

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 de un arco de protección en material compuesto para
vehículos de competición”**

Autor:

D. José Manuel Cano Cortés

Dirigido por:

Dr. Néstor Muñoz Montañés

Dr. Vicent Fombuena Borràs

Junio 2019

RESUMEN

“Diseño de un arco de protección en material compuesto para vehículos de competición”

El presente proyecto consta de la realización de un arco de seguridad para vehículos de competición, similar al recientemente implantado por la Federación Internacional de Automovilismo (FIA) para la Fórmula 1. Dicho componente, denominado Halo, está diseñado para soportar un impacto directo y asegurar la integridad física del piloto.

El arco de protección se diseñará en titanio y acero, como indica la norma de la FIA, con ayuda del programa SolidWorks. Una vez diseñada la pieza, se deberá comprobar si cumple con el peso, ya que cada material tiene uno diferente. Como las medidas se han querido mantener iguales para los dos materiales, primero se ha diseñado en titanio y, una vez se ha comprobado que cumple con el peso, se ha calculado para el acero. Si el acero también cumpliera, se realizará el cálculo de las tensiones producidas por las cargas de los test para los dos materiales. Las propiedades mecánicas de los dos materiales se han obtenido con la base de datos CES Edupack.

Si los dos test de cada material son superados, se efectuará un estudio estático con el material compuesto de fibra de carbono con resina epoxi. Para conocer las propiedades mecánicas del material compuesto, se ha utilizado el programa eLamX, ya que el programa SolidWorks no ha podido realizar los cálculos cuando se ha indicado el comportamiento ortotrópico del material compuesto, por lo que se considerará como isotrópico a efectos de cálculo. Si no se superasen los dos test se deberá modificar las dimensiones de la pieza hasta cumplirlos.

Finalmente, se realizará un estudio aerodinámico para observar las tensiones generadas sobre el Halo y se desarrollará un estudio económico para evaluar la viabilidad del producto diseñado.

SUMMARY

“Design of a protective structure in composite material for racing vehicles”

The present project aims for the design of a safety structure for racing vehicles, similar to the one recently implemented by the Fédération Internationale de l'Automobile (FIA) for Formula 1. Said component, called Halo, is designed to withstand a direct impact and ensure the physical integrity of the race driver.

The protective structure is designed in titanium and steel, as indicated by the FIA standard, using SolidWorks. Once designed in one of these two materials (titanium has been arbitrarily chosen as the starting design material), the piece is checked for compliance with weight specifications. The piece is then rebuilt in the second design material, keeping dimensions the same, and rechecked for weight specifications. If successfully passed for both materials, the piece is consequently subjected to two loading tests (for each material) and mechanical stresses are calculated. The mechanical properties of titanium and steel were obtained from the CES Edupack database.

After passing loading tests, a static study is carried out with the piece rebuilt in carbon fiber/epoxy resin composite. eLamX software was used to know the mechanical properties of the composite material since SolidWorks could not perform the calculations when specifying the composite material as being orthotropic. Isotropic behavior was therefore assumed for calculation purposes. Should the two tests not pass, the dimensions of the piece are modified and the design redone.

Finally, an aerodynamic study is carried out to observe the stresses generated on the Halo, and an economic study performed to evaluate the viability of the designed product.

RESUM

“Disseny d'un arc de protecció en material compost per a vehicles de competició”

El present projecte consta de la realització d'un arc de seguretat per a vehicles de competició, semblant al recentment implantat per la Federació Internacional d'Automobilisme (FIA) per a la Fórmula 1. Dita component, denominat Halo, està dissenyat per a suportar un impacte directe i assegurar la integritat física del pilot de carreres.

L'arc de protecció es dissenyarà en titani i acer, com indica la norma de la FIA, amb ajuda del programa SolidWorks. Una vegada dissenyada la peça, s'haurà de comprovar si complix amb el pes, ja que cada material té un diferent. Com les mesures s'han volgut mantindre iguals per als dos materials, primer s'ha dissenyat en titani i, una vegada s'ha comprovat que complix amb el pes, s'ha calculat per a l'acer. Si l'acer també complira, es realitzarà el càlcul de les tensions produïdes per les càrregues dels test per als dos materials. Les propietats mecàniques dels dos materials s'han obtingut amb la base de dades CES Edupack.

Si els dos test de cada material són superats, s'efectuarà un estudi estàtic amb el material compost de fibra de carboni amb resina epoxi. Per a conèixer les propietats mecàniques del material compost, s'ha utilitzat el programa eLamX, ja que el programa SolidWorks no ha pogut realitzar els càlculs a l'indicar el comportament ortotrópic del material compost, per la qual cosa es considerarà com isotrópic a l'efecte de càlcul. Si no se superaren els dos test s'haurà de modificar les dimensions de la peça fins a complir-los.

Finalment, es realitzarà un estudi aerodinàmic per a observar les tensions generades sobre l'Halo i es desenrotllarà un estudi econòmic per a avaluar la viabilitat del producte dissenyat.

Tabla de Contenidos

RESUMEN	3
SUMMARY.....	5
RESUM.....	7
ABREVIATURAS.....	13
LISTADO DE FIGURAS	15
LISTADO DE TABLAS.....	21
I. INTRODUCCIÓN	23
I.1. LAS MEDIDAS DE SEGURIDAD PERSONALES EN VEHÍCULOS DE CARRERAS CON RUEDAS. DESDE LA BIGA HASTA LA FÓRMULA 1.....	25
I.1.1. Edad Antigua. Roma.....	26
I.1.1.1. Sistemas de seguridad en las carreras de aurigas.	27
I.1.1.2. Sistema "antivuelco" en las bigas.....	28
I.1.2. Edad Contemporánea.	29
I.1.2.1. Primeros coches de combustión interna.	29
I.1.2.2. Los sistemas de seguridad desde principios del S. XX hasta nuestros días.	30
I.2. MATERIALES.	35
I.2.1. Titanio y aleaciones.	35
I.2.1.1. Titanio.	35
I.2.1.2. Aleación de titanio Ti-6Al-4V.	37
I.2.2. Acero y aleaciones.	38
I.2.2.1. Aleación de acero AerMet 100 (UNS K92580 / AMS 6532).	39
I.2.3. Material compuesto.....	40

1.2.3.1. Definición de material compuesto.....	40
1.2.3.2. La matriz.....	41
1.2.3.3. El refuerzo.....	42
II. OBJETIVOS.....	45
II.1. OBJETIVO GENERAL.....	47
II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.....	49
II.2.1. Enumeración de los objetivos particulares.....	49
II.2.2. Diagrama de flujo de los objetivos particulares.	50
III. DESARROLLO PROYECTO.....	51
III.1. DISEÑO INICIAL PROTOTIPOS.....	53
III.1.1. Diseño del Halo para materiales isotrópicos.	53
III.1.2. Diseño del Halo para materiales ortotrópicos.	61
III.2. SELECCIÓN DE MATERIALES.	63
III.2.1. Propiedades mecánicas de Ti-6Al-4V y AerMet 100.	63
III.2.2. Propiedades mecánicas del material compuesto. Cálculo de las constantes elásticas y resistentes por el método de Chamis.	64
III.2.2.1. Propiedades mecánicas del material compuesto mediante el programa eLamX.	67
III.3. ESTUDIO ESTÁTICO DEL HALO CON SOLIDWORKS.	73
III.3.1. Definición de la superficie de aplicación de las cargas sobre el Halo.	74
III.3.2. Creación del análisis estático de la pieza.	76
III.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO.	81
III.4.1. Resultados obtenidos con Ti-6Al-4V.	81
III.4.1.1. Resultados realizando el Test 1.	81
III.4.1.2. Resultados realizando el Test 2.	82

III.4.2. Resultados obtenidos con AerMet 100.	84
III.4.2.1. Resultados realizando el Test 1.	84
III.4.2.2. Resultados realizando el Test 2.	85
III.4.3. Resultados obtenidos con CF-EP.	86
III.4.3.1. Resultados obtenidos realizando el Test 1.....	87
III.4.3.2. Resultados obtenidos realizando el Test 2.....	88
III.4.3.3. Resultados obtenidos realizando el Test 1 modificando el espesor inicial.....	90
III.4.3.4. Resultados obtenidos realizando el Test 2 modificando el espesor inicial.....	91
III.5. ESTUDIO AERODINÁMICO.	95
III.6. PROCESO DE FABRICACIÓN.	103
III.7. ESTUDIO ECONÓMICO.	107

IV. APÉNDICES115

IV.1. REFERENCIAS.	117
IV.2. ANEXOS.....	119
IV.2.1. Test 1: Halo fabricado con Ti-6Al-4V.	119
IV.2.2. Test 2: Halo fabricado con Ti-6Al-4V.	130
IV.2.3. Test 1: Halo fabricado con AerMet 100.	138
IV.2.4. Test 2: Halo fabricado con AerMet 100.	147
IV.2.5. Test 1: Halo fabricado con CF-EP.	155
IV.2.6. Test 2: Halo fabricado con CF-EP.	164
IV.2.7. Test 1: Halo fabricado con CF-EP aumentando el espesor.	172
IV.2.8. Test 2: Halo fabricado con CF-EP aumentando el espesor.	181
IV.3. PLANOS ACOTADOS.....	189
IV.3.1. Halo: Piezas.	191
IV.3.2. Halo: Acotación.....	193

IV.4. NORMATIVA.....	195
IV.5. BIBLIOGRAFÍA.....	197

ABREVIATURAS

BCC	Body centered cube
BCT	Body centered tetragonal
Def. max.	Deformación máxima producida por las tensiones
CF-EP	Material compuesto de fibra de carbono con epoxi
E	Módulo de elasticidad o elástico
E_{f11}	Módulo elástico de la fibra en dirección longitudinal
E_{f22}	Módulo elástico de la fibra en dirección transversal
E_m	Módulo elástico de la matriz
EP	Resina epoxi
FEA	Método de los elementos finitos
G_{12}	Módulo de cortadura en la dirección xy
G_{23}	Módulo de cortadura en la dirección yz
G_m	Módulo de cortadura de la matriz
HC	Hexagonal compact
M_s	Temperatura de inicio martensítico
PAN	Poliacrilonitrilo
PBO	Fenileno benzobisoxazol
PE	Polietileno
S_m	Tensión de rotura a cortadura de la matriz

V_f	Volumen de fibra
χ_{fC}	Tensión de rotura de la fibra a compresión
χ_{fT}	Tensión de rotura de la fibra a tracción
χ_{mC}	Tensión de rotura de la matriz a compresión
χ_{mT}	Tensión de rotura de la matriz a tracción
ρ_f	Densidad de la fibra
ρ_m	Densidad de la matriz
σ_e	Límite elástico
σ_T	Límite de tracción
ν	Coefficiente de Poisson
ν_{f12}	Coefficiente de Poisson de la fibra en la dirección xy
ν_{f23}	Coefficiente de Poisson de la fibra en la dirección yz
ν_m	Coefficiente de Poisson de la matriz

LISTADO DE FIGURAS

Figura I.1. Representación de un circo romano [1].....	26
Figura I.2. Mosaico de un auriga en una cuadriga [2].	27
Figura I.3. Escultura romana de bronce del British Museum [3].....	28
Figura I.4. Vehículo inventado por Karl Benz [4].....	29
Figura I.5. Vehículo de Fórmula 1 en los años 60 [5].	30
Figura I.6. Cinturón de seguridad de 6 puntos en un Fórmula 1 [6].	31
Figura I.7. a) Dibujo de sistema de sujeción de la rueda; b) Momento en el que las correas retienen una rueda tras un accidente [7].....	32
Figura I.8. a) Momento en el que el coche de Fernando Alonso colisionó contra el Sauber de Charles Leclerc [8]; b) Estado del Halo tras el impacto [9].	33
Figura I.9. Halo antes de ser instalado en el vehículo [10].	33
Figura I.10. a) Estructura cristalina HC en fase α ; b) Estructura cristalina BCC en fase β [11].....	36
Figura I.11. a) Diagrama de equilibrio del titanio con estabilizador α ; b) Diagrama de equilibrio del titanio con estabilizador β	37
Figura I.12. Transformación de estructura austenítica a martensítica debido a temple [12].....	39
Figura I.13. Evolución de M_s en el acero al aumentar % carbono [13].....	40
Figura III.1. Creación de Plano 1.	53
Figura III.2. Construcción de la anchura y el perfil.....	54
Figura III.3. Creación de la superficie plana.	54
Figura III.4. Croquis en el Plano 1.	55
Figura III.5. Recorte del croquis del Plano 1.	55
Figura III.6. Superficie con un determinado espesor.	56

Figura III.7. Redondeo en las aristas.....	56
Figura III.8. a) Croquis sobre el Plano 6, b) Aplicada la operación “Extruir saliente/base”.....	57
Figura III.9. Soportes traseros aplicando “Simetría”.....	57
Figura III.10. Extrusión en el pilón central.....	58
Figura III.11. Perforación del pilón central.....	58
Figura III.12. Vista de sección mostrando vaciado de la pieza.....	59
Figura III.13. Diseño de la pieza finalizado.....	59
Figura III.14. Selección de Propiedades físicas para conocer el peso de la pieza.....	60
Figura III.15. Peso obtenido por SolidWorks: a) con material de titanio; b) con material de acero.....	60
Figura III.16. Definir vaciado por caras seleccionadas.....	61
Figura III.17. Selección de las caras del compuesto que se van a vaciar.....	61
Figura III.18. Definición del número de láminas, ángulos de las fibras y material.....	62
Figura III.19. Selección del material en eLamX.....	68
Figura III.20. Definición del espesor, número de láminas y orientación de las fibras. ...	68
Figura III.21. Obtención de las constantes ingenieriles del material con eLamX.....	69
Figura III.22. Gráfico polar de CF-EP.....	69
Figura III.23. Distribución de fuerzas sobre el Halo para realizar los test [14].....	74
Figura III.24. Centro de la aplicación de la carga en el Test 1.....	74
Figura III.25. Zona de aplicación de la carga en el Test 1.....	75
Figura III.26. Centro de la aplicación de la carga en el Test 2.....	75
Figura III.27. Zona de aplicación de la carga en el Test 2.....	76
Figura III.28. Selección de la opción “Nuevo estudio”.....	76
Figura III.29. Selección de “Análisis estático”.....	77

Figura III.30. Menú para realizar el estudio estático.....	77
Figura III.31. Selección geometría fija.....	78
Figura III.32. Valores de la carga sobre los tres ejes que actúan en la pieza para el Test 1.	78
Figura III.33. Valores de la carga sobre los tres ejes que actúan en la pieza para el Test 2.	78
Figura III.34. Mallado de la pieza.....	79
Figura III.35. Ejecutar el estudio.....	79
Figura III.36. Tensiones generadas con Ti-6Al-4V en el Test 1.....	81
Figura III.37. Deformaciones generadas con Ti-6Al-4V en el Test 1.....	81
Figura III.38. Tensiones generadas con Ti-6Al-4V en el Test 2.....	82
Figura III.39. Deformaciones generadas con Ti-6Al-4V en el Test 2.....	82
Figura III.40. Tensiones generadas con AerMet 100 en el Test 1.....	84
Figura III.41. Deformaciones generadas con AerMet 100 en el Test 1.....	84
Figura III.42. Tensiones generadas con AerMet 100 en el Test 2.....	85
Figura III.43. Deformaciones generadas con AerMet 100 en el Test 2.....	85
Figura III.44. Tensiones generadas con CF-EP en el Test 1.....	87
Figura III.45. Deformaciones generadas con CF-EP en el Test 1.....	87
Figura III.46. Tensiones generadas con CF-EP en el Test 2.....	88
Figura III.47. Deformaciones generadas con CF-EP en el Test 2.....	88
Figura III.48. Tensiones generadas con CF-EP en el Test 1 modificando el espesor.....	90
Figura III.49. Deformaciones generadas con CF-EP en el Test 1 modificando el espesor.	90
Figura III.50. Tensiones generadas con CF-EP en el Test 2 modificando el espesor.....	91
Figura III.51. Deformaciones generadas con CF-EP en el Test 2 modificando el espesor.	91

Figura III.52. Peso obtenido por SolidWorks al modificar el espesor de CF-EP.....	92
Figura III.53. Selección de “Wizard” en “Flow Simulation”	95
Figura III.54. Dar nombre al estudio aerodinámico.	95
Figura III.55. Selección de unidades en el SI.	96
Figura III.56. Tipo de análisis y dirección del fluido.....	96
Figura III.57. Definición del fluido.....	97
Figura III.58. Velocidad del fluido, presión y temperatura.....	97
Figura III.59. Volumen de control	98
Figura III.60. Reducción del volumen de control para facilitar la simulación.	98
Figura III.61. Clic para comenzar la simulación.	99
Figura III.62. Presión del aire vista en Alzado.....	99
Figura III.63. Presión del aire vista en Planta.....	99
Figura III.64. Corte de la pieza por plano Alzado mostrando isobaras.....	100
Figura III.65. Velocidad del aire vista en Alzado.	100
Figura III.66. Velocidad del aire vista en Planta.	101
Figura III.67. Corte de la pieza por plano Alzado mostrando isovelocidades.....	101
Figura III.68. Ejemplo de un molde hembra [15].....	103
Figura III.69. Aplicación de resina epoxi sobre fibra de carbono [16].....	104
Figura III.70. a) Colocación de la vejiga dentro del molde; b) Presión de la vejiga y aplicación de calor al material compuesto.	104
Figura III.71. Moldeo con bolsa a presión [17]: a) Colocación del material compuesto sobre molde; b) Moldeo con bolsa a presión y aplicación de calor.	107
Figura III.72. Trozos al aplicar la operación “Partir” en SolidWorks: a) Trozo 1: Central Pylon; b) Trozo 2: V-transition; c) Trozo 3: Main Hoop; d) Trozo 4: Rear Brackets.	108
Figura III.73. Pesos en g: a) Trozo 1: 0,266 kg; b) Trozo 2: 1,5 kg; c) Trozo 3: 0,879 kg; d) Trozo 4: 0,158 kg.	109

Figura III.74. Medidas máximas en mm: a) Trozo 1: 0,184 m; b) Trozo 2: 0,414 m; c) Trozo 3: 0,493 m; d) Trozo 4: 0,1 m.....	109
Figura III.75. Utilización de “Part cost estimator” para conocer el precio de fabricación del Trozo 1.....	110
Figura III.76. Precio de fabricación del Trozo 1.	111
Figura III.77. Precio de fabricación del Trozo 2.	111
Figura III.78. Precio de fabricación del Trozo 3.	112
Figura III.79. Precio de fabricación del Trozo 4.	112

LISTADO DE TABLAS

Tabla I.1. Propiedades físicas del titanio.....	36
Tabla I.2. Propiedades mecánicas de la aleación Ti-6Al-4V.	38
Tabla I.3. Propiedades mecánicas de la aleación AerMet 100.	39
Tabla III.1. Peso del prototipo con diferentes materiales según la norma de la FIA.	60
Tabla III.2. Propiedades mecánicas de Ti-6Al-4V.	64
Tabla III.3. Propiedades mecánicas de Aermet 100.....	64
Tabla III.4. Propiedades de la fibra de carbono y la resina epoxi.....	65
Tabla III.5. Propiedades mecánicas de CF-EP.....	67
Tabla III.6. Propiedades mecánicas de CF-EP que se introducirán en SolidWorks.	71
Tabla III.7. Comparación entre norma FIA y resultados obtenidos con Ti-6Al-4V.	83
Tabla III.8. Comparación entre norma FIA y resultados obtenidos con AerMet 100. ...	86
Tabla III.9. Comparación entre norma FIA y resultados obtenidos con CF-EP.....	89
Tabla III.10. Comparación entre norma FIA y resultados obtenidos con CF-EP modificando el espesor.....	92
Tabla III.11. Comparativa de pesos del Halo fabricado de titanio y acero con CF-EP. .	93
Tabla III.12. Ventajas y desventajas del moldeo por vejiga.....	105
Tabla III.13. Comparativa de precios del Halo fabricado de titanio y acero con CF-EP.	113

I. INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

I. Introducción

I.1. LAS MEDIDAS DE SEGURIDAD PERSONALES EN VEHÍCULOS DE CARRERAS CON RUEDAS. DESDE LA BIGA HASTA LA FÓRMULA 1.

Los vehículos de competición, al igual que las medidas de seguridad, han ido evolucionando con el paso de tiempo, y la protección de los deportistas es una parte fundamental en cualquier evento de estas características. El participante debe de tener unas medidas mínimas de seguridad que garanticen su integridad física ante un posible accidente.

En la antigua Roma, las carreras de velocidad eran realizadas por las bigas, vehículos de combate modificados tirados por dos caballos, siendo la seguridad mínima y las probabilidades de sufrir un accidente grave, muy altas.

En la Grecia clásica ya se realizaban estos juegos, pero tenían más un trasfondo religioso que lúdico. Fue en Roma donde estas carreras consiguieron su apogeo, considerando a los aurigas como héroes nacionales. La esperanza de vida de estos no era alta debido a la peligrosidad de las carreras, pero los que sobresalían podían conseguir grandes riquezas e incluso la libertad, ya que la mayoría de los participantes eran esclavos.

Dos mil años después, con la aparición del motor de combustión interna, volvió a popularizarse las competiciones de velocidad. En las primeras carreras, aunque los coches no tenían una velocidad extremadamente alta, se producían muchos accidentes en los que había una alta tasa de mortalidad tanto de conductores como de los asistentes debido a que se conducía por carreteras abiertas y no por circuitos cerrados, y que los equipos de seguridad de los pilotos y de las pistas no eran los adecuados.

I. Introducción

Con el paso del tiempo, y debido a la gran pasión que despertó en el público las carreras de coches, los torneos se internacionalizaron, creándose unos circuitos cerrados habilitados para estos. Gracias a la ubicación de los espectadores en sitios resguardados de potenciales accidentes y el mantenimiento regular de las calzadas de las pistas, se redujo de manera considerable los daños personales de los pilotos. Este fue el comienzo de la Fórmula 1.

I.1.1. Edad Antigua. Roma.

En la antigua Roma, las carreras de bigas en el circo eran un gran acontecimiento popular que congregaba a gran parte de la sociedad romana fuera cual fuese su posición económica o social, siendo su importancia similar a la lucha de gladiadores o de fieras en los anfiteatros.



Figura I.1. Representación de un circo romano [1].

La seguridad y el bienestar del auriga no era relevante, ya que lo que primaba en estas competiciones era el puro espectáculo y donde estaba todo permitido: desde derribar a los contrincantes de sus carros hasta la muerte de los participantes a causa de los atropellos. Por lo general, el auriga era un esclavo capturado por el imperio y era obligado a participar en los juegos. Por cada carrera que ganaba iba obteniendo ganancias económicas, y si estas eran sustanciosas, podía comprar su libertad y

I. Introducción

retirarse, por lo que las carreras eran muy disputadas y en muchas ocasiones sangrientas.

I.1.1.1. Sistemas de seguridad en las carreras de aurigas.

Como se indicó anteriormente, las medidas seguridad a favor del auriga eran inexistentes. Durante la competición, en una mano portaba las riendas de la biga y en la otra un látigo para fustigar a los caballos y, si había una biga cerca durante la carrera, estaba permitido golpear a otro auriga con él. También llevaba un casco para protegerse la cabeza de los posibles golpes o caídas y un cuchillo en el cinturón. El uso del cuchillo no era para atacar a otro competidor, sino para cortar las riendas de los caballos, ya que el auriga iba atado por la cintura a estos y si descarrilaba el carro podía soltarse y así no ser arrastrado por toda la pista. Esta era la manera más común de sufrir lesiones graves por parte de los corredores.

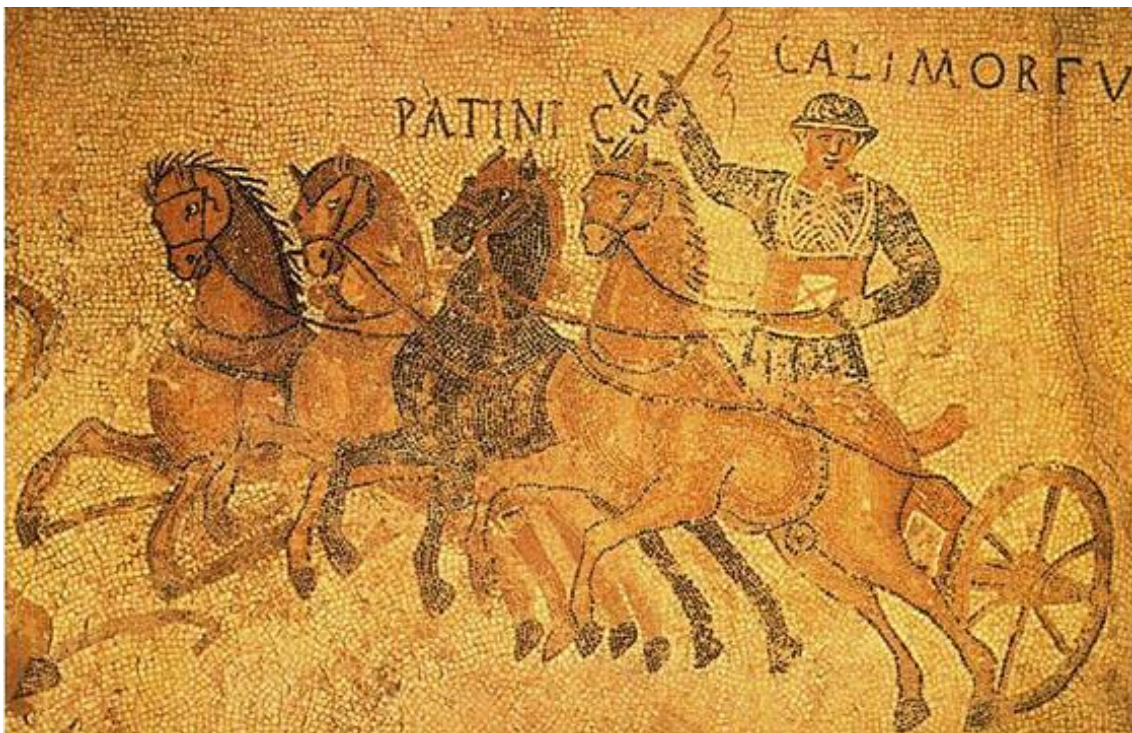


Figura I.2. Mosaico de un auriga en una cuadriga [2].

I. Introducción

I.1.1.2. Sistema “antivuelco” en las bigas.

No existen bigas que hayan llegado intactas hasta nuestros días para poder analizarlas. La razón de ello es que la mayor parte de estas estaban fabricadas con madera, por lo que se deterioraron con el paso del tiempo y los elementos. En lo que se apoyan los arqueólogos e historiadores para poder estudiarlas es en los dibujos y en las esculturas que las representan y también en los pequeños metales que unían la estructura de los carros.

Un estudio llevado a cabo por el investigador Bela Sandor, de la Universidad de Wisconsin, sobre una escultura de bronce que se encuentra en el British Museum ha dado a conocer un detalle que pasó desapercibido durante años: un aro metálico que solo se encuentra en la parte externa de la rueda derecha. Las carreras de carros se recorrían en sentido contrario a las agujas del reloj, por lo que se realizaban giros bruscos a la izquierda, sobrecargando la rueda derecha de la biga. Este aro reforzaría el eje derecho, reduciendo de manera considerable la rotura del eje y aumentando la velocidad en los giros. Este mismo estudio indica que el tener otro aro en la rueda izquierda aumentaría el rozamiento en el eje, reduciendo la velocidad del carro.



Figura I.3. Escultura romana de bronce del British Museum [3].

I. Introducción

I.1.2. Edad Contemporánea.

Desde la caída del Imperio Romano de Occidente hasta finales del siglo XIX no hubo cambios en lo referente a las carreras de velocidad hasta la aparición del motor de combustión interna atribuida a Karl Bertha Benz en Mannheim en 1886, con su modelo Benz Patent-Motorwagen.

I.1.2.1. Primeros coches de combustión interna.

A partir de la invención del motor de gasolina y la creación de nuevos materiales, se empezó a tener una conciencia sobre la seguridad del conductor, aunque todavía era mínima.

Como se puede apreciar en la Figura I.4, el diseño del automóvil de Karl Benz no tenía cinturón de seguridad ni tampoco carrocería que protegiera al pasajero. Debido a su altura, lo que elevaba su centro de masa, era fácil que el vehículo volcara al coger una curva a velocidades no especialmente altas, poniendo en riesgo al conductor. Aunque este coche no fue en un principio diseñado para realizar carreras, diseños posteriores fueron creados para ello.



Figura I.4. Vehículo inventado por Karl Benz [4].

I. Introducción

I.1.2.2. Los sistemas de seguridad desde principios del S. XX hasta nuestros días.

Tras la II Guerra Mundial, resurgió la pasión en el automovilismo. Tras la guerra, la tecnología experimentó un enorme progreso, apoyándose en los avances militares como, por ejemplo, diferentes vehículos mejorados para el combate. Debido a esto, los materiales de los que estaban contruidos los vehículos de carreras fueron más sofisticados y los motores mucho más potentes.

En los años 60, los vehículos tenían un centro de masa bajo por lo que podían trazar curvas mucho más cerradas, aumentando la adherencia de las ruedas en el asfalto. Respecto a las medidas de seguridad, los pilotos portaban un casco que les cubría solo la parte superior de la cabeza y unas gafas sujetas con una goma para protegerles los ojos. Si bien los coches tenían integrado un cinturón de seguridad, durante las carreras la mayoría de los conductores no lo utilizaban, ya que se pensaba que ante un accidente estos no podrían soltarse y se invertiría mucho tiempo en retirarlos del vehículo. En 1962, en el Gran Premio de México, el piloto Ricardo Rodríguez de la Vega salió despedido del coche por no llevar el cinturón de seguridad puesto y falleció al golpearse contra una barrera de protección de una curva peraltada.



Figura I.5. Vehículo de Fórmula 1 en los años 60 [5].

En el año 1963, debido a los numerosos incendios que se produjeron en diversos accidentes, la FIA desarrolló una normativa en la que obligaba a los pilotos el uso de vestimenta ignífuga y se mejoró el diseño del tanque de gasolina para que pudiera absorber un mayor golpe y evitar así incendios en los autos.

I. Introducción

En los años 70, en la parte trasera del vehículo, se añade un faro de color rojo para hacer visible el coche bajo la lluvia y se agrega un respaldo en la parte superior del asiento para sujetar la cabeza y evitar lesiones cervicales. También se hace obligatorio el uso del cinturón de seguridad de seis puntos, sujetando al conductor al asiento por el pecho y con una cinta entre las piernas impidiendo que pueda salir despedido del habitáculo en cualquier dirección.



Figura I.6. Cinturón de seguridad de 6 puntos en un Fórmula 1 [6].

En los 80 y 90 los depósitos de gasolina tienen que pasar un test de impacto que asegure su resistencia e impedir el vertido de combustible en el circuito. En los circuitos de carreras debía haber un Centro Médico permanente y en caso de emergencia, un helicóptero que pudiese evacuar de manera rápida a un accidentado. Como detalle importante, la superficie de material que había alrededor del cockpit y que ayudaba a proteger la cabeza de posibles impactos se amplió de 80 a 400 cm². Las ruedas tenían que estar ancladas al chasis mediante unas correas de sujeción y unidas a las manguetas de freno para que no saliesen despedidas.

I. Introducción

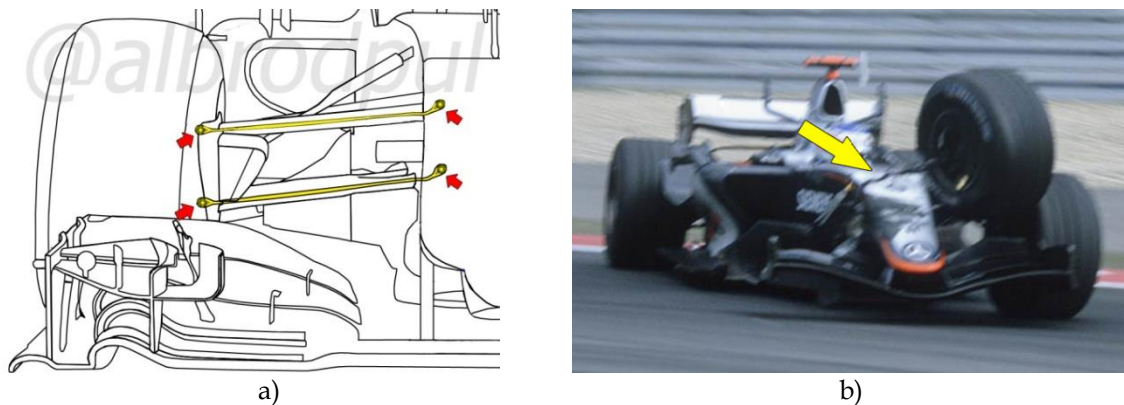


Figura I.7. a) Dibujo de sistema de sujeción de la rueda; b) Momento en el que las correas retienen una rueda tras un accidente [7].

A partir del año 2000 la barra antivuelco aumentó de 5 a 7 cm para facilitar la salida del piloto en caso de que el coche volcase. En el visor del casco se añadió un refuerzo de Zylon, un material de fibra sintética de altas prestaciones compuesta por PBO, que ofrece unas excelentes cualidades entre las que se encuentra una alta resistencia a la tracción y al impacto y, además, gran aguante a altas temperaturas.

Desde 2018 el uso del Halo es obligatorio en todos los coches de Fórmula 1 y Fórmula 2. Este sistema de protección, construido de titanio o acero, está anclado al chasis y tiene como misión salvaguardar la cabeza de los corredores de posibles impactos debido a objetos que salgan despedidos por el aire. Es, de todos los elementos del monoplaza, el más resistente.

Desde que informó la FIA que el Halo iba a ser obligatorio para todos coches hubo muchas opiniones en contra de esta pieza. Dos de los inconvenientes más evidentes eran que mermaba la visibilidad frontal por culpa del pilón central y que reducía la movilidad del piloto en caso de tener que evacuar el coche ante una urgencia. Aún con estos problemas, en el Gran Premio de Bélgica de 2018, el auto de Fernando Alonso pasó por encima del Sauber de Charles Leclerc y el Halo detuvo el impacto del coche, demostrando de una manera directa y positiva el servicio de Halo en competición.

I. Introducción



a) Momento en el que el coche de Fernando Alonso colisionó contra el Sauber de Charles Leclerc [8]; b) Estado del Halo tras el impacto [9].

Antes de ser instalado en el coche, el Halo debe pasar por dos test de fuerza para verificar si realmente es apto para un uso competitivo. Estas pruebas se realizarán aplicando unas cargas en dos zonas concretas del Halo mediante una prensa.

En el Test 1 se le aplicará una fuerza de 125 kN de manera descendente y en sentido a los soportes traseros en el cual la pieza no debe romper y su deformación no podrá exceder los 17,5 mm.

Para el Test 2 la fuerza también será de 125 kN y se administrará de modo horizontal y con sentido diagonal hacia el interior del Halo. En este caso, la pieza finalmente debe romper pero no sobrepasar los 100 mm de deformación al terminar la prueba.



Figura I.9. Halo antes de ser instalado en el vehículo [10].

I. Introducción

I. Introducción

I.2. MATERIALES.

En este apartado se van a describir los tres tipos de materiales que se utilizarán en el diseño del Halo. Dos de ellos, el titanio y el acero, se analizarán porque son los indicados por la FIA y servirán como puntos de control, indicando si el diseño es correcto al cumplir con los dos test. El tercer material, formado por fibra de carbono con matriz de resina epoxi, ha sido propuesto por el autor del siguiente trabajo debido a su uso en el ámbito aeronáutico por sus excelentes propiedades mecánicas y deberá cumplir con las mismas exigencias a las que se someterán los dos materiales anteriormente mencionados para garantizar la seguridad de la pieza.

I.2.1. Titanio y aleaciones.

Según la norma de la FIA, uno de los dos materiales de los que está fabricado el Halo es de aleación de titanio Ti-6Al-4V. Por ello, se va a desarrollar una pequeña introducción sobre este material y se enumerarán las características más relevantes para el desarrollo de este trabajo.

I.2.1.1. Titanio.

El titanio es un metal en estado sólido, no ferroso, que se encuentra el número 22 en la Tabla Periódica de los Elementos, por lo que tiene 22 protones en el núcleo atómico y 22 electrones orbitando en él.

Tiene un color blanco y brillante, similar al aluminio o la plata. Se encuentra con los elementos de transición, como el hierro o el cobre, por lo que su orbital d está parcialmente lleno de electrones, formándose por ello complejos iónicos.

El titanio posee una extraordinaria relación entre resistencia mecánica y densidad, aligerando de manera notable el peso de la pieza a construir, en comparación con el acero, que es casi el doble de denso.

Debido a que tiene una alta resistencia al calor, elevada resistencia a los impactos y baja densidad, el titanio es utilizado no solo en el ámbito aeroespacial,

I. Introducción

como en componentes de motores de reacción, sino también en la fabricación de álabes de turbinas, ingeniería naval, armamento bélico y en medicina, como prótesis médicas o implantes dentales.

Tabla I.1. Propiedades físicas del titanio.

Color	Blanco metálico
Densidad (kg/m ³)	4500
Punto de fusión (°C)	1670
Punto de ebullición (°C)	3260
Temperatura de transformación alotrópica (°C)	882

El titanio sufre una transformación alotrópica debido a la temperatura, por lo que puede tener dos estructuras cristalinas bien diferenciadas. La primera, si la temperatura es menor de 882°C, la estructura es compacta hexagonal (HC) conocida como fase α y estable a temperatura ambiente. Si la temperatura es mayor, se crea una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) y se obtiene la fase β .

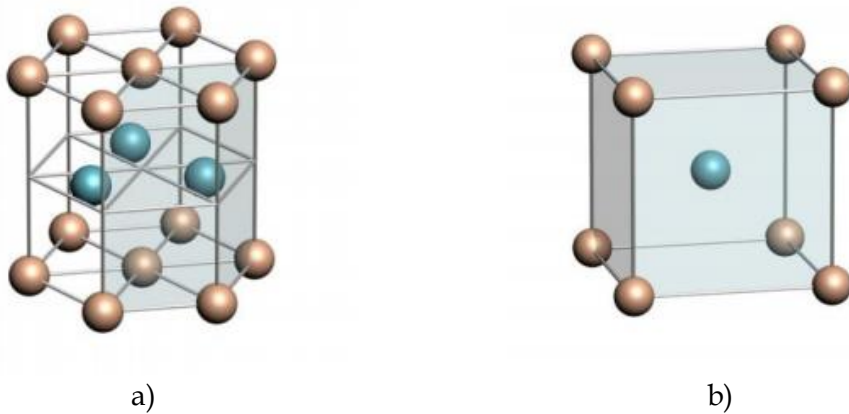


Figura I.10. a) Estructura cristalina HC en fase α ; b) Estructura cristalina BCC en fase β [11].

Con el uso de diversas aleaciones se puede estabilizar, a temperatura ambiente, las diferentes fases que puede adoptar el titanio: aleación α , β y α/β .

I. Introducción

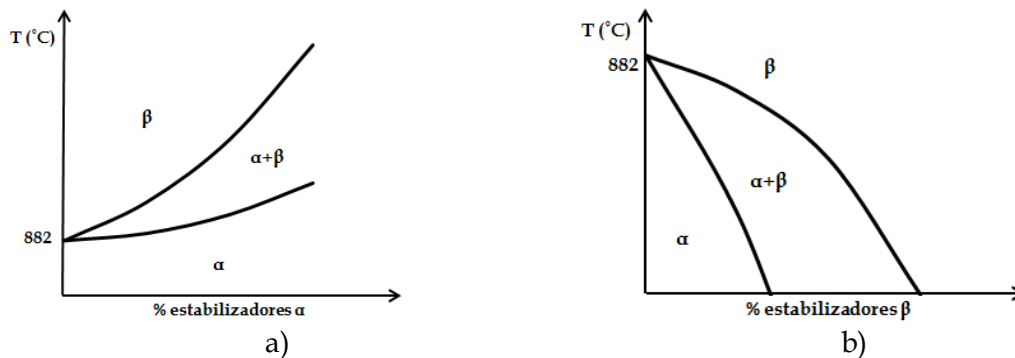


Figura I.11. a) Diagrama de equilibrio del titanio con estabilizador α ; b) Diagrama de equilibrio del titanio con estabilizador β .

Las aleaciones tipo α presentan una estructura compacta hexagonal a temperatura ambiente. Esta aleación aumenta la temperatura de transformación alotrópica, por lo que incrementa la temperatura β -transus. Entre los elementos utilizados se encuentra el aluminio, el oxígeno o el carbono. A estos estabilizadores de la fase α se les llama alfégenos.

En las aleaciones β se consigue disminuir la temperatura β -transus para que la fase β se encuentre a temperatura ambiente de manera estable. En este caso, lo que sucede es que la temperatura de transformación disminuye y así se estabiliza la estructura cúbica centrada en el cuerpo. Los aleantes son el vanadio, el hierro o el níquel y son llamados betágenos.

Las aleaciones α/β contienen tanto alfégenos como betágenos. En esta aleación se encuentran la fase α como la fase β de manera estable a temperatura ambiente, aunque esta última estructura cristalina en menor cantidad. La aleación de titanio que se va a utilizar para el diseño de la pieza del siguiente trabajo pertenece a este tipo.

I.2.1.2. Aleación de titanio Ti-6Al-4V.

La aleación de titanio utilizada para la realización del Halo es Ti-6Al-4V. Esta es la aleación de titanio más utilizada en ingeniería, sobre todo en aeronáutica y aeroespacial, ya que posee una gran resistencia a los impactos, soporta altas temperaturas y ofrece una elevada resistencia a la corrosión. Como se puede utilizar soldadura, se pueden crear diferentes partes más pequeñas para luego unir las y así obtener una pieza de grandes dimensiones y con morfología compleja.

I. Introducción

Tabla I.2. Propiedades mecánicas de la aleación Ti-6Al-4V.

σ_e (MPa)	1050
σ_T (MPa)	1185
E (MPa)	115 000
ν	0,36

La Tabla I.2 indica las propiedades mecánicas de Ti-6Al-4V más relevantes en este trabajo y se introducirán en el programa informático SolidWorks para poder realizar el análisis de la pieza.

I.2.2. Acero y aleaciones.

El acero y las diferentes aleaciones ferrosas representan el 90% de la producción de metales en el mundo. Esto es debido a que el acero posee unas notables cualidades entre las que se encuentran su alta resistencia, una extraordinaria absorción de impactos y una gran ductilidad a un coste barato, a diferencia del titanio, que es mucho más caro su producción.

Se denomina acero a aquella aleación de hierro que tiene una cantidad de carbono de 0,03% hasta un 1,2%, aunque lo más común en la mayoría de aceros es que no sobrepasen el 0,5% de carbono. Si la cantidad de carbono es superior a 1,8% el material se vuelve más frágil, lo que puede provocar la ruptura súbita del material si sobre él se ejerce una determinada fuerza que sobrepase el σ_e .

Hay estudios que datan la utilización del hierro en diferentes herramientas hace tres milenios, utilizándose sobre todo en puntas y filos de armas. Por esta razón, el acero es el material más estudiado y es, entre todos, el más utilizado en todos los ámbitos de la ingeniería: desde construcciones de edificios como en el diseño y fabricación en aeronáutica o en el refuerzo de estructuras.

Como la norma no indica el tipo de acero, se va a elegir la aleación AerMet 100 por sus cualidades físicas y mecánicas.

I. Introducción

I.2.2.1. Aleación de acero AerMet 100 (UNS K92580 / AMS 6532).

En la Tabla I.3 se indican las propiedades más importantes que se introducirán en el siguiente trabajo, fabricado de una aleación AerMet 100.

Tabla I.3. Propiedades mecánicas de la aleación AerMet 100.

σ_e (MPa)	1705
σ_T (MPa)	2030
E (MPa)	198 000
ν	0,306

La cantidad de carbono que contiene este acero es de un 0,23%. Esta aleación de acero es de tipo martensítico. La creación de martensita ocurre cuando se realiza un temple súbito, enfriando de manera rápida la pieza hasta la temperatura ambiente sumergiéndola en agua, cambiando su estructura inicial de austenita a martensita.

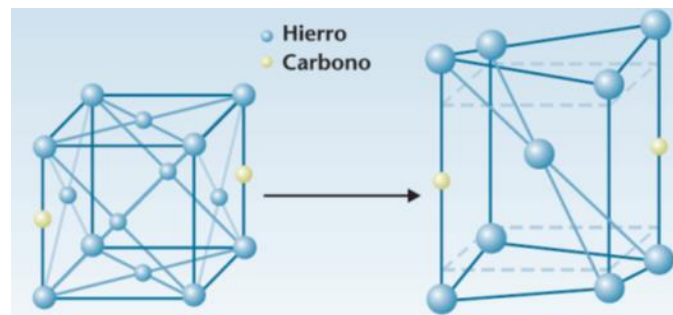


Figura I.12. Transformación de estructura austenítica a martensítica debido a temple [12].

Como se puede observar en la Figura I.12., al realizar el temple al acero, la estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo de la austenita cambia a tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) debido a la distorsión generada por el carbono intersticial.

La temperatura en la que se inicia la transformación de la austenita en martensita cuando se le aplica el temple se llama temperatura de inicio martensítico (M_s). Como indica la Figura I.13, al incrementar la cantidad de carbono en la pieza, la M_s disminuye.

I. Introducción

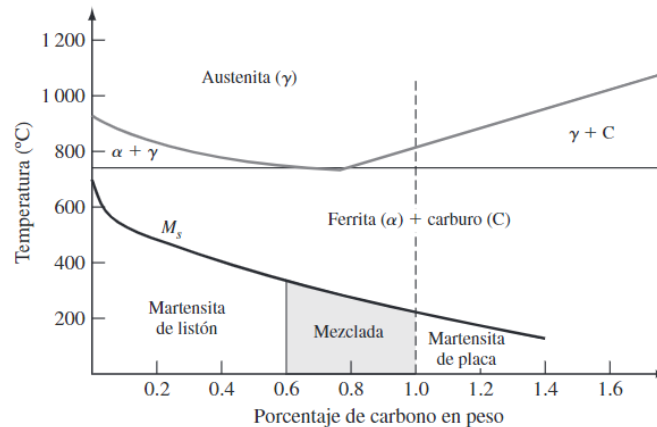


Figura I.13. Evolución de M_s en el acero al aumentar % carbono [13].

En el caso de la aleación AerMet 100, al tener un 0,23% de carbono, la temperatura en la que se inicia la transformación de martensita cuando se enfría el acero es a partir de 500°C aproximadamente.

I.2.3. Material compuesto.

La norma FIA Standard 8869-2018 indica que el material del Halo estará fabricado de titanio y acero, pero en este trabajo se va a utilizar un material compuesto para comprobar si este puede soportar las cargas que marca la norma. El material compuesto que se utilizará será fibra de carbono con una matriz de resina epoxi.

I.2.3.1. Definición de material compuesto.

Se define como material compuesto a aquellos materiales que están formados por dos constituyentes que no pueden reaccionar químicamente entre ellos y que, unidos, mejoran sus propiedades a la de sus componentes por separado. En estos materiales cada constituyente tendrá un rol determinado: uno de ellos se definirá como matriz y el otro como refuerzo.

I. Introducción

I.2.3.2. La matriz.

La matriz es la encargada de mantener unidas y orientadas a las fibras del material compuesto, aportándole una estructura rígida y absorbiendo los esfuerzos de compresión que la fibra no puede de manera individual. A su vez protege a la fibra de la degradación a causa de agentes químicos o externos, como la humedad o la temperatura, y del desgaste producido por el rozamiento.

Se pueden encontrar diferentes tipos de matrices que formen parte del material compuesto:

1) Matriz cerámica: son aquellas que están formadas por sólidos inorgánicos no metálicos. Estas matrices soportan bien las altas temperaturas y, mecánicamente, ofrecen una elevada resistencia a compresión y con un comportamiento frágil a tracción.

2) Matriz metálica: éstas están constituidas por material inorgánico metálico. Tienen una elevada resistencia mecánica, a temperatura y a la abrasión, dotando al material compuesto de una conductividad térmica y eléctrica. Son muy utilizadas en la ingeniería aeroespacial.

3) Matriz polimérica: Como el procesado de esta matriz se puede realizar a temperatura ambiente es una de las matrices más utilizadas en la fabricación de objetos. La mayoría de los materiales compuestos de matriz orgánica están fabricados con termoestables, ya que su manipulación es en forma líquida, facilitando su aplicación como matriz. Los termoestables se obtienen mediante procesos de reticulación de las resinas líquidas, siendo activado este proceso por medio de agentes reguladores y el calor o la presión.

Los polímeros termoestables se pueden obtener mediante diversos procesos de polimerización:

-Adición, como la resina epoxi.

-Condensación, como el fenol-formaldehído.

I. Introducción

-Procesos combinados, como el poliéster insaturado.

El polímero termoestable está formado por la propia resina y el endurecedor, cuya función es la activación de entrecruzamiento en la resina y solidificación. Se pueden encontrar otros componentes en cantidades bajas también importantes para la resina:

-Diluyentes reactivos, utilizados para disminuir la viscosidad y así facilitar su manipulación.

-Iniciadores, usados para iniciar el entrecruzamiento.

-Aceleradores/catalizadores, controlan la velocidad del entrecruzamiento.

-Inhibidores, impiden que se produzca la reacción entre algunos componentes.

La resina termoestable utilizada para realizar el Halo de este trabajo será resina epoxi. Aunque tiene un precio alto, lo cual encarece la fabricación de la pieza, ofrece unas buenas propiedades mecánicas al material compuesto y lo dota de gran resistencia a agentes externos. Por sus cualidades, es utilizada en la construcción de aeronaves.

I.2.3.3. El refuerzo.

Formado por las fibras del material compuesto, aportan propiedades mecánicas que la matriz no tiene, aumentando la resistencia mecánica y aligeran el peso del material compuesto.

Según el origen del material utilizado en la formación de las fibras, éstas pueden clasificarse como:

-Fibras orgánicas: son obtenidas de derivados del petróleo. Entre ellas se encuentra la fibra de carbono o la de aramida.

-Fibras inorgánicas: entre ellas se encuentran las fibras cerámicas como la fibra de vidrio, y las metálicas como el acero.

I. Introducción

Para la fabricación del material compuesto en este trabajo se utilizará como refuerzo fibra orgánica y en particular, la fibra de carbono.

-Fibra de carbono: debido a su alto precio, es utilizada cuando la rigidez necesaria en las piezas no la puede cumplir la fibra de vidrio, mucho más barata. Estas fibras ofrecen al compuesto una óptima relación entre el peso y resistencia y un elevado E (rigidez). Estas cualidades hacen que el uso de esta fibra sea empleada en el sector aeronáutico y aeroespacial.

La materia prima más utilizada en la obtención de fibra de carbono es el PAN. Para ello, el PAN debe pasar por tres fases:

-Fase de estabilización: las fibras de PAN son estiradas longitudinalmente manteniendo una tensión y oxidadas en aire mientras se aplica una temperatura de 200 °C.

-Fase de carbonización: en una atmósfera inerte y mediante un proceso de pirolisis con temperaturas entre 1000 a 1500 °C, las fibras se calientan eliminando el oxígeno, nitrógeno y el hidrógeno, generándose la fibra de carbono de alta resistencia.

-Fase de grafitización: calentando la fibra a una temperatura superior a 1800 °C aumenta el E y la orientación de los cristales de grafito. En esta fase se consigue obtener fibra de carbono de alto módulo.

I. Introducción

II. OBJETIVOS

OBJETIVOS

II. Objetivos

II.1. OBJETIVO GENERAL.

El objetivo de este proyecto es el diseño de un AFP-Halo de un Fórmula 1. El Halo se fabricará como marca la norma FIA Standard 8869-2018 la cual indica que debe ser de aleación de titanio y acero. También se efectuará un diseño con material compuesto para comprobar si se puede cumplir con los parámetros que la norma determina. Posteriormente, se realizará un estudio aerodinámico del Halo y un análisis de sus propiedades mecánicas y, finalmente, económico.

II. Objetivos

II. Objetivos

II.2. OBJETIVOS PARTICULARES.

II.2.1. Enumeración de los objetivos particulares.

1. Diseño del AFP-Halo con ayuda del programa informático SolidWorks. En él se introducirán todos los parámetros necesarios que nos indica la norma de la FIA.

2. Elección de los materiales.

3. Análisis de las propiedades mecánicas del Halo. Tiene que cumplir con los test de fuerza que indica la norma y verificar que se cumplen con las deformaciones máximas que la norma determina.

4. Estudio aerodinámico.

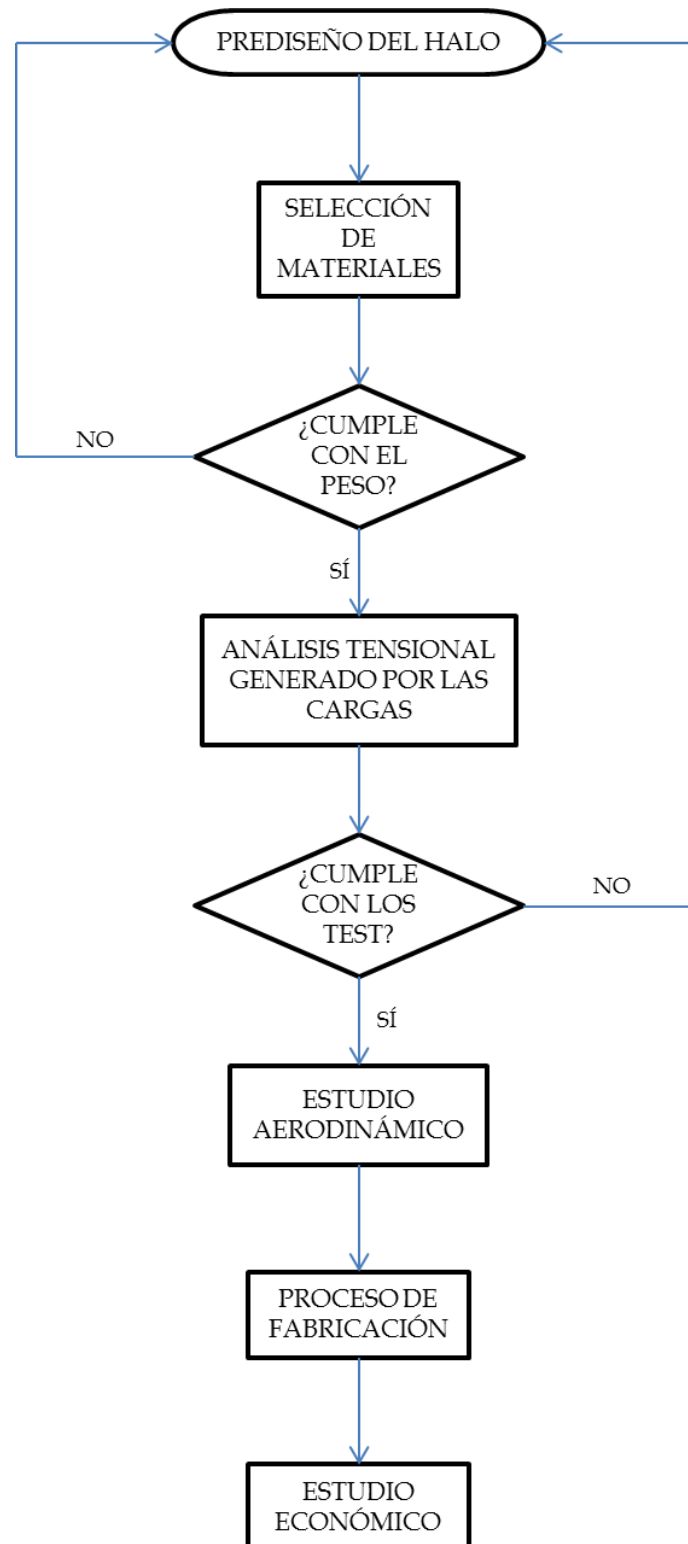
5. Determinar el proceso de fabricación.

6. Estudio económico.

Después de listar los diferentes objetivos, se puede visualizar de manera global todo el trabajo en un diagrama de flujo donde se muestren claramente todas las etapas desarrolladas y su vinculación con los objetivos.

II. Objetivos

II.2.2. Diagrama de flujo de los objetivos particulares.



III. DESARROLLO PROYECTO

DESARROLLO PROYECTO

III. Desarrollo proyecto

III.1. DISEÑO INICIAL PROTOTIPOS.

En el diseño del Halo se va a utilizar el programa informático SolidWorks. Se deben de cumplir los parámetros que dice la norma de la FIA Standard 8869-2018 sobre el peso del prototipo. Como se indica en la Tabla III.1., la pieza debe de tener un rango de peso diferente ya sea material de titanio o de acero. Una vez acabado el diseño por ordenador hay que comprobar que se respeta el peso que denota la norma. Si no cumpliese habría que rediseñar el Halo variando las medidas hasta satisfacerlo.

III.1.1. Diseño del Halo para materiales isotrópicos.

Primero, mediante la operación “Geometría de referencia”, se crea el Plano 1 que es paralelo a la Planta.

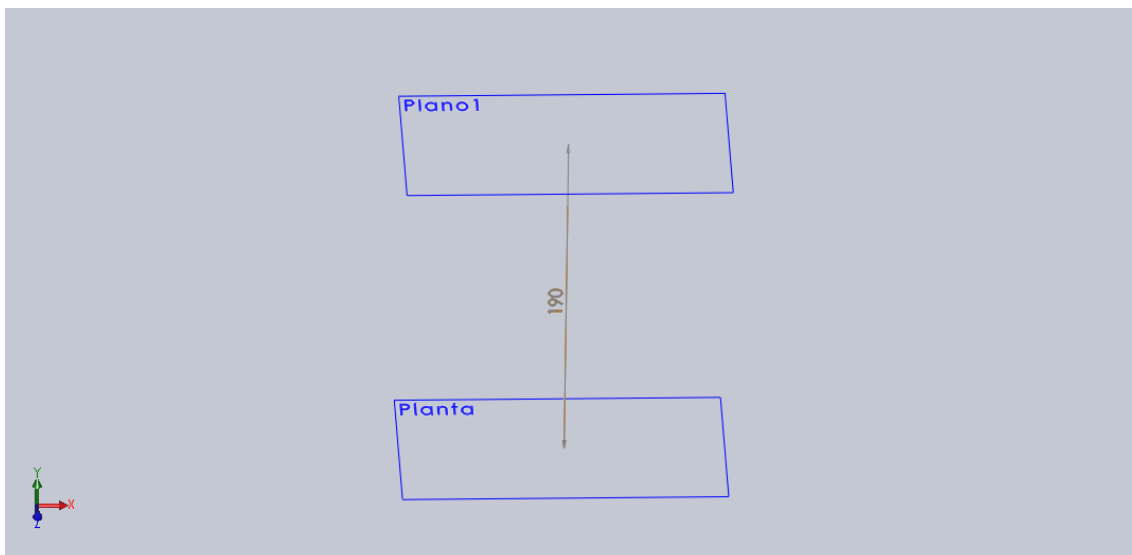


Figura III.1. Creación de Plano 1.

Definido el Plano 1, se realizan dos croquis: el primero, dibujado sobre la Planta, representa la anchura del Halo y el segundo se realizará en el plano del Alzado e indicará el perfil del prototipo.

III. Desarrollo proyecto

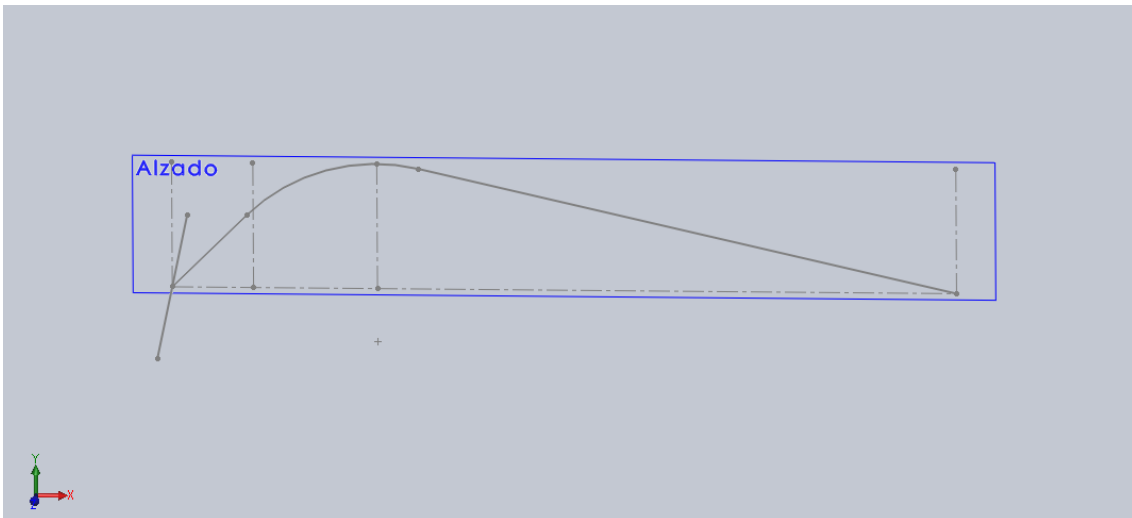


Figura III.2. Construcción de la anchura y el perfil.

Mediante la pestaña Superficies se selecciona “Superficie limitante” se crea la superficie plana delimitada por los croquis de la Figura III.2.

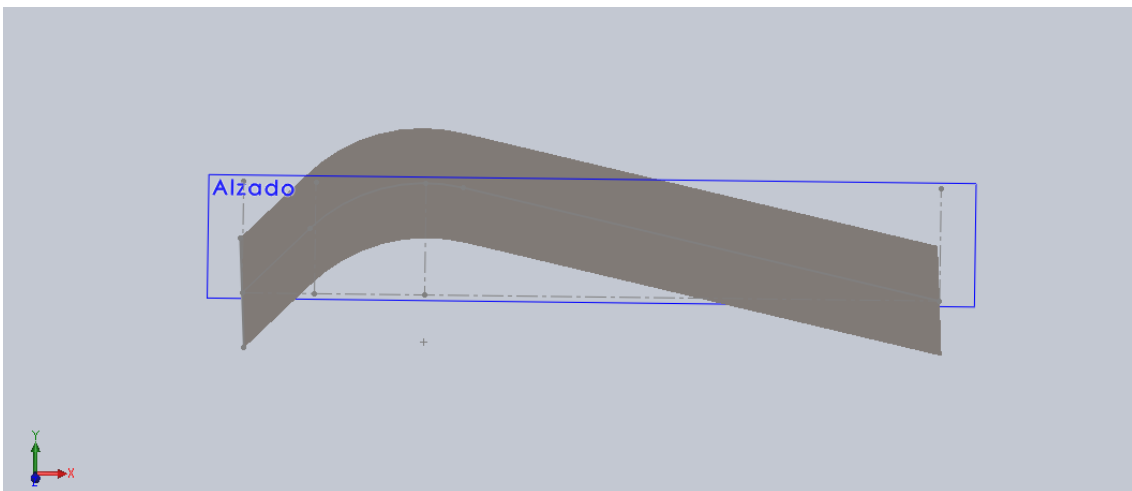


Figura III.3. Creación de la superficie plana.

Sobre el Plano 1 se realiza un croquis en el cual se dibuja la forma del Halo vista en planta.

III. Desarrollo proyecto

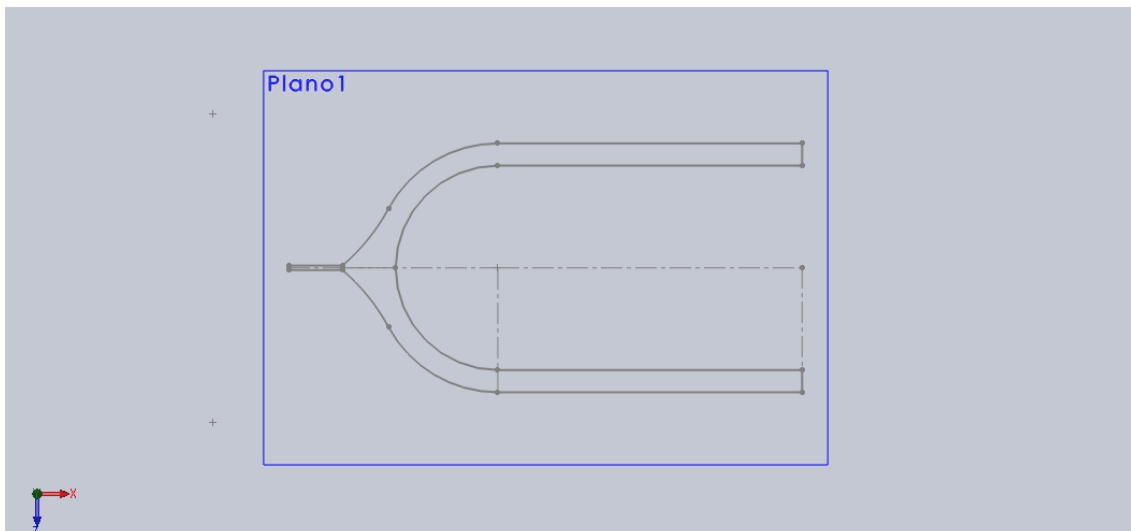


Figura III.4. Croquis en el Plano 1.

Con la operación “Superficie-Recortar” se define la parte del croquis que se quiere conservar y la parte no seleccionada es eliminada.

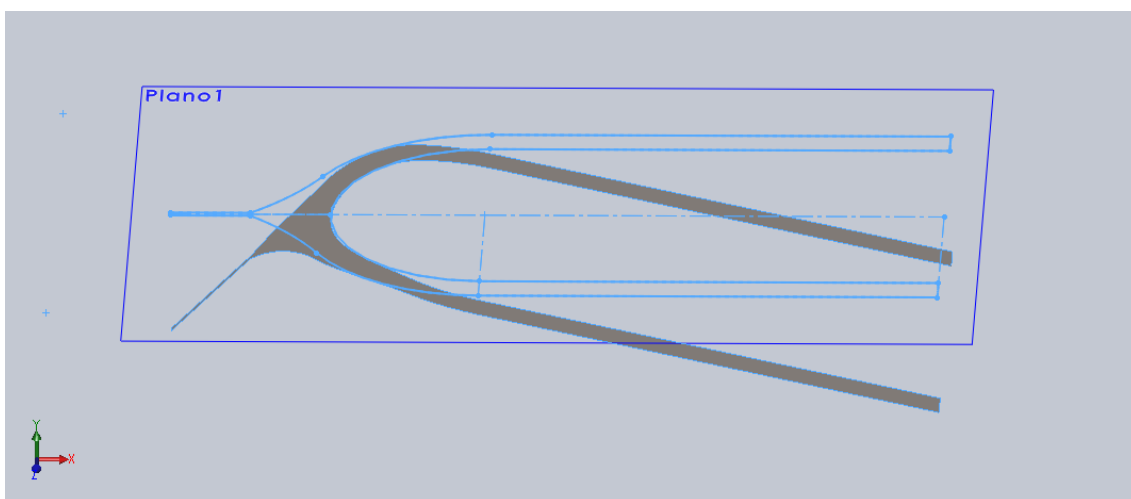


Figura III.5. Recorte del croquis del Plano 1.

Acto seguido hay que darle espesor a la superficie creada. Para ello, en la pestaña Superficies, se selecciona “Dar espesor”.

III. Desarrollo proyecto

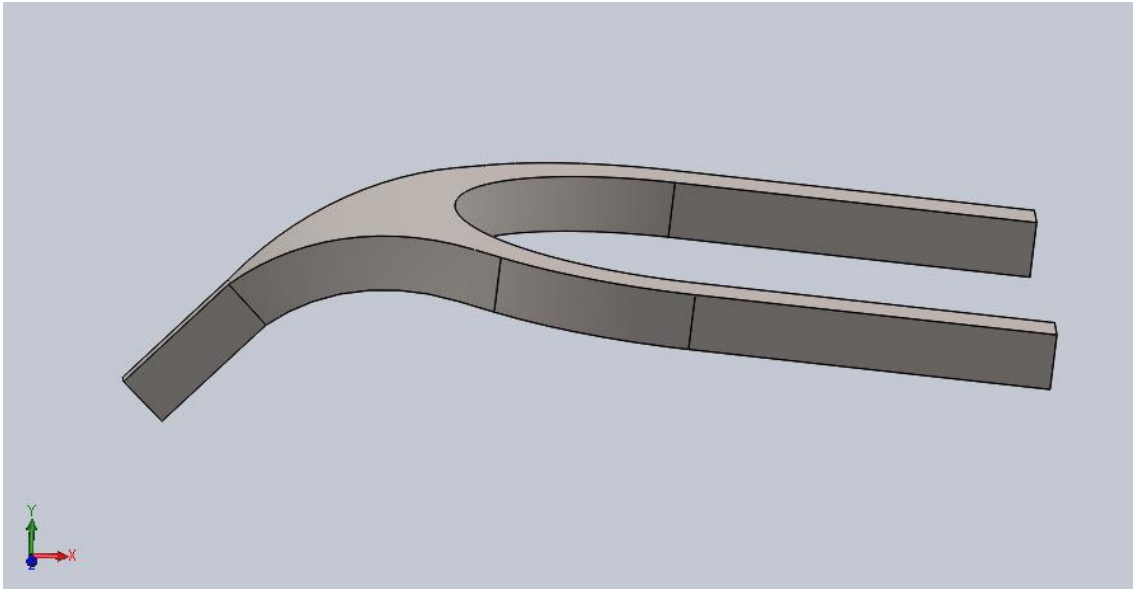


Figura III.6. Superficie con un determinado espesor.

Una vez obtenida la pieza con espesor, se aplica la operación “Redondeo” y se utiliza en todas las aristas del Halo para suavizarlas.

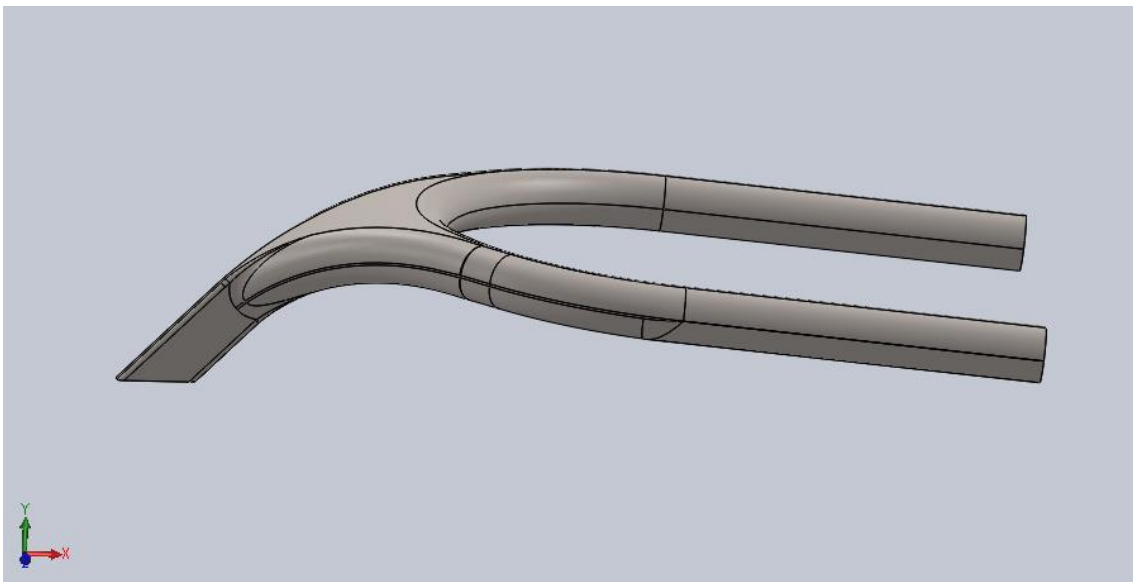
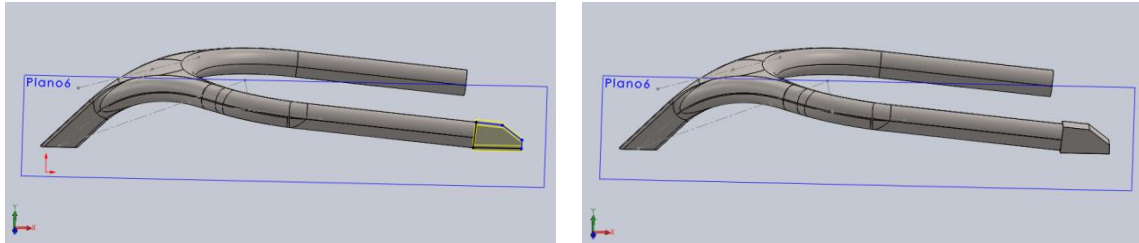


Figura III.7. Redondeo en las aristas.

III. Desarrollo proyecto

Paralelo al plano Alzado se crea el Plano 6 sobre el que se dibujará un croquis y mediante la operación “Extruir saliente/base” se formarán los soportes traseros (Rear Brackets) sobre los que se apoyará el aro principal (Main Hoop)



a) b)
Figura III.8. a) Croquis sobre el Plano 6, b) Aplicada la operación “Extruir saliente/base”.

Se le realiza un redondeo al soporte trasero para eliminar las aristas y se efectúa una simetría con respecto al Plano Alzado para añadir un segundo soporte en el otro extremo del aro principal.

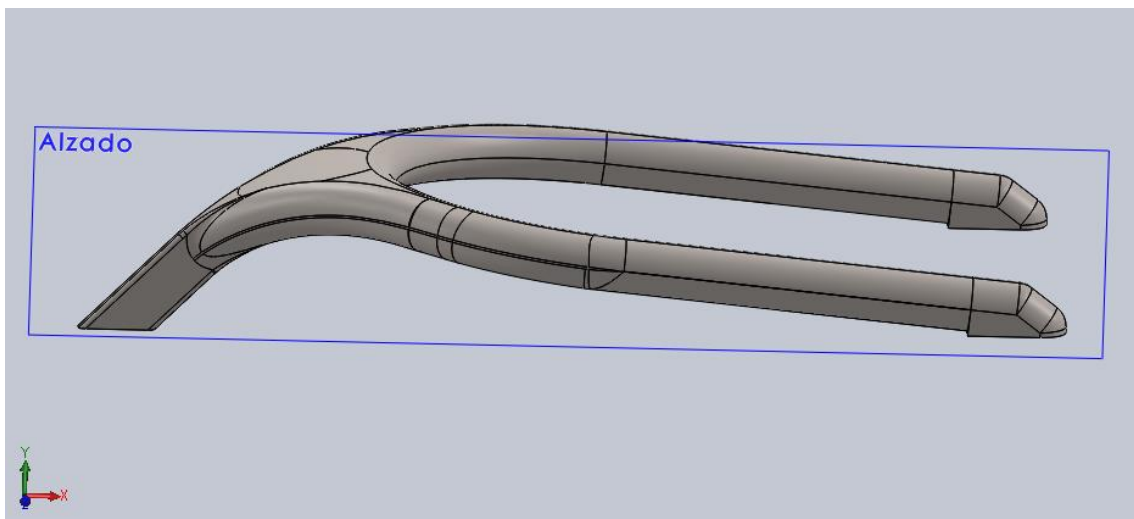


Figura III.9. Soportes traseros aplicando “Simetría”.

Sobre el pilón central (Central Pylon) se va a dibujar un círculo y se realiza un “Extruir corte” para eliminar parte del material sobrante.

III. Desarrollo proyecto

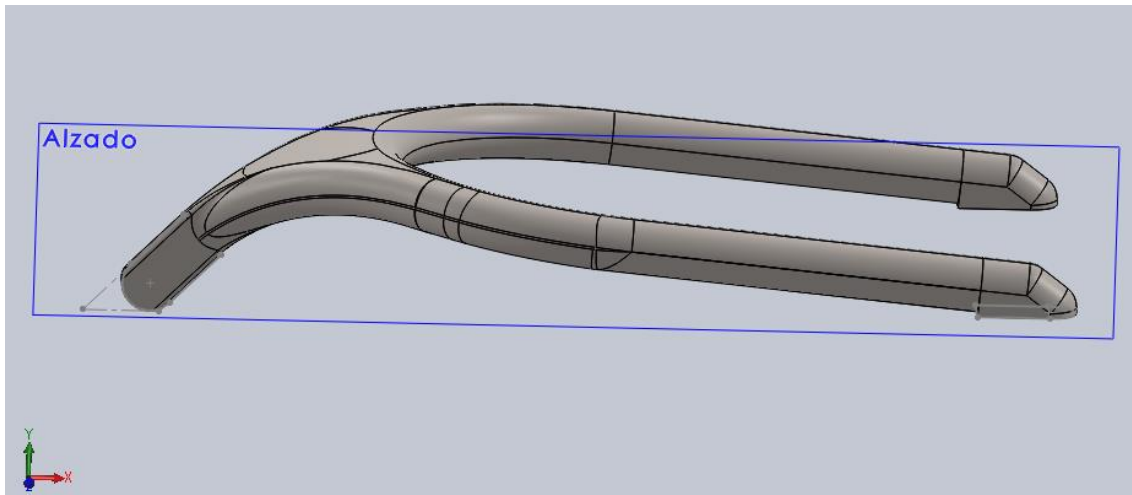


Figura III.10. Extrusión en el pilón central.

Realizada la operación anterior, se crea un agujero por todo el pilón central en el que se introducirá un pasador que sujetará el Halo a la mesa de pruebas, anclándola para poder aplicar las diferentes tensiones que la pieza deberá soportar.

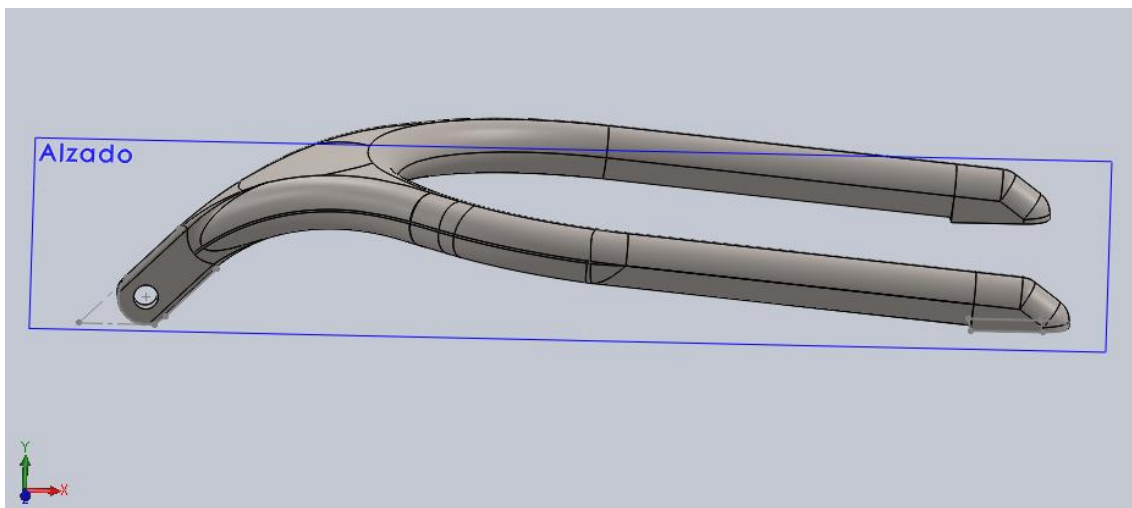


Figura III.11. Perforación del pilón central.

Una vez realizados los pasos anteriores, se efectúa un vaciado de la pieza, ya que esta no es maciza.

III. Desarrollo proyecto

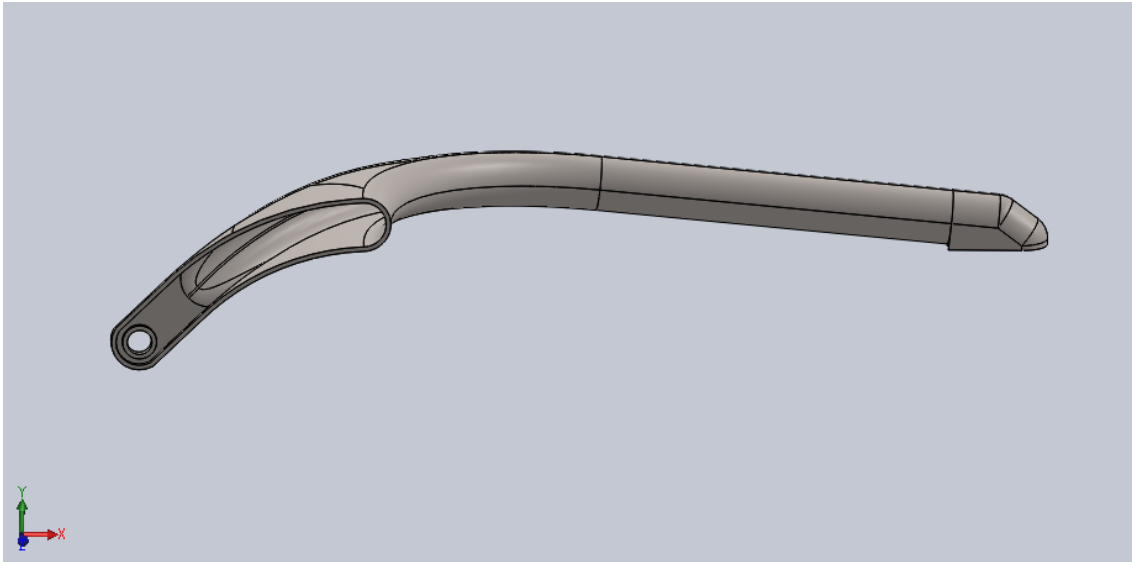


Figura III.12. Vista de sección mostrando vaciado de la pieza.

Realizados los todos los pasos anteriores obtenemos la pieza del Halo ya finalizada.

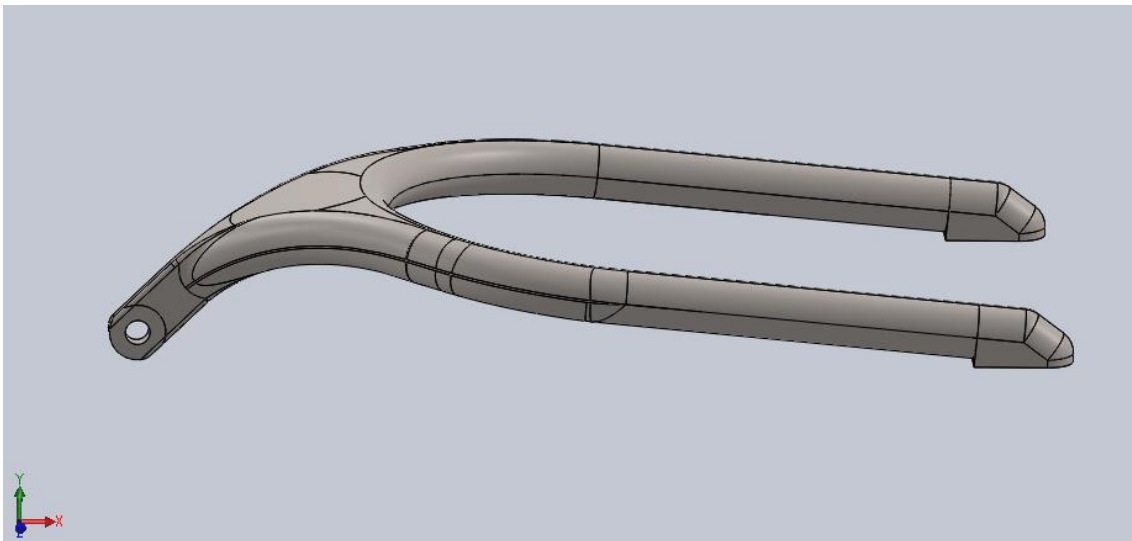


Figura III.13. Diseño de la pieza finalizado.

Como se indica en la norma de la FIA, el Halo debe cumplir un peso ya sea fabricado en titanio o en acero. Si no se cumpliese con ello habría que variar sus dimensiones, ya sea su longitud, los diámetros de los tubos o el espesor de la pieza hasta cumplir con los diferentes rangos especificados en la Tabla III.1.

III. Desarrollo proyecto

Tabla III.1. Peso del prototipo con diferentes materiales según la norma de la FIA.

Material	Peso (kg)
Titanio	6,85 - 7,05
Acero	13 - 14

Para comprobar que se cumple con el peso, se debe seleccionar “Calcular” y después “Propiedades físicas”.

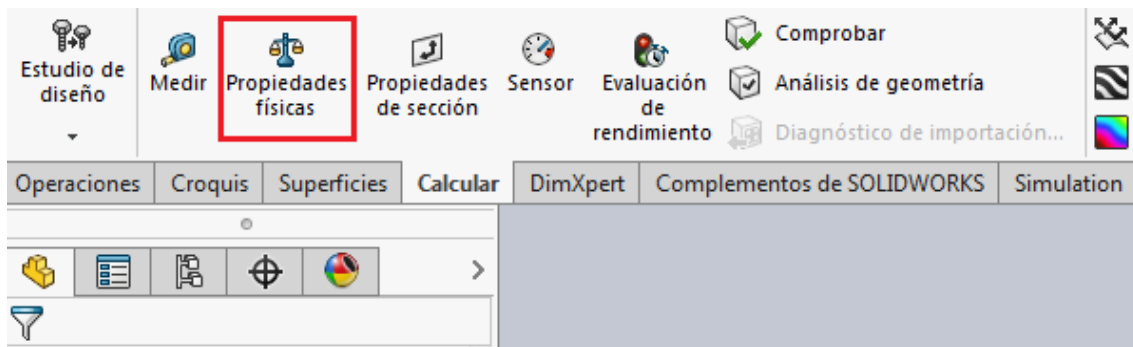


Figura III.14. Selección de Propiedades físicas para conocer el peso de la pieza.

Al realizar esta acción se abrirá una ventana donde se indicará el peso del producto diseñado. En la Figura III.15 se puede visualizar el peso de la pieza realizada con los dos materiales y si estos cumplen con el peso que la norma de la FIA indica. Para satisfacer el peso que indica la norma, el espesor del Halo será de 4,65 mm.

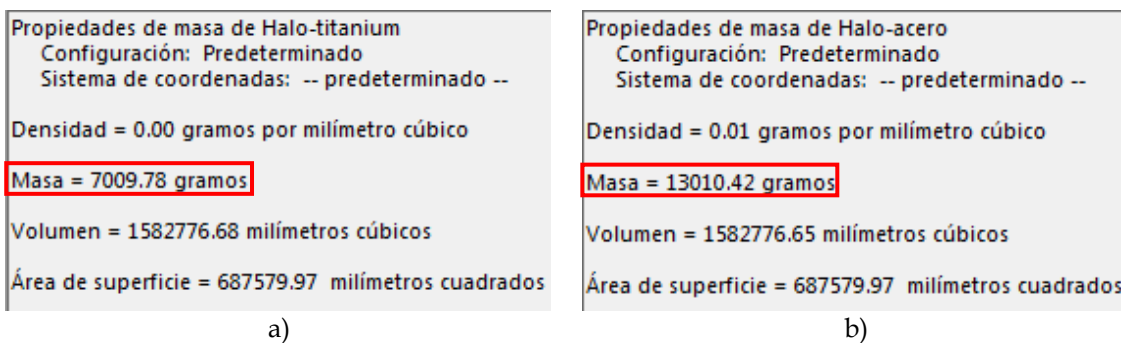


Figura III.15. Peso obtenido por SolidWorks: a) con material de titanio; b) con material de acero.

III. Desarrollo proyecto

III.1.2. Diseño del Halo para materiales ortotrópicos.

Con el diseño obtenido en el Apartado III.1.1, para poder realizar los cálculos con el material compuesto, lo primero que se debe de hacer es indicar al programa que la pieza va a ser realizada como una lámina. Para ello, en “Análisis Estático”, se seleccionará con botón derecho “Definir vaciado por caras seleccionadas...”.

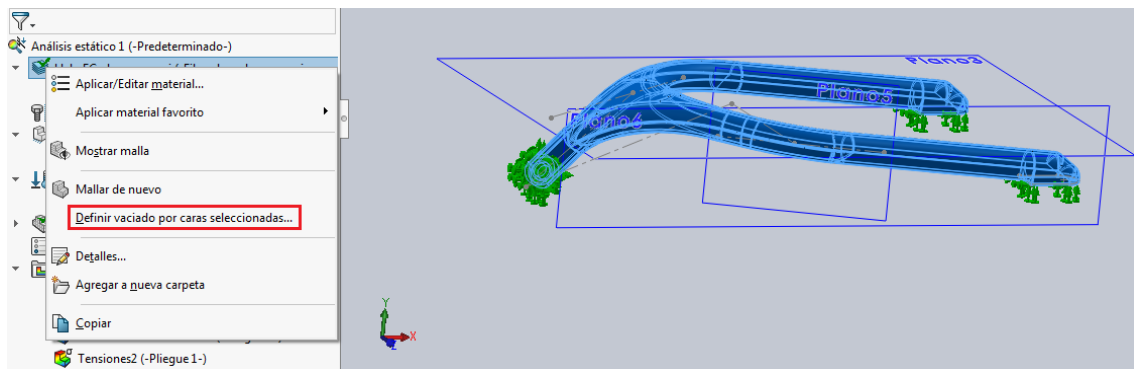


Figura III.16. Definir vaciado por caras seleccionadas.

A continuación, en “Tipo” se escoge la opción “Compuesto” y se seleccionan todas las superficies a las que se le va a aplicar el vaciado, que en este caso serán todas las caras.

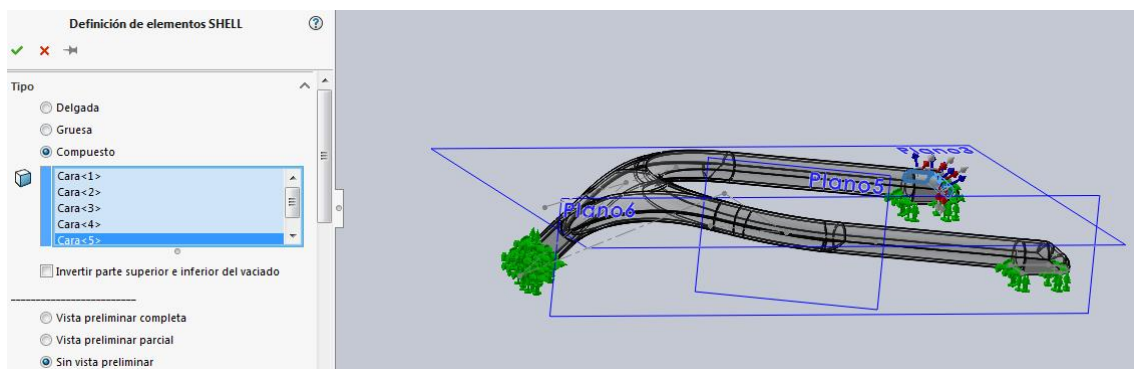


Figura III.17. Selección de las caras del compuesto que se van a vaciar.

Para darle el mismo espesor que tiene el Halo de titanio como el de acero, se van a colocar 16 capas con un espesor de 0,29 mm, con una disposición laminar tipo $[45/-45/90/0/45/-45/90/0]_s$ para aportar al material compuesto un comportamiento quasi-isotrópico. También se elegirá el material al que se le realizará el estudio.

III. Desarrollo proyecto

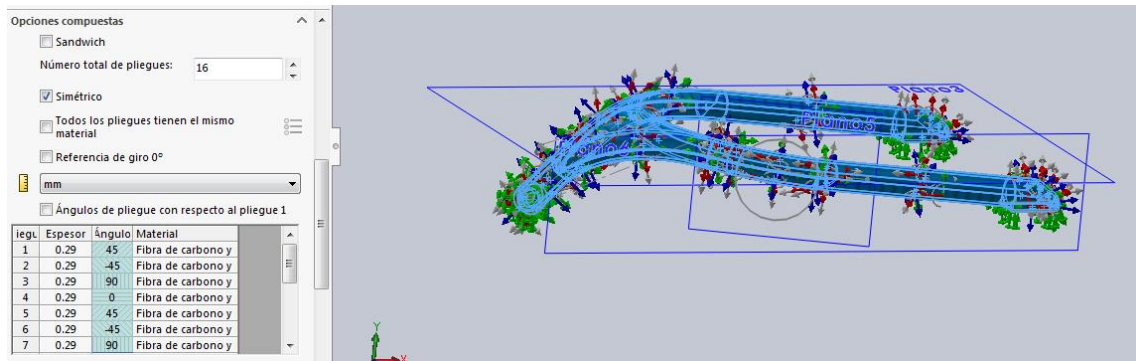


Figura III.18. Definición del número de láminas, ángulos de las fibras y material.

III. Desarrollo proyecto

III.2. SELECCIÓN DE MATERIALES.

En este apartado se van a seleccionar los diferentes materiales para la fabricación de la pieza. Para ello, se calcularán las propiedades mecánicas más relevantes para poder modelizar el Halo con el programa de elementos finitos SolidWorks.

Según indica la norma de la FIA, para la construcción de la pieza se va a utilizar la aleación de titanio Ti-6Al-4V y para el acero, ya que no se indica que aleación se debe utilizar, se ha elegido la AerMet 100 porque posee unas buenas propiedades mecánicas que pueden servir para la fabricación del Halo. Aunque solo se puede fabricar de los dos materiales mencionados anteriormente, también se utilizará material compuesto, cuyos datos se han obtenido de *Simplified Coposite Micromechanics Equations for Strength, Fracture Toughness, Impact Resistance and Environmental Effects* (Chamis, 1984).

Para la obtención de las propiedades mecánicas tanto del titanio Ti-6Al-4V como de la del acero AerMet 100 se ha utilizado la base de datos CES EduPack y se han introducido en el programa de elementos finitos SolidWorks. Los dos materiales metálicos tendrán un comportamiento isotrópico, por lo que su comportamiento mecánico será igual en las direcciones x , y , z .

III.2.1. Propiedades mecánicas de Ti-6Al-4V y AerMet 100.

En la Tabla III.2 se muestran las características mecánicas más relevantes de Ti-6Al-4V y serán introducidas en el programa SolidWorks para poder calcular las tensiones y deformaciones formadas a causa de las cargas aplicadas al realizar los dos test.

III. Desarrollo proyecto

Tabla III.2. Propiedades mecánicas de Ti-6Al-4V.

E (MPa)	115 000
σ_e (MPa)	1050
σ_T (MPa)	1185
ν	0,36
ρ (kg/m ³)	4428,8

En la Tabla III.3 quedan reflejados los valores de las propiedades mecánicas para el cálculo de la pieza de acero.

Tabla III.3. Propiedades mecánicas de Aermet 100.

E (MPa)	198 000
σ_e (MPa)	1705
σ_T (MPa)	2030
ν	0,306
ρ (kg/m ³)	8200

III.2.2. Propiedades mecánicas del material compuesto. Cálculo de las constantes elásticas y resistentes por el método de Chamis.

Para la fabricación del Halo con material compuesto se debe tener en cuenta que el material posee comportamiento ortotrópico, ya que las fibras contenidas en la matriz del material están orientadas en un determinado ángulo, por lo que las cargas que actúan sobre la pieza provocarán diferentes reacciones sobre este. Por ello, las láminas compuestas se orientarán en distintos ángulos para que el material obtenga un comportamiento quasi-isotrópico y, de esta manera, tenga la misma reacción desde todos los ángulos donde se produzcan las fuerzas sobre el Halo.

Dicho lo anterior, se realizará el cálculo utilizando el método de Chamis para hallar las propiedades del material compuesto en las tres direcciones del eje.

En la Tabla III.4 se muestran las propiedades de la fibra de carbono y la resina epoxi por separado.

III. Desarrollo proyecto

Tabla III.4. Propiedades de la fibra de carbono y la resina epoxi.

Fibra de carbono		Epoxi	
E_{f11} (MPa)	379 212	E_m (MPa)	3500
E_{f22} (MPa)	62 053	ν_m	0,35
ν_{f12}	0,2	G_m (MPa)	1296,3
ν_{f23}	0,25	χ_{mT} (MPa)	55
G_{f12} (MPa)	75 842	χ_{mC} (MPa)	103
G_{f23} (MPa)	48 263	S_m (MPa)	55
χ_{fT} (MPa)	2500	ρ_m (kg/m ³)	1200
χ_{fC} (MPa)	1500	V_f	0,7
ρ_f (kg/m ³)	1700		

Al considerar la matriz de resina epoxi como un material con comportamiento isotrópico, conociendo ν_m y E_m se puede utilizar la siguiente ecuación:

$$G_m = \frac{E_m}{2 \cdot (1 + \nu_m)} = 1296,3 \text{ MPa}$$

Obtenidas las propiedades mecánicas de la fibra de carbono y la resina epoxi se procede a calcular las constantes elásticas y resistentes del material compuesto.

Para proceder al estudio de las propiedades del material compuesto de fibra de carbono con epoxi se calculará primero E_1 mediante la ecuación de la regla de las mezclas. Para ello, se realizará el cálculo con un volumen de 70% de fibra y un 30% de matriz.

$$E_1 = E_{f11} \cdot V_f + E_m \cdot (1 - V_f) = 266 498 \text{ MPa}$$

Para el cálculo de E_2 se aplicará la siguiente fórmula:

$$E_2 = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f} \cdot \left(1 - \frac{E_m}{E_{f22}}\right)} = 16 625 \text{ MPa}$$

Como $E_2 = E_3$, $E_3 = 16 625 \text{ MPa}$

El siguiente cálculo corresponde a ν_{12} , que se realizará con la siguiente ecuación:

III. Desarrollo proyecto

$$v_{12} = v_{f12} \cdot V_f + v_m \cdot (1 - V_f) = 0,245$$

$$v_{12} = v_{13}$$

Para calcular v_{23} se utiliza la siguiente fórmula:

$$v_{23} = V_f \cdot v_{f23} + V_m \cdot \left(2 \cdot v_m - \frac{v_{12}}{E_{11}} \cdot E_{22} \right) = 0,38$$

Conocidos los módulos elásticos y los coeficientes de Poisson, se debe hallar los módulos de cizalladura:

$$G_{12} = \frac{G_m}{1 - \sqrt{V_f} \cdot \left(1 - \frac{G_m}{G_{f12}} \right)} = 7297,3 \text{ MPa}$$

$$G_{12} = G_{13}$$

$$G_{23} = \frac{G_m}{1 - V_f \cdot \left(1 - \frac{G_m}{G_{f23}} \right)} = 4066,2 \text{ MPa}$$

Una vez calculadas las constantes elásticas del material compuesto, se procede a determinar los valores de las constantes resistentes. Para ello, primero se calculará la tensión de rotura a tracción en las dos direcciones:

$$X_T = V_f \cdot X_{fT} = 1750 \text{ MPa}$$

$$Y_T = X_{mT} \cdot \left[1 - \left(\sqrt{V_f} - V_f \right) \cdot \left(1 - \frac{E_m}{E_{f22}} \right) \right] = 47,9 \text{ MPa}$$

El siguiente cálculo es la tensión de rotura a compresión en las dos direcciones y la tensión de rotura de cizalladura S_c :

$$X_C = V_f \cdot X_{fC} = 1050 \text{ MPa}$$

$$Y_C = X_{mC} \cdot \left[1 - \left(\sqrt{V_f} - V_f \right) \cdot \left(1 - \frac{E_m}{E_{f22}} \right) \right] = 89,7 \text{ MPa}$$

$$S_c = S_m \cdot \left[1 - \left(\sqrt{V_f} - V_f \right) \cdot \left(1 - \frac{G_m}{G_{f12}} \right) \right] = 47,6 \text{ MPa}$$

III. Desarrollo proyecto

Finalmente, conocidas las densidades de la fibra como de la resina y el volumen de cada una de ellas, se procede a calcular la densidad del material compuesto de fibra de carbono y resina epoxi.

$$\rho = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot (1 - V_f) = 1550 \frac{kg}{m^3}$$

Realizados los cálculos de las constantes elásticas y resistentes del material compuesto, los resultados se plasmarán en la Tabla III.5:

Tabla III.5. Propiedades mecánicas de CF-EP.

Constantes elásticas		Constantes resistentes	
E ₁ (MPa)	266 498	X _T (MPa)	1750
E ₂ (MPa)	16 625	Y _T (MPa)	47,9
E ₃ (MPa)	16 625	X _C (MPa)	1050
ν ₁₂	0,245	Y _C (MPa)	89,7
ν ₁₃	0,245	S _c (MPa)	47,6
ν ₂₃	0,380	ρ (kg/m ³)	1550
G ₁₂ (MPa)	7297,3		
G ₁₃ (MPa)	7297,3		
G ₂₃ (MPa)	4066,2		

III.2.2.1. Propiedades mecánicas del material compuesto mediante el programa eLamX.

Al introducir en SolidWorks las constantes ingenieriles obtenidas e indicar que es un material ortotrópico, el programa no ha podido realizar los cálculos. Aunque, en apariencia, la pieza tiene un aspecto sencillo, posee zonas redondeadas y una forma compleja lo que dificulta la resolución de las tensiones.

Por esta razón, se va a calcular la pieza como si fuese un material isotrópico, por lo que los resultados que se obtendrán tendrán solo un valor estimativo. Si se quisiese resolver, de una manera más precisa, las tensiones producidas en un material ortotrópico de las características del Halo, serían necesarios otros programas informáticos más potentes que pudiesen realizar unos cálculos más complejos.

III. Desarrollo proyecto

Para poder realizar el análisis tensional de la pieza se utilizará el programa informático eLamX y se considerará, de manera hipotética, que el material reaccionará a las cargas aplicadas por igual en cualquier dirección. De esta manera, se podrá conocer el módulo elástico, el cortante y el coeficiente de Poisson.

En eLamX se elige un material con 70% de carbono y con matriz de resina epoxi y se selecciona "Import". Con esta acción se carga el material de la base de datos.

Name	Fibre...	Fibre...	Matri...	Matri...	▼ Fib...	Type
G-'Scotchply' EP-'1009-26-5901'	G	Scotc...	EP	1009-...	72,0	UD
C-'(HM)' EP-'1'	C	(HM)	EP	-	70,0	UD
C-'T300' EP-'5208'	C	T300	EP	5208	70,0	UD
C-'T300' EP-'1'	C	T300	EP	-	70,0	UD
C-'AS4' EP-'1'	C	AS4	EP	-	66,0	UD

Material Data	
Fibre Type	C
Fibre Name	T300
Matrix Type	EP
Matrix Name	5208
Fiber volume fraction	70,0
Type	UD

Figura III.19. Selección del material en eLamX.

A continuación, se definen los ángulos de las fibras en el material compuesto. Para ello, la orientación de las fibras será $[45/-45/90/0/45/-45/90/0]_s$ para garantizar el comportamiento quasi-isotrópico que se busca en la pieza.

...	Name	Angle	Thickness	Material	Failure Criterion
1	New Layer	45,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
2	New Layer	-45,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
3	New Layer	90,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
4	New Layer	0,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
5	New Layer	45,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
6	New Layer	-45,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
7	New Layer	90,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
8	New Layer	0,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
9	New Layer	0,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
10	New Layer	90,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
11	New Layer	-45,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
12	New Layer	45,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
13	New Layer	0,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
14	New Layer	90,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
15	New Layer	-45,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu
16	New Layer	45,0	0,29	C-'T300' EP-'5208'	TsaiWu

Figura III.20. Definición del espesor, número de láminas y orientación de las fibras.

III. Desarrollo proyecto

Seleccionando con el botón derecho del ratón sobre “New Laminate” se cliquea en “Engineering Constant” y así se obtienen las características elásticas del material compuesto.

		without Poisson		with Poisson	
		Membrane	Flexural	Membrane	Flexural
E_x	=	75714,8	62324,2	69020,7	50030,2
E_y	=	75714,8	74329,6	69020,7	59782,7
G_{xy}	=	26600,8	33988,6	26600,8	33474,3
ν_{xy}	=	-	-	0,297	0,396
ν_{yx}	=	-	-	0,297	0,474

Figura III.21. Obtención de las constantes ingenieriles del material con eLamX.

Una vez creado el material con el programa eLamX, se debe comprobar que este posee un comportamiento quasi-isotrópico. En “New Laminate” y con botón derecho del ratón, se selecciona “Polart Chart”.

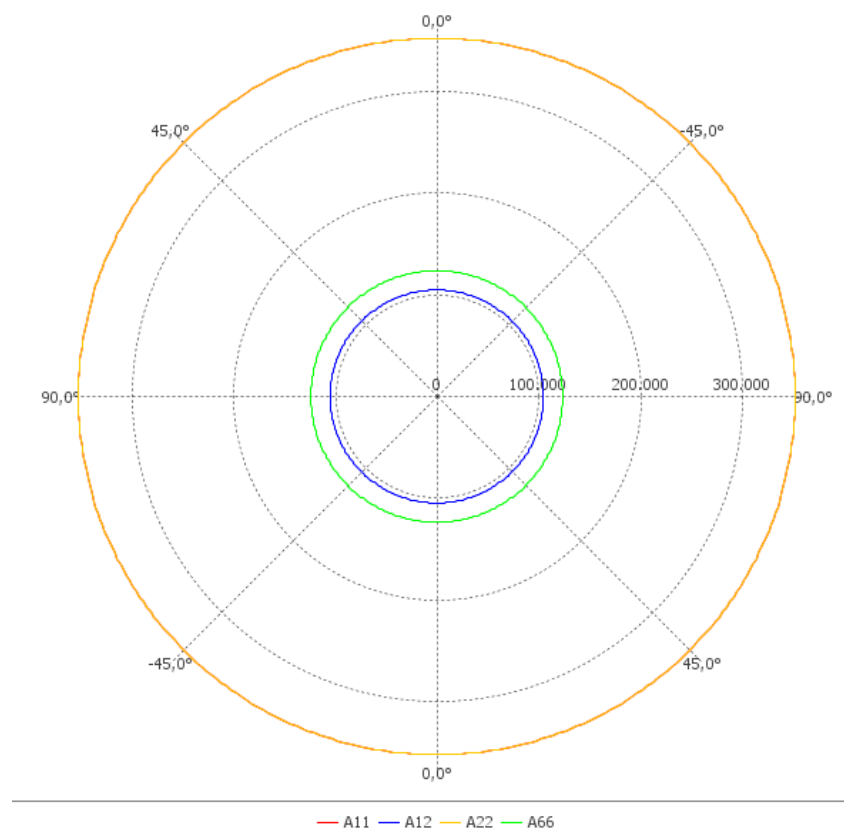


Figura III.22. Gráfico polar de CF-EP.

III. Desarrollo proyecto

En el gráfico polar de la figura anterior se puede ver que el material se comporta por igual en todas las direcciones.

Para hallar las constantes resistentes del material se utilizarán los valores necesarios de la Tabla III.4. Para comenzar, con la ecuación de la fuerza de rotura del compuesto, se llega a la tensión de rotura mediante el siguiente planteamiento:

$$F_c = F_m + F_f \Rightarrow \sigma_c A_c = \sigma_m A_m + \sigma_f A_f \Rightarrow \sigma_c = \sigma_m(1 - V_f) + \sigma_f V_f$$

Primero se va a conocer la tensión de rotura a tracción del compuesto.

Como $\sigma_m = X_{mT} = 55 \text{ MPa}$, $\sigma_f = X_{fT} = 2500 \text{ MPa}$ y $V_f = 0,7$

$$X_{cT} = X_{mT}(1 - V_f) + X_{fT}V_f = 1766,5 \text{ MPa}$$

Ahora se calcula la tensión de rotura a compresión.

Como $\sigma_m = X_{mC} = 103 \text{ MPa}$, $\sigma_f = X_{fC} = 1500 \text{ MPa}$ y $V_f = 0,7$

$$X_{cC} = X_{mC}(1 - V_f) + X_{fC}V_f = 1080,9 \text{ MPa}$$

Conocida la tensión de rotura a tracción, se halla el límite elástico de CF-EP considerándolo un 10% menos para darle un margen de seguridad antes de la rotura.

$$\sigma_e = 0,9 \cdot X_{cT} = 1589,9 \text{ MPa}$$

Para conocer la densidad del material compuesto formado por fibra de carbono con resina epoxi se utilizará la siguiente fórmula:

$$\rho = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot (1 - V_f)$$

En este caso, $V_f = 0,63$

$$\rho = \rho_f \cdot V_f + \rho_m \cdot (1 - V_f) = 1550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Realizados los cálculos anteriores, se obtienen las características mecánicas del material compuesto como si fuera isotrópico y se pondrán en SolidWorks para analizar la pieza. Como se dijo anteriormente, los resultados obtenidos sobre las tensiones de

III. Desarrollo proyecto

tracción y compresión solo son estimaciones para poder realizar el cálculo de los test en SolidWorks.

Tabla III.6. Propiedades mecánicas de CF-EP que se introducirán en SolidWorks.

E (MPa)	69 021
G (MPa)	26 601
ν	0,297
χ_{cT} (MPa)	1766,5
χ_{cC} (MPa)	1080,9
σ_e (MPa)	1589,9
ρ (kg/m ³)	1550

III. Desarrollo proyecto

III. Desarrollo proyecto

III.3. ESTUDIO ESTÁTICO DEL HALO CON SOLIDWORKS.

Según la norma FIA Standard 8869-2018, el Halo será sometido a dos test con una carga resultante de 125 kN para ambos. Estas dos pruebas se realizarán por igual tanto al titanio como al acero y también se efectuará al material compuesto de fibra de carbono con resina epoxi para verificar si puede superar los test y así poder emplearlo en Fórmula 1. El material compuesto, si cumpliera con los parámetros que indica la norma, reduciría, de manera interesante, el peso total del vehículo, aumentando la velocidad del vehículo, mermando el consumo de combustible y disminuyendo el desgaste de las gomas de las ruedas debido a la fricción con el asfalto de la pista.

Para realizar los dos test, el Halo debe de estar apoyado sobre una mesa horizontal de superficie rígida y fijado por la parte delantera y trasera a esta para que, cuando se aplique la carga, la estructura no se deslice por la superficie del banco de prueba. La fuerza, aplicada por una prensa, se administrará mediante una almohadilla de 150 mm de diámetro sobre el Halo, de manera que se distribuya la carga de manera homogénea por la superficie de contacto.

Para el Test 1, la carga se descompondrá en una fuerza de 116 kN y otra de 46 kN y se aplicará en la parte frontal de la pieza. La primera fuerza será descendente y la segunda tendrá dirección horizontal y sentido hacia los soportes traseros. Aplicada la carga, la pieza no deberá romper y su deformación no podrá exceder 17,5 mm.

En el Test 2 la carga se aplicará de manera horizontal sobre el aro principal y estará compuesta por una fuerza de 83 kN con sentido a los soportes traseros y otra fuerza de 93 kN hacia el interior del Halo. En este caso, a diferencia del test anterior, la pieza finalmente deberá romper pero no deberá sobrepasar los 100 mm de deformación al concluir la prueba.

III. Desarrollo proyecto

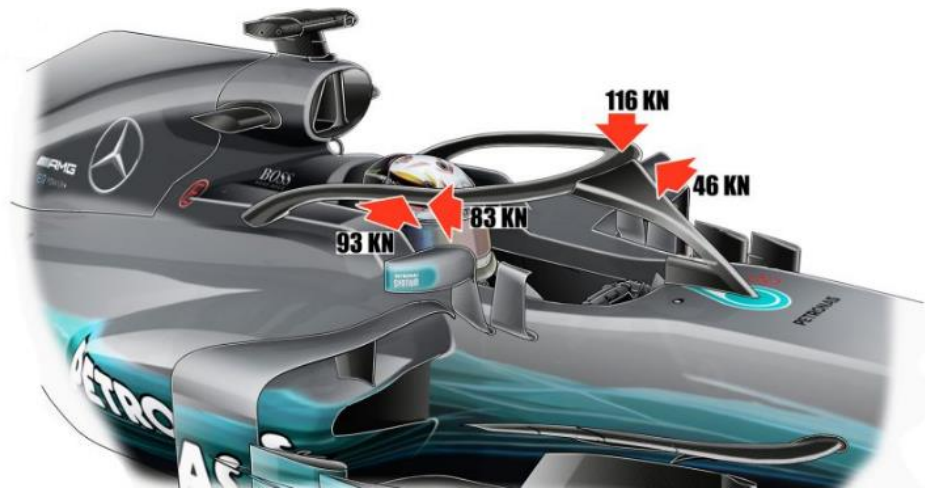


Figura III.23. Distribución de fuerzas sobre el Halo para realizar los test [14].

III.3.1. Definición de la superficie de aplicación de las cargas sobre el Halo.

Lo primero que se debe hacer es definir las zonas donde se van a aplicar las fuerzas sobre el Halo. Para dibujar la zona de aplicación de la fuerza para el Test 1, se crea el Plano 2 y sobre él se dibuja un círculo de 150 mm de diámetro cuyo centro se encuentra a 190 mm desde la parte de apoyo delantero y a 170 mm de altura.

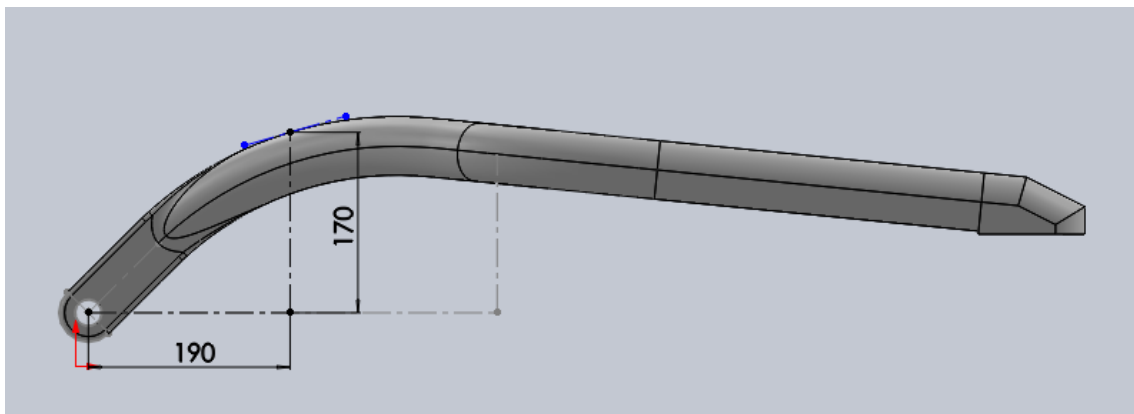


Figura III.24. Centro de la aplicación de la carga en el Test 1.

Dibujado en el Plano 2 el círculo, se proyecta este en la parte frontal de la pieza, donde la carga se aplicará por la superficie delimitada. Para proyectar el círculo, en el

III. Desarrollo proyecto

menú principal se escoge "Insertar", "Curva" y se selecciona "Línea de partición", donde se define el croquis y la superficie donde se va a proyectar.

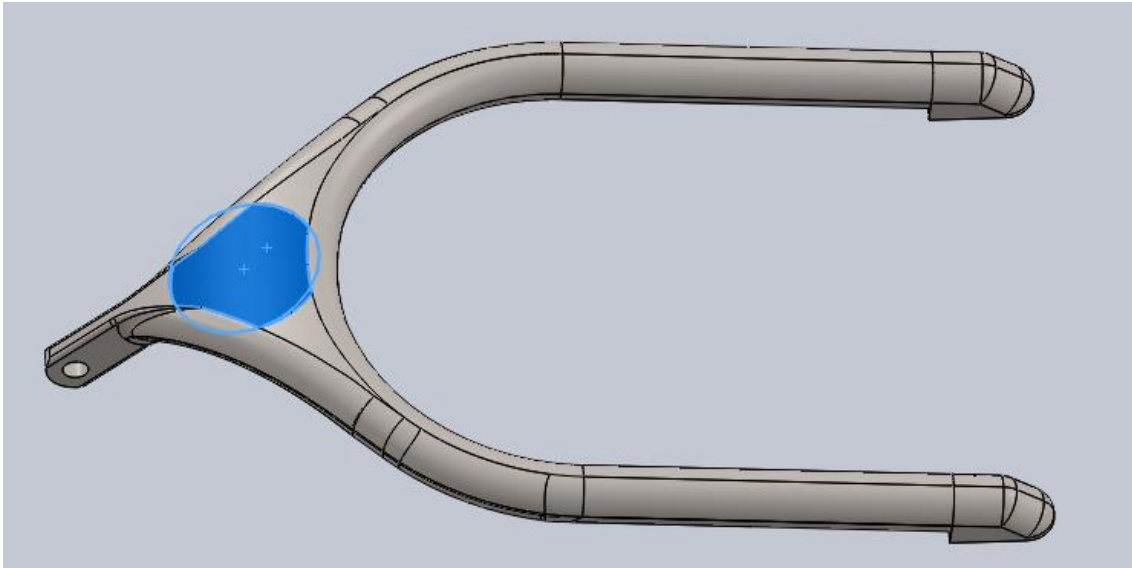


Figura III.25. Zona de aplicación de la carga en el Test 1.

Para proyectar la zona del Test 2, se crea el Plano 5 y sobre él se dibuja un círculo de 150 mm de diámetro a 385 mm de la parte del apoyo delantero y a 150 mm de altura.

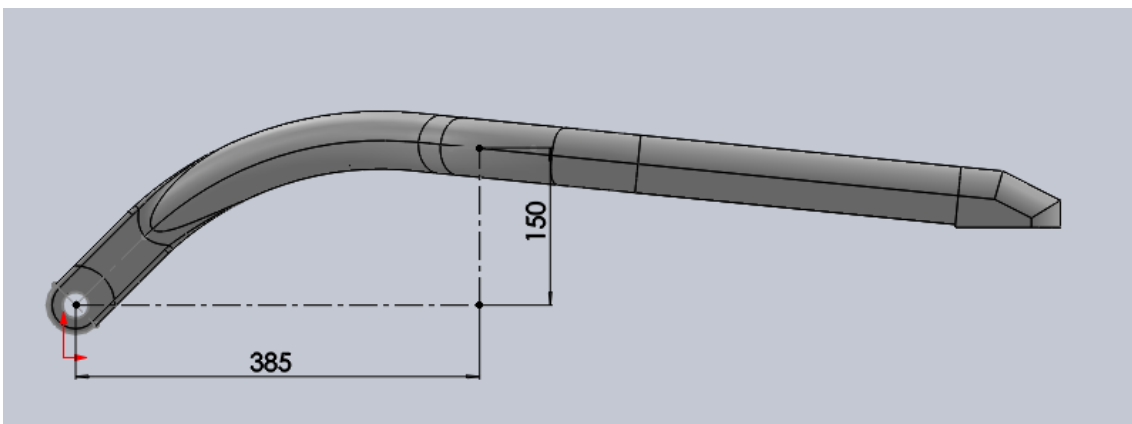


Figura III.26. Centro de la aplicación de la carga en el Test 2.

Para realizar la proyección del círculo sobre el aro principal, se deben seguir los mismos pasos que en el Test 1. Realizada la "Línea de partición", se obtiene la zona sobre la que la carga se aplicará sobre la pieza.

III. Desarrollo proyecto

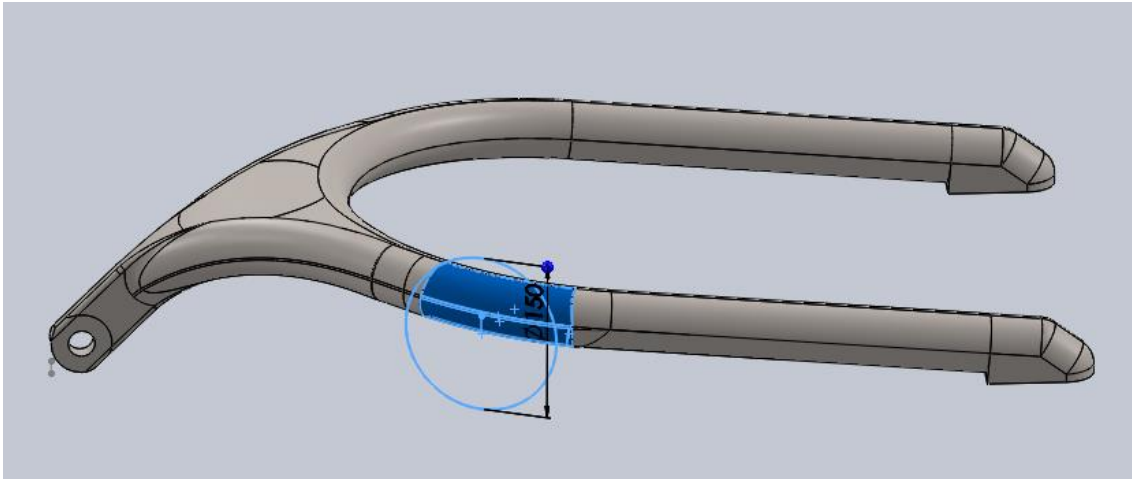


Figura III.27. Zona de aplicación de la carga en el Test 2.

Una vez delimitadas las zonas donde se aplicarán las cargas se puede realizar la simulación con el programa SolidWorks seleccionando en la Barra de Herramientas “Simulation”.

III.3.2. Creación del análisis estático de la pieza.

En “Simulation”, se selecciona “Nuevo estudio” para comenzar con el análisis.

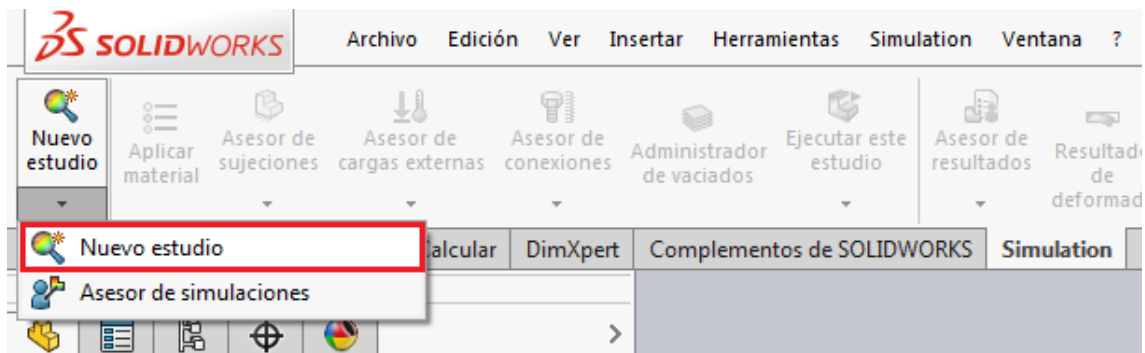


Figura III.28. Selección de la opción “Nuevo estudio”.

III. Desarrollo proyecto

A continuación se selecciona “Análisis estático”.

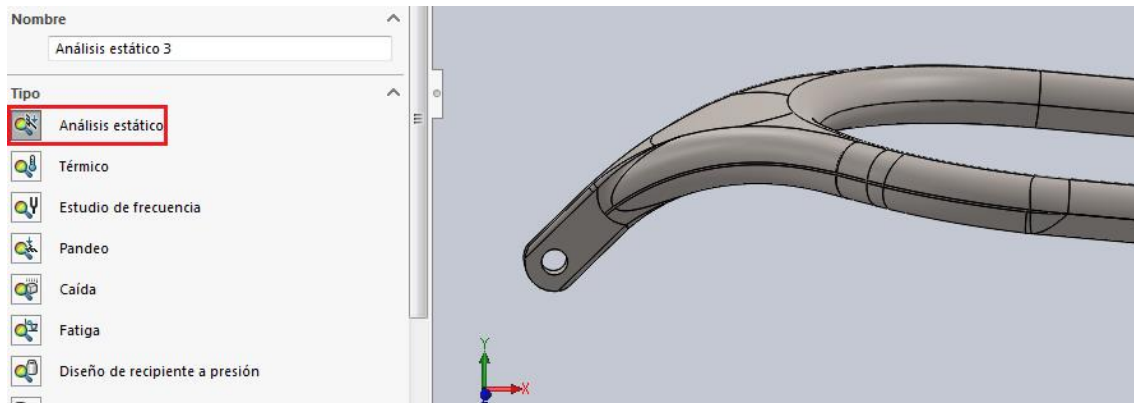


Figura III.29. Selección de “Análisis estático”.

Se abre una ventana en la parte inferior izquierda en la que se debe rellenar los datos necesarios para que se pueda realizar el ensayo.

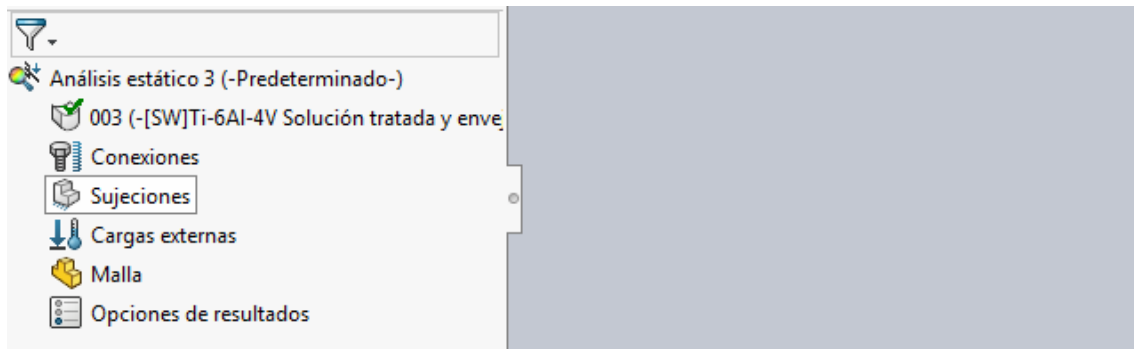


Figura III.30. Menú para realizar el estudio estático.

Seleccionado el material del que va a estar compuesta la pieza, se definen las zonas donde el Halo va a estar sujeto en la mesa de pruebas. El Halo estará inmóvil por la parte delantera y en los soportes traseros. Se seleccionará como “geometría fija” en “Sujeciones” y se elegirán todas las caras o superficies sobre las que se aplicarán las fijaciones.

III. Desarrollo proyecto

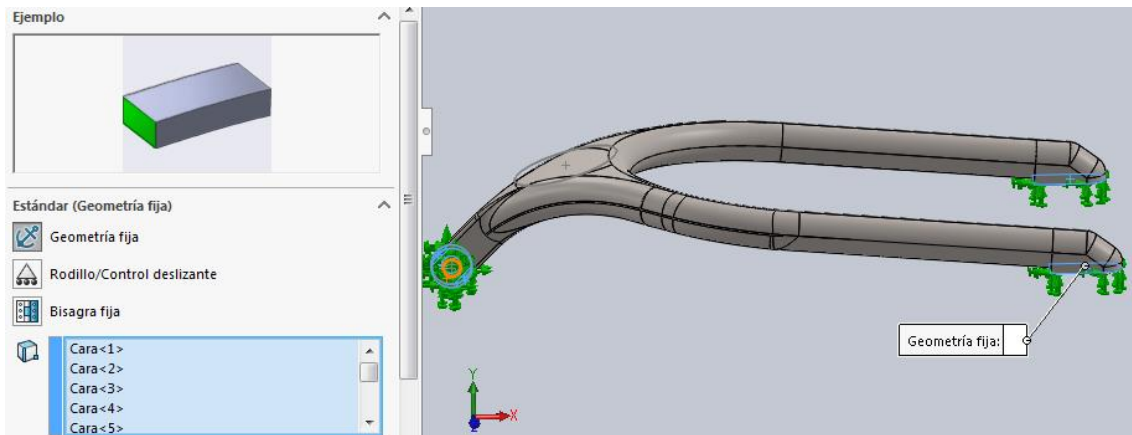


Figura III.31. Selección geometría fija.

Se descompone la carga de 125 kN en las direcciones x , y , z de la pieza para la realización del Test 1.

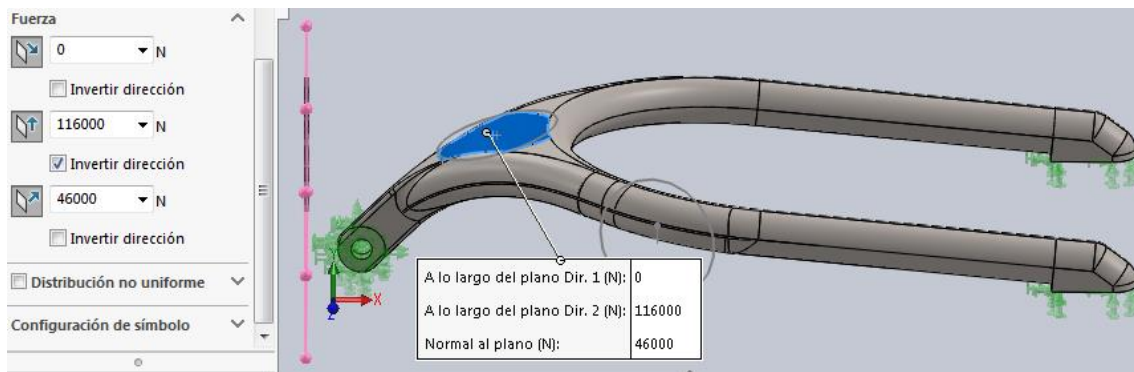


Figura III.32. Valores de la carga sobre los tres ejes que actúan en la pieza para el Test 1.

Y lo mismo para el Test 2.

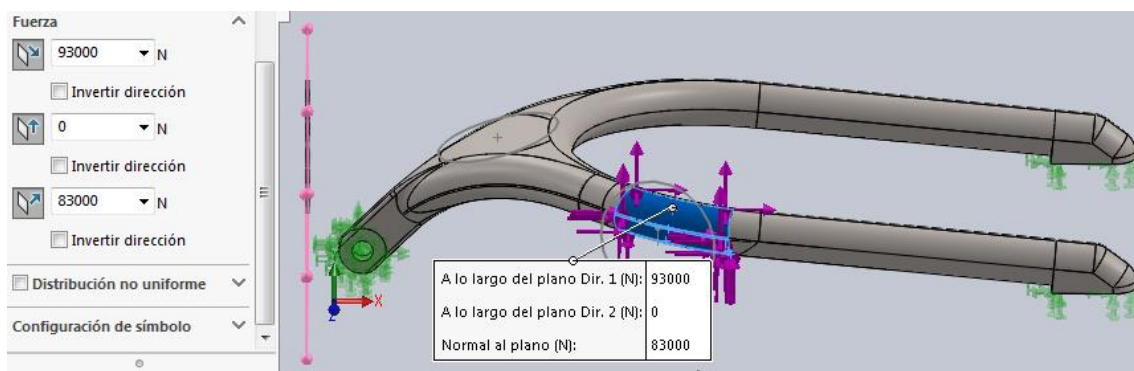


Figura III.33. Valores de la carga sobre los tres ejes que actúan en la pieza para el Test 2.

III. Desarrollo proyecto

Para poder realizar el cálculo y conocer las tensiones generadas en la pieza por las diferentes cargas, se debe realizar un mallado presionando el botón derecho del ratón y seleccionado “Crear malla...”. Esta acción realiza cálculos más pequeños por elementos, dividiendo la pieza en pequeñas secciones. Cuanto más fino sea el mallado más preciso será el cálculo de las tensiones.

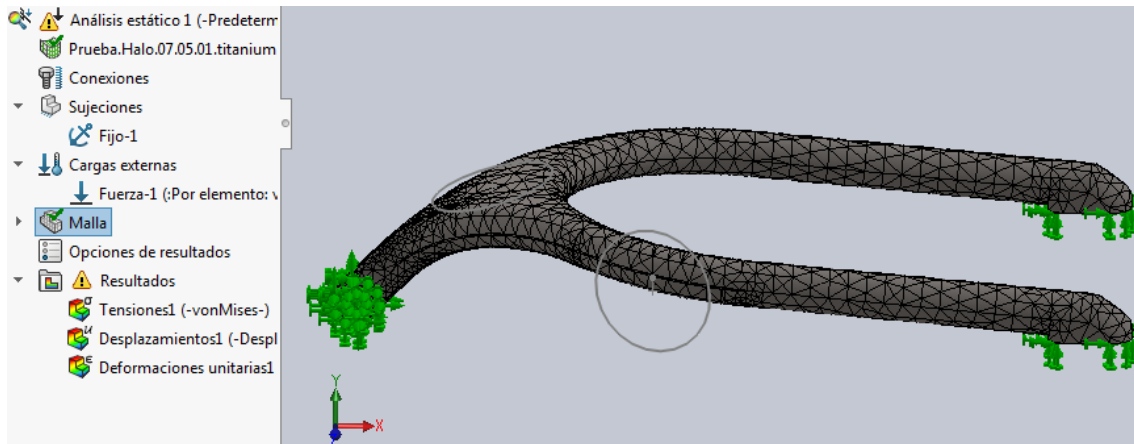


Figura III.34. Mallado de la pieza.

Realizados los pasos anteriores ya se puede hallar los resultados finales. En el menú principal, se selecciona “Ejecutar este estudio” y se ejecuta “Ejecutar este estudio”.

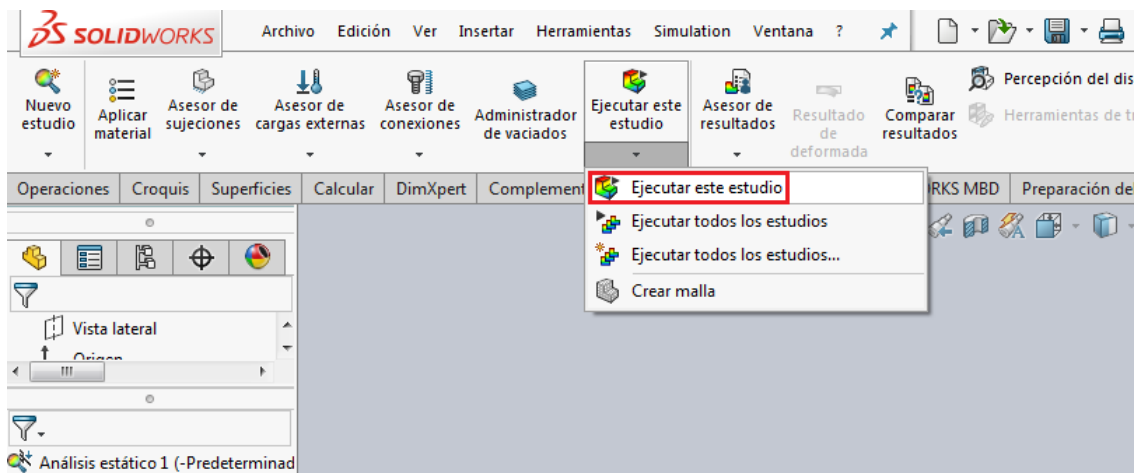


Figura III.35. Ejecutar el estudio.

III. Desarrollo proyecto

III. Desarrollo proyecto

III.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTÁTICO.

En este punto se van a exponer los resultados obtenidos con SolidWorks, mostrándose las tensiones que se generan al realizar los dos test y si estas sobrepasan el límite elástico de los diferentes materiales y las deformaciones estructurales.

III.4.1. Resultados obtenidos con Ti-6Al-4V.

III.4.1.1. Resultados realizando el Test 1.

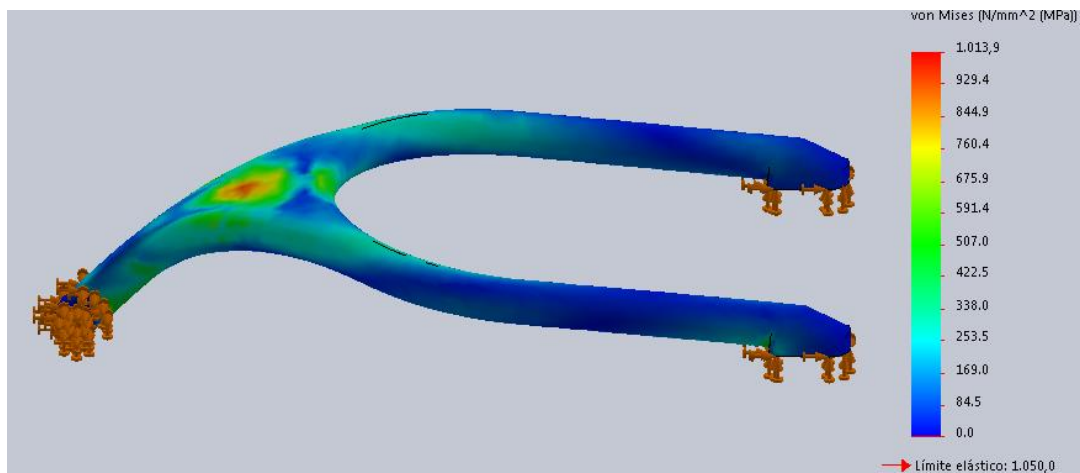


Figura III.36. Tensiones generadas con Ti-6Al-4V en el Test 1.

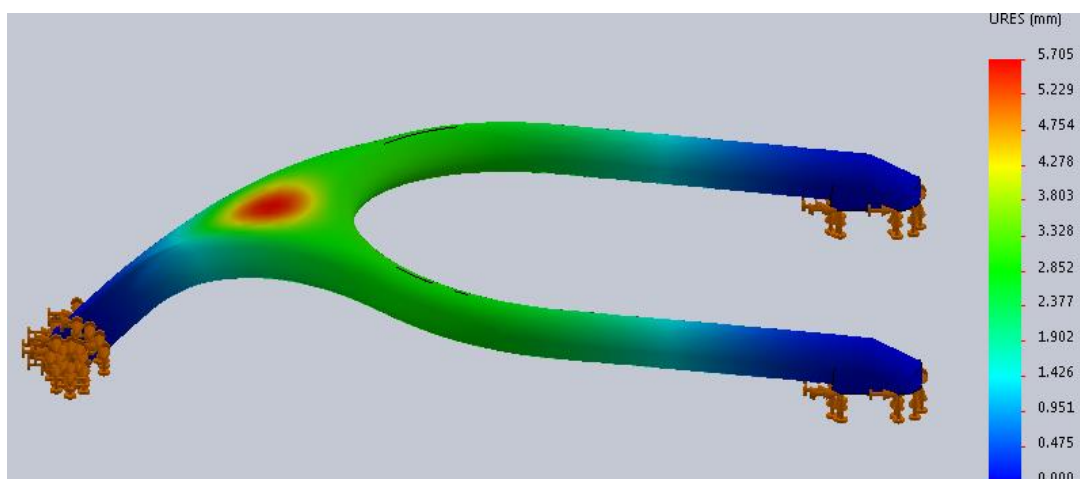


Figura III.37. Deformaciones generadas con Ti-6Al-4V en el Test 1.

III. Desarrollo proyecto

III.4.1.2. Resultados realizando el Test 2.

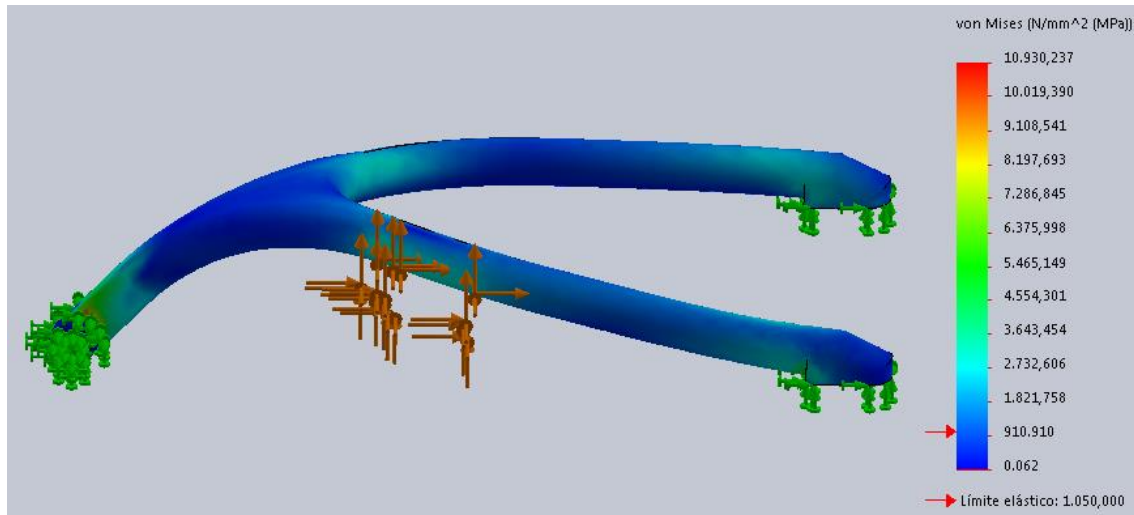


Figura III.38. Tensiones generadas con Ti-6Al-4V en el Test 2.

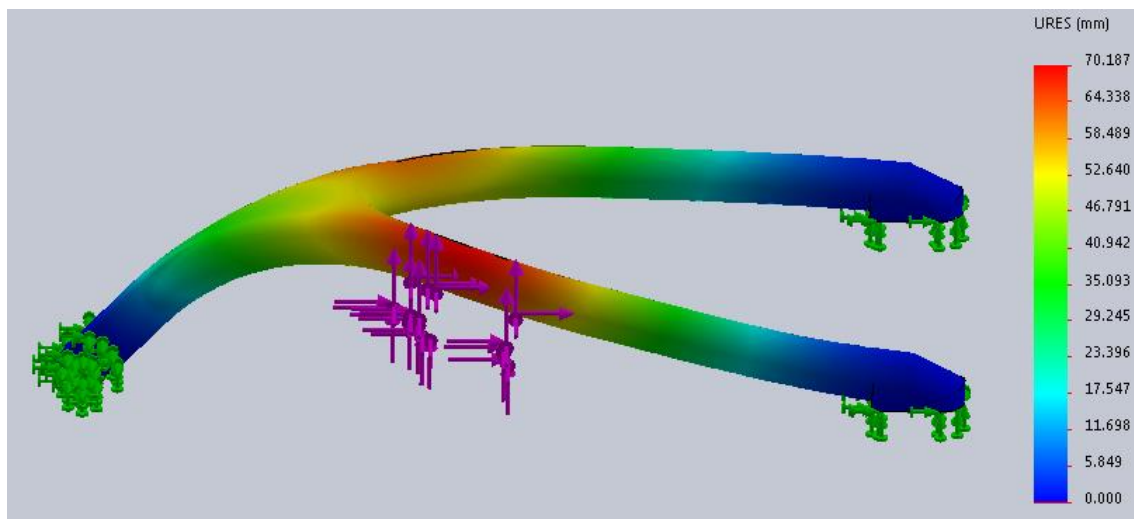


Figura III.39. Deformaciones generadas con Ti-6Al-4V en el Test 2.

Como se puede ver en las figuras anteriores, se han plasmado los resultados obtenidos mediante SolidWorks. Con ellos se puede observar como el material se comporta ante las tensiones producidas por la prensa y si, además, cumple con las especificaciones indicadas por la FIA para que el Halo se considere apto para su uso en competición.

III. Desarrollo proyecto

Como indica la norma Standard 8869-2018, al realizar el Test 1, la pieza no debe fracturarse ante las cargas sino que, además, la deformación producida no debe exceder los 17,5 mm.

Según los resultados obtenidos, la tensión máxima generada no solo no romperá el material de la estructura, sino que no sobrepasa el σ_e , por lo que el material se encuentra en el rango elástico y no se deformará plásticamente, lo cual garantiza la integridad física del objeto de estudio. Además, la deformación que se produce es de 5,705 mm, cuando el máximo permitido no debe ser mayor de 17,5 mm. Por todo esto, el material Ti-6Al-4V cumple con el Test 1.

En el Test 2, el Halo debe romper y su deformación no debe superar los 100 mm, por lo que esta prueba la cumple, ya que la deformación máxima producida por las cargas es de 70,187 mm, por lo que el material cumple con el Test 2.

Por lo comentado anteriormente, el Halo fabricado con la aleación de titanio Ti-6Al-4V cumple con la norma de la FIA.

Tabla III.7. Comparación entre norma FIA y resultados obtenidos con Ti-6Al-4V.

	Según norma FIA	Según SolidWorks	¿Cumple la norma?
Test 1			
Tensión	No debe romper Halo	No rompe Halo	Sí
Def. max. (mm)	17,5	5,705	
Test 2			
Tensión	Debe romper Halo	Sí rompe Halo	Sí
Def. max. (mm)	100	70,187	

III. Desarrollo proyecto

III.4.2. Resultados obtenidos con AerMet 100.

III.4.2.1. Resultados realizando el Test 1.

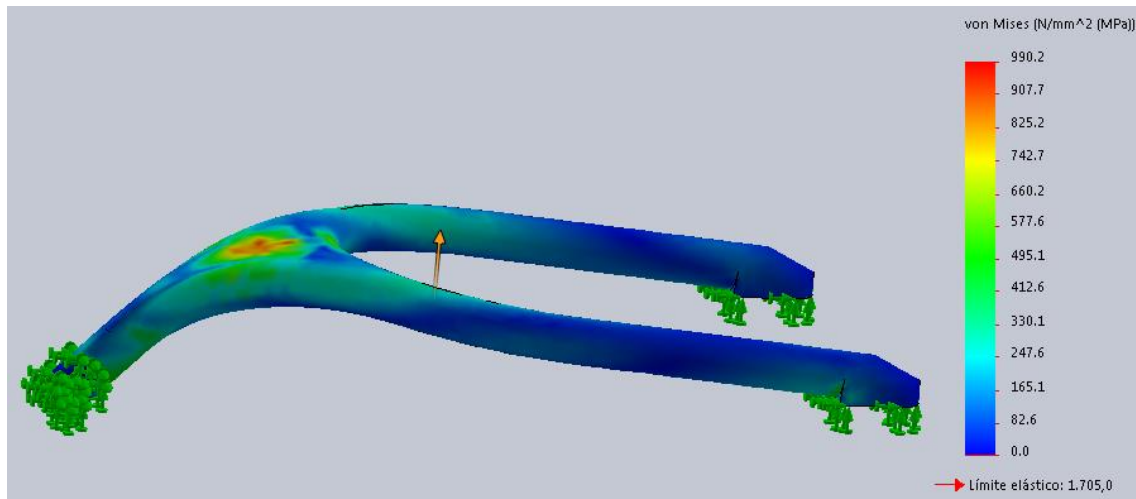


Figura III.40. Tensiones generadas con AerMet 100 en el Test 1.

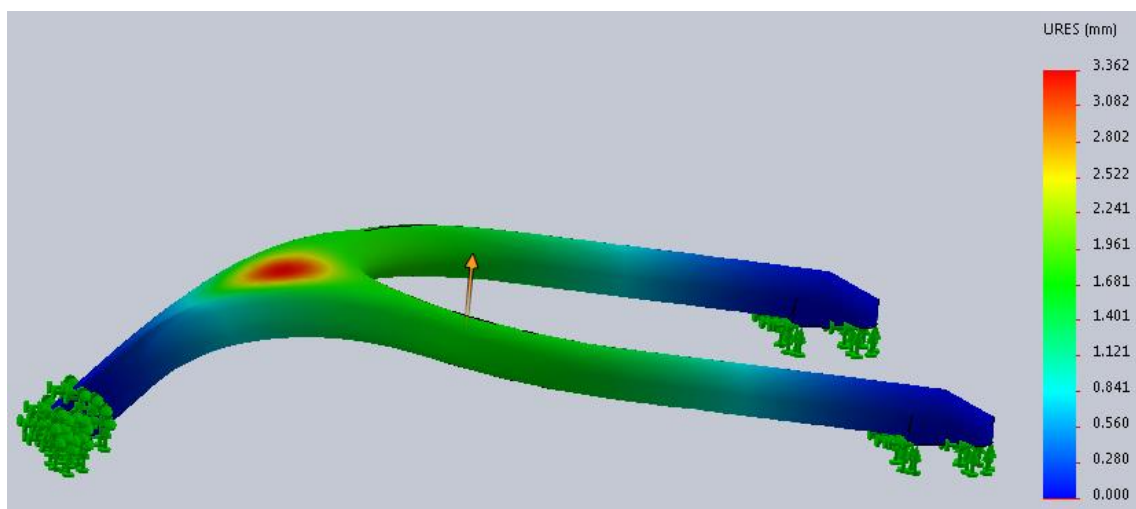


Figura III.41. Deformaciones generadas con AerMet 100 en el Test 1.

III. Desarrollo proyecto

III.4.2.2. Resultados realizando el Test 2.

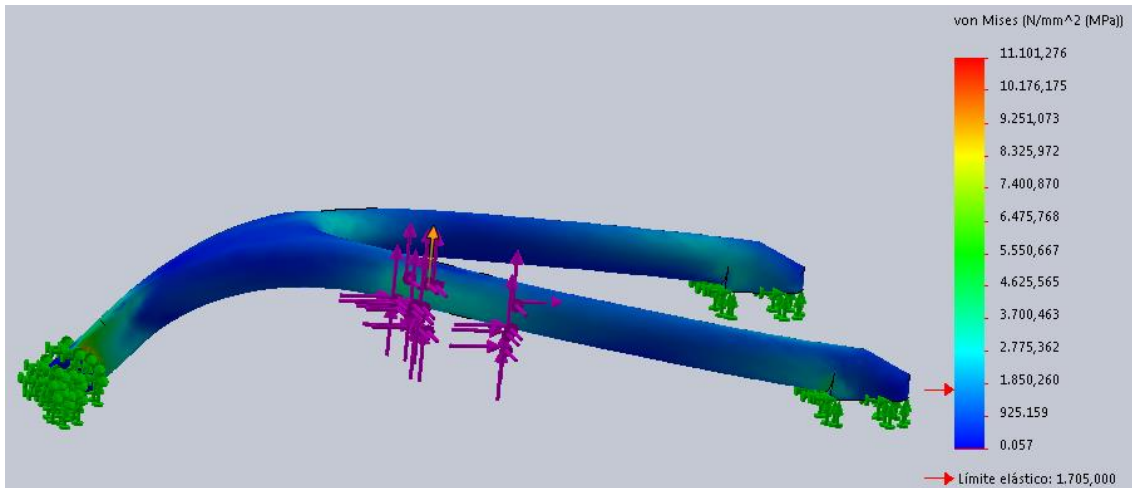


Figura III.42. Tensiones generadas con AerMet 100 en el Test 2.

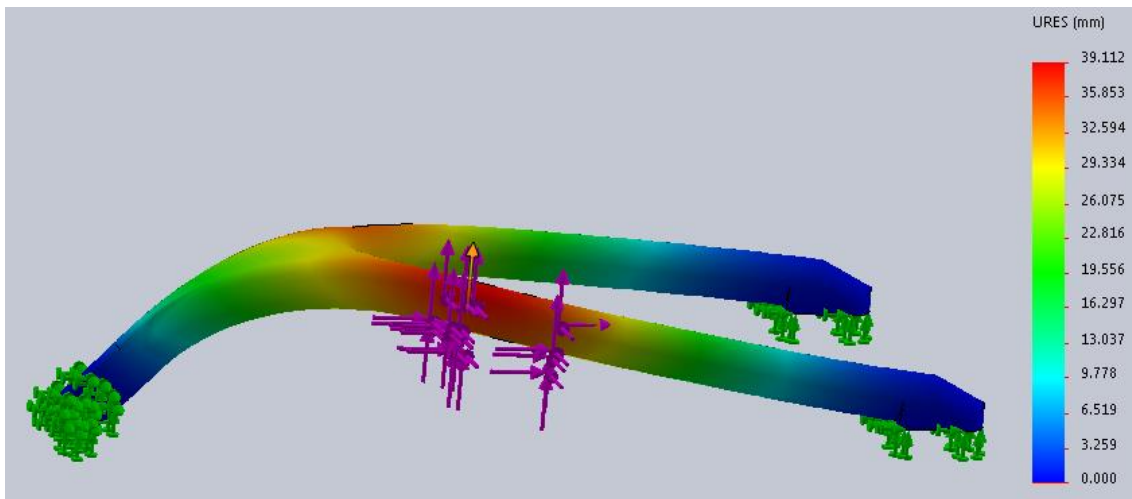


Figura III.43. Deformaciones generadas con AerMet 100 en el Test 2.

Al igual que con el material de titanio, en el Test 1 el acero no debe romper y la deformación sufrida no debe exceder los 17,5 mm. Como se muestra en la Figura III.40, se produce una tensión de 990,2 MPa, una tensión que está por debajo de σ_e de la aleación AerMet 100, por lo que el material se encuentra en el rango elástico. Como muestra la Figura III.41, la deformación que se produce por las cargas de la prueba es de 3,362 mm.

III. Desarrollo proyecto

En el Test 2, el material debe de romper bajo la fuerza producida por la prensa y la deformación generada no debe ser mayor de 100 mm. La deformación que se produce es de 39,112 mm, por lo que cumple con las especificaciones.

Tabla III.8. Comparación entre norma FIA y resultados obtenidos con AerMet 100.

	Según norma FIA	Según SolidWorks	¿Cumple la norma?
Test 1			
Tensión	No debe romper Halo	No rompe Halo	Sí
Def. max. (mm)	17,5	3,362	
Test 2			
Tensión	Debe romper Halo	Sí rompe Halo	Sí
Def. max. (mm)	100	39,112	

Para la realización del análisis de los test en titanio y acero se han mantenido las mismas medidas y espesores para poder evaluar ambos materiales con las mismas condiciones. El cálculo de CF-EP se va realizar también con las mismas medidas, ya que el apto de los dos materiales anteriores indica que el diseño de la pieza es correcto.

III.4.3. Resultados obtenidos con CF-EP.

Como se ha dicho anteriormente, el Halo se fabrica tanto de titanio como de acero. La utilización de un material compuesto es para comprobar si puede cumplir con las especificaciones que marca la norma de la FIA y si podría ser viable el diseño y la fabricación de la pieza con este material.

Una vez calculados las propiedades mecánicas del material considerándolo como ortotrópico y habiendo introducido dichos valores en SolidWorks, el programa no ha podido realizar los cálculos necesarios para la resolución de las tensiones ni las deformaciones generadas en la pieza. Por esta razón, se ha optado por suponer que el material compuesto se comporta como isotrópico, por lo que los resultados que se han obtenido solo tienen carácter orientativo y ofrecen una visión de cómo se puede comportar el material ante las cargas de las dos pruebas.

III. Desarrollo proyecto

III.4.3.1. Resultados obtenidos realizando el Test 1.

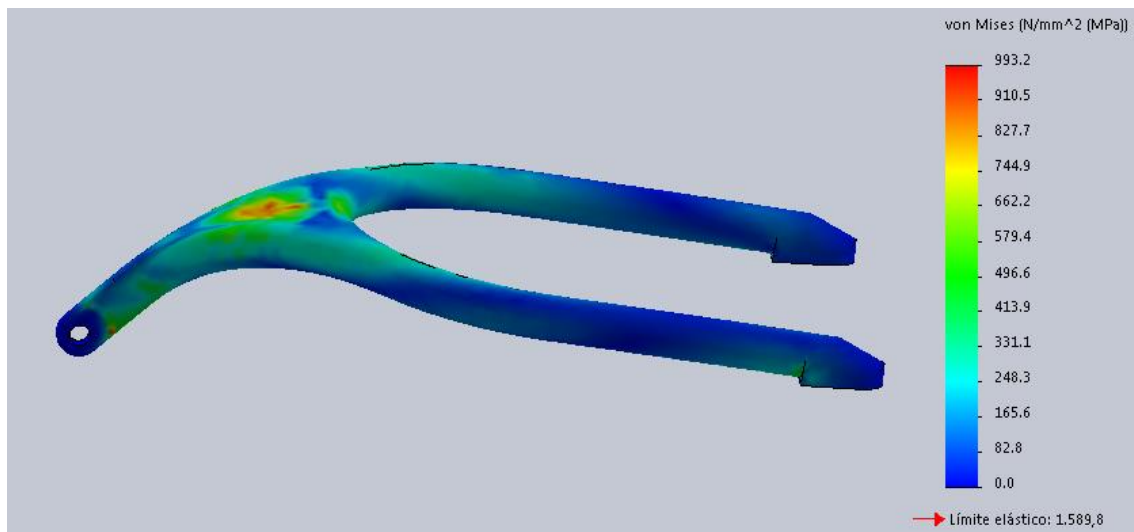


Figura III.44. Tensiones generadas con CF-EP en el Test 1.

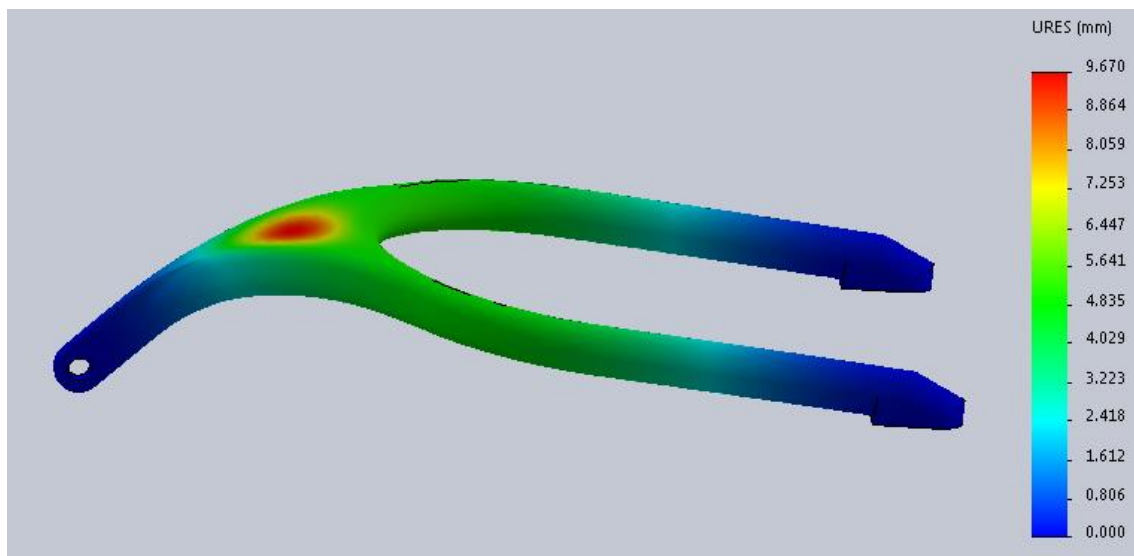


Figura III.45. Deformaciones generadas con CF-EP en el Test 1.

III. Desarrollo proyecto

III.4.3.2. Resultados obtenidos realizando el Test 2.

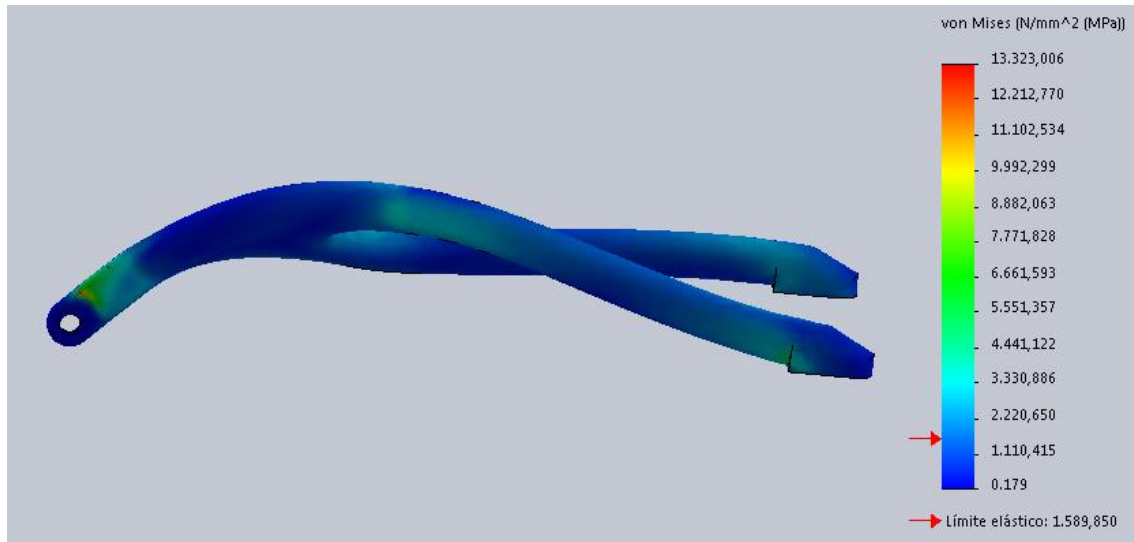


Figura III.46. Tensiones generadas con CF-EP en el Test 2.

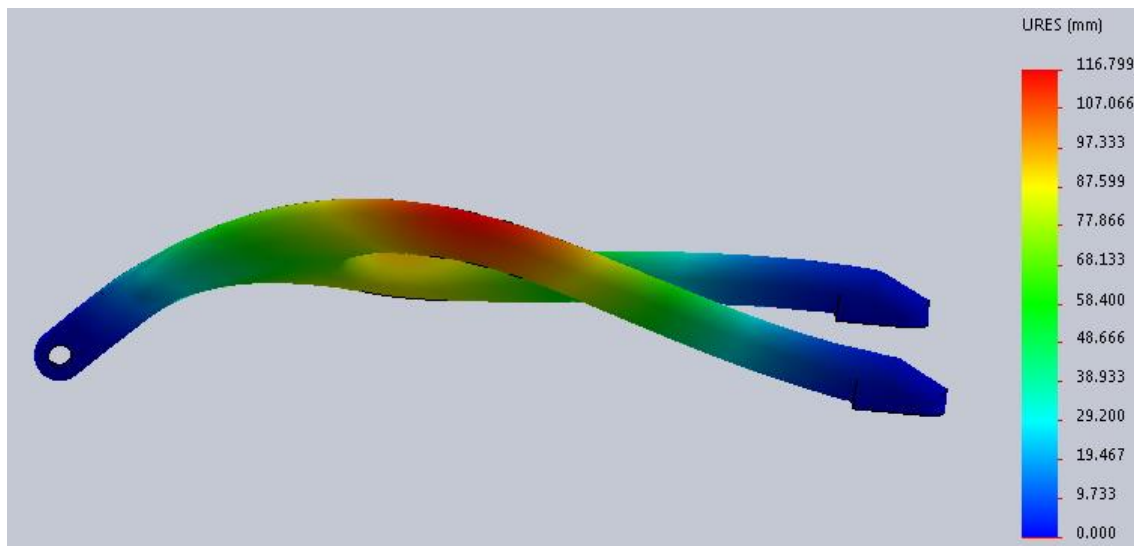


Figura III.47. Deformaciones generadas con CF-EP en el Test 2.

Para la realización de los test con CF-EP se van a considerar las mismas condiciones que marca la FIA para el titanio y para el acero: en el Test 1 el material no debe romper y su deformación no excederá de 17,5 mm y que, en el Test 2, sí debe romper y su deformación no superará los 100 mm. Las zonas de aplicación de las cargas se situarán en los mismos puntos que los materiales anteriores y las áreas donde se aplican serán la proyección de una circunferencia sobre la pieza de 150 mm de

III. Desarrollo proyecto

diámetro cada una. Para considerar apta la pieza de material compuesto se deberá cumplir con los dos test.

Cuando se realiza el Test 1, en el material CF-EP se genera una tensión máxima de 993,2 MPa, un valor inferior al σ_e , por lo que la pieza se encuentra en la zona elástica y no se deformará. En cuanto a la deformación producida es de 9,67 mm, cuando la máxima admisible es de 17,5 mm. Por los resultados obtenidos, el material cumpliría con el Test 1.

Realizado en Test 2, la pieza rompe tras la carga pero su deformación sobrepasa 16,799 mm, por lo que la pieza no cumple con la norma.

Tabla III.9. Comparación entre norma FIA y resultados obtenidos con CF-EP.

	Según norma FIA	Según SolidWorks	¿Cumple la norma?
Test 1			
Tensión	No debe romper Halo	No rompe Halo	Sí
Def. max. (mm)	17,5	9,67	
Test 2			
Tensión	Debe romper Halo	Sí rompe Halo	No
Def. max. (mm)	100	116,799	

Como el material compuesto CF-EP no cumple con el Test 2, el Halo no es apto. Por esta razón, hay que redimensionar de la pieza y volver a calcular los test hasta que esta cumpla con las especificaciones.

Para superar los test, se tiene que aumentar el espesor inicial de 4,65 mm para reforzar el material ante las cargas producidas por los test. Las otras medidas no se modificarán para no variar las longitudes del Halo. A continuación se muestran los resultados conseguidos tras aumentar el grosor del objeto de estudio.

III. Desarrollo proyecto

III.4.3.3. Resultados obtenidos realizando el Test 1 modificando el espesor inicial.

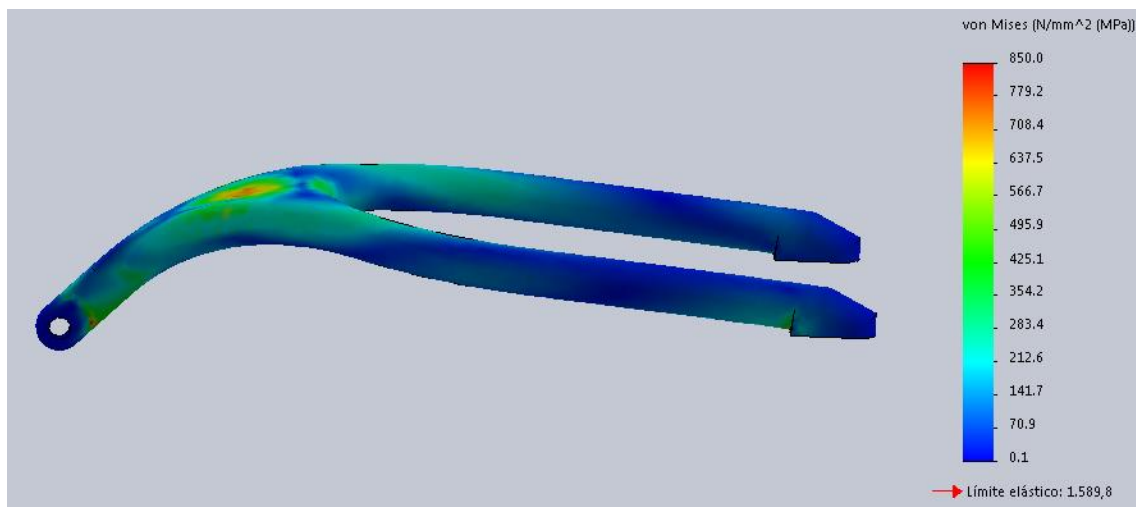


Figura III.48. Tensiones generadas con CF-EP en el Test 1 modificando el espesor.

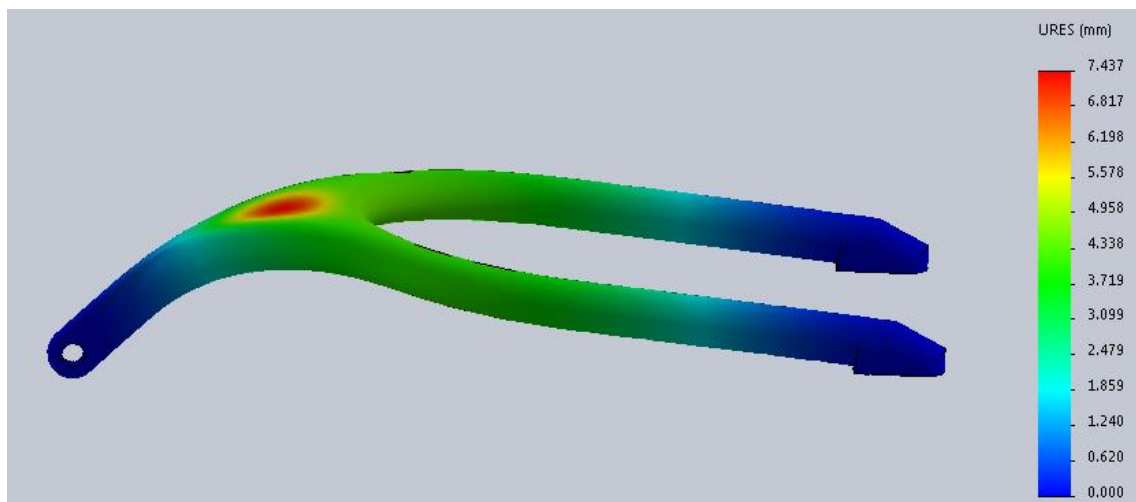


Figura III.49. Deformaciones generadas con CF-EP en el Test 1 modificando el espesor.

III. Desarrollo proyecto

III.4.3.4. Resultados obtenidos realizando el Test 2 modificando el espesor inicial.

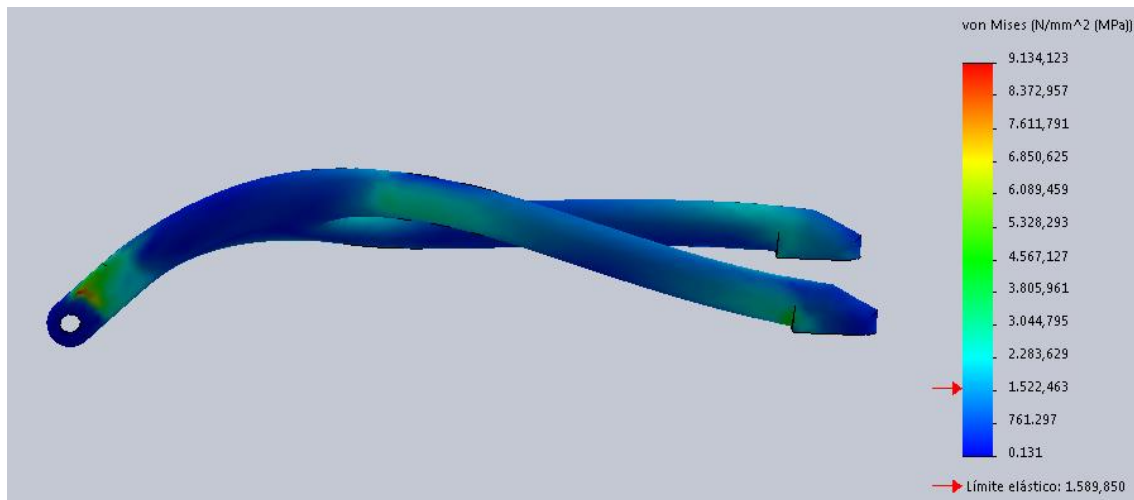


Figura III.50. Tensiones generadas con CF-EP en el Test 2 modificando el espesor.

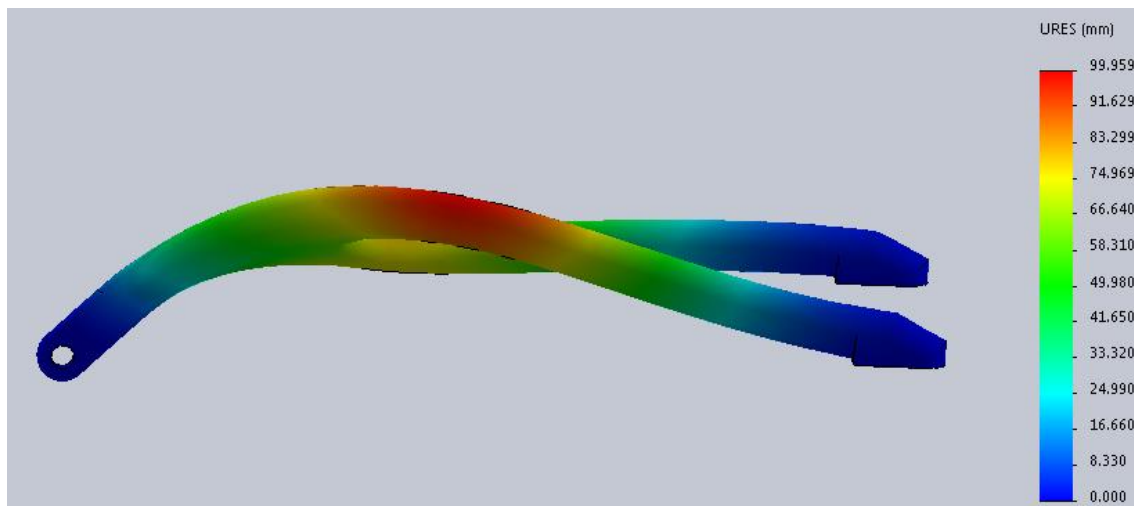


Figura III.51. Deformaciones generadas con CF-EP en el Test 2 modificando el espesor.

Al igual que los casos anteriores, al realizarse el Test 1 la pieza no debe romper y su deformación debe ser menor que 17,5 mm. Como se puede ver en las figuras del Test 1, las deformaciones máximas se encuentran por debajo del σ_e , por lo que la pieza no se deformará y las deformaciones generadas están por debajo de 17,5 mm.

En cuanto al Test 2, la pieza rompe debido a las tensiones y su deformación es de 99,959 mm, cuando el límite es de 100 mm.

III. Desarrollo proyecto

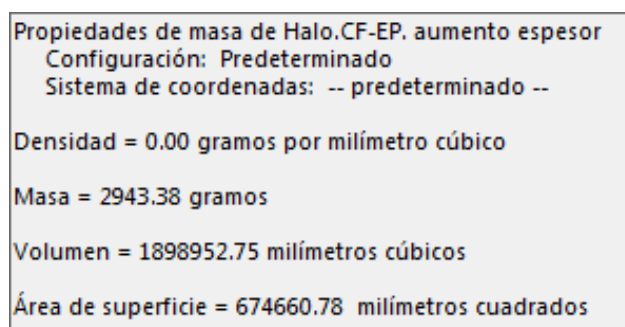
Para que la estructura formada de CF-EP cumpla con los dos test, se ha aumentado el espesor inicial 1,05 mm, por lo que el espesor final es de 5,70 mm en toda la pieza.

Al haber superado la pieza los dos test, se puede decir que la pieza de material CF-EP es apta para su uso.

Tabla III.10. Comparación entre norma FIA y resultados obtenidos con CF-EP modificando el espesor

	Según norma FIA	Según SolidWorks	¿Cumple la norma?
Test 1			
Tensión	No debe romper Halo	No rompe Halo	Sí
Def. max. (mm)	17,5	7,437	
Test 2			
Tensión	Debe romper Halo	Sí rompe Halo	Sí
Def. max. (mm)	100	99,959	

Dada la baja densidad del material compuesto con matriz polimérica en comparación con el titanio y el acero, se puede advertir una reducción de peso muy significativo de la pieza. Gracias a esto, se incrementa la velocidad punta del coche y se reduce el gasto de neumáticos sobre la pista.



Propiedades de masa de Halo.CF-EP. aumento espesor
Configuración: Predeterminado
Sistema de coordenadas: -- predeterminado --

Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico

Masa = 2943.38 gramos

Volumen = 1898952.75 milímetros cúbicos

Área de superficie = 674660.78 milímetros cuadrados

Figura III.52. Peso obtenido por SolidWorks al modificar el espesor de CF-EP.

A continuación se va a mostrar una tabla en la que aparecerá el peso de la pieza fabricada de titanio y de acero, comparando estos con el Halo de CF-EP y se mostrará la reducción de peso.

III. Desarrollo proyecto

Tabla III.11. Comparativa de pesos del Halo fabricado de titanio y acero con CF-EP.

Material	Peso Halo (kg)	Peso Halo CF-EP (kg)	Reducción peso (%)
Titanio Ti-6Al-4V	7,01	2,94	58,06
Acero AerMet 100	13,01		77,4

III. Desarrollo proyecto

III. Desarrollo proyecto

III.5. ESTUDIO AERODINÁMICO.

En este apartado se realizará un estudio aerodinámico del Halo para poder analizar el comportamiento del flujo del aire y se conocerán las tensiones producidas sobre la superficie de la pieza en unas condiciones normales de temperatura y presión, es decir, a 20 °C y a 1 atm respectivamente.

Con el programa SolidWorks, se selecciona el complemento “Flow Simulation” que será la herramienta que realizará la simulación aerodinámica.

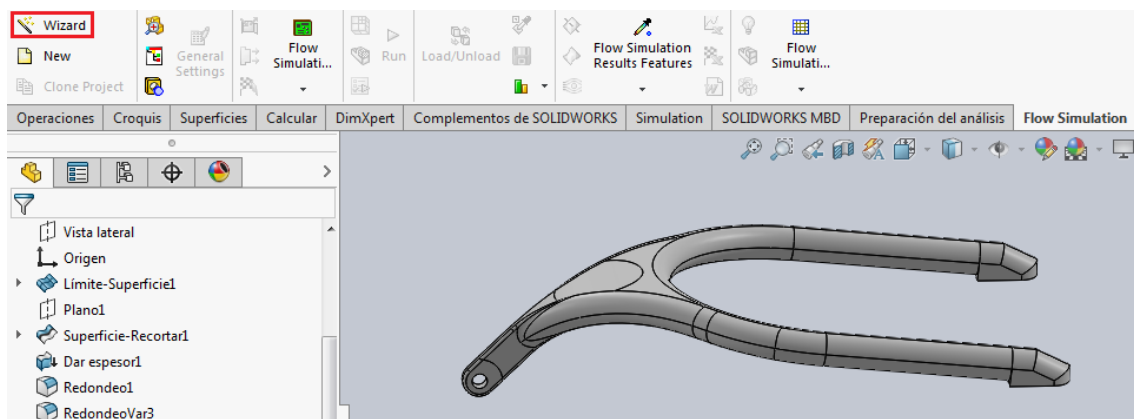


Figura III.53. Selección de “Wizard” en “Flow Simulation”.

Seleccionado “Flow Simulation” se clikea sobre “Wizard”. Aquí es donde se da nombre al estudio.

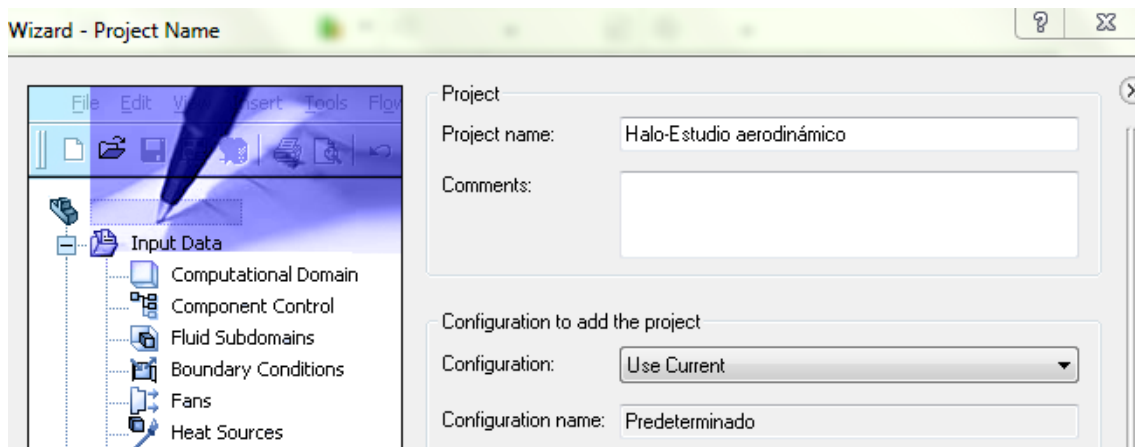


Figura III.54. Dar nombre al estudio aerodinámico.

III. Desarrollo proyecto

En la siguiente ventana se indicará el número de decimales que se quieren tener en los resultados y que las unidades se expresen en el Sistema Internacional: la longitud en m , la masa en kg y el tiempo en s .

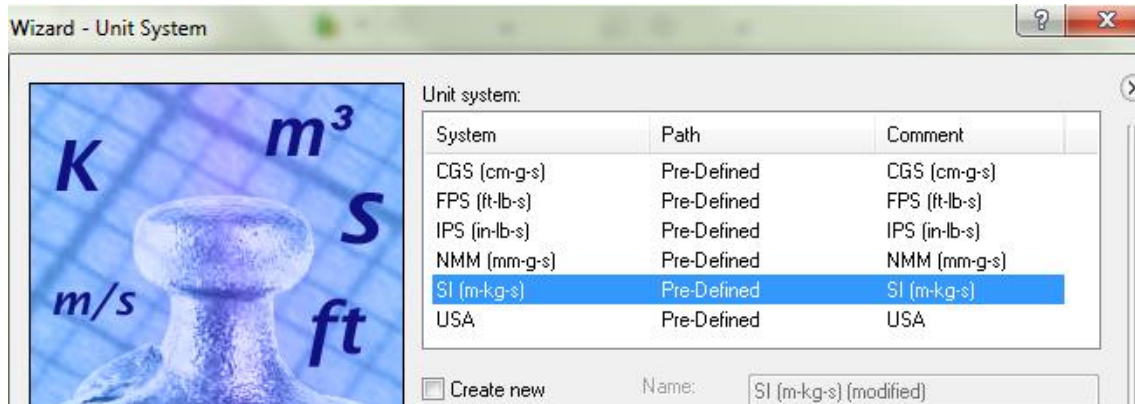


Figura III.55. Selección de unidades en el SI.

A continuación, se indica como el flujo de aire recorrerá la pieza. En el caso del Halo, será por el exterior y la dirección de éste será a lo largo del eje x .

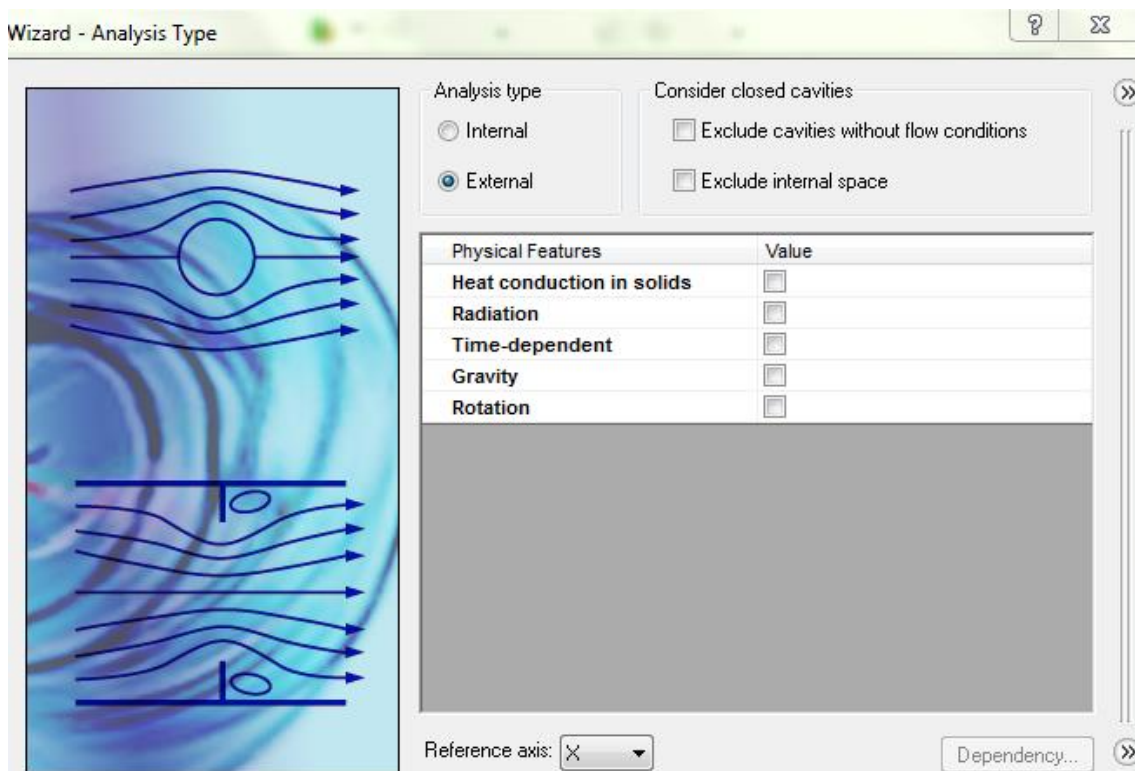


Figura III.56. Tipo de análisis y dirección del fluido.

III. Desarrollo proyecto

Ahora se especifica la clase de fluido que actúa sobre la pieza, que en el caso del estudio es aire, por lo que se elige "Air".

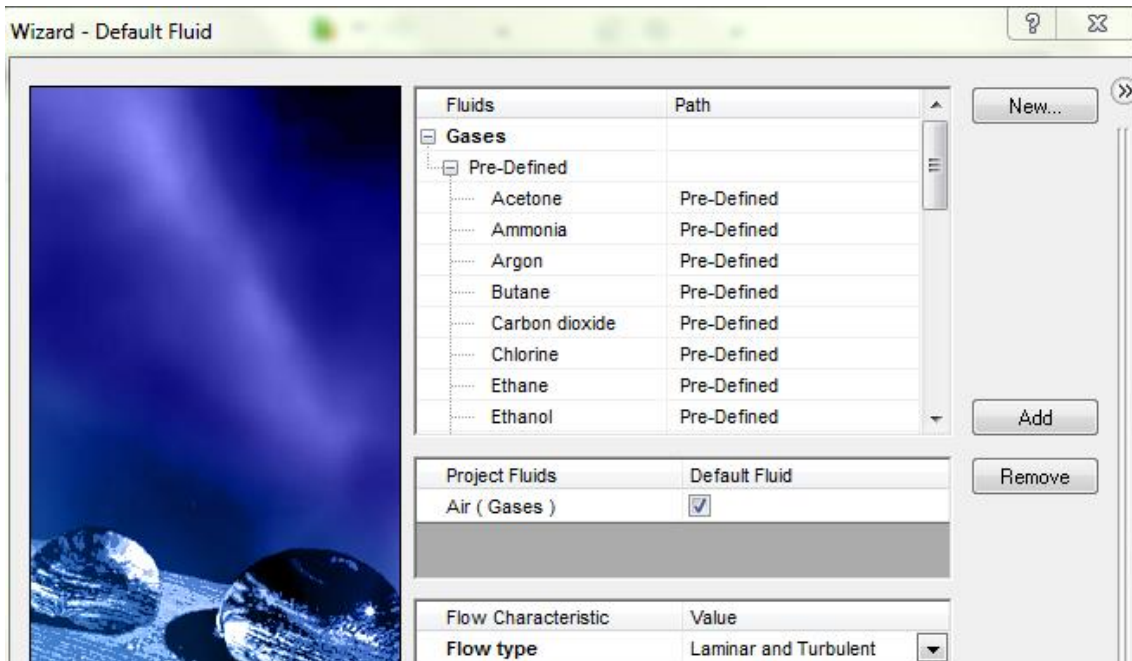


Figura III.57. Definición del fluido.

Realizado todo lo anterior, en la ventana que se abre se indica que la pieza trabajará a condiciones normales: con una presión atmosférica de 101325 Pa (1 atm) y una temperatura de 293,2 K (20 °C). La velocidad del fluido sobre el Halo se obtiene de la velocidad máxima alcanzada por el conductor Valterri Bottas durante una prueba en la recta principal del circuito de Montmeló, a 334,3 km/h (92,86 m/s).

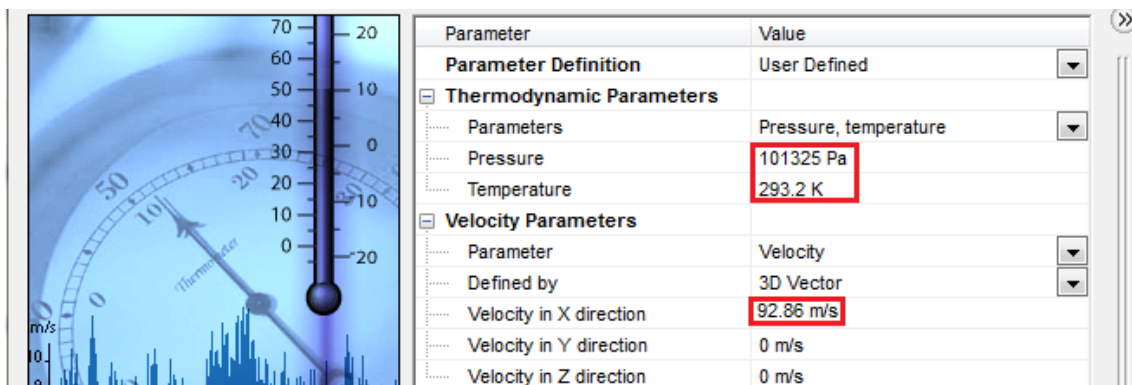


Figura III.58. Velocidad del fluido, presión y temperatura.

III. Desarrollo proyecto

Realizados los pasos anteriores, hay que crear el volumen de control donde se va a realizar el análisis aerodinámico.

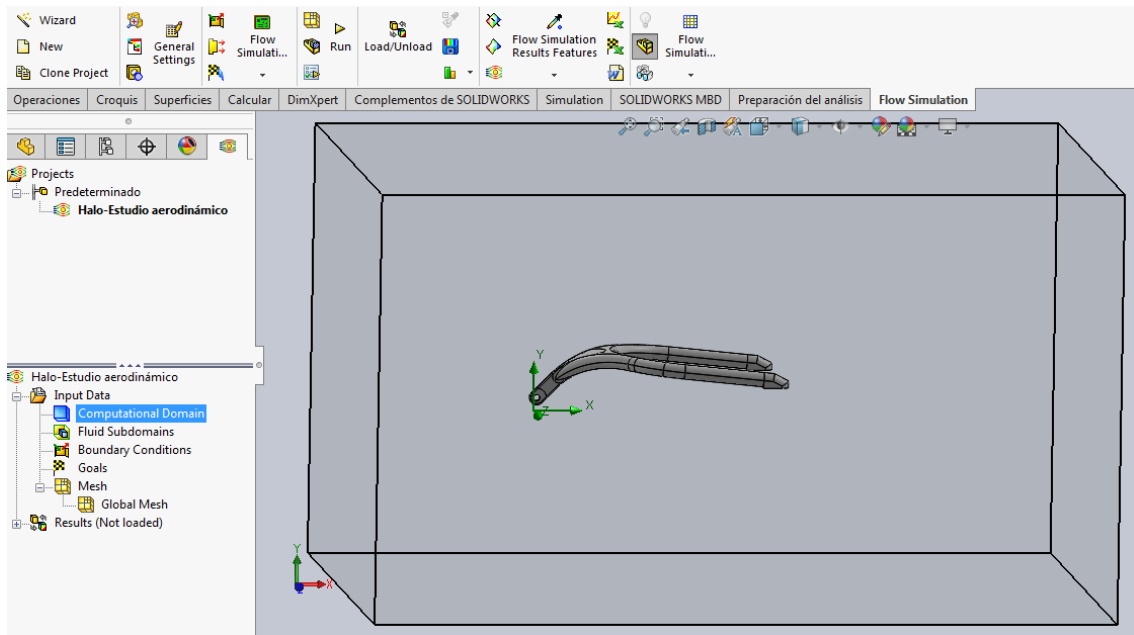


Figura III.59. Volumen de control

Se debe reducir lo máximo posible para facilitar las operaciones de cálculo. Para ello, se selecciona “Computational Domain” y se reduce el volumen de manera manual o indicando las medidas de forma numérica.

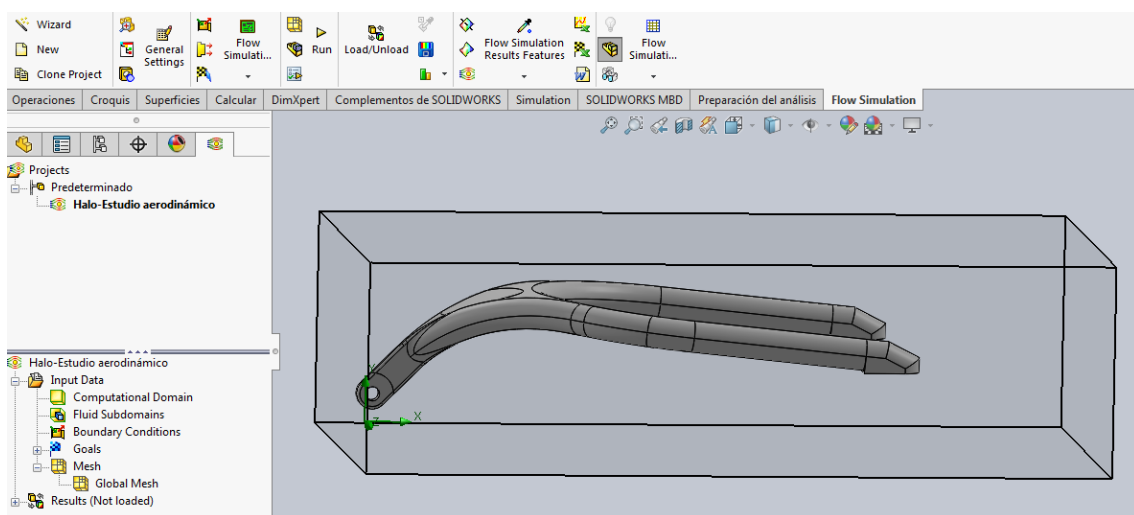


Figura III.60. Reducción del volumen de control para facilitar la simulación.

III. Desarrollo proyecto

Para iniciar la simulación se debe presionar en “Run”.

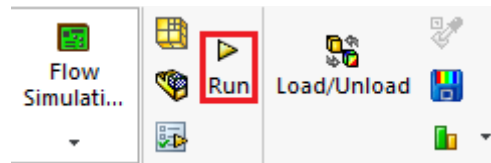


Figura III.61. Clic para comenzar la simulación.

A continuación se mostrarán una serie de figuras donde se representará como el aire incide sobre la superficie de la pieza y como se distribuyen tanto las cargas aerodinámicas como las velocidades que se generan.

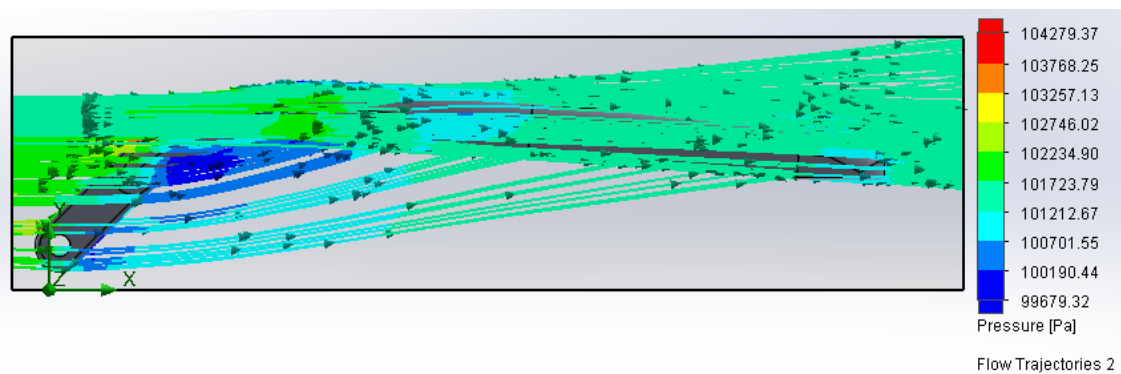


Figura III.62. Presión del aire vista en Alzado.

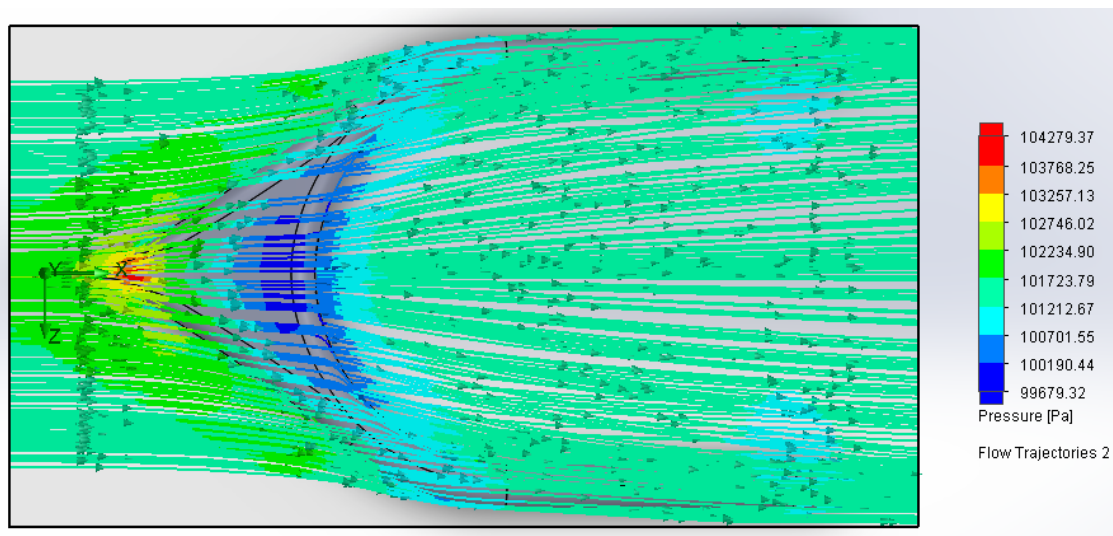


Figura III.63. Presión del aire vista en Planta.

III. Desarrollo proyecto

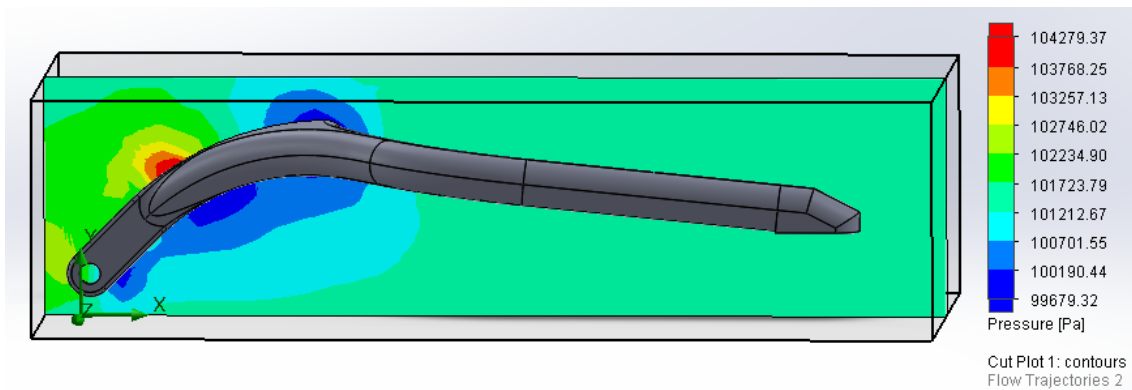


Figura III.64. Corte de la pieza por plano Alzado mostrando isobaras.

Como se puede observar en las figuras anteriores, la zona donde se produce la presión máxima es en V-transition, siendo la parte frontal de la pieza y donde impacta directamente el aire. Esta presión que se ejerce sobre la superficie es de 0,104 MPa. Si se compara este resultado con los 853,7 MPa que se producen al realizar el Test 1, esta tensión casi no influirá sobre la estructura. En la cara opuesta del Halo es donde se produce la depresión (en color azul).

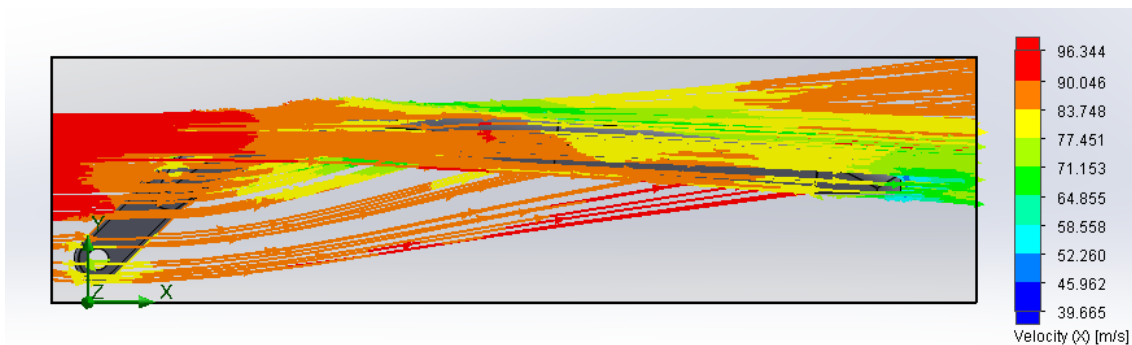


Figura III.65. Velocidad del aire vista en Alzado.

III. Desarrollo proyecto

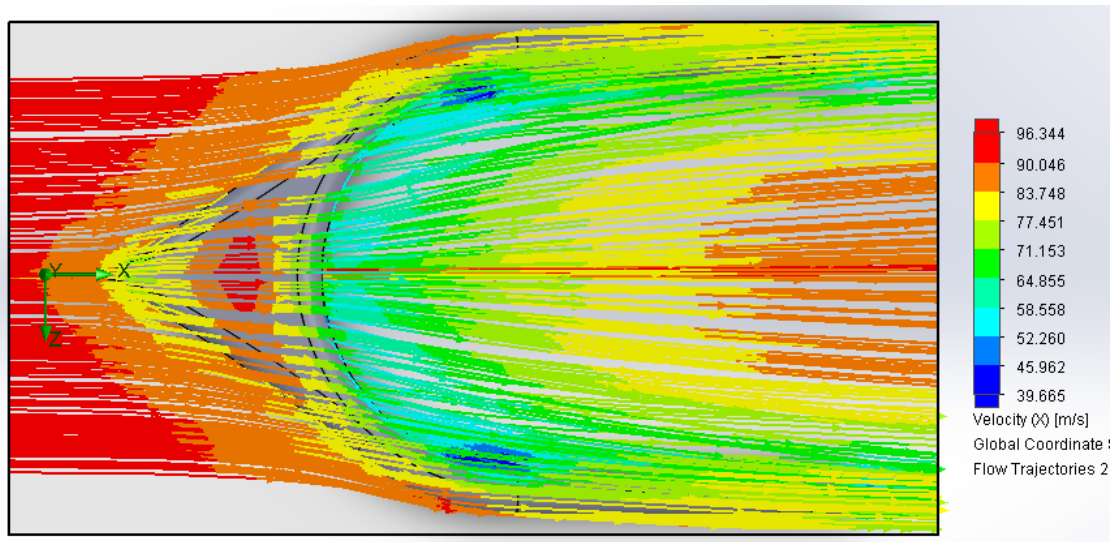


Figura III.66. Velocidad del aire vista en Planta.

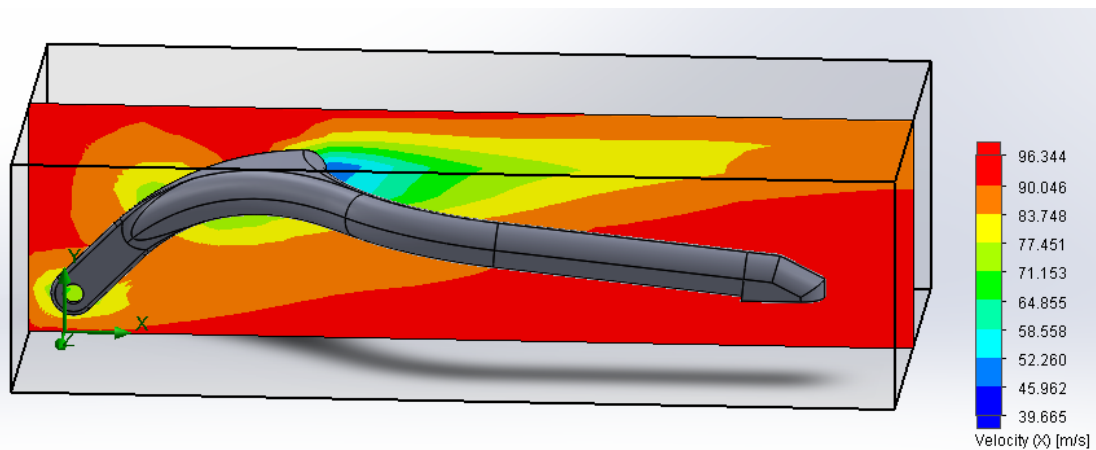


Figura III.67. Corte de la pieza por plano Alzado mostrando isovelocidades.

Viendo los flujos de aire que recorren la superficie del Halo, no se forman remolinos en la cara opuesta de donde incide el aire, lo que garantiza que el diseño en la parte aerodinámica es correcto, ya que estos vórtices producen pérdidas en velocidad punta y en la carga aerodinámica, lo que originaría inestabilidad en el vehículo de competición.

III. Desarrollo proyecto

III. Desarrollo proyecto

III.6. PROCESO DE FABRICACIÓN.

El método de fabricación que se va a utilizar para la producción del Halo de material compuesto será un moldeo por vejiga. Una vez realizado el laminado por contacto manual sobre el molde tipo hembra, se aplica presión sobre las capas de material compuesto mediante una vejiga hinchable para compactarlo sobre el molde y así dar una mejor uniformidad a la pieza.

En la Figura III.68 se puede ver un ejemplo de un molde tipo hembra sobre el que se aplica capas de material compuesto.

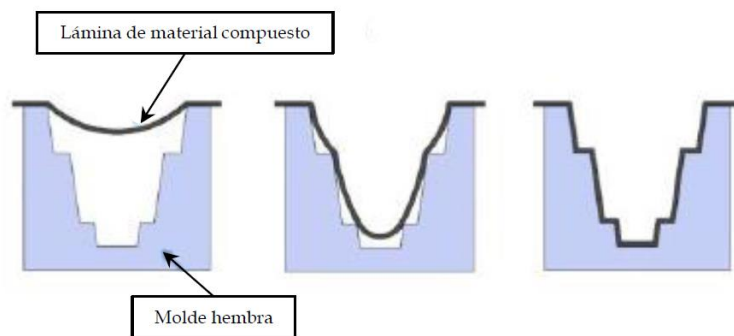


Figura III.68. Ejemplo de un molde hembra [15].

Antes de añadir las láminas de fibra y la resina, se recubre el molde con un desmoldeante para que al extraer la pieza una vez acabada se pueda hacer sin inconvenientes y se añade gel coat para darle un buen acabado superficial y protegerlo de agentes externos. Las láminas de fibra de carbono se irán colocando en diferentes ángulos para otorgarle al material compuesto un comportamiento quasi-isotrópico y se irá añadiendo la resina epoxi con ayuda de pinceles o rodillos para homogeneizar la aplicación sobre toda la superficie y eliminar las posibles burbujas de aire que se generan al extender la resina sobre la fibra, con un porcentaje de fibra de carbono de 70% frente a un 30% de resina epoxi.

III. Desarrollo proyecto



Figura III.69. Aplicación de resina epoxi sobre fibra de carbono [16].

Realizados los pasos anteriores, se introduce la vejiga dentro del molde y se llena de aire, llegando a una presión cercana a 1 atm. De esta manera, la vejiga presiona el CF-EP contra las paredes del molde compactando el material compuesto y eliminando la resina sobrante que pudiera quedar sobre las fibras de carbono y las posibles burbujas que podrían debilitar la pieza una vez terminada.

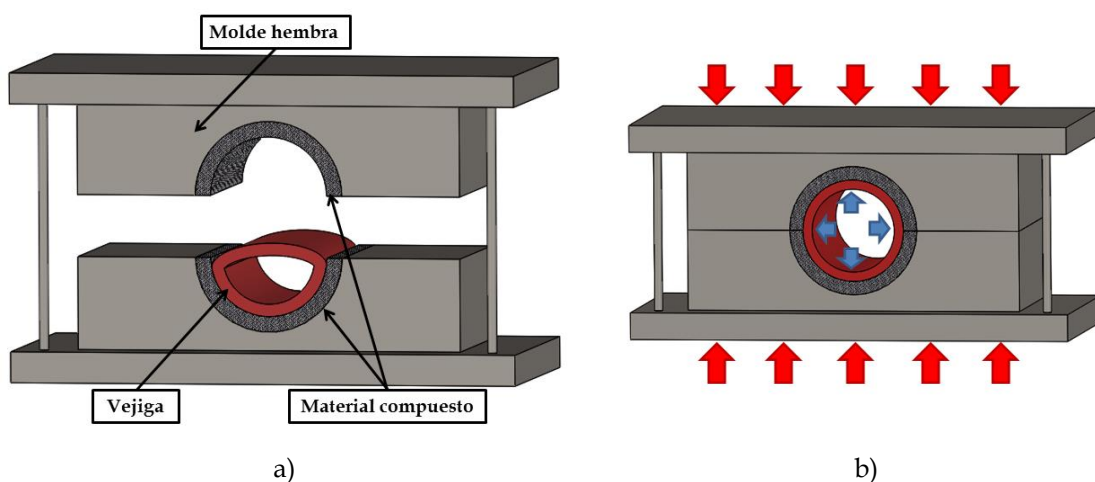


Figura III.70. a) Colocación de la vejiga dentro del molde; b) Presión de la vejiga y aplicación de calor al material compuesto.

III. Desarrollo proyecto

Además de la presión generada por la vejiga, se aplicará calor para acelerar el proceso de curado del Halo.

Una vez se ha curado el material compuesto, se debe retirar la vejiga y posteriormente pulir la pieza para eliminar las posibles irregularidades que pueda tener la superficie.

Tabla III.12. Ventajas y desventajas del moldeo por vejiga.

Ventajas	Desventajas
Se pueden fabricar productos grandes y complejos	Inversión en equipos y coste de manufactura
Proceso de fabricación sencillo	El tiempo de producción es alto
La formación de los trabajadores es mínima	Las resinas de bajo peso molecular son más dañinas que los de mayor peso molecular
Buena homogeneización de la resina y la fibra	Se necesita sistemas de extracción debido a la concentración de estireno
Buenos acabados en la pieza	Las resinas deben de ser de baja viscosidad
La vejiga se puede reutilizar	Los cambios de diseño son lentos

III. Desarrollo proyecto

III. Desarrollo proyecto

III.7. ESTUDIO ECONÓMICO.

Para la realización del estudio económico del Halo se utilizarán el programa informático SolidWorks y la base de datos CES EduPack. Con el primero se obtendrán las dimensiones y el peso de la pieza, por lo que indicará la cantidad de material necesario para conformarla. Con CES EduPack se podrá conseguir el precio del material utilizado y los costes en el proceso de fabricación.

Debido a la complejidad que tiene la pieza a causa de la curva pronunciada en el sentido longitudinal (en el eje x) y el tamaño total, la fabricación en un solo molde es muy complicada. Por esta razón, se fabricará en cuatro moldes diferentes que luego se unirán cuando las partes estén curadas para formar la pieza completa del Halo.

Como no se encuentra en CES EduPack el proceso de fabricación por vejiga se va a utilizar el moldeo con bolsa a presión (pressure bagging), que dará, de una manera aproximada, el precio de fabricación. Como segundo proceso se realizará un mecanizado por control numérico (CNC) para conseguir las dimensiones precisas de la pieza.

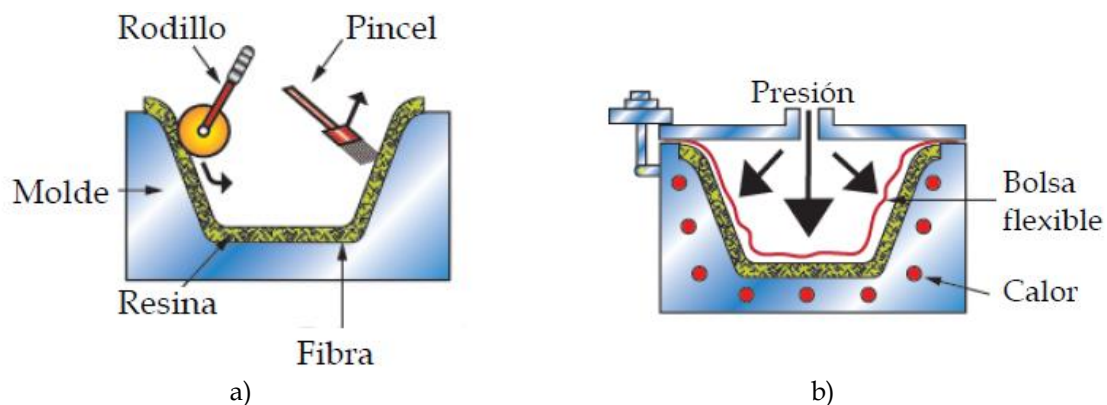


Figura III.71. Moldeo con bolsa a presión [17]: a) Colocación del material compuesto sobre molde; b) Moldeo con bolsa a presión y aplicación de calor.

Para comenzar con el cálculo del coste del proceso de fabricación se va a suponer que se van a fabricar 40 Halos anuales (2 por escudería y otros 2 para recambio) y que cada temporada se deberá cambiar para asegurar la integridad física

III. Desarrollo proyecto

de la pieza, ya que este componente estará expuesto a la luz solar y a la humedad ambiental, dos de los elementos que más deterioran la matriz polimérica.

Mediante la opción “Part cost estimator” del programa CES EduPack se puede estimar el valor del Halo. Para ello, se definirán las medidas más significativas de las cuatro piezas, el peso de cada una, el material del que se componen y los procesos de fabricación para conformar estas.

Para comenzar, hay que conocer el peso de cada pieza. Con la operación “Partir” se divide el Halo en cuatro trozos que se fabricarán en moldes diferentes.

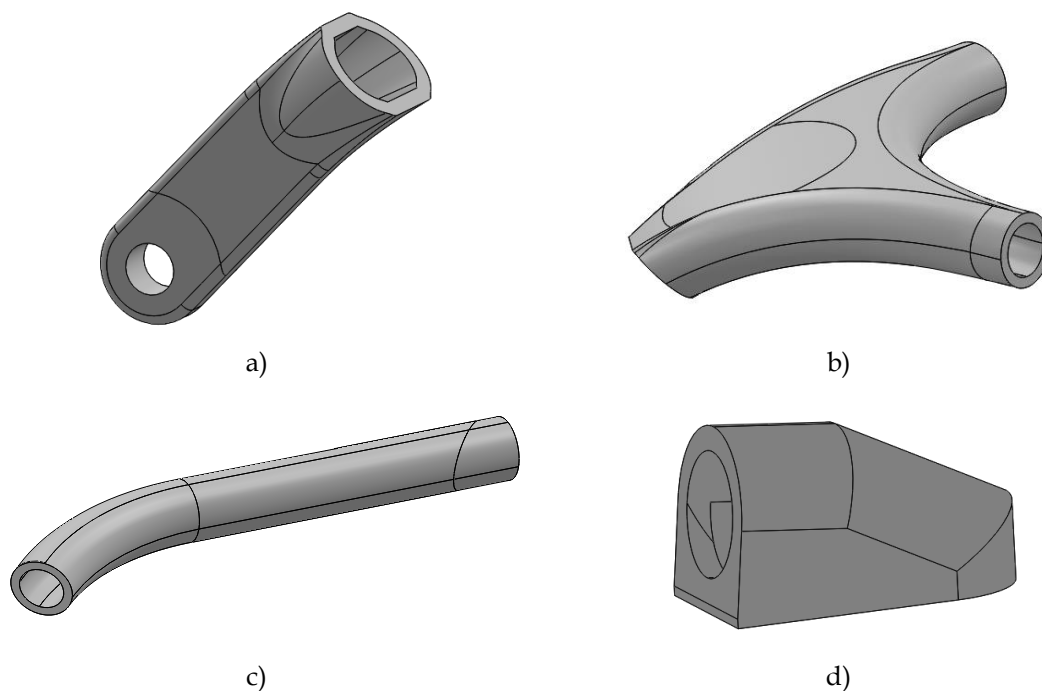


Figura III.72. Trozos al aplicar la operación “Partir” en SolidWorks: a) Trozo 1: Central Pylon; b) Trozo 2: V-transition; c) Trozo 3: Main Hoop; d) Trozo 4: Rear Brackets.

Una vez partido el Halo en cuatro trozos, con el SolidWorks se halla tanto el peso de cada uno de ellos y la longitud máxima para introducir estos datos en el programa CES EduPack. Primero se calcula el peso de cada uno.

III. Desarrollo proyecto

<p>Propiedades de masa de Trozo.01 Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado --</p> <p>Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico</p> <p>Masa = 266.25 gramos</p> <p>Volumen = 172443.61 milímetros cúbicos</p> <p>a)</p>	<p>Propiedades de masa de Trozo.02 Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado --</p> <p>Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico</p> <p>Masa = 1500.47 gramos</p> <p>Volumen = 971806.99 milímetros cúbicos</p> <p>b)</p>
<p>Propiedades de masa de Trozo.03 Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado --</p> <p>Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico</p> <p>Masa = 878.58 gramos</p> <p>Volumen = 569031.08 milímetros cúbicos</p> <p>c)</p>	<p>Propiedades de masa de Trozo.04 Configuración: Predeterminado Sistema de coordenadas: -- predeterminado --</p> <p>Densidad = 0.00 gramos por milímetro cúbico</p> <p>Masa = 157.59 gramos</p> <p>Volumen = 102066.73 milímetros cúbicos</p> <p>d)</p>

Figura III.73. Pesos en g: a) Trozo 1: 0,266 kg; b) Trozo 2: 1,5 kg; c) Trozo 3: 0,879 kg; d) Trozo 4: 0,158 kg.

Hallado el peso de los cuatro trozos, se plasma la longitud más larga de cada uno de ellos.

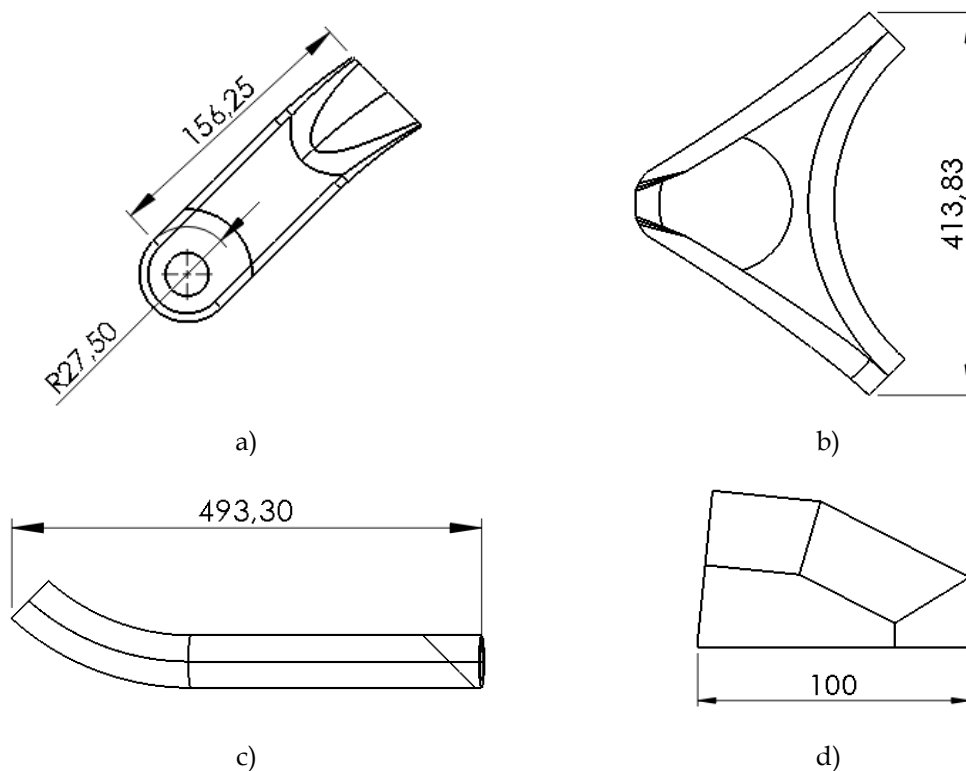


Figura III.74. Medidas máximas en mm: a) Trozo 1: 0,184 m; b) Trozo 2: 0,414 m; c) Trozo 3: 0,493 m; d) Trozo 4: 0,1 m.

III. Desarrollo proyecto

Obtenidas las cifras de los pesos y las longitudes con SolidWorks, se utiliza CES EduPack y se introducen estos para calcular los costes de fabricación. Se detallarán los puntos a seguir para obtenerlo, utilizando para ello el Trozo 1 del Halo. Para los demás trozos se realizarán los mismos pasos.

En el apartado “Part complexity” se seleccionará como estándar (Standard) a la complejidad en el desarrollo de la fabricación, ya que el Trozo 1 tiene partes angulosas y redondeadas.

En “Capital write-off time”, que es el tiempo de amortización del producto, será de un año, puesto que cada temporada tendrán que renovarse todos los Halos para estén en buen estado de uso al comienzo de la competición.

Part cost estimator

Component details

Material: Epoxy/HS carbon fiber, resin infused non-crimp fabric, UD lay-up (Browse...)

Value of scrap material: 0 % of virgin price

Part mass: 0,266 kg

Part length: 0,184 m

Batch size: 40 (Number of values: 3)

Primary shaping process

Primary Process: Vacuum/Pressure Bagging (Browse...)

Availability: Custom form

Part complexity: Standard

Load factor: 50 %

Overhead rate: 127 EUR/hr

Capital write-off time: 1 years

Secondary shaping process

Include secondary process

Secondary Process: CNC machining (Browse...)

Part complexity: Standard

Amount of scrap: 10 % of material

Scrap recycled?: Yes

Figura III.75. Utilización de “Part cost estimator” para conocer el precio de fabricación del Trozo 1.

III. Desarrollo proyecto

Rellenados los datos del peso y la longitud del Trozo 1 del Halo, se presiona “Create” y con ello se consigue el precio de la fabricación de este.

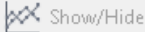









Trozo 1, Pressure bagging, CNC (0,266kg) - 40 units					
Datasheet view: All attributes 					
Part cost estimator					
Part cost		295	-	296	EUR
Part mass		0,266			kg
Batch size		40			
Material price per part		5,13	-	5,95	EUR
Primary process cost per part		282			EUR
Secondary process cost per part		7,71			EUR
Material price %		1,87			%
Primary process cost %		95,5			%
Secondary process cost %		2,61			%

Figura III.76. Precio de fabricación del Trozo 1.

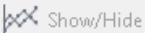









Trozo 2, Pressure bagging, CNC (1,5kg) - 40 units					
Datasheet view: All attributes 					
Part cost estimator					
Part cost		463	-	467	EUR
Part mass		1,5			kg
Batch size		40			
Material price per part		28,9	-	33,5	EUR
Primary process cost per part		405			EUR
Secondary process cost per part		28,9			EUR
Material price %		6,7			%
Primary process cost %		87,1			%
Secondary process cost %		6,21			%

Figura III.77. Precio de fabricación del Trozo 2.

III. Desarrollo proyecto

Trozo 3, Pressure bagging, CNC (0,879kg) - 80 units					
Datasheet view:		All attributes	Show/Hide		
Part cost estimator					
Part cost	(i)	379	-	382	EUR
Part mass	(i)	0,879			kg
Batch size	(i)	80			
Material price per part	(i)	17	-	19,7	EUR
Primary process cost per part	(i)	347			EUR
Secondary process cost per part	(i)	14,8			EUR
Material price %	(i)	4,8			%
Primary process cost %	(i)	91,3			%
Secondary process cost %	(i)	3,9			%

Figura III.78. Precio de fabricación del Trozo 3.

Trozo 4 , Pressure bagging, CNC (0,158kg) - 80 units					
Datasheet view:		All attributes	Show/Hide		
Part cost estimator					
Part cost	(i)	249			EUR
Part mass	(i)	0,158			kg
Batch size	(i)	80			
Material price per part	(i)	3,05	-	3,53	EUR
Primary process cost per part	(i)	242			EUR
Secondary process cost per part	(i)	3,74			EUR
Material price %	(i)	1,32			%
Primary process cost %	(i)	97,2			%
Secondary process cost %	(i)	1,5			%

Figura III.79. Precio de fabricación del Trozo 4.

Con costes de cada una de las piezas, finalmente las sumamos para conocer el total del precio de fabricación.

$$\text{Coste total} = 296 + 467 + 382 + 249 = 1394 \text{ €}$$

Según consta en un artículo de la FIA [18], el precio de fabricación de un Halo fabricado de aleación Ti-6Al-4V es de 15 000 € y el de acero es de, aproximadamente, una quinta parte de ese precio, es decir, que rondaría los 3000 €. Por lo dicho anteriormente, la fabricación del Halo con material compuesto de matriz polimérica reduciría estos costes y disminuiría el peso del monoplaza.

III. Desarrollo proyecto

Tabla III.13. Comparativa de precios del Halo fabricado de titanio y acero con CF-EP.

Material	Precio Halo (€)	Precio CF-EP (€)	Ahorro (%)
Titanio Ti-6Al-4V	15 000	1394	90,71
Acero AerMet 100	3000		53,53

IV. APÉNDICES

APÉNDICES

IV. Apéndices

IV.1. REFERENCIAS.

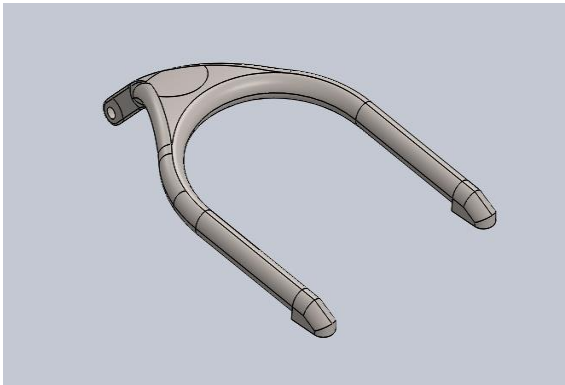
- [1] <http://www.silvaplana-curling.ch/coppa12/circus.htm>
- [2] <https://www.pinterest.es/pin/567664728025287123/>
- [3] <https://www.lavanguardia.com/cultura/20170122/413598220154/secreto-carreras-caballos-antigua-roma.html>
- [4] <http://www.eluniversal.com.mx/autopistas/mercedes-benz-pone-la-venta-su-primer-vehiculo-construido>
- [5] <http://donsusanito.blogspot.com/2012/11/la-muerte-de-ricardo-rodriguez.html>
- [6] <https://www.endado.com/blog/como-es-el-asiento-de-un-formula-1/>
- [7] <https://albrodpulf1.wordpress.com/2014/12/28/analisis-tecnico-sistema-de-retencion-de-las-ruedas/>
- [8] <https://www.latercera.com/el-deportivo/noticia/halo-salva-leclerc-pasa-primer-prueba/296529/>
- [9] <http://www.revistasafetycar.com/formula1/noticia/polemica-por-el-halo-se-cierra-con-accidente-de-leclerc-y-alonso-en-belgica-45874>
- [10] <https://www.pmw-magazine.com/news/driver-safety/sstt-titanium-halo.html>
- [11] http://recursosbiblio.url.edu.gt/Libros/2013/cmI/3-Estructuras_Cristalinas.pdf
- [12] Figura obtenida de los apuntes de Ciencia de Materiales II, Antonio Nadal Gisbert, Universidad Politécnica de Valencia.
- [13] Figura obtenida de *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*
- [14] <https://www.formula1.com/en/latest/article.f1-halo-strength-bus.51zS5jAngIly6okOkUKmso.html>
- [15] Figura obtenida de *Additive Technology of Soluble Mold Tooling for Embedded Devices in Composite Structures: A Study on Manufactured Tolerances*, Madhuparna Roy.
- [16] <http://extremecarbon.co.uk/composite-design/>
- [17] Figura obtenida del programa CES EduPack.

IV. Apéndices

[18] <https://www.fia.com/es/news/auto-tecnologia-para-todos>

IV.2.ANEXOS.

IV.2.1. Test 1: Halo fabricado con Ti-6Al-4V.



Simulación de Halo-titanium

Fecha: lunes, 08 de abril de 2019

Diseñador: José Manuel Cano Cortés

Nombre de estudio: Estudio 1

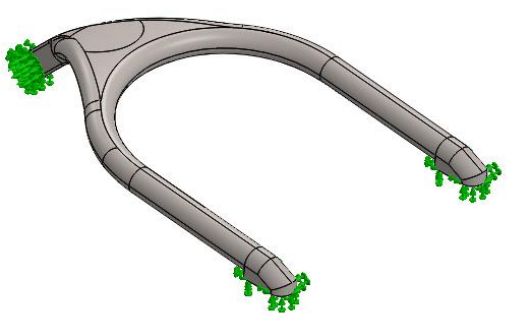
Tipo de análisis: Análisis estático

Descripción

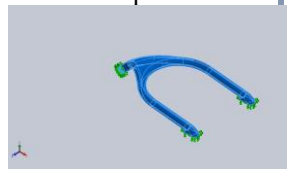
Halo fabricado con aleación de titanio Ti-6Al-4V. TEST 1.

IV. Apéndices

Información de modelo



Nombre del modelo: Halo-titanium
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición4 	Sólido	Masa:7.01546 kg Volumen:0.00158278 m ³ Densidad:4432.38 kg/m ³ Peso:68.7515 N	C:\Users\Józè\Desktop\SW-Halo\Halo-titanium.SLDPRT Feb 18 18:14:45 2019

IV. Apéndices

Propiedades de estudio

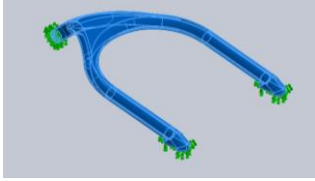
Nombre de estudio	Estudio 1
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	FFEPlus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

Unidades

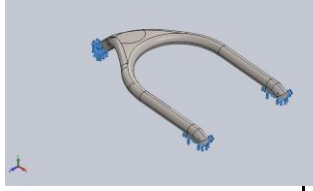
Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

IV. Apéndices

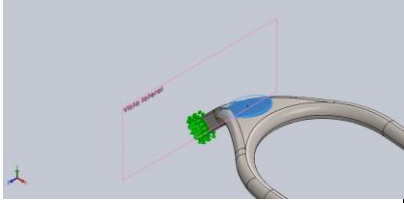
Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: Ti-6Al-4V Mod Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx. Límite elástico: 1.05e+009 N/m² Límite de tracción: 1.185e+009 N/m² Módulo elástico: 1.15e+011 N/m² Coeficiente de Poisson: 0.36 Densidad: 4428.78 kg/m³ Módulo cortante: 4.10238e+010 N/m² Coeficiente de dilatación térmica: 9e-006 /Kelvin</p>	Sólido 1(Línea de partición4)(Halo-titanium)
Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción			
Fijo-1		Entidades:	5 cara(s)		
		Tipo:	Geometría fija		
Fuerzas resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Fuerza de reacción(N)	-45997	116021	5.44537	124807	
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0	

IV. Apéndices

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s), 1 plano(s) Referencia: Vista lateral Tipo: Aplicar fuerza Valores: ---, -116000, 46000 N

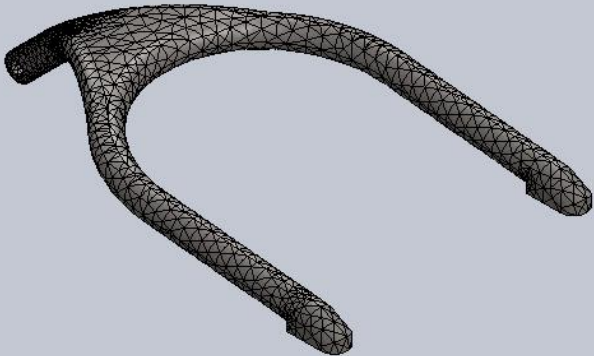
Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	33.1659 mm
Tamaño mínimo del elemento	6.63318 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden


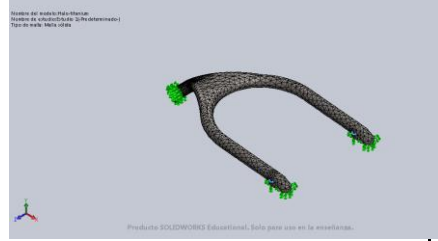
Información de malla - Detalles

Número total de nodos	22502
Número total de elementos	11385
Cociente máximo de aspecto	4024.6
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	37.5
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	7.69
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:13

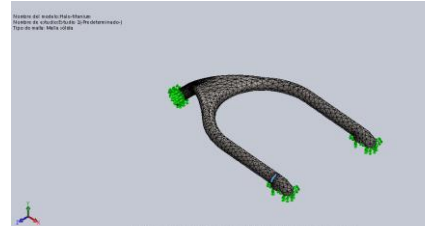
IV. Apéndices

Nombre de computadora:	JÓZÈ-HP
<p>Nombre del modelo: Halo-titanium Nombre de estudio: Estudio 1-(Pre determinado) Tipo de malla: Malla sólida</p>  <p>Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.</p>	

Información sobre el control de malla:

Nombre del control de malla	Imagen del control de malla	Detalles del control de malla
Control-1		<p>Entidades: 1 arista(s)</p> <p>Unidades: mm</p> <p>Tamaño: 8.29204</p> <p>Coeficiente: 1.5</p>
Control-2		<p>Entidades: 2 arista(s)</p> <p>Unidades: mm</p> <p>Tamaño: 6.63363</p> <p>Coeficiente: 1.5</p>

IV. Apéndices

Control-3		Entidades: 1 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 8.29204 Coeficiente: 1.5
-----------	---	---

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

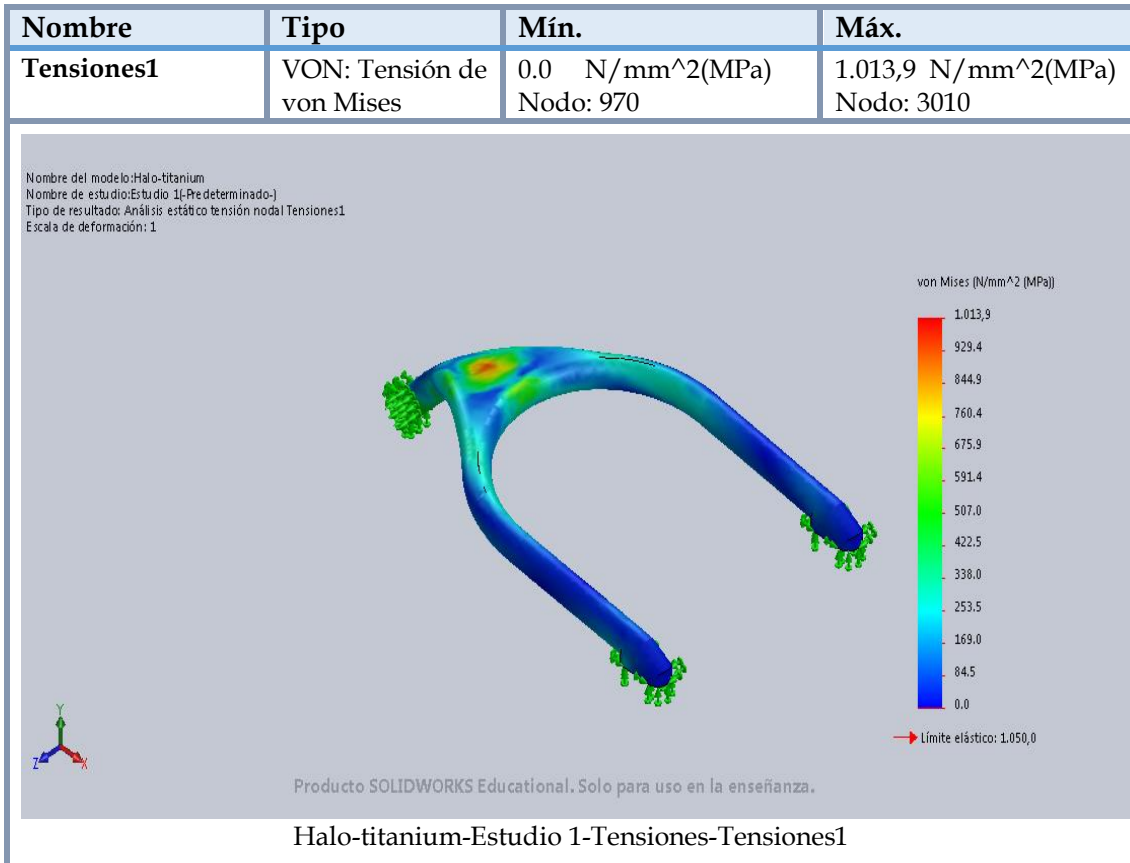
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-45997	116021	5.44537	124807

Momentos de reacción

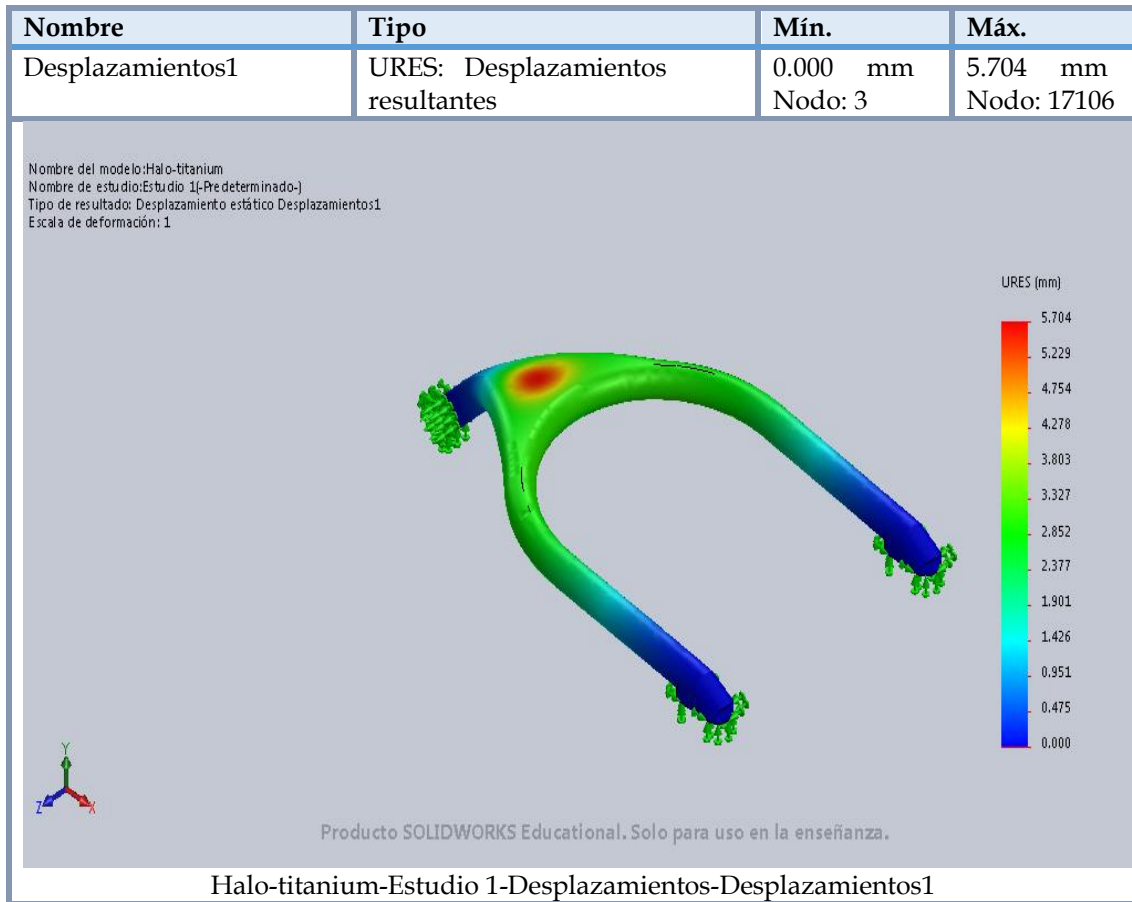
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

IV. Apéndices

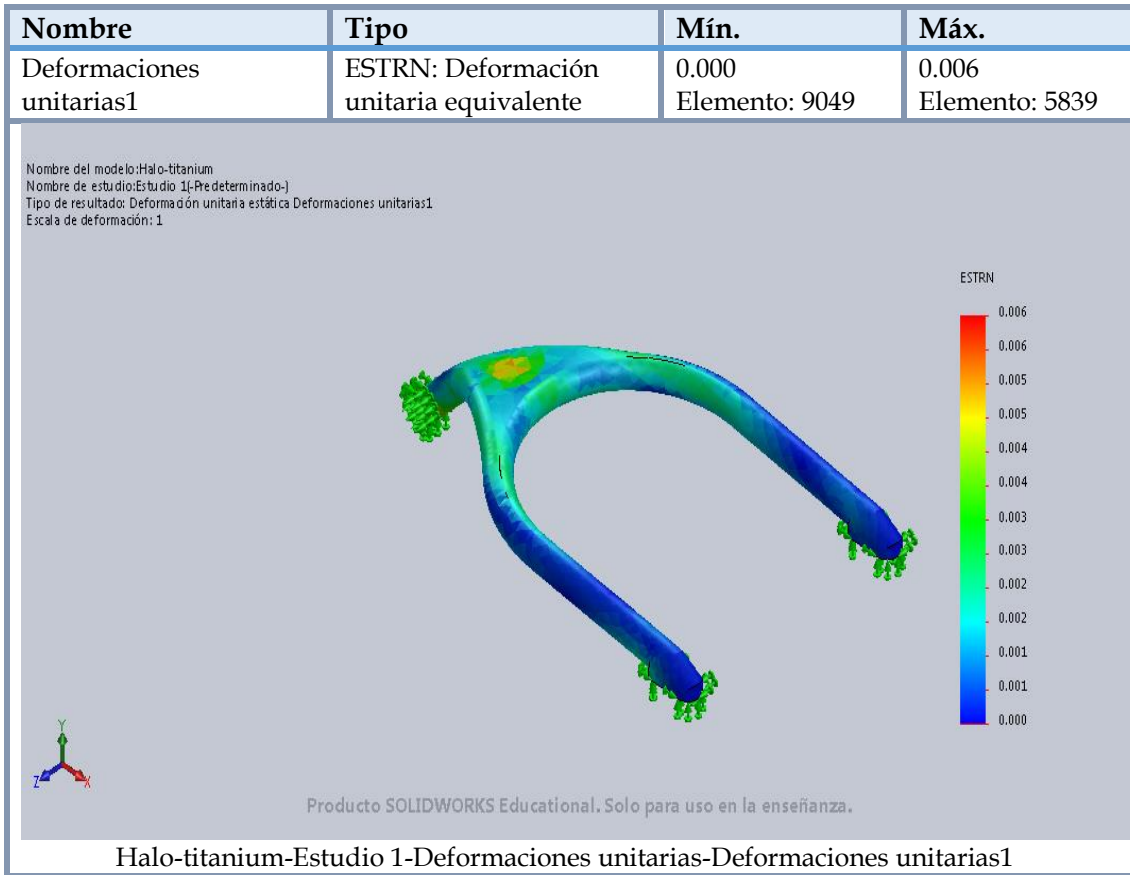
Resultados del estudio



IV. Apéndices



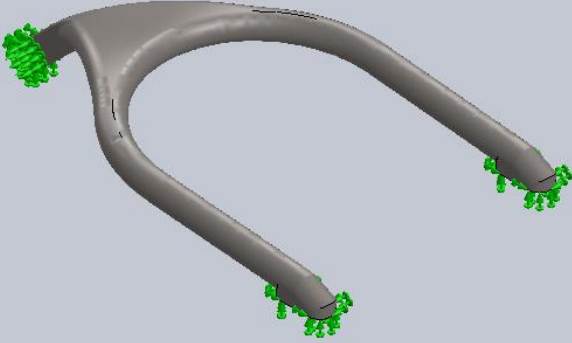
IV. Apéndices



IV. Apéndices

Nombre	Tipo
Desplazamientos1{1}	Deformada

Nombre del modelo: Halo-titanium
Nombre de estudio: Estudio 1-Pre determinado-
Tipo de resultado: Deformada Desplazamientos1{1}
Escala de deformación: 1

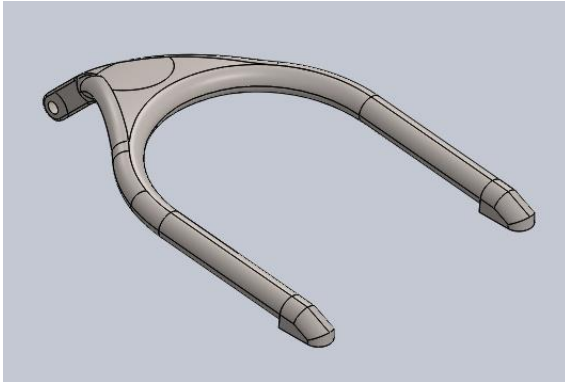


Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Halo-titanium-Estudio 1-Desplazamientos-Desplazamientos1{1}

IV. Apéndices

IV.2.2. Test 2: Halo fabricado con Ti-6Al-4V.



Simulación de Halo-titanium

Fecha: lunes, 08 de abril de 2019

Diseñador: José Manuel Cano Cortés

Nombre de estudio: Estudio 2

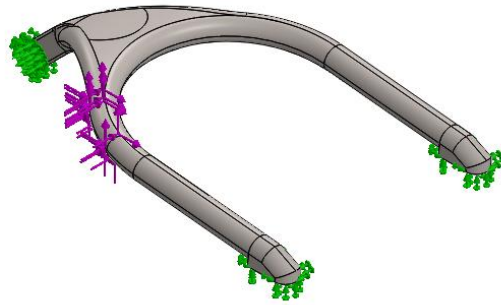
Tipo de análisis: Análisis estático

Descripción

Halo fabricado con aleación de titanio Ti-6Al-4V. TEST 2.

IV. Apéndices

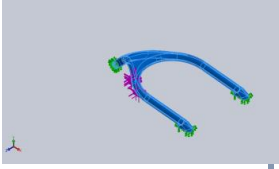
Información de modelo



Nombre del modelo: Halo-titanium

Configuración actual: Predeterminado

Sólidos

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición4 	Sólido	Masa:7.01547 kg Volumen:0.00158278 m ³ Densidad:4432.38 kg/m ³ Peso:68.7516 N	C:\Users\Józè\Desktop\SW-Halo\Halo-titanium.SLDPRT Feb 18 18:14:45 2019

IV. Apéndices

Propiedades de estudio

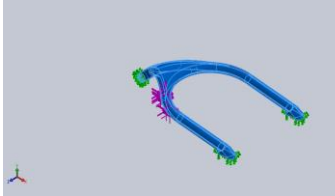
Nombre de estudio	Estudio 2
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	FFEPlus
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\Józè\Desktop\SW-Halo)

Unidades

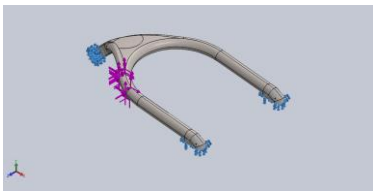
Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

IV. Apéndices

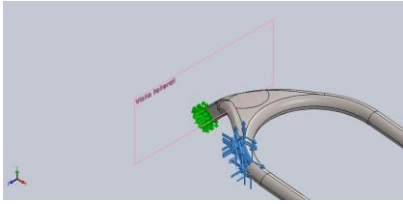
Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes	
	Nombre:	Ti-6Al-4V Solución tratada y envejecida (SS)	Sólido 1(Línea de partición4)(Halo-titanium)
	Tipo de modelo:	Isotrópico elástico lineal	
	Criterio de error predeterminado:	Tensión de von Mises máx.	
	Límite elástico:	1.05e+009 N/m ²	
	Límite de tracción:	1.185e+009 N/m ²	
	Módulo elástico:	1.15e+011 N/m ²	
	Coeficiente de Poisson:	0.36	
	Densidad:	4428.78 kg/m ³	
	Coeficiente de dilatación térmica:	9e-006 /Kelvin	
Datos de curva:N/A			

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades:	5 cara(s)	
		Tipo:	Geometría fija	
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-332032	23.7295	371997	498626
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

IV. Apéndices

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		Entidades: 4 cara(s), 1 plano(s) Referencia: Vista lateral Tipo: Aplicar fuerza Valores: 93000, 0, 83000 N

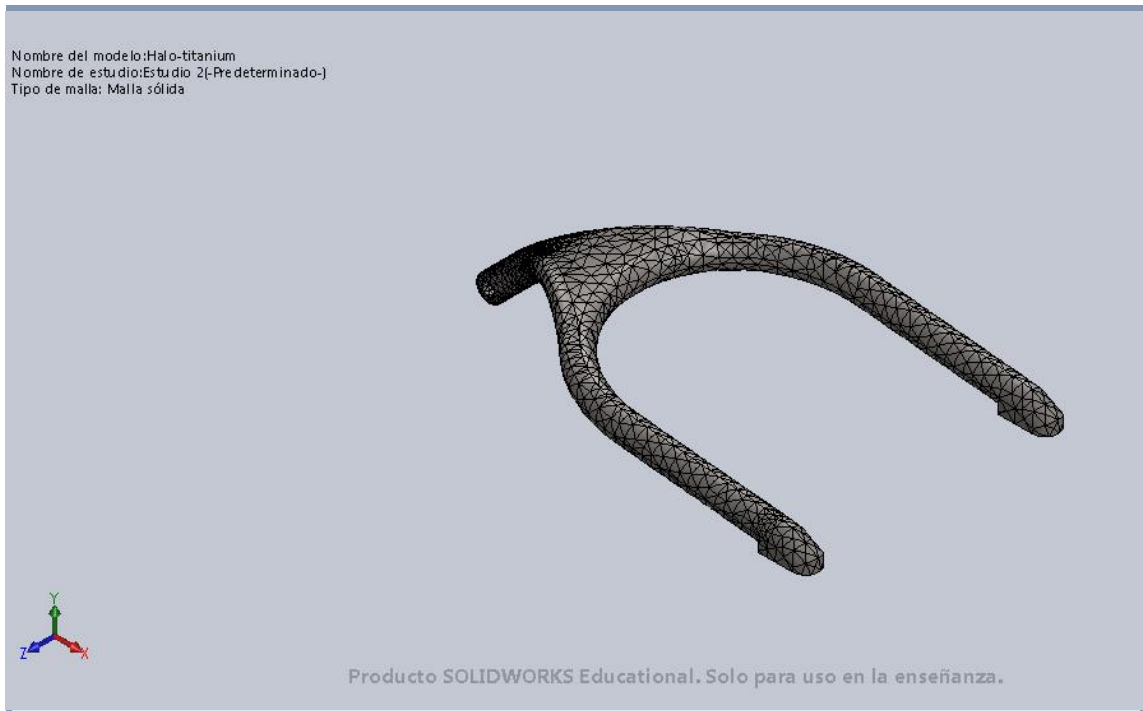
Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	33.1659 mm
Tamaño mínimo del elemento	6.63318 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	22265
Número total de elementos	11280
Cociente máximo de aspecto	2711
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	37.5
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	7.99
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:14
Nombre de computadora:	JÓZÈ-HP

IV. Apéndices



Información sobre el control de malla:

Nombre del control de malla	Imagen del control de malla	Detalles del control de malla
Control-1		<p>Entidades: 1 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 8.29204 Coeficiente: 1.5</p>

IV. Apéndices

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

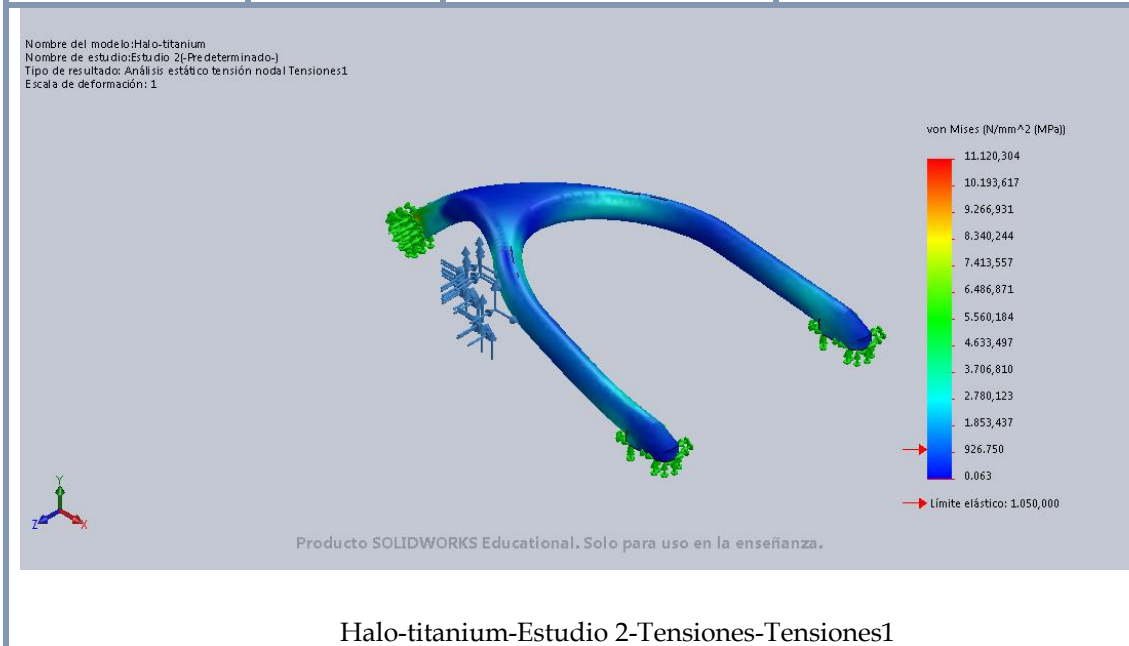
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-332032	23.7295	371997	498626

Momentos de reacción

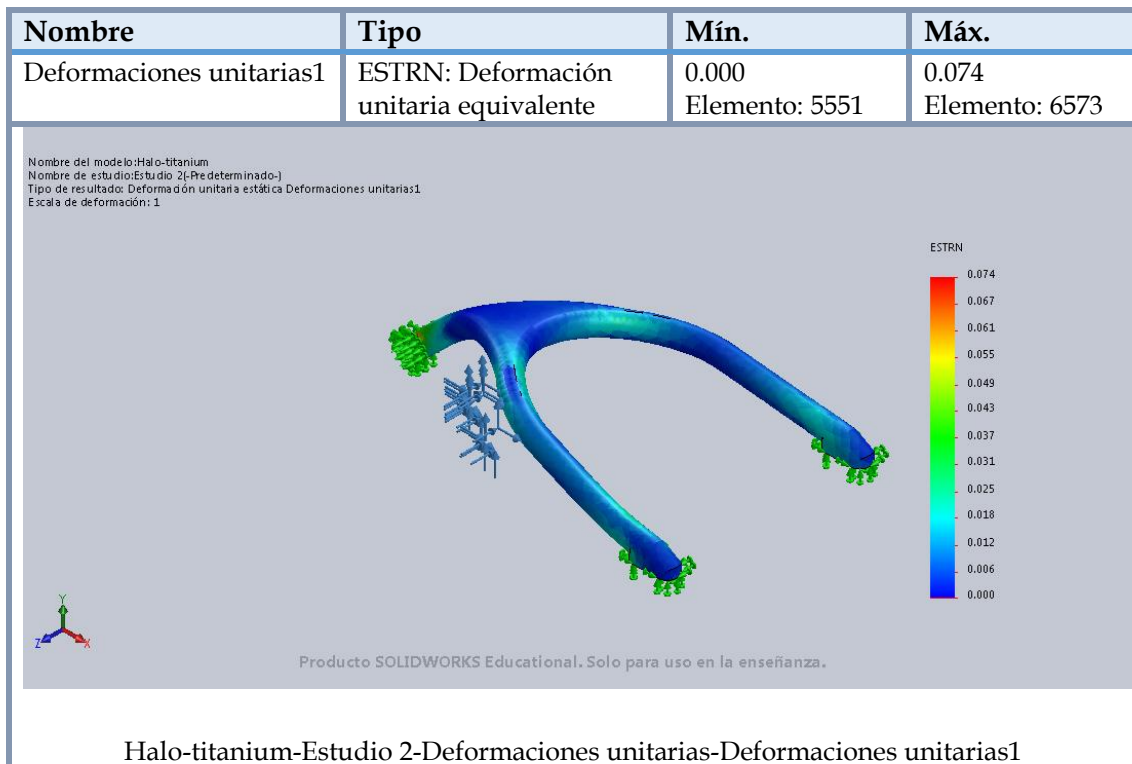
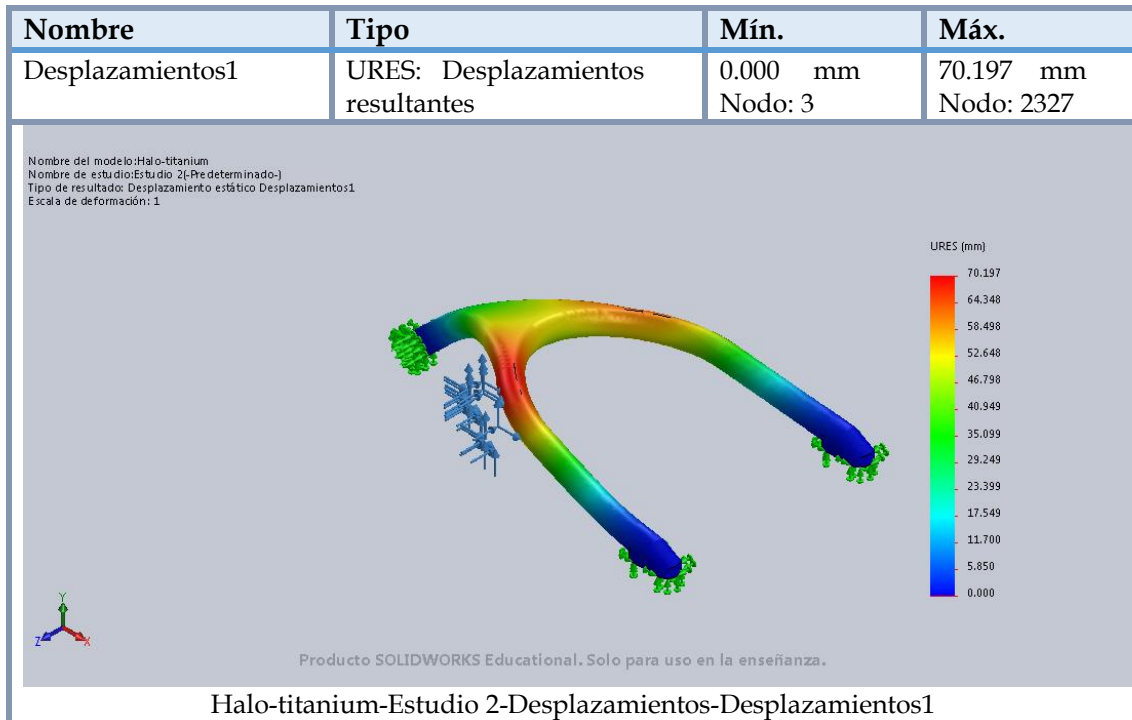
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	0.063 N/mm ² (MPa) Nodo: 4521	11.120,304 N/mm ² (MPa) Nodo: 3780

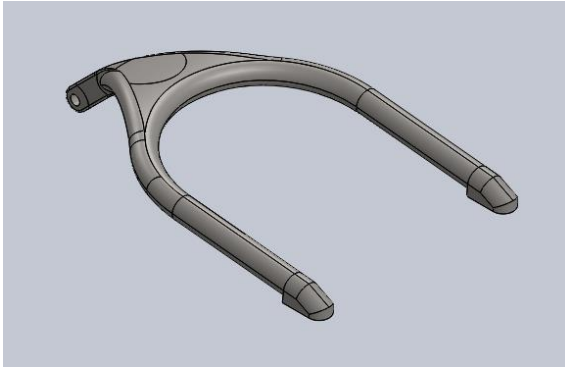


IV. Apéndices



IV. Apéndices

IV.2.3. Test 1: Halo fabricado con AerMet 100.



Simulación de Halo- acero

Fecha: lunes, 08 de abril de 2019

Diseñador: José Manuel Cano Cortés

Nombre de estudio: Estudio 1

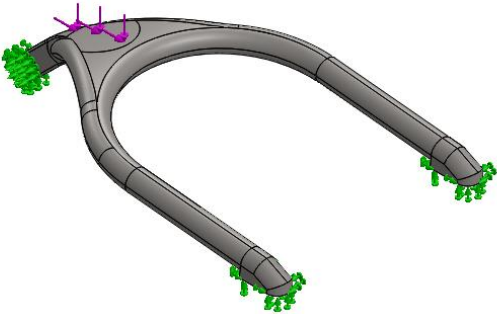
Tipo de análisis: Análisis estático

Descripción

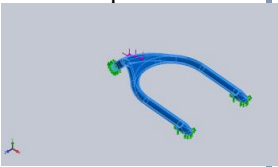
Halo fabricado con aleación de acero
AerMet 100. TEST 1.

IV. Apéndices

Información de modelo



Nombre del modelo: Halo-acero
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición4 	Sólido	Masa:13.021 kg Volumen:0.00158278 m ³ Densidad:8226.68 kg/m ³ Peso:127.606 N	C:\Users\Józè\Desktop\SW-Halo\Halo-acero.SLDPRT Mar 02 21:21:21 2019

IV. Apéndices

Propiedades de estudio

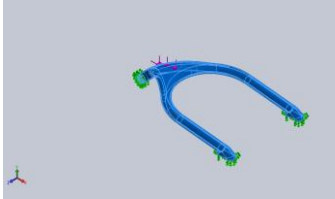
Nombre de estudio	Estudio 1
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	FFEPlus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

Unidades

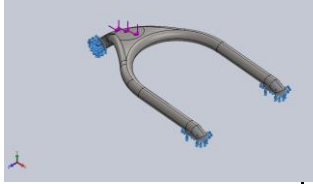
Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

IV. Apéndices

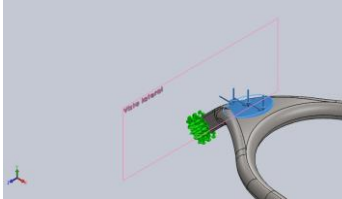
Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes	
	Nombre:	AerMet 100	Sólido 1(Línea de partición4)(Halo-acero)
	Tipo de modelo:	Isotrópico elástico lineal	
	Criterio de error predeterminado:	Tensión de von Mises máx.	
	Límite elástico:	1.705e+009 N/m ²	
	Límite de tracción:	2.03e+009 N/m ²	
	Módulo elástico:	1.98e+011 N/m ²	
	Coefficiente de Poisson:	0.306	
	Densidad:	8220 kg/m ³	
	Módulo cortante:	7.485e+010 N/m ²	
	Coefficiente de dilatación térmica:	1.1e-005 /Kelvin	
Datos de curva:N/A			

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción			
Fijo-1		Entidades:	5 cara(s)		
		Tipo:	Geometría fija		
Fuerzas resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Fuerza de reacción(N)	-46046.7	115970	-10.1722	124777	
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0	

IV. Apéndices

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Fuerza-1		Entidades: Referencia: Tipo: Valores:	1 cara(s), 1 plano(s) Vista lateral Aplicar fuerza ---, -116000, 46000 N

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	33.1659 mm
Tamaño mínimo del elemento	6.63318 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	22848
Número total de elementos	11559
Cociente máximo de aspecto	4040.9
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	37.6
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	7.71
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:13
Nombre de computadora:	JÓZÈ-HP

IV. Apéndices



Información sobre el control de malla:

Nombre del control de malla	Imagen del control de malla	Detalles del control de malla
Control-1		Entidades: 1 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 8.29204 Coefficiente: 1.5
Control-2		Entidades: 2 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 6.63363 Coefficiente: 1.5
Control-3		Entidades: 1 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 8.29204 Coefficiente: 1.5

IV. Apéndices

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

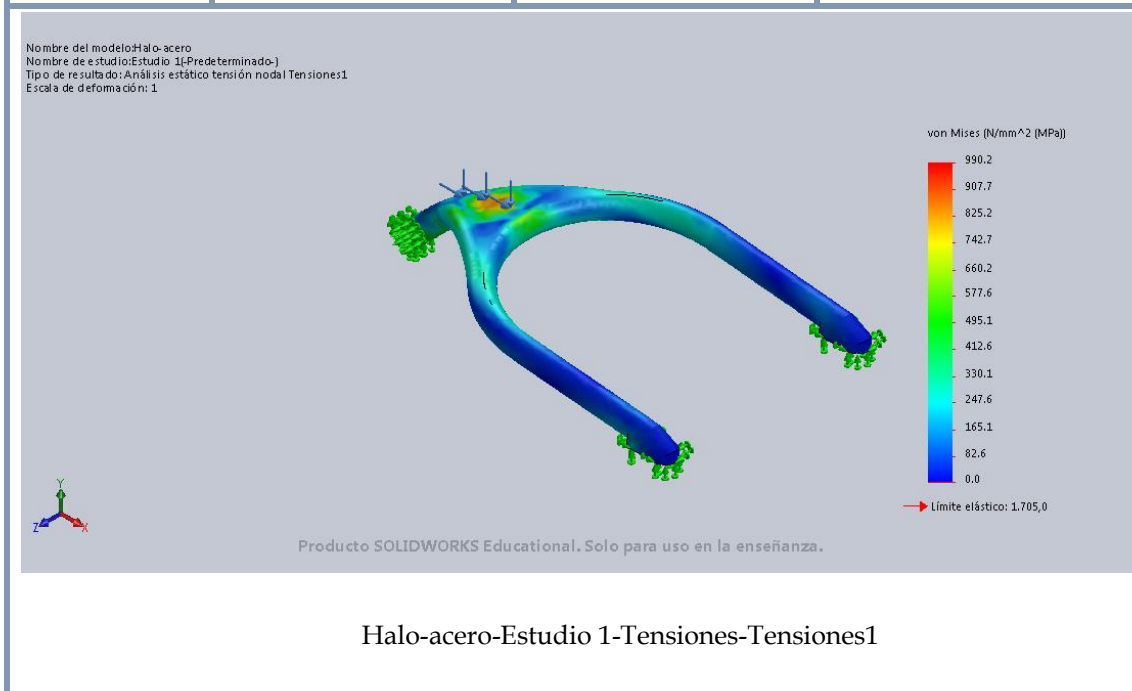
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-46046.7	115970	-10.1722	124777

Momentos de reacción

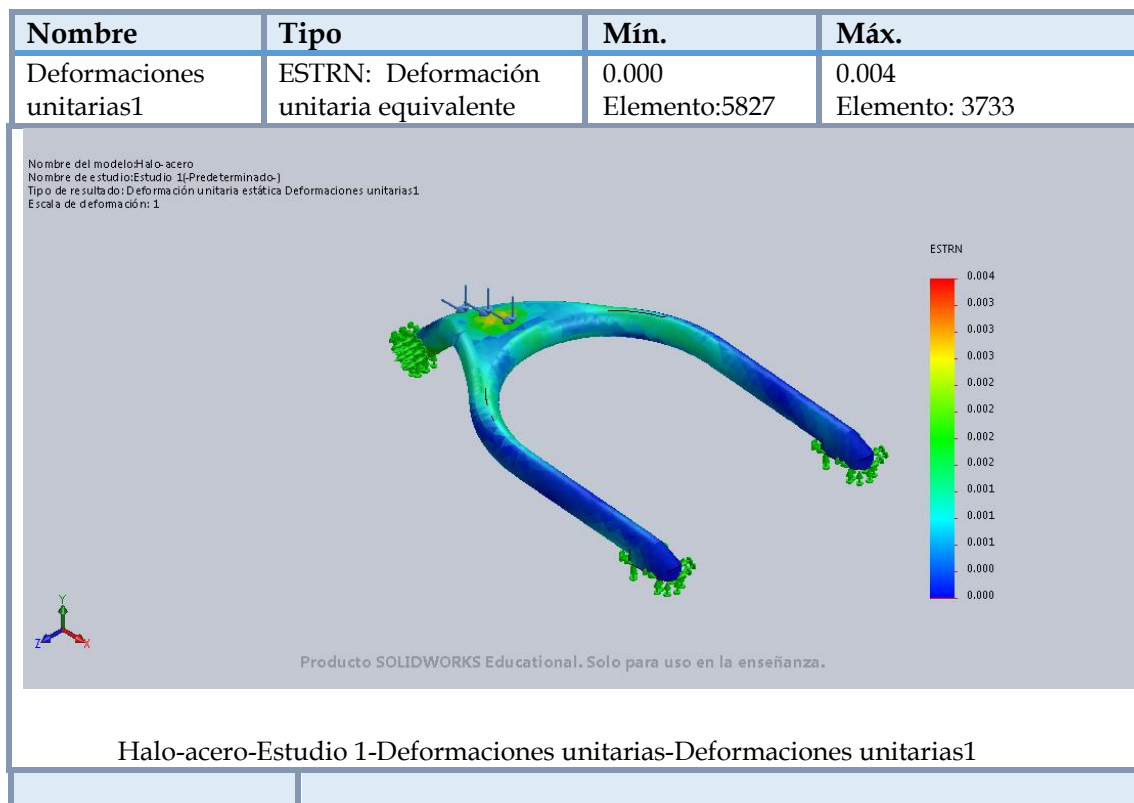
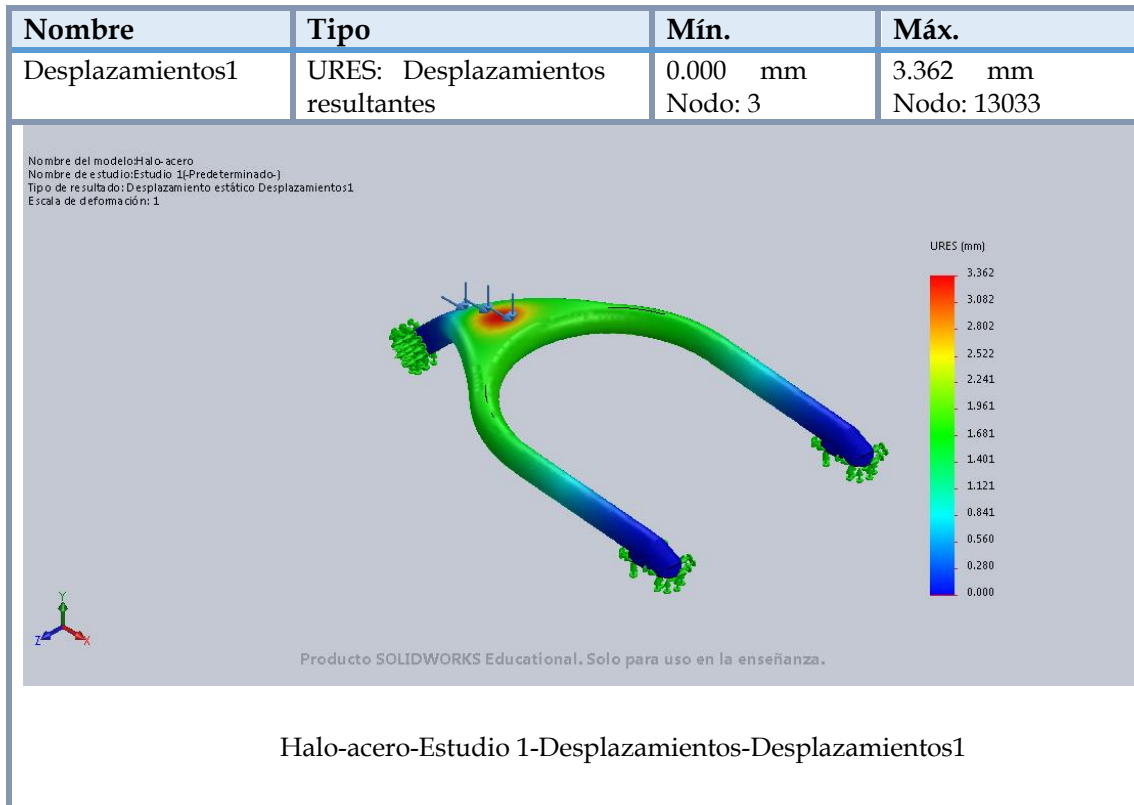
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	0.0 N/mm ² (MPa) Nodo: 10349	990.2 N/mm ² (MPa) Nodo: 3040



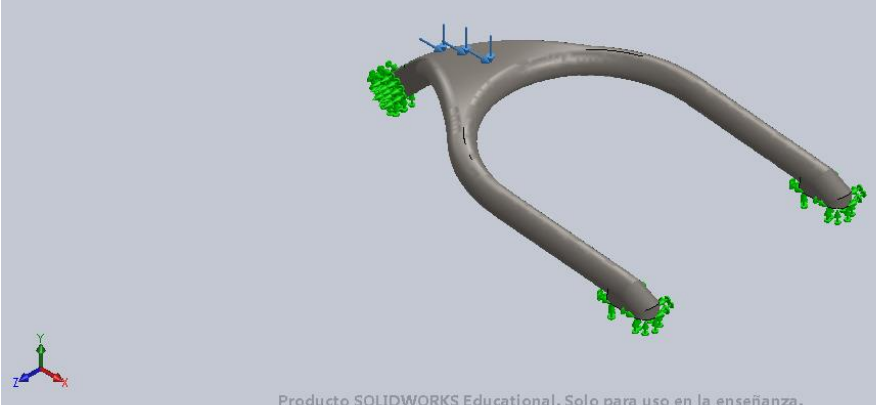
IV. Apéndices



IV. Apéndices

Nombre	Tipo
Desplazamientos1{1}	Deformada

Nombre del modelo: Halo-acero
Nombre de estudio: Estudio 1 (Predeterminado)
Tipo de resultado: Deformada Desplazamientos1{1}
Escala de deformación: 1

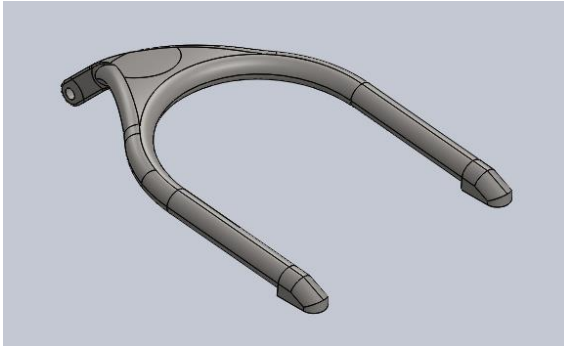


Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Halo-acero-Estudio 1-Desplazamientos-Desplazamientos1{1}

IV. Apéndices

IV.2.4. Test 2: Halo fabricado con AerMet 100.



Simulación de Halo- acero

Fecha: lunes, 08 de abril de 2019

Diseñador: José Manuel Cano Cortés

Nombre de estudio: Estudio 2

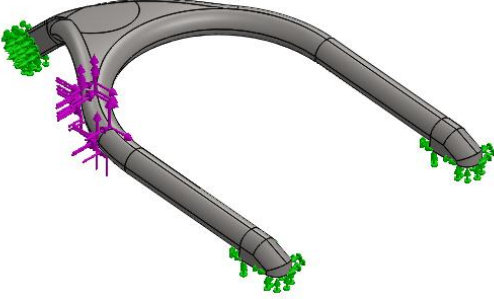
Tipo de análisis: Análisis estático

Descripción

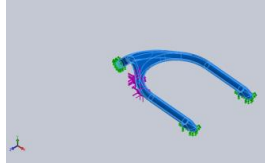
Halo fabricado con aleación de acero
AerMet 100. TEST 2.

IV. Apéndices

Información de modelo



Nombre del modelo: Halo-acero
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición4 	Sólido	Masa:13.021 kg Volumen:0.00158278 m ³ Densidad:8226.68 kg/m ³ Peso:127.606 N	C:\Users\Józè\Desktop\SW-Halo\Halo-acero.SLDPRT Mar 02 21:21:21 2019

IV. Apéndices

Propiedades de estudio

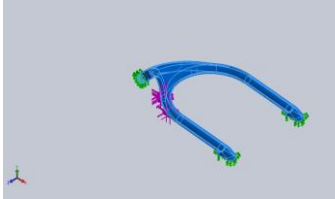
Nombre de estudio	Estudio 2
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	FFEPlus
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\Józè\Desktop\SW-Halo)

Unidades

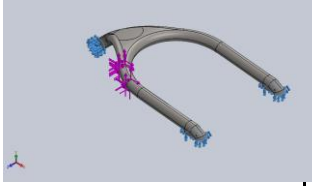
Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

IV. Apéndices

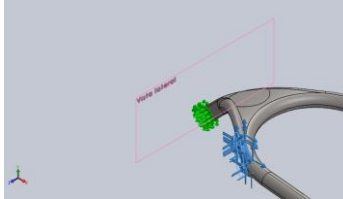
Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes	
	Nombre:	AerMet 100	Sólido 1(Línea de partición4)(Halo-titanium)
	Tipo de modelo:	Isotrópico elástico lineal	
	Criterio de error predeterminado:	Tensión de von Mises máx.	
	Límite elástico:	1.705e+009 N/m ²	
	Límite de tracción:	2.03e+009 N/m ²	
	Módulo elástico:	1.98e+011 N/m ²	
	Coefficiente de Poisson:	0.306	
	Densidad:	8220 kg/m ³	
	Módulo cortante:	7.485e+010 N/m ²	
	Coefficiente de dilatación térmica:	1.1e-005 /Kelvin	
Datos de curva:N/A			

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción			
Fijo-1		Entidades:	5 cara(s)		
		Tipo:	Geometría fija		
Fuerzas resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Fuerza de reacción(N)	-332001	0.528198	371997	498604	
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0	

IV. Apéndices

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Fuerza-1		Entidades: Referencia: Tipo: Valores:	4 cara(s), 1 plano(s) Vista lateral Aplicar fuerza 93000, 0, 83000 N

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	33.1659 mm
Tamaño mínimo del elemento	6.63318 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	22013
Número total de elementos	11141
Cociente máximo de aspecto	4331.2
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	38
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	8.17
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:14
Nombre de computadora:	JÓZÈ-HP

IV. Apéndices



Información sobre el control de malla:

Nombre del control de malla	Imagen del control de malla	Detalles del control de malla
Control-1		Entidades: 1 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 8.29204 Coficiente: 1.5

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

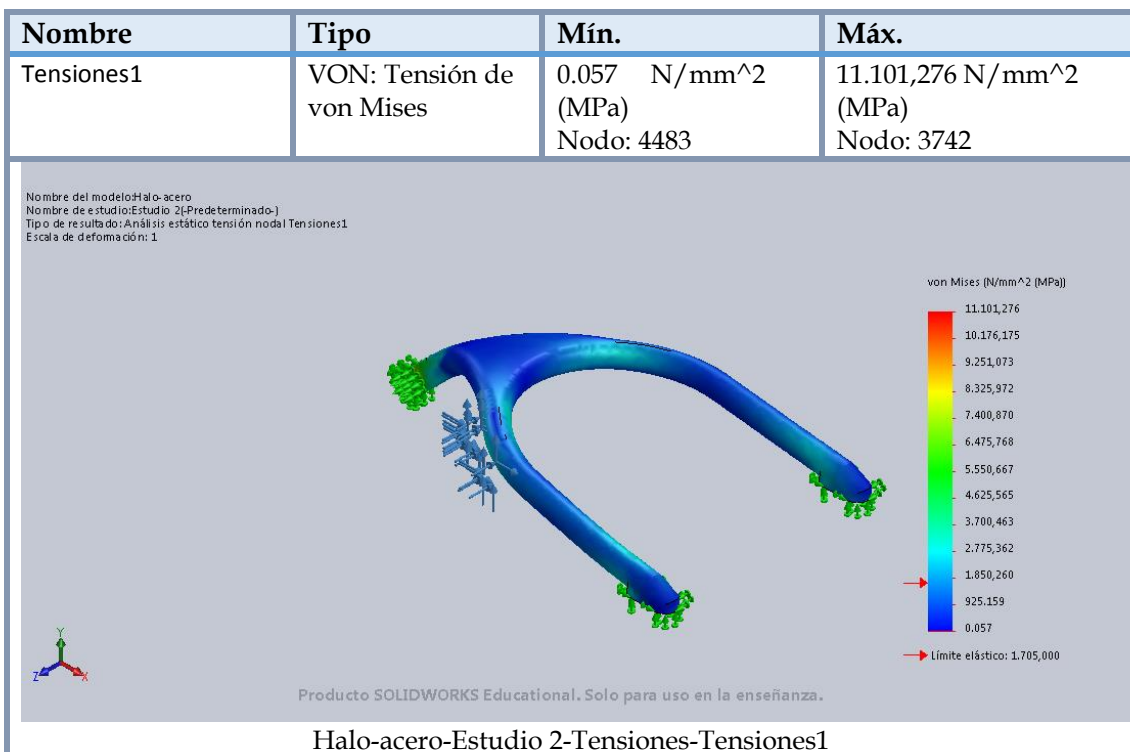
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-332001	0.528198	371997	498604

IV. Apéndices

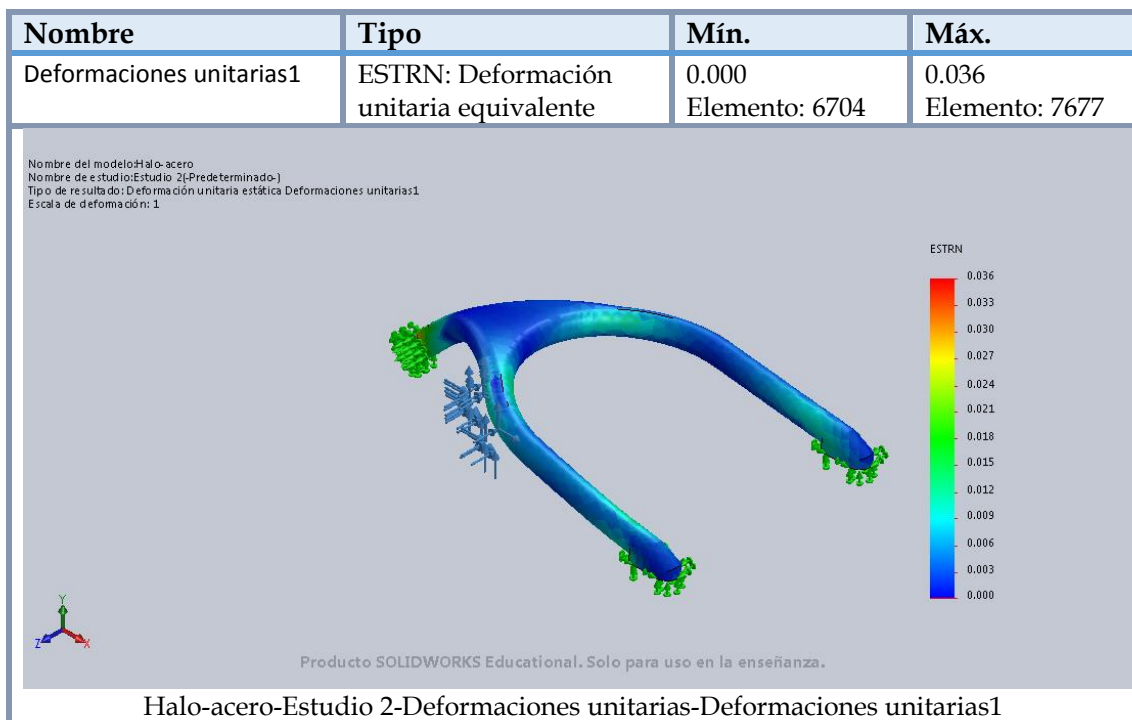
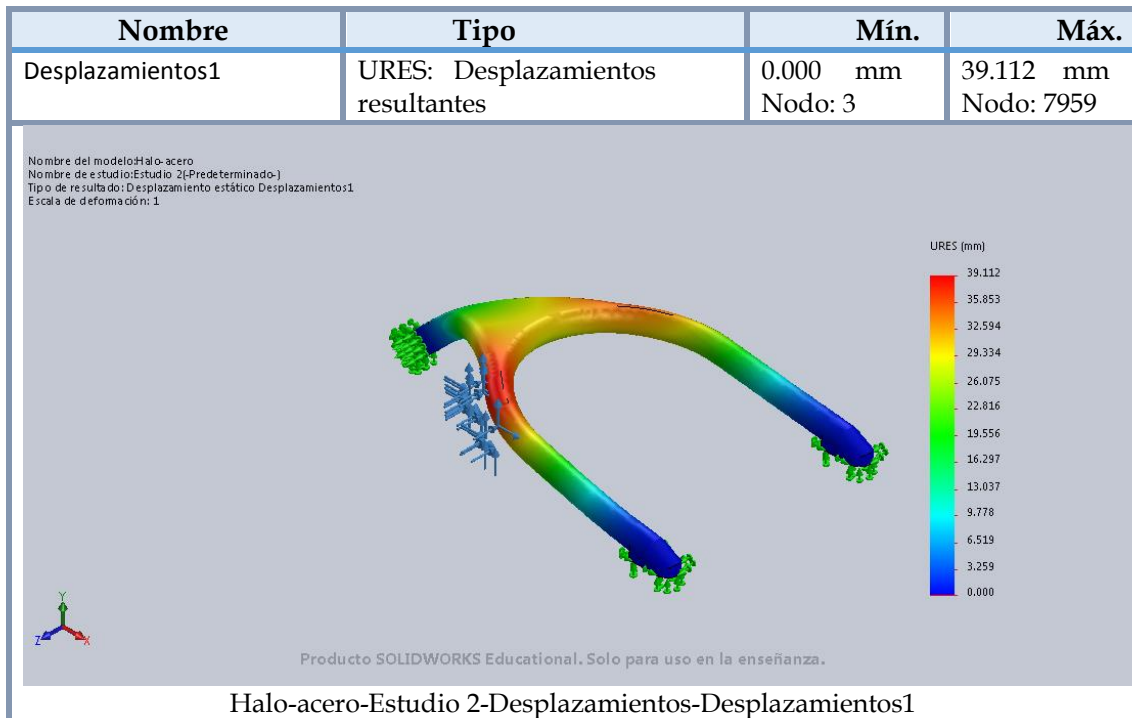
Momentos de reacción

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

Resultados del estudio

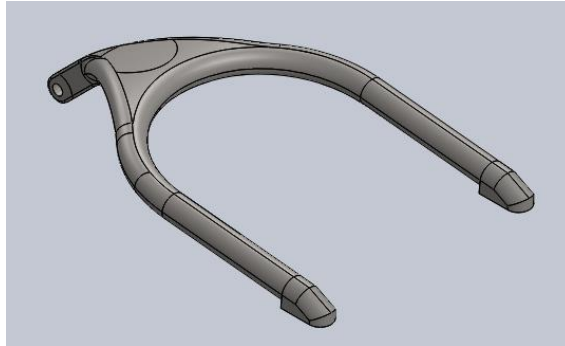


IV. Apéndices



IV. Apéndices

IV.2.5. Test 1: Halo fabricado con CF-EP.



Simulación de Halo.CF-EP

Fecha: lunes, 08 de abril de 2019

Diseñador: José Manuel Cano Cortés

Nombre de estudio: Estudio 1


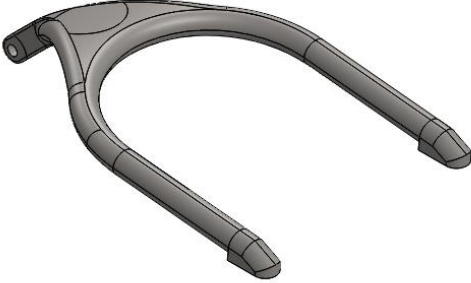
Tipo de análisis: Análisis estático

Descripción


Halo fabricado con CF-EP. TEST 1

IV. Apéndices

Información de modelo



Nombre del modelo: Halo.CF-EP
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición4 	Sólido	Masa:2.4553 kg Volumen:0.00158278 m ³ Densidad:1551.26 kg/m ³ Peso:24.0619 N	C:\Users\Józè\Desktop\SW-Halo\Halo.CF-EP.SLDPRT Apr 06 20:31:27 2019

IV. Apéndices

Propiedades de estudio

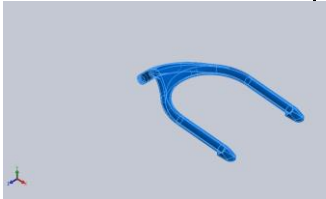
Nombre de estudio	Estudio 1
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	FFEPlus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

Unidades


Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

IV. Apéndices

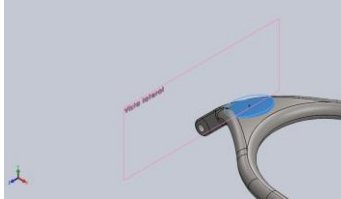
Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes	
	Nombre:	CF-EP	Sólido 1(Línea de partición4)(Halo-acero)
	Tipo de modelo:	Isotrópico elástico lineal	
	Criterio de error predeterminado:	Tensión de von Mises máx.	
	Límite elástico:	1.58985e+009 N/m ²	
	Límite de tracción:	1.7665e+009 N/m ²	
	Límite de compresión:	1.0809e+009 N/m ²	
	Módulo elástico:	6.90207e+010 N/m ²	
	Coefficiente de Poisson:	0.297	
	Densidad:	1550 kg/m ³	
	Módulo cortante:	2.66008e+010 N/m ²	
Coefficiente de dilatación térmica:	1.1e-005 /Kelvin		
Datos de curva:N/A			

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción			
Fijo-1		Entidades:	5 cara(s)		
		Tipo:	Geometría fija		
Fuerzas resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Fuerza de reacción(N)	-46047.2	116011	-21.304	124816	
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0	

IV. Apéndices

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Fuerza-1		Entidades: Referencia: Tipo: Valores:	1 cara(s), 1 plano(s) Vista lateral Aplicar fuerza ---, -116000, 46000 N

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	33.1659 mm
Tamaño mínimo del elemento	6.63318 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden




Información de malla - Detalles

Número total de nodos	22848
Número total de elementos	11559
Cociente máximo de aspecto	4040.9
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	37.6
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	7.71
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:13
Nombre de computadora:	JÓZÈ-HP

IV. Apéndices



Información sobre el control de malla:

Nombre del control de malla	Imagen del control de malla	Detalles del control de malla
Control-1		Entidades: 1 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 8.29204 Coefficiente: 1.5
Control-2		Entidades: 2 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 6.63363 Coefficiente: 1.5
Control-3		Entidades: 1 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 8.29204 Coefficiente: 1.5

IV. Apéndices

Fuerzas resultantes

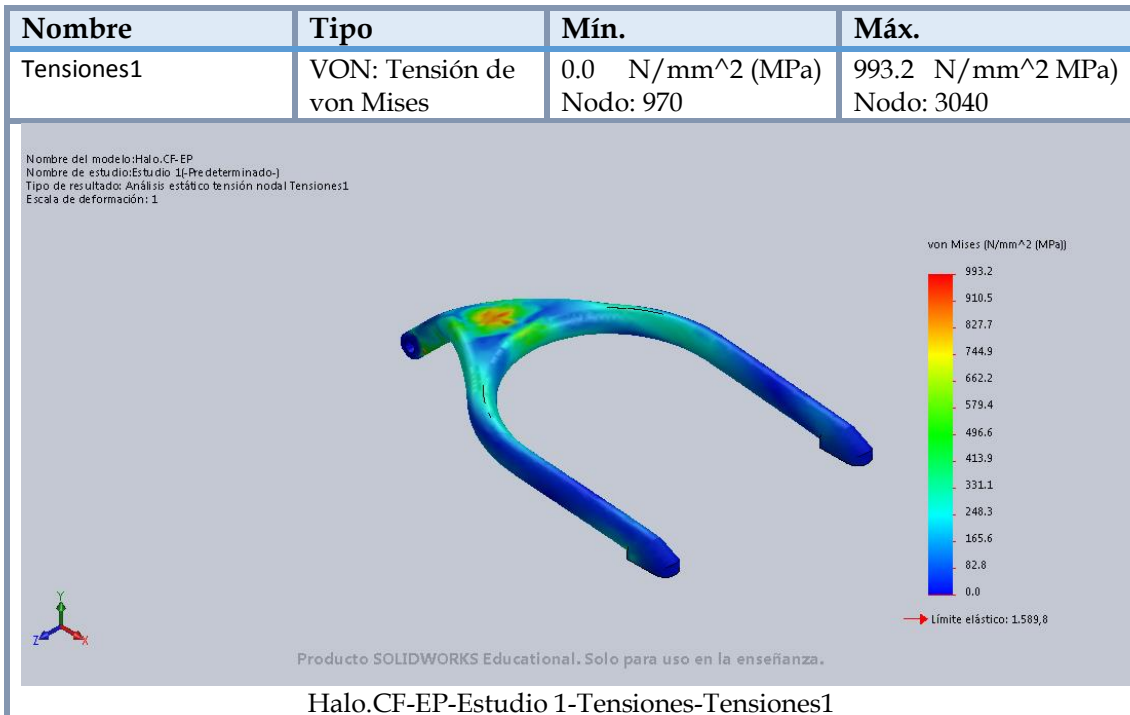
Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-46047.2	116011	-21.304	124816

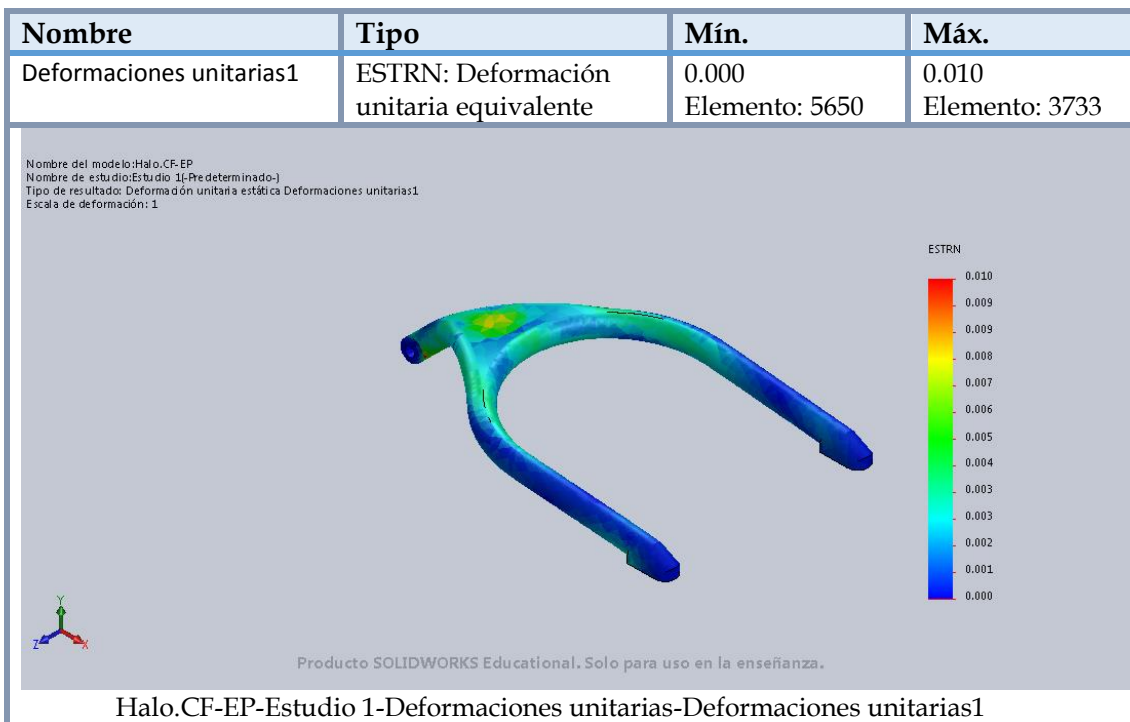
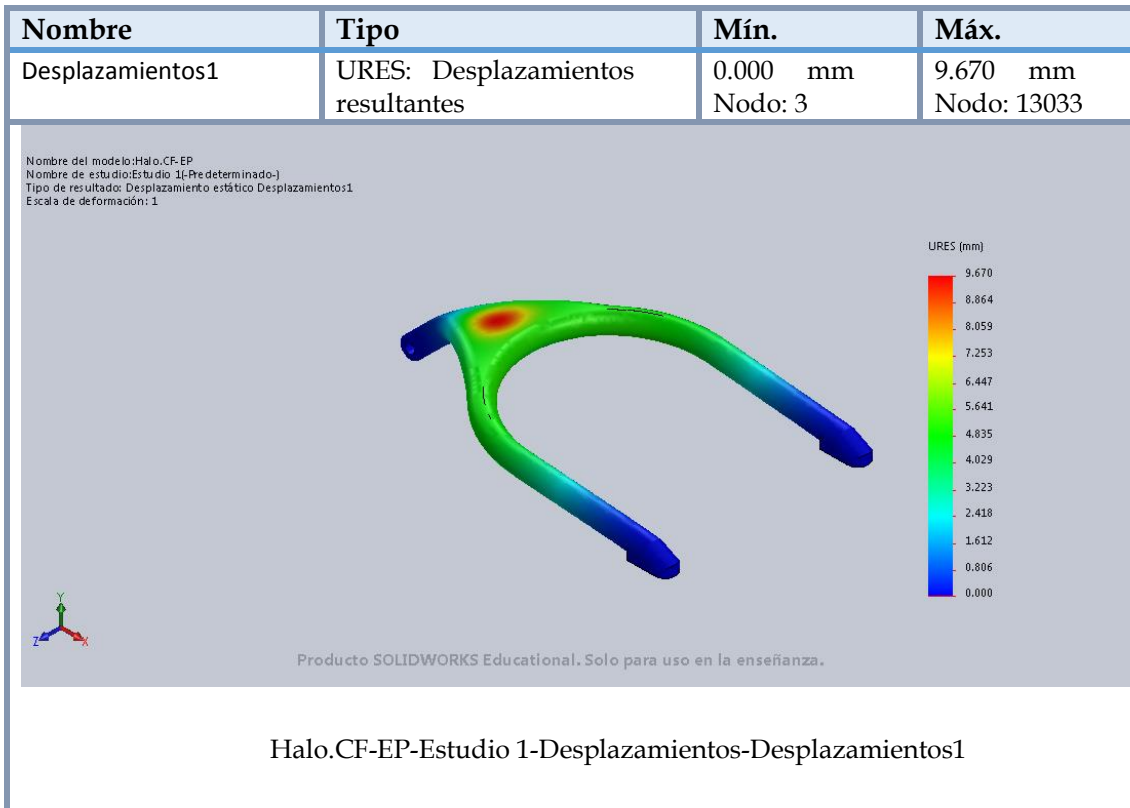
Momentos de reacción

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

Resultados del estudio




IV. Apéndices




IV. Apéndices

Nombre	Tipo
Desplazamientos1{1}	Deformada

Nombre del modelo: Halo.CF-EP
Nombre de estudio: Estudio 1-(Pre-determinado-)
Tipo de resultado: Deformada Desplazamientos1{1}
Escala de deformación: 1



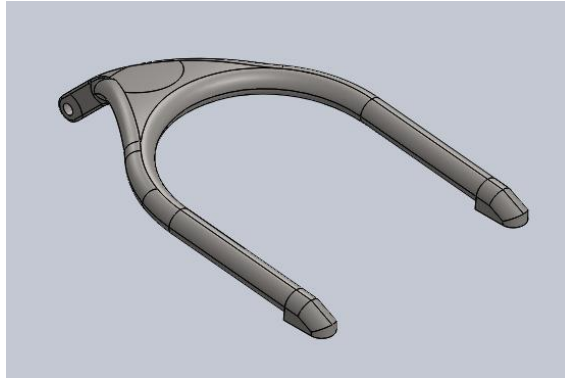


Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Halo.CF-EP-Estudio 1-Desplazamientos-Desplazamientos1{1}

IV. Apéndices

IV.2.6. Test 2: Halo fabricado con CF-EP.



Simulación de Halo.CF-EP

Fecha: lunes, 08 de abril de 2019

Diseñador: José Manuel Cano Cortés

Nombre de estudio: Estudio 2


Tipo de análisis: Análisis estático

Descripción

Halo fabricado con CF-EP. TEST 2.

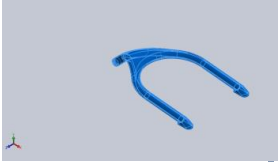
IV. Apéndices

Información de modelo



Nombre del modelo: Halo.CF-EP
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición4 	Sólido	Masa:2.4553 kg Volumen:0.00158278 m ³ Densidad:1551.26 kg/m ³ Peso:24.0619 N	C:\Users\Józè\Desktop\SW-Halo\Halo.CF-EP.SLDPRT Apr 06 20:31:27 2019

IV. Apéndices

Propiedades de estudio


Nombre de estudio	Estudio 2
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\Józè\Desktop\SW-Halo)

Unidades


Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

IV. Apéndices

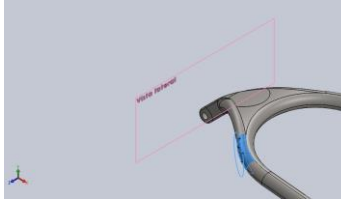
Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes	
	Nombre:	CF-EP	Sólido 1(Línea de partición4)(Halo-titanium)
	Tipo de modelo:	Isotrópico elástico lineal	
	Criterio de error predeterminado:	Tensión de von Mises máx.	
	Límite elástico:	1.58985e+009 N/m ²	
	Límite de tracción:	1.7665e+009 N/m ²	
	Límite de compresión:	1.0809e+009 N/m ²	
	Módulo elástico:	6.90207e+010 N/m ²	
	Coefficiente de Poisson:	0.297	
	Densidad:	1550 kg/m ³	
	Módulo cortante:	2.66008e+010 N/m ²	
Coefficiente de dilatación térmica:	1.1e-005 /Kelvin		
Datos de curva:N/A			

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades:	5 cara(s)	
		Tipo:	Geometría fija	
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-332034	-33.464	372002	498630
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

IV. Apéndices

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Fuerza-1		Entidades: Referencia: Tipo: Valores:	4 cara(s), 1 plano(s) Vista lateral Aplicar fuerza 93000, 0, 83000 N

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	33.1659 mm
Tamaño mínimo del elemento	6.63318 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	22013
Número total de elementos	11141
Cociente máximo de aspecto	4331.2
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	38
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	8.17
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:14
Nombre de computadora:	JÓZÈ-HP

IV. Apéndices



Información sobre el control de malla:

Nombre del control de malla	Imagen del control de malla	Detalles del control de malla
Control-1		Entidades: 1 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 8.29204 Coficiente: 1.5

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

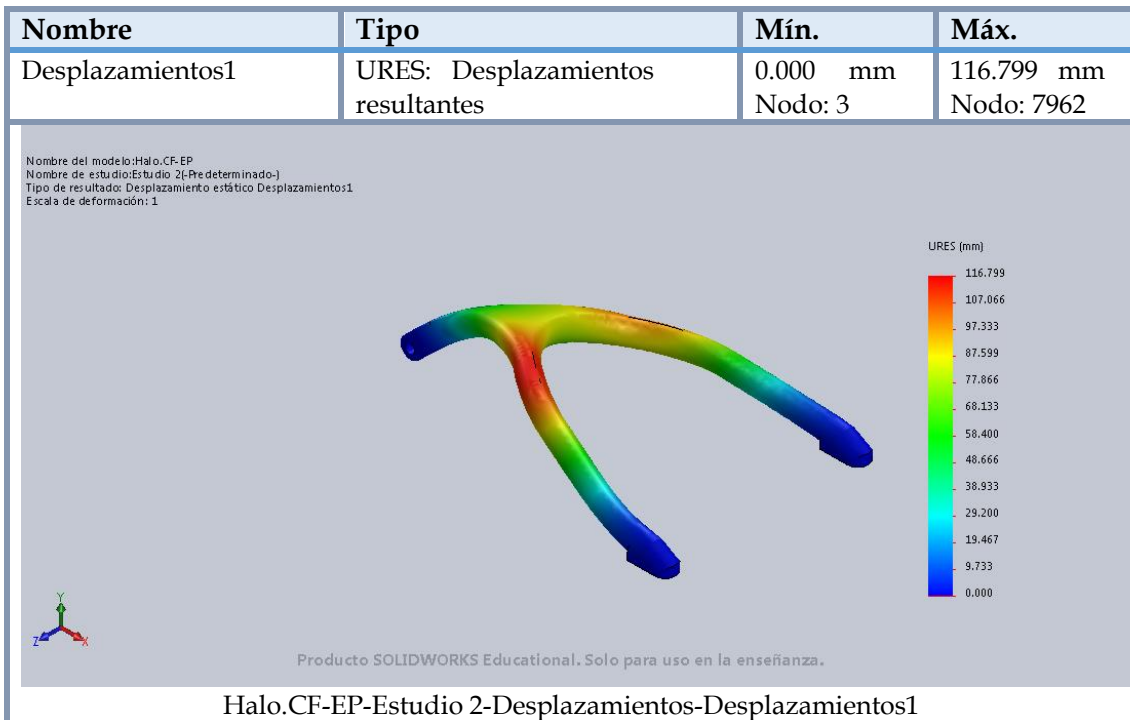
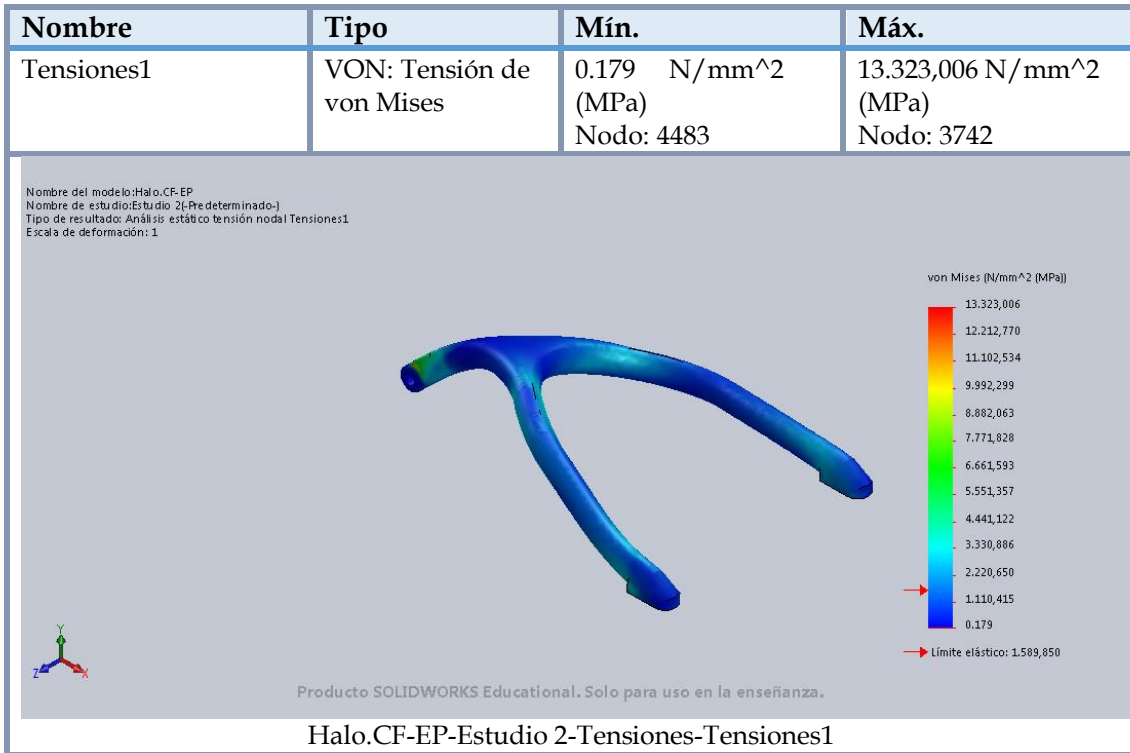
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-332034	-33.464	372002	498630

Momentos de reacción

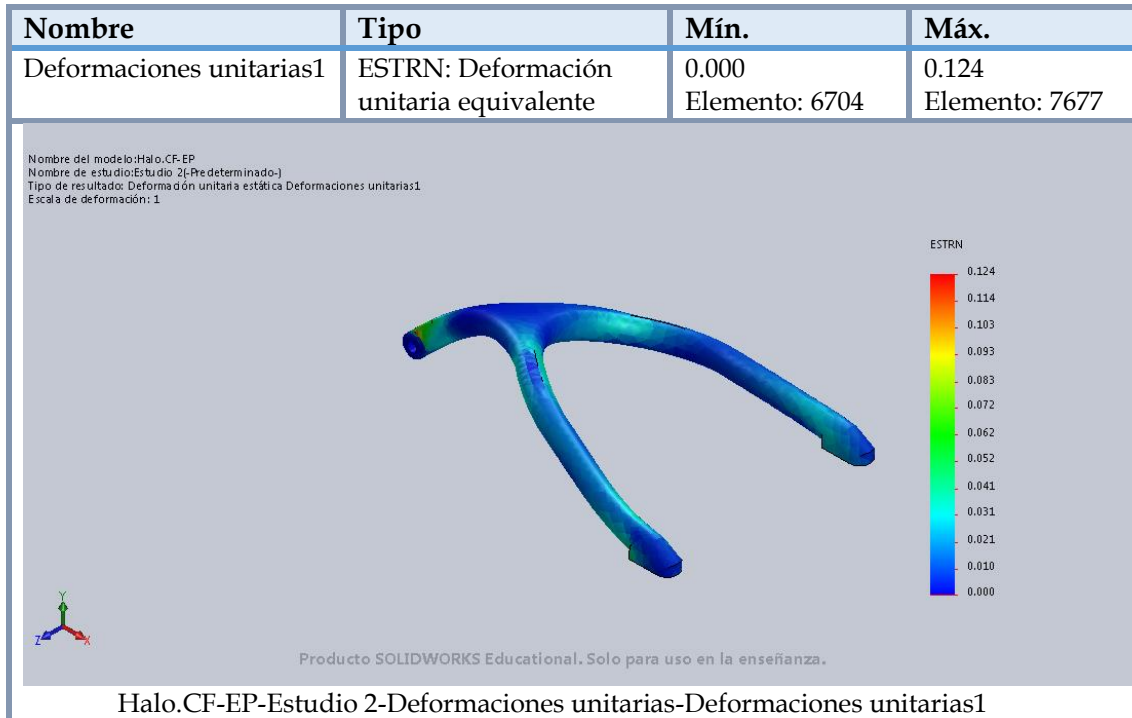
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

IV. Apéndices

Resultados del estudio

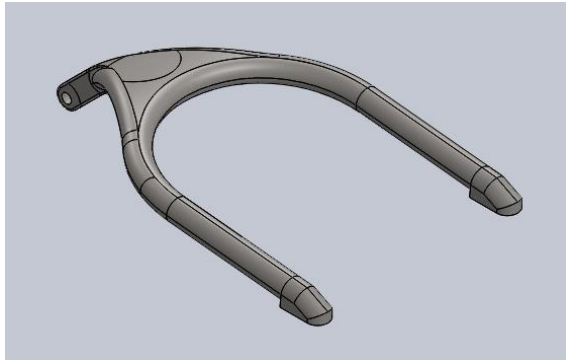


IV. Apéndices



IV. Apéndices

IV.2.7. Test 1: Halo fabricado con CF-EP aumentando el espesor.



Simulación de Halo.CF-EP. aumento espesor

Fecha: lunes, 08 de abril de 2019

Diseñador: José Manuel Cano Cortés

Nombre de estudio: Estudio 1

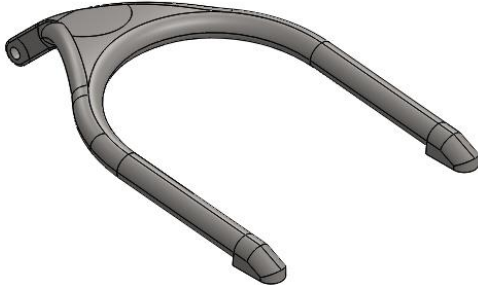

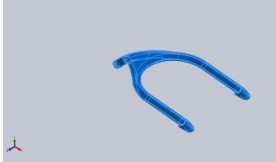
Tipo de análisis: Análisis estático

Descripción

Halo fabricado con CF-EP aumentando su espesor. TEST 1.

IV. Apéndices

Información de modelo

			
			
Nombre del modelo: Halo.CF-EP. aumento espesor Configuración actual: Predeterminado			
Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición4 	Sólido	Masa:2.94611 kg Volumen:0.00189893 m ³ Densidad:1551.46 kg/m ³ Peso:28.8719 N	C:\Users\Józe\Desktop\SW-Halo\Halo.CF-EP.aumento espesor.SLDPRT Apr 07 02:17:43 2019

IV. Apéndices

Propiedades de estudio

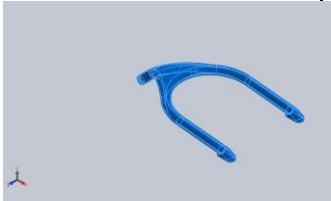
Nombre de estudio	Estudio 1
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	FFEPlus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

Unidades

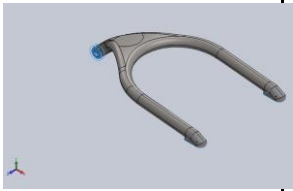
Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

IV. Apéndices

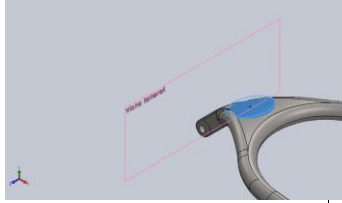
Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes	
	Nombre:	CF-EP	Sólido 1(Línea de partición4)(Halo.CF-EP. aumento espesor)
	Tipo de modelo:	Isotrópico elástico lineal	
	Criterio de error predeterminado:	Tensión de von Mises máx.	
	Límite elástico:	1.58985e+009 N/m ²	
	Límite de tracción:	1.7665e+009 N/m ²	
	Límite de compresión:	1.0809e+009 N/m ²	
	Módulo elástico:	6.90207e+010 N/m ²	
	Coefficiente de Poisson:	0.297	
	Densidad:	1550 kg/m ³	
	Módulo cortante:	2.66008e+010 N/m ²	
	Coefficiente de dilatación térmica:	1.1e-005 /Kelvin	
	Datos de curva:N/A		

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades:	5 cara(s)	
		Tipo:	Geometría fija	
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-46025.5	115971	12.5325	124770
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

IV. Apéndices

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Fuerza-1		Entidades: Referencia: Tipo: Valores:	1 cara(s), 1 plano(s) Vista lateral Aplicar fuerza ---, -116000, 46000 N

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	33.1659 mm
Tamaño mínimo del elemento	6.63318 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	19166
Número total de elementos	9578
Cociente máximo de aspecto	2410.8
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	36.7
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	2.56
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:14
Nombre de computadora:	JÓZÈ-HP

IV. Apéndices



Información sobre el control de malla:

Nombre del control de malla	Imagen del control de malla	Detalles del control de malla
Control-1		Entidades: 1 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 8.29204 Coefficiente: 1.5
Control-2		Entidades: 2 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 6.63363 Coefficiente: 1.5
Control-3		Entidades: 1 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 8.29204 Coefficiente: 1.5

IV. Apéndices

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

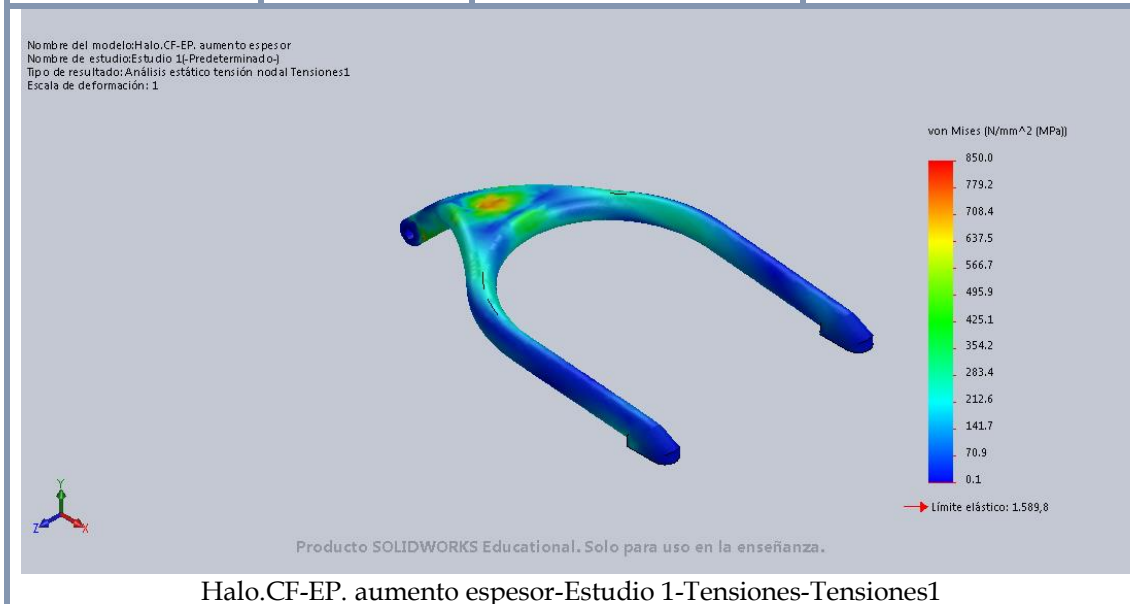
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-46025.5	115971	12.5325	124770

Momentos de reacción

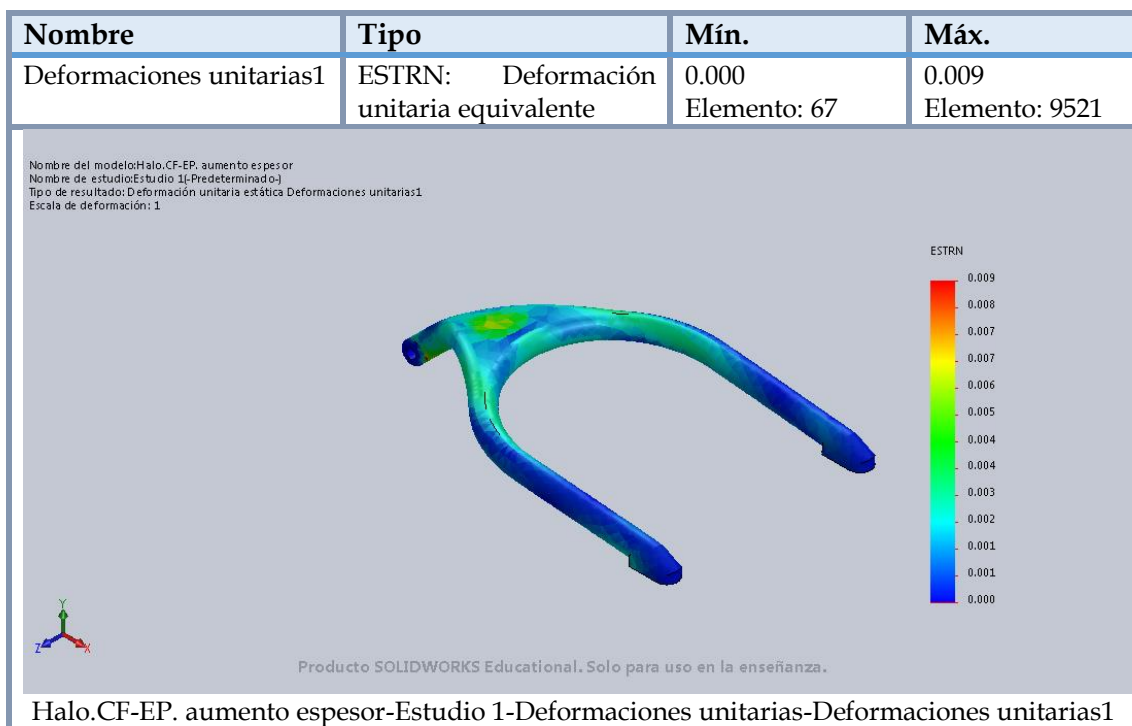
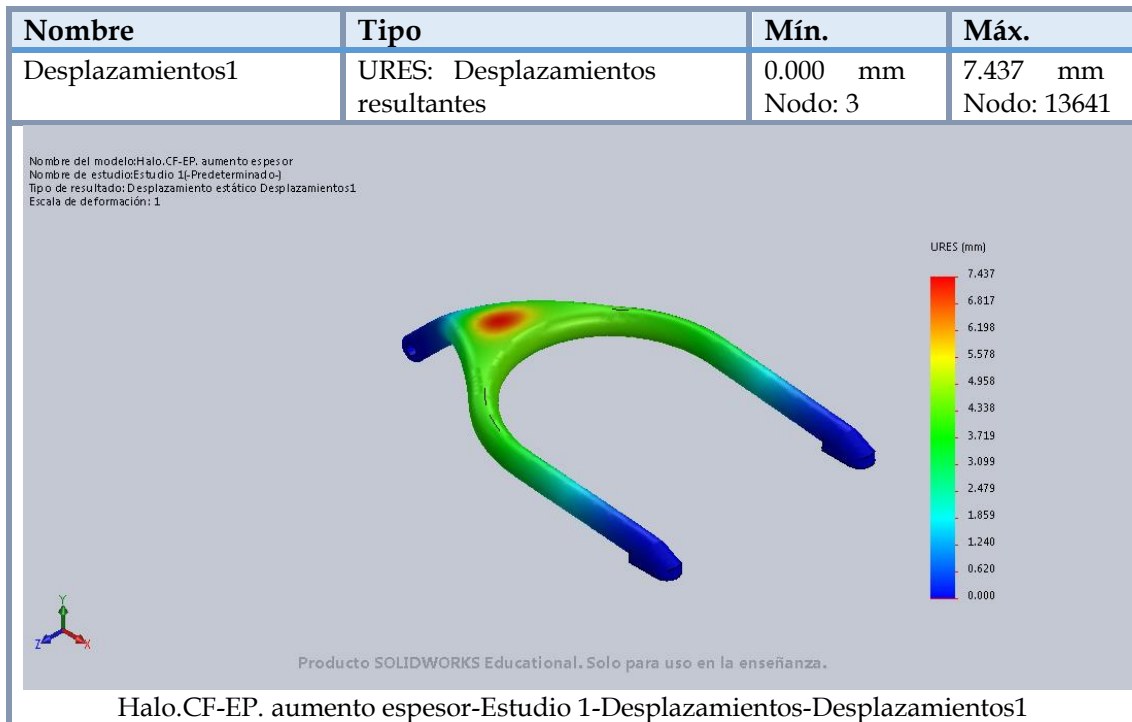
Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N.m	0	0	0	0

Resultados del estudio

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	0.1 N/mm ² (MPa) Nodo: 4084	850.0 N/mm ² (MPa) Nodo: 3220




IV. Apéndices




IV. Apéndices

Nombre	Tipo
Desplazamientos1{1}	Deformada

Nombre del modelo: Halo.CF-EP. aumento espesor
Nombre de estudio: Estudio 1-[Predeterminado]
Tipo de resultado: Deformada Desplazamientos1{1}
Escala de deformación: 1



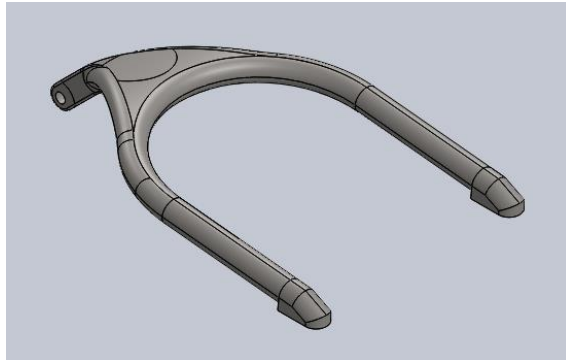


Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

Halo.CF-EP. aumento espesor-Estudio 1-Desplazamientos-Desplazamientos1{1}

IV. Apéndices

IV.2.8. Test 2: Halo fabricado con CF-EP aumentando el espesor.



Simulación de Halo.CF-EP. aumento espesor

Fecha: lunes, 08 de abril de 2019

Diseñador: José Manuel Cano Cortés

Nombre de estudio: Estudio 2

Tipo de análisis: Análisis estático

Descripción

Halo fabricado con CF-EP aumentando su espesor. TEST 2.


IV. Apéndices

Información de modelo



Nombre del modelo: Halo.CF-EP. aumento espesor
Configuración actual: Predeterminado

Sólidos

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición4 	Sólido	Masa:2.94611 kg Volumen:0.00189893 m ³ Densidad:1551.46 kg/m ³ Peso:28.8719 N	C:\Users\Józè\Desktop\SW-Halo\Halo.CF-EP. aumento espesor.SLDPRT Apr 07 02:17:43 2019

IV. Apéndices

Propiedades de estudio

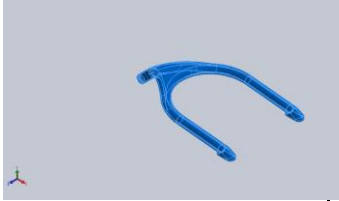
Nombre de estudio	Estudio 2
Tipo de análisis	Análisis estático
Tipo de malla	Malla sólida
Efecto térmico:	Activar
Opción térmica	Incluir cargas térmicas
Temperatura a tensión cero	298 Kelvin
Incluir los efectos de la presión de fluidos desde SOLIDWORKS Flow Simulation	Desactivar
Tipo de solver	FFEPlus
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\Józè\Desktop\SW-Halo)

Unidades


Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

IV. Apéndices

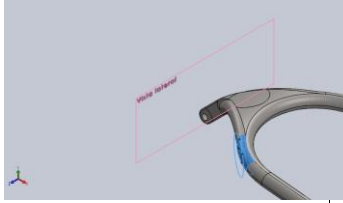
Propiedades de material

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes	
	Nombre:	CF-EP	Sólido 1(Línea de partición4)(Halo.CF-EP. aumento espesor)
	Tipo de modelo:	Isotrópico elástico lineal	
	Criterio de error predeterminado:	Tensión de von Mises máx.	
	Límite elástico:	1.58985e+009 N/m ²	
	Límite de tracción:	1.7665e+009 N/m ²	
	Límite de compresión:	1.0809e+009 N/m ²	
	Módulo elástico:	6.90207e+010 N/m ²	
	Coefficiente de Poisson:	0.297	
	Densidad:	1550 kg/m ³	
	Módulo cortante:	2.66008e+010 N/m ²	
Coefficiente de dilatación térmica:	1.1e-005 /Kelvin		
Datos de curva:N/A			

Cargas y sujeciones

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades:	5 cara(s)	
		Tipo:	Geometría fija	
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-331897	-72.351	371992	498532
Momento de reacción(N.m)	0	0	0	0

IV. Apéndices

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Fuerza-1		Entidades: Referencia: Tipo: Valores:	4 cara(s), 1 plano(s) Vista lateral Aplicar fuerza 93000, 0, 83000 N

Información de malla

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	33.1659 mm
Tamaño mínimo del elemento	6.63318 mm
Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Información de malla - Detalles

Número total de nodos	18711
Número total de elementos	9365
Cociente máximo de aspecto	2410.8
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	36.6
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	2.59
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:13
Nombre de computadora:	JÓZÈ-HP

IV. Apéndices



Información sobre el control de malla:

Nombre del control de malla	Imagen del control de malla	Detalles del control de malla
Control-1		Entidades: 1 arista(s) Unidades: mm Tamaño: 8.29204 Coeficiente: 1.5

Fuerzas resultantes

Fuerzas de reacción

Conjunto de selecciones	Unidades	Sum X	Sum Y	Sum Z	Resultante
Todo el modelo	N	-331897	-72.351	371992	498532

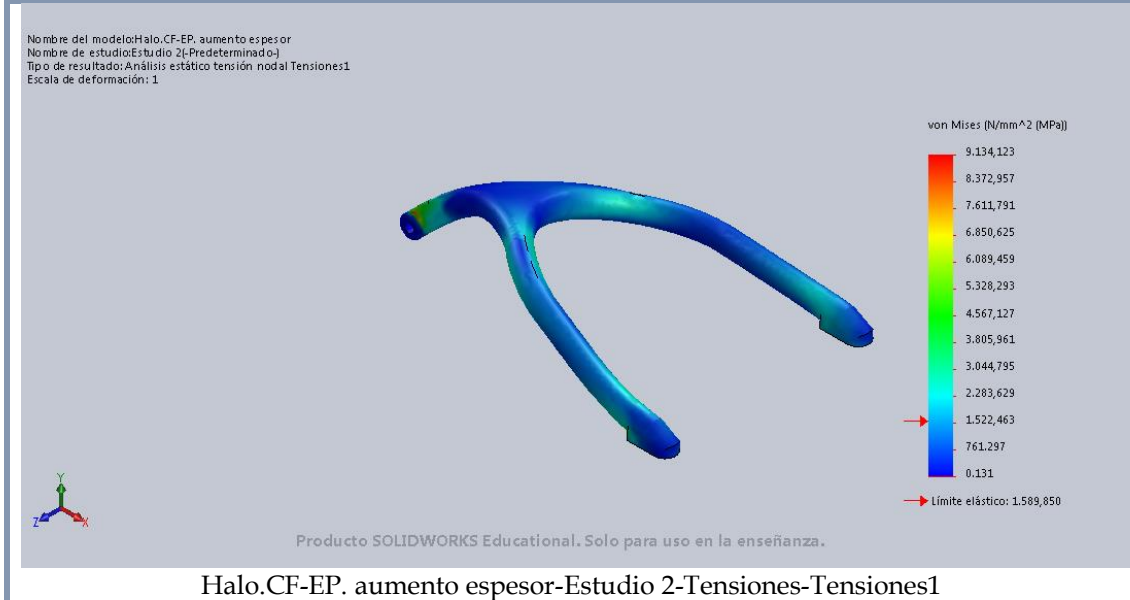
Momentos de reacción

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

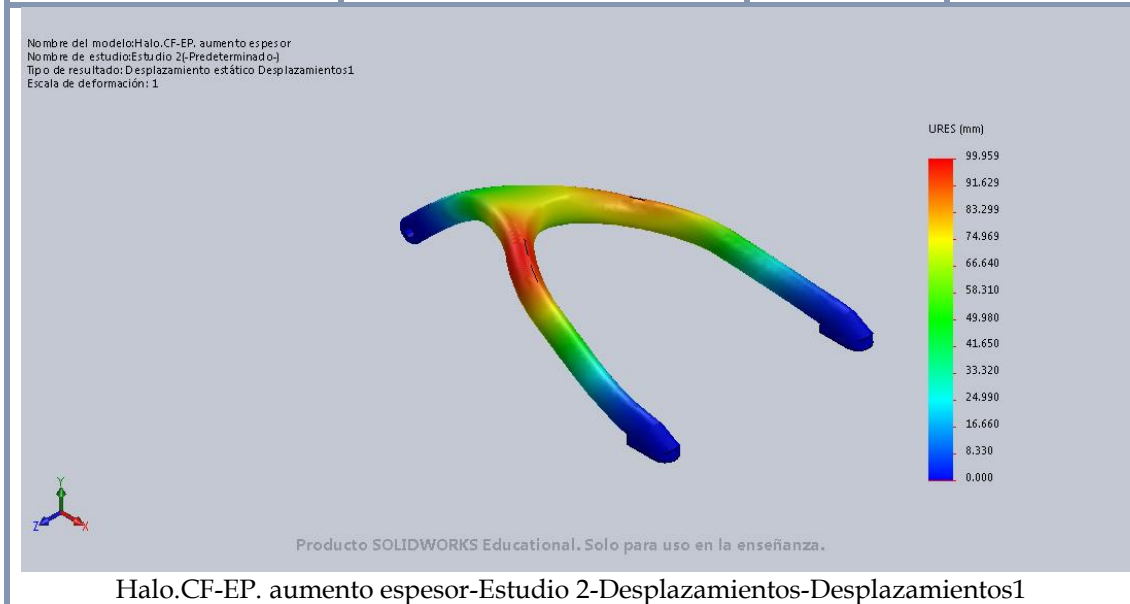
IV. Apéndices

Resultados del estudio

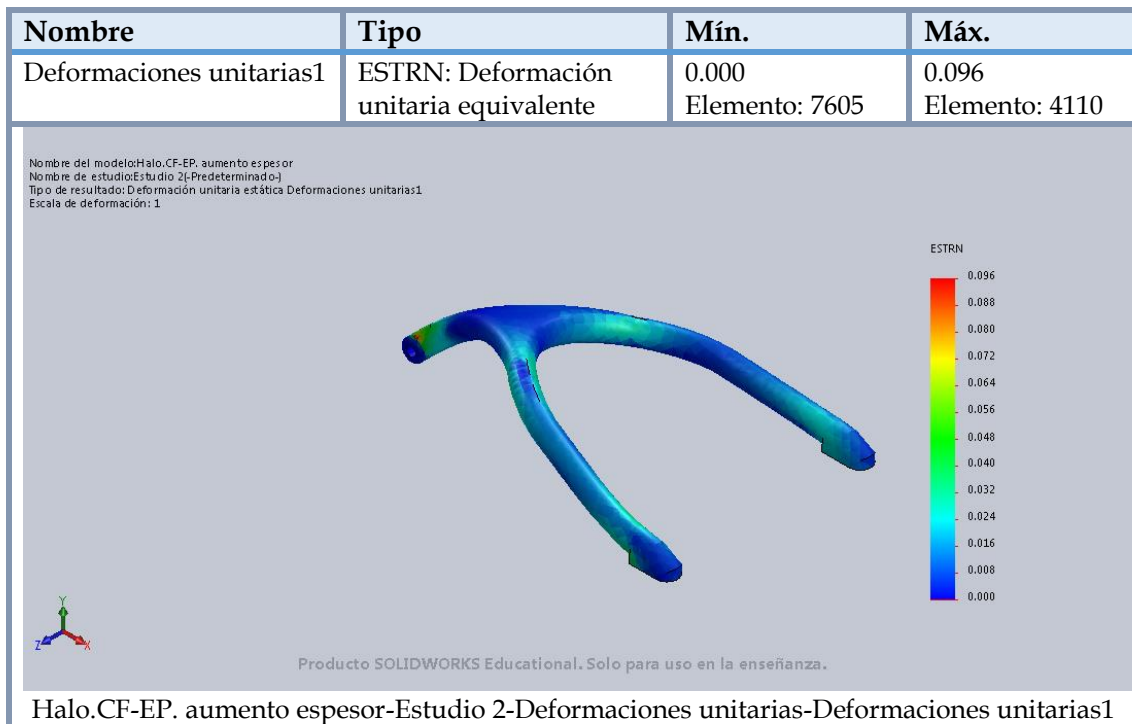
Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	0.131 N/mm ² (MPa) Nodo: 3987	9.134,123 N/mm ² (MPa) Nodo: 5197



Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamientos resultantes	0.000 mm Nodo: 3	99.959 mm Nodo: 6357

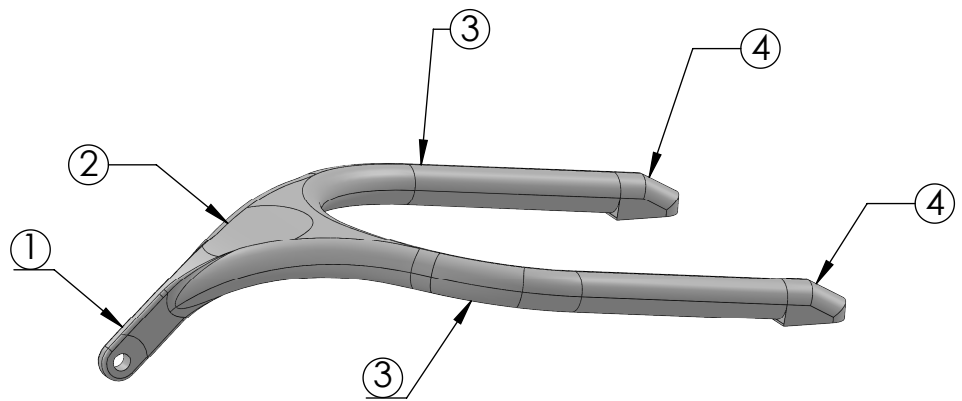
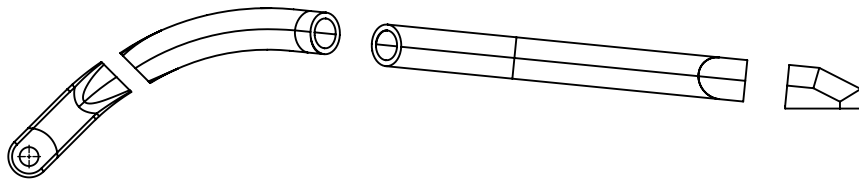
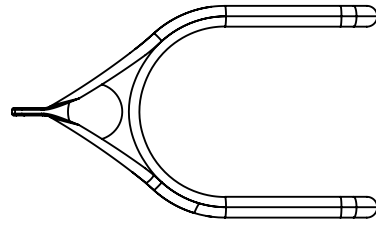
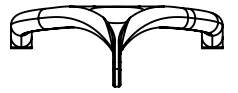
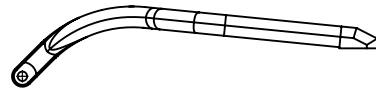


IV. Apéndices


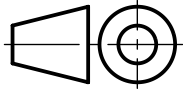


IV.3. PLANOS ACOTADOS.

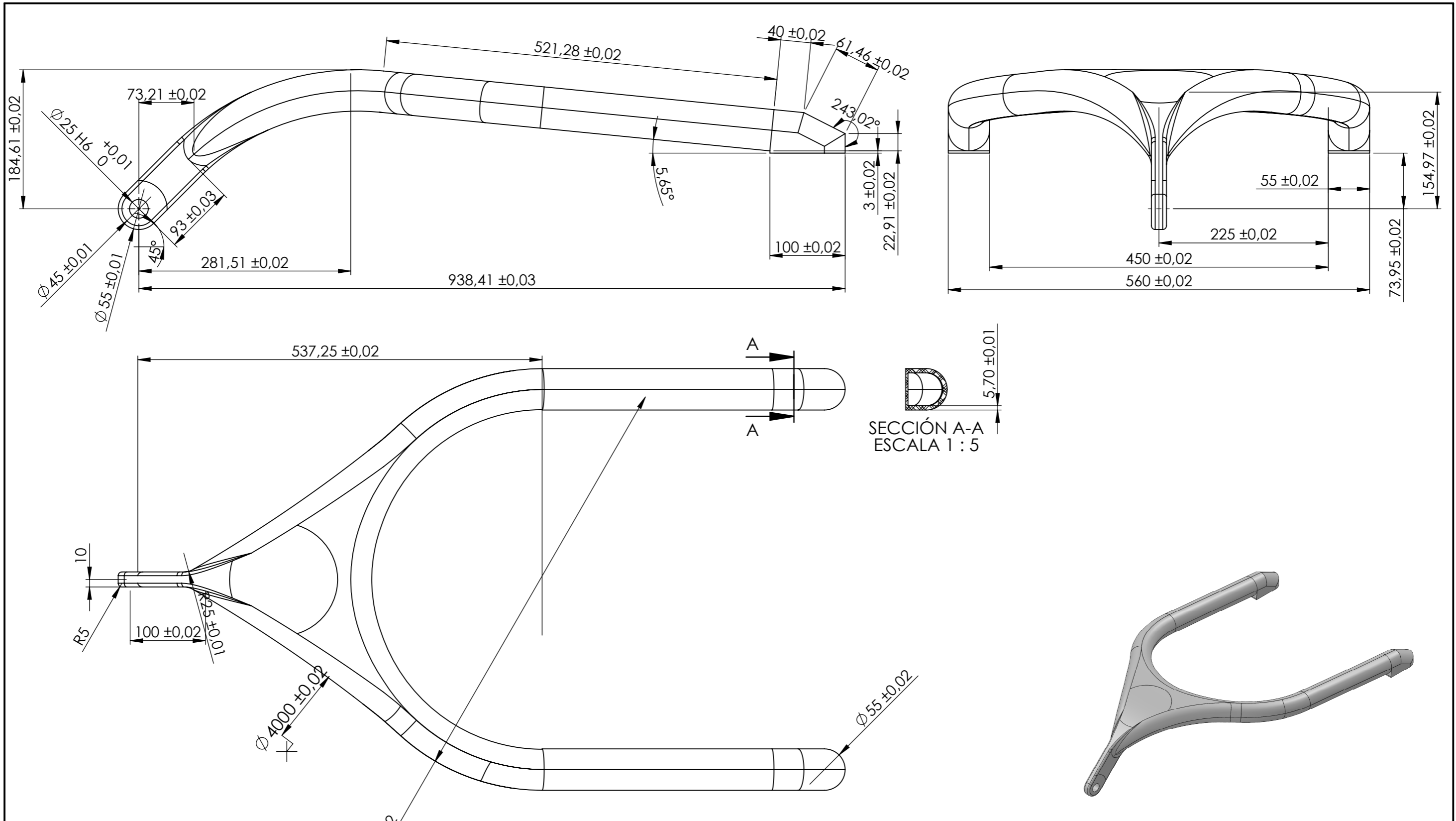
IV. Apéndices


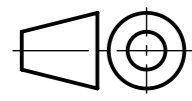


Lista de piezas			
Marca	Cantidad	Denominación	Material
1	1	Central pylon	CF-EP
2	1	V-transition	CF-EP
3	2	Main hoop	CF-EP
4	2	Rear brackets	CF-EP

	Fecha	Nombre	Firma		
Dibujado	30/04/2019	J.M. Cano		 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	
Comprobado					
Aprobado					
Escala: 1:10	Título: HALO: PIEZAS				Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm
				Plano: 1	Hoja: 1/2
				Material: Fibra de carbono con resina Epoxi	

IV. Apéndices



	Fecha	Nombre	Firma
Dibujado	30/04/2019	J.M. Cano	
Comprobado			
Verificado			
Escala:	Título:		
1:5	HALO: ACOTACIÓN		
			 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
			 Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm
Plano: 2		Hoja: 2/2	A3
Material: Fibra de carbono con resina Epoxi			

IV. Apéndices

IV. Apéndices

IV.4. NORMATIVA.

FIA Standard 8869-2018. Single-seater additional frontal protection-Halo.

IV. Apéndices

IV. Apéndice

IV.5. BIBLIOGRAFÍA.

BALART GIMENO, R., LÓPEZ MARTÍNEZ, J., SÁNCHEZ NÁCHER, L., & NADAL GIBERT, A. (s.f.). *Introducció als materials polimèrics i compostos*. Valencia, España: UPV.

CHAMIS, C. (1984). *Simplified Coposite Micromechanics Equations for Strength, Fracture Toughness, Impact Resistance and Environmental Effects*. Houston, Texas, EE.UU.

CUADRADO MORALES, D. (2017). *Carreras de cuádrigas, el mayor deporte de Roma*. Recuperado el 23 de Septiembre de 2018, de Acento Cultural: <http://www.acentocultural.com/blog/carreras-de-cuadrigas-el-mayor-deporte-de-roma/>

ESPINOSA, M., & DOMÍNGUEZ, M. (2010). *Expresión gráfica y diseño asistido en Ingeniería* (2ª ed.). Madrid, España: AIDA.

F. SMITH, W., & HASHEMI, J. (2014). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (5ª ed.). Mc Graw Hill/Interamericana.

GÓMEZ RUIZ, L. (2017). *El físico que descubrió el gran secreto de las carreras de caballos de la antigua Roma*. Recuperado el 1 de Octubre de 2018, de La Vanguardia: <https://www.lavanguardia.com/cultura/20170122/413598220154/secreto-carreras-caballos-antigua-roma.html>

LARBURU, L. (2015). *Máquinas. Prontuario. Técnicas, máquinas, herramientas*. (13ª ed.). Madrid, España: Paraninfo.

O'BRIEN, J. (2018). *SST Technology launches Titanium AFP-Halo*. Recuperado el 22 de Agosto de 2018, de PMW Magazine: <https://www.pmw-magazine.com/news/driver-safety/sstt-titanium-halo.html>

ORTIZ, R. (2016). *Así ha sido la evolución de la seguridad en la F1*. Recuperado el 16 de Noviembre de 2018, de Unocero: <https://www.unocero.com/autos/asi-ha-sido-la-evolucion-de-la-seguridad-en-la-f1/>

IV. Apéndices

PARKIN, C. (2018). *Así han revolucionado los monos de los pilotos de la F1 a lo largo de los años*. Recuperado el 2 de Noviembre de 2018, de Red Bull: <https://www.redbull.com/es-es/evolucion-f1-monos-carreras>

RODRÍGUEZ RIUS, D. (1999). Tesis Doctoral. *Obtención de capas de nitruro de titanio mediante tratamiento termoquímico en titanio y Ti6Al4V y caracterización de sus propiedades para aplicaciones biomédicas*. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya.

RODRÍGUEZ, A. (2014). *Análisis Técnico. Sistema de retención de las ruedas*. Recuperado el 8 de Noviembre de 2018, de AlbrodpulF1: <https://albrodpulf1.wordpress.com/2014/12/28/analisis-tecnico-sistema-de-retencion-de-las-ruedas/>

SÁNCHEZ NOYA, R. (2017). *La seguridad es el nombre de las carreras*. Recuperado el 28 de Octubre de 2018, de El Universal: <http://www.eluniversal.com.mx/blogs/rodolfo-sanchez-noya/2017/06/2/la-seguridad-es-el-nombre-de-las-carreras>

SCHMIDT, M. (13 de Marzo de 2018). *McLaren opfert Top-Speed für Abtrieb*. Obtenido de Auto Motor und Sport: <https://www.auto-motor-und-sport.de/formel-1/top-speed-analyse-f1-test-barcelona-2018/>

TERA, S. (2018). *La FIA afirma que el Halo salvó a Leclerc de recibir un golpe en Spa*. Recuperado el 12 de Diciembre de 2018, de Car and Driver: <https://www.caranddriver.es/formula-1/la-fia-afirma-que-el-halo-salvo-a-leclerc-de-recibir-un-golpe-en-spa>