



UNIVERSIDAD DE TALCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

DISEÑO DE ARCO RECURVO DE TIRO Y VALIDACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES

MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA

Jorge Hinojosa

COTUTOR

Gonzalo Pincheira

AUTOR

Rodrigo Rojas Santana

CURICÓ

2020

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'. The right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'.

Curicó, 2022

Dedicatoria

Quisiera dedicar mi memoria a todas aquellas personas que me apoyaron en todo mi proceso universitario, amigos y familia, a mis padres, Eugenia Santana y Franco Rojas, que siempre depositaron en mí su confianza y me inculcaron los valores y enseñanzas para ser quien soy, además de todo el cariño que una familia puede brindar a un hijo, y muy en particular a mi hija Antonia Rojas y a mi pareja Daniela Orellana, quienes fueron el pilar fundamental para mi progreso profesional y personal.

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a toda mi familia y amigos, quienes han brindado palabras de aliento y su apoyo incondicional en todo momento. Fueron ellos artífices de una gran motivación para mi persona en este largo proceso universitario.

También quiero agradecer a mi profesor guía Jorge Hinojosa, quien siempre me brindó su apoyo en el desarrollo del proyecto y tuvo muy buena disposición y compromiso en su labor como docente. Además, quisiera dar las gracias al profesor Gonzalo Pincheira, quien me orientó y facilitó las herramientas, materiales y espacios para la fabricación del prototipo de la memoria durante el desarrollo del proyecto Fondecyt de Iniciación 11160633.

Finalmente, quisiera agradecer a todo el equipo de trabajo de la Escuela de Ingeniería civil Mecánica y el Departamento de Tecnologías Industriales, por la vocación de servicio en la formación de jóvenes profesionales que sueñan con un futuro mejor para la sociedad chilena, fomentando el crecimiento personal, formación profesional, ética de servicio y compromiso social que debe poseer un ingeniero en la escena nacional e internacional.

Rodrigo Alexis Rojas Santana

RESUMEN

En el presente documento se ha desarrollado el diseño de un arco recurvo validando sus componentes principales fabricados en base a materiales compuestos, realizando un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en la simulación computacional de la estructura, utilizando el método de elementos finitos, y los recopilados en los ensayos mecánicos realizados, discutiendo y estudiando el error asociado entre ambos modelos.

La investigación y posterior selección de materiales y metodologías de fabricación en el desarrollo del proyecto, se desarrolló en base a la disponibilidad de estos en el laboratorio de diseño y prototipado de la Escuela de Ingeniería civil Mecánica, considerando, además, la idoneidad de estos para una correcta performance en el diseño.

Para determinar los factores de diseño a utilizar y las solicitaciones de carga en el desarrollo del proyecto, se lleva a cabo una investigación sobre la mecánica del arco y sobre de fuerzas involucradas en la consecución de movimientos en la secuencia de tiro de un deportista.

Para una primera aproximación al espesor necesario en las palas del arco, se desarrolla el teorema de Mohr para el cálculo de deflexiones en vigas curvas, cuya eficacia será posteriormente evaluada con simulaciones computacionales.

El análisis del diseño se realizó utilizando el software ANSYS, debido a la combinación de materiales de distinta naturaleza, complejidad de la estructura y ensamblaje en el modelo. Además, esta herramienta computacional permite mejorar el desempeño del diseño, o corregir en caso de ser necesario, analizando los desplazamientos engendrados bajo las solicitaciones de carga y las concentraciones de esfuerzo utilizando los criterios de falla de Von Mises, para materiales isotrópicos, y el criterio de falla de Tsai-Hill, para materiales de naturaleza anisotrópica.

Palabras claves: Diseño, arco recurvo, materiales compuestos, método de elementos finitos, ANSYS.

ABSTRACT

In this current document, the design of a recurve bow has been developed validating its main components manufactured on the basis of composite materials where it was performed a comparative analysis between the obtaining results in the computational structure simulation, using the the finite element method and those ones being collected in the mechanical tests performed. Here the associated error between these two models has been discussed and studied

A research and its subsequent selection of manufacturing materials and methodologies in the development of the project, were developed according to the availability in design and prototyping laboratory at the School of Mechanical Civil Engineering, considering the suitability for proper design performance.

In order to determine the design factors to be used and the load requests in the development during the project, it was carried out a research about the mechanics of the bow and forces involved in achieving movements in an athlete's shooting sequence.

The Mhor theorem was used for getting either a first approximation of the thickness required in the arc blades and for the calculation of deflections on curved beams whose efficiency will be checked in future computational structure simulations.

The software ANSYS was used to analyse the design due to the combination of materials from different nature, structure complexity and model assembly. Furthermore, this tool allows to improve the design performance, or even correct if it is necessary by analyzing the displacements engendered under load requests and effort concentrations. All of these was done using Von Mises failure criteria for isotropic materials, and the Tsai-Hill fault criterion, for materials of anisotropic nature.

Key words: Desing, recurve bow, composite materials, finite element method, ANSYS.

INDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN.....	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA	3
1.4. OBJETIVOS	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. ALCANCES DEL PROYECTO	4
1.6. METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....	4
1.7. RESULTADOS ESPERADOS.....	5
1.8. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA ESCRITA	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. DESCRIPCIÓN DEL ARCO RECURVO	7
2.2. TÉCNICA DE TIRO	8
2.2.1. Secuencia de apertura	8
2.3. MECÁNICA DEL ARCO	9
2.3.1. Análisis de fuerzas involucradas	9
2.3.2. Deflexión en las palas del arco	11
2.4. ALUMINIO	13
2.4.1. Aleaciones de aluminio	15
2.4.2. Fundición de aluminio.....	15
2.5. MATERIALES COMPUESTOS.....	17
2.5.1. Materiales compuestos reforzados con fibras.....	18

2.5.2.	Fase fibrosa.....	18
2.5.3.	Fase matriz.....	19
2.5.4.	Proceso de manufactura de materiales compuestos.....	20
2.5.5.	Criterios de falla	21
2.6.	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	23
CAPÍTULO 3. DISEÑO DEL ARCO Y VALIDACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES. 24		
3.1.	FACTORES DE DISEÑO	25
3.1.1.	Distancia de apertura y largo del arco	25
3.1.2.	Relación de distancias entre el cuerpo y las palas	26
3.2.	DISEÑO DEL ARCO	27
3.3.	DESPLAZAMIENTO DE LAS PALAS DEL ARCO	28
3.4.	ESPESOR DE LAS PALAS	30
3.5.	SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL ARCO.....	35
3.5.1.	Mallado del arco	35
3.5.2.	Contactos entre los elementos.	36
3.5.3.	Condiciones de borde	37
3.6.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.....	38
3.6.1.	Desplazamientos	38
3.6.2.	Análisis de falla de la pala del arco	39
3.7.	APILAMIENTO VARIABLE DE LAS PALAS	39
3.8.	RESULTADOS DE LA SEGUNDA SIMULACIÓN.....	40
3.8.1.	Distribución de esfuerzos	41
3.8.2.	Análisis de resultados	42
3.9.	PROCESO DE MANUFACTURA DE LAS PALAS.....	43
3.10.	VALIDACIÓN DE LA RIGIDEZ DE LAS PALAS.....	44

3.10.1.	Ensayo físico.....	44
3.10.2.	Ensayo computacional	45
3.10.3.	Comparación de resultados	45
3.11.	NUEVA PROPUESTA DE APILAMIENTO	48
3.12.	RESULTADOS DE LA TERCERA SIMULACIÓN.....	48
3.12.1.	Distribución de esfuerzos.....	49
3.12.2.	Análisis de resultados	50
3.13.	FALLAS EN FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO	50
3.13.1.	Falla por no impregnación en láminas inferiores.....	50
3.13.2.	Falla por no impregnación en láminas intermedias	51
3.14.	COMENTARIOS.....	52
CAPÍTULO 4. DISEÑO FINAL Y VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO.....		54
4.1.	ANALISIS DE VISCOSIDAD.....	55
4.2.	LIBRAJE DEL MODELO.....	55
4.3.	APILAMIENTO DEL MODELO	56
4.4.	SIMULACIÓN DEL DISEÑO FINAL	56
4.4.1.	Desplazamientos.....	56
4.4.2.	Distribución de esfuerzos	57
4.5.	FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO.....	61
4.6.	VALIDACIÓN DE LAS PALAS DEL ARCO.....	61
4.7.	COMENTARIOS.....	63
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES		65
5.1.	CONCLUSIONES	66
BIBLIOGRAFÍA		67
ANEXO 1: MEMORIA DE CÁLCULO DE ESPESOR		68
ANEXO 2: PLANO DE MEDIDAS GENERALES DEL DISEÑO		69

ANEXO 3: PLANOS DE FABRICACIÓN DE LA PALA.....	70
--	----

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diseño actual de un arco recurvo (Arco Santander, 2010)	7
Figura 2.2: Correcto posicionamiento de tiro (Axford, 1995).....	8
Figura 2.3: Secuencia de apertura (Axford, 1995).	9
Figura 2.4: DCL condición de apertura (Propia, 2020).....	10
Figura 2.5: DCL punto de enfleche. (Propia, 2020)	10
Figura 2.6: Carta de materiales, Módulo de elasticidad - Densidad. (Propia, 2020).....	17
Figura 2.7: Clasificación de los materiales compuestos (William & Callister, 2007) ...	18
Figura 2.8: Esquema de moldeo asistido por vacío (Peters, 1997).....	21
Figura 3.1: Distancia de apertura (Reilly, 2015).	25
Figura 3.2: Diseño cuerpo del arco (Propia, 2020).....	27
Figura 3.3: Zona de unión entre cuerpo y palas (Propia, 2020).	27
Figura 3.4: Diseño pala del arco (Propia, 2020).....	28
Figura 3.5: Detalle hendidura de la pala (Propia, 2020).....	28
Figura 3.6: Esquema de desplazamiento máximo (Propia, 2020).	29
Figura 3.7: DCL pala del arco (Propia, 2020)	30
Figura 3.8: DCL sección curva (Propia, 2020).....	31
Figura 3.9: DCL sección curva con cargas horizontales (Propia, 2020).	31
Figura 3.10: DCL sección circular con cargas verticales (Propia, 2020).....	32
Figura 3.11: DCL sección circular (Propia, 2020).	33
Figura 3.12: DCL sección recta (Propia, 2020).....	33
Figura 3.13: DCL sección recta simplificado (Propia, 2020).....	34

Figura 3.14: Mallado del cuerpo del arco (Propia, 2020).....	36
Figura 3.15: Mallado de las palas y detalle de la unión apernada (Propia, 2020).....	36
Figura 3.16: Condiciones de borde de la simulación (Propia, 2020).	37
Figura 3.17: Corte de la sección transversal de la unión apernada. (Propia, 2020).	38
Figura 3.18: Desplazamientos de la pala (Propia, 2020).....	38
Figura 3.19: Análisis de falla de la pala. (Propia, 2020).	39
Figura 3.20: Apilamiento variable de la pala (Propia, 2020).	40
Figura 3.21: Distribución de esfuerzos en el cuerpo. (Propia, 2020).....	41
Figura 3.22: Análisis de falla de la pala. (Propia, 2020).	41
Figura 3.23: Manufactura de las palas del arco (Propia, 2020).....	43
Figura 3.24: Prototipo de pala del arco (Propia, 2020).	43
Figura 3.25: Banco de ensayo de flexión (Propia, 2020).	44
Figura 3.26: Condiciones de borde del ensayo de flexión (Propia, 2020).	45
Figura 3.27: Distribución de esfuerzos en el cuerpo. (Propia, 2020).....	49
Figura 3.28: Análisis de falla en la pala. (Propia, 2020).	49
Figura 3.29: Falla de fabricación por no impregnación en laminas inferiores	51
Figura 3.30: Infusión por vacío con inyección por ambos costados y extracción central (Propia, 2020).	51
Figura 3.31: Falla de fabricación por no impregnación en láminas intermedias (Propia, 2020).....	52
Figura 4.1: Desplazamientos de la pala de 25 lb (Propia, 2020).....	56
Figura 4.2: Distribución de esfuerzos en el cuerpo, vista anterior (Propia, 2020).....	57
Figura 4.3: Distribución de esfuerzos en el cuerpo, vista posterior (Propia, 2020).	57
Figura 4.4: Ubicación del valor del esfuerzo máximo en el cuerpo. (Propia, 2020).....	58
Figura 4.5: Distribución de esfuerzos en pernos. (Propia, 2020).	58
Figura 4.6: Análisis de falla en las palas, vista anterior. (Propia, 2020).	59
Figura 4.7: Análisis de falla en las palas, vista posterior. (Propia, 2020).	60

Figura 4.8: Ubicación de valor máximo del facto de falla en las palas. (Propia, 2020).	60
Figura 4.9: Prototipo de pala de 25 lb (Propia, 2020).	61
Figura 4.10: Falla de delaminación en el prototipo (Propia, 2020).	63
Figura 4.11: Defecto de fabricación en el prototipo (Propia, 2020).	63

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Propiedades físicas del aluminio (Aluminio)	13
Tabla 2.2: Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio (Aluminio)	14
Tabla 2.3: Propiedades mecánicas de arenas comerciales (Aluminio)	16
Tabla 2.4: Propiedades de materiales reforzados con fibras (William & Callister, 2007)	19
Tabla 2.5: Propiedades típicas de resina epoxica a 20°C (William & Callister, 2007)	20
Tabla 3.1: Largo sugerido del arco (Archery, 2017)	26
Tabla 3.2: Relación cuerpo y palas del arco (Archery, 2017)	26
Tabla 3.3: Tabulación de número de láminas y espesores del modelo (Propia, 2020)	40
Tabla 3.4: Tabulación de número de láminas y espesores del modelo (Propia, 2020)	42
Tabla 3.5: Tabla comparativa de resultados (Propia, 2020)	46
Tabla 3.6: Tabla comparativa de resultados con espesores corregidos (Propia, 2020)	47
Tabla 3.7: Tabulación del número de láminas y espesores del rediseño (Propia, 2020)	48
Tabla 3.8: Tabulación del número de láminas y espesores del rediseño (Propia, 2020)	50
Tabla 4.1: Análisis de viscosidad de la resina epoxica disponible (Propia, 2020)	55
Tabla 4.2: Tabla comparativa de resultados (Propia, 2020)	62
Tabla 4.3: Tabla comparativa de resultados con espesores corregidos (Propia, 2020)	62

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1.ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

El tiro con arco es una disciplina que ha avanzado a lo largo de la humanidad conforme esta ha progresado con el pasar de los años, actualmente se considera como un deporte olímpico o de caza, existiendo a lo largo de nuestro país varias instituciones que fomentan esta práctica a nivel profesional, participando en competencias tanto nacionales como internacionales.

La sociedad chilena actual se encuentra en altos niveles de obesidad debido a los malos hábitos alimenticios y al sedentarismo de la población, por esto, fomentar la actividad física en la comunidad resulta imperante, para así, prevenir posibles enfermedades futuras que acarreen dichos problemas.

Promover el deporte en la sociedad actual desde el área de la ingeniería revalorizando materiales reciclables resulta gratificante y necesario para generar conciencia en la población actual que carece de hábitos de vida saludable y responsabilidad ecológica.

1.2.DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El diseño y simulación estructural de un arco recurvo de tiro implica la modelación de ensamblajes, geometrías complejas y materiales de naturaleza ortotrópica que resultan imposibles de realizar con las metodologías convencionales en el área de la ingeniería mecánica, esto debido al cálculo de no linealidades en el modelo que esto conllevaría. Por tanto, se requiere de otras metodologías de análisis para estos diseños que permitan acercarse a una solución aproximada y permitan la validación respecto a ensayos mecánicos realizados a prototipos fabricados para dicho fin.

1.3.SOLUCIÓN PROPUESTA

La solución propuesta se basa en el diseño de un arco recurvo de tiro en base a materiales compuestos simulado mediante el método de elementos finitos con la ayuda del software ANSYS, comprometiendo un alto desempeño mediante la validación de los componentes principales realizando ensayos experimentales a prototipos manufacturados.

1.4.OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y validar los componentes principales de un arco recurvo de tiro, en base a materiales compuestos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Describir la mecánica del arco recurvo.
- Describir los materiales a utilizar.
- Diseñar la estructura.
- Simular el modelo mediante el método de elementos finitos.
- Manufacturar el prototipo de las palas del arco.
- Validar componentes principales.

1.5.ALCANCES DEL PROYECTO

- El análisis de elementos finitos se realizará bajo las condiciones estáticas de reposo y apertura del arco.
- El diseño se realizará en base a la anatomía del autor.
- Para la simplificación del análisis, la cuerda no será objeto de estudio, puesto que se considerará como inextensible.
- Las dimensiones principales del arco estarán regidas por el manual del arco recurvo del fabricante HOYT.

1.6.METODOLOGÍAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Para el desarrollo del proyecto, se realiza un estudio de la mecánica del arco, para la definición de los parámetros principales para el diseño, como el libraje del arco, distancia de apertura y dimensiones generales de este.

La selección de los materiales a utilizar, se realizan en base a disponibilidad de estos en el departamento de tecnologías industriales y en base al criterio de revalorización de desechos para el caso del aluminio.

Un primer acercamiento a la rigidez deseada en las palas del arco se definirá desarrollando el teorema de Mohr, para el cálculo de deflexiones para vigas curvas, que posteriormente será analizado y optimizado con la ayuda del software ANSYS bajo las condiciones de diseño predeterminadas.

La validación de componentes principales del diseño buscará esclarecer las diferencias entre la simulación computacional y el prototipo fabricado, con el fin de conocer el error asociado entre ambos modelos y rediseñar en caso de ser necesario, para mermar dicha variación en los resultados.

1.7.RESULTADOS ESPERADOS

Se espera como resultado un diseño completo de un arco recurvo de tiro olímpico, validado mediante simulaciones computacionales que permitan optimizar la performance del modelo.

Además, la fabricación de un prototipo de las palas del arco con un error asociado inferior al 15% que permita homologar el proceso de manufactura hacia componentes similares con distinta rigidez.

1.8.ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA ESCRITA

1. Capítulo 1 Introducción.
2. Capítulo 2 Marco teórico.
3. Capítulo 3 Diseño del arco y validación de componentes principales.
4. Capítulo 4 Diseño final y validación de prototipo.
5. Capítulo 5 Conclusiones.

CAPÍTULO 2.

MARCO TEÓRICO

2.1.DESCRIPCIÓN DEL ARCO RECURVO

El diseño y los materiales de los arcos dependen de la ubicación y tiempo de su fabricación. Actualmente, los diseños se han mantenido inalterables en los últimos años, debido a la eficiencia de la transformación de energía de estos.

En competiciones olímpicas, destaca la disciplina de tiro con arco recurvo, el cual es un arco desmontable, que se compone a grandes rasgos de un cuerpo o riser, normalmente fabricado de aleaciones de aluminio o magnesio, y un juego de palas o limbs, principalmente manufacturadas de materiales compuestos.

En la figura 2.1, se muestra el diseño de un arco recurvo actual con sus principales partes y componentes.

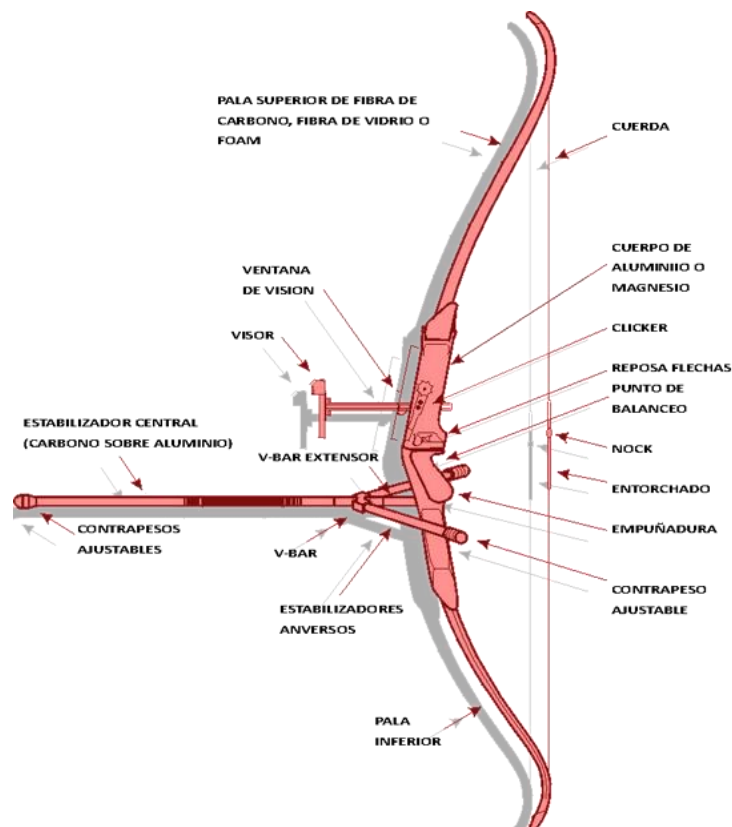


Figura 2.1: Diseño actual de un arco recurvo (Arco Santander, 2010)

2.2. TÉCNICA DE TIRO

La técnica de tiro es el factor más importante para lograr repetir buenos tiros consecutivos en una competencia, para esto, se establece que, se debe lograr una correcta consecución biomecánica de los músculos y huesos involucrados para lograr la condición de apertura del arco, además, contar con una posición de apoyo estable y rígida que asegure un correcto equilibrio (Axford, 1995).

Otro punto importante en la técnica es una buena precisión que dirija la ejecución física de todo el proceso. En la figura 2.2, se muestra un correcto posicionamiento del cuerpo para la ejecución de un tiro.



Figura 2.2: Correcto posicionamiento de tiro (Axford, 1995)

2.2.1. Secuencia de apertura

La secuencia de apertura comúnmente utilizada en el deporte, es la denominada “apertura en T”, esta se muestra en la figura 2.3, bajo dos puntos de vista diferentes, y consiste en mantener la posición del cuerpo y visión girada en la dirección de tiro, elevando los brazos extendidos en dirección de la diana, posteriormente, la mano que

sostiene la cuerda, es llevada hacia atrás hasta el mentón, logrando así, la condición de apertura (Axford, 1995).

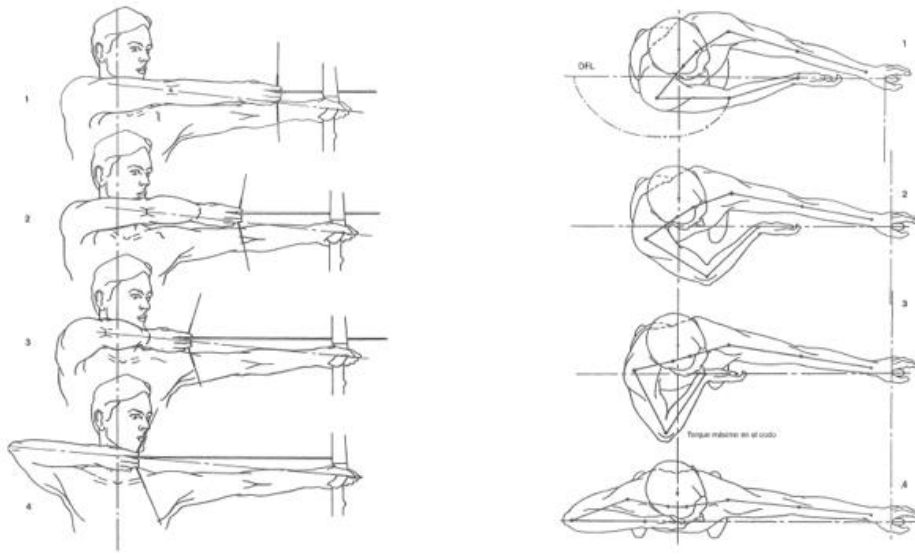


Figura 2.3: Secuencia de apertura (Axford, 1995).

2.3. MECÁNICA DEL ARCO

La mecánica del arco consiste en almacenar la fuerza ejercida por el arquero como energía de deformación, principalmente en las palas del arco, para posteriormente, transferirla en forma de energía cinética a la flecha.

Dicha respuesta del arco ante la fuerza ejercida, se le conoce como el libraje del arco, que por definición, es la fuerza que se necesita para deformar las palas hasta la condición de apertura del arquero (Axford, 1995).

2.3.1. Análisis de fuerzas involucradas

El libraje del arco y la distancia de apertura, son las variables a partir de las cuales un arco es diseñado, puesto que, dependiendo de estos factores, se establece la respuesta que deben tener los componentes del diseño.

Para efecto del desarrollo del proyecto, se considerará un libraje del arco de 30 libras, a partir de esto, se establece el diagrama de cuerpo libre presentado en la figura 2.4, donde F es la fuerza requerida por el arquero para alcanzar la condición de apertura, R es la fuerza de reacción en la empuñadura del arco y P es el peso de arco.

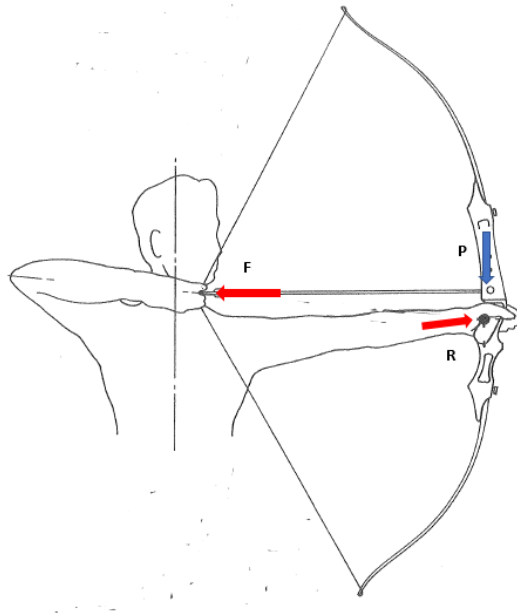


Figura 2.4: DCL condición de apertura (Propia, 2020)

Para el análisis de la fuerza de tensión en la cuerda del arco, considerándola como inextensible, se presenta en la figura 2.5, el diagrama de cuerpo libre en el punto de enfleche.

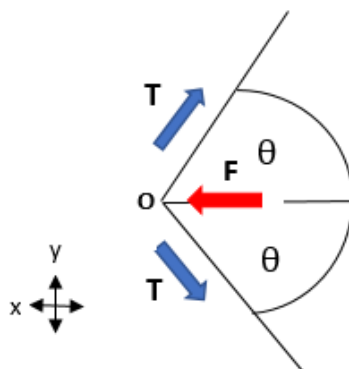


Figura 2.5: DCL punto de enfleche. (Propia, 2020)

De la figura 2.5, se establece la condición de equilibrio, por tanto, la sumatoria de fuerzas debe ser cero, por esto, se evidencia una relación entre la tensión de la cuerda y la fuerza aplicada, como se muestra en la ecuación 2.1.

$$2T\cos\theta = F \quad (2.1)$$

Donde: T: Tensión en la cuerda.
 F: Fuerza aplicada.
 θ : Ángulo de apertura de la cuerda.

Despejando la ecuación 2.1.

$$T = \frac{F}{2\cos\theta} \quad (2.2)$$

Por tanto, a partir de esta ecuación, es posible conocer la fuerza que se transmite desde la cuerda, hacia las palas del arco.

El ángulo θ descrito en la ecuación 2.2, será aproximado en base a la geometría del arco en su condición de apertura, siendo este de 50° .

2.3.2. Deflexión en las palas del arco

Con el fin de conocer la rigidez que deben tener las palas del arco, se debe estimar el valor de la deflexión máxima en las palas sometidas a la fuerza que ejerce la cuerda sobre ellas. Considerando a la cuerda y al cuerpo del arco como elementos rígidos respecto a las palas, y a estas últimas como vigas de sección transversal constante, se puede utilizar el método de Mohr para el cálculo de deflexiones en vigas curvas.

2.3.2.1. *Método de Mohr para el cálculo de deflexiones*

Es un método basado en consideraciones energéticas descrito en (Ortiz Berrocal, 2002) , que consiste en calcular el potencial interno de la viga sometida a la carga real, más una carga ficticia Φ , para luego calcular la deflexión aplicando el teorema de Castigliano, particularizado para cuando la fuerza ficticia es cero, esto a partir de la ecuación 2.3.

$$\delta_c = \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \Phi} \right)_{\Phi=0} \quad (2.3)$$

Donde: δ_c : deflexión de la viga.

Γ : Potencial interno de la viga.

Φ : Carga ficticia.

Desarrollando la ecuación 2.3, y despreciando la deformación provocada por los esfuerzos cortantes, se obtiene la ecuación 2.4.

$$\delta_c = \int \frac{M_{z0} M_{z1}}{EI_z} dx \quad (2.4)$$

Donde: M_{z0} : Ley de momentos flectores de la viga sometida a la carga real.

M_{z1} : Ley de momentos flectores producidos por la carga ficticia Φ .

E: Módulo de elasticidad de la viga.

I_z : Momento de inercia de la sección transversal de la viga.

2.4. ALUMINIO

El aluminio es el metal no ferroso más importante en la industria de los metales, esto debido a sus facilidades de producción, peso liviano, alta resistencia a la corrosión, ductilidad, conductividad eléctrica, resistencia mecánica y alta conductividad térmica, lo que se traduce en un material de alta gama de la ingeniería y de una alta sollicitación a nivel mundial en rubros industriales, deportivos y de construcción.

Las propiedades físicas y mecánicas del aluminio en estado puro y sus aleaciones se presentan en las tablas 2.1 y 2.2 respectivamente.

Propiedades	Medida métrica
Densidad a 20°C	2,7 gramos por cc
Punto de fusión	660°C
Punto de ebullición a 760 mm de mercurio	1800 °C
Conductividad térmica a 25°C	0,53 cal. g por seg. por cm ³ por cm de espesor por grado C
Calor específico medio (0 a 100°C)	0,225 cal. por gramo por grado C
Coefficiente de dilatación lineal térmica (20 a 100°C)	0,0000239 por grado C
Calor latente de fusión	93 cal. Por gramo
Módulo de elasticidad (Young)	7030 kg/mm ²
Módulo de rigidez (Corte)	2670kg/mm ²
Relación de Poisson	0,33

Tabla 2.1: Propiedades físicas del aluminio (ALCAN)

Es importante destacar que el módulo de elasticidad del aluminio es bastante bajo comparándolo con el módulo del acero, esto es importante, ya que el aluminio y sus aleaciones poseen una ventaja que da a las estructuras una capacidad elevada de amortiguar golpes (ALCAN).

	Aleación y temple	Resistencia a la ruptura kg/mm ²	Límite elástico kg/mm ²	Alargamiento % en 50 mm	Límite en compresión kg/mm ²	Número de dureza Brinell	Resistencia al corte kg/mm ²
Fundición en arena	100	7,7	2,5	45	3,4	20	5,6
	A11-TS	17,9	10,9	3,5	-	-	-
	117	17,6	11,2	3,5	11,2	65	16,2
	123	13,4	6,3	9	7	40	9,8
	125-T6	26,7	24,6	2,5	20,4	80	21,1
	125-T6A	31,6	28,1	2	26	90	22,5
	125-T5	19,7	16,2	1,5	16,9	65	15,5
	135-T6	25,3	17,6	4	15,5	70	19
	135-T5	17,6	14,1	2	15,5	60	12,7
	225-T6	27,4	19,7	5	17,6	80	21,1
	236	15,5	9,8	2	12	65	14,1
	250-T5B	17,6	14,1	1	-	75	14,8
	250-T6	25,3	21,1	1	-	100	20,4
	A320	16,9	9,1	6	9,1	50	12
	350-T4	31,6	17,6	14	18,3	75	23,2
Fundición en molde permanente	117	20,4	13	4	14,1	70	17,6
	123	15,8	6,3	10	6,3	40	12,7
	125-T6	29,5	24,6	3	-	90	21,1
	125-T6A	31,6	28,1	2	-	-	-
	125-T5	21,8	16,9	2	16,9	75	-
	135-T6	25,3	19	6	19	90	20,4
	A143-T5	23,9	21,8	1,5	-	100	-
	250-T5C	26	24,6	-	-	115	19
	250-T6A	33,7	25,8	-	-	140	28,1
Fundición en matriz	143	28,8	-	3	-	-	-
	160X	24,6	-	3,5	-	-	15,5
	340	28,8	-	7,5	-	-	-

Tabla 2.2: Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio (ALCAN)

2.4.1. Aleaciones de aluminio

Las aleaciones de aluminio ofrecen una gran variedad de combinaciones que permiten mejorar las propiedades del material, como su resistencia mecánica, ductilidad, conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión.

Los principales constituyentes de aleación del aluminio son, magnesio y silicio, que aumentan las propiedades anticorrosivas del material, y además, cobre y zinc, que mejoran la relación resistencia-peso del material.

Las aleaciones en cuestión contienen entre un 99% a un 99,5% de aluminio en su composición, dependiendo de las ventajas y limitaciones que se puedan alcanzar según el metal de aporte a la aleación (ALCAN).

2.4.2. Fundición de aluminio

La fundición de aluminio consiste en la fabricación de una pieza mediante la fusión del material, para posteriormente ser vertido en un molde con la preforma del elemento a manufacturar.

Para el proceso de fundición, es de suma importancia la temperatura del horno, puesto que si se lleva a cabo a temperaturas muy altas, se producen imperfecciones metalúrgicas, por otro lado, si el vaciado se ejecuta a temperaturas muy bajas, el metal no logra llenar el molde por completo, resultando así, piezas de fundición ineficientes, por lo que resulta imperante ejercer una correcta metodología de fusión y vertido del aluminio, y además, contar con equipos pirotécnicos de alta precisión y un correcto diseño del molde para evitar turbulencias y salpicaduras en el proceso de vaciado (ALCAN).

2.4.2.1. Moldes para fundición

Los moldes para la fundición de aluminio son principalmente de arena y metal, existiendo tres tipos de estos: moldes de arena, moldes permanentes de metal y moldes de matriz. La correcta selección de estos depende de variables como, las dimensiones de la pieza, requerimientos de producción en serie o limitada, nivel de tolerancia de la pieza y durabilidad del molde.

Los moldes de arena son utilizados cuando el número de piezas a fabricar no justifica el costo de un molde de metal, además, permite el moldeo de piezas que son excesivamente grandes.

El molde se fabrica comúnmente como una mezcla de componentes, siendo estos un tipo de arena (usualmente arena de sílice), un aglutinante y una cantidad de agua.

Las arenas de moldeo deben cumplir con ciertas propiedades que aseguren un correcto proceso de fundición, entre estas, cohesión entre partículas, capacidad de resistir altas temperaturas, baja conductividad térmica, capacidad de deformación, desmoldeabilidad y fluidez.

En la tabla 2.3 adjunta, se muestran algunas propiedades de arenas de moldeo comerciales.

Material de molde	Conductividad térmica [W/m·K]	Densidad [kg/dm ³]	Calor específico [J/(kg·K)]	Expansión [%]	Temperatura fusión [K]
Arena de sílicea	0,52	1,6	1170	1,9	1986
Arena de cromita	38	2,65	990	0,6	2363
Arena de olivino	35	1,7	990	1,1	2143
Arena de zirconio	1,04	2,72	840	0,45	2813

Tabla 2.3: Propiedades físicas de arenas comerciales (ALCAN)

2.5. MATERIALES COMPUESTOS

“Un material compuesto consiste en la combinación a nivel macroscópico de dos o más componentes no solubles entre ellos que se unen sinérgicamente, obteniéndose un material con una mayor capacidad estructural que la de sus constituyentes cuando actúan por separado” (Marco & Sánchez, 2014)

Se diferencian dos fases en la composición de un material compuesto, la fase de matriz, que actúa como aglutinante, distribuye los esfuerzos en la estructura y protege al refuerzo del desgaste, y la fase de refuerzo, de mayor rigidez y resistencia que la matriz, y quien soporta en mayor medida los esfuerzos solicitados de la estructura, unidas ambas por una interfase que establece la comunicación entre estas. Las propiedades finales del elemento dependen de los materiales constituyentes, su distribución, su geometría y su fracción volumétrica.

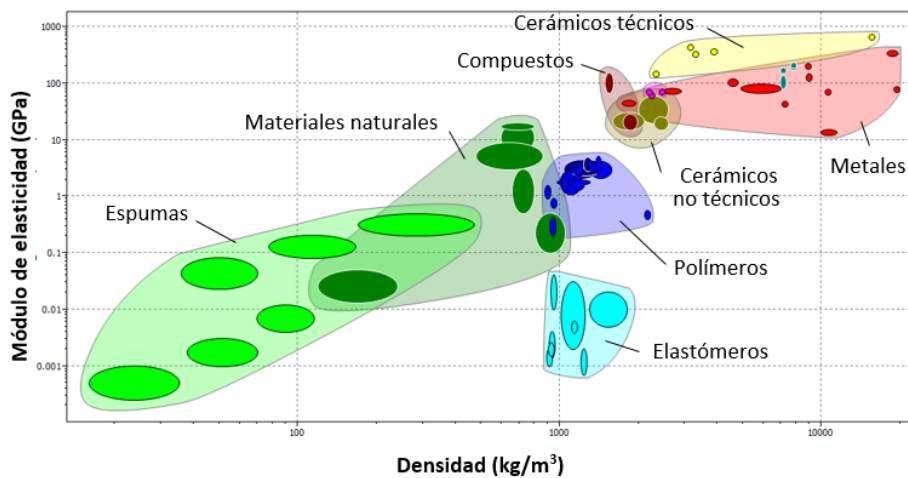


Figura 2.6: Carta de materiales, Módulo de elasticidad - Densidad. (Propia, 2020)

Los materiales compuestos ofrecen la ventaja de poseer altos módulos de rigidez y altas resistencia con un bajo peso, lo que se denomina módulo específico y resistencia específica, esto resulta fundamental para justificar la relación beneficio/costo para la selección de este tipo de material, donde el peso de la estructura resulta crítico para un mejor desempeño del diseño, en la figura 2.6 se presenta un esquema comparativo entre los módulos de algunos materiales respecto a su densidad.

Los materiales compuestos se dividen en tres grupos según su refuerzo: compuestos reforzados con partículas, compuestos reforzados con fibras y compuestos laminados, existiendo para cada una dos subdivisiones como muestra la figura 2.7



Figura 2.7: Clasificación de los materiales compuestos (William & Callister, 2007)

2.5.1. Materiales compuestos reforzados con fibras

Como se evidencia de la figura 2.6, los compuestos reforzados con fibras pueden subdividirse en tres: continuas alineadas, discontinuas alineadas y discontinuas orientadas al azar.

Para el diseño se utilizarán fibras continuas, ya que, una distribución uniforme de la fibra permite obtener mejores propiedades mecánicas del material.

2.5.2. Fase fibrosa

Los refuerzos de fibra son los constituyentes del material compuesto que proporcionan las mejores propiedades mecánicas al elemento, particularmente, una alta resistencia a la tracción y módulo de elasticidad.

La tabla 2.4 adjunta, evidencia las propiedades mecánicas de fibras comúnmente utilizadas en el área de la ingeniería, que se caracterizan por sus diámetros pequeños del orden de 10 micrones.

Fibra	Peso específico	Resistencia a la tracción (10 ³ MPa)	Resistencia específica (10 ⁶ psi)	Módulo elástico (10 ³ MPa)	Módulo específico (10 ⁶ psi)
Aramida (Kevlar 49)	1,4	0,5	0,36	19	13,5
Vidrio E	2,5	0,5	0,2	10,5	4,2
Carbono	1,8	0,25-0,80	0,18-0,57	22-73	15,7-52,1
Óxido de aluminio	3,2	0,3	0,09	25	7,8
Carburo de Silicio	3	0,5	0,17	62	20,7

Tabla 2.4: Propiedades mecánicas de materiales reforzados con fibras (William & Callister, 2007)

2.5.3. Fase matriz

La fase de matriz cumple la función de mantener a la fibra en la disposición predestinada, transferir los esfuerzos hacia el refuerzo y proteger a este del desgaste por abrasión o del medio ambiente.

Entre los materiales utilizados como matriz en los compuestos se destacan los poliméricos termoestables y termoplásticos, los cerámicos y los metálicos.

Los materiales poliméricos termoestables, son comúnmente usados cuando se utilizan como refuerzos fibras continuas, esto debido a su baja viscosidad, que permite un fácil manejo de este en el proceso de manufactura (William & Callister, 2007). Entre estos materiales se destaca la resina epoxica, comúnmente usada en el proceso de fabricación de materiales compuestos. En la tabla 2.5 se presentan sus propiedades mecánicas.

Propiedad	Valor
Densidad (g/cm ³)	1,2-1,3
Esfuerzo de tracción (MPa)	55-130
Módulo de elasticidad (GPa)	2,75-4,10
Coefficiente de Poisson	0,2-0,33
Coefficiente de expansión volumétrica 10 ⁻⁶ C ⁻¹	50-80

Tabla 2.5: Propiedades típicas de resina epoxica a 20°C (William & Callister, 2007)

2.5.4. Proceso de manufactura de materiales compuestos

Existen diversos tipos de procesos de manufactura de materiales compuestos y la selección de este depende de variables, como el nivel de producción deseado, calidad deseada del producto y complejidad de la pieza a fabricar. Se diferencian entre estos procesos dos grandes grupos, técnicas manuales de fabricación, como el laminado manual y la proyección simultánea, y técnicas automatizadas de producción, como moldeo por vía líquida (RTM), moldeo asistido por vacío, pultrusión, bobinado de filamentos y procesos de preimpregnado (PrePeg).

Un correcto proceso de curado del material compuesto resulta preponderante para obtener un material de alta calidad y buen desempeño, por esto, se deben asegurar correctas reacciones químicas del proceso y un adecuado flujo de resina en el molde.

Los factores a considerar para un correcto proceso de fabricación de materiales compuestos son:

- Nivel de curado.
- Viscosidad de la resina.
- Flujo de resina.
- Tiempo de gel.

2.5.4.1. Moldeo asistido por vacío

El proceso de moldeo consiste en hacer fluir a la resina a través del molde sellado con una bolsa de vacío, donde se sitúan las fibras hasta impregnar completamente a estas últimas y conformar el material completando el proceso de curado de la resina. En la figura 2.8, se muestra un esquema explicativo del proceso.

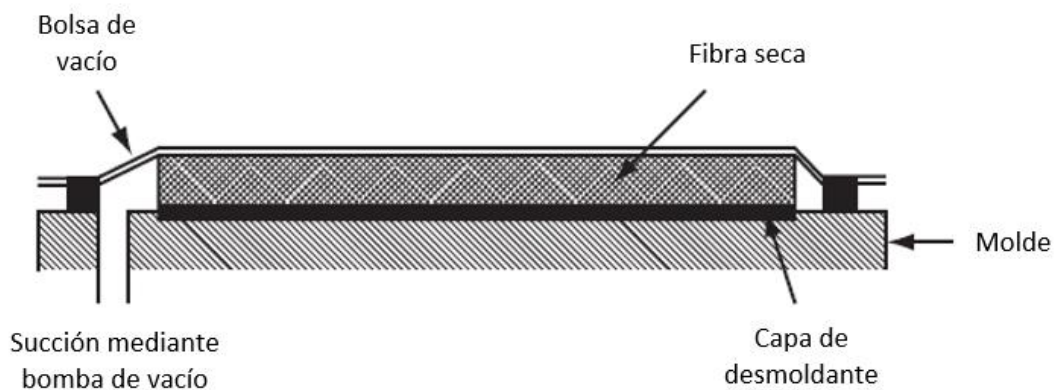


Figura 2.8: Esquema de moldeo asistido por vacío (Peters, 1997)

El proceso inicia extrayendo el aire atrapado dentro del molde y compactando las fibras, asegurando un bajo nivel de humedad, laminado uniforme y una correcta orientación del refuerzo. Posteriormente, la resina fluye a través del molde donde se evidencia un aumento drástico de la temperatura una vez iniciado el proceso de curado, la resina comienza a transformarse en gel pasando a formar la matriz del material compuesto.

2.5.5. Criterios de falla

Los criterios de falla convencionales no son válidos para los materiales compuestos, debido a su naturaleza anisotrópica, por esto, se presenta el criterio de falla de Tsai-Hill, para analizar los esfuerzos que se presentan en la estructura.

2.5.5.1. *Criterio de Tsai-Hill*

El criterio de Tsai-Hill, se basa en la energía de distorsión que considera la interacción de las propiedades mecánicas del material en sus tres direcciones principales (Engblom, 2012). Este propone que, bajo condiciones de esfuerzo plano para laminas unidireccionales, el elemento fallara si la ecuación 2.5 no se cumple.

$$\left[\frac{\sigma_1}{\sigma_{1ultT}} \right]^2 - \left[\frac{\sigma_1 \sigma_2}{(\sigma_{1ultT})^2} \right] + \left[\frac{\sigma_2}{\sigma_{2ultT}} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{12}}{\tau_{12ult}} \right]^2 < 1 \quad (2.5)$$

- Donde:
- σ_1 : Esfuerzo normal engendrado en la dirección de la fibra.
 - σ_2 : Esfuerzo normal engendrado en la dirección transversal de la fibra.
 - τ_{12} : Esfuerzo de corte engendrado en la dirección transversal de la fibra.
 - σ_{1ultT} : Esfuerzo normal último de tracción en la dirección de la fibra.
 - σ_{2ultT} : Esfuerzo normal último de tracción en la dirección transversal de la fibra.
 - τ_{12} : Esfuerzo de corte último en la dirección transversal de la fibra.

Cabe destacar que la teoría no distingue entre esfuerzo de compresión y tracción generados en la lámina, por tanto, esto se traduce en una subestimación de la carga máxima que pueden ser aplicadas en la estructura.

2.6. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos es un método numérico de resolución de problemas comúnmente en el área de la mecánica de sólidos, este es de gran importancia en el área de la ingeniería gracias a su utilidad práctica. Este método permite resolver al diseñador una infinidad de problemas que antes eran imposibles de realizar, sin embargo, el método no proporciona una solución exacta, sino mas bien, posibilita una solución aproximada, que en muchos casos resulta suficiente para la resolución de problemas prácticos (Fraile & Alarcón, 2011).

El método consiste en subdividir el elemento de análisis en pequeñas partes (elementos) interconectados entre sí mediante los nodos de dichos elementos, de esta manera, se logran conocer los desplazamientos en el interior de cada elemento analizando los desplazamientos que sufren los nodos del elemento, para posteriormente, determinar las tensiones y deformaciones en el interior de cada elemento.

En el análisis de un problema utilizando el MEF conoceremos las fuerzas exteriores aplicadas en algunos nodos y/o valores de desplazamientos en otros, tras su aplicación se obtendrá la expresión 2.6.

$$\{F\} = [K] \cdot \{u\} \quad (2.6)$$

Donde: $\{F\}$: Vector de cargas exteriores que actúan sobre el sólido.

$[K]$: Matriz de Rigidez del sistema.

$\{u\}$: vector de desplazamiento de los nodos del modelo.

CAPÍTULO 3.

DISEÑO DEL ARCO Y VALIDACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES.

3.1. FACTORES DE DISEÑO

Los factores a considerar en el diseño del prototipo son: el largo de la cuerda, la relación entre las medidas del cuerpo y las palas, distancia de apertura del arquero y el libraje deseado de las palas.

3.1.1. Distancia de apertura y largo del arco

Existe una relación directa entre el largo del arco y la distancia de apertura del tirador, siendo la primera variable dependiente de la segunda. Para medir la apertura de un deportista se necesita medir la distancia entre la punta de los dedos según la posición mostrada en la figura 3.1 y dividir este valor por el factor 2,5 (Reilly, 2015).



Figura 3.1: Distancia de apertura (Reilly, 2015).

Para el diseño del arco se determinó una apertura de 24 pulgadas. Ahora bien, conocida la apertura del arquero, se presenta la tabla 3.1 donde se sugiere una medida para el largo final del arco con palas montadas sin cuerda. Por tanto, el largo recomendado es de 64 pulgadas.

DISEÑO DEL ARCO Y VALIDACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES.

Distancia de apertura	Largo del arco
Pulgadas	Pulgadas
14-16	48
17-20	54
20-22	58
22-24	62
24-26	64-66
26-28	66-68
28-30	68-70
31>	70-72

Tabla 3.1: Largo sugerido del arco (Archery, 2017)

3.1.2. Relación de distancias entre el cuerpo y las palas

Para establecer una correcta relación entre el cuerpo y palas, la tabla 3.2 adjunta, se establecen combinaciones entre estos componentes para un determinado largo del arco.

Cuerpo	Palas		
	Cortas	Medianas	Largas
23'	64'	66'	68'
25'	66'	68'	70'
27'	68'	70'	72'

Tabla 3.2: Relación cuerpo y palas del arco (Archery, 2017)

Para lograr un largo final del arco de 64', se debe seleccionar un cuerpo de 23' en conjunto de palas cortas.

3.2. DISEÑO DEL ARCO

A partir de los factores mencionados anteriormente, se propone un diseño del cuerpo del arco mostrado en la figura 3.2, en este se aprecian perforaciones donde se ubicará la empuñadura y una sección circular en el frente donde es posible anexar un estabilizador.



Figura 3.2: Diseño cuerpo del arco (Propia, 2020)

Existen zonas donde el cuerpo se encuentra ranurado, esto con el fin de aligerar el peso de este elemento y así propiciar una mejor técnica de tiro.

En cuanto a la unión entre el cuerpo y las palas del arco, existe una perforación en la zona superior e inferior del componente, donde estos interactúan mediante una unión apernada, esta zona se muestra más en detalle en la figura 3.3

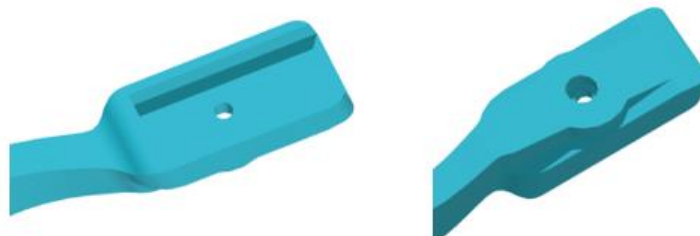


Figura 3.3: Zona de unión entre cuerpo y palas (Propia, 2020).

DISEÑO DEL ARCO Y VALIDACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES.

Para el diseño de las palas del arco, se considera el largo que estas deben tener respecto a la medida estipulada para el cuerpo, para que así, el ensamblaje tenga el largo total deseado. En la figura 3.4 se muestra el diseño de este elemento.



Figura 3.4: Diseño pala del arco (Propia, 2020).

Se consideran agujeros pasantes en la zona inferior para la unión con el cuerpo, y en la sección superior posee una hendidura donde la cuerda del arco es montada, esta última característica se muestra en detalle en la figura 3.5.



Figura 3.5: Detalle hendidura de la pala (Propia, 2020).

3.3. DESPLAZAMIENTO DE LAS PALAS DEL ARCO

Es posible conocer una aproximación de los desplazamientos máximos de las palas bajo condiciones geométricas, en la figura 3.6 se muestra el desplazamiento de las palas desde la condición de reposo del arco hasta la apertura de este, donde L es el largo de la cuerda, D la distancia de apertura y θ el ángulo de la cuerda en el punto de enfleche.

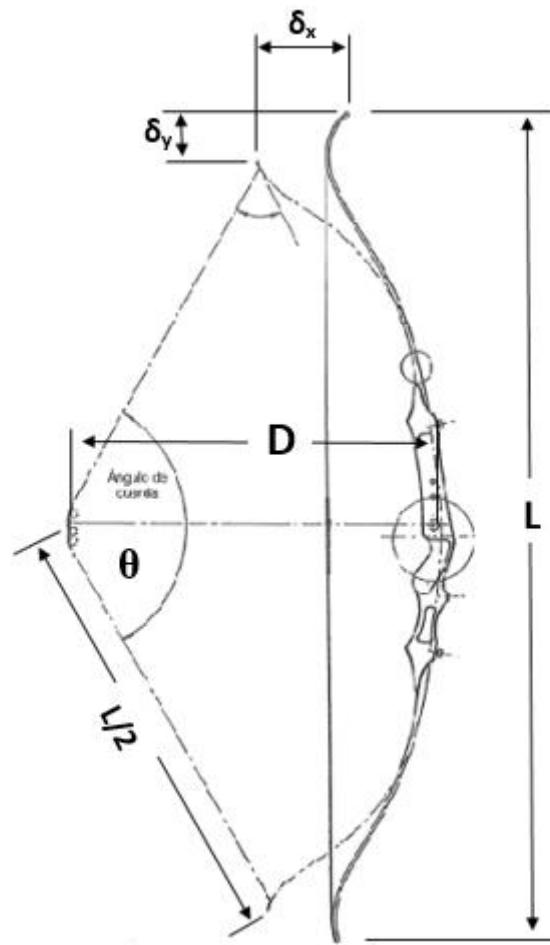


Figura 3.6: Esquema de desplazamiento máximo (Propia, 2020).

El valor del desplazamiento en cada eje coordenado queda definido por la diferencia de las coordenadas del punto en las dos situaciones de análisis, esto según las ecuaciones 3.1 y 3.2.

$$\delta_x = x_2 - x_1 = 175 \text{ mm} \quad (3.1)$$

$$\delta_y = y_2 - y_1 = 20 \text{ mm} \quad (3.2)$$

3.4. ESPESOR DE LAS PALAS

Para conocer una primera aproximación al espesor de las palas del arco se desarrolla la ecuación 2.3, para las sollicitaciones mecánicas del arco.

Considerando que la pala tiene tanto una sección recta como una sección circular, la aplicación del método exigirá la consideración de una carga ficticia vertical Φ_v y una horizontal Φ_h que provocarán consecuentemente desplazamientos verticales δ_{cv} y horizontales δ_{ch} .

Para analizar las condiciones a las que se encuentra sometida la pala del arco, se muestra el diagrama de cuerpo libre de esta en la figura 3.7, bajo el supuesto de que se encuentra empotrada en la sección de unión con el cuerpo del arco.

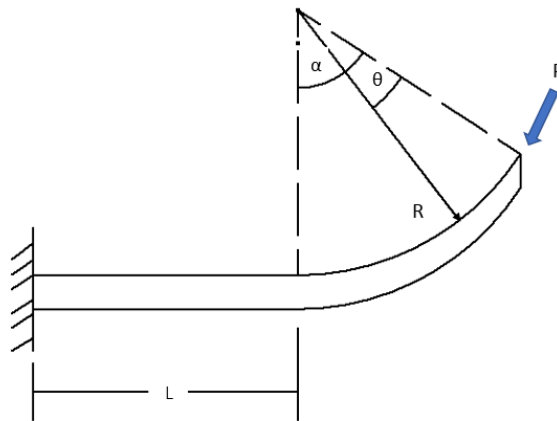


Figura 3.7: DCL pala del arco (Propia, 2020)

A partir del principio de superposición, podemos cortar la viga transversalmente, para luego sumar los efectos y las deflexiones engendradas.

El primer corte se realiza al inicio de la sección circular y se rota el eje coordenado para facilitar el cálculo de los momentos flectores presentes en el análisis. Esto se muestra en la figura 3.8.

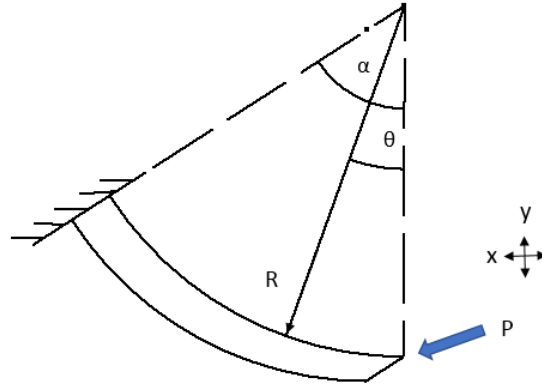


Figura 3.8: DCL sección curva (Propia, 2020).

Para analizar las deflexiones, se debe descomponer la fuerza P en sus dos componentes P_x y P_y , y para cada caso, una fuerza ficticia en la misma dirección. Esto se presenta en las figuras 3.9 y 3.10.

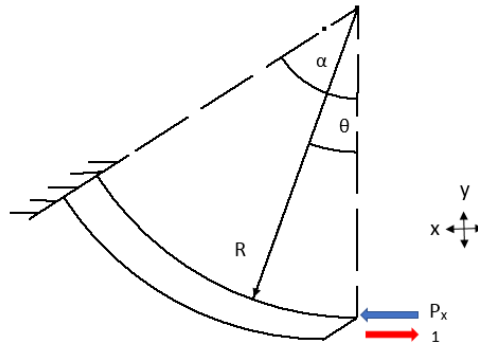


Figura 3.9: DCL sección curva con cargas horizontales (Propia, 2020).

Desarrollando la ecuación 2.4 para el caso propuesto en la figura 3.9, se obtienen las ecuaciones 3.3 y 3.4 para las deflexiones en los dos sentidos de la viga.

$$\begin{aligned} \delta_{x1} &= \frac{1}{EI_z} \int_0^\alpha -P_x R(1 - \cos \theta) \times -R(1 - \cos \theta) \times R d\theta & (3.3) \\ &= -\frac{P_x R^3}{EI_z} \frac{1}{4} (6\alpha - 8 \sin \alpha + \sin \alpha) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\delta_{y1} &= \frac{1}{EI_z} \int_0^\alpha -P_x R(1 - \cos \theta) \times R \sin \theta \times R d\theta & (3.4) \\ &= -\frac{P_x R^3}{EI_z} \left(-\cos \alpha + \frac{\cos \alpha^2}{2} + \frac{1}{2} \right)\end{aligned}$$

Los desplazamientos provocados por la componente vertical de la fuerza aplicada se desarrollan en las ecuaciones 3.5 y 3.6 a partir del esquema presentado en la figura 3.10.

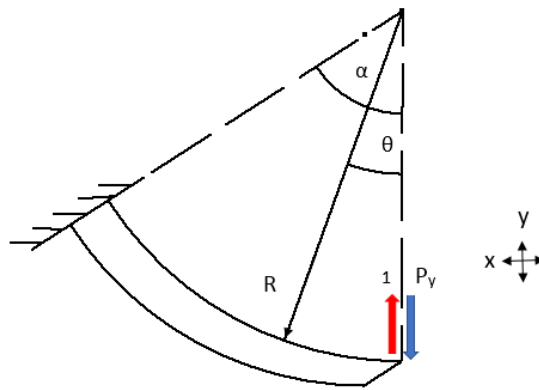


Figura 3.10: DCL sección circular con cargas verticales (Propia, 2020).

$$\begin{aligned}\delta_{x2} &= \frac{1}{EI_z} \int_0^\alpha -P_y R \sin \theta \times R(1 - \cos \theta) \times R d\theta & (3.5) \\ &= -\frac{P_y R^3}{EI_z} \left(-\cos \alpha + \frac{\cos \alpha^2}{2} + \frac{1}{2} \right)\end{aligned}$$

$$\delta_{y2} = \frac{1}{EI_z} \int_0^\alpha -P_x R \sin \theta \times R(1 - \cos \theta) \times R d\theta = -\frac{P_y R^3}{EI_z} \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \quad (3.6)$$

Bajo la condición estática del corte generado, se engendran reacciones y momentos flectores que son transmitidos a la sección recta de la viga, esto según la figura 3.11. Las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9 describen esta situación.

DISEÑO DEL ARCO Y VALIDACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES.

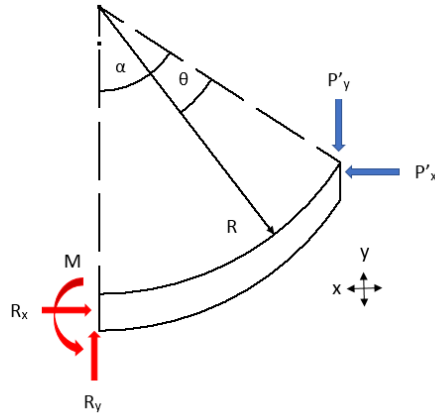


Figura 3.11: DCL sección circular (Propia, 2020).

$$R_x = P'_x \quad (3.7)$$

$$R_y = P'_y \quad (3.8)$$

$$M = P'_y R \sin \alpha + P'_x R (1 - \cos \alpha) \quad (3.9)$$

Las fuerzas y momentos flectores a las que se encuentra sometida la sección recta de la viga se muestran en la figura 3.12.

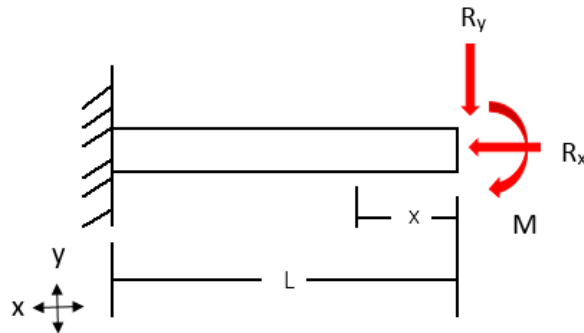


Figura 3.12: DCL sección recta (Propia, 2020).

Para este caso en particular, los desplazamientos horizontales son despreciables, puesto que los verticales son predominantes, por tanto, al considerar una carga vertical ficticia en la dirección positiva, como se muestra en la figura 3.13, la deflexión vertical queda definida bajo la ecuación 3.10.

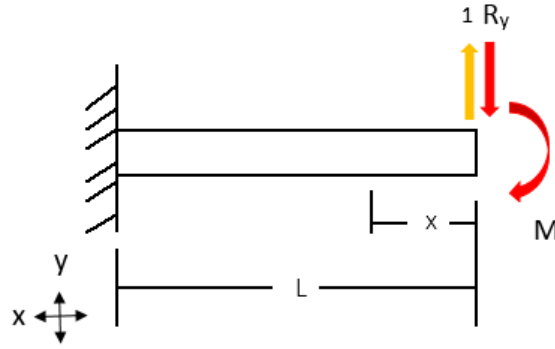


Figura 3.13: DCL sección recta simplificado (Propia, 2020).

$$\begin{aligned} \delta_{y3} &= \frac{1}{EI_z} \int_0^L -P'_x R \sin \alpha x \times P'_x R (1 - \cos \alpha) x \times P'_y x^2 dx & (3.10) \\ &= -\frac{1}{EI_z} \left(-P'_y R \sin \alpha \frac{L^2}{2} - P'_x R (1 - \cos \alpha) \frac{L^2}{2} + P_y \frac{L^3}{3} \right) \end{aligned}$$

Finalmente, se suman los efectos engendrados por las condiciones de operación del elemento, considerando las direcciones de los desplazamientos para cada caso mostrado, presentados en las ecuaciones 3.11 y 3.12.

$$\delta_{xt} = \frac{R^3}{\cos \alpha EI_z} \left[\frac{-P_x}{4} (6\alpha - 8 \sin \alpha + \sin 2\alpha) - P_y \left(-\cos \alpha + \frac{\cos \alpha^2}{2} + \frac{1}{2} \right) \right] \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \delta_{yt} &= \frac{R^3}{\cos \alpha EI_z} \left[-P_x \left(-\cos \alpha + \frac{\cos \alpha^2}{2} + \frac{1}{2} \right) - P_y \left(\frac{\alpha}{2} - \frac{\sin 2\alpha}{2} \right) \right] & (3.12) \\ &+ \frac{1}{EI_z} \left[-P'_y R \sin \alpha \frac{L^2}{2} - P'_x R (1 - \cos \alpha) \frac{L^2}{2} + P_y \frac{L^3}{3} \right] \end{aligned}$$

Aplicando ingeniería inversa, a partir de la ecuación 3.13 se puede conocer la inercia del componente en función de la deflexión en las palas. Esta es considerada como una viga de sección rectangular constante.

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3.13)$$

Donde: I: Momento de inercia de la sección transversal de la viga.

b: Ancho de la viga.

h: Espesor de la viga.

Con un ancho de pala de 35 mm, el espesor aproximado de esta es de 5.5 mm, por tanto, se considerará para la simulación de la pala, un apilamiento de 22 láminas de fibra de vidrio con resina epoxica orientadas a 0°.

3.5. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL ARCO

Definida la geometría de los componentes del arco, se procede a establecer las condiciones para la simulación del diseño y evaluar el comportamiento de este bajo las sollicitaciones de carga en la ejecución de un tiro.

3.5.1. Mallado del arco

Para el mallado del arco se propone un tamaño de elemento para las palas de 2 mm debido a su pequeño espesor, mientras que para el cuerpo el tamaño de elemento será de 5 mm con un refinamiento en la unión que permitirá ajustar los elementos en la zona de contacto. Finalmente, para los pernos se utilizó un tamaño de elemento de 1 mm. En la figura 3.14 se muestra el mallado del cuerpo del arco y en la figura 3.15 se evidencia el refinamiento de los elementos y los elementos de la pala del arco.

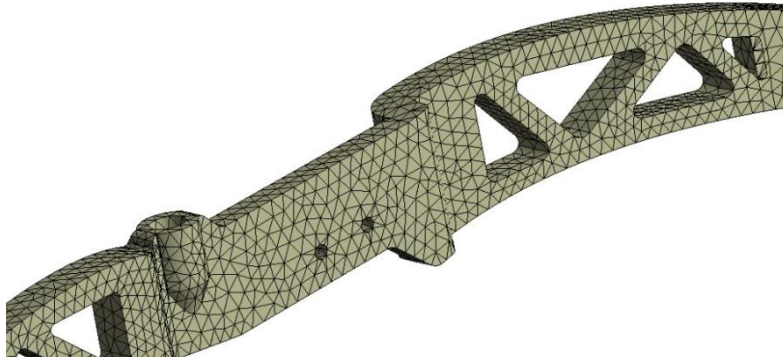


Figura 3.14: Mallado del cuerpo del arco (Propia, 2020).

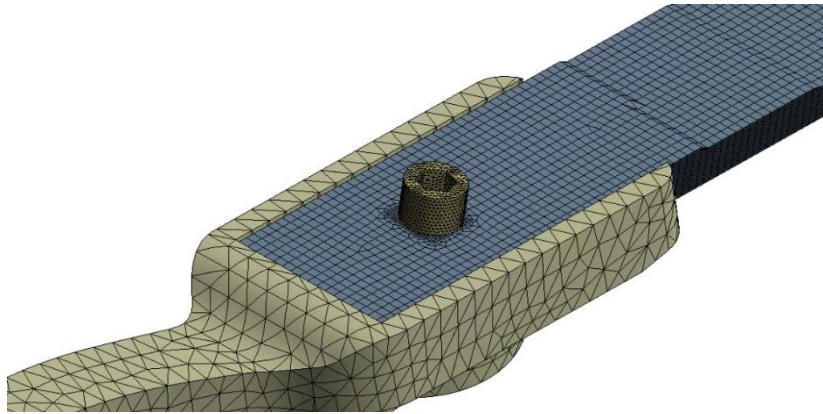


Figura 3.15: Mallado de las palas y detalle de la unión apornada (Propia, 2020).

3.5.2. Contactos entre los elementos.

Para la simulación de las superficies en contacto del ensamble se utilizaron contactos del tipo “Frictional”, que supone una fricción entre los elementos no limitando sus desplazamientos relativos.

Con el objeto de simplificar la simulación, se consideró la unión perno-tuerca como un único elemento, esto quiere decir que la tuerca se encuentra adosada al perno, limitando sus desplazamientos.

3.5.3. Condiciones de borde

Las condiciones de borde del modelo se presentan en la figura 3.16, siendo estas un empotramiento en las perforaciones donde se ubica la empuñadura del arco en el punto C que emula un firme agarre del usuario, limitado así los desplazamientos en aquella zona. Además, la fuerza ejercida por el tirador de 132,77 N en la dirección de la cuerda en las hendiduras de las palas en los puntos D y E.

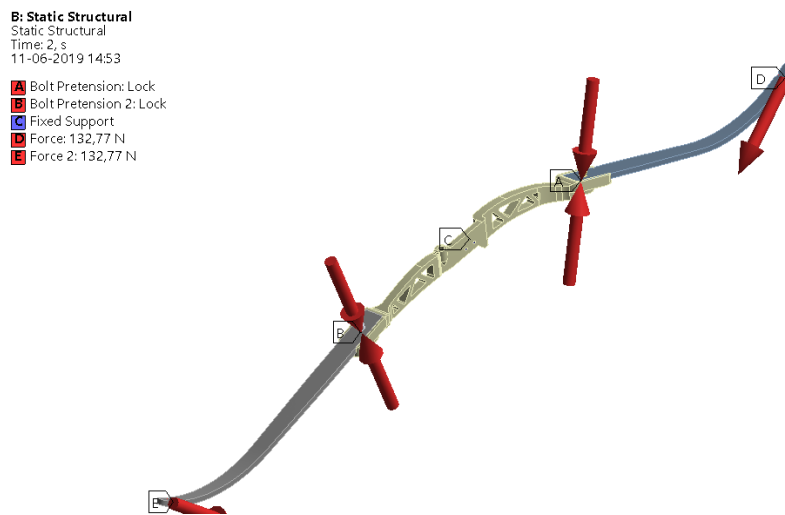


Figura 3.16: Condiciones de borde de la simulación (Propia, 2020).

Para la unión apernada se consideró una pretensión mínima necesaria para mantener unidos a los componentes en los puntos A y B, esta precarga se fija en un valor de 500 N para ambas uniones que permita la no separación entre los componentes sin provocar daños severos en estos mismos, en la figura 3.17 se muestra un corte transversal en la sección de la unión apernada luego de aplicada las cargas, en esta se puede evidenciar un leve desprendimiento.

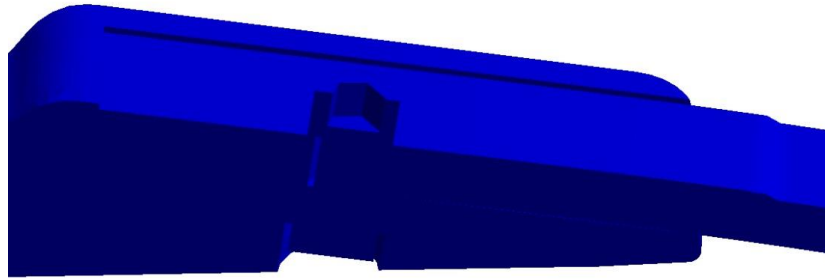


Figura 3.17: Corte de la sección transversal de la unión apernada. (Propia, 2020).

3.6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

3.6.1. Desplazamientos

Bajo las condiciones establecidas en la simulación, se presenta en la figura 3.18 el máximo valor del desplazamiento en la pala, siendo este de 321,48 mm. Dicho valor difiere considerablemente del valor calculado en la ecuación 3.1, debido a que la geometría del modelo en el cálculo no considera el cambio de ancho del diseño 3D, ni tampoco la hendidura donde se monta la cuerda del arco. Por tanto, esta es considerablemente mas rígida que el diseño simulado.

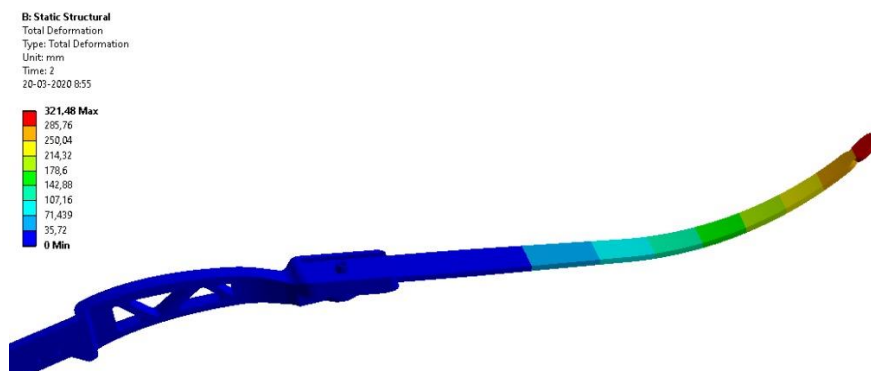


Figura 3.18: Desplazamientos de la pala (Propia, 2020).

3.6.2. Análisis de falla de la pala del arco

El análisis de falla para la pala del arco se realiza en base al criterio de Tsai-Hill, este se presenta en la figura 3.19 y evidencia una gran concentración en la cara inferior del componente, particularmente en la zona de unión de los componentes con un valor máximo de 1.47, lo que se traduce en la falla de la estructura.

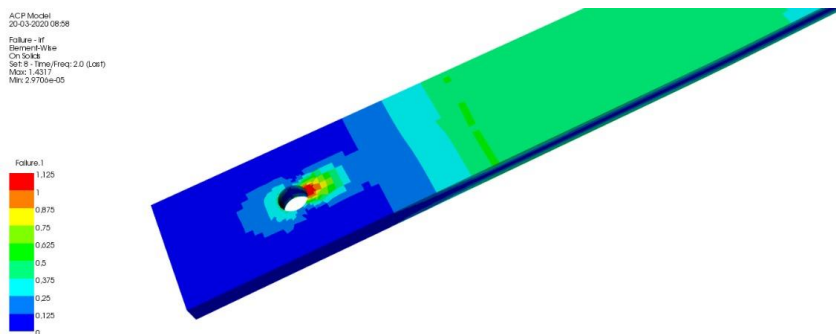


Figura 3.19: Análisis de falla de la pala. (Propia, 2020).

3.7. APILAMIENTO VARIABLE DE LAS PALAS

Debido a que se obtuvo una gran diferencia en la rigidez del modelo matemático y el modelo computacional, se proponen apilamientos variables de la fibra. Esto permitirá aumentar la rigidez del diseño para alcanzar la deseada, y además, asegurar un correcto desempeño del componente bajo las condiciones de carga. En la figura 3.20 se muestra la pala con una propuesta de apilamiento evidenciada en detalle por tramos en la tabla 3.3.

DISEÑO DEL ARCO Y VALIDACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES.

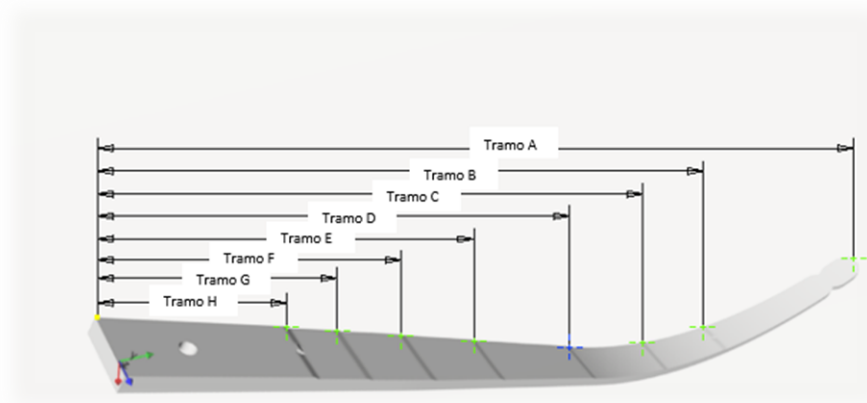


Figura 3.20: Apilamiento variable de la pala (Propia, 2020).

Tramo	Largo de la fibra (mm)	Número de laminas	Espesor por laminado(mm)	Espesor final (mm)
A	570,34	20	5	5
B	422,34	2	0,5	5,5
C	360,27	2	0,5	6
D	290	2	0,5	6,5
E	210	2	0,5	7
F	160	2	0,5	7,5
G	120	2	0,5	8
H	90	4	1	9

Tabla 3.3: Tabulación de número de láminas, largo de fibra y espesores del modelo (Propia, 2020).

3.8. RESULTADOS DE LA SEGUNDA SIMULACIÓN

Bajo las mismas condiciones de borde, contactos y mallado anteriormente expuestos, se realiza esta segunda iteración del modelo propuesto, donde el desplazamiento máximo de la pala es de 170,7 mm, obteniendo así la rigidez deseada en el modelo.

3.8.1. Distribución de esfuerzos

En la figura 3.21 se presenta la zona donde se ubica el esfuerzo máximo en el cuerpo del arco y la distribución de estos en los elementos cercanos utilizando el criterio de falla de Von Mises.

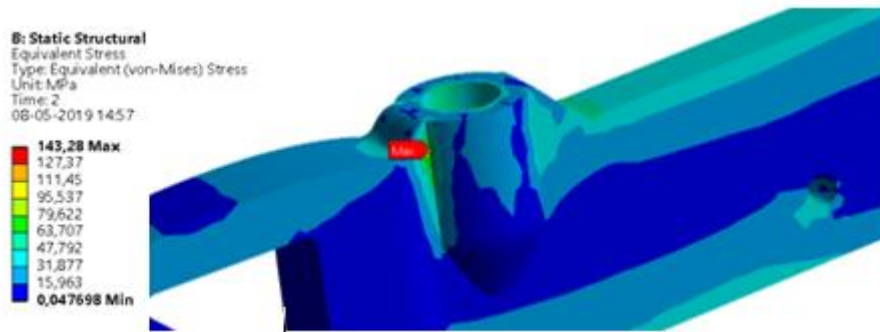


Figura 3.21: Distribución de esfuerzos en el cuerpo. (Propia, 2020).

Para el análisis de falla de la pala se utiliza se presenta la figura 3.22 donde se identifica el esfuerzo máximo en la cara inferior del componente.

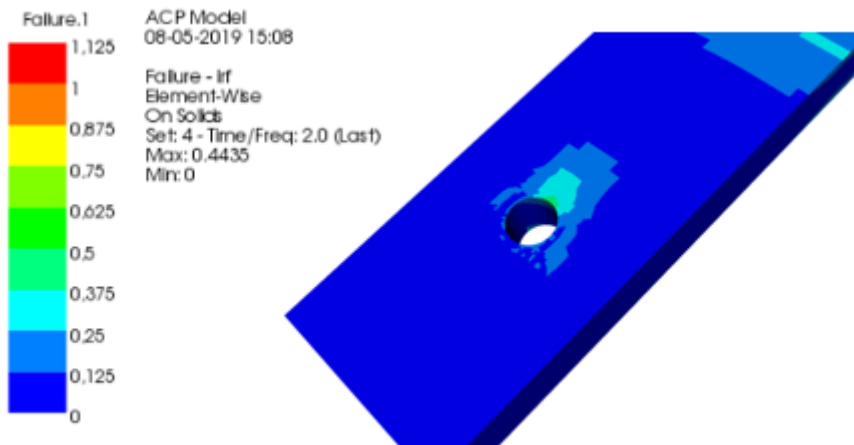


Figura 3.22: Análisis de falla de la pala. (Propia, 2020).

3.8.2. Análisis de resultados

En la tabla 3.4 se presentan los resultados del análisis de falla para cada componente y su factor de seguridad calculado según la ecuación 3.14

$$F = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \quad (3.14)$$

Donde: F: Factor de seguridad.

S_y : Esfuerzo de fluencia.

σ_{max} : Esfuerzo máximo.

Componente	Esfuerzo máximo	Esfuerzo de fluencia	Factor de seguridad
Pala del arco	0,44	1,25	2,84
Cuerpo del arco	88 MPa	280 MPa	3,2
Perno de unión	128,88 MPa	600MPa	4,7

Tabla 3.4: Tabla de resultados de esfuerzo máximo y factor de seguridad. (Propia, 2020).

Como se evidencia en la tabla 3.4, ninguno de los componentes analizados presentara fallas bajo las condiciones de carga del diseño ya que cada componente tiene un gran factor de seguridad que fideliza el desempeño del modelo.

3.9. PROCESO DE MANUFACTURA DE LAS PALAS

El proceso de manufactura a utilizar para estos componentes es la infusión mediante bomba de vacío, en la figura 3.23 se muestra el montaje utilizado para la fabricación, donde se destaca el molde de fabricación, la bomba de vacío y la trampa de resina como componentes principales del proceso.

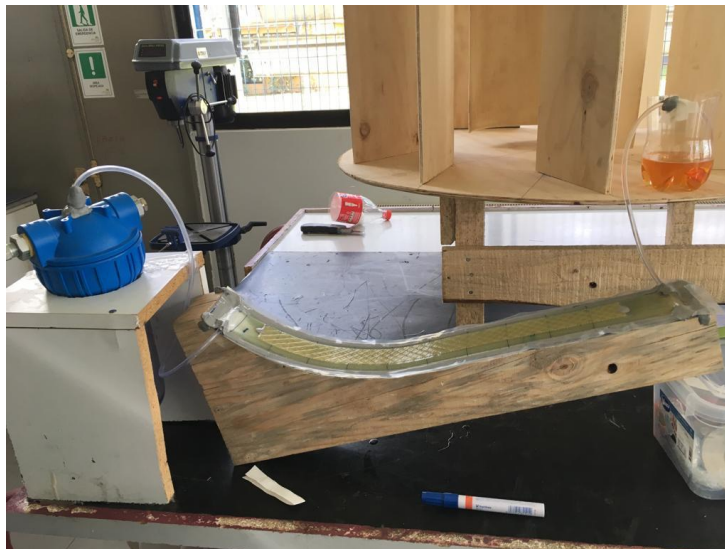


Figura 3.23: Manufactura de las palas del arco (Propia, 2020).

Posterior a esto, se procede al curado de la pieza mediante un horno de inducción, para finalmente realizar el mecanizado del componente para dar la forma deseada. en la figura 3.24, se muestra el prototipo del modelo terminado.

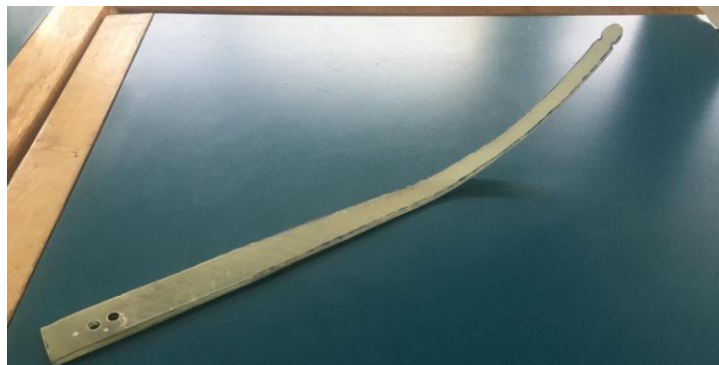


Figura 3.24: Prototipo de pala del arco (Propia, 2020).

3.10. VALIDACIÓN DE LA RIGIDEZ DE LAS PALAS

Para la validación de las palas del arco, se requiere realizar un ensayo que sea homologable con una simulación computacional, para así, comparar los resultados y evaluar el error asociado entre el prototipo y el modelo simulado.

3.10.1. Ensayo físico

Se confecciona un banco de ensayo presentado en la figura 3.25, donde se une la pieza fabricada con un perno en la zona izquierda y en la punta del elemento se aplican cargas verticales. Se miden los desplazamientos con la ayuda de un papel milimétrico.

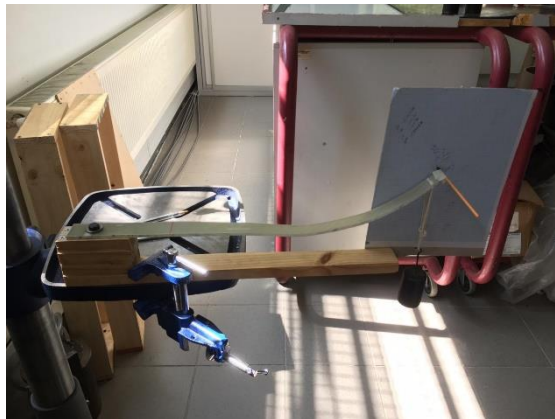


Figura 3.25: Banco de ensayo de flexión (Propia, 2020).

3.10.2. Ensayo computacional

El ensayo es replicado en el software para posterior analizar los resultados. Las condiciones de borde se muestran en la figura 3.26, donde A es la pretensión del perno, B es un empotramiento que simula la fijación del ensayo y C es la fuerza de las masas aplicada verticalmente.

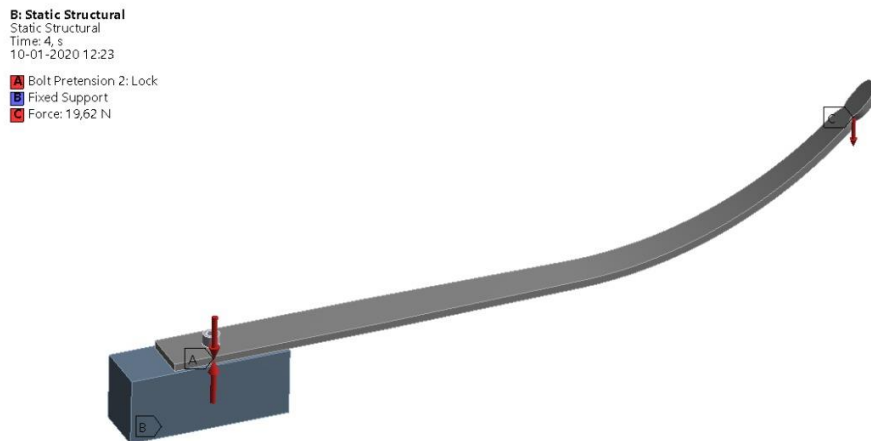


Figura 3.26: Condiciones de borde del ensayo de flexión (Propia, 2020).

3.10.3. Comparación de resultados

Los resultados obtenidos en ambos ensayos son tabulados y se calcula para ambos casos una rigidez estimada a partir de la ecuación 3.15.

$$K = \frac{F}{d} \quad (3.15)$$

Donde: K: Rigidez estimada.

F: Carga aplicada.

d: Desplazamiento vertical.

DISEÑO DEL ARCO Y VALIDACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES.

Además, se calculan los errores asociados a los resultados de la rigidez para cada caso, esto según la ecuación 3.16.

$$e = \frac{|K_{sim} - K_{prot}|}{K_{prot}} \quad (3.16)$$

Donde: e: Error porcentual.

K_{sim} : Rigidez estimada simulación.

K_{prot} : Rigidez estimada prototipo.

Los resultados obtenidos y calculados se presentan en la tabla 3.5 adjunta.

Carga Aplicada (Kg)	Simulación		Prototipo		Error
	Desplazamiento vertical (mm)	Rigidez estimada (N/mm)	Desplazamiento vertical (mm)	Rigidez estimada (N/mm)	
0,5	6,0584	0,810	27,52	0,1782	354%
1	12,238	0,802	56,5	0,1736	362%
1,5	18,547	0,793	90,4	0,1628	387%
2	24,986	0,785	127,63	0,1537	411%

Tabla 3.5: Tabla comparativa de resultados simulación-prototipo (Propia, 2020).

Del análisis de los resultados obtenidos se evidencia una gran diferencia entre el diseño computacional y el prototipo fabricado, esto se debe principalmente a la variación de espesores entre ambos modelos, donde el primero tiene un espesor por lámina de fibra de vidrio de 0,25 mm, conocido por la medición de espesores de probetas antes fabricadas con los mismos materiales y metodologías, mientras que el prototipo tiene 0,15 mm de espesor por lámina, esto que afecta directamente al momento de inercia del elemento, y consecuentemente, su rigidez.

DISEÑO DEL ARCO Y VALIDACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES.

Dicha variación se debe a que la medición del espesor por lámina fue realizado en probetas que tenían un espesor aproximado de 1,5 mm, mientras que el prototipo fabricado posee un espesor real de 6 mm, por tanto, en la fabricación por infusión al vacío, el espesor por capa de material depende del número de láminas utilizadas para la fabricación del componente.

Por tanto, se propone un nuevo modelo computacional bajo las mismas condiciones, pero con la corrección del espesor por capa de material. Los nuevos resultados de este análisis se muestran en la tabla 3.6.

Carga Aplicada (Kg)	Simulación		Prototipo		Error
	Desplazamiento vertical (mm)	Rigidez estimada (N/mm)	Desplazamiento vertical (mm)	Rigidez estimada (N/mm)	
0,5	24,641	0,199	27,52	0,178	12%
1	51,021	0,192	56,5	0,174	11%
1,5	78,79	0,187	90,4	0,163	15%
2	107,21	0,183	126,56	0,155	18%

Tabla 3.6: Tabla comparativa de resultados simulación-prototipo con espesores corregidos (Propia, 2020).

El error asociado entre los modelos analizados disminuyó significativamente gracias a la corrección de los espesores realizados, siendo el valor promedio de este un 14%. Dicha errata se debe principalmente a factores como: cortes desiguales en el prototipo, falla en el proceso de fabricación, diferencias en la orientación de la fibra, no impregnación de toda la fibra, burbujas de aire presentes en el prototipo, desproporción en el largo de la sección curva y recta del diseño y cambios de sección asimétricos.

Dado que el diseño corregido no cumple con la rigidez solicitada debido a la corrección en el espesor por lámina mostrado con anterioridad, se debe realizar una tercera iteración en el diseño.

3.11. NUEVA PROPUESTA DE APILAMIENTO

Para la tercera iteración de diseño se propone un nuevo apilamiento para lograr la rigidez en las palas de 35 lb. La tabla 3.7 determina la cantidad de láminas de fibra por cada uno de estos a partir de los tramos definidos en la figura 3.3.

Tramo	Largo de la fibra (mm)	Número de laminas	Espesor por laminado(mm)	Espesor final (mm)
A	570,34	32	4,8	4,8
B	422,34	3	0,45	5,25
C	360,27	4	0,6	5,85
D	290	4	0,6	6,45
E	210	4	0,6	7,05
F	160	4	0,6	7,65
G	120	4	0,6	8,25
H	90	5	0,75	9

Tabla 3.7: Tabulación del número de láminas, largo de fibra y espesores del rediseño (Propia, 2020).

3.12. RESULTADOS DE LA TERCERA SIMULACIÓN

Bajo las mismas condiciones de borde, mallado y contactos presentados con anterioridad, se procede a analizar el nuevo apilamiento propuesto, obteniendo un desplazamiento máximo de 175,9 mm.

3.12.1. Distribución de esfuerzos

En la figura 3.27 se presenta la distribución de esfuerzos en la zona crítica del cuerpo del arco.

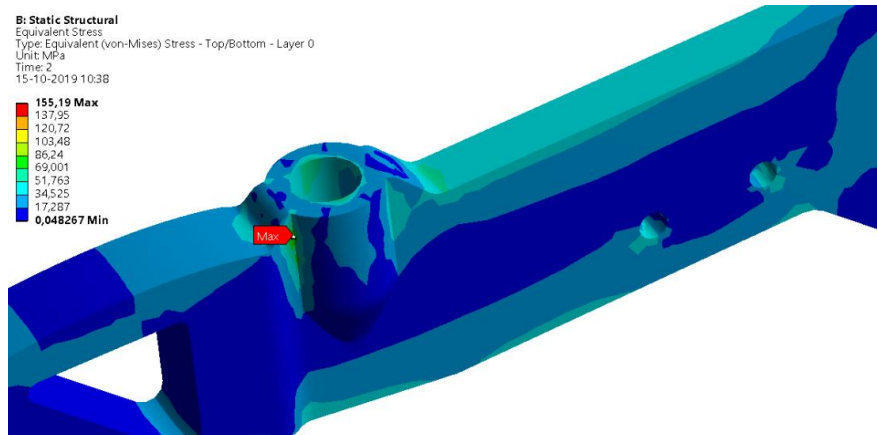


Figura 3.27: Distribución de esfuerzos en el cuerpo. (Propia, 2020).

El análisis de falla para la pala del arco se muestra en la figura 3.28, donde el máximo para este criterio se encuentra en la cara inferior del modelo.

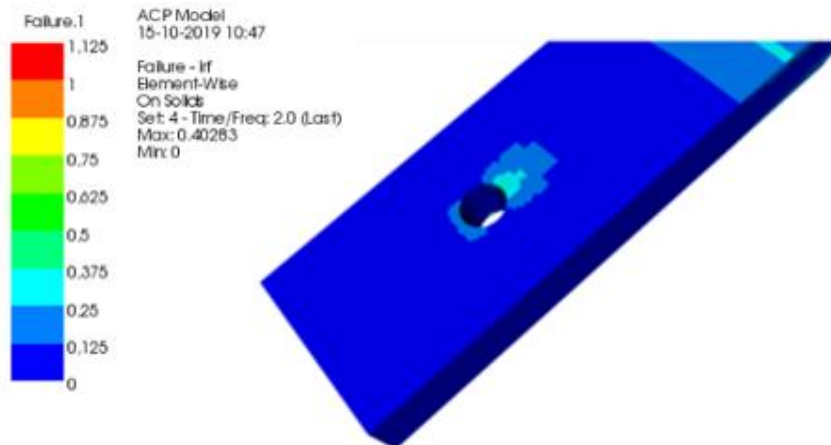


Figura 3.28: Análisis de falla en la pala. (Propia, 2020).

3.12.2. Análisis de resultados

Los resultados para los esfuerzos máximos y el factor de seguridad para cada componente se presentan en la tabla 3.8, donde los valores son levemente mayores respecto a la iteración anterior.

Componente	Esfuerzo máximo	Esfuerzo de fluencia	Factor de seguridad
Pala del arco	0,4	1,25	2,5
Cuerpo del arco	92,5 MPa	280 MPa	3,9
Perno de unión	155,19 MPa	600MPa	3,9

Tabla 3.8: Tabla de resultados de esfuerzo máximo y factor de seguridad (Propia, 2020).

3.13. FALLAS EN FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

El nuevo apilamiento propuesto resulta inviable de prototipar con los materiales dispuesto en el laboratorio. El principal factor de falla de fabricación fue la no impregnación completa de las láminas, donde se diferencian dos tipos de estas.

3.13.1. Falla por no impregnación en láminas inferiores

Utilizando el mismo método de fabricación que en el prototipo anterior, mostrado en la figura 3.23, se presenta la falla por no impregnación de las láminas inferiores del apilamiento, debido a la gran cantidad de láminas de este modelo. Este tipo de falla se muestra en la figura 3.29.



Figura 3.29: Falla de fabricación por no impregnación en laminas inferiores (Propia, 2020).

3.13.2. Falla por no impregnación en láminas intermedias

Debido a las fallas presentadas en la técnica antes mencionada, se realizó la inyección de resina en ambos costados y la extracción por el centro de la pieza. Además, para asegurar la impregnación en las láminas inferiores, se añadió mosquetero en dicha zona. El montaje se muestra en la figura 3.30.

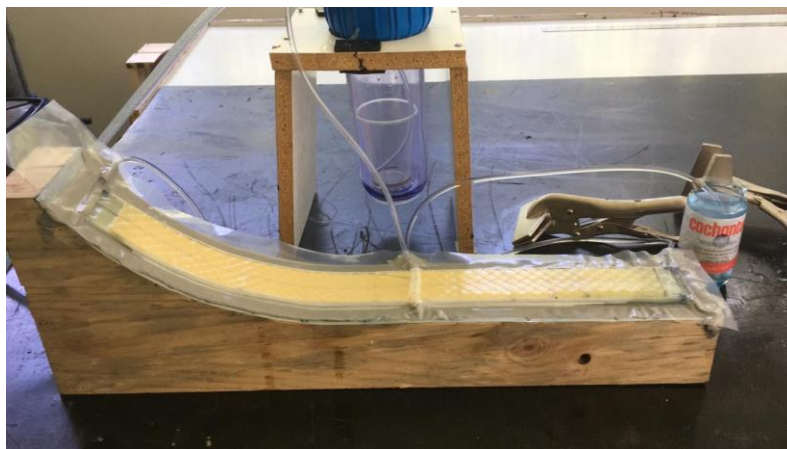


Figura 3.30: Infusión por vacío con inyección por ambos costados y extracción central (Propia, 2020).

Esta metodología resultó ineficaz, puesto que la resina impregno solo de forma superficial a las láminas de fibra en las zonas superior e inferior, no así en las capas de la zona central como muestra la figura 3.31.

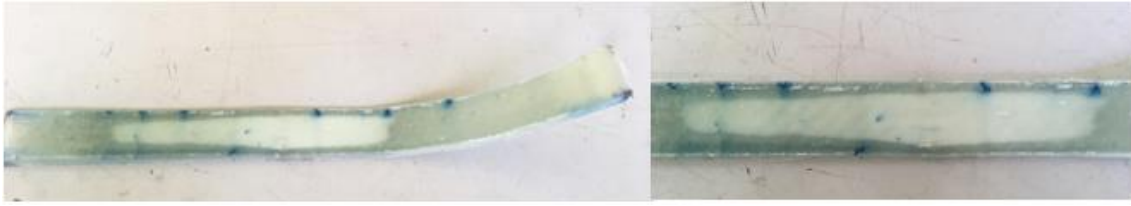


Figura 3.31: Falla de fabricación por no impregnación en láminas intermedias (Propia, 2020).

Dados los inconvenientes en la fabricación del prototipo, se procede a una reevaluación del modelo propuesto disminuyendo la rigidez del diseño y simplificando el apilamiento de este, para que así, el flujo de resina logre impregnar las fibras con mayor facilidad.

3.14. COMENTARIOS

El cálculo manual desarrollado para una primera aproximación en el espesor de la pala del arco resulta ser ineficaz y poco asertivo, puesto que, los resultados obtenidos en la simulación computacional poseen una rigidez notoriamente menor. Si bien, era de esperar variaciones en los resultados, debido a la no consideración de un ancho variable del componente ni agujero de sujeción de este ni tampoco de la hendidura en el extremo, las diferencias resultaron ser abismales, lo que conllevó a utilizar una metodología más empírica e iterativa.

El error de definir un espesor por lamina mayor en la simulación que en el prototipo fabricado, presentó variaciones en la rigidez de ambos modelos, esto debido a que el momento de inercia para cada uno de estos depende directamente del grosor de la estructura.

El utilizar demasiadas láminas de fibra para la fabricación del tercer modelo simulado sin contar con una resina epoxica de baja densidad que permitiese infiltrarse de mejor manera en las fibras, produjo fallas por no impregnación en la manufactura del prototipo.

DISEÑO DEL ARCO Y VALIDACIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES.

Considerando los errores cometidos y la experiencia adquirida en las iteraciones anteriores, tanto en la simulación computacional del modelo como en el proceso de fabricación del arquetipo, se procede por un diseño final menos rígido y sometido a cargas menores que asegure una correcta manufactura.

CAPÍTULO 4.

DISEÑO FINAL Y VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO.

4.1. ANALISIS DE VISCOSIDAD

Se realiza un análisis de viscosidad a temperatura ambiente de la resina y el endurecedor utilizados en la fabricación, para así, tomar una decisión respecto a la viabilidad de la manufactura de una nueva propuesta. Los resultados de la experiencia se muestran en la tabla 4.1 adjunta.

Material	Viscosidad (mPa·s)
Resina epoxica	952,1
Endurecedor	138,5

Tabla 4.1: Análisis de viscosidad de la resina epoxica disponible (Propia, 2020).

Una resina para infusión por vacío debe tener una viscosidad aproximada de 200 mPa·s para asegurar una correcta impregnación de la fibra, este factor es aún más preponderante cuando la cantidad de láminas a utilizar es elevada.

4.2. LIBRAJE DEL MODELO

Se procede a disminuir el libraje del arco a 25 lb, para así, aminorar la rigidez necesaria en las palas, y consecuentemente, el número de láminas necesarias para alcanzar dicho factor.

Reemplazando el nuevo valor de la fuerza requerida para alcanzar la condición de apertura en la ecuación 2.2, se establece que la tensión transmitida hacia la cuerda es de 85,85 N.

4.3. APILAMIENTO DEL MODELO

Tomando como consideración primordial las experiencias en fabricaciones pasadas, el apilamiento propuesto es más simple y con un número de láminas menor que asegure una correcta impregnación en todas estas, éste consta de 38 capas de fibra de vidrio, resultando un espesor de 5.7 mm.

4.4. SIMULACIÓN DEL DISEÑO FINAL

Para esta simulación el mallado y las condiciones de borde son idénticas a las pruebas anteriores, sin embargo, la carga aplicada en los puntos D y E presentadas en la figura 3.16 es ahora de 85,85 N en la dirección de la cuerda.

4.4.1. Desplazamientos

En la figura 4.1, se muestran los desplazamientos de la pala del arco, siendo el valor máximo de 180,02 mm en la dirección vertical en la zona superior del elemento.

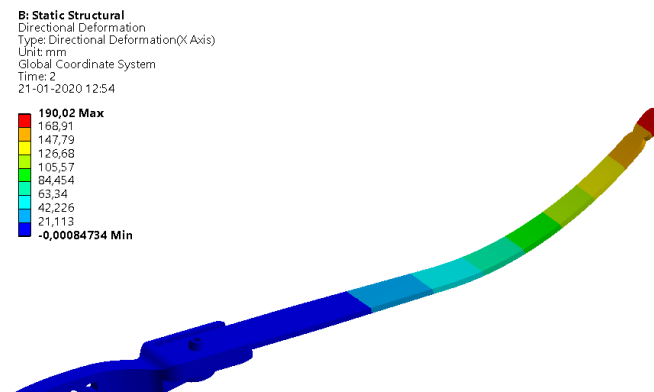


Figura 4.1: Desplazamientos de la pala de 25 lb (Propia, 2020).

4.4.2. Distribución de esfuerzos

4.4.2.1. Criterio de Von Mises

En las figuras 4.2 y 4.3, se presentan los resultados del criterio de falla de Von Mises para el cuerpo del arco.

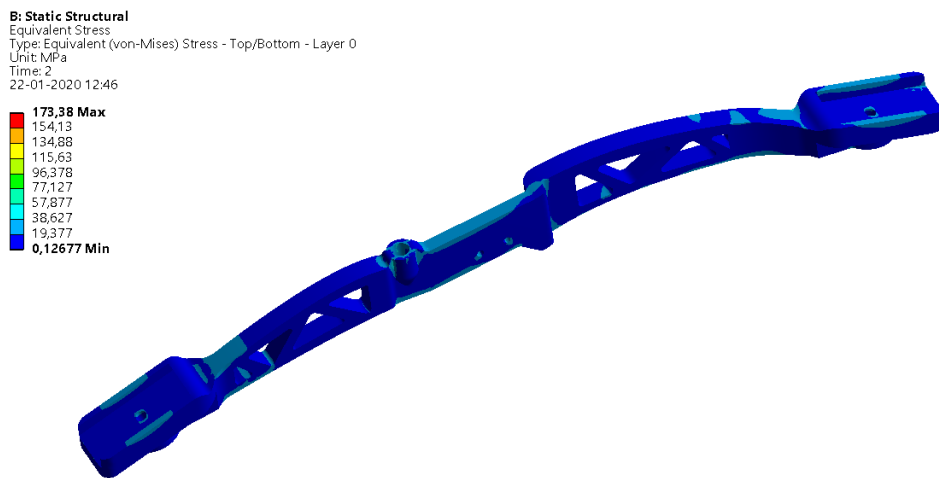


Figura 4.2: Distribución de esfuerzos en el cuerpo, vista anterior (Propia, 2020).

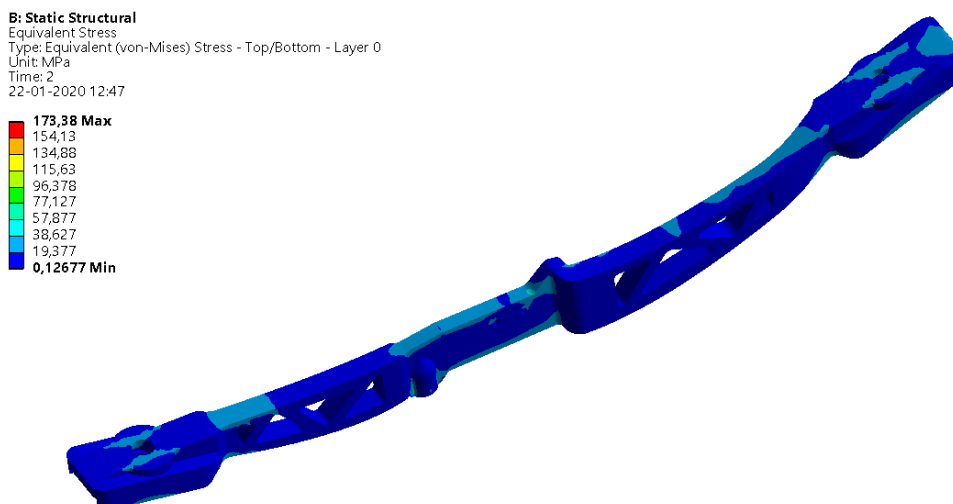


Figura 4.3: Distribución de esfuerzos en el cuerpo, vista posterior (Propia, 2020).

DISEÑO FINAL Y VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO.

La zona donde se ubica el mayor esfuerzo se presenta en la figura 4.4, siendo su valor de 52,459 MPa. Éste se debe al cambio de sección que se presenta y al agujero donde se ubica el estabilizador. Ambos factores son altos concentradores debido al cambio de dirección de las líneas de esfuerzos en el componente.

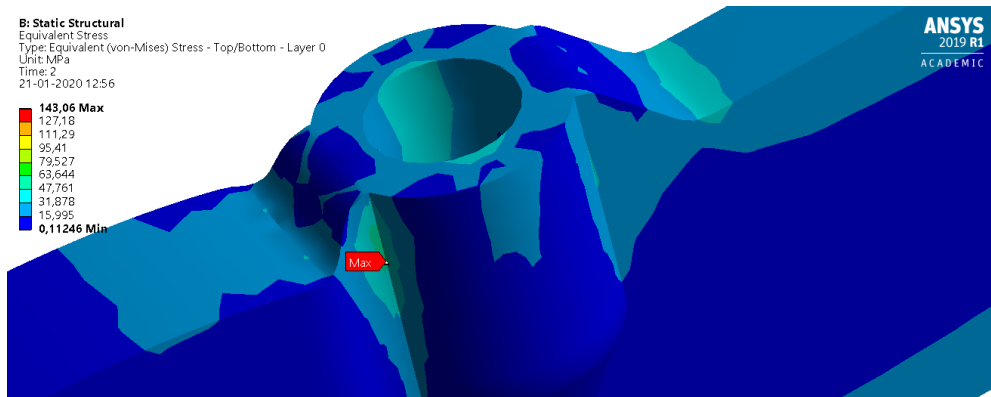


Figura 4.4: Ubicación del valor del esfuerzo máximo en el cuerpo. (Propia, 2020).

Para los pernos de unión, se presenta la figura 4.5, donde se muestra la distribución de esfuerzos en estos elementos, donde el valor máximo equivale a 146.06 MPa.

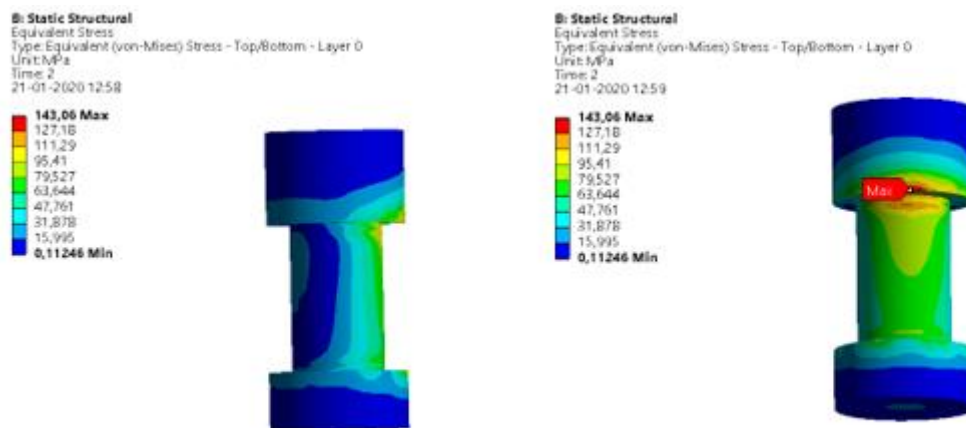


Figura 4.5: Distribución de esfuerzos en pernos. (Propia, 2020).

La concentración de esfuerzos que se evidencia en este elemento es producto del efecto de palanca que ejerce la pala sobre el perno debido a tendencia de desprendimiento entre la pala y el cuerpo que se mostró en la figura 3.17. Éste fenómeno provoca que el perno se tienda a flectar, engendrando así, esfuerzos de mayores a un costado de este elemento, como se evidencia en la vista lateral de la figura 4.5.

4.4.2.2. Criterio de Tsai-Hill

El análisis de falla de las palas del arco, a partir del criterio de Tsai-Hill, se presentan en las figuras 4.6 y 4.7.

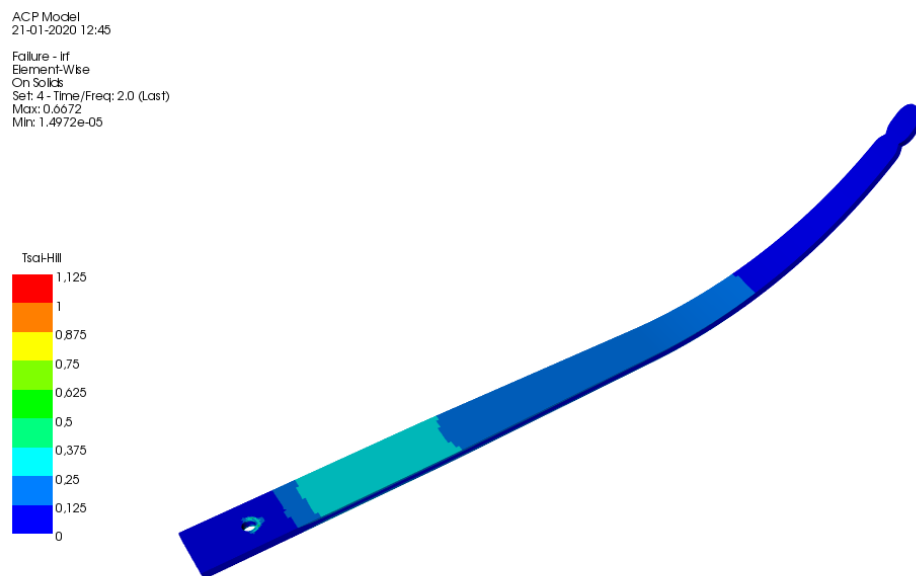


Figura 4.6: Análisis de falla en las palas, vista anterior. (Propia, 2020).

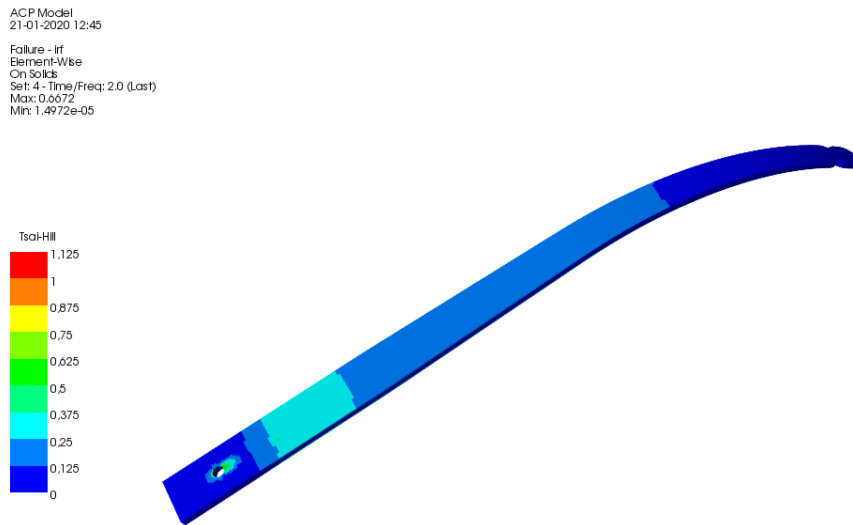


Figura 4.7: Análisis de falla en las palas, vista posterior. (Propia, 2020).

En la figura 4.8, se muestra el detalle donde se ubica el esfuerzo máximo en la cara inferior de la pala. El valor máximo presente en el componente es de 0,67.

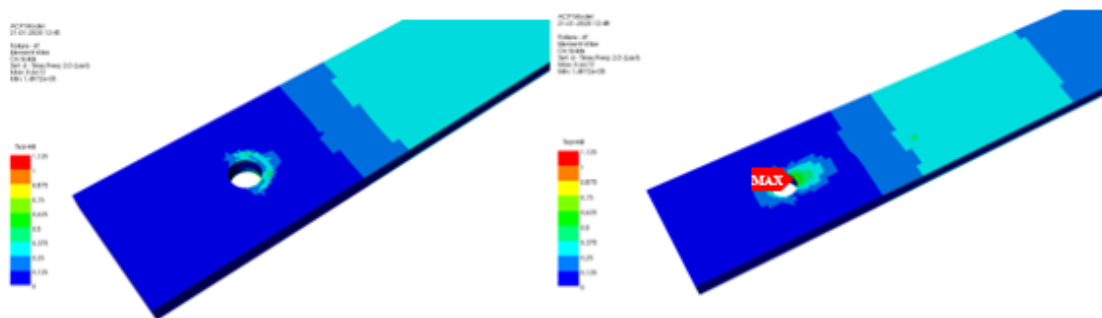


Figura 4.8: Ubicación de valor máximo del factor de falla en las palas. (Propia, 2020).

Los mayores esfuerzos presentes en la pala se deben a la presión que ejerce el perno sobre esta para la sujeción de los componentes y a la concentración de esfuerzos intrínseca que una discontinuidad como un agujero engendra en una estructura.

4.5. FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO

En base a los resultados obtenidos con las distintas técnicas de fabricación por infusión la vacío, se concluyó que la que obtuvo mejor resultado fue la primera, inyectando resina por un costado y extrayendo por el otro, además de utilizar mosqueteros por la zona superior e inferior de la pieza. El montaje para esta manufactura es idéntico al mostrado en la figura 3.23.

Luego del proceso de post-curado y mecanizado de la pieza, se muestra en la figura 4.9 el nuevo prototipo de la pala del arco.



Figura 4.9: Prototipo de pala de 25 lb (Propia, 2020).

4.6. VALIDACIÓN DE LAS PALAS DEL ARCO

Se utiliza el mismo banco de ensayo presentado en la figura 3.25 y se comparan los resultados con los obtenidos por la simulación numérica bajo las mismas condiciones mostradas en la figura 3.26.

Se calculan los parámetros descritos en las ecuaciones 3.15 y 3.16, donde se determina la rigidez del modelo y el error asociado respectivamente. Los datos obtenidos en cada ensayo son tabulados y se presentan en la tabla 4.2 adjunta.

DISEÑO FINAL Y VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO.

Carga Aplicada (Kg)	Simulación		Prototipo		Error
	Desplazamiento vertical (mm)	Rigidez estimada (N/mm)	Desplazamiento vertical (mm)	Rigidez estimada (N/mm)	
0,5	10,1	0,486	11,1	0,4419	10%
1	20,47	0,479	25,3	0,3877	24%
1,5	31,13	0,473	38,7	0,3802	24%
2	42,01	0,467	53,5	0,3667	27%

Tabla 4.2: Tabla comparativa de resultados simulación-prototipo (Propia, 2020).

Al igual que en el primer prototipo fabricado, existe diferencias entre el espesor por lámina del modelo computacional respecto al fabricado, siendo el primero de un espesor por lamina de 0,15 mm, mientras que el segundo un espesor de 0,14 mm. Por tanto, se propone la tabla de resultados 4.3, donde se corrige dicho factor.

Carga Aplicada (Kg)	Simulación		Prototipo		Error
	Desplazamiento vertical (mm)	Rigidez estimada (N/mm)	Desplazamiento vertical (mm)	Rigidez estimada (N/mm)	
0,5	10,93	0,448	11,1	0,442	1%
1	22,2	0,441	25,3	0,388	14%
1,5	33,77	0,435	38,7	0,380	14%
2	45,552	0,430	53,5	0,367	17%

Tabla 4.3: Tabla comparativa de resultados simulación-prototipo con espesores corregidos (Propia, 2020).

El error asociado en esta validación tiene un valor promedio de 15%, levemente mayor al modelo anterior. La variación entre los resultados computacionales respecto a los experimentales se debe a factores como los antes mencionados, y además, a que en el prototipado de este modelo se presentaron fallas por delaminación producto del mecanizado de la pieza y de los ensayos realizados a esta. En la figura 4.10 se muestra la falla del arquetipo.

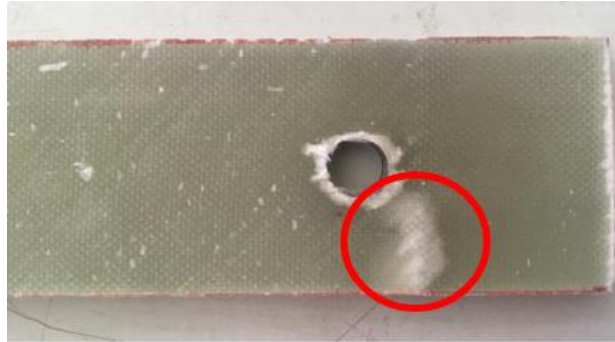


Figura 4.10: Falla de delaminación en el prototipo (Propia, 2020).

En la vista lateral del prototipo que se muestra en la figura 4.11, se evidencia una desviación de la fibra, esto se debe a que para la fabricación de este modelo se utilizó mosquetero por ambos costados, lo que tuvo como consecuencia este defecto de fabricación que influyó en la falla por delaminación mostrada en la figura 4.10.



Figura 4.11: Defecto de fabricación en el prototipo (Propia, 2020).

4.7.COMENTARIOS

Los resultados de la simulación y el cálculo del factor de seguridad para cada componente en el diseño final se presentan en la tabla 4.4 adjunta, de la cual se puede inferir que todos los elementos del modelo cumplen con las sollicitaciones de carga con un amplio factor de seguridad, lo que asegura un correcto desempeño del diseño.

DISEÑO FINAL Y VALIDACIÓN DEL PROTOTIPO.

Componente	Esfuerzo máximo	Esfuerzo de fluencia	Factor de seguridad
Pala del arco	0,67	1,25	1,87
Cuerpo del arco	52,459 MPa	280 MPa	5,3
Perno de unión	146,06 MPa	600MPa	4,12

Tabla 4.4: Tabla de resultados de esfuerzo máximo y factor de seguridad (Propia, 2020).

Del análisis de resultados realizados, se puede inferir que el último prototipo presentado cumple con los requerimientos mecánicos solicitados, con un porcentaje de error promedio respecto a la simulación computacional de un 15%, una rigidez promedio de 0,394 (N/mm) y un factor de seguridad teórico de 1,87.

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES

5.1. CONCLUSIONES

El proceso de diseño de componentes mecánicos siempre es de carácter iterativo, esto se ve reflejado en el desarrollo de este proyecto, el cual inicia con un cálculo manual que no coincide con resultados computacionales, y estos últimos a su vez, no se condicen con los resultados obtenidos en los ensayos experimentales del prototipo. Siempre existe un margen de error entre los modelos analizados, debido a esto, como ingenieros debemos encontrar los orígenes de dichos errores para aminorar o al menos comprender a que se deben, para así, proponer nuevas propuestas de diseño que permitan mejorar el desempeño de éste, ya sea, cambiando la geometría el modelo, considerando otro tipo de material para la fabricación o utilizando diferentes metodologías de manufactura, discretizando sobre cual proceso de rediseño es el más idóneo.

Un 15% de error promedio se considera como aceptable para la validación del prototipo considerando que dicho valor se presenta debido principalmente a fallas en la fabricación del prototipo, desde los procedimientos de moldeo hasta el posterior mecanizado. A partir de esto, se puede concluir que la metodología de fabricación utilizada permite la replicabilidad de modelos de mayor libraje utilizando materiales con mejores propiedades físicas, en particular, una resina de menor densidad.

Si bien el modelo presentó una falla por delaminación, esta se debió principalmente por defectos en su manufactura, como el que se muestra en la figura 4.11, donde se evidencia una desviación de la fibra, lo que en conjunto con el agujero cercano, causaron una concentración de esfuerzo en la zona y posteriormente la falla del elemento.

El software ANSYS es una excelente herramienta para el desarrollo de estos proyectos, pues permite analizar estructuras complejas, uniones de componentes y combinación de materiales isotrópicos y ortotrópicos con un bajo error asociado. Además, dentro de sus múltiples funciones, permite identificar puntos críticos o sobredimensionamientos de los componentes con facilidad, permitiendo así al diseñador tomar decisiones rápidas respecto al diseño de los elementos.

BIBLIOGRAFÍA

ALCAN. (s.f.). *Manual del aluminio*.

Archery, H. (2017). *Recurve Owner's Manual*.

Arco Santander. (2010). Recuperado el 12 de Marzo de 2019, de <https://www.arcosantander.com/recurvo-olimpico/>

Axford, R. (1995). *Archery Anatomy. An Introducing to Techniques for Improved Performance*. Souvenir Press Ltda.

Engblom, J. (2012). *Stress and Failure Analisis of Laminated Composite Structure*. USA: PDH Center.

Fraile, A., & Alarcón, E. (2011). *Mecánica de medios continuos y teoría de estructuras*. Madrid: Universidad Carlos III.

Marco, P., & Sánchez, M. (2014). *Fundamentos de la mecánica de los materiales compuestos*. Barcelona: Omnia Publicher.

Ortiz Berrocal, L. (2002). *Resistencia de Materiales*. España: Mc Grall- Hill.

Peters, S. (1997). *Handbook of composites*. Springer .

Propia, F. (2020). Curicó.

Reilly, P. J. (25 de 6 de 2015). *Lancaster Archery*. Obtenido de <https://www.lancasterarchery.com/blog/what-size-recurve-bow-is-right-for-me/>

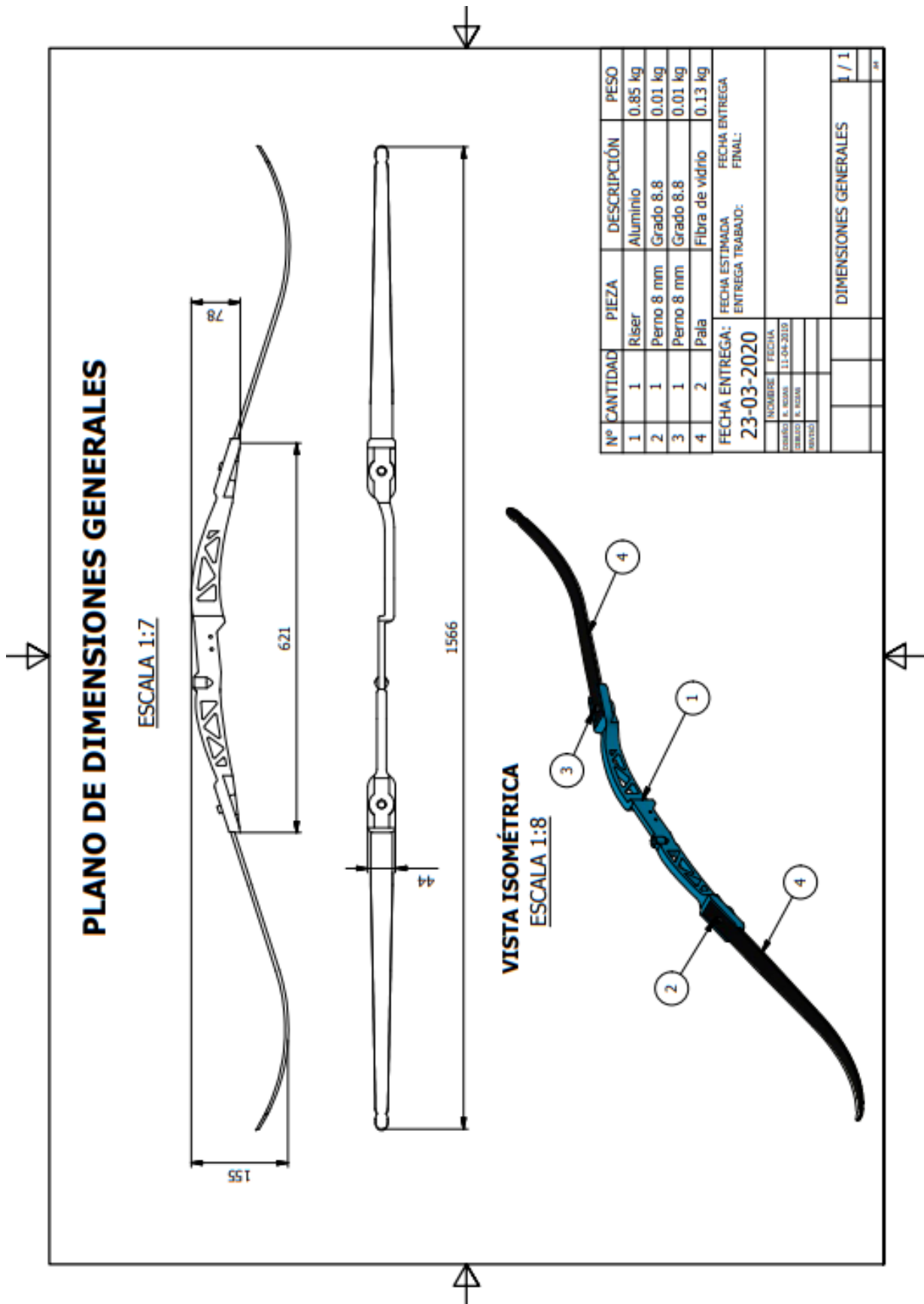
William , D., & Callister, J. (2007). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverté, S.A.

ANEXOS

ANEXO 1: MEMORIA DE CÁLCULO DE ESPESOR

$a := 0.6534512719\text{-rad}$	Ángulo de apertura
$y := 1.047197551\text{-rad}$	Ángulo de corrección
$E := 30\text{GPa}$	Módulo de Young fibra de vidrio
$r := 300\text{mm}$	Radio de curvatura de la pala
$P_x := 115.5641619 \cdot \cos(a) \cdot N$	Fuerza horizontal
$P_y := 66.721 \cdot \cos(a) \cdot N$	Fuerza vertical
$dy := \frac{102.792}{\cos(y)} \text{mm}$	Desplazamiento vertical
$dx := \frac{171.861}{\cos(y)} \text{mm}$	Desplazamiento horizontal
$b := 35\text{mm}$	Ancho de la pala
$l_a := 300\text{mm}$	Largo de la pala sección recta
$Fac := \left(\frac{-P_x}{4} \right) \cdot (6 \cdot a - 8 \cdot \sin(a) + \sin(2 \cdot a)) - P_y \cdot \left[\cos(a) + \left(\frac{\cos(a)^2}{2} \right) + 0.5 \right]$	
$I := \frac{\left[\left(\frac{r}{3} \right) \cdot Fac \right]}{E \cdot \cos(a) \cdot -dy}$	Inercia de la pala
$h := \left[\frac{(I \cdot 12)}{b} \right]^{\frac{1}{3}}$	h = 5.453-mm
	Espesor de la pala

ANEXO 2: PLANO DE MEDIDAS GENERALES DEL DISEÑO



ANEXO 3: PLANOS DE FABRICACIÓN DE LA PALA

