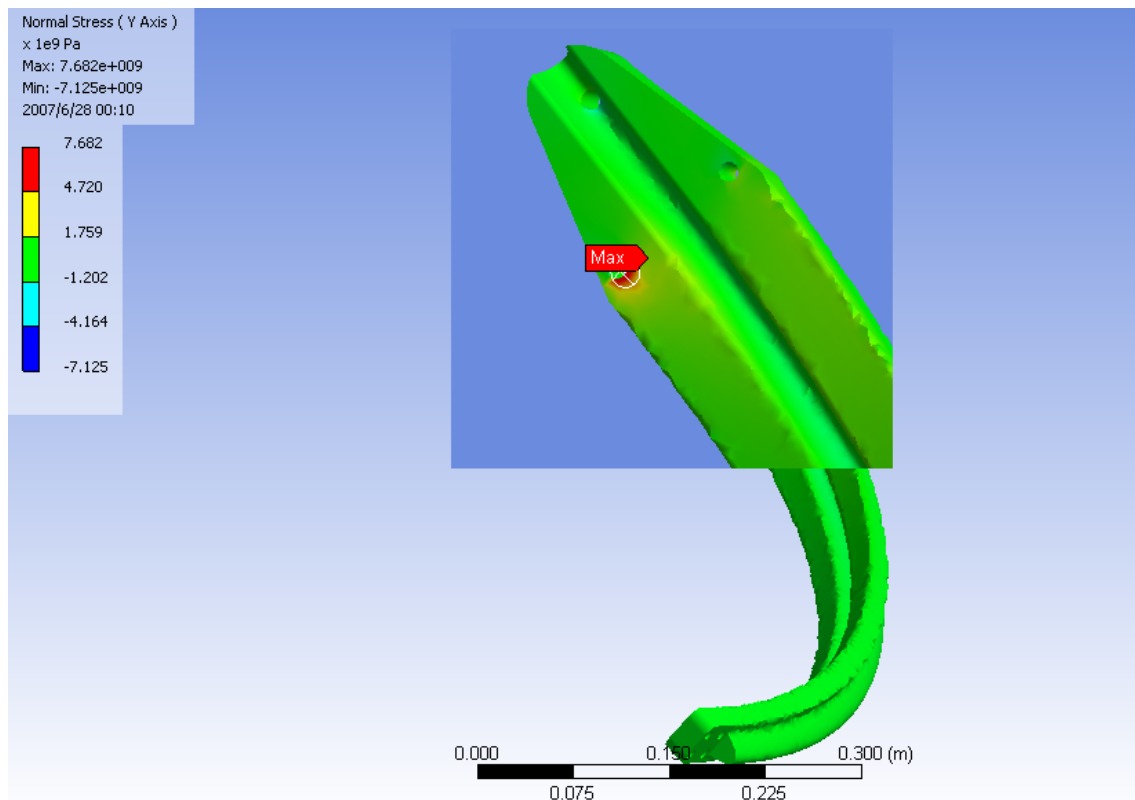


Fig. 4.6: Visualización del esfuerzo normal en el eje y tren de herradura Ref.(9)

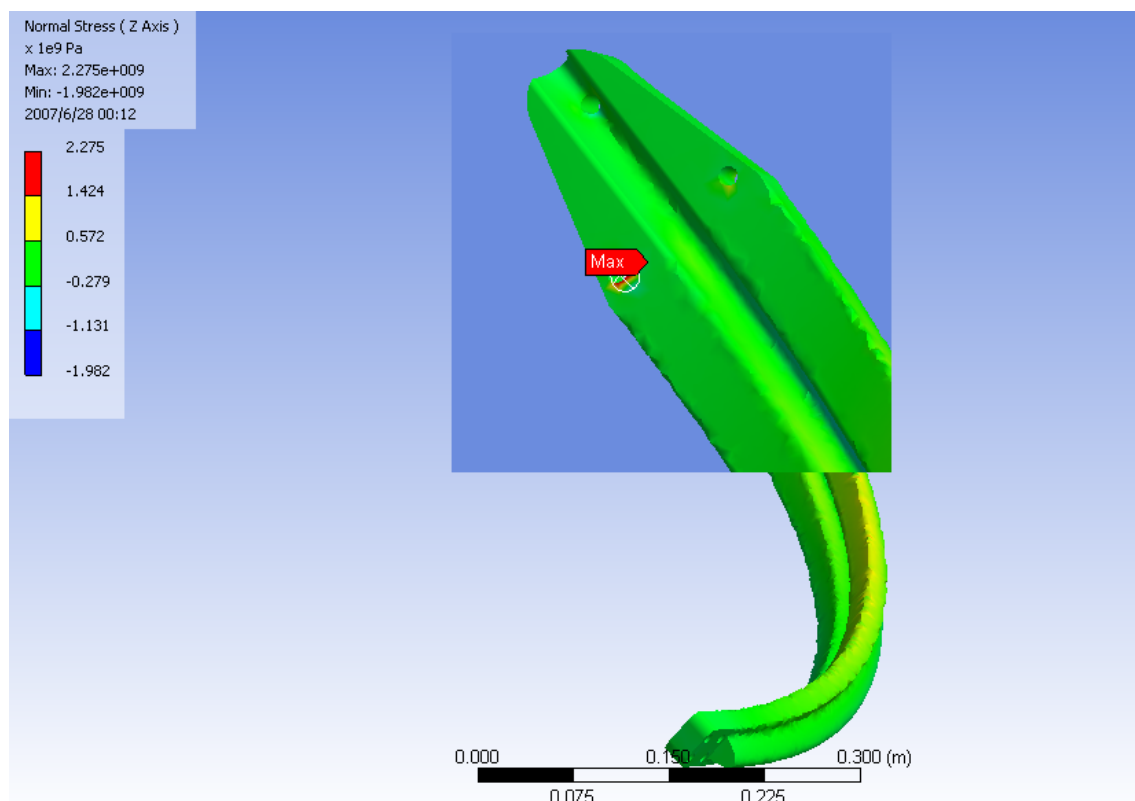


Fig. 4.7: Visualización del esfuerzo normal en el eje z tren de herradura Ref.(9)

## 4.2 Determinación de la dirección del esfuerzo normal resultante

Como vimos en las imágenes anteriores, los esfuerzos están dispuestos de forma diferente para cada eje en el espacio, y sólo son de nuestro interés los esfuerzos máximos en cada eje coordenado. Las tabla 4.4 muestran los valores máximos del esfuerzo normal en cada eje coordenado para cada modelo.

TREN PLANO		TREN DE HERRADURA
Material: Acero AISI 4027		
eje / $\sigma$	Esfuerzo normal máximo (Pa)	Esfuerzo normal máximo (Pa)
X	2.62E+09	2.29E+09
Y	8.30E+09	7.68E+09
Z	2.02E+09	2.28E+09

Tabla. 4.4: Componentes del esfuerzo normal máximo para cada modelo Ref.(9)

Para poder determinar la dirección del esfuerzo, tomamos el esfuerzo máximo en cada eje y utilizando el teorema de Pitágoras calculamos la magnitud del esfuerzo resultante sumando los cuadrados de cada una de las componentes y sacando la raíz cuadrada de la suma.

Resultante del esfuerzo para el tren plano:

$$X = 2.618e^9$$

$$Y = 8.299e^9$$

$$Z = 2.024e^9$$

$$X = (2.618e^9)^2$$

$$Y = (8.299e^9)^2$$

$$Z = (2.024e^9)^2$$



$$R = \sqrt{(2.618e^9)^2 + (8.299e^9)^2 + (2.024e^9)^2}$$

$$R = 8934422253 \text{ Pa.}$$

Esta es la magnitud del vector resultante del esfuerzo normal, la cual será útil para determinar las direcciones de los vectores unitarios  $\hat{i}$ ,  $\hat{j}$ , y  $\kappa$ , esto se logra dividiendo la componente de cada eje entre la resultante y multiplicando el resultado por el vector unitario correspondiente.

$$\bar{U} = \frac{2.618e^9}{8934422253} \hat{i} + \frac{8.299e^9}{8934422253} \hat{j} + \frac{2.024e^9}{8934422253} \kappa$$

$$\bar{U} = 0.2930 \hat{i} + 0.9288 \hat{j} + 0.2265 \kappa$$

Este procedimiento se repite para el tren en herradura.

Resultante del esfuerzo para el tren de herradura:

$$X = 2.293e^9 \quad Y = 7.682e^9 \quad Z = 2.275e^9$$

$$X = (2.293e^9)^2 \quad Y = (7.682e^9)^2 \quad Z = (2.275e^9)^2$$

$$R = \sqrt{(2.293e^9)^2 + (7.682e^9)^2 + (2.275e^9)^2}$$

$$R = 8338944657 \text{ Pa.}$$

$$\bar{U} = \frac{2.293e^9}{8338944657} \hat{i} + \frac{7.682e^9}{8338944657} \hat{j} + \frac{2.275e^9}{8338944657} \kappa$$

$$\bar{U} = 0.2749 \hat{i} + 0.9212 \hat{j} + 0.2728 \kappa$$

La dirección obtenida para el esfuerzo máximo, está referenciada a un mismo origen coordenado para ambas geometrías y descrita en forma unitaria con respecto a cada eje coordenado, pudiendo identificar fácilmente de esta manera, la dirección en la que la resultante de las fuerzas tiene su mayor componente.

En este caso la mayor componente para ambas geometrías se ubica en el mismo eje y en la misma región de la pierna, aun que no siendo iguales debido a la forma de la geometría en cuestión. En la fig. 4.8 se muestra la posición de los ejes coordenados con respecto al modelo.

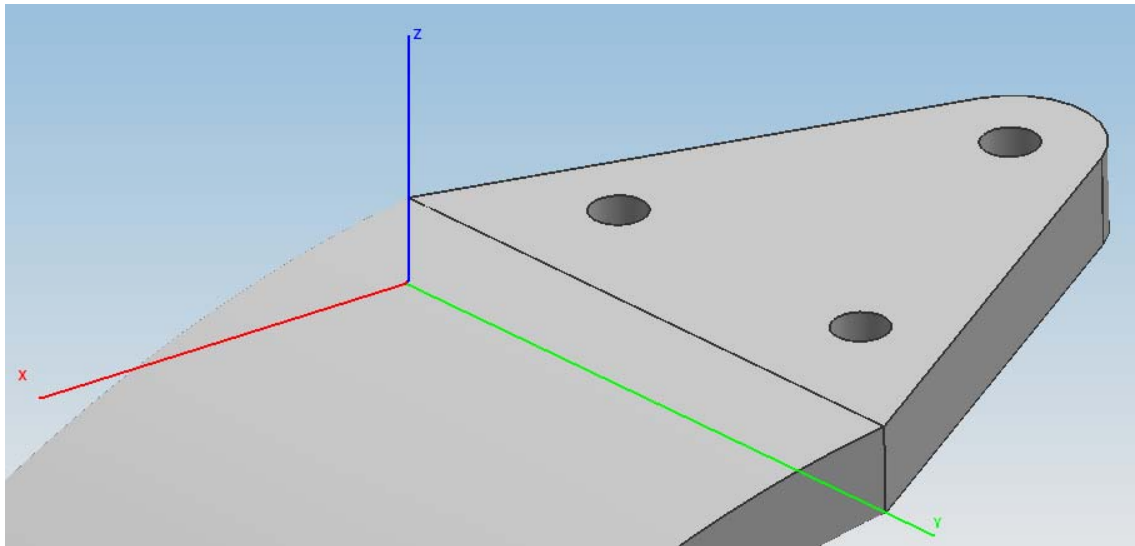


Fig. 4.8: Posición de los ejes coordenados respecto al modelo Ref. (10)

El vector unitario, nos permite localizar en el espacio la dirección de un vector, que depende de la relación que existe entre las componentes de dicho vector y la magnitud del mismo vector con respecto a los ejes coordenados. En la fig. 4.9 se muestra la disposición del vector unitario con respecto a los ejes coordenados.

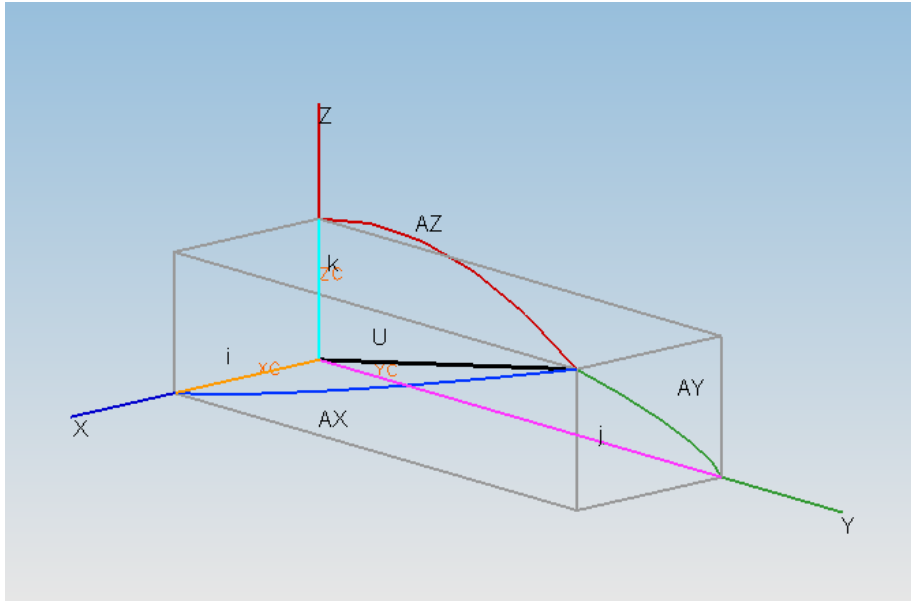


Fig. 4.9: Vector unitario Ref. (10)

La fig. 4.10 muestra la dirección del vector con respecto a los ejes coordenados y a su posición en la pierna del tren de aterrizaje.

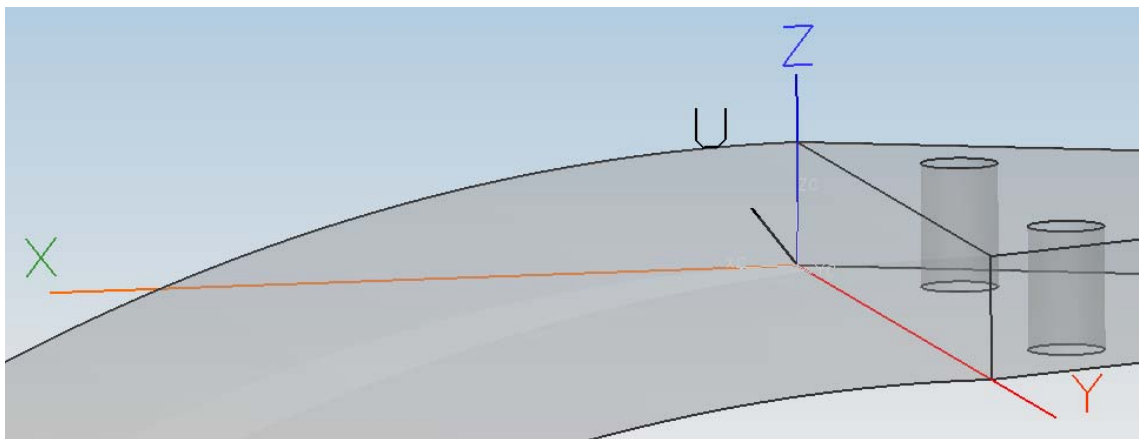


Fig. 4.10: Vector unitario respecto a su posición en la pierna Ref. (10)

Las tablas 4.5 y 4.6 muestran las propiedades de cada modelo analizado.

Propiedades de los modelos:

Modelo					
Nombre	Material	Masa (kg)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Nodos	Elementos
"tren_plano (1)"	AISI 4027	17.52	$2.23 \times 10^{-3}$	115094	74069

Tabla. 4.5: Propiedades Perfil Rectangular Ref.(9)

Modelo					
Nombre	Material	Masa (kg)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Nodos	Elementos
"tren_curvo (1)"	AISI 4027	14.19	$1.81 \times 10^{-3}$	100612	64825

Tabla. 4.6: Propiedades Perfil Herradura Ref.(9)

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede definir que el esfuerzo generado en las piernas del tren, bajo las mismos criterios de carga y en una sola condición crítica, especificada anteriormente, es menor en la pierna de herradura con respecto al otro modelo, en un 6.66 %, la masa contenida es 19 % menor, ésto es debido, en el caso del esfuerzo, a la geometría propuesta, y en el caso de la cantidad de masa, debido, a las dimensiones, esto se ve reflejado directamente en la relación de resistencia específica de manera benéfica, ya que dicha relación aumenta en un 13.5 % con respecto a la geometría del tren plano. En la tabla C9 se muestra la comparación de los parámetros medidos de un modelo respecto a otro.

Basándonos solamente en estos factores, la geometría más adecuada, para la condición de aterrizaje a las que fueron sometidas las geometrías propuestas es, en este caso, la de herradura.

Evaluando el tren plano y tomando en consideración otros factores que intervienen en el proceso de diseño, y además de la relativa facilidad de la manufacturación de esta geometría, es muy factible considerar la posibilidad de poder utilizar dicha geometría.

Modelo	Masa (Kg.)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Esfuerzo calculado (Pa)	resistencia/peso
Tren plano	17.52	2.23E-03	8934422253	5335390.7
Tren herradura	14.19	1.81E-03	8338944657	6587459.1

Tabla. 4.7: Comparación de Resultados

## **Conclusiones**

## Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en el capítulo anterior con respecto a la dirección del vector unitario en los modelos analizados, podemos concluir, que la dirección del esfuerzo descrita por el vector unitario, no es la misma para ambos modelos, debido a la magnitud del esfuerzo generado en cada uno de ellos, siendo así, cada una de las direcciones en las que se encuentra la resultante de las fuerzas que actúan en los modelos y por este motivo son las más adecuada para los modelos en cuestión. En la tabla C8 se muestra la comparación del vector unitario de los modelos analizados.

Modelo	Dirección del vector unitario
Tren plano	$0.2930 \hat{i} + 0.9288 \hat{j} + 0.2265 \kappa$
Tren de herradura	$0.2749 \hat{i} + 0.9212 \hat{j} + 0.2728 \kappa$

Tabla. C8: Vector unitario de los modelos

El eje longitudinal de los hilos de fibra debe ser paralelo a la dirección del vector de esfuerzo normal resultante en toda la sección transversal de la pieza, en caso de manufacturar las piernas en materiales compuestos (fibra en forma de hilos), de esa manera aseguramos que la fuerza resultante de las cargas a las que se sometió la pierna, se encuentra en el sentido del eje longitudinal de los hilos.

Manufacturar los modelos con la disposición de los hilos de fibra en la dirección obtenida, a lo largo de todo el modelo, es sumamente difícil y es necesaria la utilización de maquinaria y tecnología de última generación, así como procesos muy específicos que pudieran ser lentos y costosos, por éstas razones se hace la consideración de poder disponer las fibras en un solo plano, el cual esta definido por las componentes del esfuerzo de mayor magnitud.

En la tabla C9 se muestran los valores de esfuerzo correspondientes a los ejes coordenados para cada modelo haciendo resaltar las componentes del esfuerzo de mayor magnitud.

TREN PLANO		TREN DE HERRADURA
Material: Acero AISI 4027		
eje / $\sigma$	Esfuerzo normal	máximo (Pa)
X	2.62E+09	2.29E+09
Y	8.30E+09	7.68E+09
Z	2.02E+09	2.28E+09

Tabla. C9: Componentes de mayor magnitud

El plano definido por las componentes de mayor magnitud en ambos casos es el plano XY en el cual es posible orientar los hilos de forma más simple. En la figura C1 se muestra el plano en el que actúan las componentes de mayor magnitud para ambos modelos.

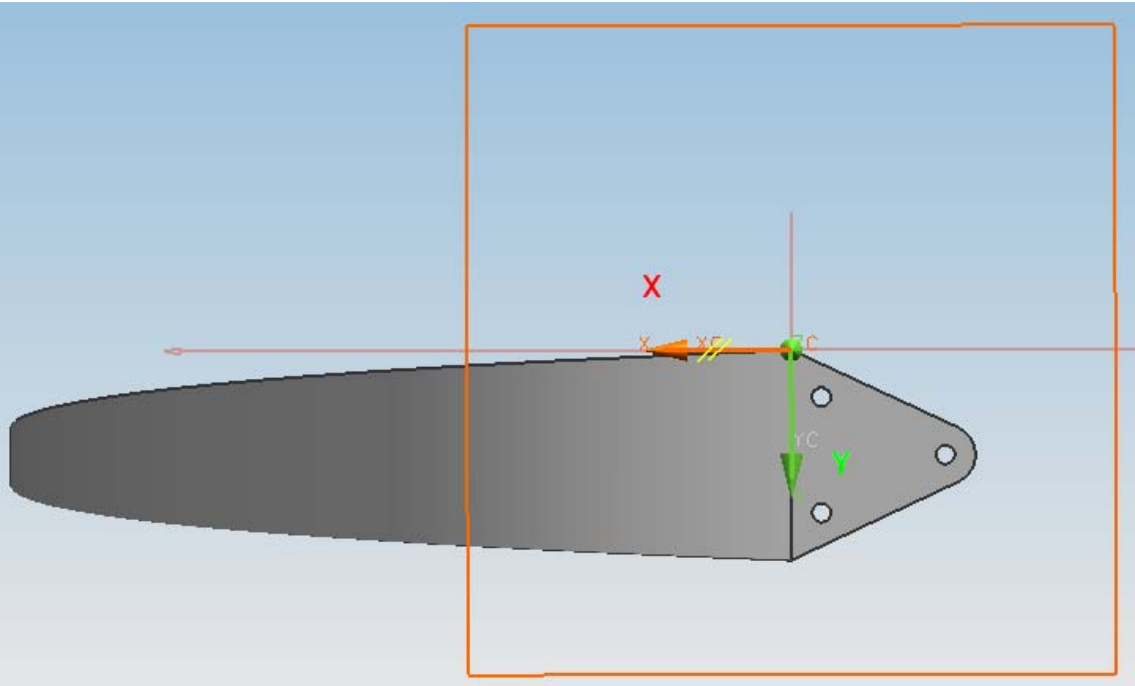


Fig. C1: Plano de las componentes de mayor magnitud

Tonando en cuenta solo las componentes en los ejes que conforman este plano, podemos disponer los hilos en dirección del vector que resulta de estas dos. En la fig. C2 se muestra el vector formado por las componentes de esfuerzo en el plano XY.

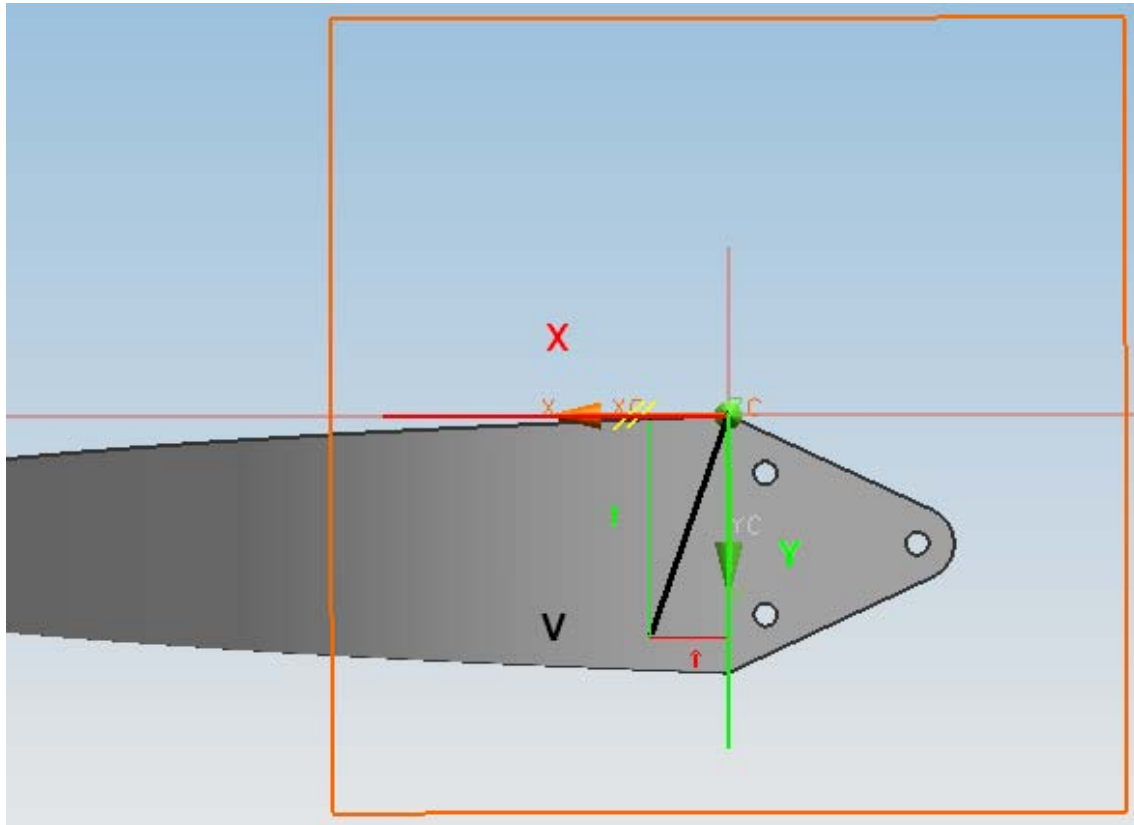


Fig. C2: Vector formado por las componentes de mayor magnitud

La forma de sujeción de la pierna del tren principal al fuselaje esta hecha por un juego de tres tornillos a través de barrenos, en los cuales se concentra el esfuerzo y por ésta razón es conveniente hacer una modificación en la forma de sujetar la pierna del tren al fuselaje, con la finalidad de disminuir los esfuerzos en dicha zona.

Haciendo un análisis exclusivamente hablando del material con el que fueron analizados los modelos propuestos con respecto a su capacidad de carga, se concluye que el material está limitado para soportar dichas condiciones y por esta razón no es el más adecuado para la manufacturación de dichos modelos.



## **Recomendaciones**

## Recomendaciones:

Se recomienda hacer la sujeción de las piernas del tren de aterrizaje al fuselaje por medio de una abrazadera, de forma que, la superficie de contacto sea mayor con respecto a la superficie de los barrenos y de esa forma ayudar a disminuir la concentración de esfuerzos en los barrenos y distribuirla en zonas con mayor superficie.

El material utilizado en el análisis de esfuerzos, se muestra con limitación respecto a la capacidad de soportar los esfuerzos generados en la condición especificada y es recomendable hacer uso de materiales más resistentes con respecto a este punto. En la siguiente lista se muestran algunos materiales que pueden ser tomados en cuenta para la elaboración de los modelos de las piernas del tren de aterrizaje, estos materiales permiten un margen de seguridad mas amplio con respecto al material con el que fue hecho el análisis estructural.

AISI 4140

AISI 4140H

AISI 4150

AISI 4150H

AISI 4320

Todos estos materiales están disponibles en Norte América y tienen compatibilidad con materiales de otras normas internacionales.

## Referencias

1. - Dr. Jan Roskam, Airplane Design Part IV, Layout of landing gear and systems, DAR Corporation, Estados Unidos de América, 2004.
2. - H. G. Conway, Landing Gear Design, Chapman, Londres, 1958.
3. - Manual Técnico de Productos, Carpenter, México D. F., 2000
4. - <http://www.matweb.com/search/SearchProperty.asp>
5. - [http://www.oni.escuelas.edu.ar/2003/BUENOS\\_AIRES/62/tecnolog/tren.htm](http://www.oni.escuelas.edu.ar/2003/BUENOS_AIRES/62/tecnolog/tren.htm)
6. - <http://www.airliners.net>
- 7.- <http://www.acerosfortuna.com.mx>
8. - [http://www.flightsimaviation.com/data/FARS/part\\_25.html](http://www.flightsimaviation.com/data/FARS/part_25.html)
- 9.- <http://www.metalesdiaz.com.mx/Templates/productos>
10. - Imágenes obtenidas del Software de Análisis por Elemento Finito “ANSYS WORKBENCH”, durante el proceso de análisis
11. - Imágenes obtenidas del Software de Ingeniería Concurrente “NX”, durante el proceso de Modelado

## **Anexos**

## **Anexo 1**

**Modelado de un prototipo virtual.**

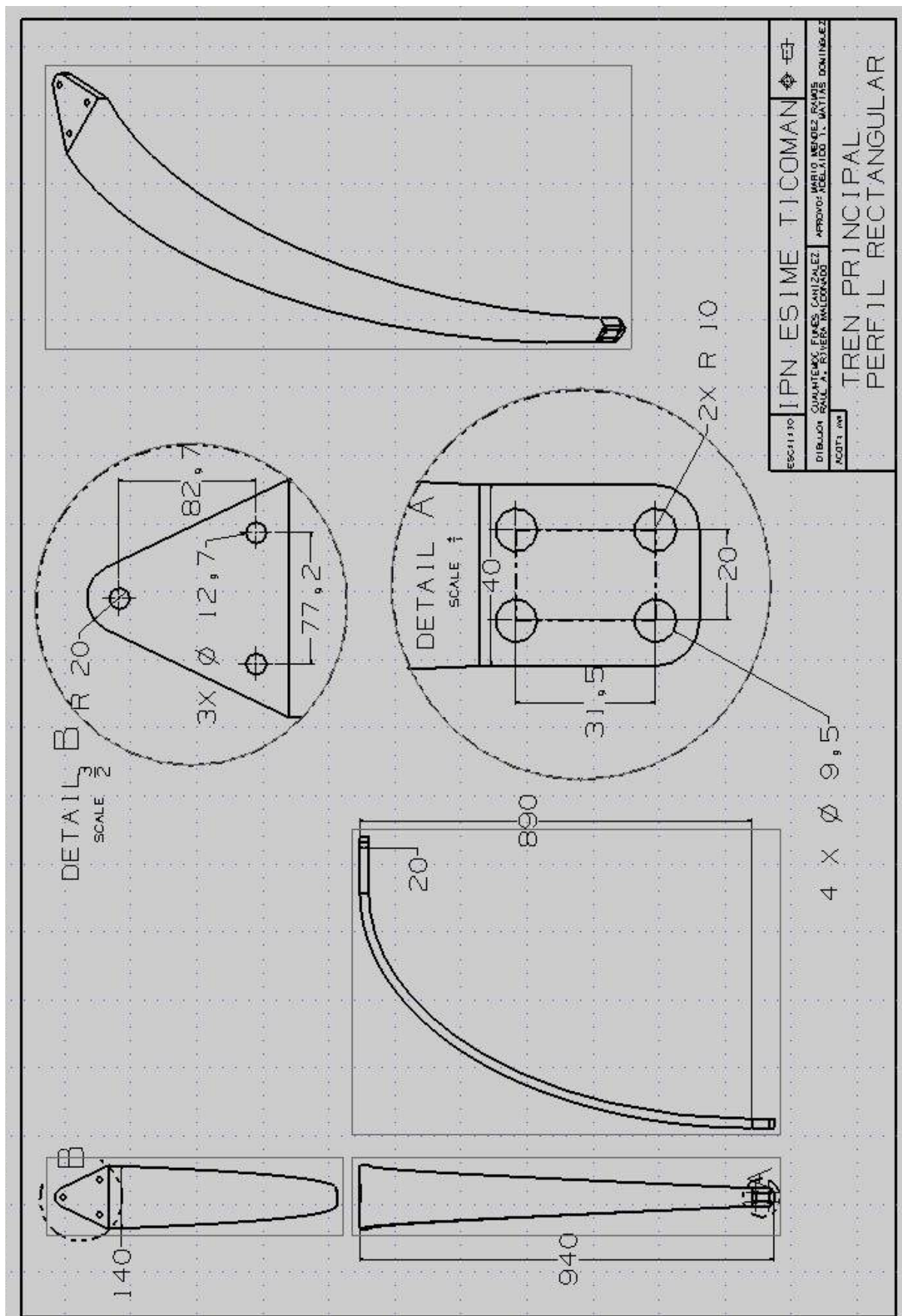


Figura A: Plano de Referencia para el Modelado de una pierna del tren de aterrizaje con perfil rectangular Hoja A4 acot: mm

En el modulo de “Modeling”, dentro de la barra de herramientas “Form feature” se encuentra el icono de “Sketch”, dentro del Sketch dibujaremos un rectángulo en el plano XZ con las siguientes dimensiones:

Largo: 140 mm.

Alto: 20 mm.

Posicionando el rectángulo con la arista inferior izquierda en el origen.

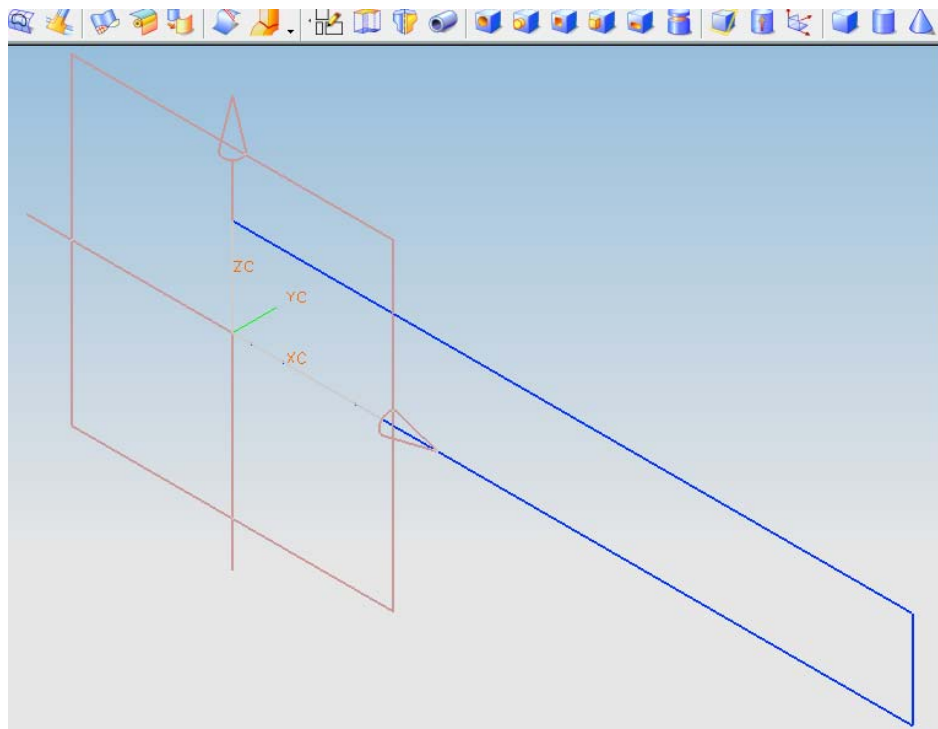


Fig. A1: Perfil Rectangular Principal

Asignamos una capa a cada una de las entidades generadas hasta el momento.

En la barra estándar se encuentra el menú “Format”, en él, se encuentra el submenú “Layer category”, dentro del cuadro, en el espacio de category asignamos un nombre a la capa y seleccionamos crear y ok.

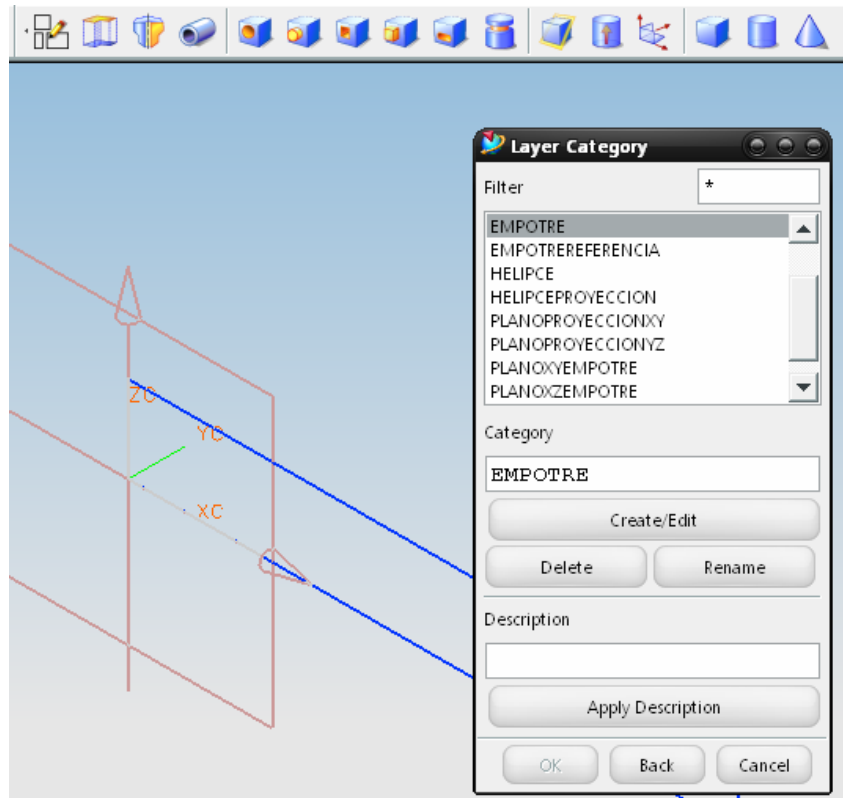


Fig. A2: Ubicación de Capa “Layer”

Dentro del mismo menú se encuentra el submenú “Move to Layer”, seleccionamos las entidades y confirmamos dando clic en la palomita verde.

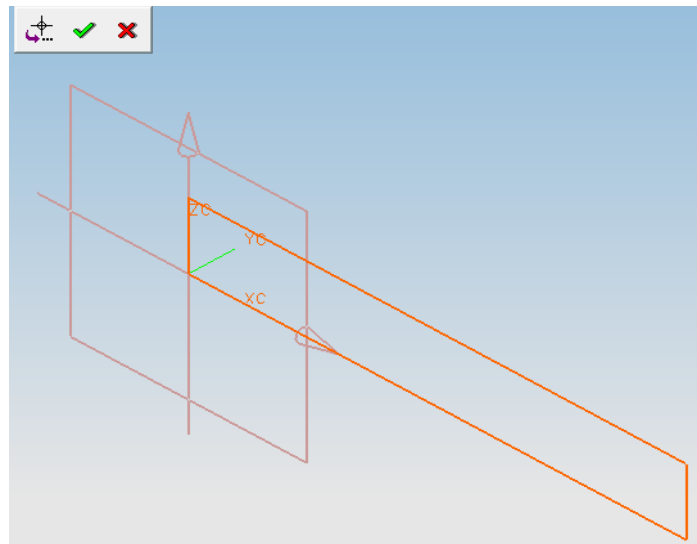


Fig. A3: Selección de Elemento

Este procedimiento lo podemos hacer cada vez que sea necesario con cada entidad generada en todo el proceso.



Generamos un nuevo sketch en el plano XY y dibujamos un rectángulo con las siguientes dimensiones:

Largo: 40 mm.

Alto: 20 mm.

Posicionamos el rectángulo a 500 mm. por debajo del eje X y a 50 mm. del eje Y

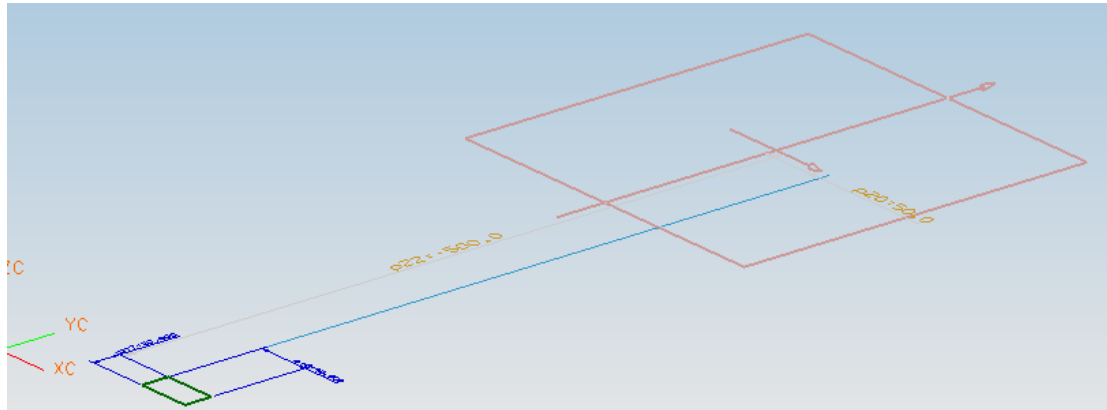


Fig. A4: Base Perfil Secundario

Ahora seleccionamos el plano anterior y con el botón derecho seleccionamos la opción “datum plane” definimos la separación entre los planos y confirmamos con OK (palomita).

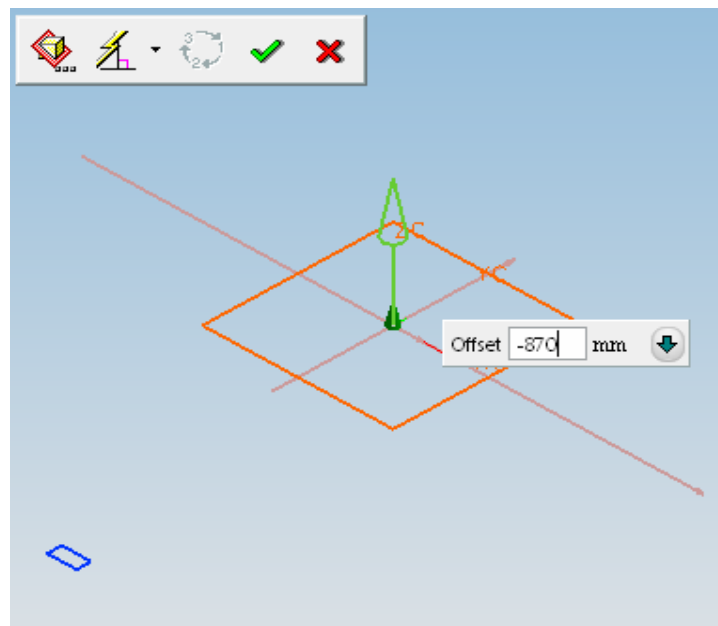


Fig. A.5:  
“Datum  
Plane” Base  
para el Perfil  
Secundario

Seleccionamos el icono de “sketch” y enseguida seleccionamos el nuevo plano generado en el paso anterior.

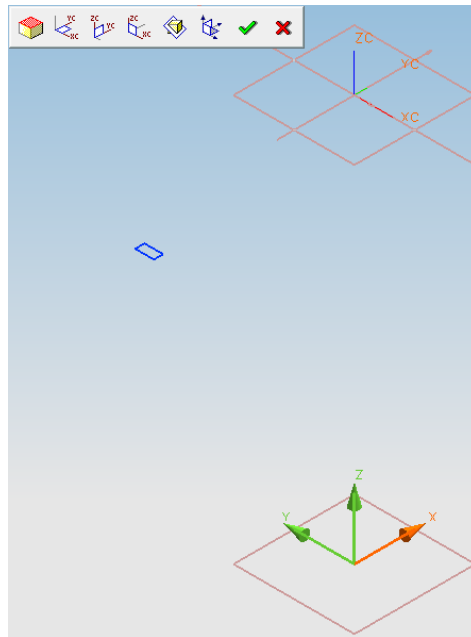


Fig. A.6: Sketch Base para el Perfil Secundario

Dentro del “sketch” generado en la barra de herramientas llamada “sketch operation” seleccionamos el icono “Project” y enseguida el rectángulo dibujado en el plano del origen.

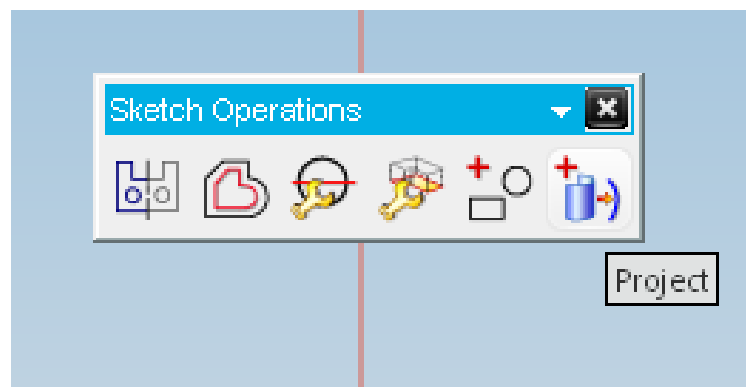


Fig. A.7: Barra “Sketch Operations”

El resultado de esta operación es lo siguiente:

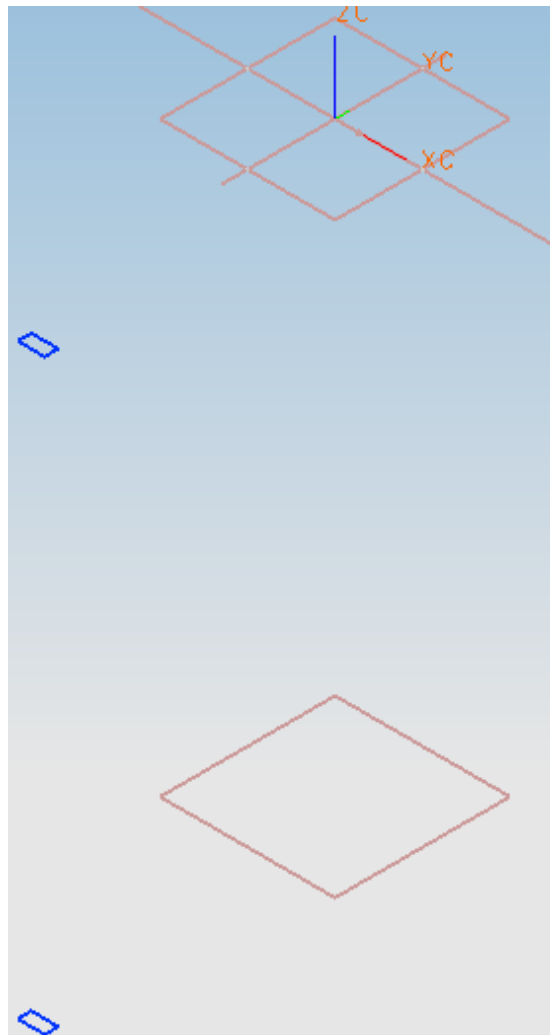


Fig. A.8: Proyección Completa

Para facilitar la visualización asignamos una capa a cada entidad creada; ahora generamos un “sketch” en el plano YZ en el origen y dibujamos una elipse con las siguientes dimensiones:

Semieje mayor: 870 mm.

Semieje menor: 500 mm.

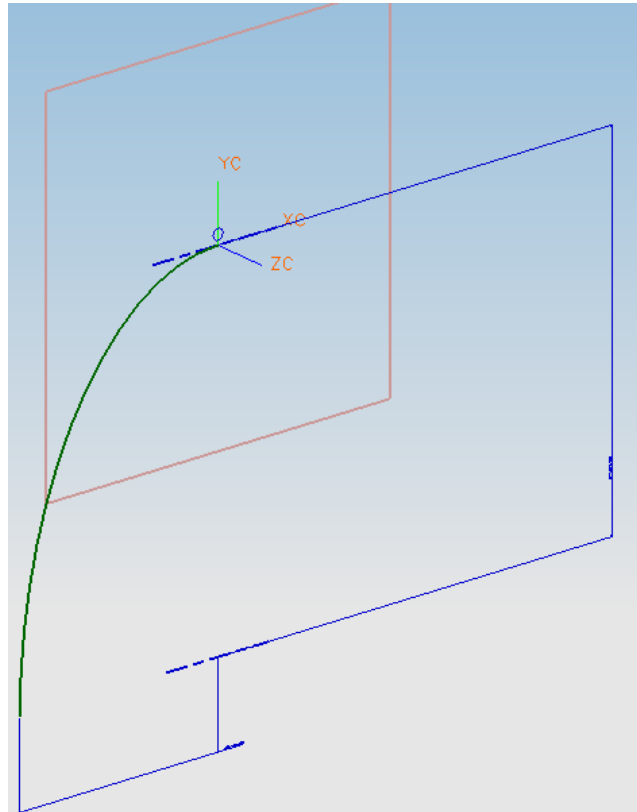


Fig. A.9: Perfil Curvo para Guía

Repetimos el procedimiento anterior para la proyección den rectángulo para la elipse de modo que obtengamos la siguiente visión:

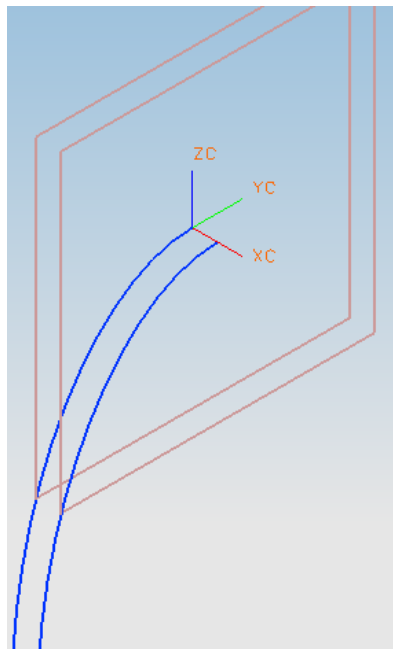


Fig. A.10: Complemento del Perfil Guía

Asignamos una capa para cada entidad generada dejando activas las que contengan las entidades de los rectángulos y la proyección de la elipse.

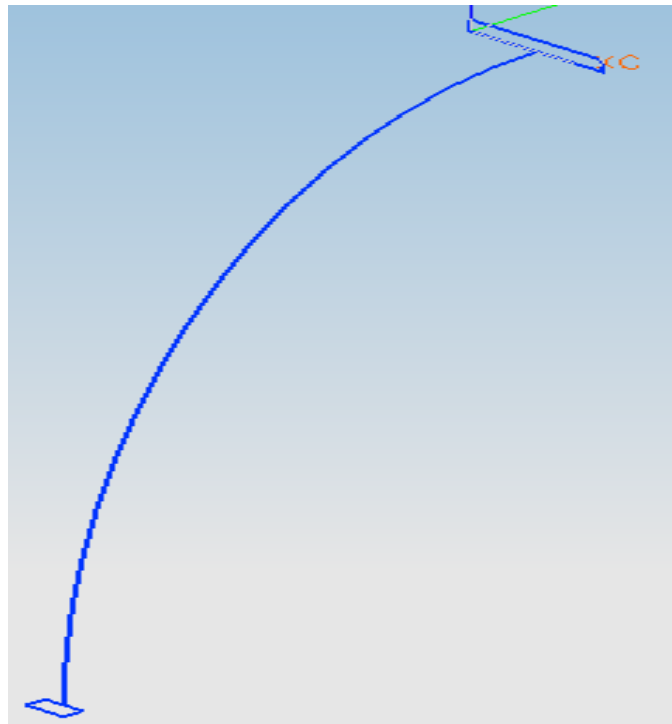


Fig. A.11: Guía Finalizada

Esta geometría es la base para poder generar en si la pierna del tren principal y lo haremos con una herramienta que se encuentra en la barra llamada “Surface” con el icono “Swept”.



Fig. A.12: Operación de Barrido a través de una Guía

Seleccionamos la opción “Curve”, enseguida seleccionamos la elipse que en este caso será la guía para el barrido, damos ok, ahora el programa nos pide

seleccionar la curva que queremos barrer a lo largo de la guía seleccionada, seleccionamos el rectángulo grande y confirmamos con ok, nuevamente el programa nos pide seleccionar una segunda curva para barrer, en este caso seleccionamos el rectángulo pequeño y confirmamos con ok. En este proceso debe cuidarse la dirección del vector que se dibuja en la pantalla puesto que ésta es la que define la forma del barrido a lo largo de la guía, es decir que los dos vectores estén en la misma dirección, ésto se logra seleccionando en las curvas a barrer aproximadamente en el mismo lugar en cada una de ellas.

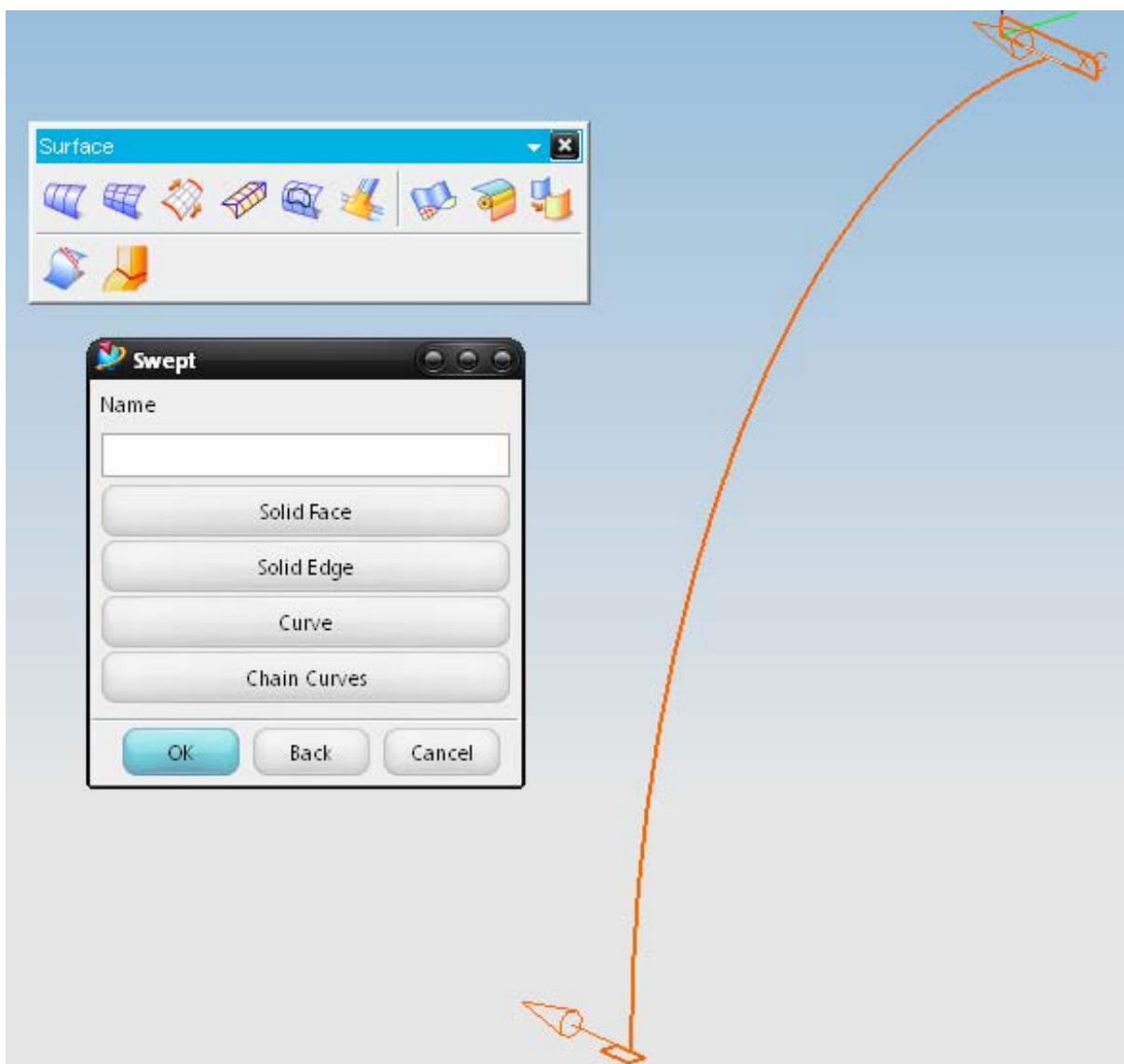


Fig. A.13: Selección de la Guía

Confirmamos la cadena de operaciones anterior con ok y se debe obtener lo siguiente:

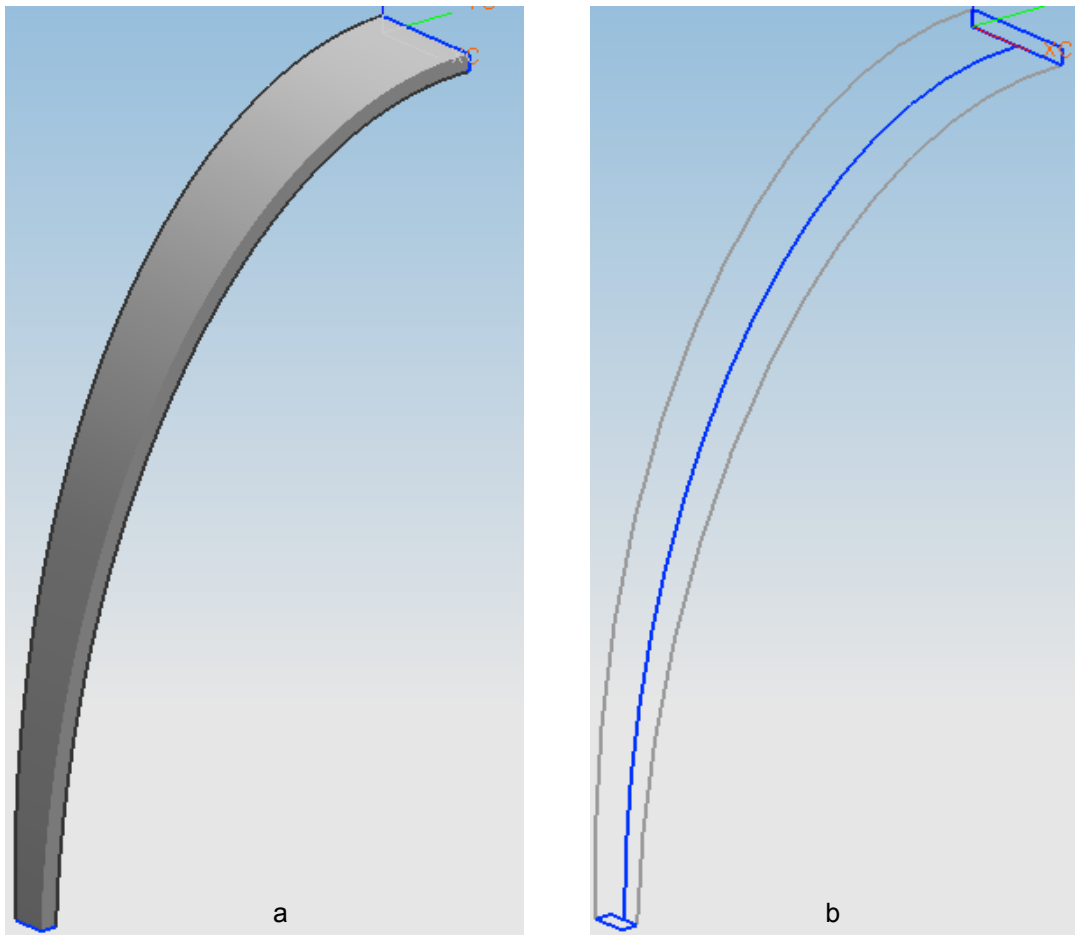


Fig. A.14: Visualización del Modelo Finalizado en sólido (a) y en Alambre (b)

Ésta es la geometría base del tren de aterrizaje sobre la cual trabajaremos en adelante, haciendo uso de los “sketch” ya construidos.

Para construir el soporte de donde fijaremos la pierna a la estructura de la aeronave, trabajaremos con el “sketch” del rectángulo grande, de la barra de herramientas “form feature” seleccionamos el icono “Extrude” seguido de seleccionar el rectángulo, el programa nos pide la longitud del “Extrude” y la operación booleana que queremos hacer con ese “extrude”.

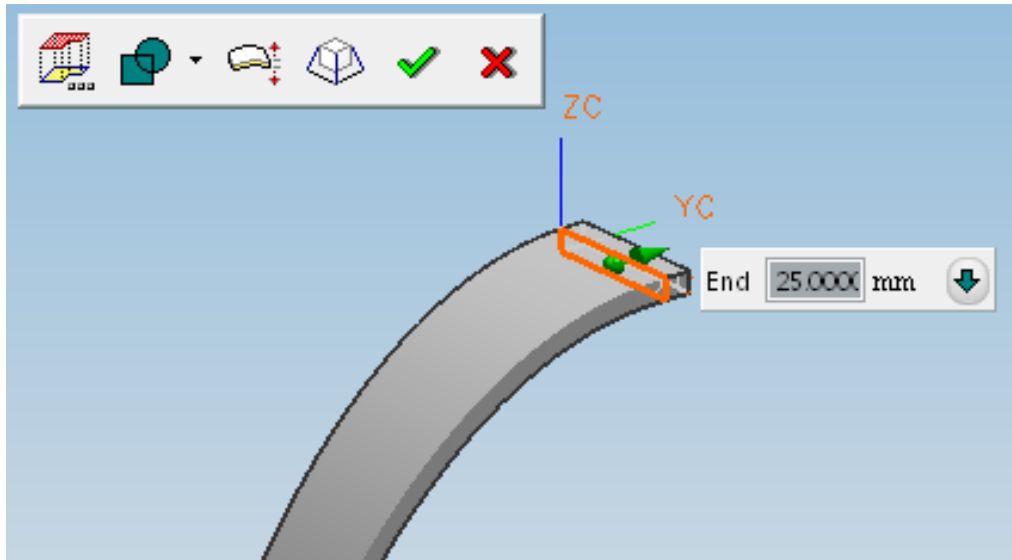


Fig. A.15: Extrusión para la Base de Fijación

En éste caso la operación booleana que se requiere es la de unión simbolizada con el icono verde en la barra de arriba, especificamos la longitud del “extrude” en 150 mm. Confirmamos con palomita. De la misma manera lo hacemos con el rectángulo de abajo con una longitud de 50 mm.

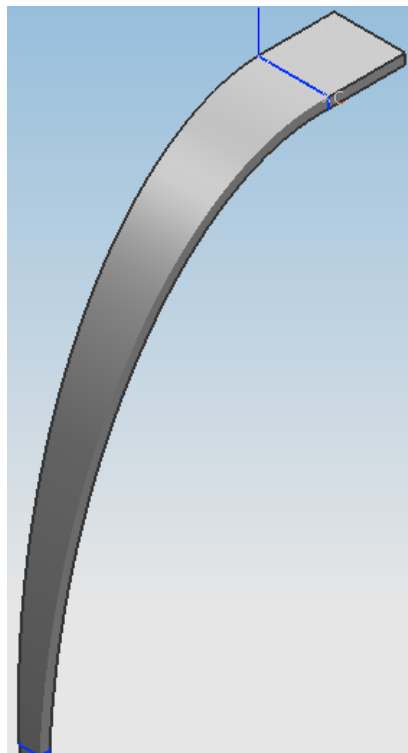


Fig. A.16: Base de Fijación Extruida



Ahora utilizaremos otra herramienta para dar forma triangular a la operación anterior, en la barra de herramientas llamada “Feature operation” se encuentra el icono “Edge chamfer”, el programa nos pide seleccionar la forma en la que queremos rebajar las aristas, seleccionamos la opción “double offset” seguido de seleccionar las aristas que queremos rebajar y confirmamos con ok.

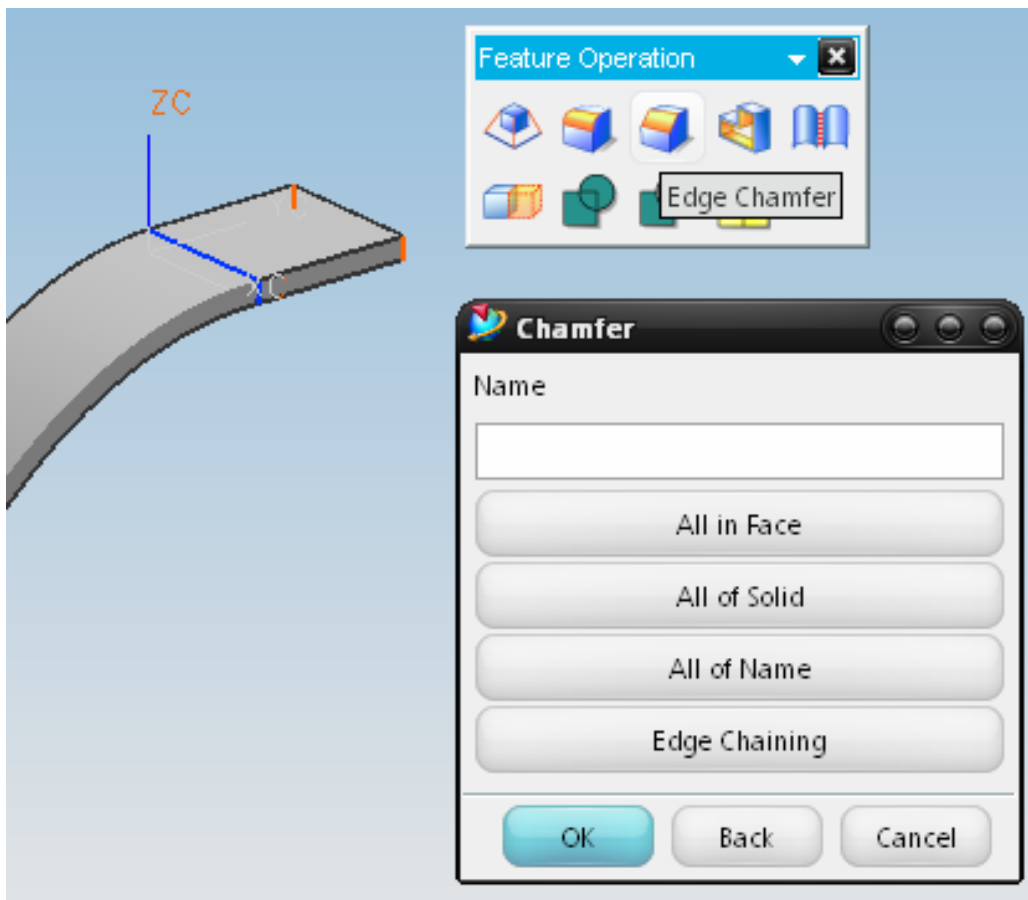


Fig. A.17: Generación de Chaflán

Colocamos las dimensiones correspondientes al primer y segundo lado de las aristas y confirmamos con ok, para obtener lo siguiente:

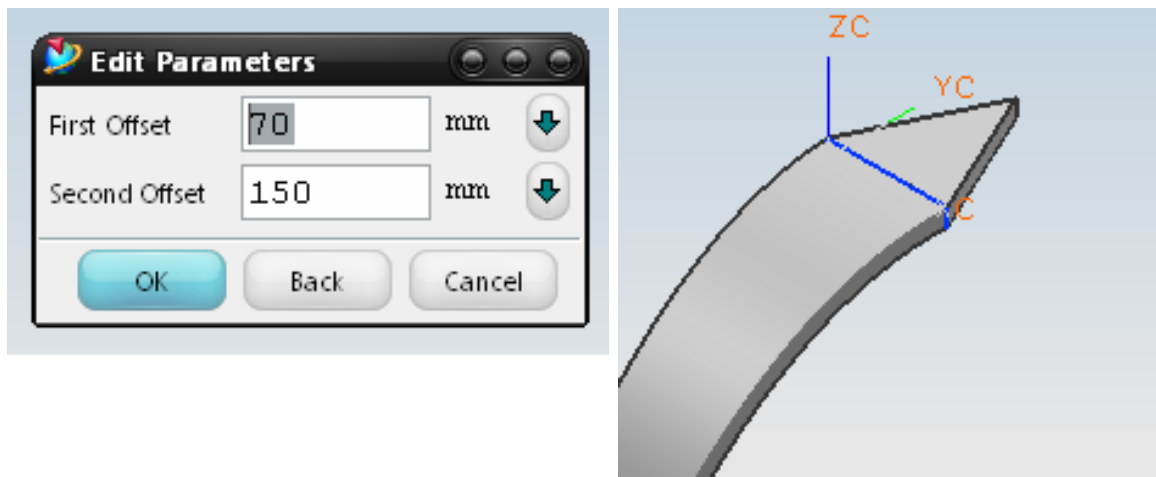


Fig. A.18: Parámetros de Chaflán

Ahora en la misma barra de herramientas se encuentra el icono llamado “Edge blend” que utilizaremos para redondear la arista formada por la operación anterior, asignando un radio de 20 mm. y confirmamos con palomita, obtenemos lo siguiente:

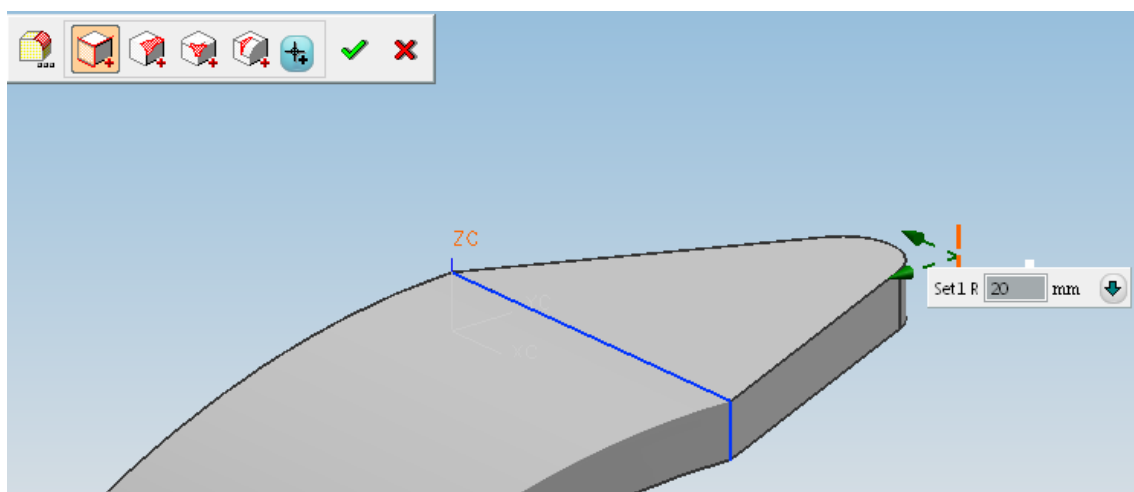


Fig. A.19: Redondeo de Punta

Generaremos los barrenos con los cuales sujetaremos la pierna del tren a la estructura de la aeronave mediante la opción “Hole” situada en la berra de herramientas llamada “Form feature” con centro en las aristas del “Sketch” generado a continuación.

Haciendo clic en el icono de “Sketch” y seleccionando la cara superior de la extrusión, por medio de líneas construiremos un triángulo con cada uno de sus lados separados de los lados de la extrusión con 10 mm.

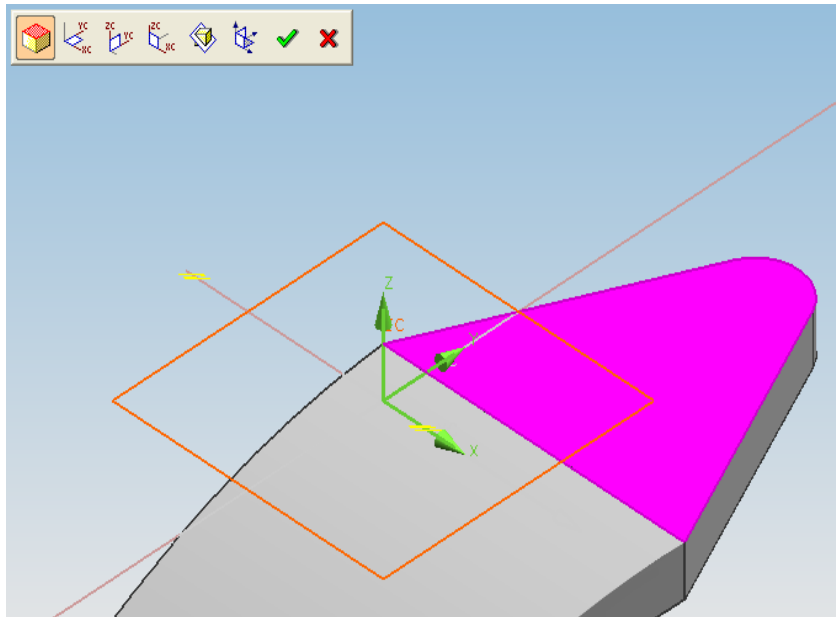


Fig. A.20: Sketch base para Barrenos de Empotramiento

Las líneas deben estar separadas de los lados de la cara seleccionada una distancia de 20 mm. y ser paralelas, después las transformaremos en líneas de referencia.

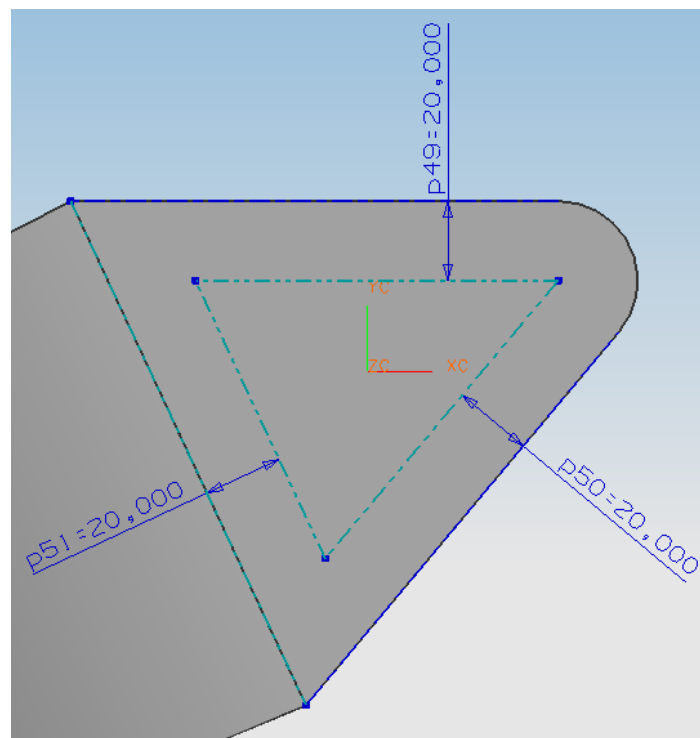


Fig. A.21: Guía para Barrenos de Empotramiento

Ahora podemos finalizar el “Sketch”; usamos el icono de “Hole” y generamos los barrenos con centro en cada punta del rectángulo.

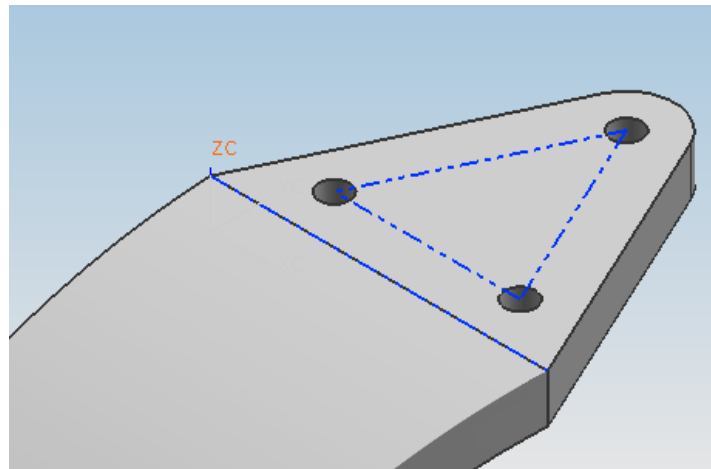


Fig. A.22: Sketch Finalizado y Extruído

Del mismo modo generamos los barrenos en la parte inferior de la pierna reemplazando el triángulo por un rectángulo.

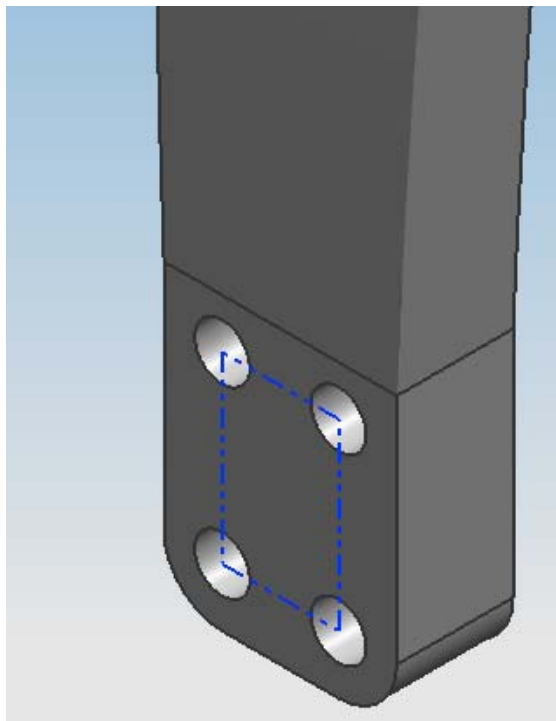


Fig. A.23: Sketch base para Barrenos de Sujeción

Asignamos una capa a cada operación de modo que solo se vea el sólido que construimos

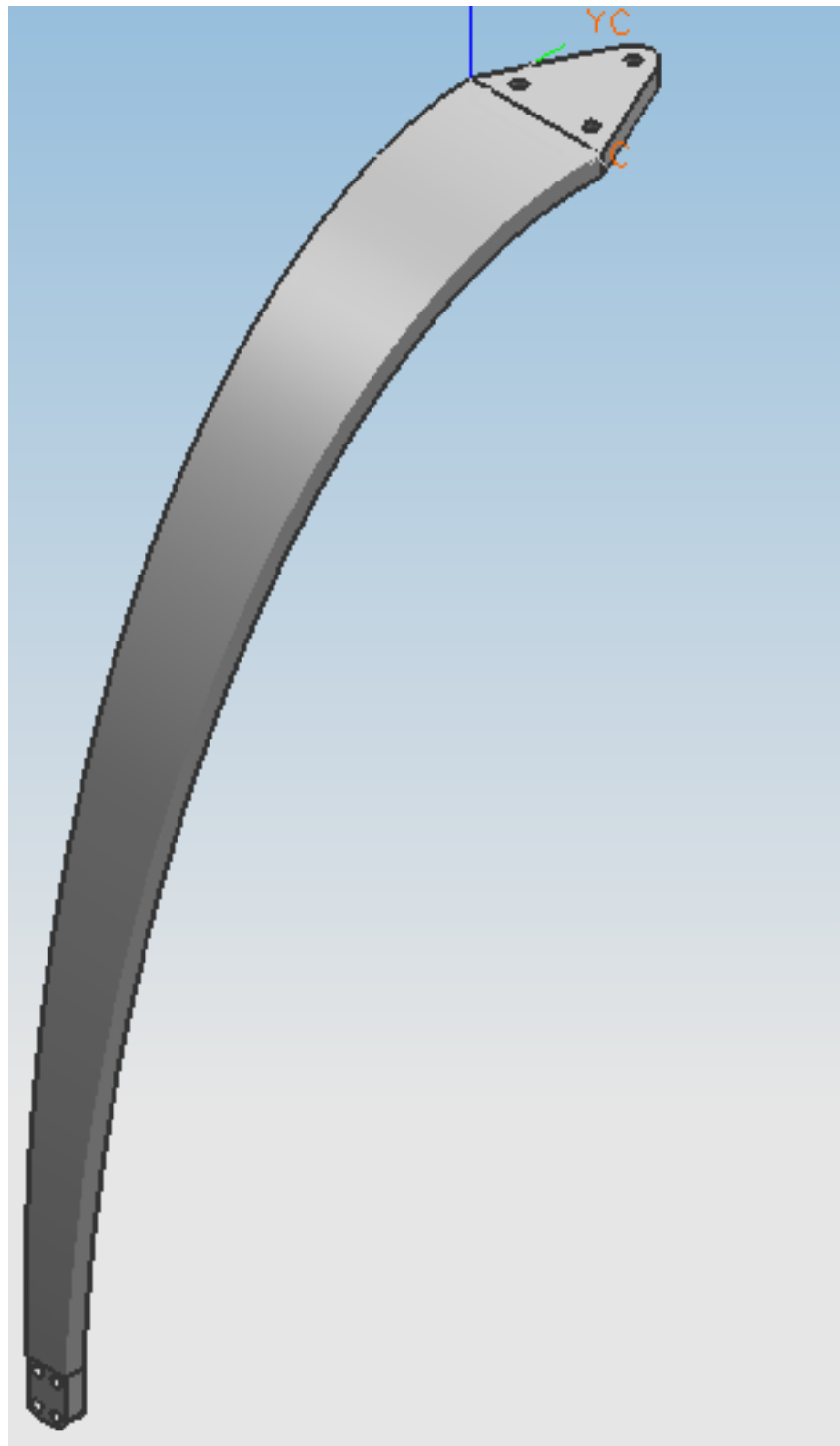


Fig. A.24: Modelo Finalizado