

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA POLITÈCNICA SUPERIOR DE ALCOY



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

CAMPUS D'ALCOI

TRABAJO FIN DE GRADO
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**“Diseño, optimización y fabricación de un arco de competición
elaborado con materiales compuestos.”**

Autor:

D. Nicholas Paul Machell Ciappessoni

Dirigido por:

Prof. Néstor Montañés Muñoz

Prof. Rafael Antonio Balart Gimeno

Febrero 2019

RESUMEN

“Diseño, optimización y fabricación de un arco de competición elaborado con materiales compuestos”

En el presente Trabajo Final de Grado se pretende realizar un estudio técnico sobre los varios diseños realizados de un Arco Recurvo elaborado de fibra de carbono y resina epoxi, destinado a la competición de toxofilia.

La realización de este proyecto tiene como finalidad comprobar si se puede realizar un Arco Recurvo de fibra de carbono con resina epoxi para, así, reducir el peso, mejorar la estabilidad y evitar los problemas causados por las variaciones en la cantidad de humedad en el ambiente próximo.

Primeramente, se procede a explicar la evolución de los arcos hasta llegar a los arcos existentes en la actualidad, pasando por una breve explicación del arco adaptado y los materiales utilizados actualmente. Posteriormente se procederá a exponer la normativa que se aplica al diseño del arco competitivo y seguidamente a realizar los diseños del arco de fibra de carbono y resina epoxi.

Se realizarán simulaciones de carga sobre todos los diseños mediante el Análisis de elementos finitos del software “*SolidWorks*” ® y se compararán entre sí para comprobar cuál de estos cumpliría con las condiciones necesarias y determinar la velocidad a la que saldría una flecha cargada en su punto máximo.

Finalmente se analizarán varios de los procesos de fabricación para poder realizar un estudio del coste y poder tener una estimación del precio de fabricación del arco y realizar una comparativa con los productos del mercado.

SUMMARY

This dissertation undertakes a technical study of various carbon fibre and epoxy resin recurve bow designs to be used for toxophilic competition.

The purpose of the project is to verify whether a recurve bow can be made of carbon fibre and epoxy resin to reduce overall weight, improve stability and mitigate the problems normally associated with variations in the level of relative humidity in the atmosphere.

First the evolution of bows will be covered; the types of bow commonly used, a brief explanation of the adapted bow and the typical materials used in construction today. As the bow is designed for competition, regulations will govern its specification, and these will be outlined due to their importance in the subsequent design using the materials specified.

To ensure compliance, load simulations will be undertaken on each of the designs proposed using the Finite Element Analysis tool within the “Solid Works”[®] software application. In addition to seeking to meet the required specifications, the maximum exit velocity of a standard arrow when loosed will be determined

Finally, a variety of manufacturing processes will be investigated to prepare an analysis of their respective costs to estimate a manufacturing cost for the chosen bow design for comparison with alternative products currently available.

RESUM

En el present Treball Final de Grau es pretén realitzar un estudi tècnic sobre els diversos dissenys realitzats d'un arc recorbat elaborat de fibra de carboni i resina epoxi, destinat a la competició de toxofília.

La realització d'aquest projecte té com a finalitat comprovar si es pot fer un arc recorbat de fibra de carboni amb resina epoxi per poder reduir el pes, millorar l'estabilitat i evitar els problemes causats per les variacions en la quantitat d'humitat en l'ambient proper.

Primerament, s'explicarà l'evolució dels arcs conjunt als tipus d'arcs existents en l'actualitat, passant per una breu explicació de l'arc adaptat i els materials utilitzats actualment. Posteriorment es procedirà a exposar la normativa que s'aplica al disseny de l'arc competitiu i seguidament a realitzar els dissenys.

Es realitzaran simulacions de càrrega sobre tots els dissenys mitjançant l'Anàlisi d'Elements Finites del programa “*SolidWorks*” ® i es compararan entre sí per comprovar quin d'aquests compliria amb les condicions necessàries i determinar la velocitat a la qual sortiria una fletxa carregada en el seu punt màxim.

Finalment s'analitzaran tots els processos de fabricació possibles per poder realitzar un estudi del cost i poder tenir una estimació del preu de fabricació de l'arc i realitzar una comparativa amb els productes del mercat.

ÍNDICE	
RESUMEN	3
SUMMARY	5
RESUM	7
ABREVIATURAS	11
LISTADO DE FIGURAS	15
LISTADO DE TABLAS	17
I. INTRODUCCIÓN	19
I.1. ANTECEDENTES	21
<i>I.1.1 El arte del arco y flecha:</i>.....	21
I.1.1.1 Descripción del Arco	21
I.1.1.2 Historia y origen del arco y flecha.....	22
I.1.1.3 Tipos de Arco:	25
I.1.1.3.1 Arco Largo	25
I.1.1.3.2 Arco Recurvo.....	26
I.1.1.3.3 Arco Compuesto	27
<i>I.1.2 El tiro con arco como deporte de alta competición</i>	28
<i>I.1.3 Arco Adaptado</i>	29
<i>I.1.4 Materiales utilizados en Arcos Recurvos</i>.....	30
II. OBJETIVOS.....	31
II.1 OBJETIVO GENERAL.....	33
II.2 OBJETIVOS PARTICULARES	33
III. DESARROLLO DEL PROYECTO	35
III.1- NORMATIVA APLICABLE	37
III.2- SELECCIÓN DEL MATERIAL	38
III.3 ESTUDIO Y DEFINICIÓN DE ESTADOS TENSIONALES	42
III.3.1 Fuerzas y ángulos de las simulaciones.....	42
III.3.2 Velocidad de flecha.....	43
III.4 DISEÑO INICIAL Y PROTOTIPOS	44
<i>III.4.1 Primer Prediseño</i>.....	44
III.4.1.1 Empuñadura primer diseño	44
III.4.1.2 Palas Superior e Inferior del primer diseño	49
III.4.1.3 Ensamblaje	54
III.4.1.4- Simulación del encordado	55
III.4.1.5 Simulación del arco con flecha cargada.....	57
<i>III.4.2 Segundo Prediseño</i>	59
III.4.2.1 Segundo prediseño de la empuñadura	59
III.4.2.2 Segundo prediseño de las palas.....	60
III.4.2.3 Ensamblaje del segundo prediseño	61
III.4.2.4 Simulación del encordado del arco.....	62
III.4.2.5 Simulación del arco con flecha cargada.....	64
<i>III.4.3 Tercer Prediseño</i>	66
III.4.3.2 Tercer prediseño de las palas	68
III.4.3.3 Ensamblaje del tercer prediseño	69
III.4.3.4 Simulación encordado del arco	70
III.4.3.5 Simulación del arco con flecha cargada.....	72
III.5 TABLA RESUMEN Y SELECCIÓN DEL DISEÑO FINAL	74
IV. PROCESO DE FABRICACIÓN.....	77
IV.1 PROCESOS DE CONFORMADO	79

“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”

IV.1.1 Moldeo manual	80
IV.1.2 Moldeo por compresión al vacío	81
IV.1.3 Bobinado de filamentos	82
IV.1.4 Moldeo por transferencia de resina	83
IV.1.5 Post-procesado.....	86
V. PRESUPUESTO	87
V.1 COSTE DEL MATERIAL	89
V.2 COSTE DE FABRICACIÓN	91
V.3 COSTE DE LA MAQUINARIA	93
V.4 COSTE FINAL	94
VI. BIBLIOGRAFIA	95
VII. ANEXOS.....	99
VII.1 NORMAS	101
VII.2 SIMULACIONES “SOLIDWORKS”	102
VII.3 PLANOS.....	132

Abreviaturas

a	Aceleración
A	Peso de la flecha en granos
a.C.	Antes de Cristo
C_e	Coste de la empuñadura
cm	Centímetros
$C_{mat.T}$	Coste del material total
cos	Coseno
C_p	Coste de la pala
d	Distancia que recorre la flecha en contacto con la cuerda
D	Potencia del arco diseñado
d.C.	Después de Cristo
E_c	Energía cinética
E_{LTf}	Módulo de elasticidad longitudinal de la fibra
E_m	Módulo de elasticidad de la matriz
E_{TTf}	Módulo de elasticidad transversal de la fibra
E_x	Módulo de elasticidad en el eje de coordenadas X
E_y	Módulo de elasticidad en el eje de coordenadas Y
E_z	Módulo de elasticidad en el eje de coordenadas Z
F	Fuerza aplicada a la cuerda
F'	Fuerza ejercida por la cuerda sobre la pala
ft	Pies
G_{LTf}	Módulo de cortadura longitudinal de la fibra
G_m	Módulo de cortadura de la matriz
G_{TTf}	Módulo de cortadura transversal de la fibra
G_{xy}	Módulo de cortadura en el plano XY
G_{xz}	Módulo de cortadura en el plano XZ

G_{yz}	Módulo de cortadura en el plano YZ
h	Hora
IBO	International Bowhunting Organization
J	Julio
kg	Kilogramo
L	Apertura máxima del arco
lb	Libra
m	Metro
m_f	Masa de la flecha
min	Minuto
m_{cfe}	Masa de fibra de carbono en la empuñadura
m_{cfp}	Masa de fibra de carbono en la pala
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
m_{Ree}	Masa de resina epoxi de la empuñadura
m_{Rep}	Masa de la resina epoxi de la pala
m_{Te}	Masa total de la empuñadura
m_{Tp}	Masa total de la pala
N	Newton
s	Segundo
S_m	Tensión de rotura a cortadura de la matriz
S_{xy}	Tensión de rotura a cortadura en el plano XY
t	Tiempo
UV	Ultravioleta
v	Velocidad
V_f	Volumen de fibra
v_f	Velocidad final

v_i	Velocidad inicial
VM	Von Mises
w	Peso adicional a la cuerda
X_c	Tensión de rotura a compresión
X_{cf}	Tensión de rotura a compresión de la fibra
X_{cm}	Tensión de rotura a compresión de la matriz
X_t	Tensión de rotura a tracción
X_{tf}	Tensión de rotura a tracción de la fibra
X_{tm}	Tensión de rotura a tracción de la matriz
Y_c	Tensión de rotura a compresión en el eje Y
Y_t	Tensión de rotura a tracción en el eje Y
€	Euro
°	Grado
α	Ángulo entre F y F' al encordar el arco
β	Ángulo entre F y F' al cargar una flecha
ν_{LT_f}	Coefficiente de Poisson longitudinal de la fibra
ν_m	Coefficiente de Poisson de la matriz
ν_{xy}	Coefficiente de Poisson en el plano XY
ν_{xz}	Coefficiente de Poisson en el plano XZ
ν_{yz}	Coefficiente de Poisson en el plano YZ

Listado de figuras

- Figura 1.** Dibujo de un azteca usando Atlatl.
- Figura 2.** Réplica arco Mollegabet.
- Figura 3.** Arco Largo.
- Figura 4.** Arco Recurvo.
- Figura 5.** Arco Compuesto.
- Figura 6.** Arquero Olímpico.
- Figura 7.** Dispositivo mecánico de liberación.
- Figura 8.** Madera nogal, Fibra de vidrio y Fibra de carbono.
- Figura 9.** Rectángulo inicial del diseño de la empuñadura y extrusión de esta.
- Figura 10.** Croquis cara frontal de la empuñadura.
- Figura 11.** Extrusión del corte del sobrante.
- Figura 12.** Croquis lateral de empuñadura.
- Figura 13.** Extrusión del corte lateral del sobrante.
- Figura 14.** Redondeo de los contornos.
- Figura 15.** Croquis de la circunferencia del pasador.
- Figura 16.** Extrusión del corte del agujero para el pasador.
- Figura 17.** Rectángulo inicial del diseño de la pala y extrusión de esta.
- Figura 18.** Croquis lateral de las palas.
- Figura 19.** Extrusión del corte del sobrante.
- Figura 20.** Croquis cara frontal de las palas.
- Figura 21.** Extrusión corte del sobrante.
- Figura 22.** Redondeo de los bordes.
- Figura 23.** Croquis circunferencia del pasador.
- Figura 24.** Extrusión del corte del pasador.
- Figura 25.** Piezas a ensamblar.
- Figura 26.** Tensión Von Mises 1^{er} diseño, arco en reposo.
- Figura 27.** Desplazamiento 1^{er} diseño, arco en reposo.
- Figura 28.** Tensiones Von Mises 1^{er} diseño, arco cargado.
- Figura 29.** Desplazamiento 1^{er} diseño, arco cargado.

- Figura 30.** Longitud en 1^{er} diseño.
- Figura 31.** Longitud en 2^o diseño.
- Figura 32.** 2^o Diseño empuñadura.
- Figura 33.** Espesor 1^{er} diseño.
- Figura 34.** Espesor 2^o diseño.
- Figura 35.** 2^o Diseño Palas.
- Figura 36.** Piezas ensamblaje, 2^o diseño.
- Figura 37.** Relaciones de posición, 2^o diseño.
- Figura 38.** Tensiones Von Mises 2^o diseño, arco en reposo.
- Figura 39.** Desplazamiento 2^o diseño, arco en reposo.
- Figura 40.** Tensiones Von Mises 2^o diseño, arco con flecha cargada.
- Figura 41.** Desplazamiento 2^o diseño, arco con flecha cargada.
- Figura 42.** Anchura 2^o diseño.
- Figura 43.** Anchura 3^{er} diseño.
- Figura 44.** 3^{er} Diseño Empuñadura.
- Figura 45.** Anchura 2^o diseño.
- Figura 46.** Anchura 3^{er} diseño.
- Figura 47.** 3^{er} Diseño Palas.
- Figura 48.** Piezas a ensamblar, 3^{er} diseño.
- Figura 49.** Relaciones de posición, 3^{er} diseño.
- Figura 50.** Tensiones Von Mises 3^{er} diseño, arco en reposo.
- Figura 51.** Desplazamientos 3^{er} diseño, arco en reposo.
- Figura 52.** Tensiones Von Mises 3^{er} diseño, arco con flecha cargada.
- Figura 53.** Desplazamientos 3^{er} diseño, arco con flecha cargada.
- Figura 54.** Moldeo manual.
- Figura 55.** Moldeo por compresión al vacío.
- Figura 56.** Moldeo por bobinado de filamentos.
- Figura 57.** Moldeo por transferencia de resina.
- Figura 58.** Coste de la unidad dependiendo del tamaño del lote.

Listado de tablas

Tabla 1. Características mecánicas de “Epoxy/Aramid fiber”.

Tabla 2. Características mecánicas de “Epoxy/HS carbon fiber”.

Tabla 3. Características mecánicas de “Epoxy/E-glass fiber”.

Tabla 4. Comparación de resultados de las simulaciones.

Tabla 5. Apertura máxima, altura del arco en reposo y longitud de la cuerda entre extremidad y punto de agarre.

Tabla 6. Ventajas e inconvenientes de los procesos de fabricación.

Tabla 7. Tiempos de los procesos.

I. INTRODUCCIÓN

I.1. Antecedentes

I.1.1 El arte del arco y flecha:

I.1.1.1 Descripción del Arco

Un arco es una herramienta utilizada antiguamente como arma mortal tanto en guerras como en la caza, compuesta por dos partes principales: la estructura base, compuesto por un mango y sus extremidades, y la cuerda, la cual debe tener cierta elasticidad para poder proyectar la flecha.^{1,2}

La estructura principal del arco solía estar formada por un cuerpo alargado de madera con cierta flexibilidad. En cambio, la cuerda solía provenir de origen animal, ya sea fabricada con tendones, ligamentos o pieles de esta. También se utilizaban algunas fibras vegetales para fabricar la cuerda, siendo las más conocidas las del cáñamo.³

Hoy día el mango del arco se caracteriza por ser una estructura rígida compuesta por un corazón de madera grueso recubierto con un refuerzo de fibra de vidrio o fibra de carbono. Al hacer esto, los materiales mencionados actúan de elemento rígido y estabilizador del arco.^{3,4}

Las extremidades del arco se fabrican utilizando un corazón de madera con refuerzos de fibras de vidrio o de carbono mucho más finos y flexibles para poder realizar los movimientos necesarios para la propulsión de la flecha.^{3,5,6}

La cuerda se hace, generalmente, de aramida¹, un material rígido y resistente para cargar con las tensiones de disparar flechas continuas y repetitivamente.⁷

Estas estructuras permiten que, al estirar de la cuerda, se acumule energía, en forma de tensión en el arco la cual, al soltar la cuerda, es liberada y se convierte en energía cinética transferida a la flecha.⁶

I.1.1.2 Historia y origen del arco y flecha

No se conoce con exactitud cuándo se inventó el arco, pero, según la Dra. Ledesma², se han hallado arcos que datan más de 30.000 años. Además, se han encontrado grabados del hombre primitivo en cuevas donde es posible apreciar al hombre primitivo utilizando el arco o una herramienta muy similar.¹

El arco y la flecha llevan milenios siendo las armas principales para la caza y para la guerra. El hombre cazador evolucionó gracias a la evolución del "Atlatl" al arco y flecha. El "Atlatl" permitía cazar desde una distancia más segura. Como podemos observar en la siguiente figura, los Aztecas utilizaban el "Atlatl" como una lanza disparada a distancia mediante el uso de un mango de madera con una curvatura que encajaba al final de la lanza.⁷⁻⁹

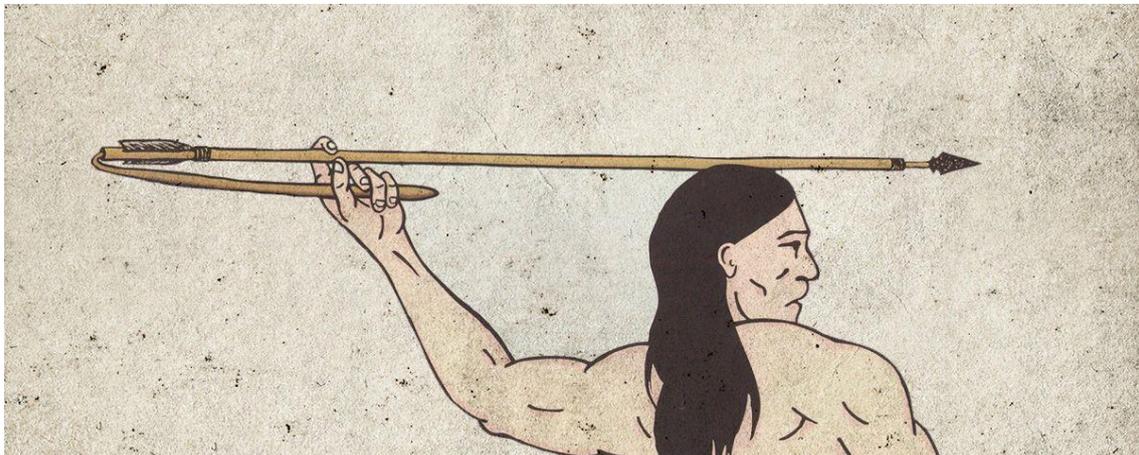


Figura 1. Dibujo de un azteca usando "Atlatl"

Los primeros arcos en diferenciar el mango de las extremidades fueron los “*Mollegabet*”. Este arco proveniente del Neolítico se caracterizaba por tener un 50% de la estructura rígida y el 50% restante formada por una estructura flexible. Todo el cuerpo del arco se constituía de una sola pieza de madera. La peculiaridad de este arco es que se componía por una empuñadura redondeada, justo a continuación unas palas planas y de poco espesor para darle flexibilidad y seguido de los extremos, los cuales eran rígidos y más gruesos. Otro arco procedente de la misma época, la cual se llamaba “*Meare Heath*”, tenía la misma base que la “*Mollegabet*”, pero se podía apreciar mayor maestría artesanal, ya que los artesanos que creaban dichos arcos, los adaptaban al cazador que iba a utilizarlo.⁹



Figura 2. Réplica arco Mollegabet

Al paso del tiempo, el arco evolucionó hasta llegar a ser una de las armas más letales utilizadas en las guerras. Los mejores estrategas del mundo utilizaban a los arqueros como arma principal, tanto de ataque como de defensa. La primera civilización en usar los arcos como arma de guerra fueron los egipcios en el 3.500 a.C. los cuales utilizaban arcos con una altura similar a la de su portador con flechas con punta de piedra o bronce.⁶

En 1.800 a.C. los asirios modificaron el diseño del arco para crear un arco constituido de cuero, marfil y madera. Vieron que estos materiales daban un perfil recurvo y, gracias a ello, eran arcos mucho más potentes que permitían lanzar la flecha a una velocidad mucho mayor que sus precedentes, además de proporcionar la ventaja de ser más pequeños y manejables. Esto creaba una gran ventaja cuando montaban en caballo.^{6,10}

En el siglo XI, en Normandía se desarrolló el Arco Largo (o el conocido “*Long-bow*”) que los ingleses se apoderaron de su uso después de la “*Batalla de Hastings*” en 1.066 d.C.⁵

Cuando se comenzó a desarrollar y fabricar las armas de fuego, la popularidad del arco y flecha decayó drásticamente, sólo manteniéndose vivo para la diversión y el entretenimiento. A partir del año 1.600 se crearon muchas sociedades, eventos y concursos relacionados con el tiro con arco, siendo el más importante y longevo el “*Ancient Scorton Silver Arrow Contest*”, el cual lleva vigente desde 1.673 hasta hoy día. En 1.787, más de un siglo más tarde, se permitió la participación de las mujeres en el concurso. Esto significó que el tiro de arco fue uno de los primeros deportes en incluir a mujeres en su participación.¹¹

En 1.900 se introdujo el tiro con arco en las Olimpiadas de Paris. En 1.904 y en 1.908 siguió la arquería en los juegos, pero cayó en el olvido hasta los juegos de 1.920 en Bélgica que volvió fugazmente y, a posteriori, se dejó de considerar un juego olímpico debido a la falta de reglas universales para el deporte. En 1.930 en Polonia, se creó la Federación Internacional de Tiro con Arco (FITA) la cual reguló las normas por las cuales se regían las competiciones de arquería. A partir de entonces, aumentó considerablemente el interés como deporte y en 1.972 hizo su gran regreso a los Juegos Olímpicos.¹²

I.1.1.3 Tipos de Arco:

I.1.1.3.1 Arco Largo

El Arco Largo¹³, o “*Long-Bow*”, es mayoritariamente conocido por su uso por parte de los ingleses durante los siglos XV y XVI, pero no fue originario de allí. Los historiadores no han llegado a la conclusión exacta de su origen, aunque se piensa que proviene de Gales o Normandía en el siglo XI. El Arco Largo se caracterizan por ser de una longitud similar o igual a la altura de su portador y, por ello, normalmente varía entre 1’2 y 2’1 m. El diseño del arco es básico, siendo toda una pieza y de una sola curvatura que abarca todo el arco con una cuerda atada a los extremos. Se estima que los arcos largos del siglo XVI lograban una tensión de 72-82 kg (706’08-804’15 N), y tenían un alcance efectivo de entre 168 y 228 m. Los arcos largos de la actualidad logran una tensión de alrededor de 27 kg (264’78 N) y un alcance efectivo de 180 m.

En la actualidad sigue habiendo competiciones de tiro con Arco Largo, pero no son de gran relevancia mundialmente, principalmente se centran en Inglaterra.

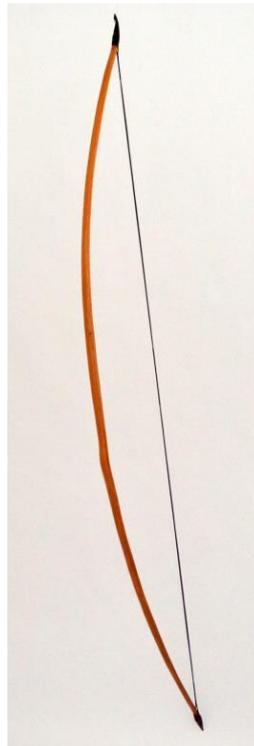


Figura 3. Arco Largo

I.1.1.3.2 Arco Recurvo

El Arco Recurvo¹⁴ fue inventado por los asirios en 1.800 a.C. caracterizado por tener una segunda curvatura en los extremos de las palas en la dirección contraria a la curvatura principal del arco. Este diseño facilitaba su uso a caballo y permitía disparar con más potencia utilizando menos fuerza para su apertura. Las potencias que suelen abarcar este tipo de arco varían entre 20 lb y 60 lb (9 kg y 27 kg respectivamente), y aunque existen de mayor potencia, son muy escasos.

En la actualidad hay muchas competiciones a nivel mundial de tiro con Arco Recurvo. La principal y más reconocida es el tiro a diana, tanto en competición Olímpico como Paralímpico.



Figura 4. Arco Recurvo.

I.1.1.3.3 Arco Compuesto

El Arco Compuesto¹⁵ o Arco de Poleas es un arco que funciona mediante dos poleas descentradas en los extremos de las palas por donde pasa la cuerda. Gracias al mecanismo de poleas se reduce considerablemente la fuerza necesaria para realizar la apertura máxima del arco aun manteniendo la potencia de disparo. Además, al estar fabricado con materiales compuestos y aluminio, se ven muy poco afectados por cambios ambientales como la humedad, la temperatura, etc.

El Arco Compuesto también tiene su lugar en la competición del tiro con arco, siendo sus competiciones más importantes los Juegos Mundiales de Tiro a Diana y los Juegos Paralímpicos.



Figura 5. Arco Compuesto.

I.1.2 El tiro con arco como deporte de alta competición

Como se ha mencionado anteriormente, el tiro con arco pasó de ser un arma de guerra a un deporte competitivo a partir de la invención de las armas de fuego en el siglo XVI. Enrique VIII promovió el tiro con arco como deporte oficial en Inglaterra en 1.537, lo cual llevó a la creación de la sociedad de arqueros conocida como “*The Guild of Saint George*” (La Hermandad de San Jorge). La competición más importante y que aún persiste actualmente tuvo lugar por primera vez en Yorkshire, Inglaterra, en 1.673, el “*Ancient Scorton Silver Arrow Contest*”.¹¹

El Tiro con arco llegó al rango olímpico en Paris en 1.900 y se celebró en las olimpiadas de 1.900, 1.904, 1.908 y 1.920. Después de 1.920 fue excluido de las Olimpiadas al no constar de unas reglas internacionales concretas. En 1.930 se empezó a intentar conseguir la readmisión a los Juegos Olímpicos mediante la FITA. Esto no llegó a ocurrir hasta 1.972, en Múnich, donde se volvió a aceptar como Juego Olímpico.¹²



Figura 6. Arquero Olímpico.

I.1.3 Arco Adaptado

En 1.948 se inició el tiro con arco adaptado¹⁶ en los Juegos Internacionales en Silla de Ruedas, que, como indica el nombre, fueron creados para personas que utilizaban sillas de ruedas. Hoy día existen tres clasificaciones principales de tiro con arco adaptado en las Para-Olimpiadas para la gente con discapacidades físicas. Encontramos la ARW1 y la ARW2, las cuales incluyen personas con discapacidades en las extremidades inferiores del cuerpo y utilizan sillas de ruedas; además se tiene la ARST en la cual participa gente que puede andar aun teniendo discapacidades en estas extremidades.

En el ARW1 participa gente con Tetraplejía o casos graves de Paraplejía. Aquí también se incluye aquella gente con amputaciones de ambos miembros inferiores con alguna discapacidad motora del tren superior.

En el ARW2 los arqueros pueden ser parapléjicos o tener un caso severo de diplejía con problemas de equilibrio del tren superior.

Como podemos observar en la *figura 7*, existe un dispositivo mecánico de liberación el cual dispone de una adopción para que la persona pueda tirar de la cuerda con más fuerza. Esto facilita a una persona que no tiene el agarre necesario para, ya sea por coordinación o por fuerza, tirar de la cuerda del arco.

Participantes con problemas de tren superior utilizan arcos adaptados con un sistema de poleas y cableado para reducir la fuerza necesaria para mantener tensa la cuerda y así poder tirar con arco.



Figura 7. Dispositivo mecánico de liberación

I.1.4 Materiales utilizados en Arcos Recurvos

Actualmente los arcos recurvos se fabrican con varios materiales¹⁷ y combinaciones de estos. El material más tradicional es la madera, la cual se ha utilizado mucho a lo largo de la historia. Algunas de las maderas más utilizadas han sido la madera de Pacana, de Morera, de Nogal, de Fresno, de Cerezo, de Yuca, de Naranja de los Osages, de Limonero, etc.⁵

Hoy día se combina el material tradicional ya mencionado con materiales compuestos como la fibra de vidrio y la fibra de carbono.¹⁸ Los materiales compuestos se usan como refuerzo para la madera, ya que haciendo esto se consigue unas propiedades mecánicas mejoradas con menor peso, además de lograr que los cambios climáticos afecten en menor medida el rendimiento del arco. En cuanto a las cuerdas, se utiliza principalmente aramida o tereftalato de polietileno, que son materiales muy resistentes y duraderos.

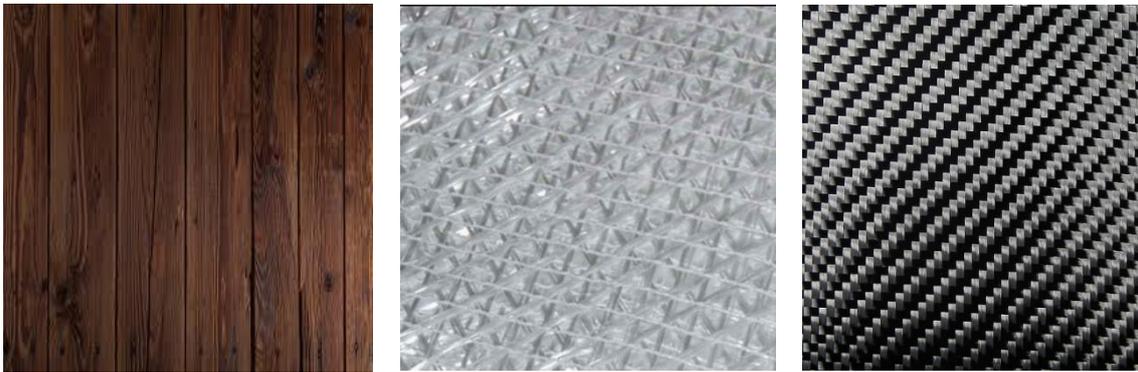


Figura 8. Madera nogal, fibra de vidrio y fibra de carbono.

II. OBJETIVOS

II.1 Objetivo General

Realizar un diseño de un Arco Recurvo realizado con fibra de carbono y resina epoxi para evitar los cambios de prestaciones que tiene la madera bajo humedad y temperatura.

II.2 Objetivos particulares

Los objetivos particulares para cumplir en este trabajo son los siguientes:

1. Diseñar y optimizar geoméricamente un Arco Recurvo con la plataforma de "SolidWorks".
2. Analizar los prediseños y determinar cuál es el más adecuado.
3. Analizar los estados tensionales a los que se va a someter el Arco Recurvo.
4. Estudiar el valor numérico del comportamiento de la flecha al disparar el Arco Recurvo.
5. Realizar una validación técnica de la solución propuesta.
6. Estudiar el coste de fabricación del producto final.

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

III.1- Normativa aplicable

Normativa aplicable¹⁹ para el diseño de un arco recurvo en competición Olímpica.

- El mango debe tener apoyo lateral y no inmersa centrada.
- Solo puede usarse una cuerda que va de una extremidad al lado opuesto.
- No se puede añadir ayudas para el estiramiento de la cuerda, debe ser con los dedos.
- Se permiten elevadores que incluyen un aparato ortopédico siempre que el aparato ortopédico no toque constantemente la mano o la muñeca del atleta.
- La cuerda puede estar compuesta por cualquier número de fibras.
- Un reposaflechas variable está permitido.
- Se puede usar cualquier botón de presión móvil, punto de presión o placa de flecha en el arco, siempre que no sean eléctricos o electrónicos y no ofrezcan ninguna ayuda adicional para apuntar. El punto de presión puede colocarse a no más de 4 cm (dentro) del punto de pivote de la empuñadura.
- Se permite una mira de arco, pero no puede llevar amplificador de imágenes. En ningún momento se puede usar más de uno de estos dispositivos.

Estabilizadores y reductores de vibración están permitidos, pero no pueden:

- Servir de guía para la cuerda.
- Tocar cualquier cosa menos el arco.
- Representar algún tipo de peligro para los otros tiradores.

III.2- Selección del material

Para elegir el material compuesto que se utilizará para el diseño del arco recurvo propuesto, se deberá tener en cuenta los objetivos que se quiere cumplir en este proyecto. Al tratarse de un arco recurvo basado en un arco de competición, este deberá ser ligero, de un material con un límite elástico alto además teniendo en cuenta el posible proceso de fabricación.

En el caso de este proyecto, se han analizado tres materiales compuestos, con una mezcla de resina epoxi, los cuales son:

- Fibra de Aramida + Resina Epoxi
- Fibra de Carbono + Resina Epoxi
- Fibra de Vidrio + Resina Epoxi

Mediante el uso del programa de CES Edupack 2.019 se determinan las propiedades mecánicas de los materiales expuestos.

Fibra de Aramida:

Usos típicos: Peso ligero, estructuras resistentes a impacto. Controles de aeronaves, escudo de contención de turbina, chalecos antibalas...

La aramida es un material ligero, con usos muy variados desde capas de contención de turbinas hasta chalecos antibalas. Es un material que puede ser procesado de varias formas en materiales compuestos de matriz polimérica, entre las cuales se incluyen: moldeo manual, moldeo por compresión, moldeo por transferencia de resina, moldeo automatizado, etc. Las principales características mecánicas de este material son:

Epoxy/Aramid fiber

% en fibras	45-50%
Módulo de Young	60-80 GPa
Coefficiente de Poisson	0.34
Densidad	1.380 kg/m^3
Límite a tracción	1.100-1.380 MPa
Límite elástico	1.100-1.3800 MPa

Tabla 1. Características mecánicas de “Epoxy/Aramid fiber”

Fibra de carbono:

Usos típicos: Astronaves de alto rendimiento, aeronaves, misiles, radomos y antenas.

La fibra de carbono es un material ligero con buenas propiedades mecánicas que es utilizado en una gran variedad de sectores, como por ejemplo en el sector aeronáutico, para componentes de vehículos, bienes deportivos, muelles... Además, es un material que puede ser procesado por algunos métodos de fabricación como el moldeo manual, moldeo automatizado o moldeo por transferencia de resina. Las principales propiedades mecánicas del material escogido son:

Epoxy/HS carbon fiber	
% en fibras	60-70%
Módulo de Young	299-376 GPa
Coefficiente de Poisson	0,245
Densidad	1.670 kg/m^3
Límite a tracción	2.530 MPa
Límite elástico	1.575 MPa

Tabla 2. Características mecánicas de “Epoxy/HS carbon fiber”

Fibra de vidrio:

Usos típicos: Casco de barcos y cruceros, chasis de vehículos, componentes de automóviles, revestimiento en construcción.

La fibra de vidrio es un material empleado en una gran variedad de sectores de fabricación como en los cascos de barcos, componentes de automóvil, en la construcción, etc. Se puede procesar por varios métodos como moldeo manual, moldeo automatizado, moldeo por transferencia de resina, moldeo por compresión y más. En cuanto a las principales características mecánicas del material son:

Epoxy/E-glass fiber	
% en fibras	30%-60%
Módulo de Young	35-45 GPa
Coefficiente de Poisson	0'05-0'4
Densidad	1.600-1.950 kg/m^3
Límite a tracción	300-1'100 MPa
Límite elástico	300-1'100 MPa

Tabla 3. Características mecánicas de “Epoxy/E-glass fiber”

Teniendo en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales seleccionados se procede a seleccionar el material que mejor se adapte a las características requeridas para el diseño del arco recurvo en cuestión. Como se puede comprobar, la fibra de carbono es el material que mejor se adapta al proyecto, debido a que es el material con una baja densidad, por tanto, ligero, siendo de $1.670 kg/m^3$, además de poseer un módulo de Young y un límite elástico superiores a los otros en cuestión, siendo de 376 GPa y 1.575 MPa.

Cálculos del compuesto Fibra de Carbono + Epoxi

Para conocer los datos que se introducirán dentro del programa “SolidWorks” se deberá realizar el cálculo del compuesto formado por la fibra de carbono y la resina epoxi mediante el modelo de cálculo de Chamis.

Constantes Elásticas:

$$E_x = E_{LT_f} * V_f + E_m * (1 - V_f) = 376.000 * 0'7 + 8.000 * (1 - 0'7) = 265.600 \text{ MPa}$$

$$E_y = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f} * \left(1 - \frac{E_m}{E_{TT_f}}\right)} = \frac{8.000}{1 - \sqrt{0'7} * \left(1 - \frac{8.000}{62.000}\right)} = 29.488'1 \text{ MPa}$$

$$E_z = E_y = 29.488'1 \text{ MPa}$$

$$G_{xy} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} * \left(1 - \frac{G_m}{G_{LT_f}}\right)} = \frac{2.941,18}{1 - \sqrt{0'7} * \left(1 - \frac{2.941,18}{75.000}\right)} = 14.994'5 \text{ MPa}$$

$$G_{xz} = G_{xy} = 14.994'5 \text{ MPa}$$

$$G_{yz} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} * \left(1 - \frac{G_m}{G_{TT_f}}\right)} = \frac{2.941.18}{1 - \sqrt{0'7} * \left(1 - \frac{2.941.18}{48.000}\right)} = 13.705 \text{ MPa}$$

$$\nu_{xy} = \nu_{LT_f} * V_f + \nu_m * (1 - V_f) = 0'25 * 0'7 + 0'36 * 0'3 = 0'28$$

$$\nu_{xz} = \nu_{xy} = 0'28$$

$$\nu_{yz}; G_{yz} = \frac{E_y}{2 * (1 + \nu_{yz})}; \nu_{yz} = \frac{E_y}{2 * G_{yz}} - 1 = \frac{29.488,1}{2 * 13.705} - 1 = 0'08$$

Constantes Resistentes:

$$X_t = V_f * X_{tf} = 0'7 * 2.530 = 1.771 \text{ MPa}$$

$$Y_t = X_{tm} * \left[1 - \left(\sqrt{V_f} - V_f\right) * \left(1 - \frac{E_m}{E_{TT_f}}\right)\right] = 45 * \left[1 - \left(\sqrt{0'7} - 0'7\right) * \left(1 - \frac{8.000}{62.000}\right)\right]$$

$$Y_t = 39'64 \text{ MPa}$$

$$X_c = V_f * X_{cf} = 0'7 * 1.010 = 707 \text{ MPa}$$

$$Y_c = X_{cm} * \left[1 - \left(\sqrt{V_f} - V_f\right) * \left(1 - \frac{E_m}{E_{TT_f}}\right)\right] = 90 * \left[1 - \left(\sqrt{0'7} - 0'7\right) * \left(1 - \frac{8.000}{62.000}\right)\right]$$

$$Y_c = 79'29 \text{ MPa}$$

$$S_{xy} = S_m * \left[1 - \left(\sqrt{V_f} - V_f\right) * \left(1 - \frac{G_m}{G_{LT_f}}\right)\right] = 60 * \left[1 - \left(\sqrt{0'7} - 0'7\right) * \left(1 - \frac{2.941'8}{75.000}\right)\right]$$

$$S_{xy} = 52'12 \text{ MPa}$$

III.3 Estudio y definición de estados tensionales

A partir del diseño original, podemos observar las medidas de arco. Para calcular los ángulos necesarios para las fuerzas aplicadas a la hora de la cuerda para el encordado, se partirá del punto medio del conjunto de ambas palas y la empuñadura, ya que, tomando este punto como referencia, ambos lados son simétricos y, por consecuencia, las fuerzas se reparten equitativamente.

III.3.1 Fuerzas y ángulos de las simulaciones

Primero se coge la longitud de la cuerda (152 cm) y calculamos la mitad de la cuerda (76 cm), porque como hemos establecido antes, el arco es simétrico respecto a su punto medio. Con esta medida se traza una paralela al eje de simetría creado al dividir el arco a una distancia de 76 cm. A partir de disponer de esta paralela, se realizan varias simulaciones de diferentes fuerzas realizadas a 45° hasta encontrar la fuerza que consiga que la zona de apoyo de la cuerda se coloque a la misma altura que la paralela. Una vez encontrada la fuerza, se pasa a calcular la fuerza equivalente que se usaría para doblar las palas del arco de esta manera.

En el caso del diseño escogido, es necesario ejercer una fuerza (F') de 100 N de fuerza a un ángulo de 45° para conseguir el objetivo, el cual se traduce en una fuerza perpendicular al arco (F) de:

$$F' = \frac{F}{2 * \cos\alpha}; F = F' * 2 * \cos\alpha = 100 * 2 * \cos45 = 141'42 N$$

Una vez se ha obtenido esta fuerza de encordado mínimo, se procede a calcular la fuerza con la que se estiraran las palas aplicando una fuerza de 50lb (222'41N) perpendicularmente al arco.

Sabiendo la distancia a la que se ejerce esta fuerza, 76 cm del punto de apoyo, la fuerza que se aplica (222'41 N) y el ángulo de la en el que se estiran las extremidades de las palas (58'43°), se calcula que la fuerza que se aplica sobre cada extremo de las palas es de:

$$F' = \frac{F}{2 * \cos\beta} = \frac{222'41}{2 * \cos58'43} = 212'41 N$$

Esta es la fuerza que se ejerce sobre las palas a un ángulo de 58'43° y la fuerza que se coloca en las simulaciones del SolidWorks.

III.3.2 Velocidad de flecha

Primeramente, se tiene en cuenta que la fuerza con la que se carga la flecha (F), el peso de la flecha (m_f), la distancia que recorre la flecha antes de salir del arco (d) y la apertura máxima del arco (L).

Una vez definidos los parámetros se procede a determinar cuál es el valor del IBO (International Bowhunting Organization) específico del arco. Para ello, se debe calcular la aceleración del arco (a):

$$a = \frac{F}{m_f} = \frac{222'41}{0'016} = 13.900'625 \text{ m/s}^2$$

Después de calcular la aceleración, se calcula el tiempo (t) que tarda en recorrer la distancia hasta el punto de reposo:

$$d = \frac{1}{2} a * t^2; t = \sqrt{\frac{2d}{a}} = \sqrt{\frac{2 * 0'571}{13.900'625}} = 0'009s$$

Ya hallado el tiempo y la aceleración se puede calcular la velocidad final a la que saldría la flecha del arco:

$$t = \frac{v_f - v_i}{a}; v_i = 0; IBO = v_f = t * a = 0'009 * 13.900'625 = 125'11 \text{ m/s} = 410'47 \text{ ft/s}$$

Siguiendo la fórmula establecida por la IBO para calcular la velocidad de la flecha podemos determinar que:

$$v = IBO + (L - 30) * 10 - w/3 + \min\left(0, \frac{-(A - 5D)}{3}\right)$$

$$v = 410'47 + (30 - 30) * 10 - 0/3 + \min\left(0, \frac{-(250 - 5 * 50)}{3}\right) = 410'47 \text{ ft/s} = 125'11 \text{ m/s}$$

Finalmente, sabiendo la velocidad real de la flecha y su masa, se procede a calcular la energía cinética (E_c) que se le aporta a la flecha:

$$E_c = \frac{1}{2} m_f * v^2 = \frac{1}{2} * 0'016 * 125'11^2 = 126'79 \text{ J}$$

III.4 Diseño inicial y prototipos

El arco que se va a diseñar en este proyecto será un ejemplo de Arco Recurvo diseñado para una persona de 190 cm de estatura, por esta razón, el montaje del arco después de encordarlo deberá tener una altura de alrededor del 80% de la altura del usuario, es decir, unos 152 cm. Teniendo en cuenta esta altura, cada pala constituirá del 35% de la altura total del arco, mientras que la empuñadura será un 30%.

Como se ha mencionado anteriormente, la estructura del arco se compondrá puramente de fibra de carbono y resina epoxi para juntar las fibras. Para conseguir un primer diseño a partir del cual trabajar, se ha empezado por observar diseños de arcos recurvos ya existentes y, a partir de estos, crear diseños para encontrar el más adecuado para este proyecto.

III.4.1 Primer Prediseño

Para las dimensiones del primer prediseño, se han observado las medidas de varios arcos recurvos ya existentes y se han extrapolado al diseño realizado.

III.4.1.1 Empuñadura primer diseño

El diseño de la empuñadura se ha realizado en base a la observación de imágenes de otros arcos comerciales y se ha mantenido, en cierta medida, las dimensiones de este para conseguir un atractivo comercial además de un uso cómodo y efectivo.

Para la realización del diseño de la empuñadura se ha utilizado el programa de “SolidWorks”. Se ha elegido este programa como método de empleo porque dispone de un área de trabajo cómodo y bastante intuitivo para la realización de diseños en tres dimensiones.

Los objetivos del diseño de la empuñadura son:

- Alcanzar un alto nivel de rigidez.
- Garantizar estabilidad al aplicar tensiones a la misma.
- Aportar cierta comodidad a la hora de ser utilizado un tiempo prolongado.

Para el diseño de la empuñadura se partirá de un plano rectangular de 200 mm x 456 mm, porque así tenemos unas dimensiones a partir de las cuales trabajar. Este plano se extruirá 100 mm para tener una anchura cómoda de manejo.



Figura 9. Rectángulo inicial del diseño de la empuñadura y extrusión de ésta

Una vez obtenida la estructura prismática, se ha escogido la cara con la anchura de 200 mm x 456 mm para proceder a diseñar la parte frontal de la empuñadura.

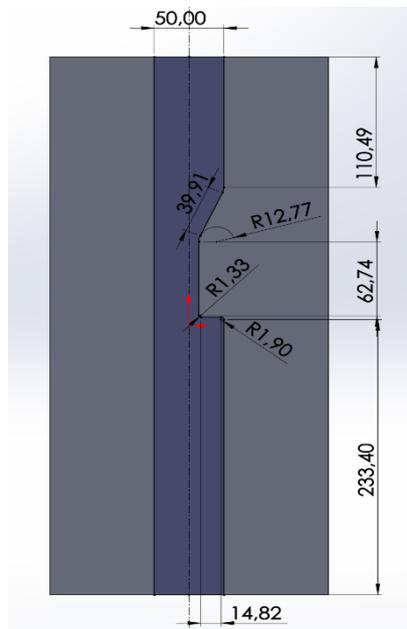


Figura 10. Croquis cara frontal de la empuñadura

Después de conseguir la forma básica y primitiva del diseño frontal se procede a eliminar las partes sobrantes extruyendo el corte.

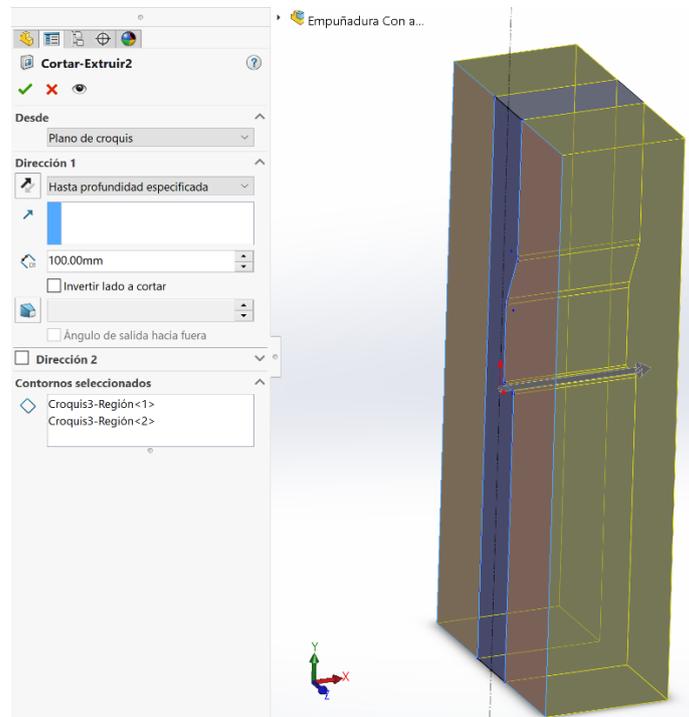


Figura 11. Extrusión del corte del sobrante

El siguiente paso para seguir es realizar el perfil lateral, en el cual se incluye el agarre y la zona de unión entre las extremidades y la empuñadura.

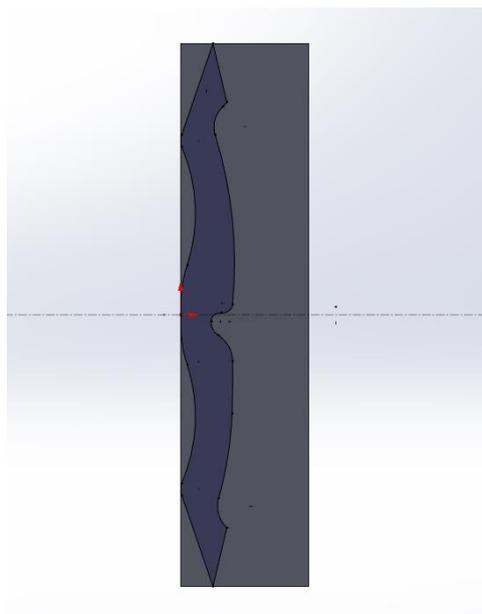


Figura 12. Croquis lateral de empuñadura

Ahora que ya se tiene el croquis de la vista lateral, se elimina el sobrante.

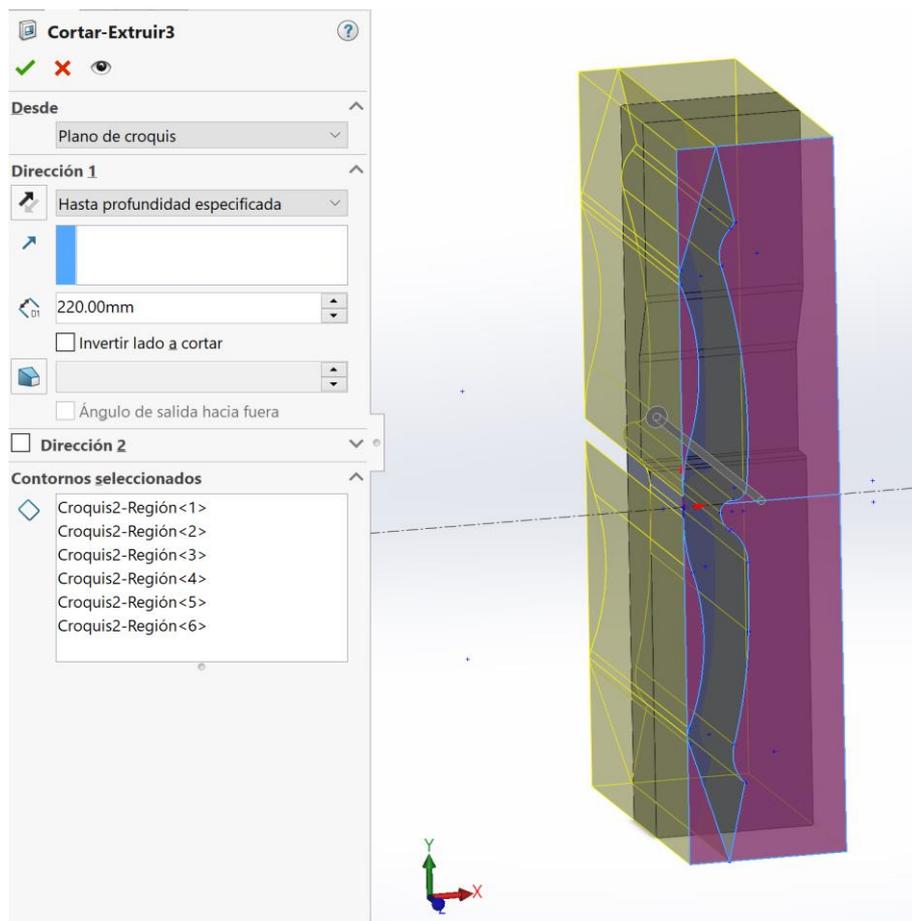


Figura 13. Extrusión del corte lateral del sobrante

Ya conseguida la estructura base de la empuñadura, se empezará a redondear los bordes bruscos que tiene la pieza. Cada esquina tendrá un dimensionado distinto para mejorar la ergonomía del arco, por ejemplo, la zona de unión entre las extremidades y la empuñadura tendrá un redondeo de alrededor de 1 mm, el resto de la cara frontal tendrá un redondeo con un radio de 10 mm, mientras que en la parte trasera se le aplicará un redondeo de radio 4 mm.

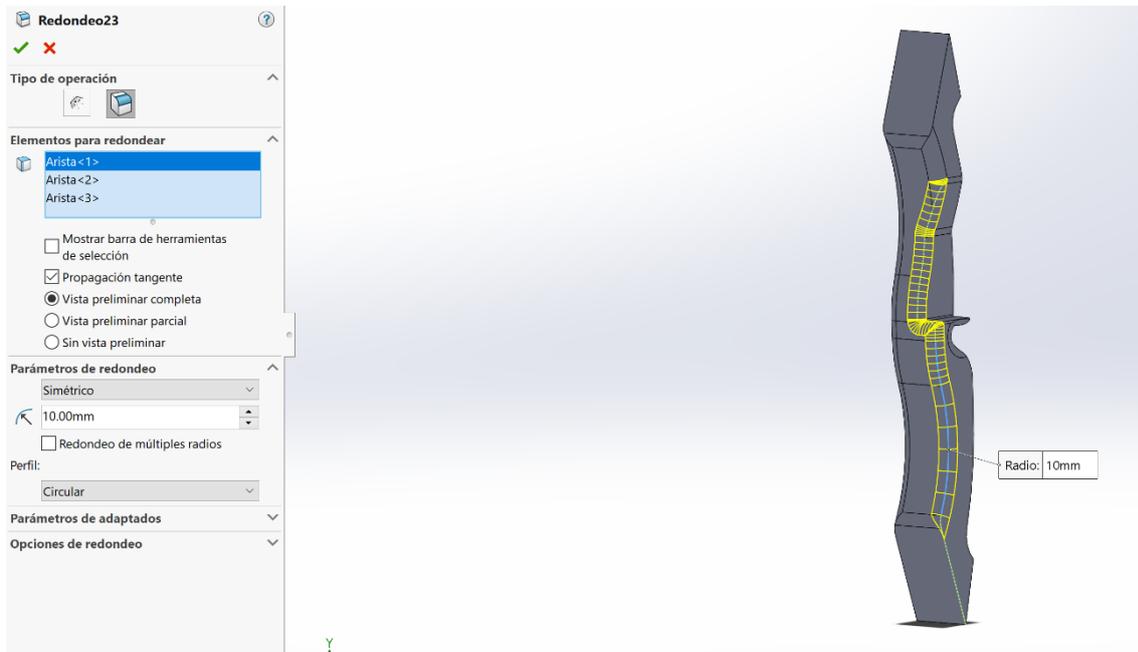


Figura 14. Redondeo de los contornos

La última fase para la realización del diseño sería añadir los agujeros para unir las palas con la empuñadura. El agujero se realiza con un diámetro de 20'637 mm para poder insertar una rosca “Whitworth” para colocar un ajustador de potencia para el arco.

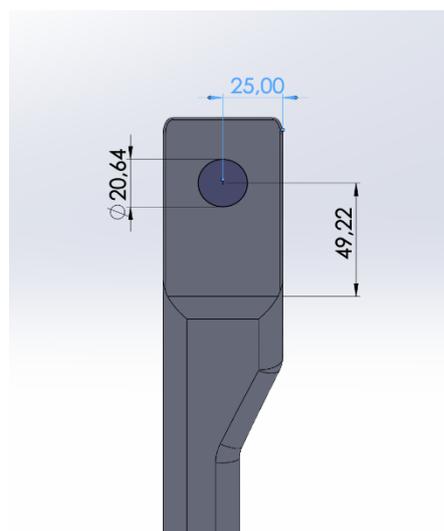


Figura 15. Croquis de la circunferencia del pasador

La profundidad del agujero será de 7 mm para que no sobrepase el espesor del diseño, para que a su vez tenga suficiente juego para aguantar las tensiones aplicadas por las palas.

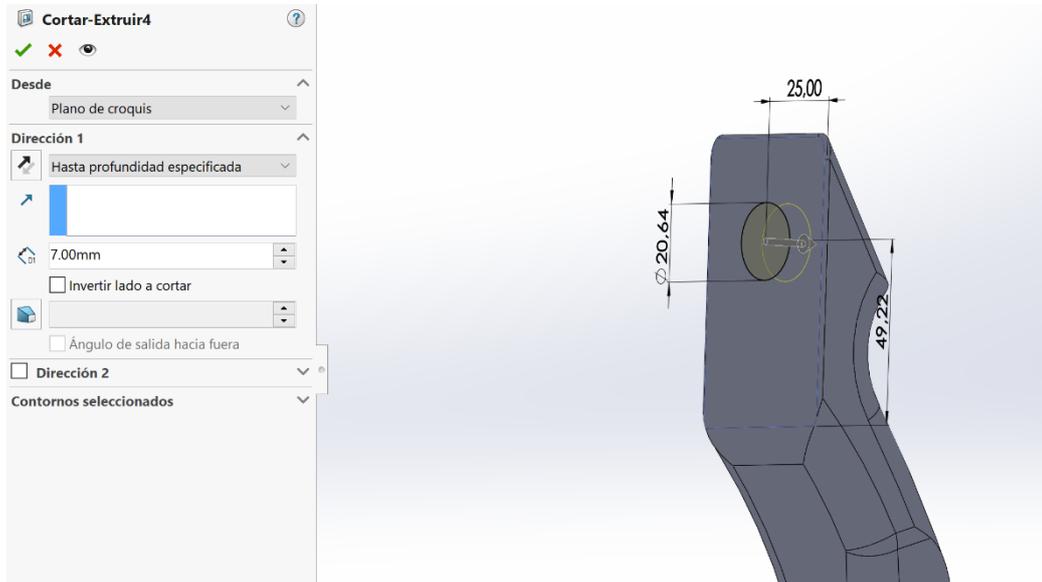


Figura 16. Extrusión del corte del agujero para el pasador

III.4.1.2 Palas Superior e Inferior del primer diseño

Al igual que la empuñadura, el diseño de las palas se realiza basándose en la observación de diseños comerciales y manteniendo, hasta cierta medida, las dimensiones del diseño ya existente.

Las características principales que deben tener las palas son:

- Elasticidad.
- Resistencia a torsión.
- Resistencia a impacto.

Para comenzar, se prepara la base sobre la cual se diseñarán las palas del Arco Recurvo. Esta base constará de un rectángulo de 200 mm x 608 mm. Este rectángulo se extruye 270 mm para tener un espacio cómodo para trabajarlo.

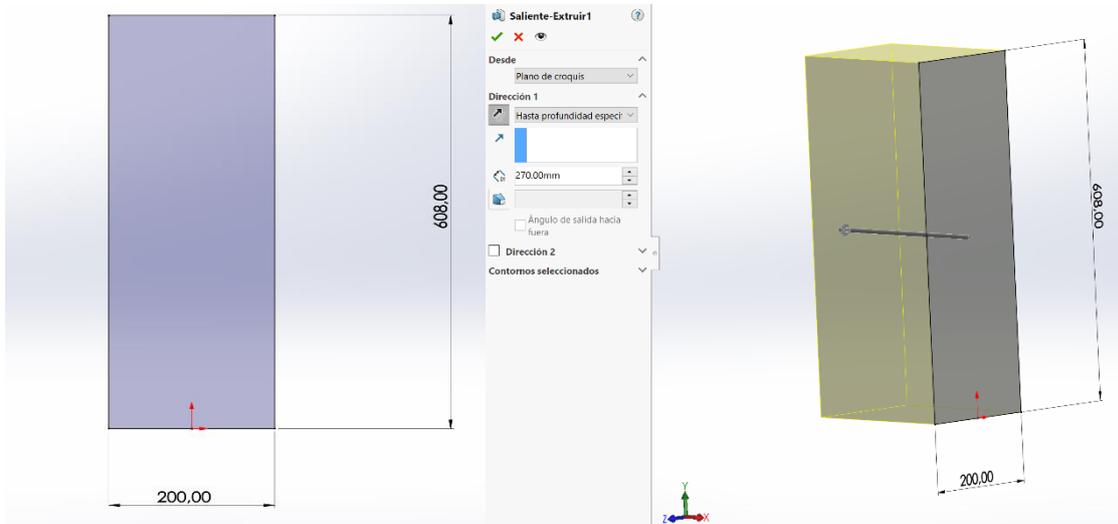


Figura 17. Rectángulo inicial del diseño de la pala y extrusión de esta

Una vez extruido el rectángulo, se pasa a determinar el espesor y la curvatura de la parte superior de la pala del Arco Recurvo. En cuanto a espesor se ha optado por un espesor de 20 mm en la base que se reduce hasta 10 mm en el extremo contrario. Estas medidas se han obtenido estudiando arcos recurvos de madera. Para hallar la curvatura idónea de la pala, se extrapola mediante la espiral de Fibonacci, seleccionando un radio de esta espiral que encaje con las dimensiones que se han elegido para la pala. En el caso del primer diseño se escoge un radio de 233 mm.

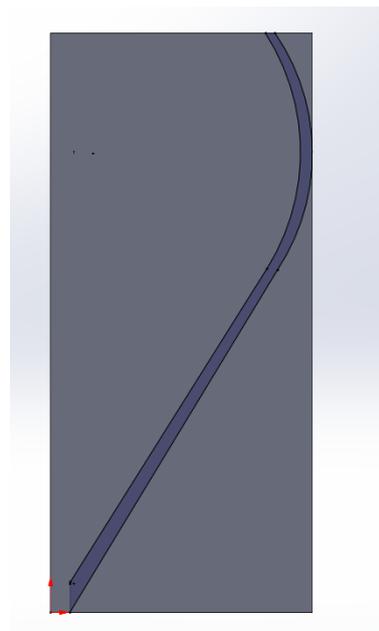


Figura 18. Croquis lateral de las palas

Al igual que se ha hecho con la empuñadura, ahora se debe recortar toda la sección sobrante del croquis.

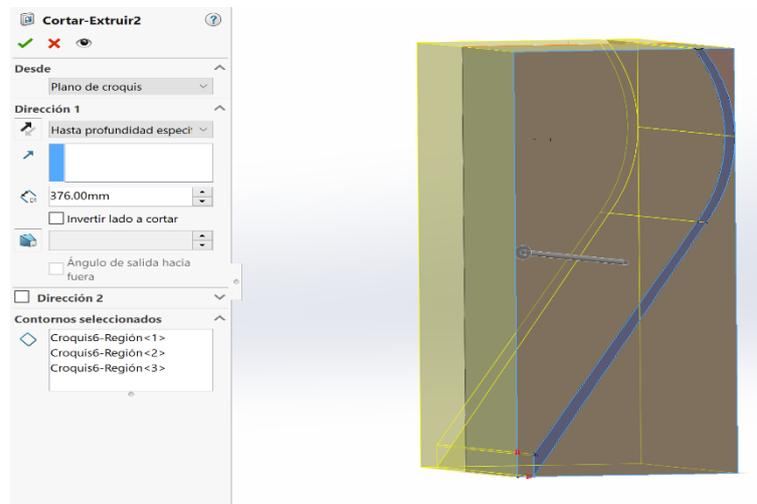


Figura 19. Extrusión del corte del sobrante

El próximo paso para seguir es dibujar el croquis de la forma frontal de la pala. Para ello se selecciona la cara de 200 mm x 608 mm.

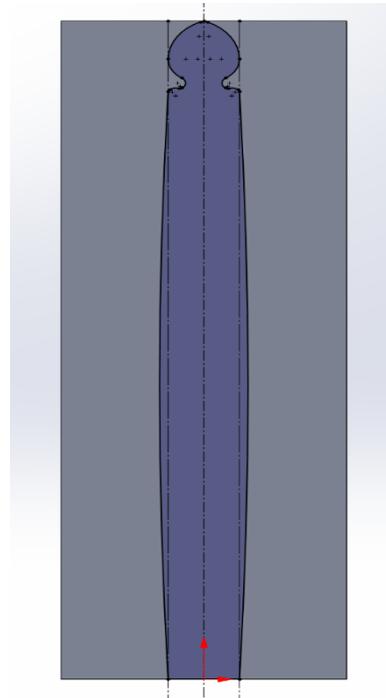


Figura 20. Croquis cara frontal de las palas

El siguiente paso consta en la eliminación del sobrante de los laterales.

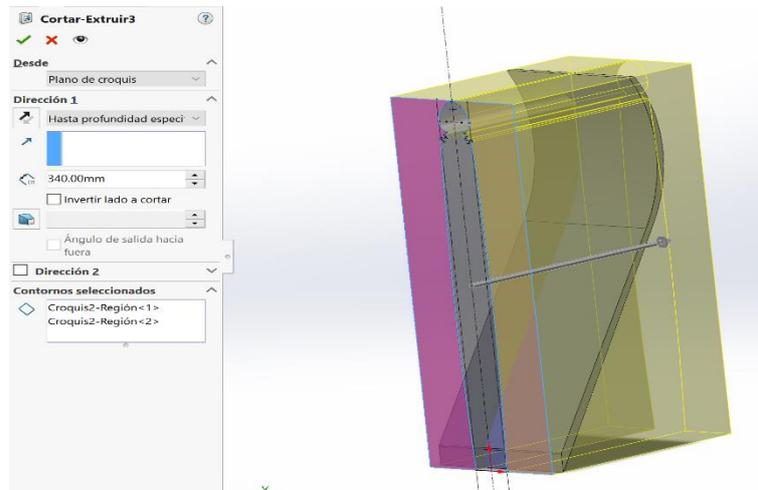


Figura 21. Extrusión corte del sobrante

En cuanto se ha obtenido la preforma del diseño, se procede a redondear las aristas de la pala para quitar los contornos bruscos lo que, a la vez que da elegancia al diseño, evita posibles problemas con la cuerda cuando se coloque.

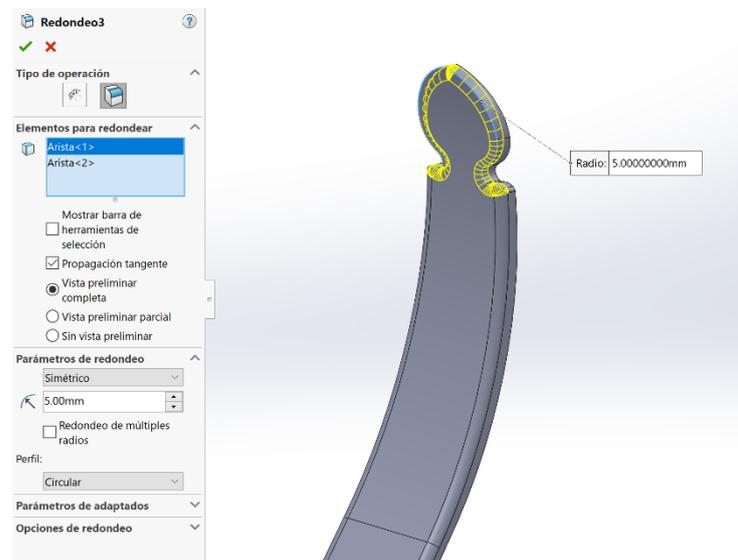


Figura 22. Redondeo de los bordes

Ahora que se ha realizado la forma de las palas, procederemos a añadir el elemento final, el agujero para el tornillo “Whitworth” que las une con la empuñadura. Para ello se dibuja la circunferencia de 20’637 mm sobre la cara trasera de la pala.

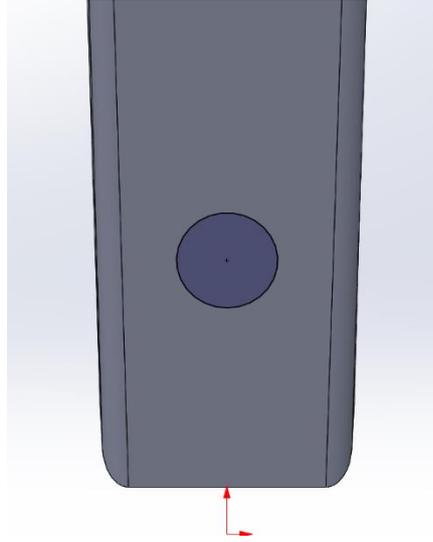


Figura 23. Croquis circunferencia del pasador

Una vez dibujado se extruye el corte para eliminar la sección para que pase el tornillo por completo.

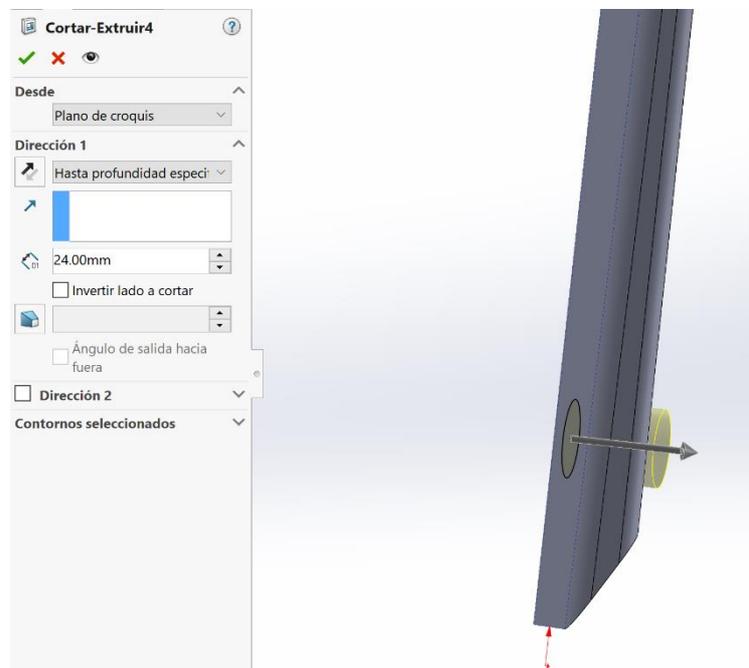


Figura 24. Extrusión del corte del pasador

III.4.1.3 Ensamblaje

El último paso antes de comenzar con los estudios de funcionalidad del diseño es el ensamblaje, el cual trata de conectar todas las piezas diseñadas individualmente en un mismo archivo para poder realizar los estudios sobre ellos.

Se introducen todas las partes en un mismo archivo de ensamblaje de “*SolidWorks*” y se crean relaciones de posición para garantizar que no hay giros inesperados entre piezas.



Figura 25. Piezas a ensamblar

III.4.1.4- Simulación del encordado

La simulación del encordado se realiza a partir del ensamblaje realizado anteriormente.

El primer paso para seguir es la selección de material, que en nuestro caso va a ser fibra de carbono con resina epoxi. Una vez se ha colocado el material a toda la pieza, se pasa a colocar las conexiones entre las piezas, en este caso se colocan pasadores para simular los tornillos “Whitworth” que estarán en su lugar.

Después se debe indicar las sujeciones o partes que estarán fijas durante la simulación, en este caso la empuñadura del arco.

Una vez fijadas las partes inmóviles se pasará a introducir las cargas externas a las partes móviles, las cuales simularán el estiramiento que provocará la cuerda sobre las palas del arco. La carga que se colocará sobre las palas es de 100 N a 45°, lo que debería llevar el arco a la posición en reposo. Se colocará una carga en cada pala a 45° respecto a una horizontal en la posición central del arco. Por último, antes de ejecutar la simulación, se debe realizar un mallado para poder simular los estados tensionales. En el caso de los arcos, no se debe hacer un mallado estándar, sino que se deberá efectuar un mallado basado en curvatura, que se encontrará en los parámetros del mallado. Una vez obtenido el mallado, se pasará a ejecutar.

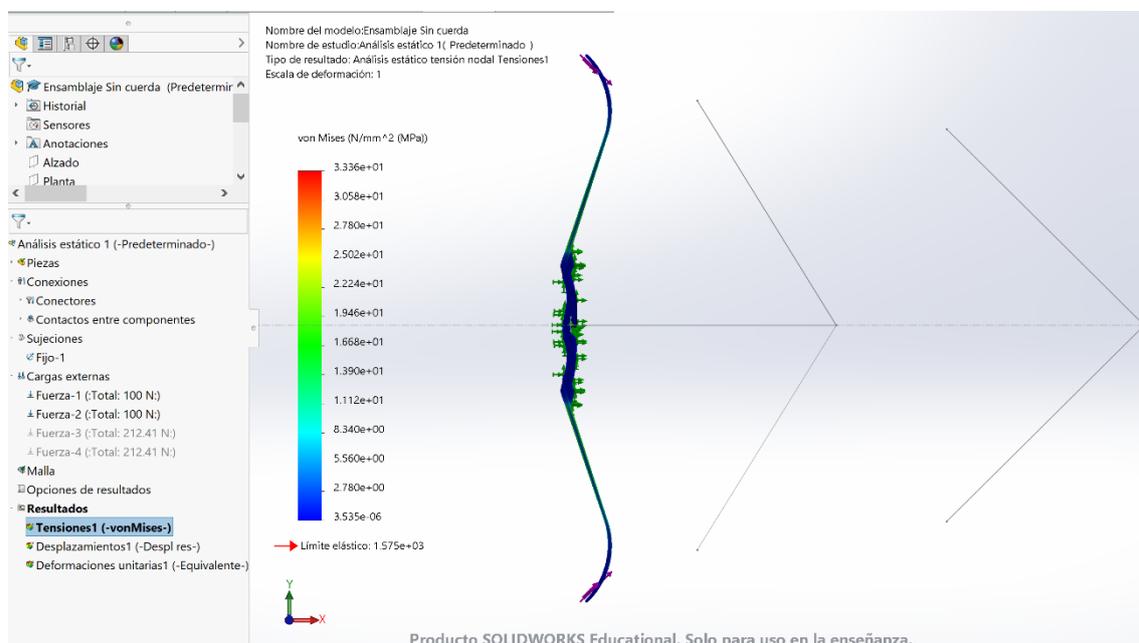


Figura 26. Tensión Von Mises 1^{er} diseño, arco en reposo

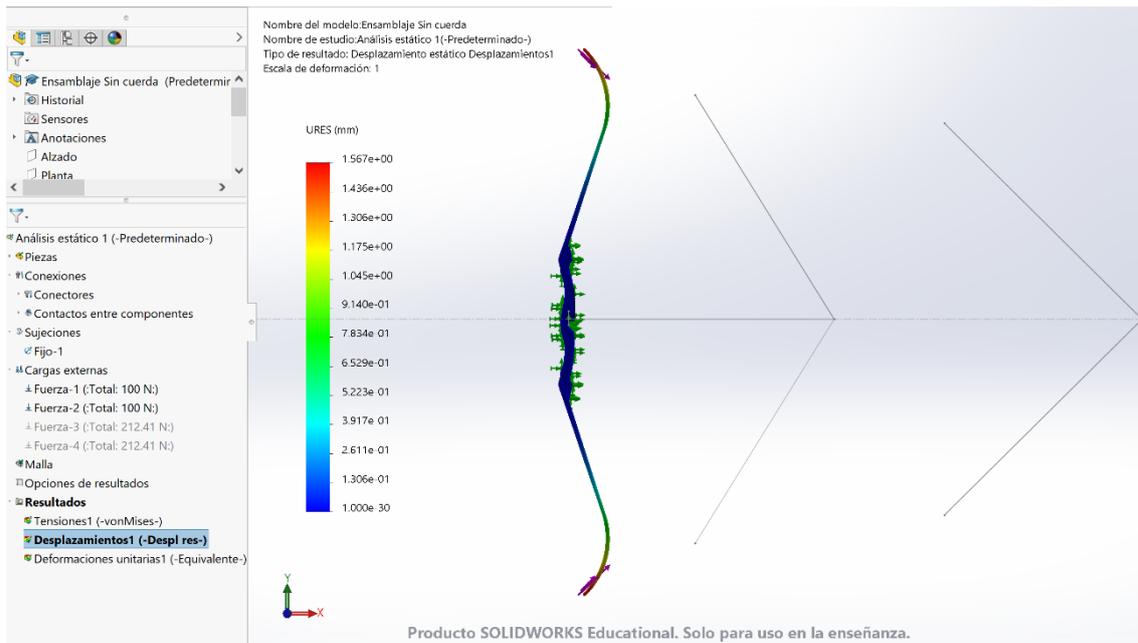


Figura 27. Desplazamiento 1^{er} diseño, arco en reposo

Como se puede observar en los resultados obtenidos, podemos deducir que el arco en sus condiciones actuales es demasiado rígido. Si se analiza las tensiones de Von Mises, observamos que la tensión a la que está sometida cada extremidad del arco es de $3'336e^1$ MPa. Este valor no se acerca al límite elástico del material utilizado, además de que su desplazamiento es casi negligible, siendo un desplazamiento de $1'567$ mm y esto no es suficiente para encordar el arco.

III.4.1.5 Simulación del arco con flecha cargada

Para realizar una simulación con el arco en su estado cargado, se realizan los mismos pasos que se han realizado anteriormente añadiendo un par de cargas externas adicionales. Estas dos cargas externas representan el estiramiento de la cuerda y la tensión que producen a cada extremidad del arco. Estas cargas estarán situadas en la misma posición que las anteriores, pero con la diferencia del ángulo al cual afectarán a las palas.

Estas cargas adicionales serán de 212'41 N a 58'43° que es la carga equivalente a la que estarán sometidas las palas en el caso de estirar a una fuerza de 50 lb (222'41 N) en la horizontal centrada.

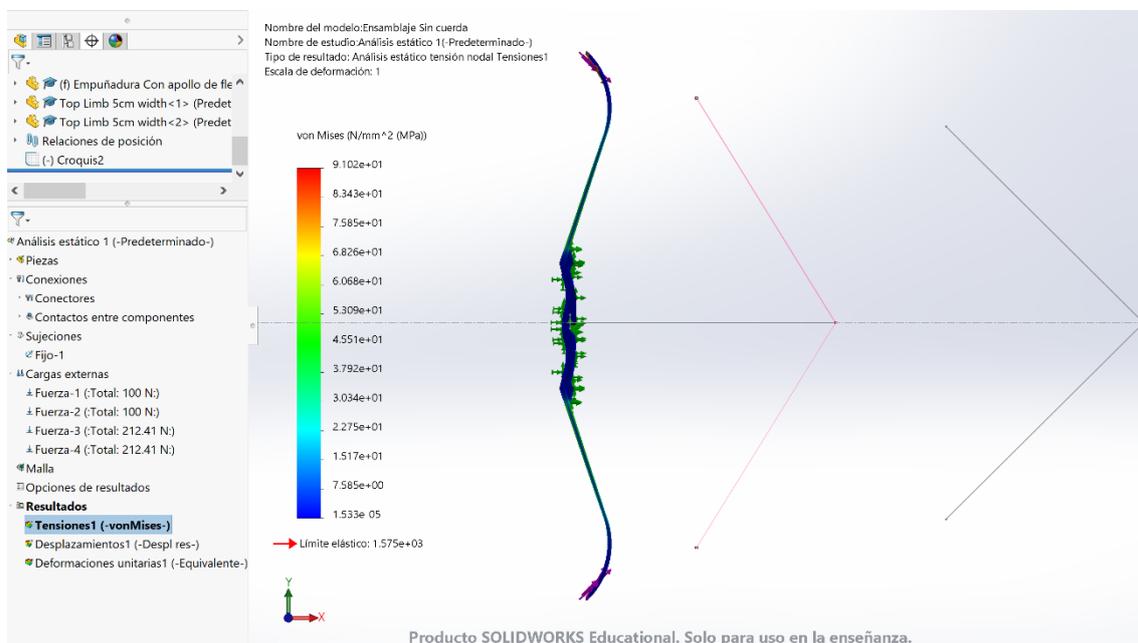


Figura 28. Tensiones Von Mises 1^{er} diseño, arco cargado

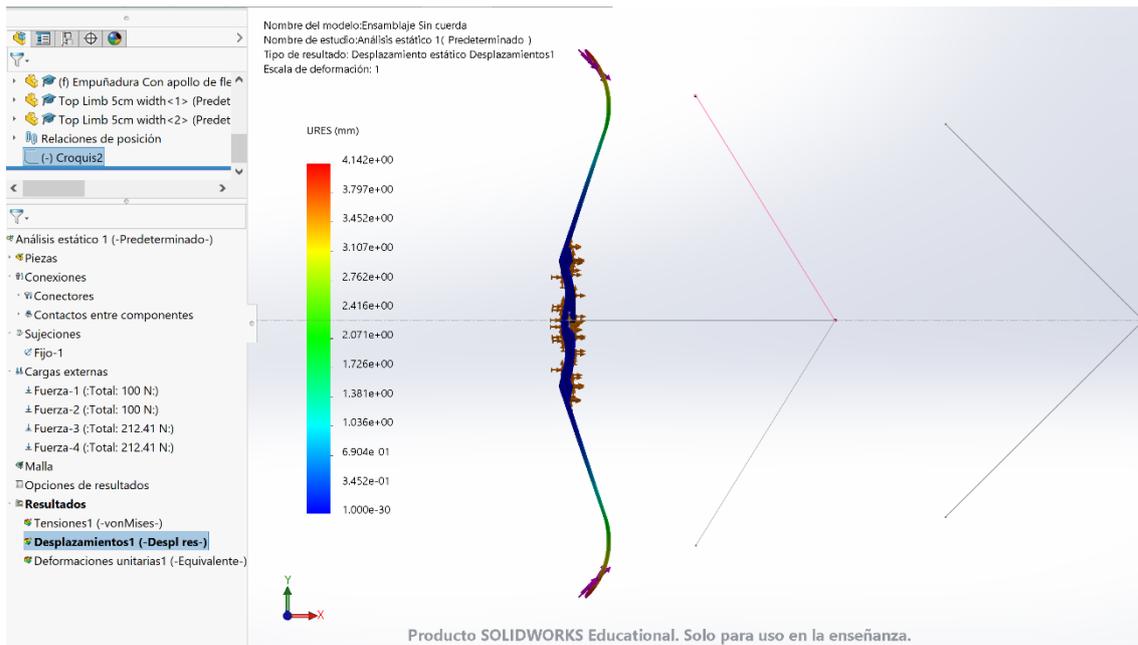


Figura 29. Desplazamiento 1^{er} diseño, arco cargado

Como se puede observar en las simulaciones realizadas, este diseño del arco con este material es demasiado rígido. Las tensiones de Von Mises llegan a $9'102e^1$ MPa. Este valor se queda lejos del límite elástico del material seleccionado. En cuanto al desplazamiento que experimenta, 4'142 mm, es un desplazamiento insignificante en el mundo de la arquería. Por lo que se puede concluir que este diseño es demasiado rígido.

III.4.2 Segundo Prediseño

Para la realización del segundo prediseño, se ha basado el nuevo diseño en el anterior, pero teniendo en cuenta los resultados de las simulaciones y reajustando partes del diseño para corregir los errores observados.

III.4.2.1 Segundo prediseño de la empuñadura

El cambio principal realizado en la empuñadura es una reducción de sección de apoyo para la pala de una longitud de 80'40 mm a una de 43'34 mm, porque de esta manera al haber más distancia entre el punto de apoyo de la pala con la empuñadura y el extremo donde se aplica la fuerza se aumenta la facilidad de flexión que afecta a la pala.

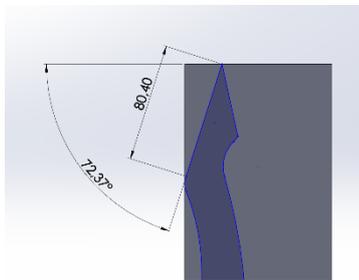


Figura 30. Longitud en 1^{er} diseño

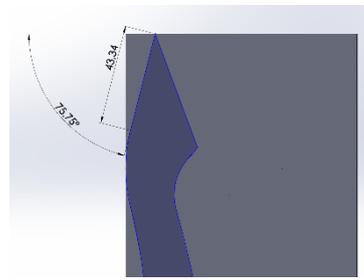


Figura 31. Longitud en 2^o diseño

Y al reducir el espesor de las palas, esta se compensa con una variación de la inclinación de esta sección de 72'37° a 75'75°.

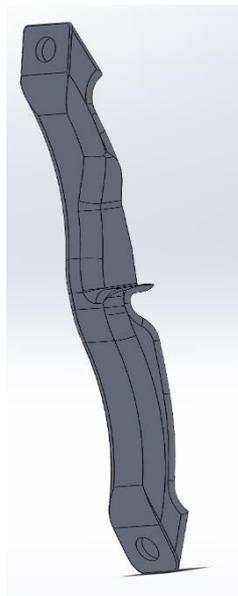


Figura 32. 2^o Diseño empuñadura

III.4.2.2 Segundo prediseño de las palas

En cuanto a los cambios realizados a las palas, se ha reducido el espesor de estas de 20 mm a 4 mm debido a la rigidez del primer diseño.

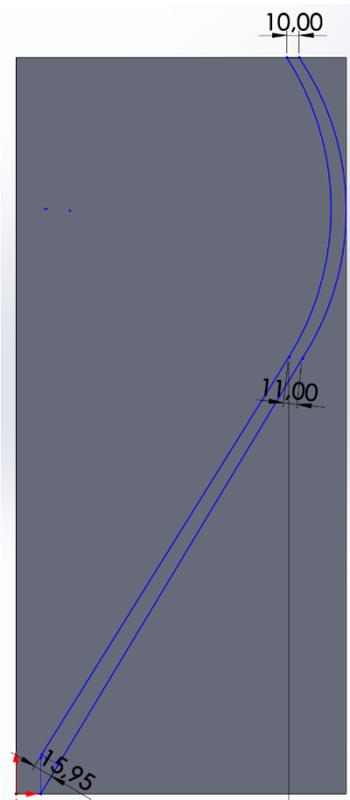


Figura 33. Espesor 1^{er} diseño

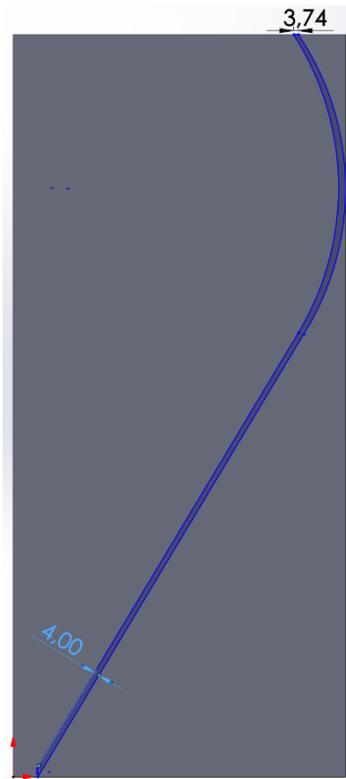


Figura 34. Espesor 2^o diseño



Figura 35. 2^o Diseño Palas

III.4.2.3 Ensamblaje del segundo prediseño

Para el ensamblaje del segundo prediseño se procede de la misma forma que en el primero. Se insertan todas las piezas en un mismo archivo de ensamblaje. Gracias a tenerlos todos en un mismo archivo, se definen las relaciones de posición de tal forma que no se descentren ni giren en su sitio.

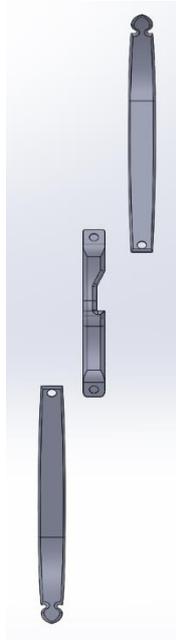


Figura 36. Piezas ensamblaje, 2º diseño

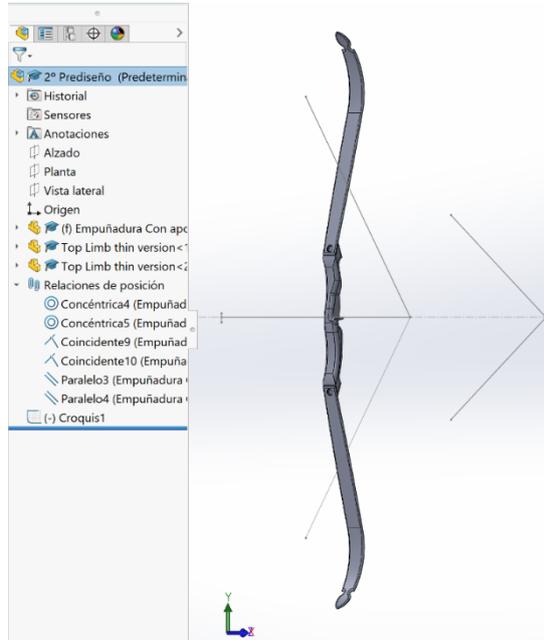


Figura 37. Relaciones de posición, 2º diseño

III.4.2.4 Simulación del encordado del arco

Para la simulación se vuelven a realizar los mismos pasos que en el primer diseño. Primero se selecciona el material, se colocan las conexiones, se indican las partes fijas del arco, se colocan las dos fuerzas de 100 N a 45° que simulará la posición de reposo del arco encordado y por último se crea el mallado basado en curvatura.

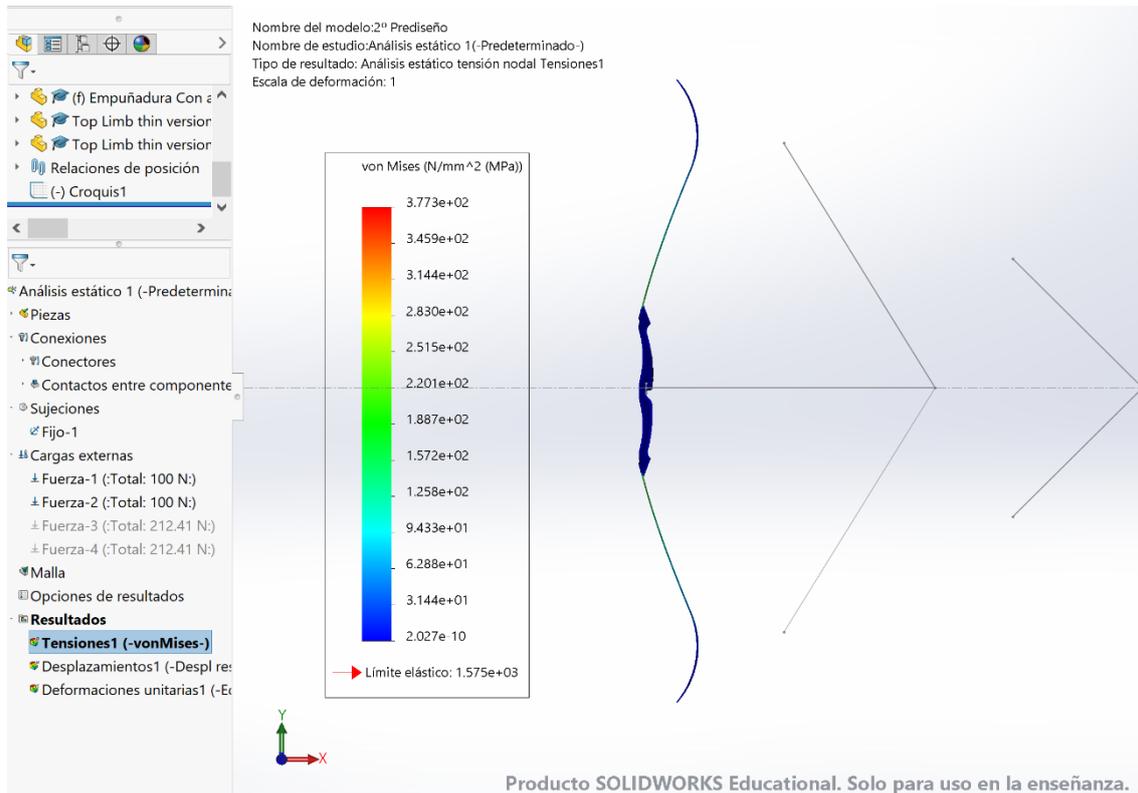


Figura 38. Tensiones Von Mises 2ºdiseño, arco en reposo

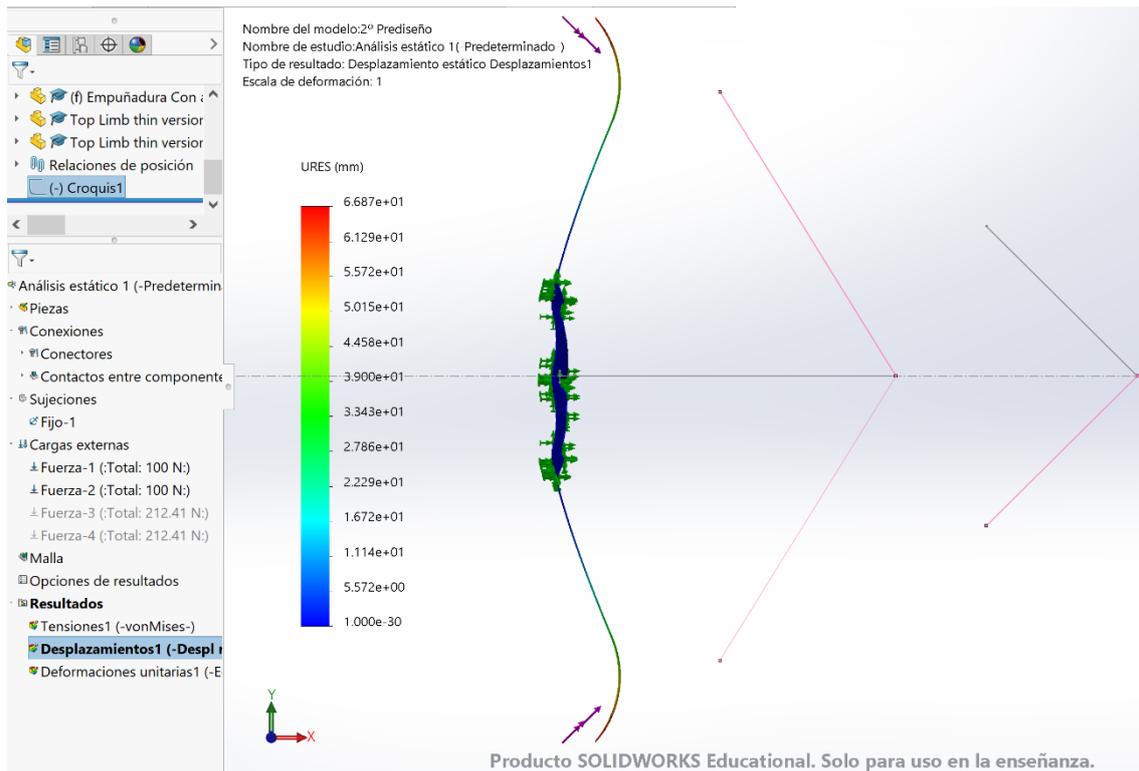


Figura 39. Desplazamiento 2º diseño, arco en reposo

Como se puede observar si analizamos los resultados de las simulaciones no hay ningún inconveniente al colocar la cuerda, la tensión máxima a la que están sometidas las palas del arco son de $3'773e^2$ MPa, lo cual no sugiere ningún riesgo para la integridad del material, mientras que el desplazamiento de máximo que experimenta el arco se encuentra en la punta de las palas, dando una distancia de $6'687e^1$ mm, lo cual se ajusta para un funcionamiento básico del arco.

La mayor problemática que se encuentra tras esta simulación es que las palas no llegan al punto de encordado mínimo, por tanto, se requeriría de más fuerza para poder encordarlo correctamente.

III.4.2.5 Simulación del arco con flecha cargada

Se realiza la misma simulación que anteriormente, pero, en este caso, se añaden dos fuerzas adicionales de 212'41 N en una dirección de 58'43°. Esto simulará la carga que presenta estirar la cuerda hasta el punto de apertura del arco al cargar una flecha.

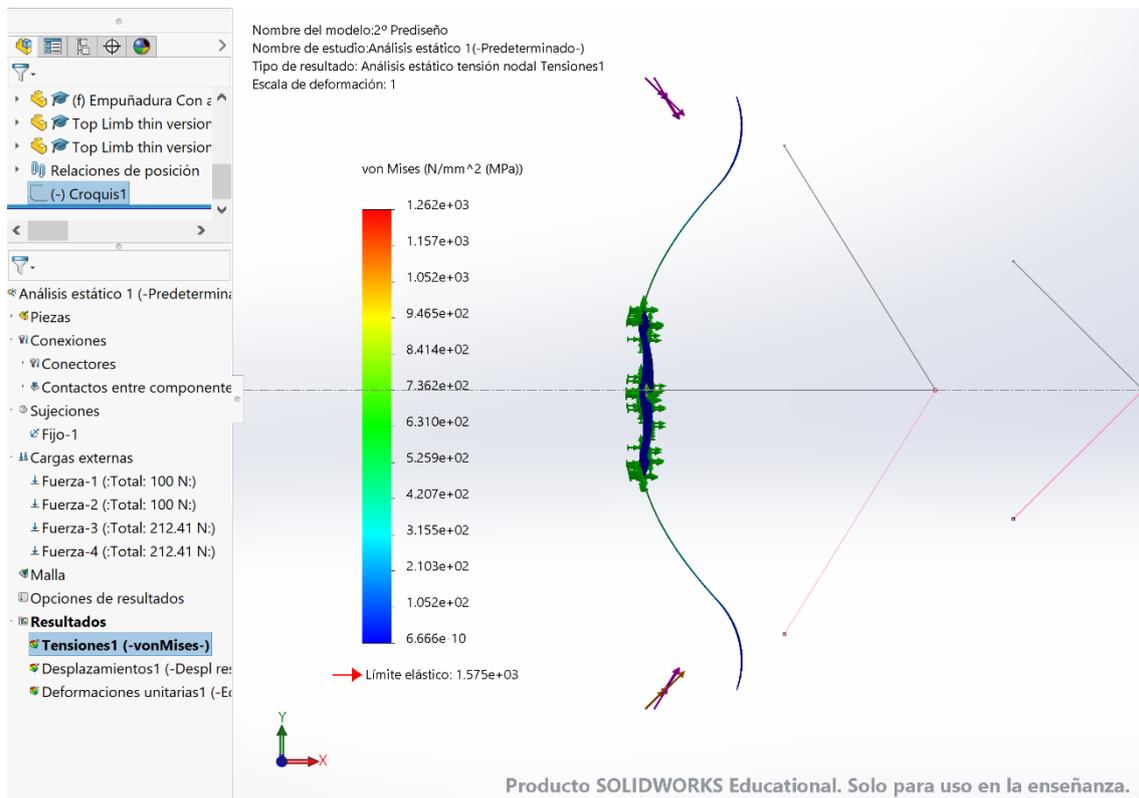


Figura 40. Tensiones Von Mises 2º diseño, arco con flecha cargada

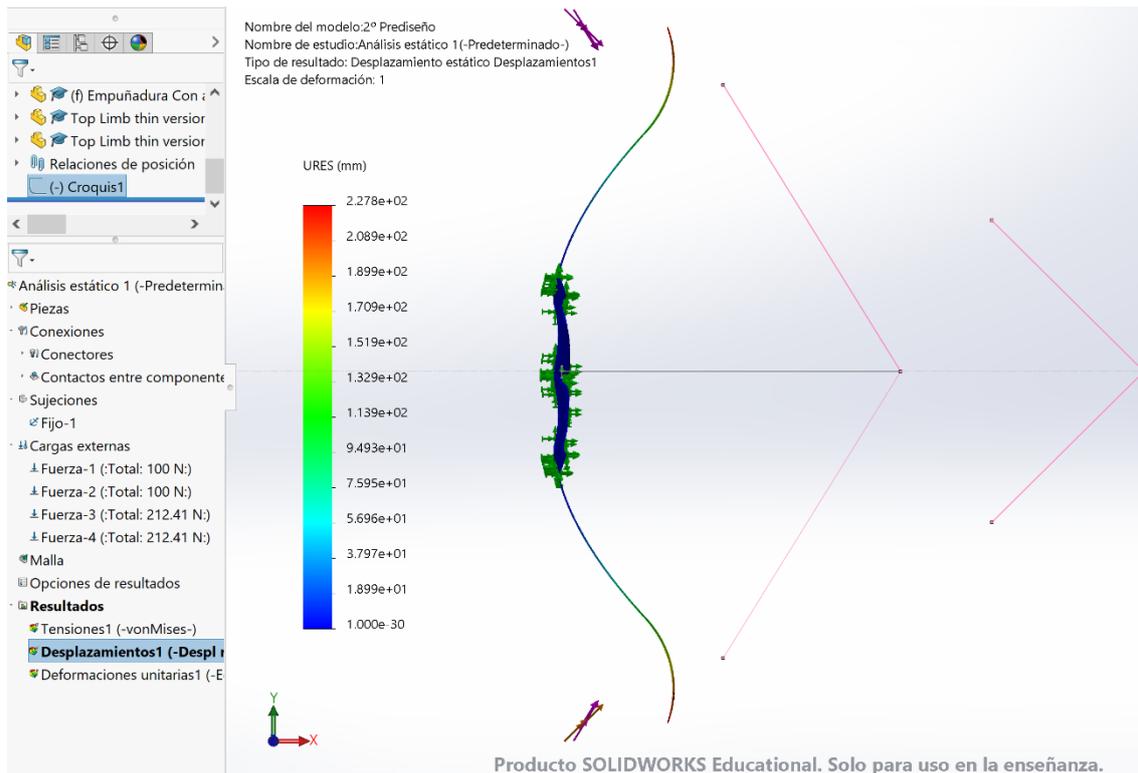


Figura 41. Desplazamiento 2º diseño, arco con flecha cargada

Como se puede observar después de analizar los resultados de las simulaciones realizadas, la tensión de Von Mises que obtenemos de poner las cargas a este diseño es de $1'262e^3$ MPa la cual no supera el límite elástico del material, aunque empiece a acercarse. Aun teniendo en cuenta que el límite elástico no es superado, también se observa que el desplazamiento obtenido al aplicar las cargas es de $2'278e^2$ mm, lo cual es inferior al valor necesario para poder llegar al punto de apertura necesaria aplicando la fuerza de diseño.

Teniendo en cuenta estos resultados, debemos crear un nuevo diseño, corrigiendo y mejorando el diseño anterior, teniendo en cuenta los fallos se han observado.

III.4.3 Tercer Prediseño

Este tercer prediseño se ha diseñado utilizando como base el segundo prediseño, teniendo en cuenta los fallos observados en los resultados de las simulaciones anteriores. Para solucionar los problemas que surgieron al analizar los resultados del segundo prediseño se ha optado por la ampliación de la sección de apoyo entre la empuñadura y las palas, para poder repartir la carga tensional producida en la pala al aplicarle la fuerza de cargar una flecha. Además, se ha reducido la anchura de las palas para aumentar la flexibilidad y para disminuir la masa que se encuentra en las puntas de éstas ya que de esta manera se facilita el frenado de las puntas al soltar la flecha y la recuperación del estado de reposo del arco. El incremento de la sección entre las palas y la empuñadura se ha realizado mediante un aumento de 50 mm a 55 mm de anchura en la zona de apoyo.

III.4.3.1 Tercer prediseño de la empuñadura

Para solucionar los problemas encontrados en el segundo prediseño, mencionados anteriormente, se ha optado por la ampliación de la sección de apoyo entre la empuñadura y las palas para poder asegurar una correcta repartición de las cargas para compensar los cambios realizados a las palas y así no superar el límite elástico del material.

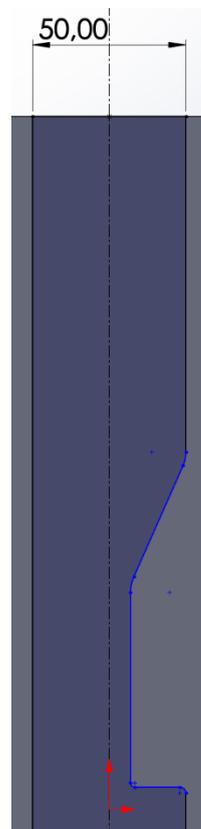


Figura 42. Anchura 2º diseño

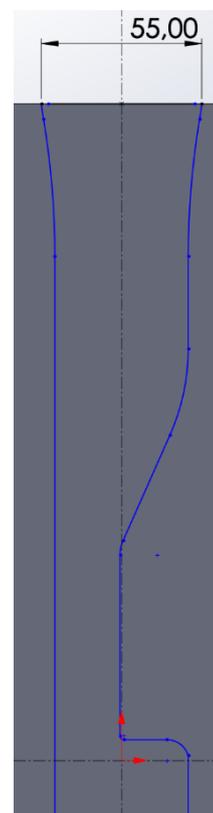


Figura 43. Anchura 3º diseño

El incremento de la sección entre las palas y la empuñadura se ha realizado mediante un aumento de 50 mm a 55 mm de anchura en la zona de apoyo de la empuñadura.

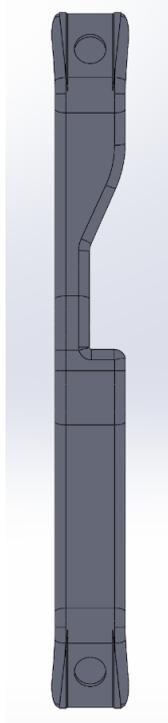


Figura 44. 3^{er} Diseño Empuñadura

III.4.3.2 Tercer prediseño de las palas

Para solucionar los problemas que se han encontrado con el diseño de las palas, se ha optado por una reducción de la base de la pala para facilitar la flexión. La reducción en cuestión es de 50 mm a 30 mm en la base de la pala.

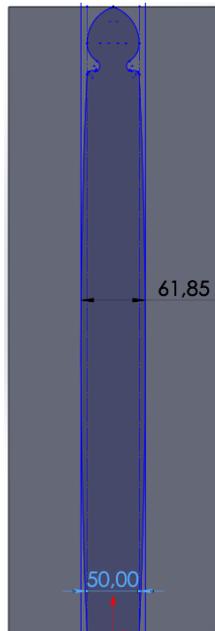


Figura 45. Anchura 2º diseño

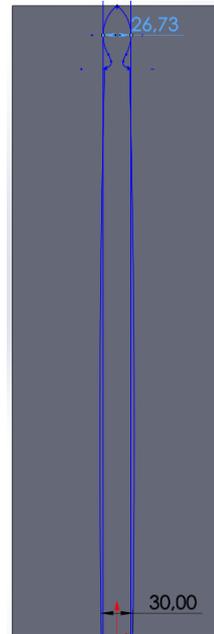


Figura 46. Anchura 3º diseño

Además de la reducción en la base, se ha optado por una reducción progresiva a lo largo de la pala desde los 30 mm en la parte inferior, hasta los 24 mm de la extremidad superior, para mejorar de esta manera el reparto de tensiones a lo largo de la pala.

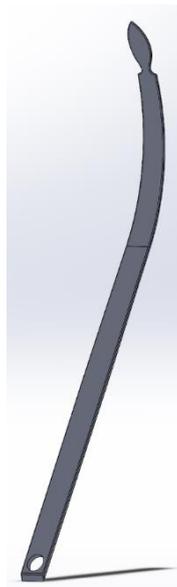


Figura 47. 3º Diseño Palas

III.4.3.3 Ensamblaje del tercer prediseño

Para el ensamblaje del tercer prediseño se procede de la misma forma que en los dos diseños anteriores. Se insertan todas las piezas en un mismo archivo de ensamblaje. Al partir con todos en un mismo archivo, se definen las relaciones de posición de tal forma que no se descentren ni giren en su sitio.

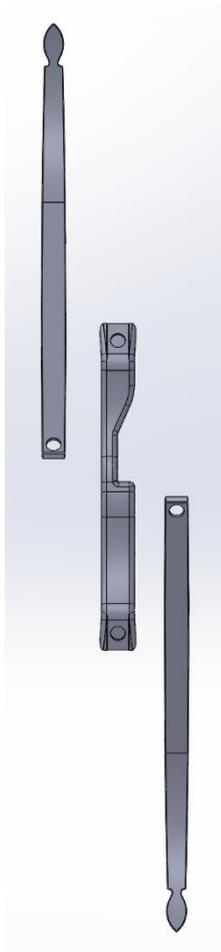


Figura 48. Piezas para ensamblar, 3^{er} diseño

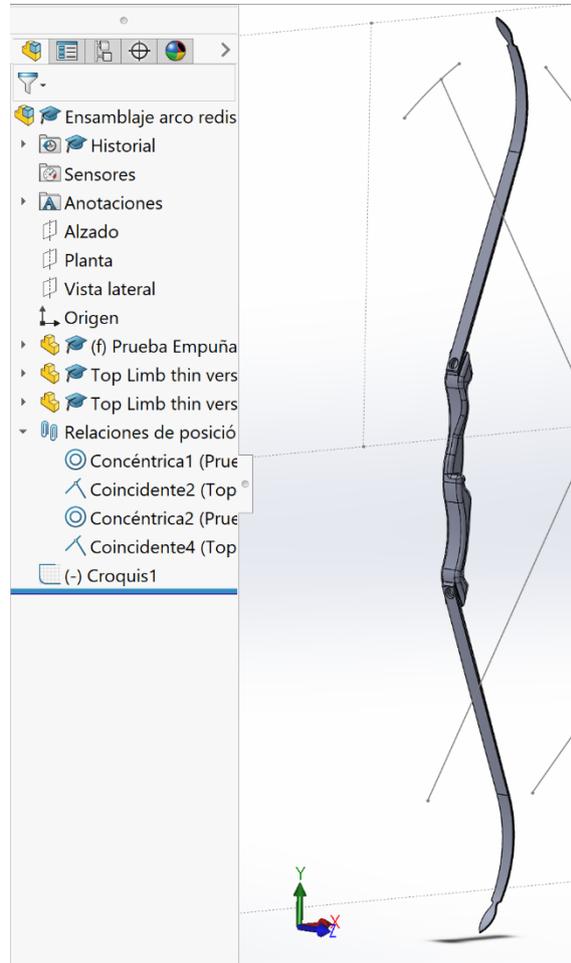


Figura 49. Relaciones de posición, 3^{er} diseño

III.4.3.4 Simulación encordado del arco

A la hora de proceder con la simulación, se repiten los pasos que se han realizado en los anteriores dos diseños. Primero se selecciona el material que se va a aplicar, el cual es fibra de carbono con resina epoxi en el caso de este proyecto. Segundo se colocan los pasadores que actúan de tornillos “Whitworth”. Seguidamente se fija la zona rígida del arco, y después se colocan las fuerzas de 100 N a 45° en cada uno de los extremos y por último el mallado basado en curvatura para los cálculos de la simulación.

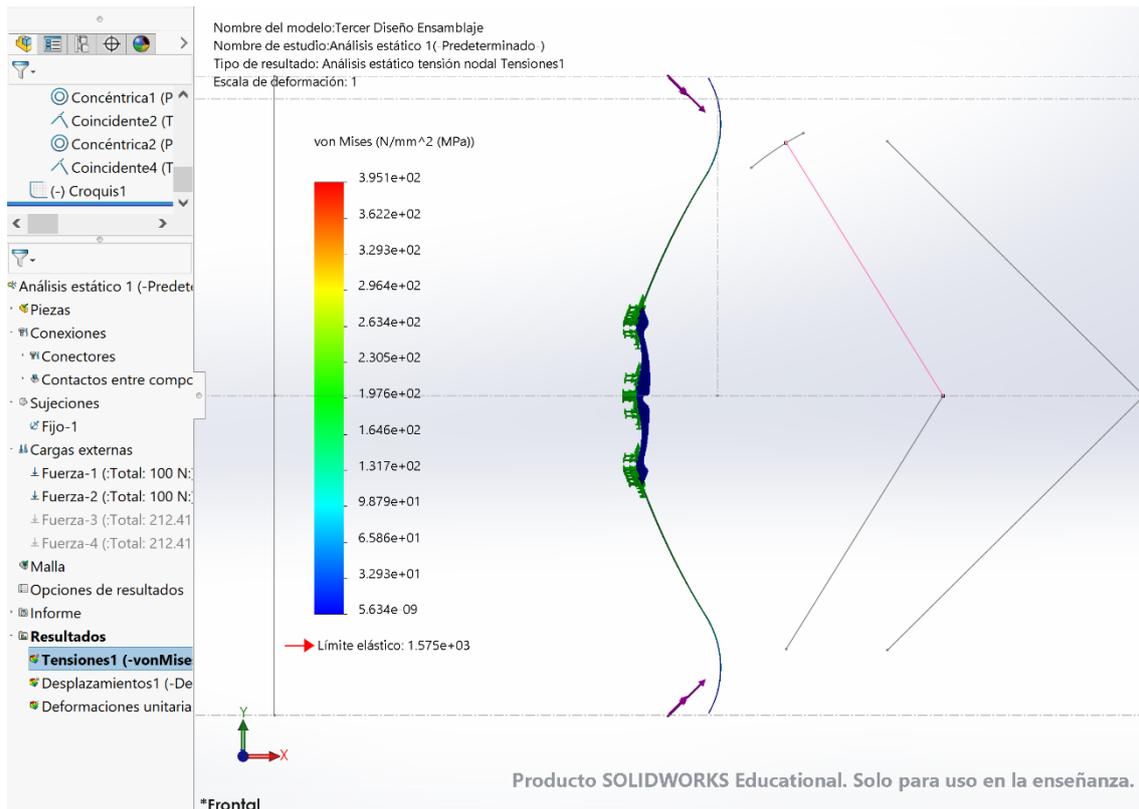


Figura 50. Tensiones Von Mises 3^{er} diseño, arco en reposo

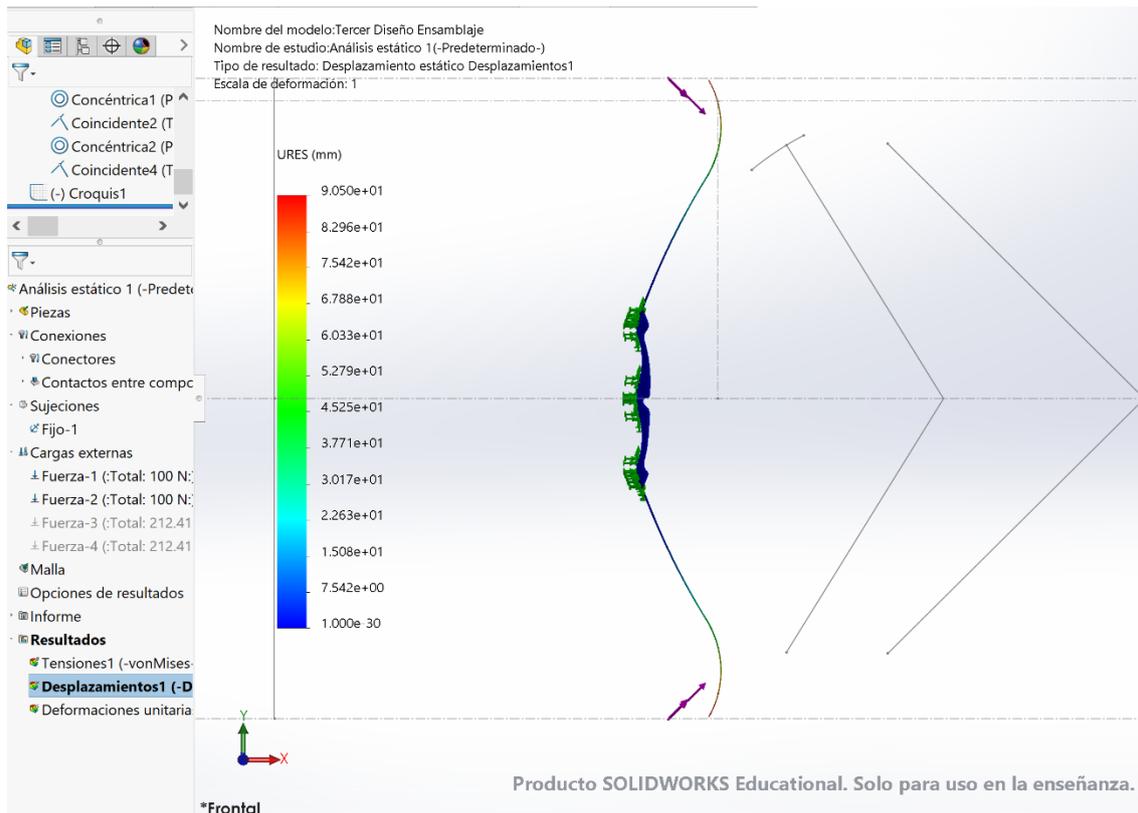


Figura 51. Desplazamientos 3^{er} diseño, arco en reposo

En este caso, las tensiones de Von Mises no causan ningún problema para encordar el arco. La tensión máxima a la que está sometida es de $3'951e^2$ MPa la cual no supera el límite elástico. En cuanto al desplazamiento que sufre el arco, podemos observar que se desplaza $9'050e^1$ mm lo cual colocaría las palas en la posición idónea para el encordado del arco.

III.4.3.5 Simulación del arco con flecha cargada

Se realiza la misma simulación que anteriormente añadiendo dos fuerzas adicionales de 212'41 N en una dirección de 58'43°, lo que simulará la carga que presenta estirar la cuerda hasta el punto de apertura del arco al cargar una flecha.

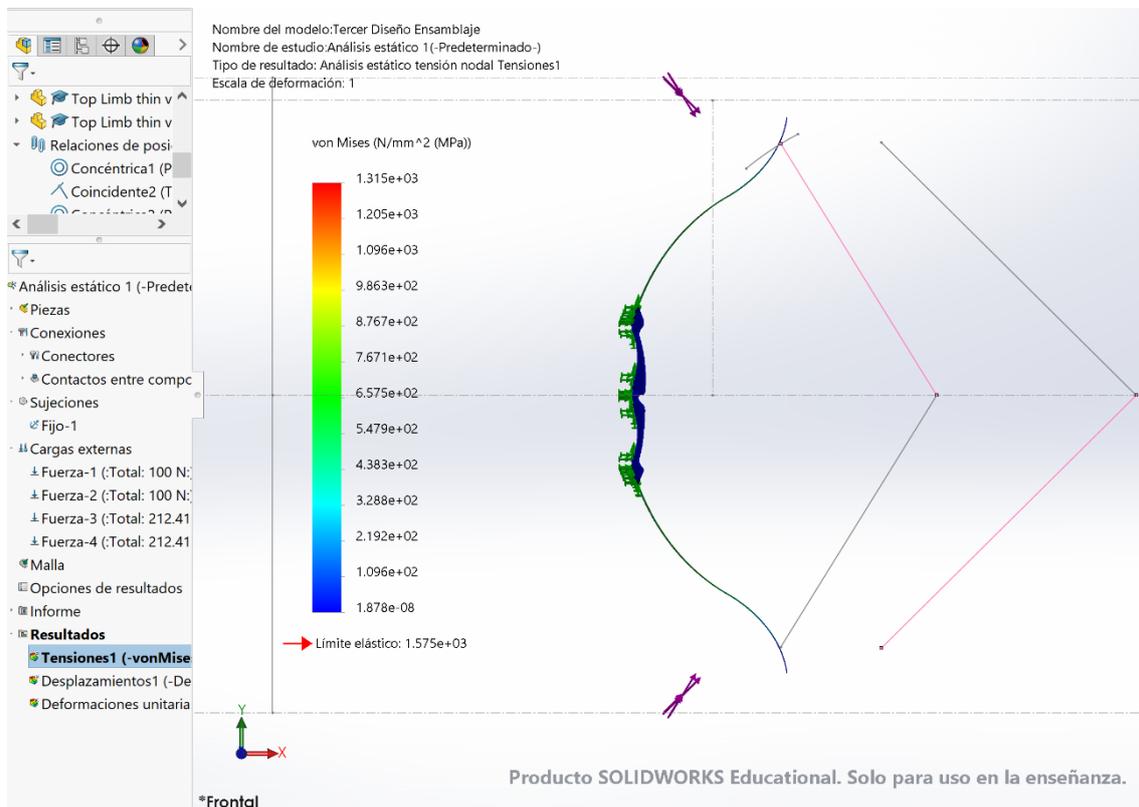


Figura 52. Tensiones Von Mises 3^{er} diseño, arco con flecha cargada

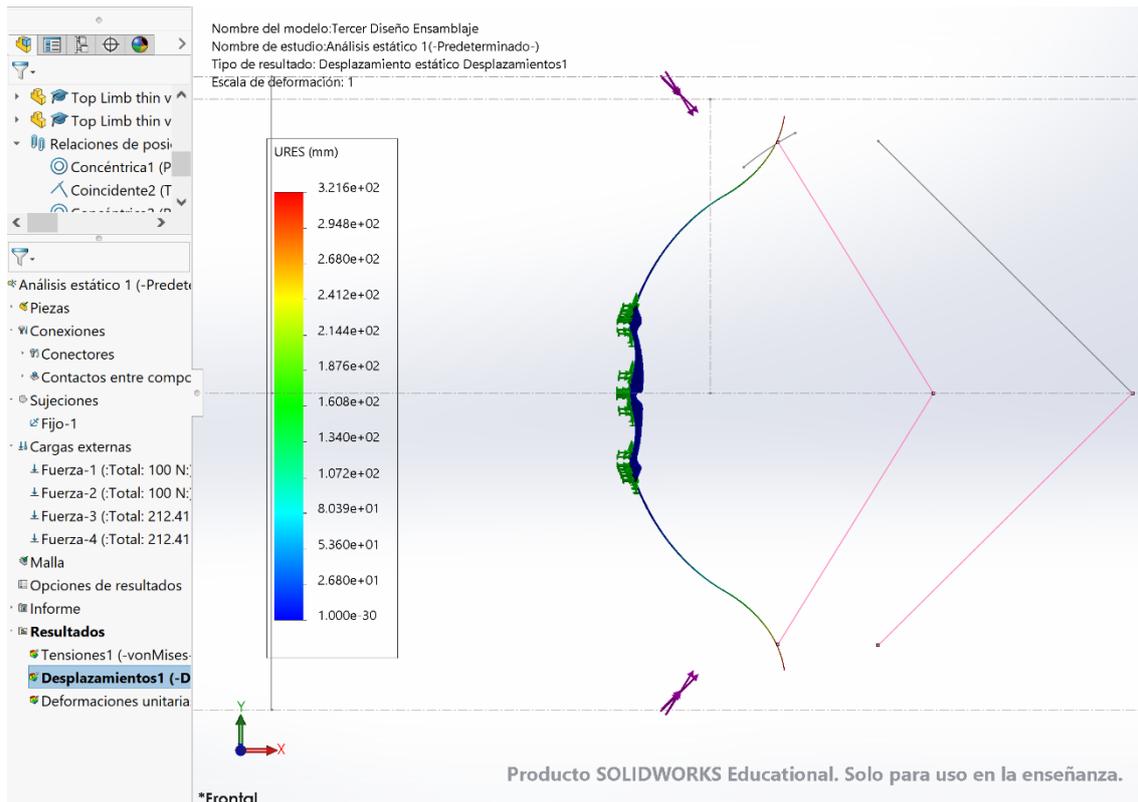


Figura 53. Desplazamientos 3^{er} diseño, arco con flecha cargada

Como se puede observar de los resultados obtenidos mediante la simulación, las tensiones de Von Mises no superan el límite elástico dejando un factor de seguridad de 1'198 calculado con la ecuación (1), y como no hay una normativa fija del factor de seguridad mínimo, se tomará como mínimo de 1. En cuanto al desplazamiento total, se puede observar que las palas se desplazan hasta el punto predefinido para que la longitud de la cuerda desde la flecha hasta el arco sea exactamente 760 mm, lo cual cumple con las medidas necesarias para el correcto funcionamiento del arco permitiendo llegar al punto de apertura con la fuerza de diseño del arco.

$$(1) \text{ Factor de Seguridad} = \frac{\text{Límite elástico}}{\text{Tensión máx.}}$$

III.5 Tabla resumen y selección del diseño final

Para seleccionar el diseño que se va a utilizar se han confeccionado un par de tablas en las cuales se resumen los resultados de las simulaciones realizadas anteriormente, además de algunos datos importantes para tener en cuenta.

Si comparamos los resultados obtenidos de las simulaciones en la siguiente tabla:

	Tensiones VM Reposo (MPa)	Deformaciones Reposo (mm)	Tensiones VM Cargado (MPa)	Deformaciones Cargado (mm)
Diseño 1	$3'336e^1$	$1'567e^0$	$9'102e^1$	$4'142e^0$
Diseño 2	$3'773e^2$	$6'687e^1$	$1'262e^3$	$2'278e^2$
Diseño 3	$4'097e^2$	$9'052e^1$	$1'364e^3$	$3'216e^2$

Tabla 4. Comparación de resultados de las simulaciones.

Si sólo se presta atención a los resultados de las simulaciones podemos determinar claramente que el primer diseño es demasiado rígido y sería imposible de usar a mano. Con una tensión máxima de $9'102e^1$ MPa se puede observar que le queda mucho margen para aumentar la fuerza a la que se estira, pero en el diseño de un arco de 50 lb de fuerza, no es un dato de relevancia.

En cuanto al segundo diseño, podemos observar que, cuando se le aplica una carga de 50 lb, la tensión máxima que experimenta es de $1'262e^3$ MPa, la cual no llega a superar el límite elástico de la fibra de carbono con epoxi que utilizamos, pero a su vez no cumple con las deformaciones necesarias porque las palas no flectan lo suficiente para el correcto funcionamiento del arco, lo cual hace que este diseño no sea viable.

Lo que nos lleva al tercer y último diseño expuesto, el cual tiene una tensión máxima aplicada de $1'364e^3$ MPa que nos da un factor de seguridad de 1'198. Esto permite un margen de seguridad a la hora de que una persona estire la cuerda. Además de esto, cuenta con un desplazamiento óptimo, ya que las palas logran flectar lo suficiente para poder tener el punto de apertura con la fuerza deseada para el diseño del arco.

	“Brace height” (mm)	Altura del arco (mm)	Longitud de la cuerda desde la flecha al arco (mm)
Diseño 1	122’52	1265’70	891’04
Diseño 2	103’07	1503’84	873’12
Diseño 3	189’04	1520’00	760’00

Tabla 5. Apertura máxima, altura del arco en reposo y longitud de la cuerda entre extremidad y punto de agarre.

Teniendo también en cuenta la importancia de las posiciones en las cuales debe estar el diseño al aplicar las fuerzas para su funcionalidad, se deberá comprobar cuál de los diseños se acerca más a las medidas recomendadas para un arco del tamaño que se ha diseñado.

La longitud de la cuerda concuerda con la distancia entre los puntos de apoyo que tienen las palas, es decir, en teoría debería medir 1.520 mm, que es la misma medida del diseño 3. Además, esta distancia desde el punto de apoyo de las palas hasta la posición de la flecha cuando el arco está cargado debe ser la mitad de la longitud de la cuerda, y en el caso del diseño 3, es de 760 mm que es exactamente el valor que se necesita.

Teniendo en cuenta todo lo dicho anteriormente, se puede determinar que el diseño número 3 será el más eficaz de los diseños propuestos, estando cerca del diseño ideal.

IV. PROCESO DE FABRICACIÓN

Una vez se ha definido el diseño del arco que mejor se adapta al material elegido, se procederá a seleccionar el proceso necesario para fabricar cada parte del arco.

Para este apartado, se pasará a explicar los procesos por los cuales se podría realizar cada pieza del arco los procesos de acabado de cada pieza.

IV.1 Procesos de conformado

En este apartado se buscarán procesos que permitan conseguir la forma deseada para las piezas del arco. Como se ha mencionado anteriormente, se va a realizar solamente con fibra de carbono y resina epoxi, y no usarlos como refuerzo del arco.

Ya que se trata de un material de fibras continuas, se puede descartar todos los procesos de conformado por fibras cortas, como por ejemplo inyección, extrusión, etc. Esto nos deja con las opciones de procesos de conformado por fibras continuas. Entre estos procesos de conformado se encuentran: fabricación por moldeo manual, fabricación por moldeo de compresión al vacío, moldeo por transferencia de resina y bobinado de filamentos. Además del proceso de conformado, puede ser necesario soldar las partes resultantes para conseguir la pieza completa dependiendo del proceso seleccionado.

Entre estos procesos, se debe encontrar uno que se adecúe a la forma del diseño propuesto, sea adaptable a la maquinaria disponible en la empresa en el que se vaya a efectuar y además que sea económico.

IV.1.1 Moldeo manual

El proceso de fabricación por moldeo manual²⁰ se basa en colocar a mano trozos de tela del material polimérico deseado, fibra de carbono para el caso en cuestión, en el molde aplicando a continuación una capa de resina con un pincel, en este caso resina epoxi, y después pasar un rodillo para quitar burbujas de aire que puedan quedar atrapados entre las capas seguido de otro trozo de tela del material polimérico y así cubrir todo el molde.



Figura 54. Moldeo manual

Este proceso tiene como ventajas el hecho que no es necesario ningún tipo de maquinaria específica ni un trabajador especializado para realizar el proceso, además de ser muy económico.

Pero a su vez tiene varios inconvenientes, entre ellos, la inconsistencia del producto final, ya que depende del trabajador y la cantidad de resina que aplica y lo eficiente que sea al quitar las burbujas de aire que se creen, la orientación de las fibras no sería óptima, debido a que se colocan a mano y los seres humanos no tenemos tanta precisión como una máquina diseñada para ello, y por último, es un proceso lento, por lo que no se puede producir en cantidades altas.

IV.1.2 Moldeo por compresión al vacío

El proceso de fabricación por moldeo de compresión^{4,20,21} al vacío es un proceso en el cual se coloca manualmente las telas de materiales poliméricos con las orientaciones deseadas, al igual que el moldeo manual, pero sin añadir la resina.

A diferencia del moldeo manual, una vez se colocan todas las telas de fibra que sean necesarias para la pieza en cuestión, se inserta en una bolsa de vacío con un sistema de distribución de resina y se cierra herméticamente.

Una vez cerrado, se conecta un tubo a un contenedor con resina y a una bomba de vacío el cual retira todo el aire del interior creando así una presión sobre las telas manteniéndolas en la posición correcta durante el proceso de curado.

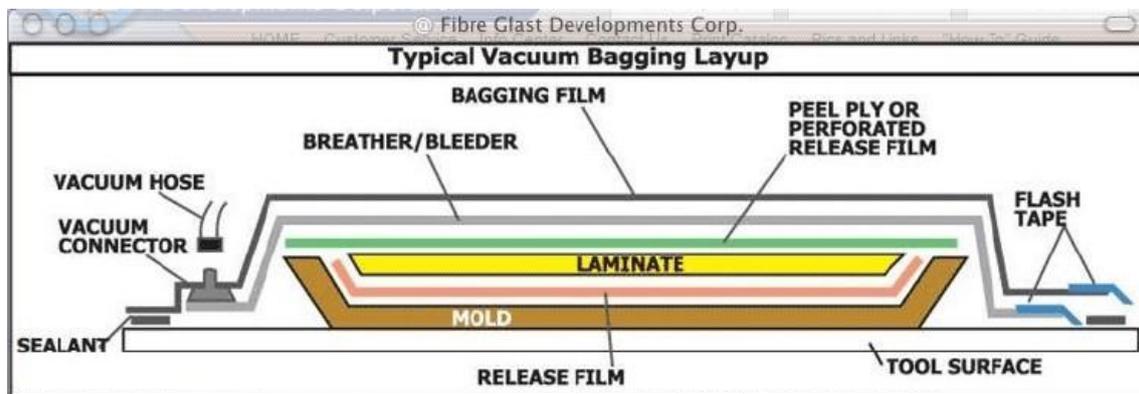


Figura 55. Moldeo por compresión al vacío

Este proceso tiene varias ventajas, es un proceso simple de realizar, no es necesario una gran inversión en maquinaria, se eliminan la mayoría de las burbujas de aire que se puedan crear y por tanto se obtiene un acabado superior al moldeo manual.

A su vez este proceso viene con algunos inconvenientes. La colocación de las fibras, al ser manual, no siempre son idóneas e iguales en todos los productos realizados, la repartición de resinas requiere de estudios y cálculos muy precisos para que sea equitativa por toda la pieza y además es un proceso lento y difícil de automatizar, por lo tanto, tiene un nivel de productividad baja.

IV.1.3 Bobinado de filamentos

El proceso de fabricación por bobinado de filamentos^{22,23} es un proceso por el cual se hace pasar filamentos del material en cuestión por un baño de resina con su catalizador y, a veces, con pigmentos y sustancias que retrasan la reacción UV hasta una bobina con la forma deseada el cual los enrolla al ángulo requerido por la pieza a fabricar.

Para alinear estas fibras pasan previamente por unos separadores de acero inoxidable y posteriormente por unos rodillos para mantener la alineación de las fibras.

Al final del baño de resina hay un dispositivo de limpieza, típicamente un par de rodillos juntados a presión, para quitar cualquier exceso de resina que haya en los filamentos antes de pasar al rodillo. Una vez los filamentos están impregnados correctamente pasan a un peine de acero inoxidable para asegurar que no haya sobreposicionamientos de los hilos y posteriormente pasará por un ojo de colección, para asegurar que no haya grandes separaciones entre hilos.

Durante el proceso de curado de la resina, el mandril se mantiene en movimiento rotacional para mantener uniformidad por toda la pieza. Después se retira la pieza mediante un extractor hidráulico o un extractor mecánico.

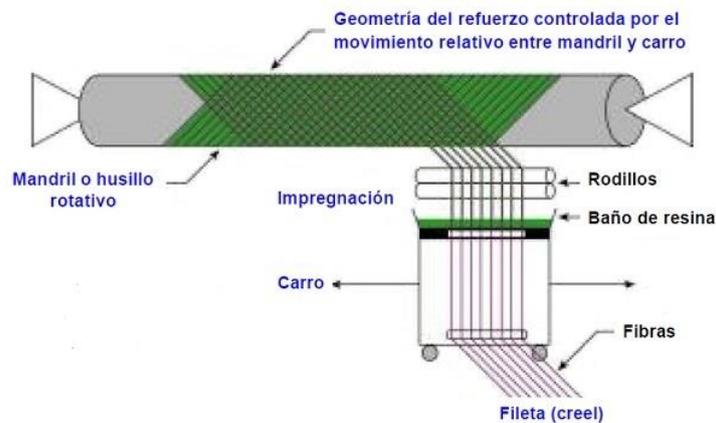


Figura 56. Moldeo por bobinado de filamentos

Este proceso cuenta con una serie de ventajas: es un procedimiento rápido, es un método preciso para la colocación de varias capas de fibras, como no hay malgasto de material resulta en un proceso barato, deja un perfecto acabado al producto final.

Aun teniendo en cuenta estas ventajas, tiene algunos inconvenientes: Es un proceso limitado a formas cilíndricas, esféricas o en forma de cúpula y el coste de la maquinaria es muy elevada.

IV.1.4 Moldeo por transferencia de resina

El moldeo por transferencia de resina es un método de producción de componentes formados por fibras de polímeros.²⁴ Para realizar el proceso, dichas fibras se colocan en un molde cerrado donde se vierte, a baja presión, la resina y el catalizador que se encuentran en una cámara de calefacción previa. Gracias a este proceso, la resina inyectada empuja el aire del molde, expulsándolo por los correspondientes agujeros de ventilación.²⁵

Al utilizar presiones bajas, normalmente menores de 7 bar, este proceso permite utilizar moldes menos rígidos y, en consecuencia, más económicos que los moldes metálicos utilizados en la fabricación por moldeo a presión.²⁶

Es común utilizar un bomba de vacío para mejorar la extracción del aire y su vez conseguir una mayor fijación de las fibras y reducir el número de vacíos formados por aire.²⁷

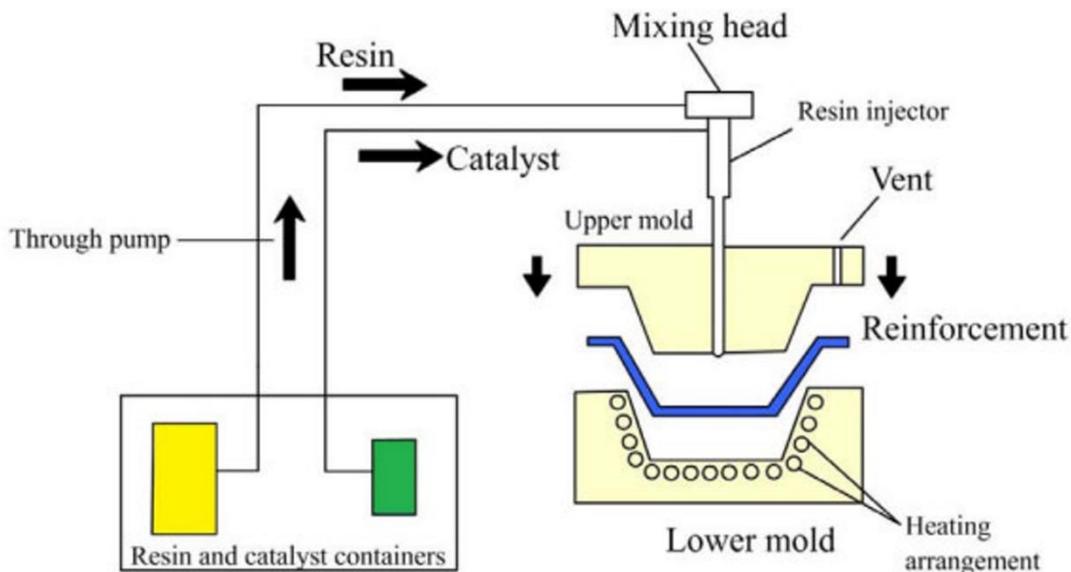


Figura 57. Moldeo por transferencia de resina

Este proceso tiene varias ventajas: se obtiene un acabado perfecto en ambas partes

de la pieza, se puede controlar con alta precisión los refuerzos en cada parte de la pieza, se puede incorporar insertos en el molde, tiene una emisión de volátiles reducida, es un proceso completamente automatizable y por tanto puede alcanzar una alta productividad, se pueden fabricar moldes de alta complejidad y no se crean burbujas de aire.²⁰

Aunque tenga varias ventajas, también cuenta con ciertos inconvenientes: se pierde una pequeña porción de la resina usada, los tiempos de curado son altos y el proceso eleva su complejidad proporcionalmente al del molde.²⁰

Procesos	Ventajas	Inconvenientes
Moldeo Manual	<ul style="list-style-type: none"> - No es necesaria una maquinaria específica. - No es necesario mano de obra especializada. - Proceso económico 	<ul style="list-style-type: none"> - La calidad del producto final varía. - La orientación de las fibras es inconsistente. - Nivel de productividad baja.
Moldeo por compresión al vacío	<ul style="list-style-type: none"> - Es un proceso simple. - La maquinaria necesaria es barata. - No produce burbujas de aire. 	<ul style="list-style-type: none"> - La colocación de fibras no es óptima. - La repartición de resinas es compleja. - Productividad baja.
Fabricación de bobinado de filamentos	<ul style="list-style-type: none"> - Es un procedimiento rápido. - La orientación de fibras precisa. - El coste del proceso es barato. - Deja un acabado perfecto. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se limita a formas cilíndricas, esféricas o cúpulas. - El coste de maquinaria es muy elevado.
Moldeo por transferencia	<ul style="list-style-type: none"> - Acabado perfecto en ambos lados de la pieza. - Alto control de refuerzos para la pieza. - Emisión de volátiles reducido. - Es un proceso completamente automatizable. - Adaptable a moldes complejos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Desperdicio de los excesos de resina. - Tiempos de curado altos. - A mayor complejidad del molde, mayor dificultad del proceso.

Tabla 6. Ventajas e inconvenientes de los procesos de fabricación

Una vez observadas las ventajas y los inconvenientes de los procesos analizados, la opción óptima para el producto a realizar sería el moldeo por transferencia de resina.

Se ha deducido que este proceso sería la opción correcta ya que el producto saldría con muy buen acabado, con la orientación de las capas más precisa que otros procesos de fabricación, y se adapta mejor a los diseños realizados para cada pieza, aparte de que imposibilita la aparición de burbujas y los productos finales salen con gran consistencia.

El desperdicio de resina es menospreciado en comparación al malgasto de fibras de los otros procesos y en cuanto al bobinado, al limitarse a las formas cilíndricas, esféricas y cupulares no se puede usar en el diseño de este proyecto. Los tiempos largos de curado son menospreciados en este caso debido a que no es un producto que se fabrique en masa.

Además, al tratarse de piezas de baja complejidad por falta de detalles complicados de realizar, el aumento de dificultad del proceso es casi nulo.

IV.1.5 Post-procesado

Una vez se ha elegido el proceso por el cual se realizará el producto se deberá estudiar los procesos de post-procesado como taladrado, lijado y roscado.

El primer paso al obtener el producto del proceso de fabricación sería realizar el taladrado del agujero en el cual se colocará posteriormente las roscas Whitworth para la unión de las palas con la empuñadura.

Una vez obtenido el agujero, se continúa realizando el proceso de roscado para el tornillo Whitworth el cual constaría de una rosca de los tamaños especificados en apartados anteriores.

El último proceso que se debe realizar es el lijado de los sobrantes y de las zonas de remaches para dejar el producto con un acabado liso y perfecto.

V. PRESUPUESTO

En este apartado se va a calcular el coste de fabricación total de una unidad finalizada del arco. Para ello se observará tanto el coste de los materiales como el coste del proceso de fabricación completo. Es un cálculo aproximado por lo que los valores finales pueden variar a los teóricos calculados.

V.1 Coste del material

En cuanto al coste del material se debe tener en cuenta el porcentaje de cada material que se encuentra en el producto final a parte del peso de cada pieza por separado para averiguar cuánto peso hay de cada. Se ha mirado en la página web <https://www.castrocompositesshop.com/> para comparar precios de los materiales. Esta página web pertenece a “Resinas Castro”, la cual es una compañía de venta de materiales, situado en Resinas Castro S. L., Polígono Industrial A Granxa, C/ Cíes 190, 36400 O Porriño, Pontevedra, España.

El peso total del ensamblaje del arco es de 0'75 kg, de los cuales 0'10 kg equivale a cada una de las palas y 0'44 kg a la empuñadura (datos obtenidos de la ventana de propiedades físicas del SolidWorks).

Sabiendo que cada pala pesa 0'10 kg y que la proporción de fibras de carbono y resina epoxi utilizado es de 70 % y 30 % respectivamente, realizando un simple cálculo se puede determinar que:

$$m_{cfp} = m_{Tp} * 70\% = 0'10 * 0'7 = 0'07 \text{ kg}$$

$$m_{rep} = m_{T74p} * 30\% = 0'10 * 0'3 = 0'03 \text{ kg}$$

Esto quiere decir que por cada pala que se fabrique, se usarán 0'126 kg de fibras de carbono y 0'054 kg de resina epoxi. Teniendo en cuenta que cada kg de fibra de carbono unidireccional cuesta alrededor de 180 € y por cada 1 kg de resina epoxi y 0'3 kg de catalizador costaría alrededor de 42 €. Teniendo esta información se puede deducir que cada pala del arco costaría:

$$C_p = \frac{0'07 * 180}{1} + \frac{0'03 * 42}{1'3} = 11'63 \text{ €/pala}$$

Como cada arco tiene dos palas, este valor se duplica a 23'26 €.

En cuanto a la empuñadura se sabe que pesa 0'44 kg en total con la misma proporción mencionada para las palas, 70 % fibra de carbono y 30 % resina epoxi. Realizando el mismo cálculo que anteriormente se obtiene:

$$m_{cfe} = m_{Te} * 70\% = 0'44 * 0'7 = 0'308 \text{ kg}$$

$$m_{ree} = m_{Te} * 30\% = 0'44 * 0'3 = 0'132 \text{ kg}$$

Conociendo el peso de cada material empleado y con los costes mencionados anteriormente se puede deducir que cada empuñadura costaría:

$$C_e = \frac{0'308 * 180}{1} + \frac{0'132 * 42}{1'3} = 72'66 \text{ €/emp.}$$

Por tanto, sabiendo esta información se conoce los costes del material para fabricar cada arco siendo esta la suma de los costes de las piezas:

$$C_{mat.T} = 2 * C_p + C_e = 2 * 11'63 + 72'66 = 95'92 \text{ €/arco}$$

V.2 Coste de Fabricación

En el apartado de costes de fabricación se hablará de varios factores que hay que tener en cuenta:

- **Preparación del molde:** se tendrá en cuenta el tiempo que tarda el trabajador en colocar el desmoldeante y la mezcla de resina y catalizador.
- **Tiempo de moldeado y curado:** se tendrá en cuenta el tiempo empleado por el trabajador para la colocación de las fibras y el curado de la resina.
- **Tiempo de mecanizado:** aquí se tendrá en cuenta el tiempo del post-procesado como el taladrado, roscado y lijado.

	Palas	Empuñadura
Desmoldeante (min)	3	3
Resina + Catalizador (min)	10	10
Colocación de fibras (min)	5	5
Curado de resina a T ^a Ambiente (min)	30	30
Taladrado (min)	5	5
Roscado (min)	15	15
Lijado (min)	10	10

Tabla 7. Tiempos de los procesos.

Sabiendo estos tiempos de procesos y utilizando el salario medio de un moldeador según la página web www.tusalario.es, al cual se accedió el 12 Noviembre 2019, el cual es de 10'39 €/h (mínimo de 6'29 €/h y máximo de 14'49 €/h) se procede a averiguar los costes de fabricación por mano de obra, asumiendo que la maquinaria y los utensilios a usar ya están comprados.

Si se realiza la suma de todos los tiempos, se obtienen 1 h y 18 min, que, al multiplicarse por el salario medio de un moldeador, esto equivale a 13'51 € por pala y por

“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”

empuñadura que se realice. Como el diseño se compone de dos palas y una empuñadura, se multiplicará este precio por tres siendo el coste total por arco de 40'52 €.

V.3 Coste de la maquinaria

Se calculará un coste estimado asumiendo que se tiene las máquinas necesarias para su producción y solo sea necesario la compra de los moldes y costes de producción dependiendo del lote de piezas que se fabricarán.

Este presupuesto se realizará con la ayuda del programa “CES Edupack 2019” desde el cual se obtendrán todos los datos citados a posteriori.

El coste de los moldes puede variar de entre 161 € y 1610 € que, en el caso de este proyecto, aunque no se trate de piezas complejas, si son largas, por lo que tenderá hacia la parte intermedia del intervalo. En cuanto a los costes de producción de la máquina de transferencia de resina, el coste dependerá del lote producido:

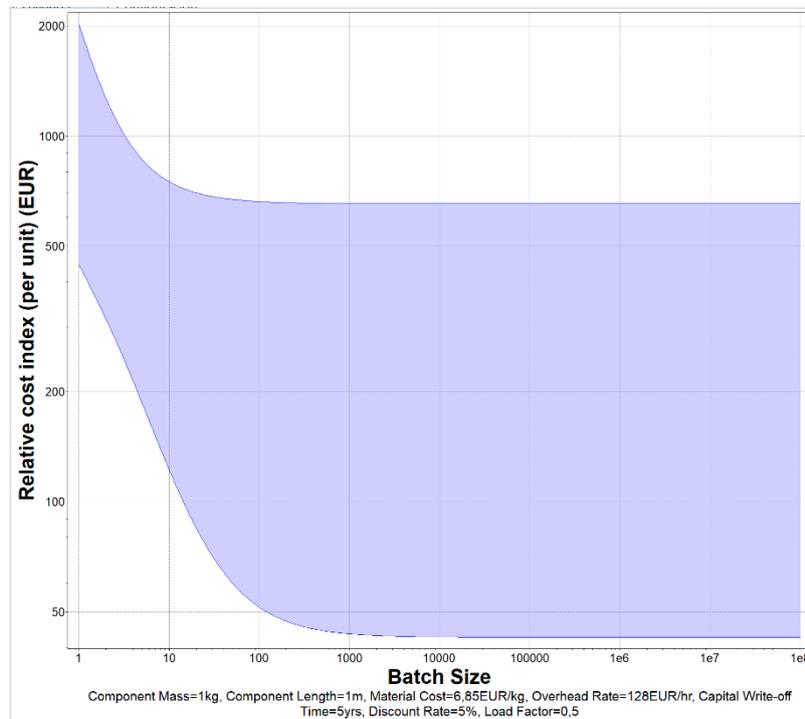


Figura 58. Coste de la unidad dependiendo del tamaño del lote

Como se puede comprobar en la gráfica, a partir del lote de 1000 unidades es cuando los costes por pieza son mínimos. Y teniendo en cuenta esto, se puede decir que los costes de maquinaria son de entre 25 y 700 €/ud.

Además de estas piezas, los tornillos de unión entre las palas y la empuñadura se deberán comprar a sus proveedores, el precio de los cuales es de alrededor de los 15 €.

V.4 Coste final

En este apartado se recopilarán todos los costes mencionados anteriormente además de tener en cuenta las pérdidas de material que se obtendrán del proceso de fabricación.

Los costes por pérdidas de material son de alrededor de un 5% del producto, por lo que a los costes de material se le añadirá un 5% para incluirlos en el coste final.

$$C_t = (C_p + C_p * 5\%) * 2 + (C_e + C_e * 5\%) + C_f + C_{maq} + C_{tor}$$

$$C_t = (11'63 + 11'63 * 0'05) * 2 + (72'66 + 72'66 * 0'05) + 40'52 + 362'5 + 15$$

$$C_t = 518'74\text{€}$$

Este sería un coste aproximado, teniendo en cuenta una media ponderada de los costes de maquinaria (C_{maq}) y sin saber el material perdido es rebabas exactas.

VI. BIBLIOGRAFIA

Bibliografía

1. Kathleen M. Haywood CFL. Archery Steps to success. Fourth. Human Kinetics; 2013. 250 p.
2. Ledesma Beades D. Historia, Metodología y Salud vinculadas al tiro con arco. Pod Rev Cienc y Tecnol en la Cult Física. 2008;3(3):123–36.
3. Kooi BW. “Cut and try” method in the design of the bow. Lect Notes Eng. 1991;(63):283–92.
4. Salvado M, Marcos M, Botana FJ, Simonet BM. Process for manufacturing carbon fiber composite structures by membrane-assisted compression molding. 2017;1:1–7.
5. Steve Allely, Tim Baker, Paul Comstock, Jim Hamm, Ron Hardcastle, Jay Massey JS. The traditional bowyer’s bible. Lttons Press. 1992;1.
6. Kooi BW. On the mechanics of the bow and arrow. J Eng Math. 1981;15(2):119–45.
7. Whittaker J. Weapon trials: The atlatl and experiments in hunting technology. Des Exp Res Archaeol Examining Technol through Prod Use. 2010;(January 2010):195–224.
8. Cain DI, Sobel EA. Sticks with stones: An experimental test of the effects of the atlatl weight on atlatl mechanics. Ethnoarchaeology. 2015;7(2):114–40.
9. Prior S. The skill of the neolithic bowyers – reassessing the past through experimental archaeology. Somerset Archaeol Pap to mark 150 years Somerset Archaeol Nat Hist Soc [Internet]. 2000;19–24. Available from: <http://www1.somerset.gov.uk/archives/hes/publications/index.htm>
10. Chang TYP, Saleeb AF, Li G. On the mechanics of the modern working-recurve bow. 1991;221–33.
11. Herd B. The antient Scorton arrow contest. The sociey. 2002
12. ARCHERY. History of Archery at the Olympic Games [Internet]. The Olympic Study Centre. 2017. Available from: www.olympic.org/studies
13. Gervase Phillips. Longbow. Encyclopedia of War. 2012;1:1–3.
14. Elliot M. Reference guide for Recurve archers. 2002;1–68. Available from: http://www.archersreference.pwp.blueyonder.co.uk/archref_05.pdf%5Cnfile:///Users/dwroush/Dropbox/Library.papers3/Files/18/18DDEDEFF-48A4-45C7-AD0C-F9F1FE47CA78.pdf%5Cnpapers3://publication/uuid/3C853EA6-A6A9-4C6A-9465-D3E99553BE40

15. Yang M, Lin Y. Kineto-Elastic analysis of a compound bow. 2015;1–9.
16. Luigi AJ De. Adaptive Sports Medicine. Vol. 51, Medicine & Science in Sports & Exercise. 2018. 313–315 p.
17. Lieu D., Kim J, Kim KC. Fundamentals of the Design of Olympic Recurve Bow. 2008;14. Available from: <http://archery.berkeley.edu/wp-content/uploads/2011/08/Fundamentals-of-the-Design-of-Olympic-Recurve-Bows.pdf>
18. Huang X. Fabrication and properties of carbon fibers. Materials (Basel). 2009;2(4):2369–403.
19. Federation WA. Archery rule book. 2016;
20. Muñoz NM. Procesos de Fabricación de Materiales Compuestos. Univ Politécnica Val Campus Alcoy. 2019;
21. Tatara RA. Applied Plastics Engineering Handbook [Internet]. Second Edi. El Sevier. Elsevier Inc.; 2017. 291–320 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8/00014-6>
22. Mutasher S, Mir-nasiri N, Lin LEEC. Small-scale filament winding machine for producing fiber composite products. 2012;7(2):156–68.
23. Abdalla FH, Mutasher SA, Khalid YA, Sapuan SM, Hamouda AMS, Sahari BB, et al. Design and fabrication of low cost filament winding machine. Mater Des. 2007;28(1):234–9.
24. Jamir MRM, Majid MSA, Khasri A. Natural lightweight hybrid composites for aircraft structural applications [Internet]. Sustainable Composites for Aerospace Applications. Elsevier Ltd; 2018. 155–170 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-102131-6.00008-6>
25. Verma D, Joshi G, Dabral R, Lakhera A. Processing and evaluation of mechanical properties of epoxy-filled E-glass fiber–fly ash hybrid composites [Internet]. Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites. Elsevier Ltd; 2019. 293–306 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-102292-4.00015-1>
26. Eckold G. Disign and manufacture of composite structures. Woodhead Publ Ltd. 1994;406.
27. Devaraju S, Alagar M. Unsaturated Polyester—Macrocomposites [Internet]. Unsaturated Polyester Resins. Elsevier Inc.; 2019. 43–66 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-816129-6.00002-8>

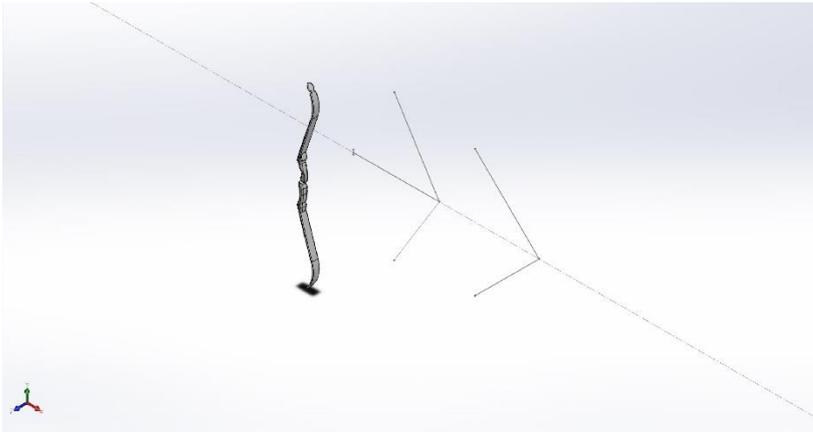
VII. ANEXOS

VII.1 Normas

Normativa de la Real Federación Española de Tiro con Arco.

- Ley 10/1990, de 15 de octubre, del Deporte.
- Real Decreto 1835/1991, de 20 de diciembre, de Federaciones Deportivas Españolas.
- Estatutos de la Real Federación Española de Tiro con Arco - BOE 309 (25/12/2012)
- Orden ECI/3567/2007, de 4 de diciembre, por la que se regulan los procesos electorales en las Federaciones Deportivas Españolas.

VII.2 Simulaciones "SolidWorks"



Descripción

No hay datos

Simulación de Primer Diseño Ensamblaje

Fecha: miércoles, 11 de diciembre de 2019

Diseñador: Solidworks

Nombre de estudio: Análisis estático 1

Tipo de análisis: Análisis estático

Tabla de contenidos

DESCRIPCIÓN	102
SUPOSICIONES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
INFORMACIÓN DE MODELO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
PROPIEDADES DE ESTUDIO	103
UNIDADES	103
PROPIEDADES DE MATERIAL	104
CARGAS Y SUJECIONES	105
DEFINICIONES DE CONECTOR	106
INFORMACIÓN DE CONTACTO	107
INFORMACIÓN DE MALLA	107
DETALLES DEL SENSOR	109
FUERZAS RESULTANTES	109
VIGAS	109
RESULTADOS DEL ESTUDIO	109
CONCLUSION	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Propiedades de estudio

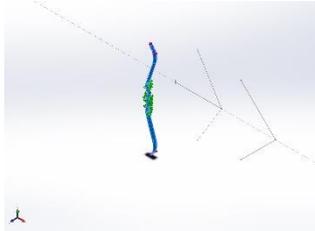
Nombre de estudio	Análisis estático 1
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	FFEPlus
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automático
Gran desplazamiento	Activar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	Documento de SOLIDWORKS (C:\Users\nicky\Desktop\TFG\Primer diseño)

Unidades

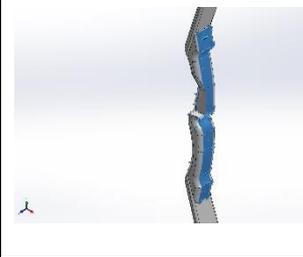
Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin

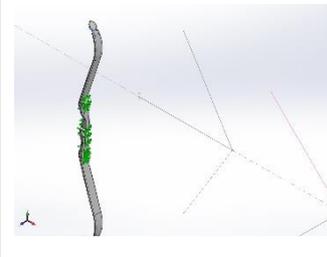
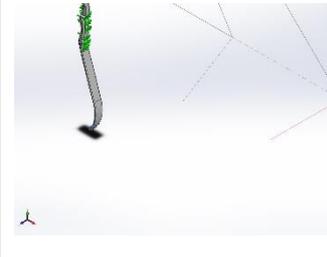
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

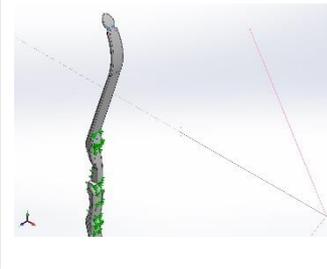
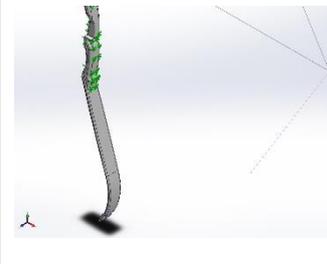
Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: CARBONO_EPOXY</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.</p> <p>Límite elástico: 1.575e+09 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 1.75e+09 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 2.66e+11 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0.245</p> <p>Densidad: 1250 kg/m³</p>	<p>Sólido 1(Cortar-Extruir5)(Empuñadura Con apollo de flechas mas inclinado-1),</p> <p>Sólido 1(Cortar-Extruir4)(Top Limb 5cm width-1),</p> <p>Sólido 1(Cortar-Extruir4)(Top Limb 5cm width-2)</p>
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

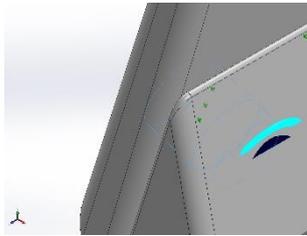
Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		<p>Entidades: 16 cara(s)</p> <p>Tipo: Geometría fija</p>		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-363.832	0.00180054	-0.0125046	363.832
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

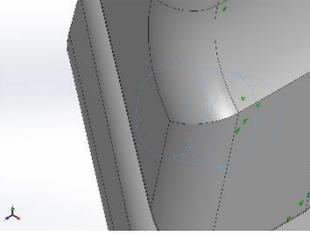
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---, ---, 100 N</p>
Fuerza-2		<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---, ---, 100 N</p>

Fuerza-3		<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---, ---, 212.41 N</p>
Fuerza-4		<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---, ---, 212.41 N</p>

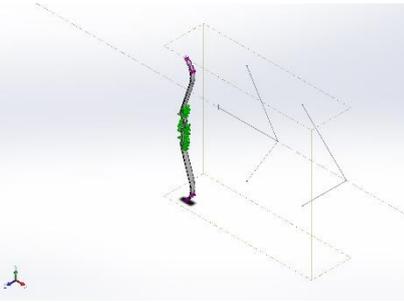
Definiciones de conector

Conector de pasador/perno/rodamiento

Referencia de modelo	Detalles del conector	Detalles de resistencia
 <p>Conector tipo Pasador-1 Segmento 1</p>	<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Pasador</p> <p>Tipo de conexión: Con anillo de retención (sin traslación)</p> <p>Valor de rigidez rotacional: 0</p> <p>Unidades: SI</p>	<p>No hay datos</p>
<p>Fuerzas del conectorNo hay datos</p>		

 <p>Conector tipo Pasador-2 Segmento 1</p>	<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Pasador</p> <p>Tipo de conexión: Con anillo de retención (sin traslación)</p> <p>Valor de rigidez rotacional: 0</p> <p>Unidades: SI</p>	<p>No hay datos</p>
<p>Fuerzas del conectorNo hay datos</p>		

Información de contacto

Contacto	Imagen del contacto	Propiedades del contacto
<p>Contacto global</p>		<p>Tipo: Unión rígida</p> <p>Componentes: 1 componente(s)</p> <p>Opciones: Mallado compatible</p>

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Transición automática:	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla:	Desactivar
Puntos jacobianos	4 Puntos

“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”

Tamaño de elementos	7.41725 mm
Tolerancia	0.370863 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	46048
Número total de elementos	27073
Cociente máximo de aspecto	73.114
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	95.1
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0.277
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:06
Nombre de computadora:	

Nombre del modelo:Primer Diseño Ensamblaje
Nombre de estudio:Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de malla: Malla sólida



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”

Detalles del sensor

No hay datos

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-363.832	0.00180054	-0.0125046	363.832

Momentos de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

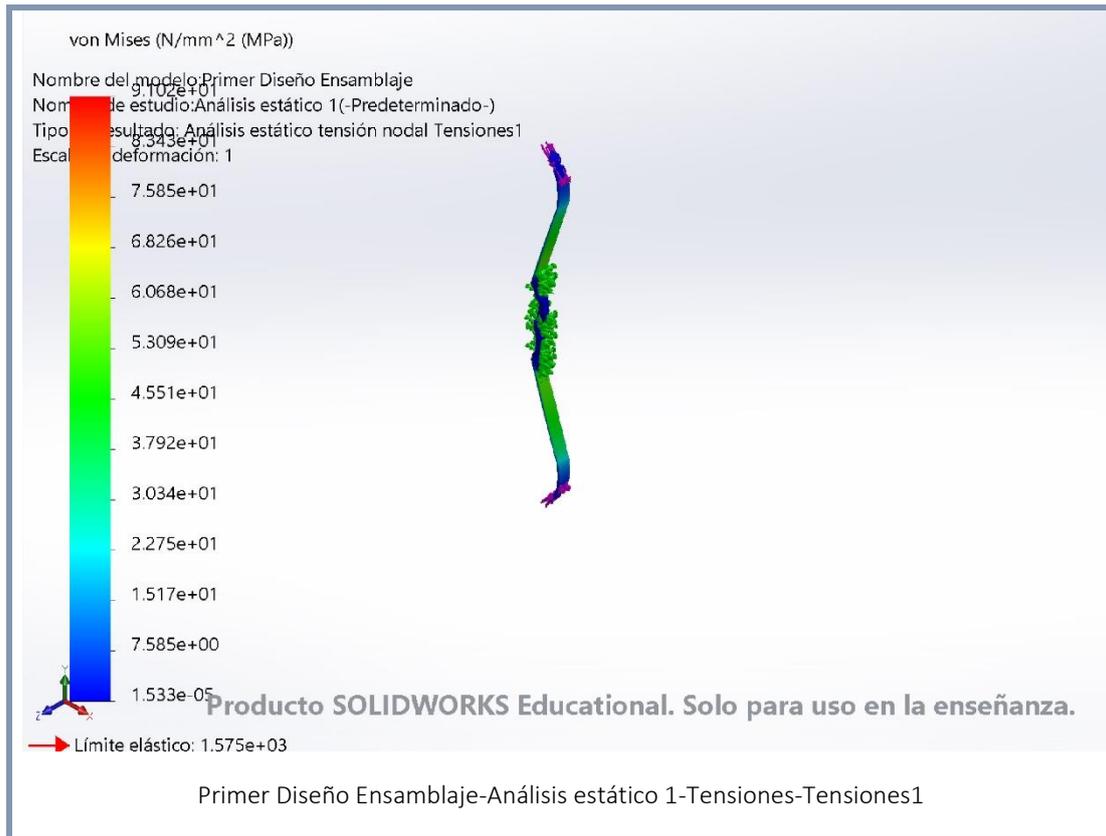
Vigas

No hay datos

Resultados del estudio

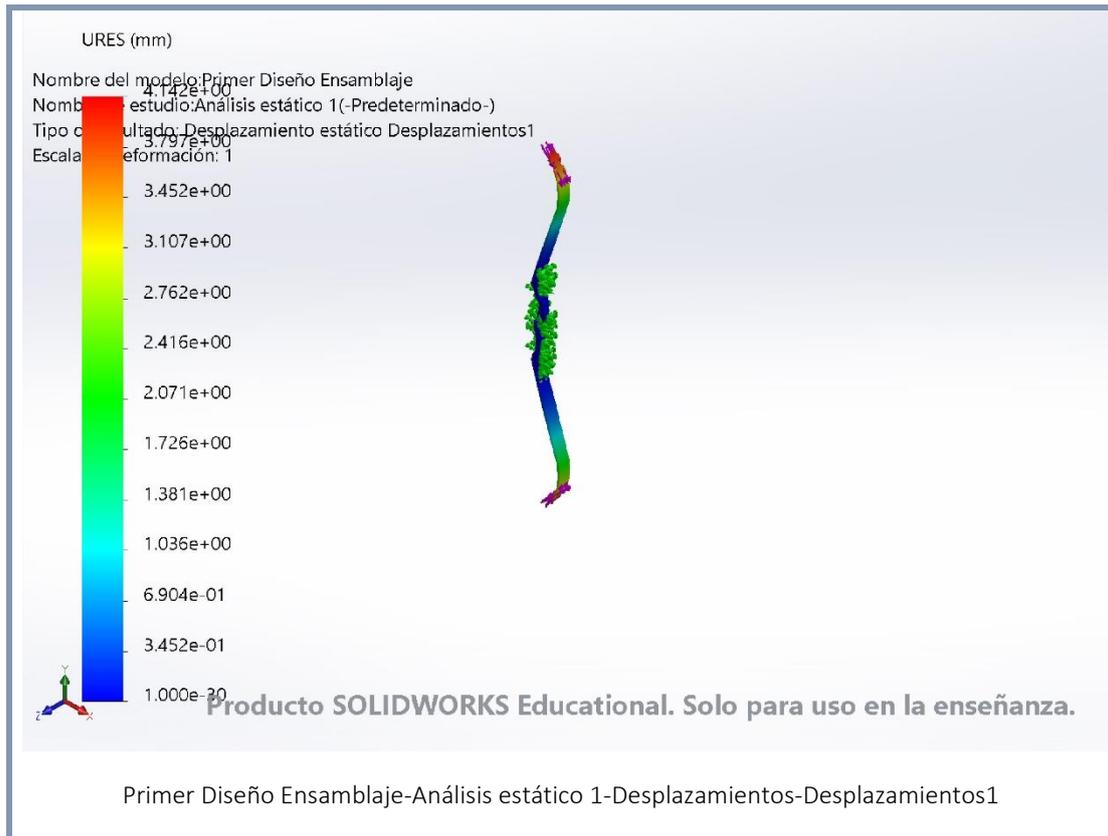
Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	1.533e-05 N/mm ² (MPa) Nodo: 12617	9.102e+01 N/mm ² (MPa) Nodo: 15465

“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”



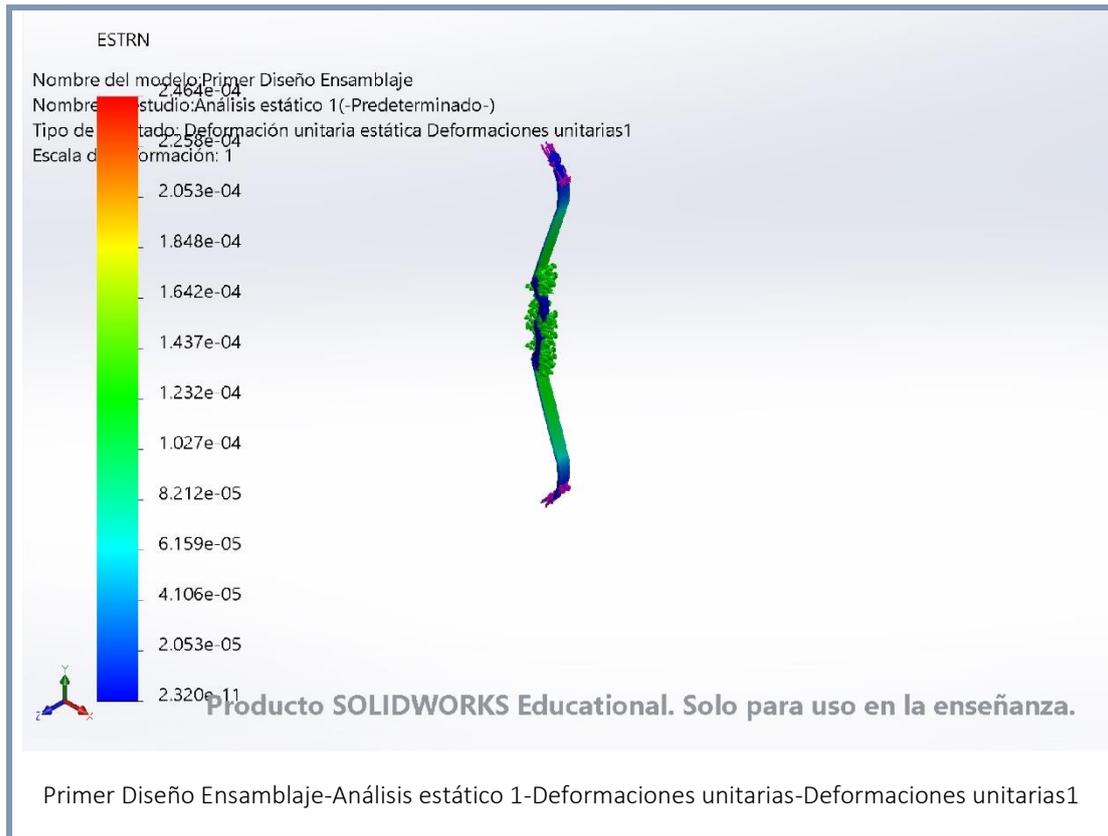
Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0.000e+00 mm Nodo: 169	4.142e+00 mm Nodo: 20077

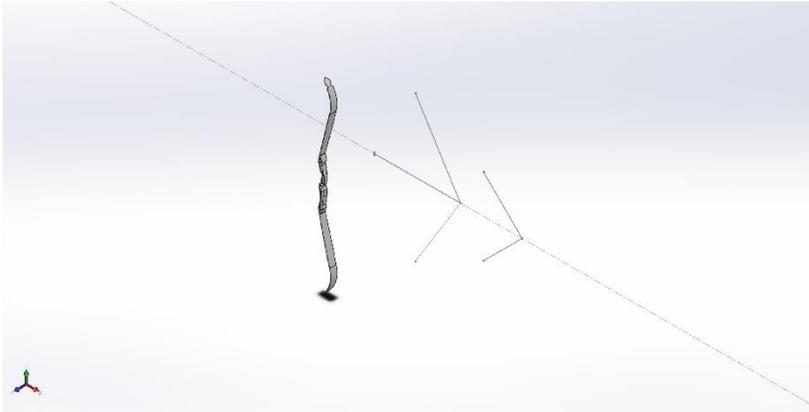
“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”



Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	2.320e-11 Elemento: 1670	2.464e-04 Elemento: 476

“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”





Descripción

No hay datos

Simulación de Segundo Diseño Ensamblaje

Fecha: miércoles, 11 de diciembre de 2019

Diseñador: Solidworks

Nombre de estudio: Análisis estático 1

Tipo de análisis: Análisis estático

Tabla de contenidos

DESCRIPCIÓN	113
SUPOSICIONES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
INFORMACIÓN DE MODELO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
PROPIEDADES DE ESTUDIO	114
UNIDADES	114
PROPIEDADES DE MATERIAL	115
CARGAS Y SUJECIONES	115
DEFINICIONES DE CONECTOR	116
INFORMACIÓN DE CONTACTO	117
INFORMACIÓN DE MALLA	118
DETALLES DEL SENSOR	119
FUERZAS RESULTANTES	119
VIGAS	120
RESULTADOS DEL ESTUDIO	120
CONCLUSION	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Propiedades de estudio

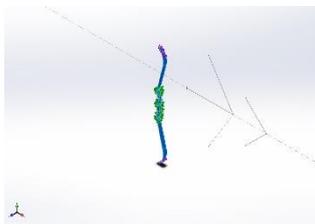
Nombre de estudio	Análisis estático 1
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	FFEPlus
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automático
Gran desplazamiento	Activar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	Documento de SOLIDWORKS (C:\Users\nicky\Desktop\TFG\3r intento)

Unidades

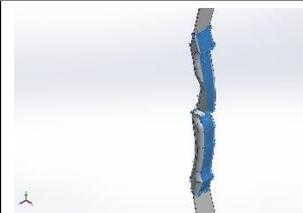
Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin

Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

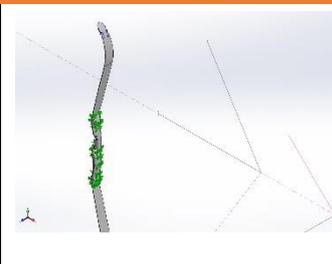
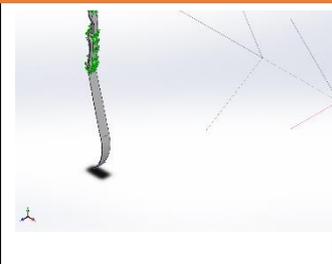
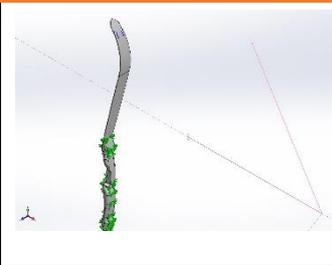
Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: CARBONO_EPOXY</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.</p> <p>Límite elástico: 1.575e+09 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 1.75e+09 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 2.66e+11 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0.245</p> <p>Densidad: 1250 kg/m³</p>	<p>Sólido 1(Cortar-Extruir5)(Empuñadura Con apollo de flechas reducido-1),</p> <p>Sólido 1(Redondeo7)(Top Limb thin version-1),</p> <p>Sólido 1(Redondeo7)(Top Limb thin version-2)</p>
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

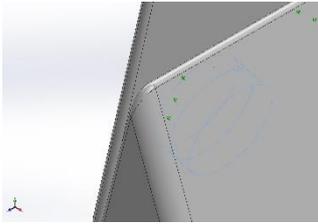
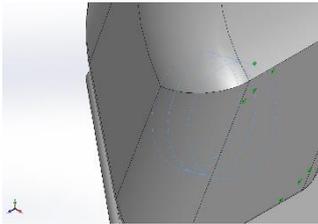
Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción
Fijo-1		<p>Entidades: 21 cara(s)</p> <p>Tipo: Geometría fija</p>

Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-365.478	-4.95349	-0.161166	365.511
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

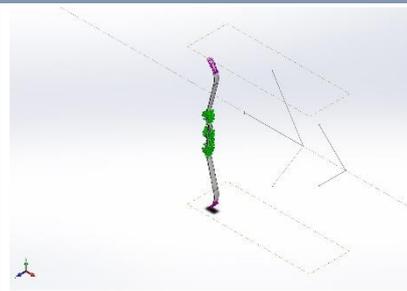
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---, ---, 100 N</p>
Fuerza-2		<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---, ---, 100 N</p>
Fuerza-3		<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---, ---, 212.41 N</p>
Fuerza-4		<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza</p> <p>Valores: ---, ---, 212.41 N</p>

Definiciones de conector

Conector de pasador/perno/rodamiento

Referencia de modelo	Detalles del conector	Detalles de resistencia
 <p>Conector tipo Pasador-1 Segmento 1</p>	<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Pasador</p> <p>Tipo de conexión: Con anillo de retención (sin traslación)</p> <p>Valor de rigidez rotacional: 0</p> <p>Unidades: SI</p>	<p>No hay datos</p>
Fuerzas del conector No hay datos		
 <p>Conector tipo Pasador-2 Segmento 1</p>	<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Pasador</p> <p>Tipo de conexión: Con anillo de retención (sin traslación)</p> <p>Valor de rigidez rotacional: 0</p> <p>Unidades: SI</p>	<p>No hay datos</p>
Fuerzas del conector No hay datos		

Información de contacto

Contacto	Imagen del contacto	Propiedades del contacto
Contacto global		<p>Tipo: Unión rígida</p> <p>Componentes: 1 component e(s)</p> <p>Opciones: Mallado compatible</p>

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla estándar
Transición automática:	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla:	Desactivar
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño de elementos	9.264 mm
Tolerancia	0.4632 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	23883
Número total de elementos	12269
Cociente máximo de aspecto	32.72
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	79.8

“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”

% de elementos cuyo cociente de aspectos > 10	2.34
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:09
Nombre de computadora:	
<p>Nombre del modelo: Segundo Diseño Ensamblaje Nombre de estudio: Análisis estático 1 (-Predeterminado-) Tipo de malla: Malla sólida</p>  <p>Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.</p>	

Detalles del sensor

No hay datos

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-365.478	-4.95349	-0.161166	365.511

Momentos de reacción

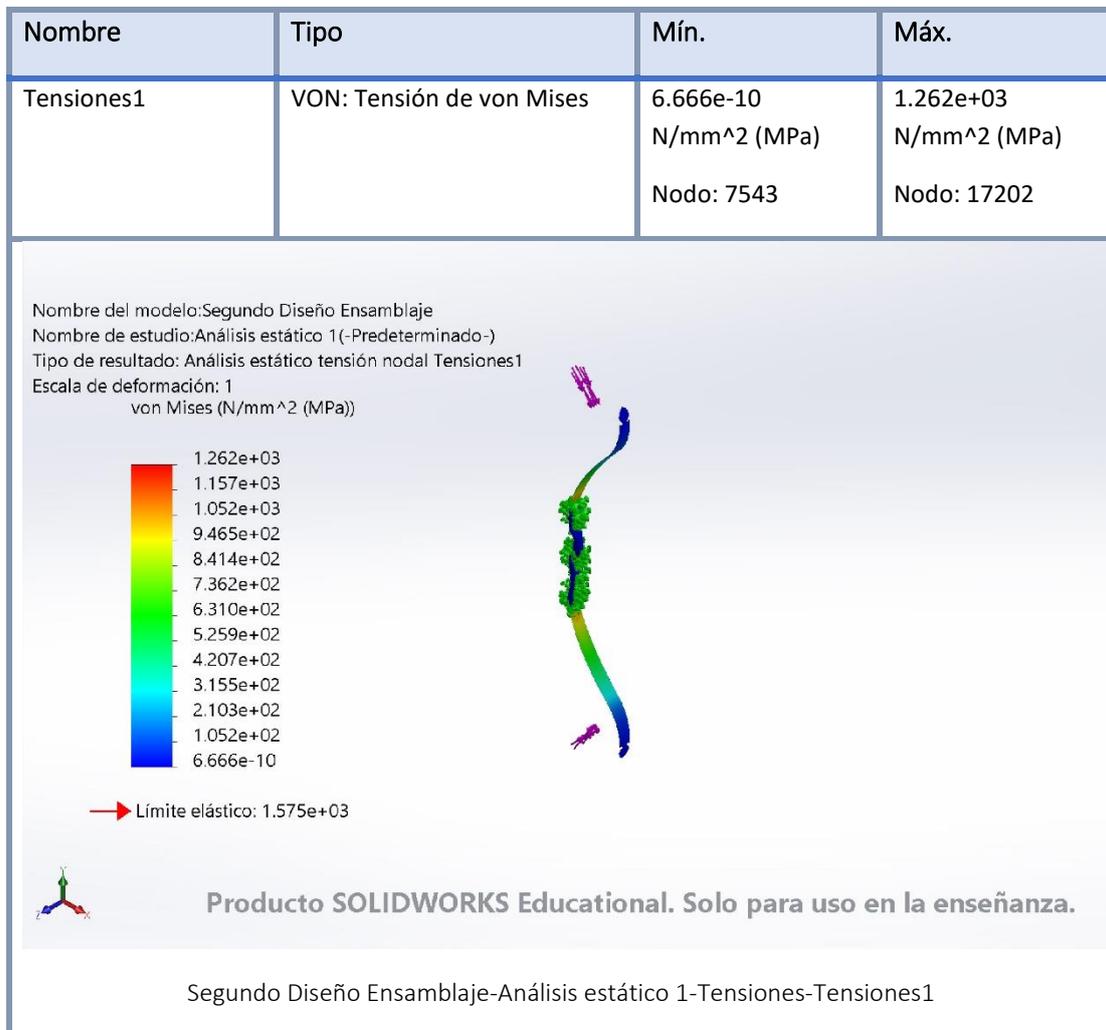
“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

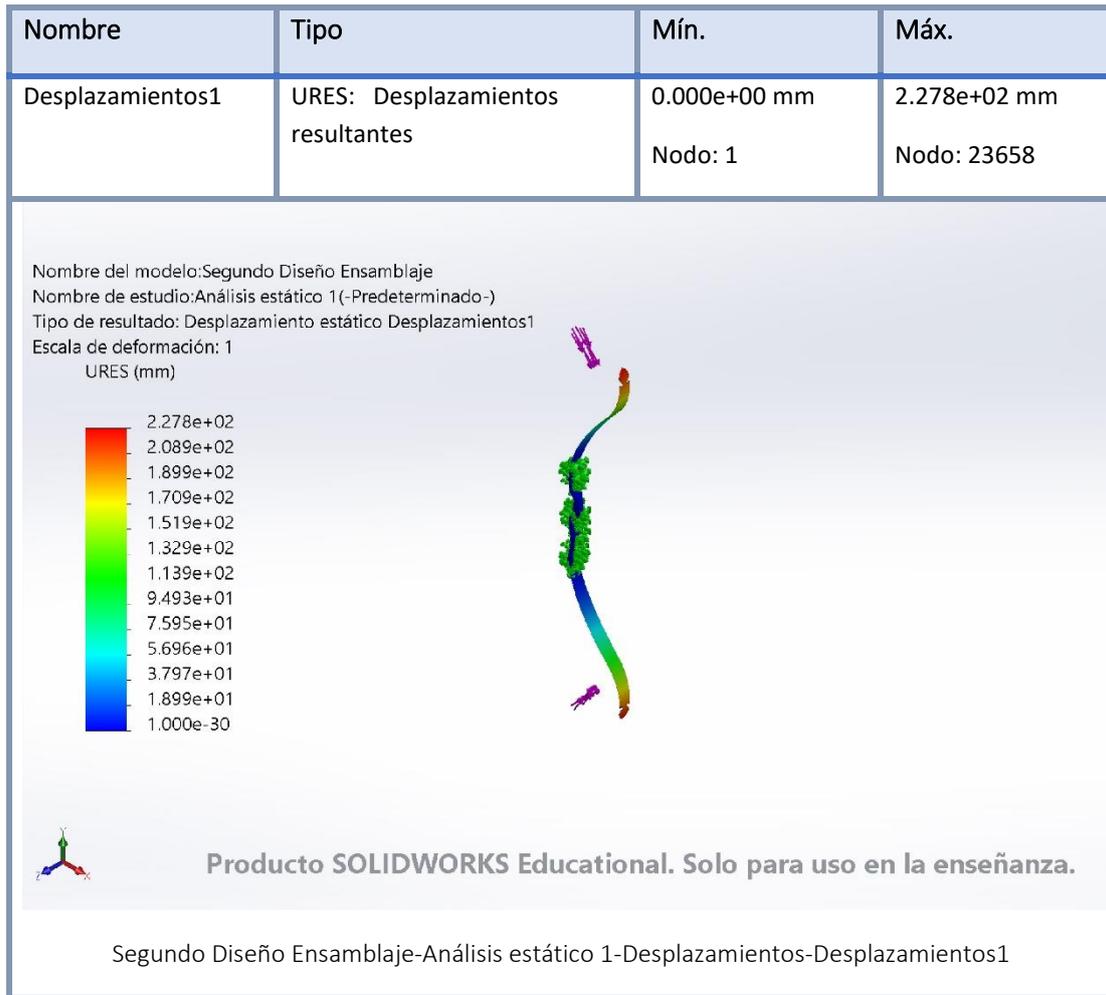
Vigas

No hay datos

Resultados del estudio



“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”



Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	1.376e-15 Elemento: 2511	2.514e-03 Elemento: 11979

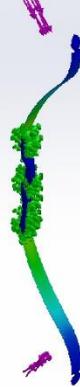
“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”

Nombre del modelo: Segundo Diseño Ensamblaje

Nombre de estudio: Análisis estático 1 (-Predeterminado-)

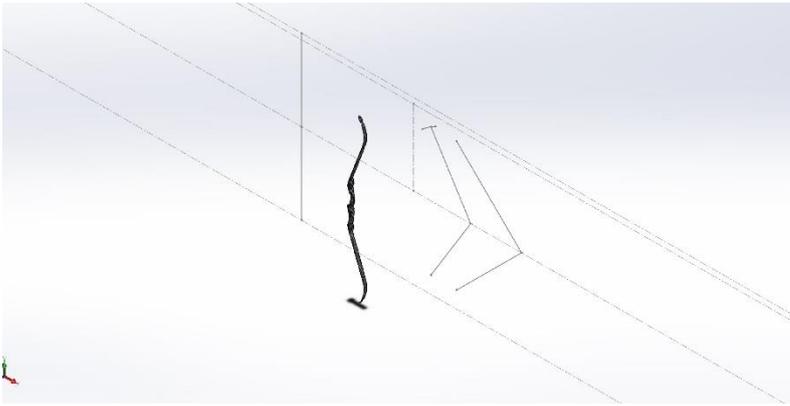
Tipo de resultado: Deformación unitaria estática Deformaciones unitarias1

Escala de deformación: 1



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Segundo Diseño Ensamblaje-Análisis estático 1-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1



Descripción

No hay datos

Simulación de Tercer Diseño Ensamblaje

Fecha: miércoles, 11 de diciembre de 2019

Diseñador: Solidworks

Nombre de estudio: Análisis estático 1

Tipo de análisis: Análisis estático

Tabla de contenidos

DESCRIPCIÓN	123
SUPOSICIONES	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
INFORMACIÓN DE MODELO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
PROPIEDADES DE ESTUDIO	124
UNIDADES	124
PROPIEDADES DE MATERIAL	125
CARGAS Y SUJECIONES	125
DEFINICIONES DE CONECTOR	126
INFORMACIÓN DE CONTACTO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
INFORMACIÓN DE MALLA	127
DETALLES DEL SENSOR	128
FUERZAS RESULTANTES	129
VIGAS	129
RESULTADOS DEL ESTUDIO	129
CONCLUSION	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.

Propiedades de estudio

Nombre de estudio	Análisis estático 1
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	FFEPlus
Efecto de rigidización por tensión (Inplane):	Desactivar
Muelle blando:	Desactivar
Desahogo inercial:	Desactivar
Opciones de unión rígida incompatibles	Automático
Gran desplazamiento	Activar
Calcular fuerzas de cuerpo libre	Activar
Fricción	Desactivar
Utilizar método adaptativo:	Desactivar
Carpeta de resultados	Documento de SOLIDWORKS (C:\Users\nicky\Desktop\TFG\Reescrito memoria)

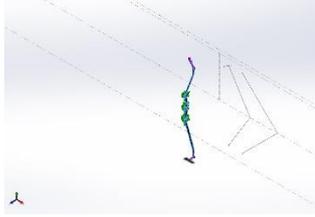
Unidades

Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm

“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”

Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: CARBONO_EPOXY (3) (2)</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.</p> <p>Límite elástico: 1.575e+09 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 1.75e+09 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 2.66e+11 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0.245</p> <p>Densidad: 1250 kg/m³</p>	<p>Sólido 1(Redondeo4)(Prueba Empuñadura-1),</p> <p>Sólido 1(Redondeo2)(Top Limb thin version 5-1),</p> <p>Sólido 1(Redondeo2)(Top Limb thin version 5-2)</p>
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

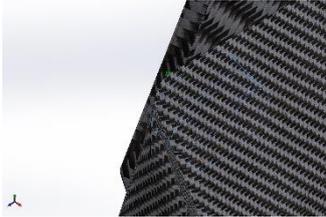
Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción
Fijo-1		<p>Entidades: 9 cara(s)</p> <p>Tipo: Geometría fija</p>

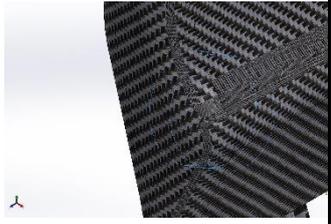
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-363.903	0.0728436	0.00499213	363.903
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

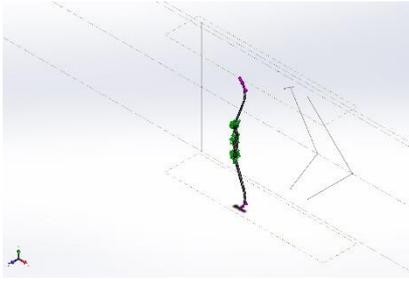
<L_LdName />	<Label_LoadImage/>	<Label_LoadDetails/>
<LoadName e/>	<Image_Load/>	<Details_Load/>

Definiciones de conector

Conector de pasador/perno/rodamiento

Referencia de modelo	Detalles del conector	Detalles de resistencia
 <p>Conector tipo Pasador-1 Segmento 1</p>	<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Pasador</p> <p>Tipo de conexión: Con anillo de retención (sin traslación)</p> <p>Valor de rigidez rotacional: 0</p> <p>Unidades: SI</p>	<p>No hay datos</p>
Fuerzas del conector No hay datos		

 <p>Conector tipo Pasador-2 Segmento 1</p>	<p>Entidades: 2 cara(s)</p> <p>Tipo: Pasador</p> <p>Tipo de conexión: Con anillo de retención (sin traslación)</p> <p>Valor de rigidez rotacional: 0</p> <p>Unidades: SI</p>	<p>No hay datos</p>
<p>Fuerzas del conector No hay datos</p>		

Contacto	Imagen del contacto	Propiedades del contacto
<p>Contacto global</p>		<p>Tipo: Unión rígida</p> <p>Componentes: 1 componente (s)</p> <p>Opciones: Mallado compatible</p>

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	9.48133 mm
Tamaño mínimo del elemento	1.89627 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”

Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
--	------------

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	142277
Número total de elementos	80788
Cociente máximo de aspecto	105.6
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	88.7
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0.333
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:10
Nombre de computadora:	

Nombre del modelo: Tercer Diseño Ensamblaje
Nombre de estudio: Análisis estático 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla: Malla sólida



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Detalles del sensor

No hay datos

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-363.903	0.0728436	0.00499213	363.903

Momentos de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

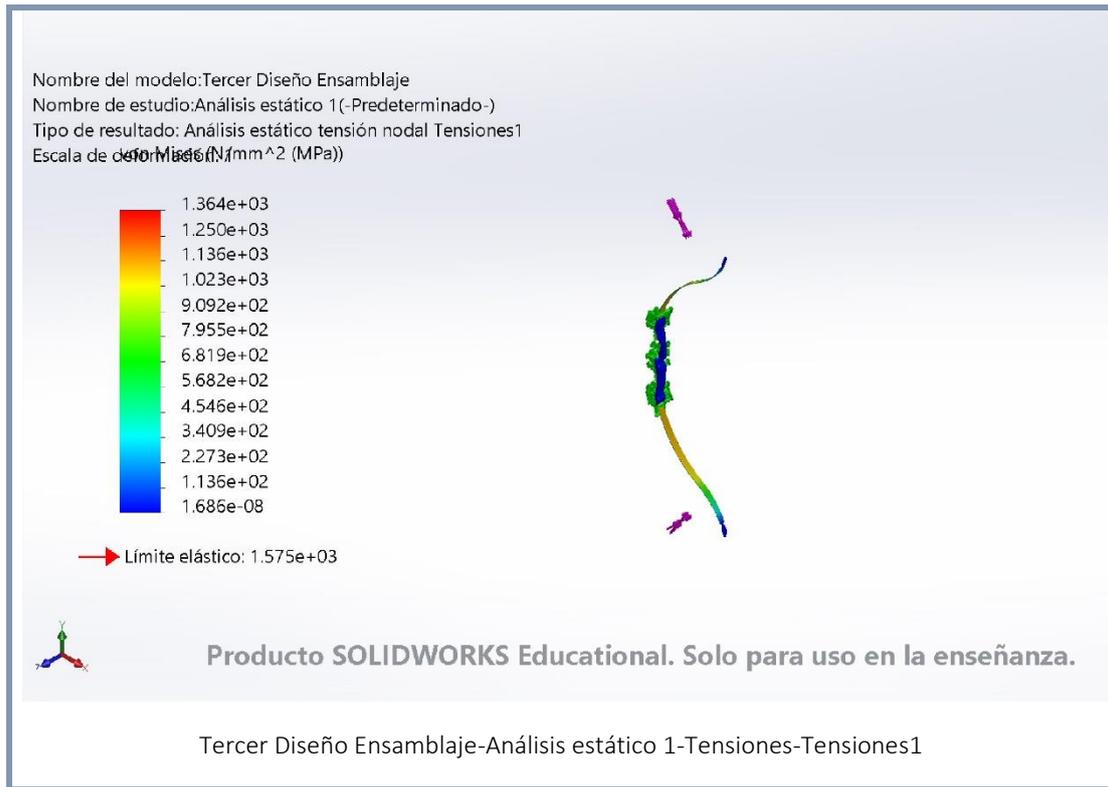
Vigas

No hay datos

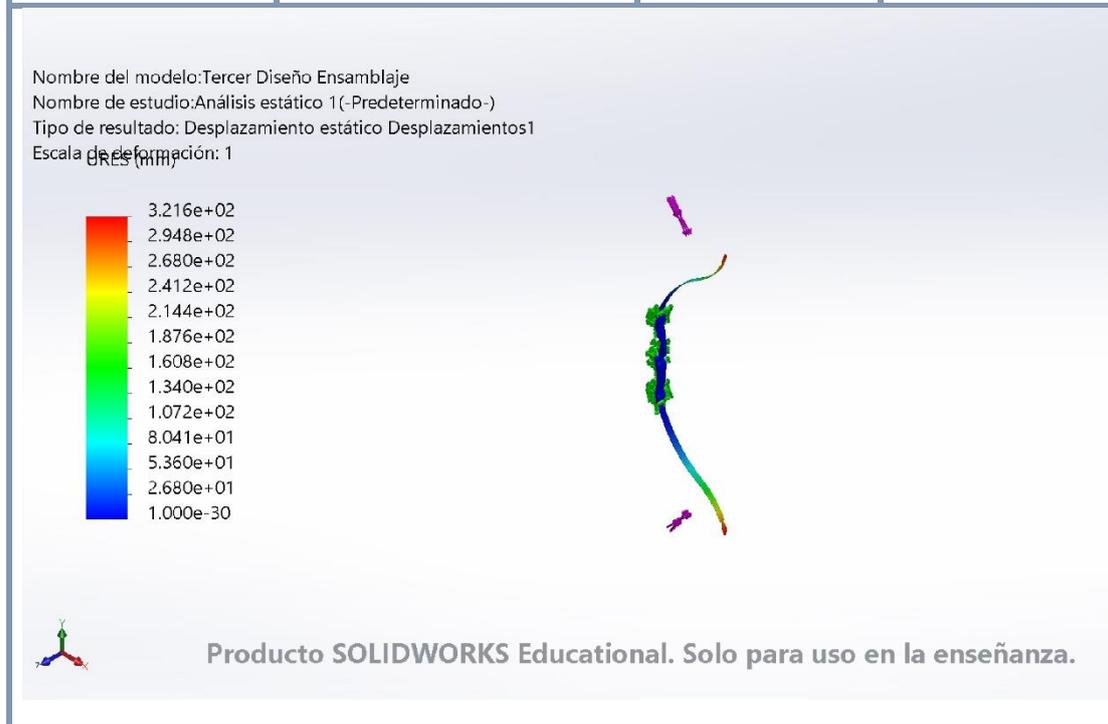
Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	1.686e-08 N/mm ² (MPa) Nodo: 9877	1.364e+03 N/mm ² (MPa) Nodo: 47849

“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”



Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0.000e+00 mm Nodo: 1	3.216e+02 mm Nodo: 26761



“Diseño, optimización y fabricación de un arco de elaborado con materiales compuestos.”

Tercer Diseño Ensamblaje-Análisis estático 1-Desplazamientos-Desplazamientos1

Nombre	Tipo	Mín.	Máy.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	8.756e-14 Elemento: 6646	3.481e-03 Elemento: 75251

Nombre del modelo:Tercer Diseño Ensamblaje
Nombre de estudio:Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Deformación unitaria estática Deformaciones unitarias1
Escala de deformación: 1



Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Tercer Diseño Ensamblaje-Análisis estático 1-Deformaciones unitarias-Deformaciones unitarias1

VII.3 Planos

4 3 2 1

F

F

E

E

D

D

C

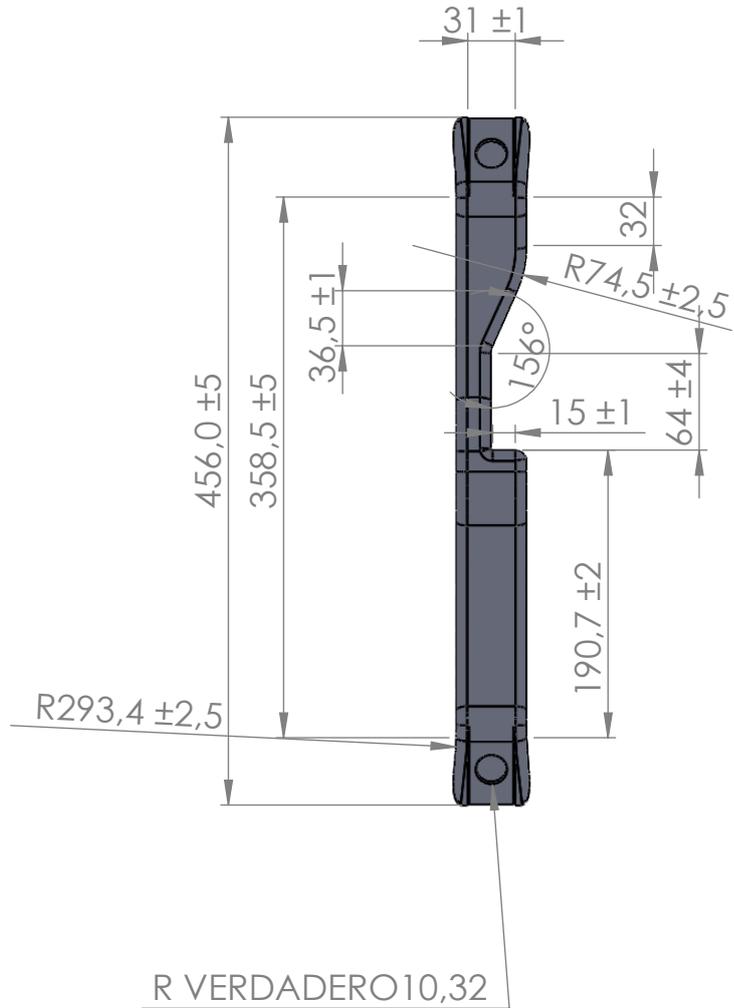
C

B

B

A

A



	Resp:	Fecha:	Firma:
Dibujado:		23/12/2019	
Modificado:			
Revisado:			



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

Escala:	Descripción:
1:45	Empuñadura de arco Recurvo

Código:	
Material:	CF/Epoxi (70%/30%)
Pintura:	Peso (kg):
Acabado:	Revisión 0 1 de 1

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

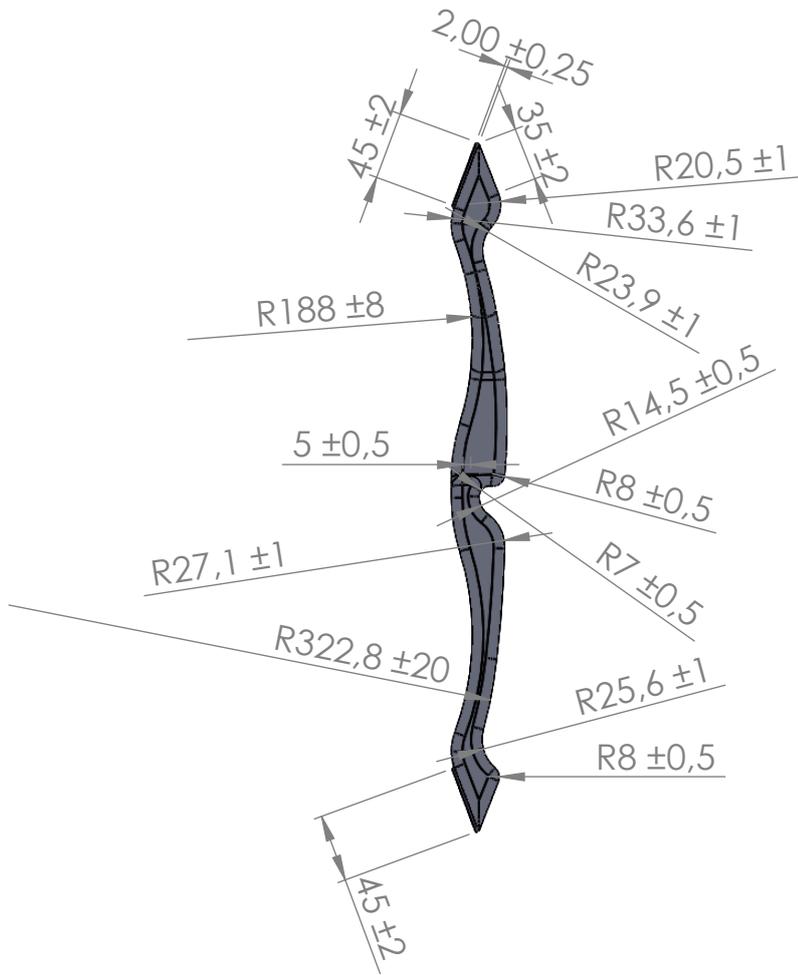
D

C

C

B

B



	Resp:	Fecha:	Firma:
Dibujado:		23/12/2019	
Modificado:			
Revisado:			

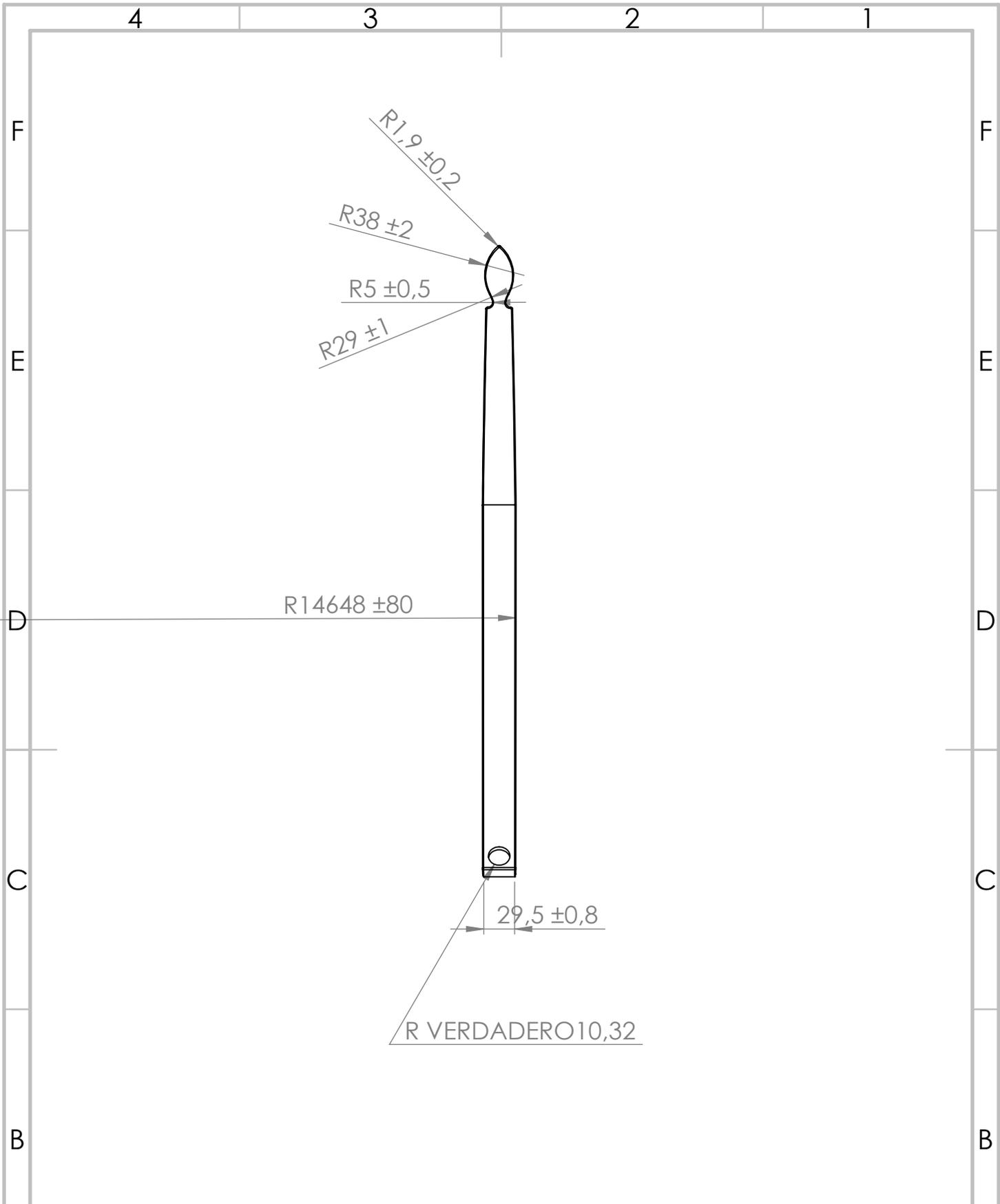


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

Escala: 1:45	Descripción: Empuñadura de arco Recurvo	Código:	
		Material:	CF/Epoxi (70%/30%)
		Pintura:	Peso (kg):
		Acabado:	Revisión 0 1 de 1

4 3 2 1



	Resp:	Fecha:	Firma:
Dibujado:		23/12/2019	
Modificado:			
Revisado:			



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

Escala: 1:50	Descripción: <h2 style="text-align: center;">Pala de arco Recurvo</h2>
-----------------	---

Código:	
Material:	CF/Epoxi (70%/30%)
Pintura:	Peso (kg):
Acabado:	Revisión 0 1 de 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

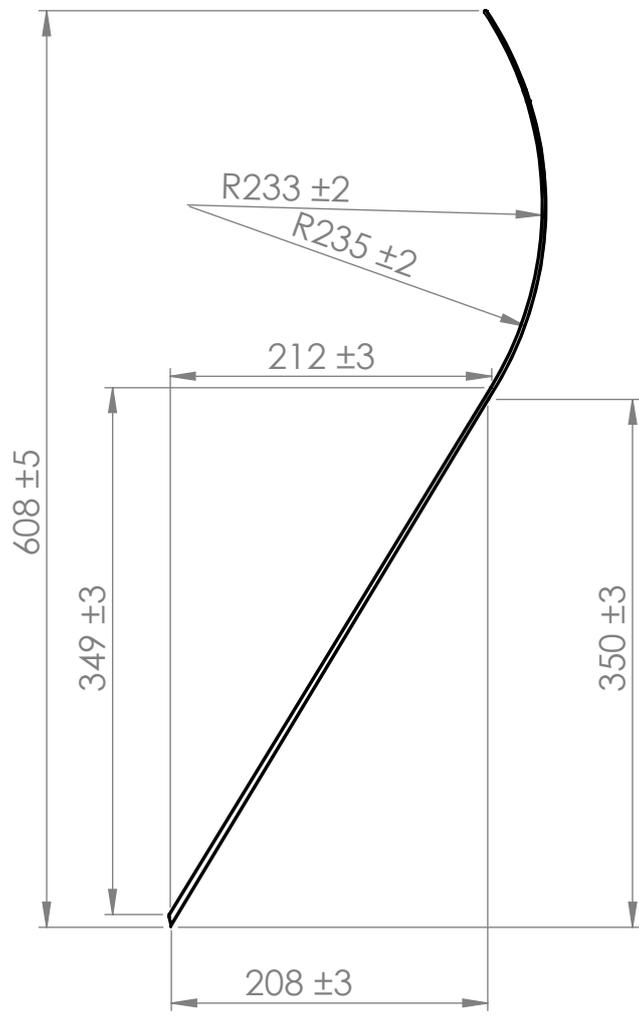
D

C

C

B

B



	Resp:	Fecha:	Firma:
Dibujado:		23/12/2019	
Modificado:			
Revisado:			



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

Escala: 1:50	Descripción: Pala de arco Recurvo
-----------------	---

Código:	
Material:	CF/Epoxi (70%/30%)
Pintura:	Peso (kg):
Acabado:	Revisión 0 1 de 1

A

A

4 3 2 1