



Universidad de Navarra Escuela Superior de Ingenieros
Nafarroako Unibertsitatea Ingeniarien Goi Mailako Eskola

Proyecto Fin de Grado

TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DISEÑO, SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UNA LLANTA DE CARBONO PARA LA FORMULA STUDENT

El alumno: María Serrano Martínez
San Sebastián, septiembre de 2019

tecnun

Índice

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Formula Student	2
1.2.1. Competición	2
1.2.2. Tecnun eRacing	4
1.3. Requisitos de diseño	5
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Reducción de peso	6
1.4.2. Precio	10
1.4.3. Diseño propio y conocimiento	13
2. Estado de arte	15
2.1. Llantas	15
2.1.1. Introducción a las llantas	15
2.1.2. Tipos de llantas en función del material	17
2.1.3. Tipos de llantas en función del tipo de anclaje	19
2.1.4. Llantas en la Formula Student	20
2.2. Materiales compuestos	21
2.2.1. Introducción a los materiales compuestos	21
2.2.2. Resinas	22
2.2.3. Fibras	26
2.2.4. Laminados	30
2.2.5. Técnicas de fabricación	31
2.3. Optimización del laminado	33
2.3.1. Método de los elementos finitos	33
2.3.2. Optimización	33
3. Geometría de la llanta	35
3.1. Partes de la llanta	35

3.2.	Necesidades de Tecnun eRacing	37
3.3.	Propuesta de diseño	37
3.4.	Material	39
4.	Simulaciones	41
4.1.	Introducción a Altair: HyperMesh, OptiStruct y HyperView	41
4.2.	Parámetros de la simulación	41
4.2.1.	Importar la geometría	41
4.2.2.	Crear el mallado	42
4.2.3.	Creación del material	44
4.2.4.	Creación de las capas y el laminado	45
4.2.5.	Propiedad PCOMPP	47
4.2.6.	Definición de las hipótesis de carga	47
4.2.7.	Pre análisis de la llanta	49
4.3.	Cargas y restricciones	50
4.4.	Ciclo de optimización	53
4.4.1.	Primera fase: Free Size Optimization	53
4.4.2.	Segunda fase: Size Optimization	55
4.4.3.	Tercera fase: Shuffle Optimization	55
4.5.	Fallos a tener en cuenta	56
5.	Resultados	59
5.1.	Resultados de Altair	59
5.1.1.	Resultados del Free Size Optimization	59
5.1.2.	Resultados del Size Optimization	61
5.1.3.	Resultados del Shuffle Optimization	63
5.2.	Solución final presentada	64
5.3.	Comparativa con llanta actual	68
6.	Fabricación	71
6.1.	Proceso de fabricación	71
6.2.	Diseño del molde	73

7. Futuras líneas y conclusiones	77
8. Presupuesto	79
8.1. Software	79
8.2. Mano de obra	80
8.3. Resumen de presupuesto	80
9. Referencias	81
Appendices	82
A. Planos	83
B. Tutorial	86

Índice de figuras

1.	Driverless del equipo AMZ (Zurich, Suiza)	2
2.	Prototipo de la temporada 2018-2019 (TeR19)	4
3.	Detalle del circuito de Endurance en FS East 2017	6
4.	Modelo de cuarto de vehículo con 2 grados de libertad	7
5.	Modelo de cuarto de vehículo con 1 grado de libertad	8
6.	Inercia rotacional	10
7.	Ejemplo de cubo con anclaje monotuerca y nexo de unión con la llanta . . .	13
8.	Vista explosionada del conjunto de rueda	15
9.	Sección de una llanta Keizer	16
10.	Llanta de aluminio	17
11.	Llanta de fibra de carbono	18
12.	Llanta de carbono de <i>Koenigsegg Automotive AB</i>	18
13.	Tipos de llantas en función al sistema de anclaje	19
14.	Cubo actual	20
15.	Esquema de la estructura molecular del poliéster sin curar	23
16.	Esquema de la estructura molecular del poliéster curado	23
17.	Esquema de la estructura molecular de una resina viniléster curada	24
18.	Esquema de la estructura molecular de una resina epoxi	24
19.	Tensión de rotura de un material genérico (punto 1)	25
20.	Tensión de rotura y rigidez de las tres resinas	26
21.	Detalle de un tejido de fibra de carbono	28
22.	De izquierda a derecha: tejido tipo plain, tejido tipo twill y tejido tipo basket	29
23.	Tejido multiaxial	30
24.	Esquema del proceso de pulverización	31
25.	Esquema del proceso de laminación <i>wet</i>	32
26.	Esquema del proceso de infusión	32
27.	Perfil de una llanta genérica	35
28.	Análisis preliminar con 10 capas	38
29.	Propiedades mecánicas de la resina curada del SE 84LV	39

30.	Propiedades mecánicas de una capa biaxial del SE 84LV	40
31.	Geometría importada en dos piezas	42
32.	Vista del mallado	43
33.	Parámetros para la medida de la calidad de los elementos	44
34.	Normales de los elementos	44
35.	Detalle del laminado	46
36.	Configuración del laminado	46
37.	Visualización de las propiedades PCOMP y PCOMPG	47
38.	Nodo del <i>contact patch</i>	48
39.	Barras rígidas para la transmisión de fuerzas y momentos	48
40.	Detalle de las fuerzas y momentos en el Front LoadStep	49
41.	Resultados de deformación del análisis preliminar	50
42.	Resultados de tensión del análisis preliminar	50
43.	Presión aplicada	51
44.	Convenio de direcciones de las fuerzas	51
45.	Esquema de la optimización de OptiStruct	56
46.	Resultados de desplazamiento del Free Size Optimization	59
47.	Resultados de tensión de Von Mises del Free Size Optimization	60
48.	Resultado del laminado del Free Size Optimization	61
49.	Detalle de las capas del Free Size	61
50.	Resultado del laminado del Size Optimization	62
51.	Resultados de desplazamiento del Size Optimization	63
52.	Resultados de tensión del Size Optimization	63
53.	Resultado de la secuencia del Shuffle Optimization	64
54.	Detalle del grosor en la zona de los tornillos	65
55.	Resultados de desplazamiento de la geometría homogeneizada	66
56.	Resultados de desplazamiento de la configuración 2	67
57.	Resultados de tensión de la configuración 2	67
58.	Orden de apilamiento de la solución final	68
59.	Comparativa de pesos a lo largo de la optimización y llanta actual	68

60.	Desmoldante utilizado	71
61.	Esquema genérico de laminación de una plancha	72
62.	Ciclo de curado del prepreg SE 84LV	73
63.	Vista explosionada del molde con la pieza	74
64.	Fase de laminación	75
65.	Fase de laminación II	75
66.	Fase de desmoldeo	75

Índice de tablas

1.	Puntuación de las distintas pruebas	3
2.	Precio de las llantas comerciales	11
3.	Coste aproximado de una llanta con y sin patrocinio de Formula Student . .	12
4.	Propiedades mecánicas de algunas fibras y materiales convencionales . . .	27
5.	Unidades utilizadas	42
6.	Propiedades del material SE 84LV	45
7.	Casos de carga máxima en el neumático	52
8.	Hipótesis de carga simuladas	53
9.	Presupuesto de Software	79
10.	Presupuesto de la mano de obra	80
11.	Presupuesto total del proyecto	80

Resumen

Este proyecto surge motivado por el objetivo de dar el salto de las llantas de aluminio actuales a unas de fibra de carbono dentro del equipo de Formula Student de la Universidad de Navarra. Actualmente el equipo cuenta con un conjunto de rueda en el que casi todas las piezas son de diseño y fabricación propias. En el caso de las llantas, el equipo de Tecnun ha utilizado en las últimas temporadas unas comerciales de aluminio, en concreto de la marca Keizer.

Para el cálculo y optimización de las llantas se ha utilizado el software Altair OptiStruct, que optimiza las capas del laminado para que se ajuste a unos parámetros establecidos por el usuario. El resultado es un diseño de llanta con una reducción de peso de 650 gr respecto a la actual de aluminio, un total de 2.6 kg en todo el coche. Además, la rigidez obtenida es mayor que en la actual comercial, con un desplazamiento máximo de las fibras de 1.5 mm frente a los 3 mm de la Keizer.

La estructura del proyecto es la siguiente. En el primer apartado hay una introducción en la que se detallan las razones y objetivos más importantes que llevan a querer hacer el cambio a unas llantas de carbono propias. En el siguiente apartado 2 se explican conceptos generales sobre las llantas, materiales compuestos y programas de simulación.

En el apartado 3 encontramos la descripción de la llanta con la que vamos a trabajar en el apartado 4, donde se especifican los parámetros de la simulación. Los resultados de estos cálculos se resumen en el apartado 5.

El apartado 6 describe el proceso de fabricación y el diseño del molde para la llanta. Por último en los apartados 7 y 8 se resumen las conclusiones y futuras líneas del proyecto y el presupuesto, respectivamente.

Para aclarar conceptos y dar más información se han incluido 2 apéndices con planos de la llanta y el tutorial del programa Altair OptiStruct.

Abstract

This project is born from the objective of the Formula Student team of the University of Navarra of changing the actual comercial rims to carbon fiber ones. The actual rims are made of aluminum by Keizer.

The software used for the composite calculations and ply optimization is Altair OptiStruct. Given some restrictions of maximum displacement, the software minimizes the objective function defined (in this case, the total mass). The result is a much lighter rim than the actual comercial one, with 650 gr less of weight in each rim, a total of 2.6 kg for four wheels. The stifness is also better, with a maximum fiber displacement of 1.5 mm.

The project's structure is as follows. First, in chapter 1 there is an introduction where we discuss the main reasons and objectives of the project. In chapter 2 general concepts regarding rims, composite materials and simulation softwares are explained.

In chapter 3 there is a description of the geometry of the rim that we are going to simulate in chapter 4. Here we will find the main parameters used in the optimization process. The results of these calculations are explained in chapter 5.

Chapter 6 contains a brief explanation of the manufacturing process of the rim. To conclude, chapter 7 includes the main conclusions and future developments of this project. Chapter 8 contains the bibliography.

To help understand some concepts better, there are 2 appendices with drawings and an OptiStruct tutorial.

1 Introducción

1.1. Motivación

El proyecto surge de la motivación que existe en el equipo de Formula Student de la Universidad de Navarra en dar el salto a un conjunto de rueda más ligero y con mayor adaptabilidad que el que existe en el momento. Actualmente el monoplaza del equipo cuenta con neumáticos y llantas comerciales, manguetas, cubos y discos de freno de diseño propio y pinzas también comerciales.

Los cambios de piezas y modificaciones del diseño de los componentes están restringidos por las medidas de la llanta que, al ser comercial, no permite modificar algunos parámetros que vienen fijados por el fabricante.

La Formula Student es también un ámbito de aprendizaje y desarrollo, en el que se llevan a cabo cada año proyectos que aumentan el conocimiento del equipo, tanto en aspectos técnicos y prácticos como en los aspectos más teóricos. Desde hace varias temporadas en el equipo de Tecnun se ha avanzado con las técnicas de cálculo y fabricación de piezas con fibra de carbono. Proyectos como los de Nicolás Serrano: "Diseño, simulación y optimización de un monocasco de fibra de carbono para la Formula Student"; o el de Borja Villanueva: "Diseño de un chasis monocasco para un monoplaza Formula Student" han aportado luz sobre el cálculo estructural de componentes de fibra de carbono.

Este proyecto tiene como objetivos tanto ahondar en ese cálculo de composites como de diseñar una llanta que sirva de precedente para futuros conjuntos de rueda, permitiendo así al equipo decidir sobre medidas y parámetros que mejorarán el performance del monoplaza y que facilitarán el diseño de otros componentes.

En el apartado 1.4 se detallan estas y otras razones de menos peso que han llevado a la realización de este proyecto.

1.2. Formula Student

La Formula Student es una competición universitaria de ingeniería a nivel internacional en la que equipos de distintas universidades diseñan, testean y compiten con un monoplaça en circuitos de carreras. Los estudiantes de ingeniería son los responsables del diseño de las piezas, conjuntos y sistemas de control que gobiernan el coche.

Existen tres categorías en las que se puede participar: Vehículo de Combustión Interna (IC), Vehículo Eléctrico (EV) o Driverless (DV). En esta última categoría se puede participar con un coche de combustión o con uno eléctrico y es la categoría más novedosa de la competición. Hasta ahora la participación en esta última modalidad era opcional, pero la organización está promoviendo que todos los equipos den pasos en esta dirección, y se ha propuesto a los equipos que empiecen a desarrollar algoritmos y sistemas de control para que sus coches compitan de forma autónoma en una de las pruebas en 2021, con un aumento en la cantidad de eventos autónomos de ahí en adelante.



Figura 1: Driverless del equipo AMZ (Zurich, Suiza)

1.2.1. Competición

La competición de Formula Student se divide en dos partes: pruebas estáticas y pruebas dinámicas. En cada prueba se ganan puntos que, al final del evento, determinarán qué equipo es el ganador.

Tanto estas pruebas como el diseño del monoplaza vienen determinados por una normativa que publica la organización cada año. Por un lado la normativa especifica los requisitos de diseño de los sistemas del coche: rigidez a torsión del chasis, recorrido de la suspensión, medidas del conjunto aerodinámico... así como ensayos de seguridad que deben cumplir algunos sistemas. Por otro lado también define el procedimiento a seguir en las pruebas de la competición.

En conjunto estas pruebas suman un total de 1000 puntos, repartidos como se indica en la Tabla 1, con un 32,5 % de los puntos asignados a las pruebas estáticas y un 67,5 % asignados a las pruebas dinámicas. Las pruebas estáticas se centran en los aspectos teóricos tanto del diseño como de la fabricación del coche. En las pruebas dinámicas el equipo tiene la oportunidad de demostrar cómo esta teoría funciona en pista: aceleración lateral, tracción, aerodinámica, etc.

	Puntos
Pruebas estáticas	
Business Plan Presentation	75
Cost and Manufacturing	100
Engineering Design	150
Pruebas dinámicas	
Skid Pad	75
Acceleration	75
Autocross	100
Endurance	325
Efficiency	100
Total	1000

Tabla 1: Puntuación de las distintas pruebas

En cuanto a las pruebas dinámicas, se debe mencionar la inspección técnica obligatoria que debe superarse previo a la participación en cualquier evento dinámico. Una vez el coche ha superado esta inspección, se considera apto para participar en dichas pruebas.

1.2.2. Tecnun eRacing

Tecnun eRacing es el equipo de Formula Student de Tecnun, Universidad de Navarra.

El equipo de Tecnun eRacing participa en la modalidad de vehículo eléctrico y surge en septiembre de 2017 tras la fusión de los dos antiguos equipos de Formula Student que existían en el momento en la universidad: Tecnun Motorsport (equipo de combustión) y Tecnun Seed Racing (equipo eléctrico). La decisión de unir el equipo y enfocar todos los esfuerzos en diseñar y fabricar un vehículo 100 % eléctrico permite optimizar los recursos que tenían los dos equipos y potenciar las áreas con mayor desarrollo de cada monopla. En este caso se traduce en adoptar el modelo de chasis, suspensión y aerodinámica del equipo de combustión y el motor, baterías, electrónica y sistema de transmisión del equipo eléctrico. Al unir los puntos fuertes de cada equipo, hemos logrado un proyecto con gran potencial a la hora de competir.



Figura 2: Prototipo de la temporada 2018-2019 (TeR19)

1.3. Requisitos de diseño

Como se ha mencionado en el apartado anterior, el diseño y funcionamiento de un Formula Student viene determinado por una normativa publicada por la organización *Formula Student Germany* al comienzo de cada temporada. En esta normativa se especifican tanto requisitos del diseño general del coche como normas específicas de algunos subconjuntos.

Las normas específicas que afectan al desarrollo de este proyecto son las siguientes (extraídas de la normativa *Formula Student Rules 2019* de *Formula Student Germany*):

T2.4 Llantas

- **T2.4.1** Los conjuntos de rueda que tengan una unión llanta-cubo monotuerca deben tener un sistema de retención para asegurar que la tuerca no se afloja. Una segunda tuerca no cumple este requerimiento.
- **T2.4.2** Los pernos de la llanta se consideran sistemas de anclaje y deben ser de acero. Cualquier modificación en los pernos debe llevar consigo una justificación ingenieril que pruebe que el diseño es seguro.
- **T2.4.3** Se pueden utilizar tuercas de aluminio en la llanta, pero deben estar anodizadas y en perfectas condiciones durante el uso.

T2.5 Neumáticos

- **T2.5.1** Los vehículos deben tener dos tipos de neumáticos como se detalla a continuación:
 - Neumáticos de seco: cuando se presenta el coche para la inspección técnica este debe llevar los neumáticos denominados "de seco".
 - Neumáticos de lluvia: deben tener un dibujo hecho por el fabricante con una profundidad mínima de 2.4 mm.

1.4. Objetivos

La importancia de dar el paso a unas llantas de carbono de fabricación propia viene motivada por los objetivos descritos a continuación.

1.4.1. Reducción de peso

Las pruebas dinámicas de la competición de Formula Student son características por llevarse a cabo en circuitos con rectas cortas y un gran número de curvas, especialmente cerradas y con tramos de *zig-zag*. Para obtener un buen tiempo por vuelta es necesario un coche ligero, ágil y fácil de conducir, que permita acelerar y frenar deprisa.



Figura 3: Detalle del circuito de Endurance en FS East 2017

El monoplaza actual, el TeR19, tiene un peso de 225 kg, una cifra elevada si la comparamos con equipos que, teniendo características técnicas similares a las nuestras, tiene pesos que oscilan entre los 190-205 kg.

Uno de los puntos pendientes por mejorar en este aspecto son las llantas, actualmente comerciales de aluminio. Las llantas forman parte de la masa no suspendida del vehículo. Se considera masa no suspendida aquella que no es soportada por el sistema de suspensión (véase la llanta, el sistema de frenos o los trapecios). Estos elementos son soportados únicamente

por la rueda, que actúa de unión entre el coche y la carretera, además de tener un ligero efecto de amortiguamiento. Esta unión entre el coche y el asfalto determinará el comportamiento del monoplaza a lo largo de la carrera. Para un buen rendimiento, los neumáticos deben estar en contacto con la carretera en todo momento, siguiendo su perfil, a veces irregular, en cada punto.

Para estudiar el comportamiento dinámico del coche representamos el monoplaza con el modelo de cuarto de vehículo. Este modelo (véase Figura 4) supone la masa no suspendida y la masa suspendida como dos masas independientes unidas entre sí por un muelle con constante de rigidez k_2 y un amortiguador con constante de amortiguamiento c , que representan los muelle y amortiguadores del coche. A su vez, la masa no suspendida se une al suelo por medio de otro muelle con constante de rigidez k_1 , que representa la rigidez vertical del neumático. Es un sistema con dos grados de libertad: x_1 , el desplazamiento vertical de la masa no suspendida, y x_2 , el desplazamiento vertical de la masa suspendida.

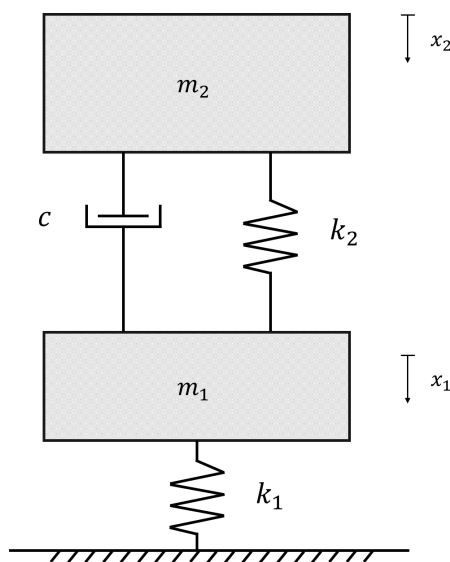


Figura 4: Modelo de cuarto de vehículo con 2 grados de libertad

Dependiendo del campo de aplicación del estudio que se esté realizando es posible obviar el efecto elástico del neumático y unir la masa no suspendida directamente al suelo. Este sería el modelo de cuarto de vehículo de un solo grado de libertad (véase Figura 5).

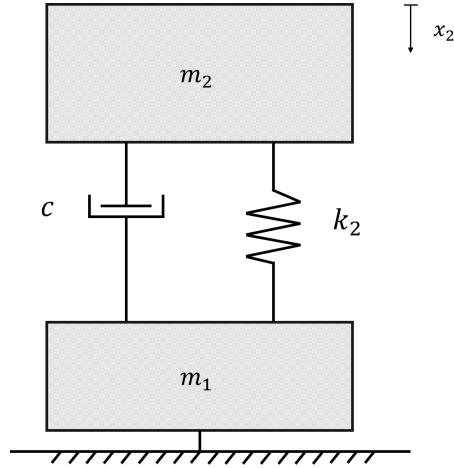


Figura 5: Modelo de cuarto de vehículo con 1 grado de libertad

Denominando m_1 a la masa no suspendida, m_2 a la masa suspendida, k_1 a la rigidez del neumático, y k_2 a la rigidez del muelle de la suspensión, las ecuaciones del movimiento que gobiernan el sistema de un cuarto de vehículo con dos grados de libertad son:

$$m_1 \ddot{x}_1 = -k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1) \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -k_2 (x_2 - x_1) \quad (2)$$

Re-ordenando las ecuaciones para expresar las aceleraciones de la masa suspendida y no suspendida en función de las masas obtenemos:

$$\ddot{x}_1 = -\frac{k_1 x_1}{m_1} - \frac{m_2 \ddot{x}_2}{m_1} \quad (3)$$

$$\ddot{x}_2 = -\frac{k_1 x_1}{m_2} - \frac{m_1 \ddot{x}_1}{m_2} \quad (4)$$

De la ecuación 3 obtenemos que una reducción en la masa no suspendida m_1 produce un aumento en la aceleración $\ddot{x}_1$ de la masa no suspendida, lo que significa que, ante una irregularidad en la carretera, el neumático volverá a estar en contacto con el asfalto lo más rápido posible. Esta disminución de m_1 genera, además, una disminución de la aceleración $\ddot{x}_2$.

De la ecuación 4 deducimos que si aumenta la masa suspendida m_2 disminuye la aceleración $\ddot{x}_2$ de la masa suspendida (chasis, alerones, motores, baterías, etc.), haciendo que sea más estable, y aumenta la aceleración $\ddot{x}_1$.

Por lo tanto, es clave que la relación m_2/m_1 sea lo más grande posible. Aumentar el peso del coche en el chasis, *cockpit* o conjunto aerodinámico tiene efectos en la agilidad y rendimiento del vehículo, por lo que la mejor opción es la de disminuir el peso de la masa no suspendida. Este proyecto se centra por lo tanto en una de las piezas de la masa no suspendida, la llanta.

Por otro lado aligerar el peso de las llantas no supone únicamente disminuir el peso global del coche, si no también una disminución en el momento de inercia que generan. El momento de inercia rotacional se define como la resistencia que presenta un objeto con movimiento giratorio a cambiar su dirección de movimiento. Viene definido por la expresión:

$$I = mr^2 \quad (5)$$

donde I es el momento de inercia rotacional, m es la masa del objeto que está girando y r es la distancia de la masa al eje de revolución del movimiento (véase Figura 6).

Si buscamos un coche ágil buscaremos que el momento de inercia del conjunto de rueda sea bajo. Así, el motor no tendrá que hacer tanto esfuerzo para acelerar el vehículo y la frenada será más rápida.

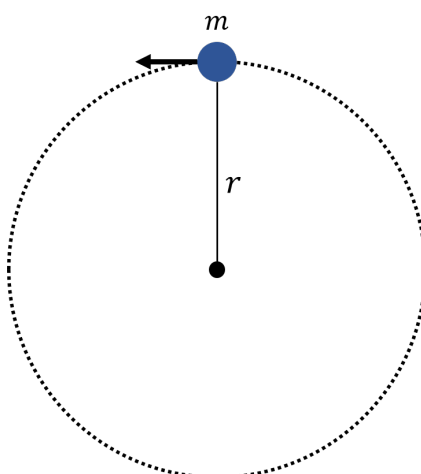


Figura 6: Inercia rotacional

1.4.2. Precio

Un factor decisivo en el proyecto de Formula Student es el presupuesto del equipo. En función de ello se deciden diseños, procesos de fabricación y materiales. Para que el coche salga adelante es vital que se administre de forma inteligente y acorde a unos objetivos realistas.

Actualmente las llantas que lleva el monoplaza son comerciales de la marca *Keizer*, con un precio de 125 € por llanta. Teniendo en cuenta que cada temporada necesitamos como mínimo 2 juegos (un juego para neumáticos en seco y otro juego para los neumáticos de lluvia), eso hace un total de 1.000 €. Cada temporada se compran llantas nuevas, pues la filosofía del equipo consiste en que el coche de la temporada anterior se mantenga plenamente funcional, lo que incluye las llantas y los neumáticos. Hay otras opciones comerciales, como las empresas Blackwave y OZ. En la siguiente Tabla 2 se recogen los precios de cada una de esas opciones.

Modelo	Material	Precio unitario
Keizer	Aluminio	125 €
OZ	Magnesio	300 €
Blackwave	Fibra de carbono	375 €

Tabla 2: Precio de las llantas comerciales

Por otro lado, fabricar llantas de carbono propias tiene un coste menor. Como equipo de Formula Student, Tecnun eRacing cuenta con empresas patrocinadoras que apoyan el proyecto, ya sea con una aportación puramente económica, productos, servicios o asesoría. Para el propósito concreto de este proyecto contamos con el apoyo de la empresa *Gurit*, que nos provee con la fibra de carbono preimpregnada (en adelante denominada prepreg) utilizada en la fabricación. Por otro lado la empresa *Altair* nos proporciona las licencias necesarias para el cálculo de la geometría y colocación de las capas por el método de los elementos finitos.

A continuación (Tabla 3) se detalla un estudio económico del coste del diseño, cálculo y fabricación de dichas llantas, con y sin patrocinio de Formula Student.

Concepto	Precio FS	Precio
Diseño	0 € (horas alumno)	240 €
Licencia Creo Parametric	0 € (proporcionada por Tecnun)	335 € (amortización)
Licencia Altair	0 € (patrocinador)	750 € (amortización)
Fibra de carbono (Gurit)	0 € (patrocinador)	100 €
Material molde	300 €	300 €
Mecanizado molde	200 €	200 €
Laminación llanta	0 € (horas alumno)	50 €
Curado (Tknika)	0 € (patrocinador)	75 €
Total	500 €	2050 €

Tabla 3: Coste aproximado de una llanta con y sin patrocinio de Formula Student

Se observa que, de no ser Tecnun eRacing un equipo de Formula Student con los patrocinadores que tiene en el momento, el precio sería más elevado. Pero el presente proyecto está pensado para una aplicación práctica y, por lo tanto, el precio es aproximadamente el mencionado en la tabla.

El precio de las llantas fabricadas en Tecnun depende del número de llantas que se vayan a fabricar con el molde. Su precio unitario viene determinado por la amortización por llanta fabricada. En el supuesto de que se fabriquen 8 llantas, tenemos un precio de 62,5 €/por llanta. Este precio es menor que cualquiera de las otras opciones comerciales.

1.4.3. Diseño propio y conocimiento

Por último, obtener conocimientos sobre el diseño, cálculo y fabricación de este primer prototipo de llanta es beneficioso para el equipo, pues abre la puerta a otros posibles diseños que darán libertad a los alumnos para poder modificar el conjunto de rueda.

Un ejemplo es el de diseñar un sistema de cubo mono-tuerca (explicado en profundidad en el apartado 2.1.3) sin necesidad de utilizar un nexo para unirlos a las llantas actuales. En la Figura 7 se observa el problema de utilizar las llantas actuales con este sistema. Es necesaria una pieza adicional a la que se atornilla el cubo y que, a su vez, se une a la llanta.

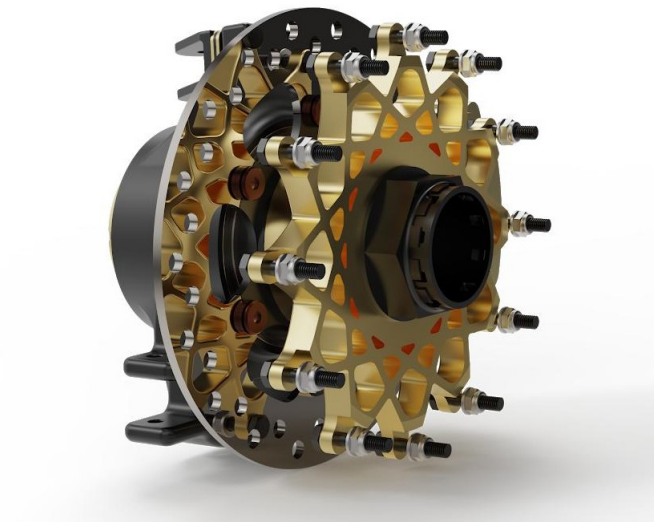


Figura 7: Ejemplo de cubo con anclaje monotuerca y nexo de unión con la llanta

Con un diseño en el que la llanta contenga ya unos radios propios que permitan la unión del cubo directamente ahorraríamos trabajo de diseño, fabricación y montaje, además de reducir el peso en la rueda.

coche en todas las condiciones meteorológicas que se puedan dar durante las competiciones.

El siguiente elemento es la llanta. La que observamos en la imagen es la llanta actual del equipo, una comercial de la marca *Keizer* con medidas de 10" x 7,5". Esta llanta está formada por dos piezas que se unen entre sí por 6 tornillos M11, como se observa en la Figura 9.

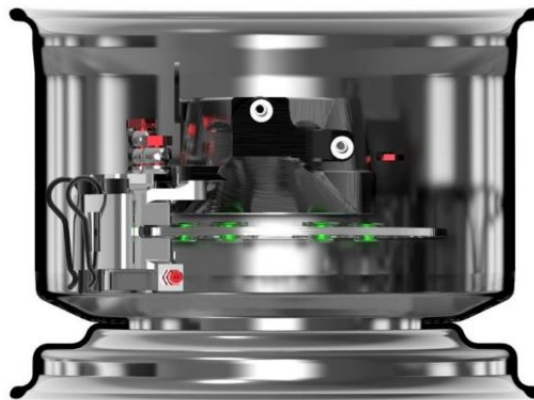


Figura 9: Sección de una llanta Keizer

La llanta y el neumático los unimos después al buje del coche por medio del cubo. El cubo tiene un diseño que permite unir directamente la llanta a la mangueta por medio de un rodamiento (en la Figura 8, el cubo es la tercera pieza y la mangueta es la sexta, desde la izquierda).

Por último tenemos los discos y pinzas de frenos. Los discos van unidos al cubo y giran con él mientras que las pinzas se unen a la mangueta, fijada al chasis por los trapecios de la suspensión.

Ahora que conocemos la geometría básica del conjunto de rueda, pasaremos a hablar sobre los tipos de llantas que podemos encontrar, tanto en función del material como del tipo de anclaje que requieren.

2.1.2. Tipos de llantas en función del material

Podemos clasificar las llantas atendiendo al material del que están hechas y en función del sistema de anclaje que tiene cada una. En primer lugar se van a describir los materiales utilizados en las distintas llantas.

En general, las llantas de los turismos están hechas de aluminio, con una buena relación rigidez-peso. Pero también existen las llantas de aleación de acero, consistente principalmente en hierro. El acero es más duro que el aluminio, lo que las hace menos propicias a agrietarse. Por otro lado, si la pieza recibe un golpe o se abolla, las de aluminio son más fáciles de reparar. Las de aluminio suelen ser de una sola pieza o de una pieza y un aro atornillados. Las de acero, por el contrario, se fabrican a partir de dos piezas (una interior y otra exterior) soldadas en la unión. Las llantas de aluminio contribuyen también a disipar el calor del sistema de frenos, dando un plus a la seguridad del vehículo. Las dos son llantas diseñadas para coches que van a recorrer muchos kilómetros por carreteras con perfiles irregulares.



Figura 10: Llanta de aluminio

En coches de gama media-alta y en deportes de automoción encontramos llantas de aleación de magnesio. El magnesio por sí mismo es algo frágil, pero mezclado con otros metales y tratado térmicamente se mejoran sus propiedades mecánicas y obteniendo el menor peso específico de los materiales utilizados para las llantas. Tiene una densidad de $1,74 \text{ kg/cm}^3$, un 35 % menos que el aluminio. Son llantas muy ligeras, proporcionando una mayor sensibilidad al piloto. Tienen una buena disipación del calor, facilitando así también la refrigeración de los frenos. Estas llantas tienen un coste más elevado que las más comunes de aluminio o acero.



Figura 11: Llanta de fibra de carbono

En el otro extremo encontramos las llantas de fibra de carbono, muy ligeras y con gran rigidez, pero de un precio aun más elevado que las de magnesio debido al precio del material y la dificultad que requiere su fabricación. Es por ello que se utilizan principalmente en vehículos de *motorsport* (aunque tengan un coste más elevado, se explica el uso del carbono para este proyecto en el apartado 1.4.2). La fibra de carbono tiene una densidad baja y los *composites* que se

fabrican con las fibras y resinas tipo *Epoxy* le dan una alta rigidez.

Los coches deportivos también buscan llantas ligeras y resistentes, con un alto rendimiento en la aceleración y frenada del vehículo. La empresa sueca *Koenigsegg Automotive AB* lleva años desarrollando llantas de carbono que aguanten las altas velocidades (de hasta 450 km/h) y fuerzas transmitidas por el neumático. En la Figura 12 se observa la llanta de radios para una unión mono-tuerca de esta empresa.



Figura 12: Llanta de carbono de *Koenigsegg Automotive AB*

2.1.3. Tipos de llantas en función del tipo de anclaje

Por otro lado, el tipo de anclaje que tiene la llanta es otro parámetro según el cual encontramos llantas tipo aro, llantas de pernos y llantas con sistema monotuerca. A continuación se describen los tres tipos (en la Figura 13 se observan de forma gráfica).



Figura 13: Tipos de llantas en función al sistema de anclaje

- En primer lugar, la **llanta tipo aro** consiste en una llanta con forma de aro en la que apoya el neumático, junto con una superficie extra en la que se ancla al cubo. Para unirla al cubo es necesario o bien que el cubo esté diseñado para atornillarse directamente a la llanta, o bien una pieza de acople entre el cubo y la llanta, como la que se ven en el ejemplo del sistema mono-tuerca de la Figura 7. La unión llanta-cubo se lleva a cabo por medio de 6 tornillos, lo que hace que el cambio de neumáticos sea bastante lento (6 tornillos/llanta hacen 24 tornillos para poder cambiar los neumáticos). Teniendo en cuenta que en competición no suele haber mucho margen de tiempo, es una desventaja.
- La **llanta de pernos** consiste en una llanta más completa que la de tipo aro, que se une al cubo por medio de 3 o 4 pernos, y generalmente no sería necesaria una pieza que hiciera de unión entre el cubo y la llanta, ya que la circunferencia que une los centros de los pernos tiene un diámetro mucho menor que la de la llanta tipo aro. El cambio de neumáticos con este tipo de llanta es más rápido que con la llanta anterior, pero mucho más lento aún que con el siguiente concepto de llanta, la llanta para un sistema mono-tuerca.
- Con una **unión llanta-cubo tipo mono-tuerca** se consigue tener un sistema de cambio

de neumáticos rápido y fácil, además de un cubo más pequeño que con las otras opciones. Aún si se diseña un cubo monotuerca con una de las llantas anteriores, es necesario siempre el sistema de acople mencionado. Con una llanta diseñada para esta unión ahorraríamos en tiempo de montaje y en peso, eliminando esa pieza con función de nexo.

2.1.4. Llantas en la Formula Student

En el equipo de Formula Student de la universidad hemos utilizado llantas de diámetro 10" desde la temporada 2016-2017 con un cubo como el de la siguiente Figura 14. Pero este sistema, aunque ha funcionado bien, es lento a la hora de montar y desmontar los neumáticos. Una llanta con una unión tipo mono-tuerca facilitaría el cambio de neumáticos, además de ahorrarse peso en el cubo, que sería mucho más pequeño. El objetivo de este proyecto es, como ya se ha explicado, el de diseñar una primera llanta de carbono que sirva como precedente para poder diseñar cualquier geometría necesaria (como la unión tipo mono-tuerca) para adaptarse a las necesidades de la suspensión del coche, y que en el futuro no estemos limitados por las opciones comerciales.

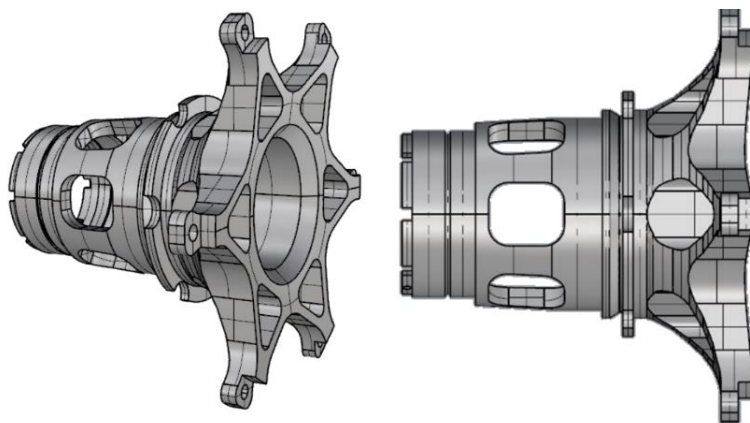


Figura 14: Cubo actual

2.2. Materiales compuestos

2.2.1. Introducción a los materiales compuestos

Para entender el uso de la fibra de carbono en este proyecto se considera conveniente presentar en este punto unas nociones básicas de los materiales compuestos, sus características principales y los métodos de fabricación empleados en la industria.

Se denominan materiales compuestos (o composites) a aquellos que están formados por la unión de dos o más materiales para obtener propiedades que no se obtienen de ninguno de los materiales que lo forman por separado. En general los materiales compuestos están formados por una matriz (la estructura principal del composite) y un refuerzo. La matriz se encuentra en forma continua, transmite los esfuerzos al refuerzo y da cohesión al material. El refuerzo, por su parte, tiene un carácter discreto y suele aparecer en forma de fibras.

Encontramos 3 tipos principales de materiales compuestos:

- Compuestos de matriz polimérica
- Compuestos de matriz metálica
- Compuestos de matriz cerámica

Los **compuestos de matriz polimérica** son los composites más utilizados. Están compuestos por una matriz formada por una resina de base polimérica y fibras que pueden ser de todo tipo (carbono, vidrio, aramida, etc.). Por un lado, poseen propiedades mecánicas limitadas en comparación con otros materiales, pero por otro lado son muy útiles a la hora de fabricar piezas con formas complejas. Los materiales como el vidrio o la aramida, utilizados como refuerzos en forma de fibras para este tipo de materiales compuestos mejoran sus propiedades al presentarse en pequeños filamentos. Uniendo ambos materiales, obtenemos un nuevo compuesto en el que la matriz y las fibras trabajan transmitiendo los esfuerzos y aumentando la resistencia de la pieza.

Los **compuestos de matriz metálica** son menos comunes que los anteriores. Estos compuestos están formados por una matriz metálica (como el aluminio) reforzada por fibras o partículas de otro material, como una cerámica o material orgánico. Se utilizan en algunas herramientas, en carrocerías de tanques, algunos discos de freno de automóviles o distintos componentes electrónicos que necesitan propiedades especiales que los materiales convencionales no pueden proporcionar por sí mismos.

Los **compuestos de matriz cerámica** están formados por fibras cerámicas embebidas en una matriz también cerámica. Se utilizan en aplicaciones con temperaturas muy elevadas. Las partículas o fibras cerámicas utilizadas como refuerzo aumentan la energía necesaria para la propagación de las grietas, lo que le da una gran resistencia al material.

A continuación se describen las principales características de las resinas y fibras utilizadas en los materiales compuestos y la importancia de una buena elección en la combinación de ambas.

2.2.2. Resinas

Las resinas (o comúnmente denominadas “polímeros”) utilizadas en la fabricación de materiales compuestos están formadas por largas cadenas de moléculas que se repiten en estructuras muy simples. Las resinas más comunes en el ámbito de los materiales compuestos son las 3 siguientes: poliéster, viniléster y epoxi o *epoxy*.

Poliéster: es el tipo de resina más utilizada en los materiales compuestos, especialmente en la industria náutica. Se forman a partir de una reacción química orgánica: el alcohol y un ácido orgánico reaccionan para dar un éster y agua. Utilizando alcoholes específicos, como el etilenglicol (comúnmente utilizado como anticongelante en sistemas de refrigeración o como disolvente de pinturas) obtenemos poliéster y agua. La mayor parte de las resinas de poliéster son una solución de poliéster y un monómero: en general, estireno.

El estireno cumple dos funciones: disminuye la viscosidad de la resina para facilitar su tratamiento y permite la unión de las cadenas moleculares del poliéster para el curado de la resina. Si dejamos la resina de poliéster (que contiene ya el estireno) sin tocar, ella misma iniciará el proceso de curado, pero a un ritmo muy lento. Es por ello por lo que a la hora de utilizarla se añaden catalizadores que inician la reacción de polimerización y aceleradores, que permiten que la reacción se lleve a cabo a una velocidad más adecuada para el ambiente de fabricación. De forma esquemática podemos representar una resina de poliéster sin curar como en la siguiente Figura 15, donde “B” indica los puntos reactivos de la molécula.

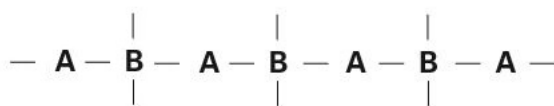


Figura 15: Esquema de la estructura molecular del poliéster sin curar

Si añadimos el estireno, “S”, y estamos en presencia de un catalizador que inicie la reacción, el estireno actuará de unión entre las distintas cadenas de moléculas de poliéster, dando lugar a una red tridimensional como la de la Figura 16. Obtenemos así una resina curada, químicamente estable y dura.

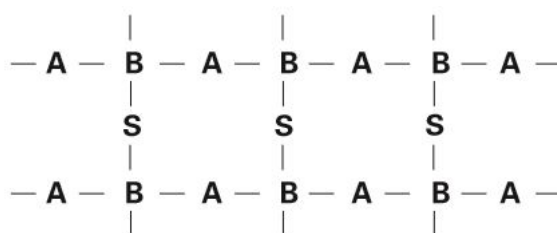


Figura 16: Esquema de la estructura molecular del poliéster curado

Viniléster: son resinas similares a las de poliéster, pero difieren en cuanto a la estructura molecular. En el caso de las resinas de viniléster, los puntos reactivos de la molécula se encuentran en los extremos de la cadena, como se observa en la Figura 17. Esto las hace más resistentes al agua, ya que hay menos uniones por las que la resina se pueda estropear.

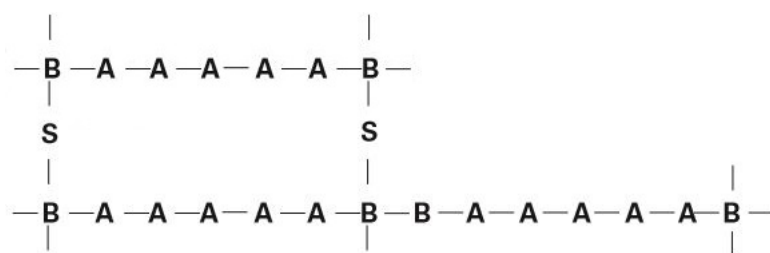


Figura 17: Esquema de la estructura molecular de una resina viniléster curada

Epoxi: la resina epoxi es un polímero termoestable muy utilizado en la industria náutica y aeronáutica gracias a sus excelentes propiedades. Gracias a su estructura molecular, similar a la del viniléster, no se degrada fácilmente con el agua, pero una variación en dicha estructura molecular (véase la Figura 18) le permite, además, tener una alta resistencia, rigidez y resistencia a la temperatura. Las resinas epoxi tienen temperaturas de curado que pueden variar entre los 5°C y los 150°C, pero, a diferencia de las resinas mencionadas antes, el epoxi necesita un agente endurecedor para curar. Este agente catalizador no solo inicia el ciclo de curado, si no que reacciona químicamente con las moléculas del epoxi.

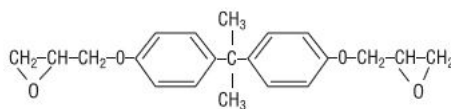


Figura 18: Esquema de la estructura molecular de una resina epoxi

Una vez vistos los tipos de resinas que podemos utilizar en nuestra matriz, es importante tener en cuenta las propiedades mecánicas y adhesivas de estas, pues definirán el comportamiento de la pieza final que se fabrique con el material compuesto. Las propiedades mecánicas más importantes en este aspecto son la tensión de rotura y la rigidez de la resina.

- La tensión de rotura de un material (véase Figura 19) se define como la máxima tensión que puede soportar un material antes de que la sección transversal de la muestra se contraiga de forma considerable y de forma permanente (la tensión de rotura se encuentra fuera de la región elástica del material). Un material con una tensión de rotura baja se

romperá antes que uno con un valor más alto.

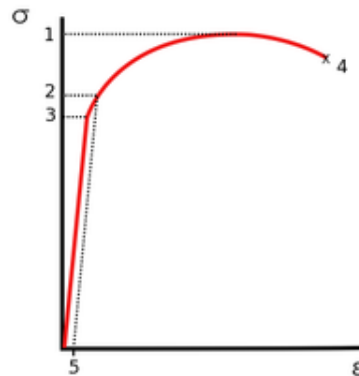


Figura 19: Tensión de rotura de un material genérico (punto 1)

- La rigidez de un material se define como la resistencia que opone el material a deformarse elásticamente ante una fuerza externa. Cuanto mayor sea la rigidez, mayor será la capacidad de soportar grandes esfuerzos sin presentar deformaciones. Dependiendo de la aplicación, esto puede llegar a ser un factor muy importante. En la llanta de este proyecto, una rigidez baja provocaría una deformación de la forma de la llanta y, por lo tanto, del neumático, que se traduce en un peor rendimiento del monoplaza.

En la siguiente Figura 20 se observan los datos de tensión de rotura y rigidez de las tres resinas explicadas. Se observa que en todos los casos la resina epoxi es la que presenta unas mejores propiedades mecánicas.

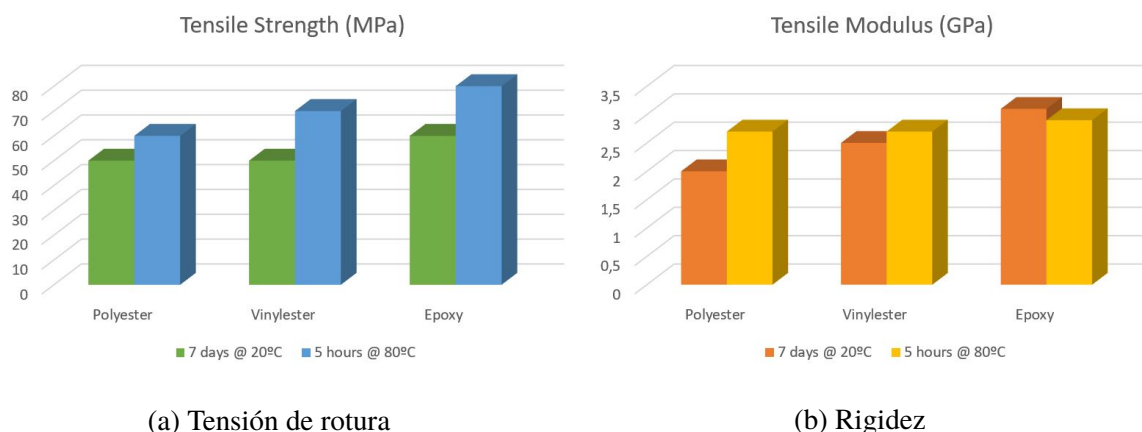


Figura 20: Tensión de rotura y rigidez de las tres resinas

La unión adhesiva entre la matriz y el refuerzo es vital para un correcto funcionamiento del material compuesto. Cuanto mejor sea la unión, mejor se transmitirán los esfuerzos de la matriz a las fibras. En general, las resinas epoxi presentan las mejores propiedades adhesivas, seguidas de las resinas de viniléster y, por último, las de poliéster.

2.2.3. Fibras

Llegados a este punto en que ya conocemos los tipos de resinas que pueden formar la matriz del composite debemos conocer las fibras que pueden formar el refuerzo del material, ya que las propiedades mecánicas de las fibras utilizadas son, por sí mismas, mayores que las de la matriz. Así pues, un material reforzado con fibras se comportará mejor en cualquier ámbito que cualquier polímero.

Las fibras contribuyen a mejorar las propiedades del compuesto en función de 3 parámetros definidos a continuación:

- **Las propiedades mecánicas** de las propias fibras: son mayores que las de otros materiales utilizados comúnmente en la ingeniería, como se observa en la Tabla 4.

Tipo de Material	Tensión de rotura MPa	Módulo de Young GPa	Densidad g/cm ³
IMC	>4400	275 a 310	1.8
UHMC	>4000	420 a 455	2.0
Aluminio (7020)	400	1069	2.7
Titanio	950	110	4.5
Acero	800	196	7.8

Tabla 4: Propiedades mecánicas de algunas fibras y materiales convencionales

- **La orientación** de las fibras en el material compuesto: las fibras están diseñadas para aguantar cargas en la dirección longitudinal de la fibra, por lo que, si queremos que una pieza aguante cargas en más de una dirección, los laminados se forman apilando capas con distintas orientaciones. Por lo tanto, la orientación de las distintas capas hace que el comportamiento del material no sea isótropo. La configuración final de orientaciones debe responder a las necesidades de carga en las distintas direcciones, para no someter a las fibras a fuerzas cortantes ni tampoco sobredimensionar las orientaciones en las que las cargas son pequeñas.
- **La fracción volumétrica de fibras (FVF)** en el material: en general la rigidez y la tensión de rotura de un material compuesto aumentan proporcionalmente con la FVF hasta llegar a un límite de alrededor del 70 % de FVF, cuando la cantidad de fibras comienza a ser excesiva y no hay suficiente matriz para mantener unido todo el refuerzo.

Según el material del que estén hechas distinguimos las principales fibras entre las fibras de carbono, fibras de vidrio y fibras de aramida. En los siguientes puntos se explica brevemente cada una de ellas.

La fibra de carbono es una fibra sintética fabricada a partir de filamentos otro material precursor rico en carbono orgánico, generalmente poliacrilonitrilo. Estos filamentos de entre 5 y 10 micras de diámetro se oxidan, carbonizan y grafitizan¹ de forma controlada para

¹La grafitización es un cambio microestructural que se da en compuestos de carbono o aceros de baja

obtener las fibras de carbono con las propiedades deseadas (estas pueden variar en función de la temperatura de grafitización). En cuanto a sus propiedades, la fibra de carbono cuenta con el módulo específico más alto de cualquier fibra, alta resistencia tanto a tensión como a compresión y alta resistencia a la corrosión, fatiga y propagación de grietas. Las fibras se clasifican en función a los valores en los que oscilan sus propiedades, siendo estos niveles “high strength” (HS), “intermediate modulus” (IM), “high modulus” (HM) y “ultra high modulus” (UHM) .

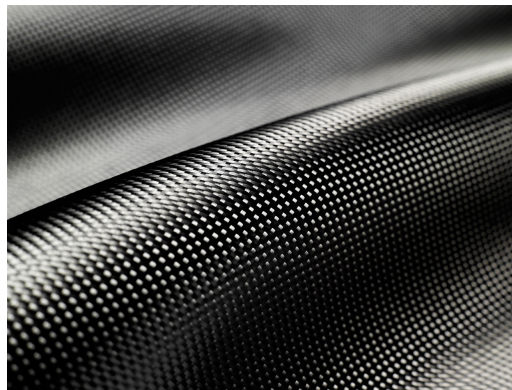


Figura 21: Detalle de un tejido de fibra de carbono

La fibra de vidrio está formada por filamentos poliméricos basados en dióxido de silicio. El material se extruye en diámetros muy finos y es enfriado rápidamente para conseguir filamentos de entre 5 y 24 micras de diámetro. Las fibras se clasifican en función de su composición, siendo las más comunes las de clase E (“electrical”, con buenas propiedades eléctricas y resistencia a tensión/compresión, pero baja resistencia al impacto) y clase C (“chemical”, con alta resistencia a agentes químicos).

La fibra de aramida, por último, es una fibra sintética formada a partir de poliamida. Es especialmente robusta y resistente al calor y la abrasión, además de contar con una alta resistencia y una densidad muy baja, dándole así una fuerza específica elevada. Esta fibra se utiliza especialmente en aplicaciones balísticas y de protección personal. En el monoplaza de

aleación expuestos a altas temperaturas. Se obtiene así el grafito, que después se trata para formar las fibras de carbono.

Tecnun eRacing se utiliza para fabricar la caja de las baterías y como protección de seguridad en los *firewalls* (protegen al piloto de cualquier posible fuego en la zona de baterías y motores).

A partir de las fibras se forman los tejidos que más tarde se utilizarán en la fabricación de piezas con materiales compuestos. Estos tejidos se califican en unidireccionales o bidireccionales.

- Los **unidireccionales** están compuestos por fibras unidas en la dirección longitudinal de la fibra. Esta unión se hace cosiendo o tejiendo las fibras entre sí. Este segundo hilo o fibra utilizado para unir las principales entre sí introduce una cantidad relativamente importante de material parásito que reduce las propiedades mecánicas del material. Además, la complejidad del proceso que se requiere para unir todas las fibras a 0° lo convierten en un proceso lento y costoso.
- Los tejidos **bidireccionales** son aquellos en los que la dirección longitudinal de las fibras se encuentra en dos ángulos distintos, generalmente a 0° y 90° . Así, puede soportar cargas en más de una dirección, lo que la hace más útil en la mayoría de aplicaciones. La unión de las fibras se hace entrelazándolas entre sí. Existen diferentes métodos para tejer la tela, como se observa en la Figura 22. En función del patrón que se siga, las propiedades mecánicas pueden variar.

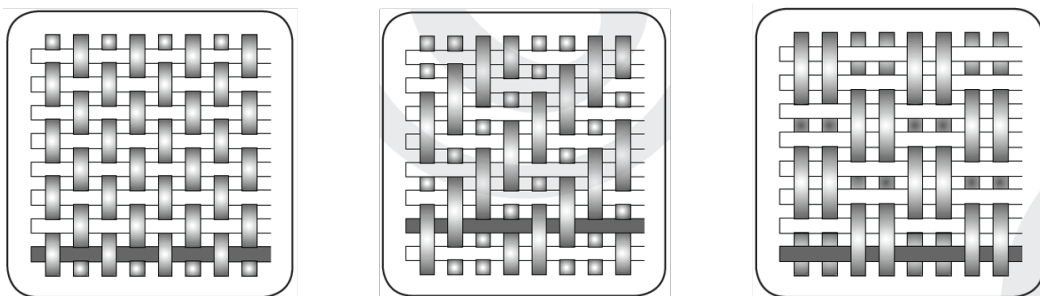


Figura 22: De izquierda a derecha: tejido tipo plain, tejido tipo twill y tejido tipo basket

- Por último, en los últimos años se están empleando tejidos **multiaxiales**, donde tenemos fibras en las tres direcciones. Las fibras bidireccionales se apilan una encima de otra y se unen entre sí por medio de otras fibras que atraviesan la pila en dirección perpendicular, como se ve en la siguiente Figura 23.

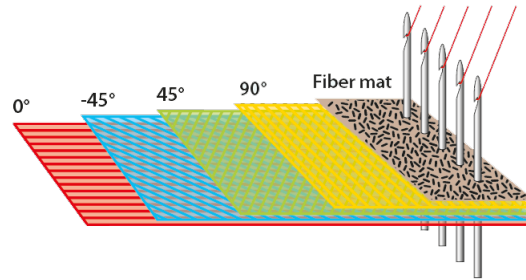


Figura 23: Tejido multiaxial

2.2.4. Laminados

Las propiedades mecánicas de un laminado no son tan fáciles de estimar como en los materiales isótropos. En materiales isótropos la deformación se calcula de manera sencilla con el módulo de Young y el módulo a cortadura. En materiales compuestos estas propiedades se pueden estimar en base a la contribución de cada material al composite. Esto se define como la regla de las mezclas (*Rule of Mixtures*, en inglés), que viene dado (para un material compuesto de dos materiales) por:

$$V_f + V_m = 1 \quad (6)$$

donde V_f es la fracción volumétrica de las fibras y V_m es la fracción volumétrica de la matriz.

Así, podemos calcular cualquier propiedad P_c del composite como:

$$P_c = P_f V_f + P_m V_m = P_f V_f + P_m (1 - V_f) \quad (7)$$

2.2.5. Técnicas de fabricación

Para acabar este apartado sobre materiales compuestos debemos hablar sobre las técnicas más importantes de fabricación de piezas con materiales compuestos.

- **Pulverización**

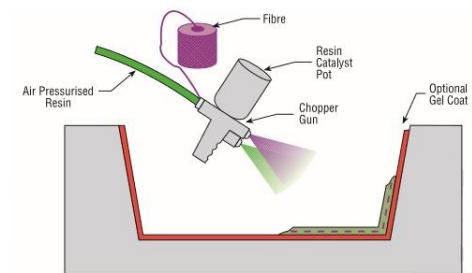


Figura 24: Esquema del proceso de pulverización

La fibra se trocea en filamentos pequeños que se mezclan en una pistola pulverizadora con la resina catalizada. Esta mezcla se rocía luego sobre un molde y se deja curar bajo condiciones atmosféricas. Es un proceso rápido y barato, aunque el material resultante suele tener demasiada resina y, por lo tanto, pesa mucho. Además las fibras tienen una longitud muy corta, lo que limita las propiedades mecánicas del compuesto. Estas también se ven afectadas por la resina utilizada, que debe ser poco viscosa para poder pulverizarse.

- **Laminación manual o *wet***

El tejido de fibras se coloca sobre el molde y se aplica la resina a mano sobre él. La resina se suele esparcir con ayuda de brochas o rodillos. Después el compuesto se deja curar (en condiciones atmosféricas o haciendo vacío para aumentar la presión sobre el laminado). Es un proceso sencillo y que no requiere de muchas herramientas. Obtenemos un compuesto con una FVF mayor que con la pulverización, pero por otro

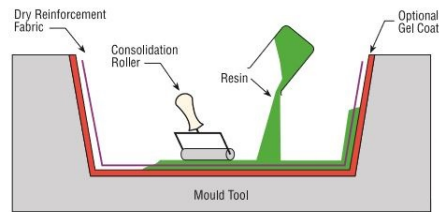


Figura 25: Esquema del proceso de laminación *wet*

lado la calidad del material final puede resarcirse debido a la destreza del operario. Puede que entren burbujas de aire al aplicar la resina, o que la fracción volumétrica de resina no sea la adecuada.

- **Laminación por transferencia de resina**

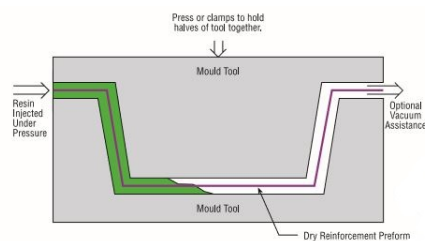


Figura 26: Esquema del proceso de infusión

En este caso el tejido se coloca también sobre el molde y se cubre todo con telas consumibles y rejillas por las que puede circular la resina. Se introduce un tubo de espiral en cada extremo del molde, conectando uno de ellos a una bomba de vacío y el otro a un recipiente con la resina. Se hace vacío en la bomba y esta absorbe el aire del molde, haciendo avanzar la resina por la pieza e impregnándola. Después se deja curar. Es un forma segura de laminar además de conseguir un control mayor sobre la cantidad de resina en el compuesto. Pero en general las herramientas necesarias tienen un coste elevado y solo sirve para piezas relativamente pequeñas.

En el apartado 6.1 se explicará con más detalle el proceso de fabricación que se seguirá para fabricar la llanta de este proyecto.

2.3. Optimización del laminado

2.3.1. Método de los elementos finitos

El cálculo estructural de la llanta se va a hacer por el Método de los Elementos Finitos (MEF). Este método es el más utilizado en problemas de mecánica de sólidos. Nuestro objetivo es conocer las tensiones y deformaciones del material en cada punto de la pieza, lo que será posible por medio del cálculo de derivadas parciales.

De forma general, el MEF toma el modelo que vamos a calcular y lo discretiza en un conjunto de elementos finitos, formando una malla. Estos elementos están unidos entre sí por los nodos. En estos nodos se encontrarán las incógnitas (tensión, deformación. . .) del problema. Además, se calculan los valores de las incógnitas también en el interior de cada elemento. Esto se hace por medio de funciones polinómicas de interpolación, que deberán cumplir ciertos requisitos de compatibilidad y orden de polinomio para acercarnos a la solución real. Si el cálculo está bien hecho, la solución convergerá hacia un valor único.

Dependiendo de la malla que tengamos, la solución se aproximará en mayor o menor medida a la solución real (desconocida) del problema. La forma y tamaño de los elementos se debe definir para cada problema en función del sólido que tengamos. En general, si estamos trabajando en el plano buscaremos elementos de 4 lados en vez de 3, mientras que si estamos trabajando en el espacio, buscaremos elementos de 6 caras en vez de 4, y con elementos que contengan más de un nodo en cada lado.

En el apartado 4.2 se detallan los parámetros de malla seguidos para este proyecto, así como otros datos necesarios, como las condiciones de contorno y material empleados.

2.3.2. Optimización

Para hacer el cálculo de la llanta tenemos varias opciones en lo referente a programas de simulación. Teniendo en cuenta que vamos a utilizar un laminado de material compuesto, es

importante que el programa esté preparado para ello. Las opciones disponibles para Tecnum eRacing son las suites de programas de ANSYS y de Altair.

Para el propósito de este proyecto se ha estudiado la posibilidad de utilizar ANSYS Structural. Este software permite definir las diferentes capas de carbono con las orientaciones y espesores deseados, así como el material compuesto. El problema encontrado, y que se resuelve con el siguiente software propuesto, es la optimización de la configuración de capas de carbono. ANSYS permite simplemente hacer el cálculo para la configuración propuesta. Una vez definida la secuencia de apilamiento el programa calcula las incógnitas de tensión y deformación. El objetivo de la simulación es el de conseguir un peso mínimo asegurando una rigidez fija. ANSYS da como resultado del cálculo un campo de desplazamientos para el dominio estudiado, pero este resultado, aun cumpliendo con las especificaciones de rigidez que nosotros pongamos, no tiene por qué ser el óptimo, que es lo que busca este proyecto.

La suite de programas de **Altair** ofrece una solución a este problema. En lo referente a cálculos de mecánica de sólidos, Altair también posee softwares para problemas similares a los que ofrece ANSYS. En lo referente al problema de optimización de capas de este proyecto, Altair ofrece su software Altair OptiStruct, con un algoritmo que permite optimizar el grosor, la forma y la orientación de cada capa, además de calcular la secuencia de apilamiento óptima de las capas para obtener el mejor resultado bajo unas condiciones especificadas por el usuario.

Si quisiéramos obtener un resultado óptimo con ANSYS Structural, tendríamos que hacer varias simulaciones e ir iterando y probando las diferentes configuraciones de orientaciones y capas una a una. Aunque el programa permite calcular varias de estas configuraciones a la vez, no llegaríamos al resultado óptimo, ya que las posibilidades en cuanto a las formas de las capas son infinitas. Altair nos proporciona toda la información en una sola simulación, por lo que es la opción elegida para este proyecto.

3 Geometría de la llanta

3.1. Partes de la llanta

Antes de pasar a definir la geometría del prototipo de la llanta que vamos a simular, se van a describir las partes de una llanta cualquiera. Para ello nos apoyaremos en la siguiente Figura 27 de la sección de una llanta.

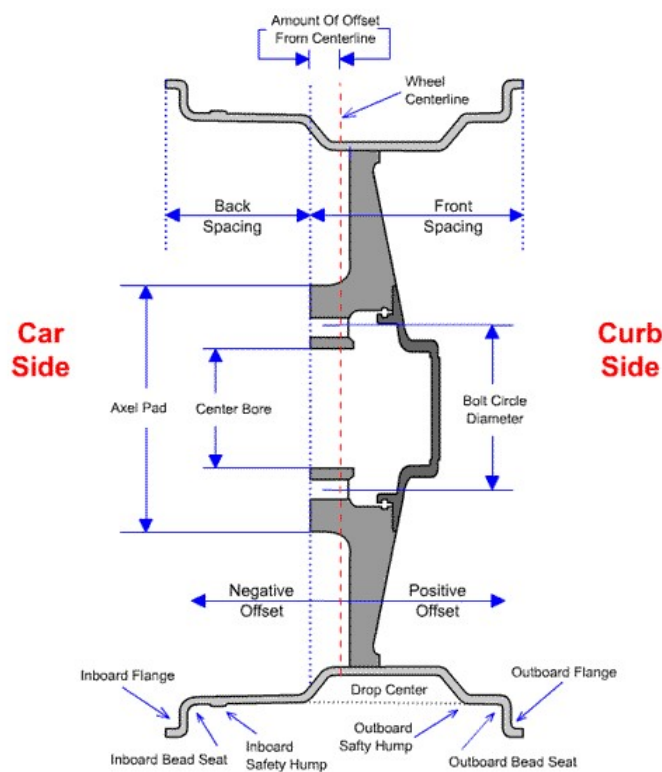


Figura 27: Perfil de una llanta genérica

Las partes en las que se divide son las siguientes:

- **Barrel:** es la estructura principal de la llanta, el cilindro con más volumen. Va desde la cara exterior² de la llanta hasta la interior. En esta parte se encuentran otros elementos de la llanta, como el *drop center* o los *flanges*.

²Definimos la cara exterior de la llanta como aquella que mira hacia fuera del coche, hacia la carretera. Para una rueda izquierda, la cara exterior, vista desde dentro del coche, será la izquierda.

- **Drop center:** es la parte de la llanta que tiene un diámetro menor que el radio exterior de la llanta. Visualmente, es la zona que parece estar “metida hacia dentro”. Este anillo más pequeño es el que permite enllantar la rueda.
- **Flanges:** son los bordes ensanchados en la parte más interior y exterior de la llanta. El material de esta zona se encuentra formando 90° con la superficie de la llanta.
- **Beads:** es la parte plana debajo de los *flanges*. Es el punto (la circunferencia, si miramos la llanta completa y no solo la sección) sobre el que se asienta el neumático en la llanta. Esta zona debe mantenerse limpia y en buen estado para asegurarnos de que el neumático apoya bien sobre la pieza, y evitar posibles fugas y la entrada de suciedad. También son un punto importante al tratarse de puntos de transferencia de energía, pues las fuerzas generadas en el neumático se transmiten por aquí a la llanta, de esta al cubo y de ahí a la mangueta y el chasis. Cualquier imperfección producirá vibraciones que se transmitirán, como hemos dicho, al coche, y que serán mayores cuanto mayor sea la velocidad a la que vaya el monoplaza.
- **Mounting / retaining humps:** son pequeñas protuberancias en la llanta por debajo de los *bead seats*. Son las encargadas de evitar que el neumático se mueva de su sitio. Suelen tener una superficie ligeramente inclinada para que, al reducir la presión del neumático para desenllantar, los *beads* del neumático salgan fácilmente.
- **Válvula:** se empleará una comercial.

En cuanto a medidas importantes en la llanta, debemos tener en cuenta las siguientes:

- **Diámetro efectivo:** diámetro medido desde la parte más interior de los *flanges*.
- **Ancho efectivo:** ancho medido entre los *bead seats*.
- **Pitch Circle Diameter (PCD):** diámetro de la circunferencia que une los centros de los agujeros de fijación.
- **Center bore:** diámetro del agujero central donde está el buje del coche.
- **Número de taladros:** número de agujeros para los tornillos de fijación al cubo.

- **Offset:** distancia entre la pared vertical interior de la llanta y el plano central imaginario de la rueda. A mayor offset, mayor será el espacio para los elementos que van dentro de la rueda (discos de freno, pinzas. . .).

3.2. Necesidades de Tecnun eRacing

La principal novedad que se pretende introducir con este proyecto no es tanto una geometría nueva sino más bien un proceso de fabricación nuevo. En este sentido, se va a buscar diseñar el proceso de fabricación para una primera llanta de carbono en el equipo, y que esta sirva como precedente para nuevos diseños en los que se introduzcan radios, se haga una llanta para una unión monotuerca, etc.

Como un objetivo es llegar a fabricar este prototipo y probarlo en uno de los coches del equipo, se necesita que sea compatible con los sistemas de suspensión y conjuntos de rueda existentes. Es por ello que se va a hacer una geometría similar a la de una llanta Keizer como las que empleamos ahora en los coches, adaptándola, claro está, al proceso de fabricación y materiales que tendrá la llanta de carbono.

3.3. Propuesta de diseño

Así pues, la geometría se va a modificar sobre el perfil de una llanta Keizer comercial. En el Apéndice A se puede encontrar el plano de la llanta Keizer 10x7.5.

Es importante mencionar aquí que aún no conocemos el grosor de la pieza, pues este viene dado por la configuración final de capas de tejido de fibra de carbono que obtendremos de la simulación con Altair OptiStruct. Como se detallará más adelante en el apartado 4.2, Altair apila las capas sobre una superficie de referencia. Esta superficie de referencia es la que vamos a diseñar nosotros. Podemos especificar que las capas se apilen sobre o bajo la superficie de referencia o que se apilen simétricamente respecto a esta. Pero para utilizar el solver de Altair OptiStruct que realiza la optimización de las capas solo podemos utilizar la opción de apilarlas de forma simétrica respecto a la superficie diseñada.

Esto podría suponer un problema, teniendo en cuenta que no conocemos el número final de capas que tendremos y, por lo tanto, no sabemos cuánto espacio habrá al final dentro de la llanta. Si este espacio resulta ser más reducido que el de las comerciales actuales, nos encontraremos con un problema de espacio, pues las pinzas de freno actuales tienen muy poco margen con respecto a la pared interior de la llanta.

Para solventar este problema nos vamos a basar en referencias externas de otros equipos de Formula Student con llantas de carbono similares a la que vamos a diseñar. El equipo catalán ETSEIB, de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), llevó a cabo un estudio similar en el que la configuración final contaba con 10 capas.

Teniendo esto en cuenta, se ha realizado una simulación con Altair para calcular las deformaciones que se producirían en una llanta con geometría simplificada y 10 capas de carbono (los detalles de cómo se simula están en el apartado 4 y en el Apéndice B). La solución que da Altair se ve en la siguiente Figura 28.

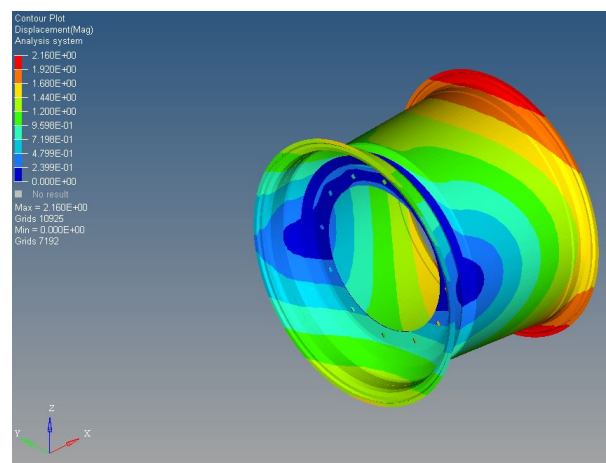


Figura 28: Análisis preliminar con 10 capas

Como se puede observar, la deformación máxima es de 2.2 mm. Este valor de deformación está cerca del que queremos conseguir (se detalla en el apartado 4). Teniendo en cuenta que obtendremos un resultado con alrededor de 10 capas, vamos a diseñar la superficie para

que aún tenga unos milímetros de margen respecto a la superficie interior de la comercial.

3.4. Material

El material que se va a utilizar es prepreg tipo SE 84LV del fabricante Gurit. Gurit es patrocinador del equipo desde hace años, y cada temporada nos provee de este producto. La cantidad acordada es suficiente para la fabricación de las llantas.

El prepreg SE 84LV contiene resina epoxy con un ciclo de curado que no requiere altas temperaturas. El tejido tiene un grosor de 0.3 mm. Las propiedades mecánicas de la resina, una vez curada, se muestran en la siguiente Figura 29.

PROPERTY	SYMBOL	SE 84LV RESIN CAST	TEST STANDARD
Tensile Strength	σ_T	82 MPa	ISO 527-2
Tensile Modulus	E_T	3.9 GPa	ISO 527-2
Flexural Strength	σ_F	123 MPa	ISO 178
Flexural Modulus	E_F	3.5 GPa	ISO 178
Compressive Strength	σ_C	163 MPa	ISO 604
Glass Transition Temperature	T_{g1}	115°C	ISO 6721

Figura 29: Propiedades mecánicas de la resina curada del SE 84LV

Por otro lado, las propiedades del laminado dependen de su configuración, pero para una capa de tejido biaxial, Gurit nos provee con la siguiente información de sus propiedades, mostrada en la Figura 30.

PROPERTY	SYMBOL	UNIT	RC200T	RC416T	TEST STANDARD
Resin Content	-	%	42	40	ASTM D 3171 Method II
Cured Ply Thickness	-	mm	0.23	0.43	ASTM D792
Fibre Volume Fraction	-	%	47 - 53	50 - 59	ASTM D 3171 Method II
0° Tensile Strength*	X_T	MPa	719	1006	ISO 527-4
0° Tensile Modulus*	E_L	GPa	60.6	59.1	ISO 527-4
90° Tensile Strength*	Y_T	MPa	662	858	ISO 527-4
90° Tensile Modulus*	E_{T22}	GPa	61.6	58.9	ISO 527-4
0° Compressive Strength*	X_C	MPa	759	649	SACMA SRM1-94
0° Compressive Modulus*	E_C	GPa	58.3	55.6	SACMA SRM1-94
90° Compressive Strength*	Y_C	MPa	731	659	SACMA SRM1-94
90° Compressive Modulus*	E_{C22}	GPa	59.0	55.2	SACMA SRM1-94
0° Flexural Strength	X_F	MPa	847	895	ISO 14125
0° Flexural Modulus	E_{F11}	GPa	51.2	49.4	ISO 14125
90° Flexural Strength	Y_F	MPa	857	892	ISO 14125
90° Flexural Modulus	E_{F22}	GPa	51.5	50.6	ISO 14125
ILSS	T_M	MPa	74.8	55.8	ISO 14130

Figura 30: Propiedades mecánicas de una capa biaxial del SE 84LV

4 Simulaciones

4.1. Introducción a Altair: HyperMesh, OptiStruct y HyperView

Altair tiene una suite de programas que permiten calcular modelos físicos en diferentes situaciones, como se ha descrito en el apartado 2.3.2. El que se va a emplear en este proyecto es OptiStruct, que optimiza el laminado. El ciclo de optimización se detalla en el apartado 4.4.

Altair posee varias herramientas para las distintas fases de la simulación. En primer lugar, la preparación del modelo (importación de la geometría, mallado y condiciones de contorno) se lleva a cabo en HyperMesh. Una vez tenemos el modelo listo, el cálculo y la optimización se hacen a través de OptiStruct. Por último, la visualización de los resultados se lleva a cabo en HyperView.

4.2. Parámetros de la simulación

En este apartado se resume el proceso de preparación de la simulación, los parámetros utilizados y los pasos que se han dado. El proceso detallado de cómo hacer la simulación se puede ver en el Apéndice B, donde se ha incluido un tutorial en el que se especifican los pasos a dar, uno a uno, para hacer el mallado, seleccionar las capas, etc.

4.2.1. Importar la geometría

En primer lugar debemos importar la geometría que vamos a simular. Esta se debe importar en un formato tipo STEP o IGES. El concepto de fabricación, detallado en el apartado 6.1, consiste en laminar dos piezas del molde y unir las por la superficie de la pletina. Para facilitar la definición de las capas en Altair HyperMesh se ha optado por importar una geometría consistente en un *assembly* de dos piezas. Al importar la geometría como dos componentes, tenemos la libertad de ocultar y seleccionar solo las partes de la llanta que deseamos, como se observa en la Figura 31.

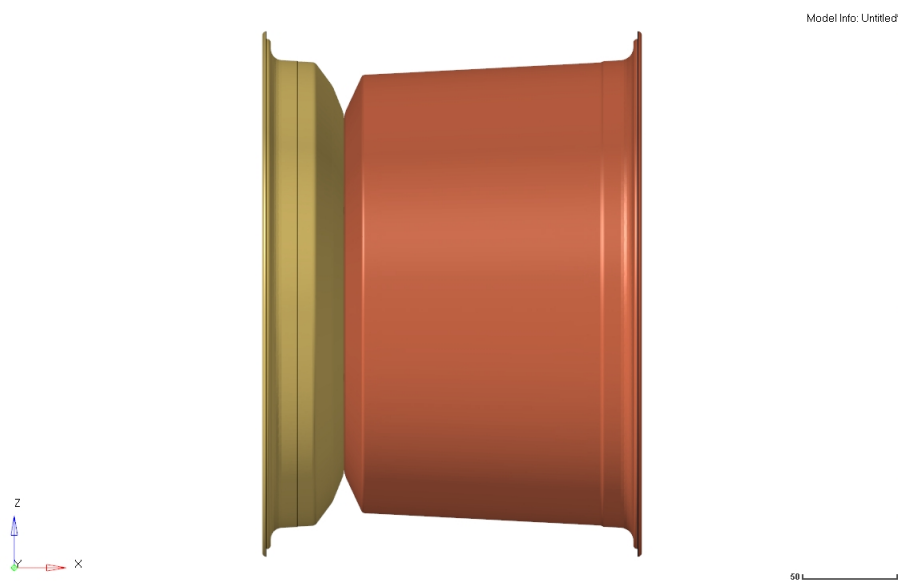


Figura 31: Geometría importada en dos piezas

La geometría se debe importar como superficies, para poder definir sobre esta las capas de carbono del laminado. Es importante saber que Altair trabaja sin un formato de unidades fijas. Esto significa que uno debe ser consistente con las unidades que utiliza para definir cargas, distancias, etc. Una rápida medida del diámetro de la llanta nos informa de que está utilizando el mm como unidad de longitud. Así, un sistema de unidades consistente es el mostrado en la Tabla 5.

Longitud	Masa	Aceleración	Densidad	Presión	Fuerza	Momento
mm	ton	mm s ²	ton/mm ³	MPa	N	N mm

Tabla 5: Unidades utilizadas

4.2.2. Crear el mallado

Una vez tenemos nuestra geometría, es el momento de mallar la llanta. Para ello utilizaremos la herramienta de mallado automático que ofrece HyperMesh, pero refinando la malla en aquellos puntos que sean más críticos. En nuestro caso, refinaremos la malla en los agujeros para los tornillos de anclaje al cubo, pues será una zona donde se concentren tensiones. El tamaño de elementos es de alrededor de 2 mm en las zonas menos críticas y 0.75 mm en la

zona refinada. Al ser una geometría con curvas se han utilizado elementos de 3 y 4 lados con la opción *mixed*. El resultado es una malla con aproximadamente 200.000 elementos. Se observa en detalle en la Figura 32.

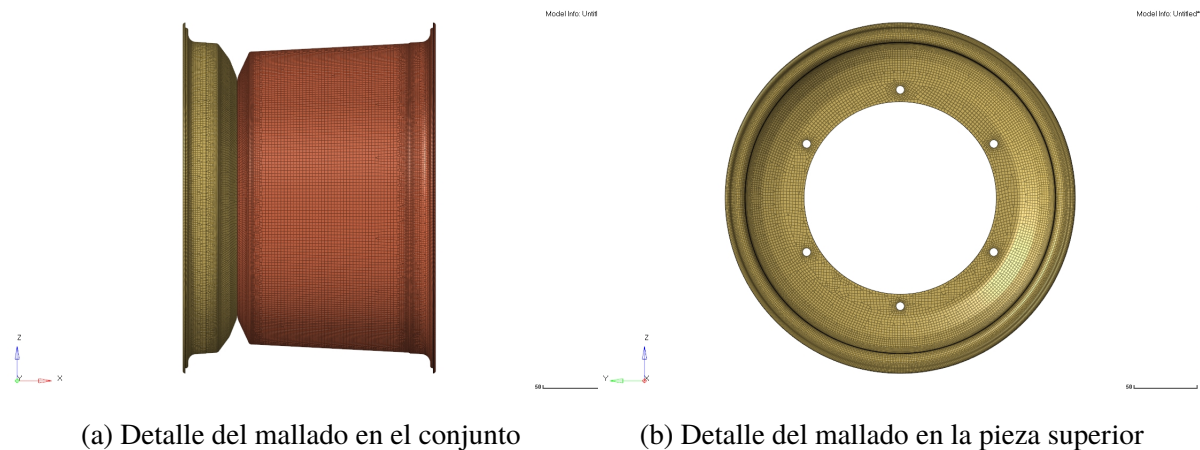


Figura 32: Vista del mallado

Para asegurarnos de que el mallado está bien hecho, podemos comprobarlo con la herramienta *quality index* de HyperMesh, que presenta opciones como:

- **Aspect Ratio:** ratio entre la arista más larga y más corta de un elemento. Buscamos elementos cuyo *aspect ratio* sea 1, aunque en la mayoría de las geometrías esto será imposible. Normalmente se aceptan valores entre 1-5 en las zonas críticas.
- **Skewness:** medida angular de la forma del elemento respecto a uno ideal (triangular o cuadrático). El rango aceptado generalmente es de 0-0.5.
- **Jacobiano:** mide la relación entre las normales de las caras de los elementos. Para un cubo perfecto, esta relación será 1. De ahí el jacobiano va bajando. Cuanto más pequeño sea peor.
- **Warpage:** medida de la inclinación de las caras del elemento respecto a la ideal. Para geometrías sencillas se aceptan valores de *warpage* $< 7^\circ$ y para geometrías más complejas, *warpage* $< 15^\circ$.

Dejaremos los valores que vienen por defecto en Altair y comprobaremos que los elementos están en los rangos permitidos. Si alguno está muy distorsionado, HyperMesh ofrece una herramienta para arreglarlos.

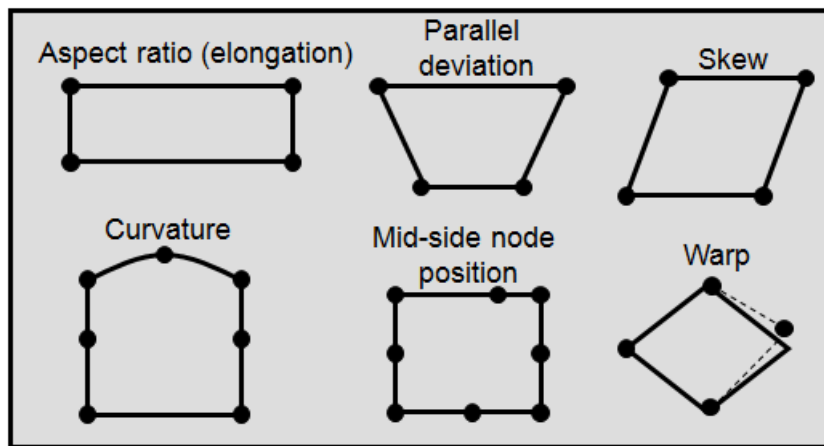


Figura 33: Parámetros para la medida de la calidad de los elementos

Con la geometría mallada se debe comprobar la orientación de los elementos, para luego no tener problemas al apilar las capas. Esto se observa en la Figura 34.

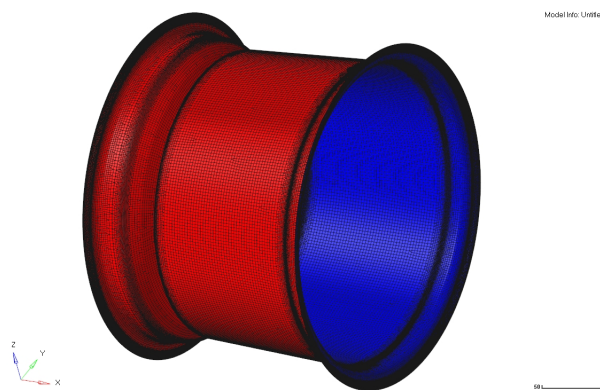


Figura 34: Normales de los elementos

4.2.3. Creación del material

El material que vamos a utilizar, el prepreg tipo SE 84LV de la empresa Gurit, se debe crear en el programa como un material tipo MAT8 (material ortótropo). Las características

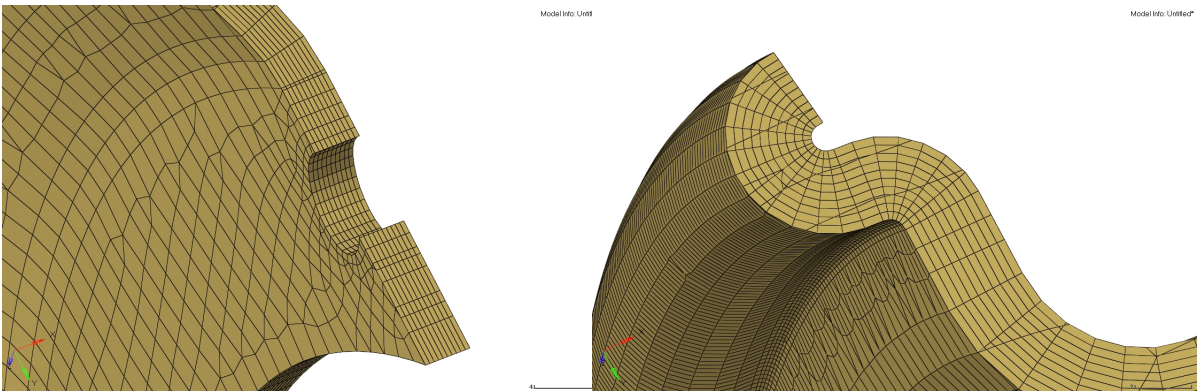
que introduciremos serán las siguientes, mostradas en la Tabla 6.

Siglas	Propiedad	Valor	Unidades
E1	0° Tensile Modulus	60600	MPa
E2	90° Tensile Modulus	61600	MPa
NU12	Poissons Ratio	0.037	-
G12	Shear Modulus	4081	MPa
RHO	Density	1.8e-09	ton/mm ³
Xt	0° Tensile Strength	719	MPa
Xc	0° Compressive Strength	759	MPa
Yt	90° Tensile Strength	662	MPa
Yc	90° Compressive Strength	731	MPa
S	Interlaminar Shear Strength	74.8	MPa

Tabla 6: Propiedades del material SE 84LV

4.2.4. Creación de las capas y el laminado

Ahora que tenemos el material podemos crear con él las capas de carbono. Definiremos un primer laminado con 10 capas en cada zona. Para ello definimos primero dos sublaminados y luego uno conjunto de tipo Interface laminate (explicado en detalle en el Apéndice B). El resultado de es como se observa en la Figura 36.



(a) Detalle de las capas en los agujeros

(b) Detalle las capas en los *flanges*

Figura 35: Detalle del laminado

Edit Laminate

Type: Interface laminate

Name: interface_lam

☐ Same as: interface_lam

Card image: STACK

☒ Update color: [Blue]

Laminate option: Total

Define sublaminates:

Sublaminates name	Id	Color	Material	Thickness	Orientation	IP	Result
top	2	[Blue]					
bottom	3	[Blue]					

Interface definition:

Interfa...	Interface ply 1	Interface ply 2
INT1	20	10

Update Cancel

Figura 36: Configuración del laminado

4.2.5. Propiedad PCOMPP

En la definición de laminados Altair ofrece 3 tipos de propiedades: PCOMP, PCOMPG, PCOMPP. Las propiedades asignadas a los laminados permiten trabajar con ellos de una forma u otra, como se explica a continuación.

La propiedad PCOMP define las capas de cada zona por separado y no permite asociarlas entre sí por afinidad de grosor, orientación y posición relativa. En cambio, la propiedad PCOMPG sí permite esta unión entre capas con diferentes IDs, pues define las capas como globales (G). Se aclara con la siguiente Figura 37.

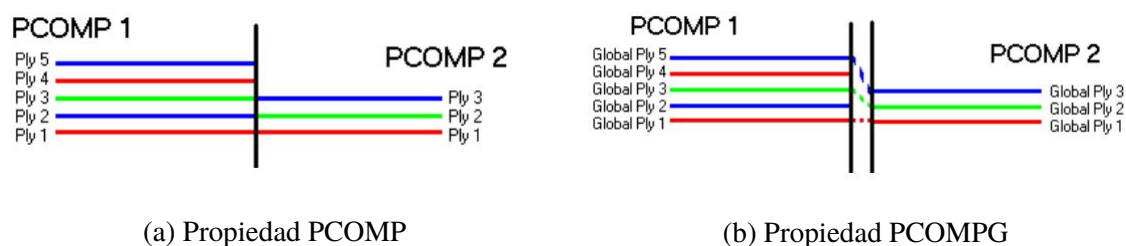


Figura 37: Visualización de las propiedades PCOMP y PCOMPG

Por otro lado, la propiedad PCOMPP es muy similar a la PCOMPG, exceptuando la posibilidad de introducir información externa, como el grosor último del laminado. Definiremos por lo tanto una propiedad PCOMPP en todo el laminado.

4.2.6. Definición de las hipótesis de carga

Se definen a continuación las condiciones de contorno de la pieza y las hipótesis de carga que va a tener. Estas se detallan en el apartado 4.3. Las cargas se van a aplicar como una fuerza remota a una distancia de 76.250 mm en el eje Z de la llanta respecto al punto más bajo del diámetro más interior de la pletina para los agujeros de los tornillos, como se ve en la Figura 38.

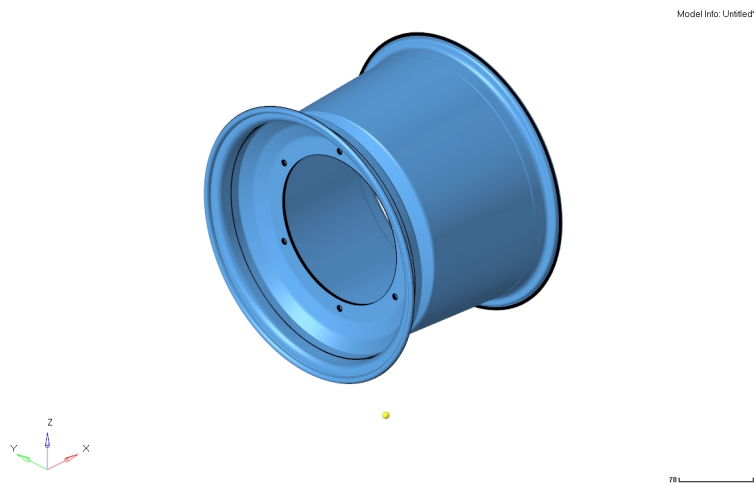


Figura 38: Nodo del *contact patch*

Para definir las cargas ahí y que se distribuyan por la zona de contacto de la llanta y el neumático se crea un nuevo componente que consiste en unas barras rígidas que van del nodo donde se aplican las cargas a la superficie de contacto, como se ve en la Figura 39.

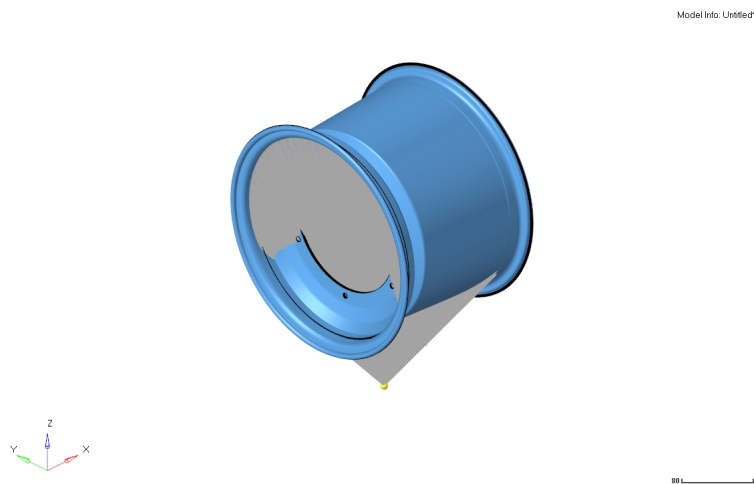


Figura 39: Barras rígidas para la transmisión de fuerzas y momentos

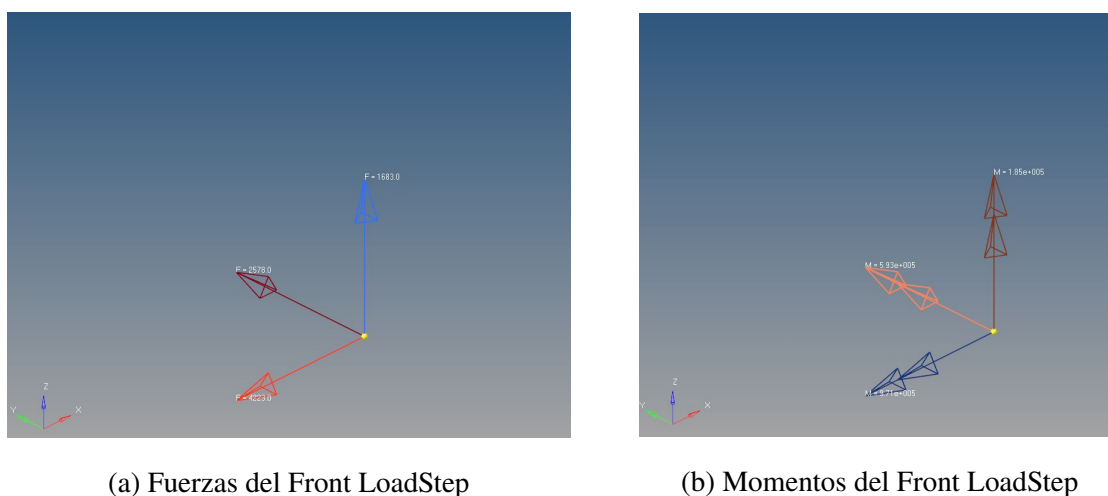


Figura 40: Detalle de las fuerzas y momentos en el Front LoadStep

Una vez hemos definido todas las cargas y restricciones de la simulación, pasamos a realizar un primer análisis. Es importante aquí hacer una nota al lector referente a la definición de las hipótesis de carga, aunque se explica en más detalle en el Apéndice B. En HyperMesh se definen por un lado todas las fuerzas y por otro lado las hipótesis de carga. Para poner más de una fuerza o restricción en una hipótesis de carga habrá que crear, previo a ello, otro load collector con una card image tipo LOADADD o SPCADD. Aquí introduciremos las cargas que actúan en una sola hipótesis de carga y el factor de escala con el que actúan.

4.2.7. Pre análisis de la llanta

Antes de realizar la optimización se ha realizado un primer análisis estático lineal de la llanta. En este análisis la llanta tenía un laminado de 10 capas en cada sublaminado. Los resultados de tensión y deformación se ven en las siguientes Figura 41 y Figura 42, respectivamente.

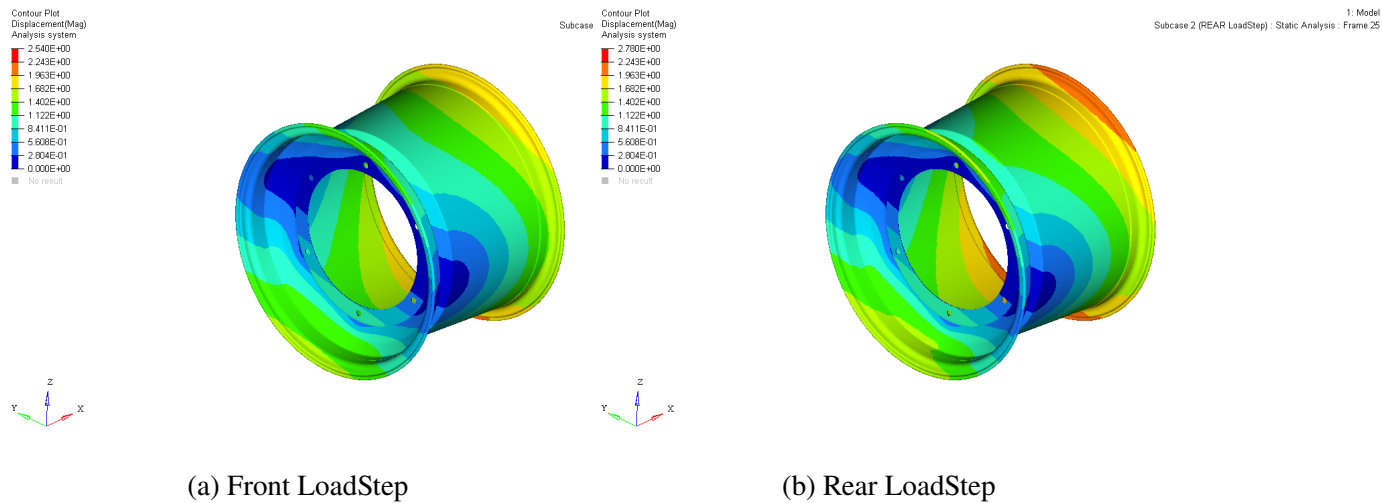


Figura 41: Resultados de deformación del análisis preliminar

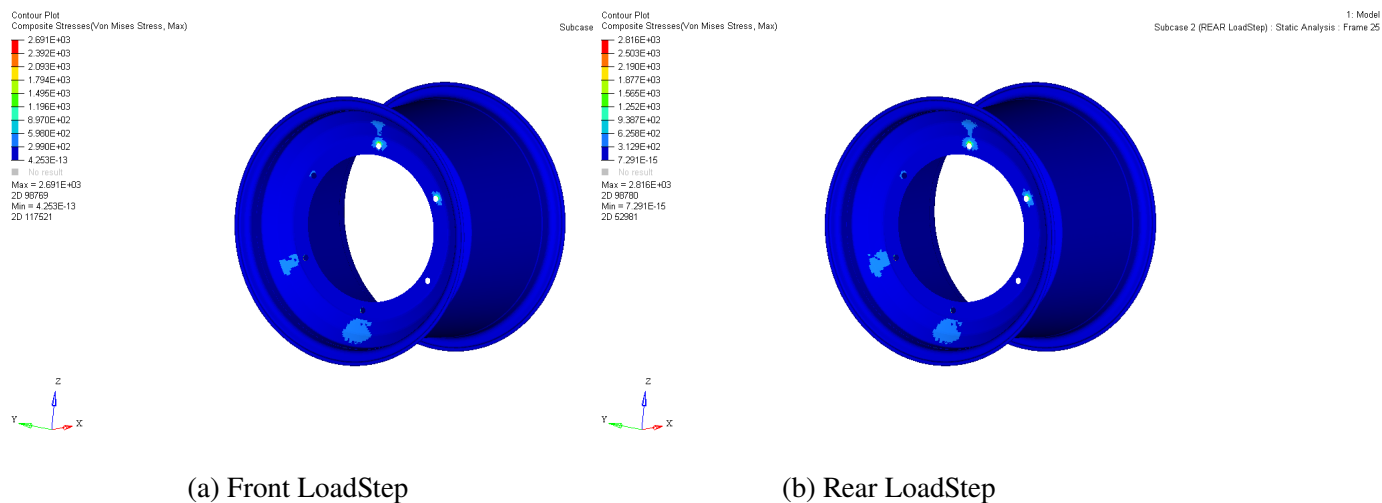


Figura 42: Resultados de tensión del análisis preliminar

Como se observa, con esta configuración el desplazamiento máximo de las fibras es de algo más que los 2.5 mm que vamos a permitir. Esto significa que los grosores deben aumentarse en algunas zonas, y se hará de forma óptima en el apartado 4.4. Los resultados de esta optimización se pueden encontrar en el apartado 5.1.

4.3. Cargas y restricciones

Las cargas a las que está sometida la llanta son de dos tipos. Por una parte tenemos la presión de hinchado de los neumáticos, que está aplicada en toda la superficie comprendida

entre los *mounting humps* de la llanta, como se observa en la Figura 43. Los valores de presión que suelen tener los neumáticos están entre los 0.6 y 1 bares. Para asegurar el resultado, introducimos un valor de 1.5 bares en la simulación.

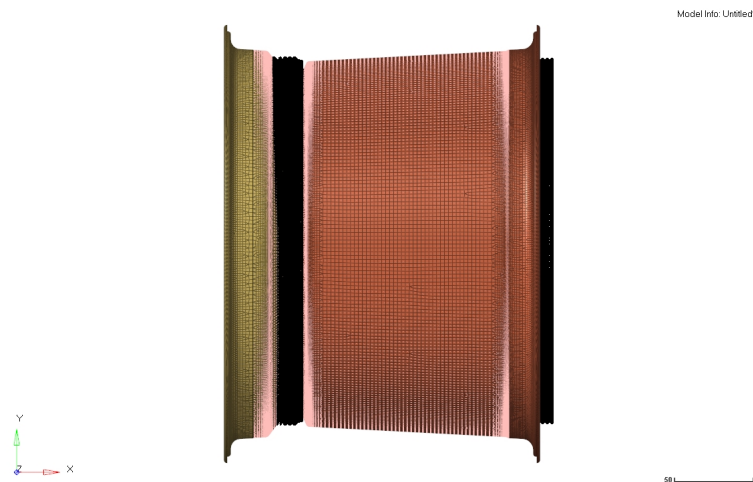


Figura 43: Presión aplicada

Por otro lado tenemos las fuerzas que se transmiten del asfalto al neumático durante la carrera. Estas son las fuerzas de aceleración, frenada y dirección que aparecen en el neumático como aceleración tangencial, fuerza normal y aceleración lateral. El convenio de signos se observa en la Figura 44. Básicamente, estas fuerzas son generadas por:

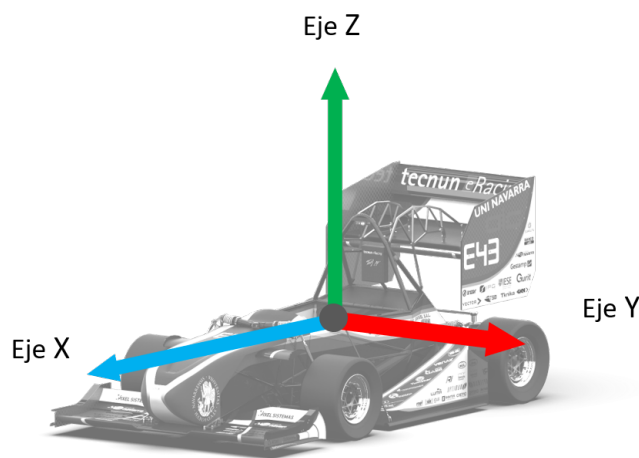


Figura 44: Convenio de direcciones de las fuerzas

- **Aceleración tangencial / longitudinal:** en la dirección de avance del coche. Surgen al aplicar un par en el eje de la rueda, se traslada por esfuerzo cortante a través del cubo a la llanta, al neumático y de ahí al asfalto. Es la aceleración que aumenta o disminuye la velocidad con que avanza el vehículo.
- **Fuerza normal:** la que sufre el neumático por el peso del vehículo.
- **Aceleración lateral:** en la dirección perpendicular al sentido de la marcha. Es la fuerza que permite el giro. Es un vector dirigido hacia el centro de la curva y su magnitud depende de la velocidad a la que nos movemos y del radio de la misma

Para obtener los valores de estas fuerzas y momentos nos hemos basado en una simulación del programa *CarMaker* de *IPG Automotive* de una carrera en un circuito genérico de Endurance. A partir de este se han obtenido los esfuerzos en el *contact patch*³ del neumático. Los esfuerzos máximos en cada rueda se observan en la siguiente Tabla 7. Los datos de fuerzas están en Newtons y los de momentos en Newton-metro.

	Rueda	Módulo	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y	M_z
1	FL	5226.52414	2578	4223	1683	593	971	185
2	FR	4129.595376	2566	2783	1651	590	640	182
3	RL	5629.743892	3469	3714	2422	798	854	266
4	RR	4532.030587	2245	3156	2353	516	726	259

Tabla 7: Casos de carga máxima en el neumático

En cuanto a las restricciones de movimiento de la pieza, se han restringido los movimientos y rotaciones de las superficies de los agujeros para los tornillos de anclaje al cubo.

Observando la Tabla 7 vemos que los casos de fuerzas y momentos máximos se dan en el caso 1 y caso 3, esto es, en las ruedas delantera y trasera izquierdas. Se ha optado, por lo tanto, por definir dos hipótesis de carga: Front LoadStep y Rear LoadStep (véase Tabla 8).

³El contact patch del neumático es el área que está en contacto con el asfalto.

Front	Valor	Rear	Valor
F_x	2578 N	F_x	3469 N
F_y	4223 N	F_y	3714 N
F_z	1683 N	F_z	2422 N
M_x	593 Nm	M_x	854 Nm
M_y	971 Nm	M_y	798 Nm
M_z	185 Nm	M_z	266 Nm
Presión	1 bar	Presión	1 bar
Restricciones	Tornillos fijos	Restricciones	Tornillos fijos

Tabla 8: Hipótesis de carga simuladas

4.4. Ciclo de optimización

Altair OptiStruct es un solver de Altair Hyperworks que permite optimizar el número y orientación de las capas de carbono para lograr los resultados que especifique el usuario. La optimización se da en 3 pasos: hay una primera fase en la que el programa calcula la solución óptima a nuestro problema de optimización, una segunda fase en la que definimos las condiciones necesarias para crear capas fabricables y, por último, una fase en la que se reorganizan las capas de la solución del segundo paso para obtener la secuencia óptima de apilamiento. En los siguientes puntos se detallan estos pasos.

4.4.1. Primera fase: Free Size Optimization

En esta primera fase el programa busca los grosores óptimos para cada orientación definida. Para ello, se definen unas supercapas, es decir, capas de carbono de un grosor muy elevado (definimos supercapas con grosores de alrededor de 2 o 3 mm, un valor elevado respecto al grosor real de una capa, de 0.3 mm). A partir de ahí, Altair va quitando material hasta conseguir la configuración óptima en cada punto de la pieza. El objetivo de esta optimización es el de reducir al máximo el peso de la pieza, aumentando su rigidez. El problema de optimización se formula poniendo como función objetivo minimizar el peso y

poniendo como restricciones la condición de rigidez, que en este caso es la de no permitir un desplazamiento de las fibras mayor que 2.5 mm, valor a partir del cual las fibras empiezan a fallar (este valor ha sido obtenido a través de la experiencia en la Formula Student y colaboración con otros equipos). El problema de optimización se define matemáticamente como:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimizar} && f(x) \\
 & \text{Sujeto a} && g_j(x) - g_j^U \leq 0, && j = 1, \dots, M \\
 & && x_{ik}^L \leq x_{ik} \leq x_{ik}^U, && i = 1, \dots, N_p, \quad k = 1, \dots, N_e
 \end{aligned} \tag{8}$$

donde:

- $f(x)$ es la función objetivo, es decir, el peso de la llanta
- $g(x)$ y $g(U)$ son la respuesta de deformación y su límite superior (2.5 mm), respectivamente.
- x_{ik} es el grosor del elemento k de la capa i y los límites entre los que puede variar, esto es, el valor de la supercapa (x_{ik}^U) y el valor mínimo especificado en la simulación (x_{ik}^L). N_p es el número total de capas y N_e es el número total de elementos que hay en cada capa.

Como resultado, Altair genera una configuración de capas con grosores que oscilan entre 0 mm y el grosor especificado en cada supercapa, en este caso, 2.5 mm. Esta configuración se presenta en capas continuas, con un número de elementos por capa que varía para cada una. Esta nueva geometría contiene los grosores óptimos para cada orientación. Observando el resultado, veremos que es una configuración que no es posible fabricar (hay capas con grosores del orden de 0.0002 mm y formas de capas con área de unos pocos mm²). Pero nos da una primera aproximación de los que vamos a obtener al final del ciclo de optimización. Para asegurarnos de obtener una configuración fabricable, pasamos al siguiente paso: *Size Optimization*.

4.4.2. Segunda fase: Size Optimization

En esta segunda fase definiremos las condiciones externas de fabricación. Para ello, tendremos que especificar el grosor de las capas, de 0.3 mm en nuestro caso, y volver a optimizarlo.

Altair buscará ahora una nueva configuración a partir de la primera optimización, uniendo capas y despreciando otras, hasta conseguir un resultado fabricable. En este paso lo más probable es que la masa del conjunto aumente un poco respecto a la masa que hemos obtenido en el apartado anterior, ya que estamos restringiendo las posibilidades a aquellas fabricables y, a menos que la optimización del *Free Size* de como resultado unas capas del mismo grosor que el material que tenemos, la solución del *Size Optimization* será algo peor.

4.4.3. Tercera fase: Shuffle Optimization

El *Size Optimization* nos dará como resultado una configuración fabricable, con capas creadas a partir de las capas no fabricables del *Free Size*. Pero no tiene por qué ser una configuración óptima aún. Por eso tenemos esta última fase de *Shuffle Optimization*.

Esta fase busca la secuencia de apilamiento óptima de las capas teniendo en cuenta las restricciones indicadas en la simulación.

De forma resumida, el ciclo de optimización consiste en: definir supercapas a partir de las cuales el programa elimina el máximo material posible. Definimos unas restricciones de fabricación y, con ellas, Altair adapta el resultado anterior. Por último, reorganizamos las capas para conseguir el mejor resultado posible.

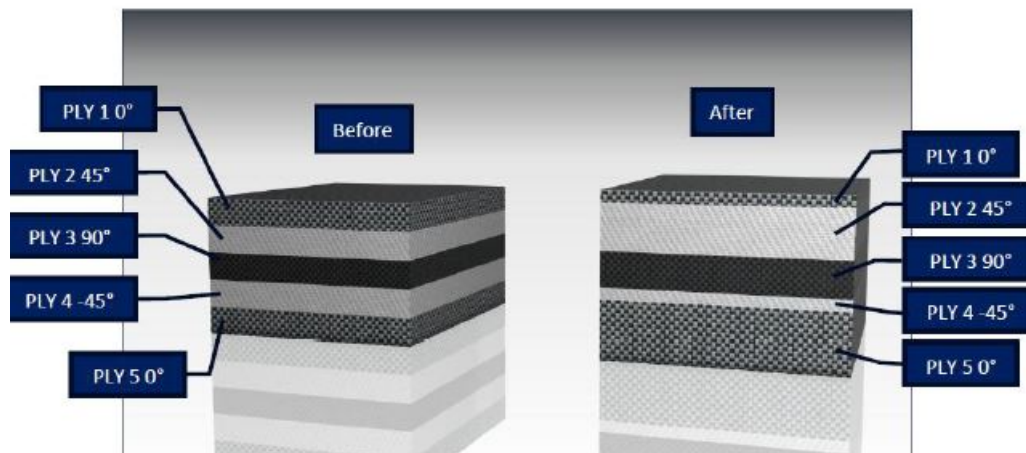


Figura 45: Esquema de la optimización de OptiStruct

4.5. Fallos a tener en cuenta

Se describen en este apartado los fallos más importantes que se han cometido a lo largo del proceso de simulación para que así el siguiente que utilice el programa los evite de primeras. La mayoría de estos fallos daban como consecuencia un error que impedía simular. Otros, sin embargo, no daban error al calcular, pero los resultados no eran válidos.

- **Geometría importada como superficie:** la geometría de la llanta que se va a importar para luego convertir en composite debe tener formato de superficie, no de sólido. Altair apila las capas sobre la superficie definida y, si se importa la geometría sólida, tendremos más de un elemento por cada punto del plano sobre el que se coloca la capa de carbono, y el programa no sabe entonces qué geometría de capa le estamos asignando.
- **Geometría importada como un assembly:** no es un fallo como tal, pero se recomienda importar la llanta como un assembly de dos piezas (la superior y la inferior, como se ha comentado en apartados anteriores). Definiendo la geometría como un conjunto de piezas da libertad al usuario para ocultar los elementos del conjunto que no se quieran seleccionar. Esto es especialmente útil a la hora de definir las capas de cada zona del laminado.

- **Unidades:** Altair OptiStruct no funciona con un convenio de unidades fijas, depende de las utilizadas por el usuario al definir la geometría. Si importamos una llanta con medidas en mm, deberemos ser consistentes y utilizar luego las unidades definidas en el apartado 4.2.1.
- **Checkear el mallado:** al utilizar la herramienta del mallado, es importante verificar luego que la calidad de la malla es buena. Si no, al simular dará un error, aunque se trate únicamente de un elemento defectuoso. Intentar arreglar la malla una vez se han definido los materiales, capas, laminados y funciones de optimización resulta complejo, ya que todos los pasos que se dan para simular contienen referencias a los elementos de la malla. Si esta se cambia, habrá que actualizar todos los parámetros referenciados a ella y es probable que en algún punto obtengamos un error.
- **Crear el material en HyperLaminate:** al crear el material es importante ser consistente con las unidades de las propiedades del material. Al acabar de crearlo, no hay que olvidarse de dar a *Apply*.
- **Parámetro Z0 de la propiedad PCOMPP:** al definir la propiedad PCOMPP del laminado encontramos la opción de Z0: *real*, *top* o *bottom*. Este parámetro indica el modo de apilación de las capas de carbono respecto a la superficie de la geometría de la llanta. El problema está en que, si queremos hacer una optimización con el Free Size, solo podemos usar la opción *real*. Así, si queremos que las capas de varios sublaminados no interseccionen entre sí, como ocurre en la zona de la pletina, en vez de usar la opción *bottom*, utilizaremos la opción *real* con un offset de la medida necesaria (para 10 capas de 0.3 mm el offset será de -3).
- **Sublaminates:** la llanta se fabrica con dos partes laminadas por separado y luego laminadas entre sí. Para definirlo, hay que crear cada laminado por separado y definirlo del tipo *sublaminated laminate*. Después crearemos otro laminado de tipo *interface laminate* en el que incluiremos los otros dos, además de especificar las capas que están en contacto.
- **Hipótesis de carga con más de una carga o restricción:** cuando definimos una

hipótesis de carga solo podemos asignarle una restricción y una carga. Si en la realidad tenemos más de una restricción o carga, deberemos crear una nueva restricción de tipo SPCADD (Card Image) o una nueva carga tipo LOADADD (Card Image) e incluir en ella las cargas que se aplican.

- **RBE2:** al definir la transmisión de la fuerza remota por medio de barras rígidas (elementos tipo RBE2) es recomendable hacerlo dentro de un nuevo componente. Esto nos dará libertad para ocultar las barras en cualquier momento.
- **Mínimo grosor de laminado en el Free Size Optimization:** al haber puntos que no sufren casi cargas, Altair puede interpretarlo como material a eliminar para minimizar la masa. Para evitarlo, hay que definir un grosor mínimo de laminado. Esto se hace al crear la variable de diseño, en el apartado composites.
- **Renombrar la variable de diseño:** al acabar el Free Size Optimization se crean tantas variables como capas nuevas hay. Además, la variable de diseño definida en el apartado anterior también toma un nombre nuevo similar al de estas nuevas variables. Es por ello que se recomienda cambiar su nombre al anterior, para no confundirla a la hora de definir los límites superiores del grosor de las capas del Free Size.
- **Aislar los elementos al hacer *update*:** como se explica en el anexo, después del Free Size Optimization hay que actualizar cada una de las capas de la solución. Para ello, se debe aislar (*isolate*) cada capa antes. Si no, al hacer *update* le cambiaremos la forma a la capa y luego no coincidirá con su *set* y dará error.

5 Resultados

5.1. Resultados de Altair

Tras ejecutar el ciclo de optimización de Altair OptiStruct en las tres fases en las que se divide, los resultados obtenidos son los siguientes.

5.1.1. Resultados del Free Size Optimization

Para esta primera fase se han definido unas supercapas con un grosor de 2 mm en todo el laminado, consistente en 20 capas. En este instante, el peso de la llanta es de 7,581 kg, excesivamente elevado. Tras optimizar el diseño al máximo con el Free Size, el resultado es de 80 capas de formas muy distintas y orientaciones que varían entre las permitidas por nuestro diseño inicial. En este punto encontramos que el desplazamiento máximo se da en un nodo de la llanta en la hipótesis de carga de la rueda trasera, con 2.48 mm. Este valor está muy próximo al máximo que hemos permitido, que recordamos que era de 2.5 mm. En la hipótesis de carga de la rueda delantera el desplazamiento máximo es de 2.315 mm. Estos desplazamientos se observan en la siguiente Figura 46.

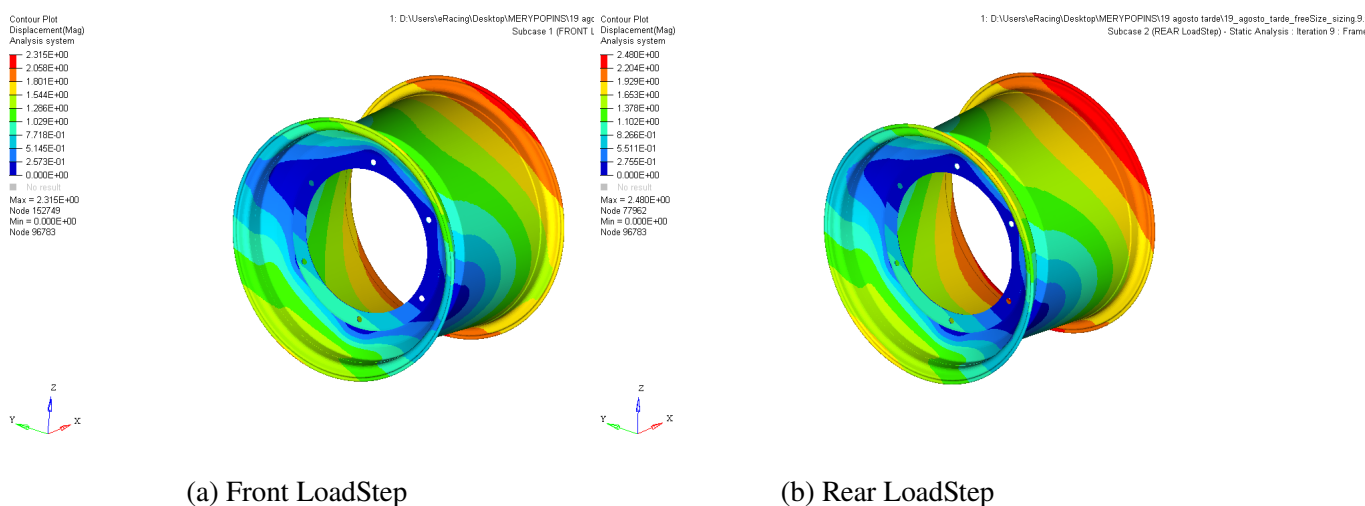


Figura 46: Resultados de desplazamiento del Free Size Optimization

En cuanto a la tensión máxima, esta se da alrededor de la zona de anclaje de la llanta al buje del coche. En concreto, los valores máximos de la tensión de Von Mises en ambas

hipótesis de carga se observan en la Figura 47.

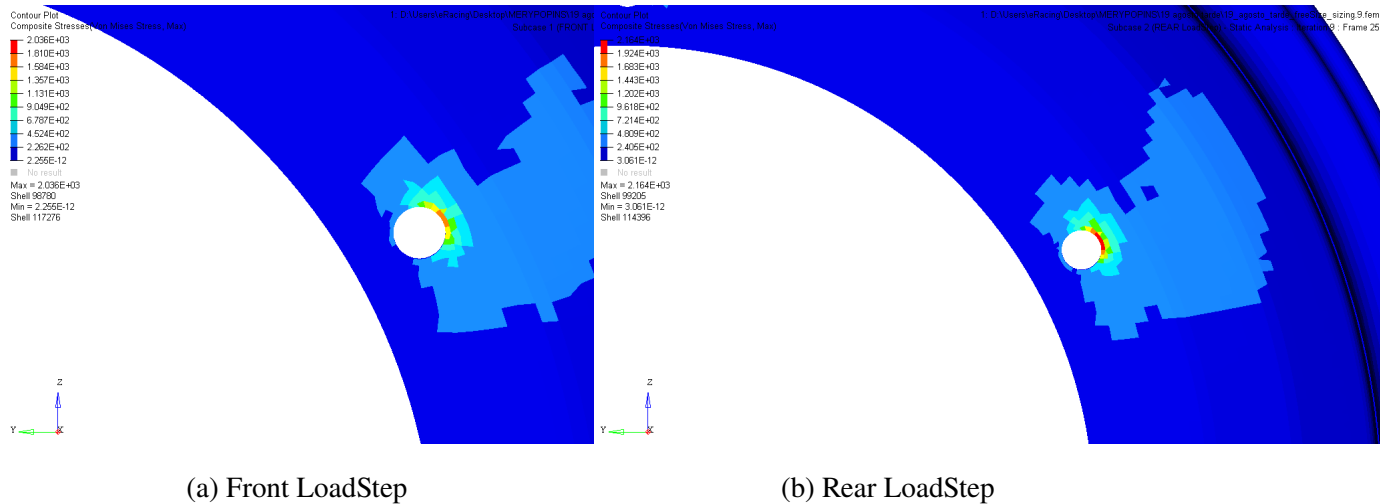


Figura 47: Resultados de tensión de Von Mises del Free Size Optimization

El laminado que nos ha dado el Free Size es consistente con las restricciones de diseño que hemos definido y, además, aguanta las fuerzas sin romperse. Tiene la masa mínima que podemos encontrar, 790 gr. Pero no es una llanta fabricable, ya que las capas que obtenemos tienen grosores por debajo del grosor del carbono disponible para fabricación (0.3 mm). Las diferentes capas se presentan además en forma continua y con patrones complejos (véase la Figura 48). Así pasamos a la segunda fase de la optimización.

Model Info: D:/Users/eRacing/Desktop/MERYPOPINS/19 agosto tarde/19_agosto_tarde_freeSize.hm*

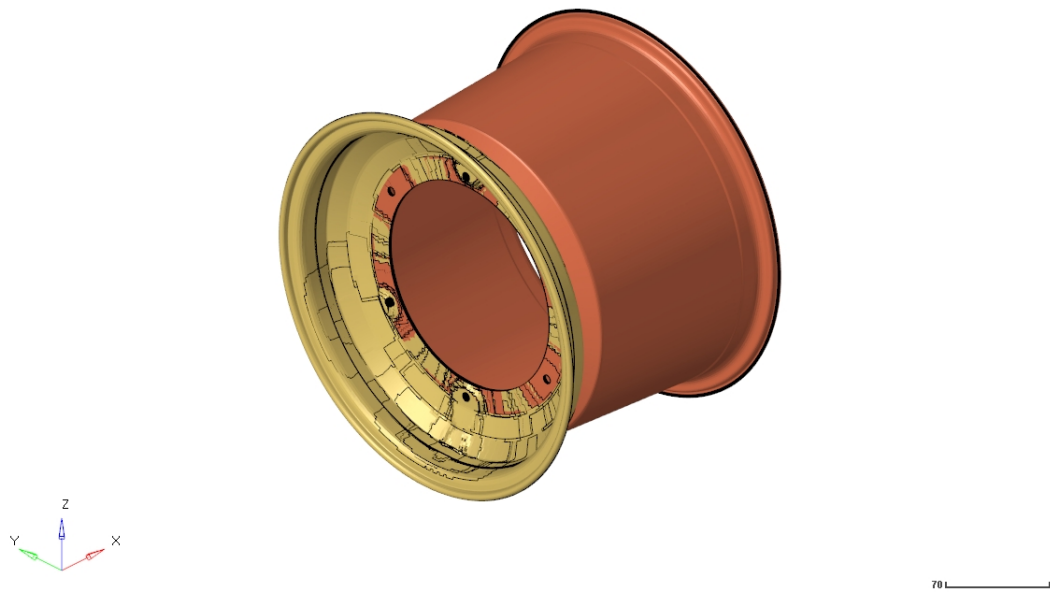
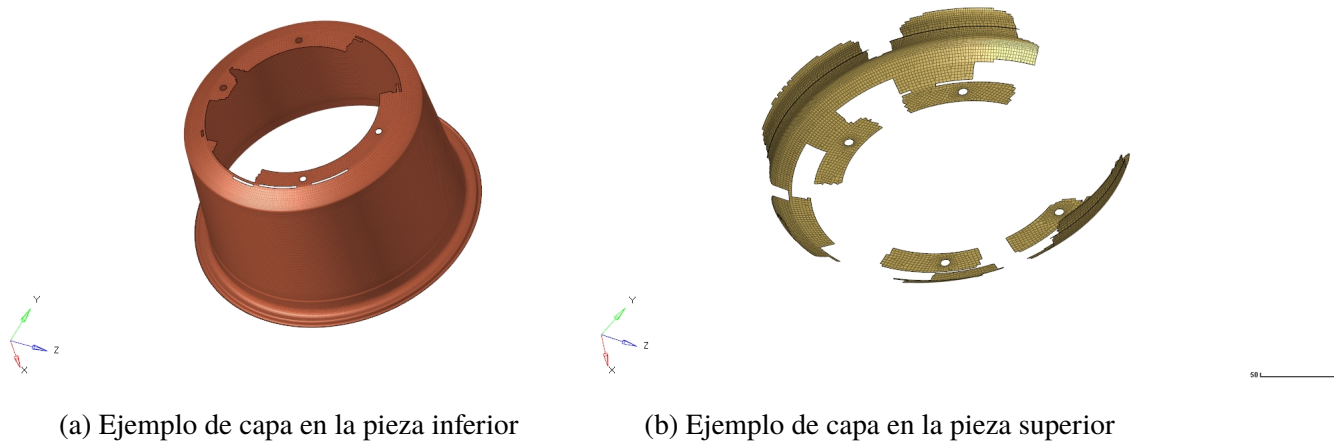


Figura 48: Resultado del laminado del Free Size Optimization

Model Info: D:/Users/eRacing/Desktop/MERYPOPINS/19 ago

Model Info: D:/Users/eRacing/Desktop/MERYPOPINS/19 agosto tarde/19_agosto_tarde_freeSize.hm*



(a) Ejemplo de capa en la pieza inferior

(b) Ejemplo de capa en la pieza superior

Figura 49: Detalle de las capas del Free Size

5.1.2. Resultados del Size Optimization

En la segunda fase hemos definido un grosor de fabricación (TMANUF) de 0.3 mm, y hemos actualizado las variables de cada una de las 80 capas para que puedan aumentar su grosor hasta ese valor. La optimización da así un resultado de 38 capas, donde el programa

ha unido capas similares entre sí y ha despreciado otras cuya aportación era mínima. Observamos el nuevo laminado en la siguiente Figura 50.

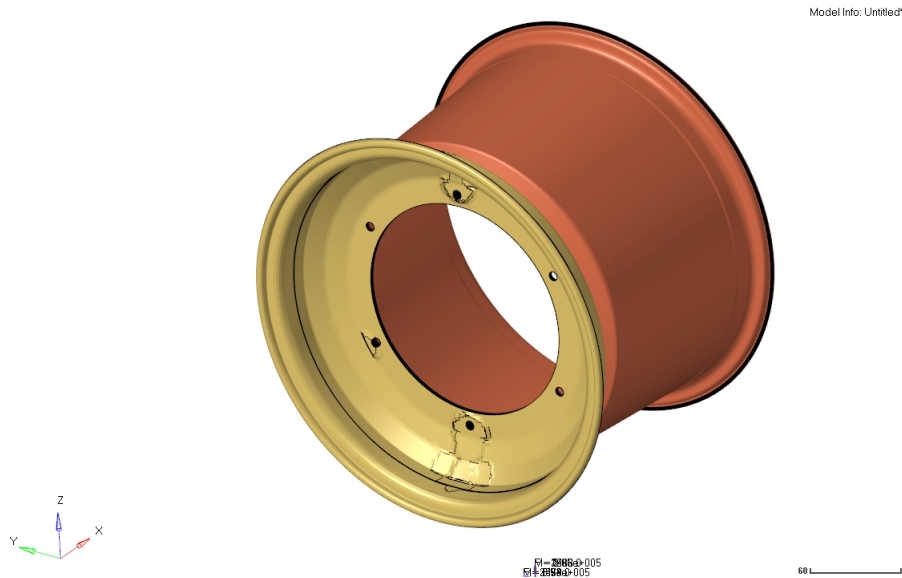


Figura 50: Resultado del laminado del Size Optimization

Esta nueva llanta pesa 900 gr, algo más que el anterior diseño. No obstante, aunque el peso haya aumentado al hacer la llanta más fácil de fabricar, también se ha reducido el desplazamiento máximo de los nodos, que ha pasado a ser 1.397 mm en la rueda trasera y 1.316 mm en la delantera. Los nuevos resultados de desplazamiento y tensión se ven en las siguientes figuras (Figura 51 y Figura 52, respectivamente).

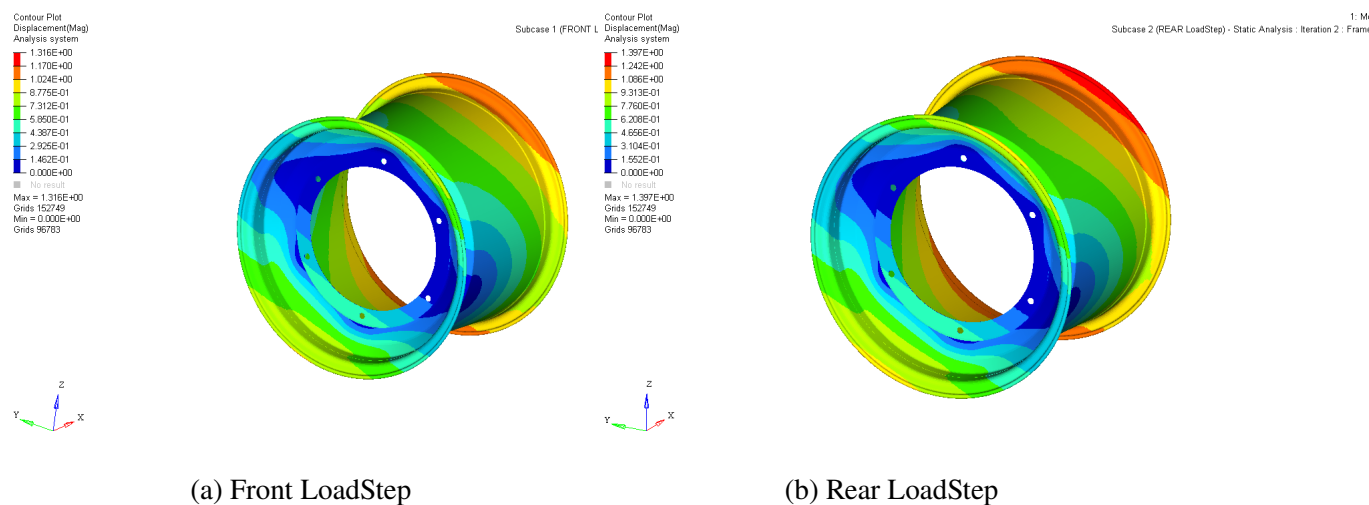


Figura 51: Resultados de desplazamiento del Size Optimization

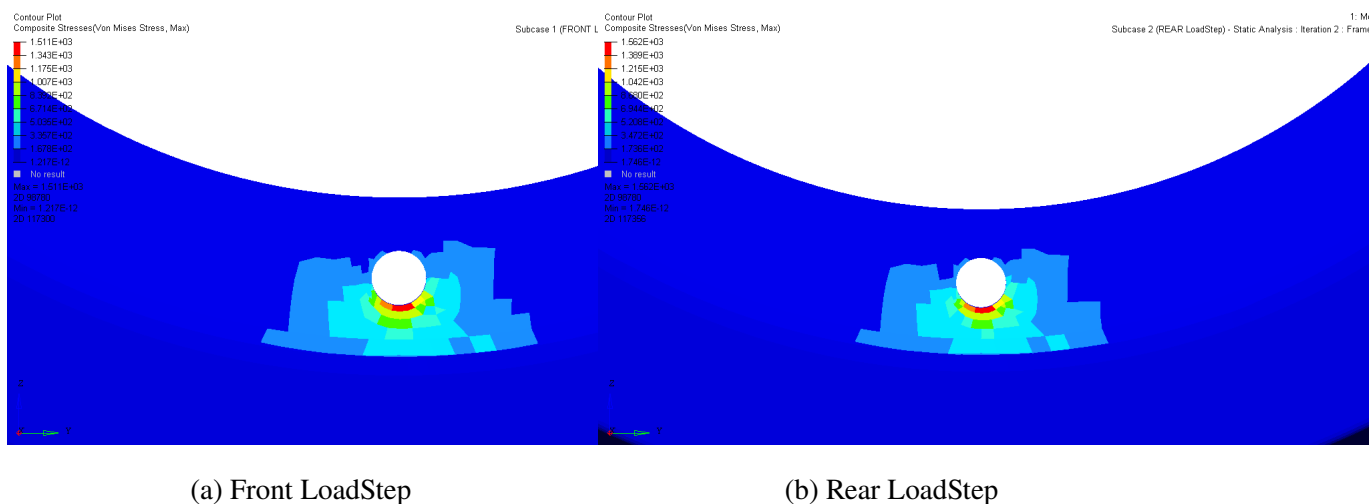


Figura 52: Resultados de tensión del Size Optimization

5.1.3. Resultados del Shuffle Optimization

Por último, con la optimización de reorganización el programa obtiene la secuencia óptima de apilamiento de las capas obtenidas en el paso anterior. Tras unas pocas iteraciones, la secuencia final es la mostrada en la siguiente Figura 53.

Stacking sequence for STACK 1

Iteration 0	Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4	Legend
1401	3101	11402	11402	11402	90.0 degrees
2101	8101	5401	5401	5401	60.0 degrees
2401	1401	5101	5101	5101	45.0 degrees
3101	5101	4401	4401	4401	30.0 degrees
3401	2101	6401	6401	6401	0.0 degrees
4101	2401	4101	4101	4101	-30.0 degrees
4401	4101	3101	3101	3101	-45.0 degrees
5101	10101	8101	8101	8101	-60.0 degrees
5401	5401	7101	7401	7401	
6401	4401	9401	7101	7101	
7101	3401	9101	9401	9401	
7401	8401	10101	9101	9101	
8101	7101	2101	10101	10101	
8401	7401	1401	1401	1401	
9101	10401	2401	2101	2101	
9401	6401	3401	2401	2401	
10101	9101	8401	3401	3401	
10401	9401	7401	8401	8401	
11101	12101	10401	10401	10401	
11401	11101	12101	12101	12101	
11402	13101	11401	11401	11401	
12101	18101	11101	11101	11101	
12401	15101	13101	13101	13101	
13101	12401	18101	18101	18101	
13401	14101	15101	15101	15101	
14101	14401	14101	14401	14401	
14401	11401	14401	15401	15401	
15101	15401	15401	14101	14101	
15401	17101	17101	17101	17101	
16101	13401	17401	17401	17401	
16401	18401	13401	13401	13401	
17101	17401	18401	18401	18401	
17401	19101	19101	19101	19101	
18101	11402	20401	20401	20401	
18401	16101	12401	19401	19401	
19101	19401	19401	12401	12401	
19401	20401	16101	16101	16101	
20401	16401	16401	16401	16401	

Figura 53: Resultado de la secuencia del Shuffle Optimization

5.2. Solución final presentada

Llegados a este punto es importante explicar que el análisis que se ha realizado es un análisis estático. Se han aplicado las cargas en un solo punto y, como resultado, Altair nos ha ofrecido una solución válida únicamente para cuando la rueda esté en ese punto. Pero el neumático va a estar girando continuamente y, debido a esta rotación, todos los puntos de la llanta van a sufrir las cargas máximas que se han dado en este análisis estático. Por la complejidad que suponía la simulación dinámica de la rueda, se ha optado por ex-

trapolar los resultados obtenidos para asegurar un correcto funcionamiento durante la carrera.

Los puntos que más tensión soportan y donde más material ha añadido Altair es la zona de los tornillos de anclaje al cubo. Cuando el neumático esté girando, todos los tornillos van a sufrir las cargas máximas, por lo que pondremos las mismas capas por toda la superficie de la pletina.



Figura 54: Detalle del grosor en la zona de los tornillos

La solución que obtenemos de la optimización es de 8 capas en la pieza inferior y 9 en la superior. En la zona de la pletina, donde se unen ambas piezas, extrapolando los resultados de máximo grosor a toda la superficie, añadiremos 10 capas en la zona de la pletina de la pieza inferior y 11 en la zona de la pletina de la superior. Así, el peso final de la llanta será de 1200 gr.

Aunque teóricamente esta configuración no va a presentar ningún problema, al haber unido algunas capas de la solución, se ha optado por realizar un rápido análisis estático lineal y comprobar los desplazamientos y tensiones. Los resultados se muestran a continuación (Figura 55).

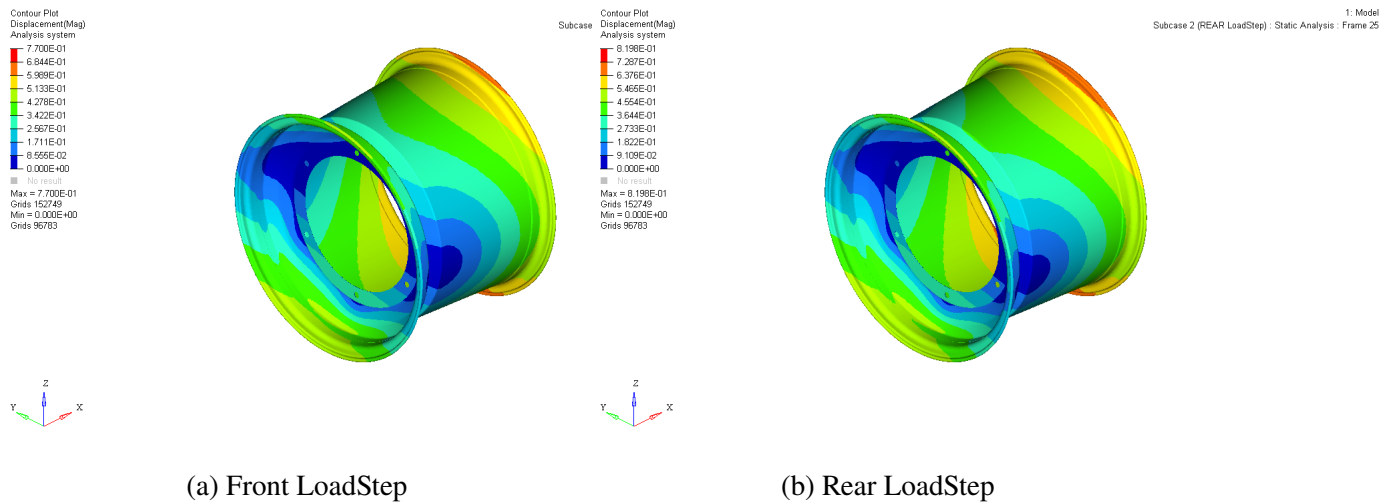


Figura 55: Resultados de desplazamiento de la geometría homogeneizada

Se observa que los desplazamientos son muy bajos al haber añadido tanto material, son del orden de 0.8 mm. En simulaciones iniciales en las que se trabajó con las orientaciones y las aportaciones de cada una a la rigidez de la llanta se observó que las orientaciones que menos aportaban eran las de 30° y 60°. Así, se ha probado a eliminar dos capas de -30° y dos de -60° tanto en capas de la pieza superior como en capas de la inferior. El resultado muestra unos desplazamientos mayores pero sin llegar a ser muy altos, de 1.42 mm como máximo. Con esta nueva configuración se reduce el peso a 950 gr. Los resultados de desplazamiento y tensión máxima de Von Mises se observan a continuación (Figura 56 y Figura 57).

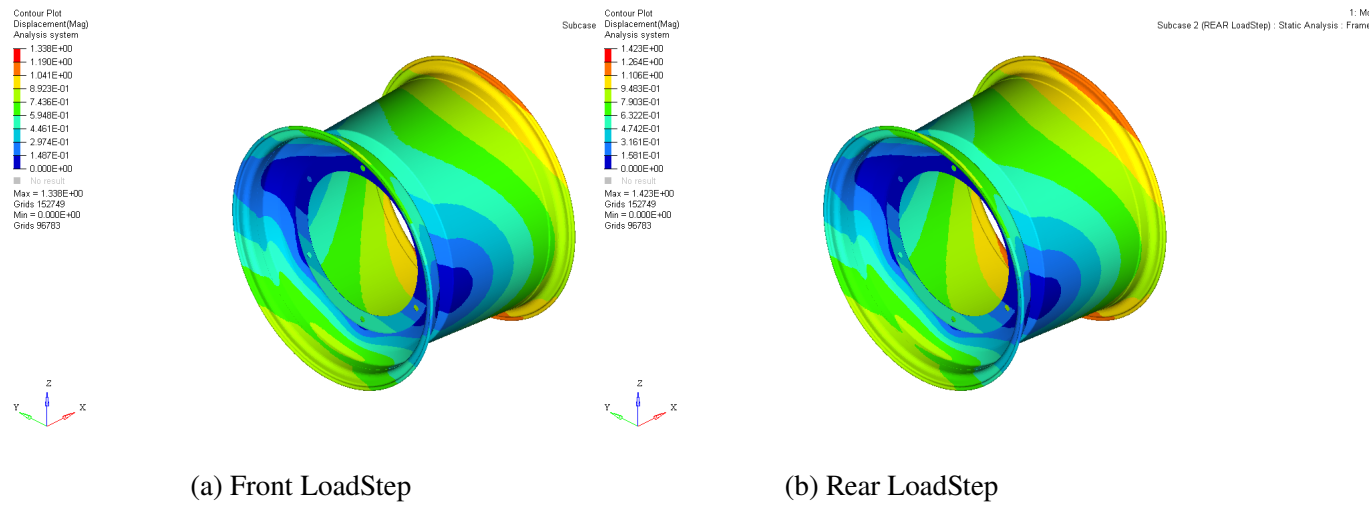


Figura 56: Resultados de desplazamiento de la configuración 2

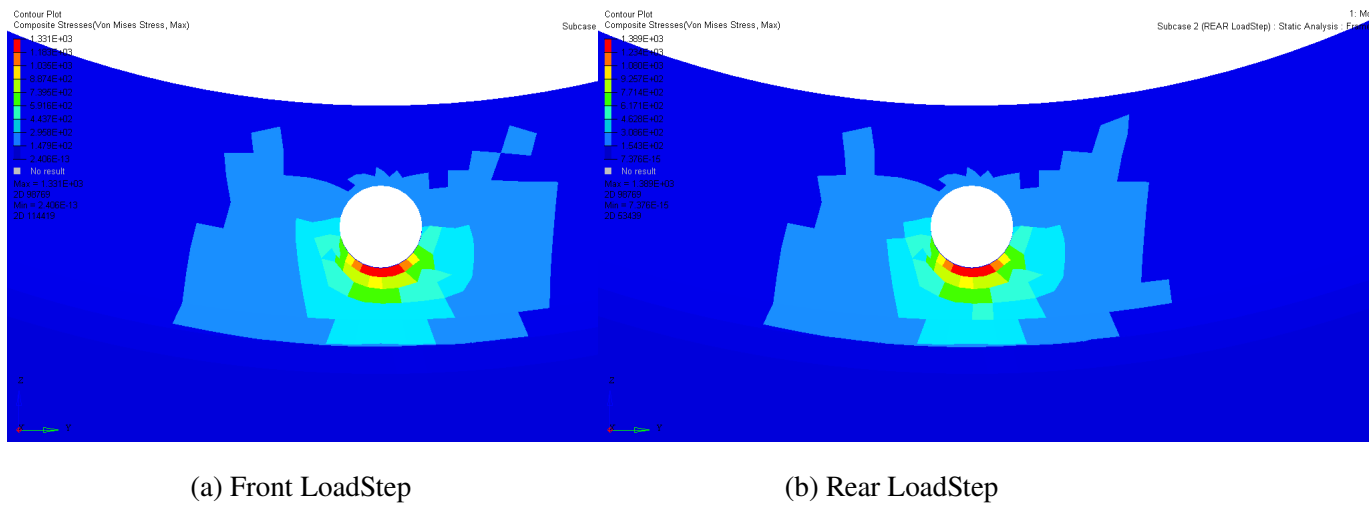


Figura 57: Resultados de tensión de la configuración 2

Así, la configuración final de las capas y orientaciones es la que sigue (Figura 58):

Ply ID	Forma	Orientación	Grosor
5401	Pletina	90°	0.3 mm
5101	Bottom	90°	0.3 mm
4401	Pletina	60°	0.3 mm
6401	Pletina	90°	0.3 mm
4101	Bottom	60°	0.3 mm
3101	Bottom	45°	0.3 mm
8101	Bottom	-45°	0.3 mm
10101	Bottom	0°	0.3 mm
1401	Pletina	0°	0.3 mm
2101	Bottom	30°	0.3 mm
2401	Pletina	30°	0.3 mm
3401	Pletina	45°	0.3 mm
8401	Pletina	-45°	0.3 mm
10401	Pletina	45°	0.3 mm

(a) Orden de apilamiento en la pieza inferior

Ply ID	Forma	Orientación	Grosor
11402	Pletina	0°	0.3 mm
12101	Top	30°	0.3 mm
11401	Pletina	0°	0.3 mm
11101	Top	0°	0.3 mm
13101	Top	45°	0.3 mm
18101	Top	-45°	0.3 mm
15101	Top	90°	0.3 mm
14401	Pletina	60°	0.3 mm
15401	Pletina	90°	0.3 mm
14101	Top	60°	0.3 mm
13401	Pletina	45°	0.3 mm
18401	Pletina	-45°	0.3 mm
20401	Pletina	0°	0.3 mm
12401	Pletina	30°	0.3 mm
16101	Top	90°	0.3 mm
16401	Pletina	90°	0.3 mm

(b) Orden de apilamiento en la pieza superior

Figura 58: Orden de apilamiento de la solución final

5.3. Comparativa con llanta actual

Ahora que tenemos la geometría definitiva podemos comparar los resultados con los de la llanta comercial actual. En cuanto a peso, la llanta que hemos conseguido tiene un peso de 90 gr, 650 gr menos que la actual. Esto es un importante ahorro de peso, con más de medio kilogramo ahorrado por rueda. En total rebajamos el peso del monoplaza en 2.6 kg. Se considera por lo tanto que el objetivo de reducir el peso está más que conseguido.

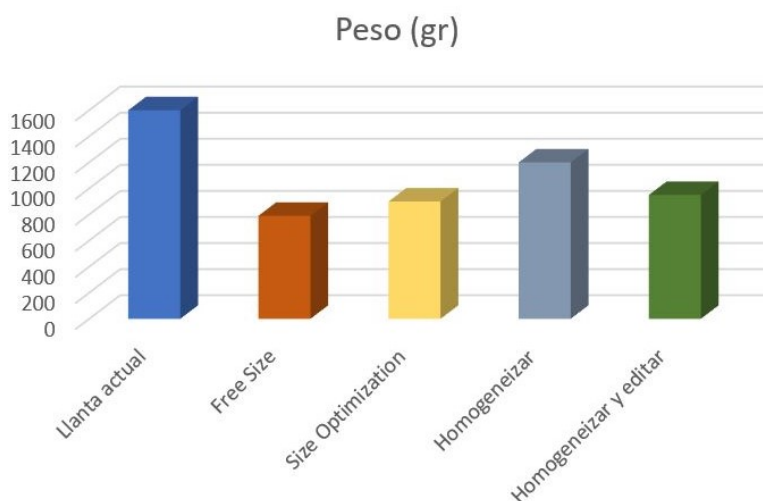


Figura 59: Comparativa de pesos a lo largo de la optimización y llanta actual

Cabe destacar que, aún con la configuración sin editar tras la homogenización de las capas, el peso sigue siendo bastante menor que el actual, 400 gr menos. Esto indica que, aun con ese sobredimensionamiento, el carbono va a comportarse mucho mejor que el aluminio en la carrera.

En cuanto a la deformación de la llanta, también mejora un poco respecto a la de aluminio, con una deformación máxima de alrededor de 1.5 mm, la mitad que la que sufre la Keizer en las mismas condiciones de carrera.

6 Fabricación

6.1. Proceso de fabricación

Conocida la geometría final de la llanta, ya podemos diseñar el molde que utilizaremos para su fabricación. El proceso de fabricación será una laminación con prepreg sobre un molde de aluminio y posterior curado en un horno autoclave. Se detallan los pasos a continuación.

1. **Preparación de la fibra de carbono:** se cortan las capas de fibra de carbono con las formas y orientaciones que se han obtenido en la optimización con Altair OptiStruct. Para ello se recomienda utilizar tijeras específicas para fibra de carbono, pues la dureza de las fibras hace que sean difíciles de cortar. El prepreg debe mantenerse a una temperatura de -18°C o empieza a secarse la resina, por lo que, una vez cortadas las capas, se recomienda volver a guardarlas en frío hasta su uso.
2. **Preparación del molde:** para evitar que el carbono se quede pegado al molde, es necesario impregnar el molde con un desmoldante industrial ideado para ello. El utilizado en el equipo de Tecnun eRacing para estos casos es el *Universal Chemical Release system easy-lease release agent* de la empresa *Easy Composites*. Se deben aplicar 5 capas de desmoldante y dejar secar 10 minutos.



(a) Desmoldante industrial



(b) Desmoldante industrial II

Figura 60: Desmoldante utilizado

3. **Preparación de la laminación:** antes de pasar a laminar la pieza, se recomienda tener preparadas las telas y consumibles necesarios para el proceso de vacío y curado. Estos incluyen: peel-ply⁴, bolsa de vacío, tacky tape⁵ y tubos para la bomba de vacío.

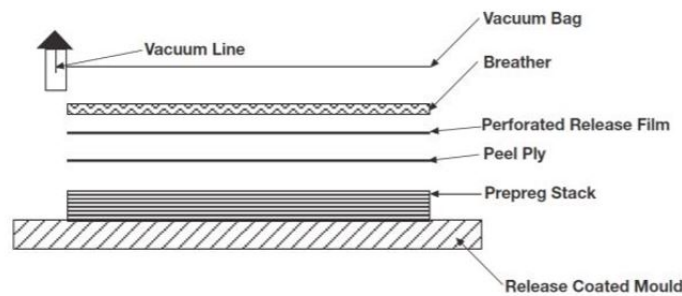


Figura 61: Esquema genérico de laminación de una plancha

4. **Laminación:** una vez se tienen todos los elementos mencionados, es el momento de laminar la pieza. Se comienza colocando las capas más inferiores del laminado sobre el molde, y seguir apilando las capas según la configuración obtenida en la optimización (véase Figura 58). Es recomendable hacer vacío sobre el conjunto cada 3 o 4 capas durante 10 minutos, para facilitar el pegado de las capas entre sí durante la fabricación. Una vez hemos acabado de colocar todas las capas, hay que colocar el peel-ply, asegurándonos de que cubrimos todas las zonas de carbono expuestas (si no, la bolsa se quedará pegada).
5. **Vacío y curado:** para acabar de fabricar la pieza, introduciremos la llanta en un horno autoclave en el que le aplicaremos calor y temperatura según el ciclo de curado especificado por el fabricante. Se puede ver el ciclo en la siguiente Figura 62.
6. **Desmoldeo:** pasado el tiempo especificado de curado, es momento de desmoldar la pieza. Para ello abriremos primero la bolsa de vacío y desatornillaremos las piezas del molde. Quitaremos primero la pieza de arriba y luego la de abajo. Si la pieza tiene

⁴El peel-ply es una tela que se coloca entre la última capa de carbono y la bolsa de vacío para evitar que se quede pegada a la resina de las fibras.

⁵El tacky tape es un adhesivo de doble cara que permite sellar la bolsa de vacío de forma efectiva, facilitando la eliminación de fugas y agujeros en las uniones.

PROPERTY	OVEN / VAC BAG		TEST STANDARD
Typical Laminate	8 plies of SE 84 LV 300g/m ² unidirectional prepreg with 35% resin content		-
Typical Ramp Rate	1 – 2°C (2 – 4°F) per minute		-
Cure Temperature	80°C (176°F)	120°C (248°F)	-
Cure Dwell Time	12 (hours)	1 (hour)	-
Cure Pressure	-1bar (14.5Psi)		-
De-mould Temperature	< 60°C (140°F)		-
Dry Tg ₁ (DMA)	98°C / 208°F	115°C / 239°F	ISO 6721 (DMA)

Figura 62: Ciclo de curado del prepreg SE 84LV

dificultades para despegarse de las paredes del molde, intentaremos soltarla provocando vibraciones en el molde. Otra ayuda es la introducción de aire a presión entre la llanta y el molde por algún punto ya despegado.

7. **Acabados finales:** para terminar, se lijarán los bordes que sean necesarios para dar a la llanta su forma final. También se perforarán los agujeros de los tornillos de anclaje al cubo y el agujero para la válvula, que se colocará en el mismo.

6.2. Diseño del molde

El diseño del molde se ha realizado en CREO Parametric y consiste en dos piezas atornilladas entre sí. Para laminar la parte inferior de la llanta se ha creado una pieza con el diámetro exterior igual al interior de la pieza final. Para laminar la parte superior, sin embargo, la pieza tiene el diámetro de la cara más externa de la pieza final. Se observa en la siguiente Figura 63 el diseño del molde.

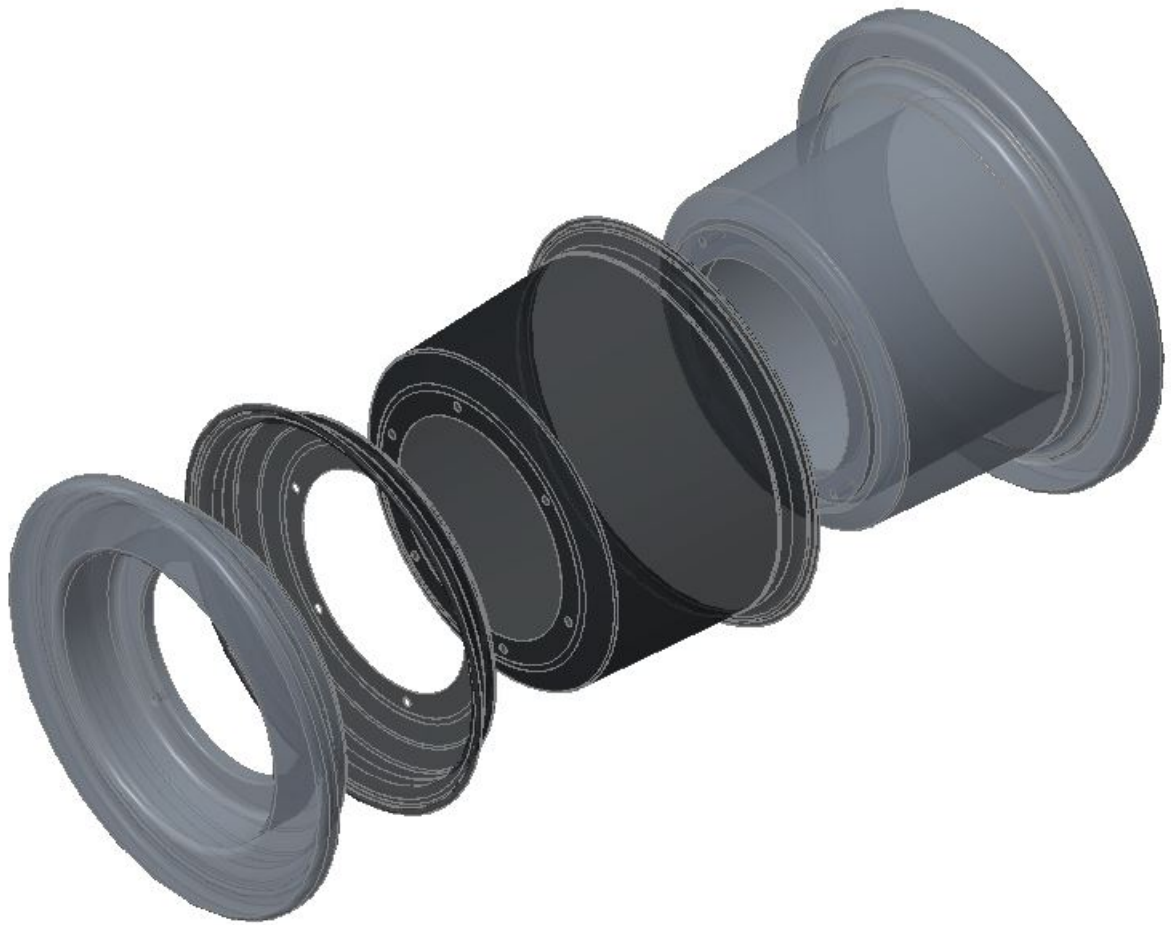


Figura 63: Vista explosionada del molde con la pieza

El proceso de laminación es idéntico al que muestra la empresa ya mencionada *Koenigsegg Automotive AB* en un vídeo⁶ explicativo de sus llantas de competición. A continuación se observan unas tomas de dicho vídeo en las que se ven las partes del molde y la laminación de la llanta.

⁶Vídeo de Koenigsegg Automotive AB: <https://www.youtube.com/watch?v=PGGiuaQwcd8>



(a) Laminación de pieza superior



(b) Laminación de pieza inferior

Figura 64: Fase de laminación



(a) Telas consumibles para proteger el carbono



(b) Horno autoclave para el curado de la llanta

Figura 65: Fase de laminación II



(a) Desmoldeo de la llanta



(b) Llanta final

Figura 66: Fase de desmoldeo

7 Futuras líneas y conclusiones

Este proyecto ha sido un primer paso en el diseño de llantas dentro del equipo de Formula Student de la Universidad de Navarra. El cambio a unas llantas de carbono ha sido un tema pendiente desde hace varias temporadas, y no se ha realizado principalmente por el coste de las llantas de carbono comerciales.

Con estas llantas que se han simulado obtenemos un conjunto de rueda más barato y con un peso similar al presente en el mercado de llantas de carbono (la opción comercial de la llanta de carbono Blackwave tiene un peso de 935 gr).

Además, la presente memoria recoge paso a paso el procedimiento a seguir para el cálculo de futuras llantas en el tutorial del Apéndice B. Se pretende con ello que el siguiente alumno que quiera calcular y optimizar un nuevo diseño tenga una base y un procedimiento sencillo a seguir. Con ello podrá dedicar más tiempo al diseño de la llanta y no tanto al aprendizaje del software, un poco complejo en sí mismo.

Por otro lado, este proyecto deja varias líneas de futuro abiertas, entre las que se destacan:

- **Diseño de una llanta con radios:** el diseño de una llanta con radios que permita ahorrar peso en el cubo. Además es una opción que facilitaría la implementación de un cubo con sistema de unión mono-tuerca.
- **Fabricación de la llanta:** por falta de tiempo no se ha podido fabricar la llanta, pero se ha dejado el procedimiento y los patrones calculados para una fabricación sencilla en la próxima temporada.
- **Ensayo de la llanta fabricada:** junto con la fabricación de la llanta se puede diseñar un plan de ensayos, pudiendo utilizar el prototipo de la temporada pasada o el monoplaza de combustión de 2017 (ambos en buen estado) para testar la llanta en condiciones reales.
- **Otras funciones de optimización:** junto con la optimización de minimizar el peso

asegurando unos desplazamientos de nodos máximos se ha encontrado otra forma de optimización que consiste en minimizar el compliance de la pieza asegurando una fracción volumétrica específica. Es similar a lo que se ha hecho, pues en este proyecto se definía un espesor mínimo de laminado, pero sería interesante ver los resultados de esta otra optimización.

- **Simulación dinámica y con neumático:** por último, sería interesante ahondar en la parametrización de la simulación y definir un contacto entre el asfalto y la llanta por medio de un neumático y aire comprimido, además de desarrollar el tema de la simulación dinámica, que se ha comentado previamente.

8 Presupuesto

A continuación se detalla el presupuesto correspondiente al desarrollo del proyecto. Se encuentra dividido en varias partidas.

- **Software:** En él, se incluye todo el software utilizado y necesario para el desarrollo del proyecto. Se tiene en cuenta el coste de amortización de las licencias.
- **Mano de obra:** Esta partida corresponde a los costes necesarios de los recursos humanos involucrados en cada una de las fases del proyecto.

En el caso de este proyecto solo hay gastos de Software y mano de obra, no encontramos ni gastos de material inmovilizado, ni material fungible ni equipamiento.

8.1. Software

Software	Cuota de adquisición (€)	Cuota de amortización (años)	Cuota de amortización mensual	Tiempo de uso (mes)	Amortización
Windows 10	260 €	4	5.42 €	8 €	43.33 €
Creo Parametric	1000 €	2	41.67 €	8	333.33 €
Latex	0 €	-	-	-	0 €
Altair	1000 €	1	83.33	9	750
ANSYS	1000	1	83.33 €	1	83.33 €
TOTAL Software					1209.99 €

Tabla 9: Presupuesto de Software

8.2. Mano de obra

Tarea	Duración (horas)	Precio unitario	Precio total
Alumno	300	6 €	1800 €
Supervisor	50	50 €	2500 €
TOTAL Mano de obra			4300 €

Tabla 10: Presupuesto de la mano de obra

8.3. Resumen de presupuesto

Partida	Importe parcial	Importe acumulado
Inmovilizado	0.0 €	0.0 €
Fungibles	0.0 €	0.0 €
Equipamiento	0.0 €	0.0 €
Software	1209.99 €	1209.99 €
Mano de obra	4300 €	5509.99 €
Total sin IVA		5509.99 €
Total con IVA (21 %)		5764.10 €
TOTAL Proyecto		5764.10 €

Tabla 11: Presupuesto total del proyecto

9 Referencias

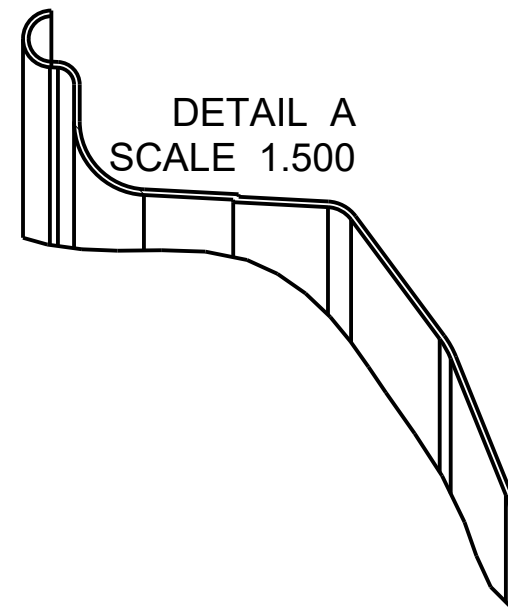
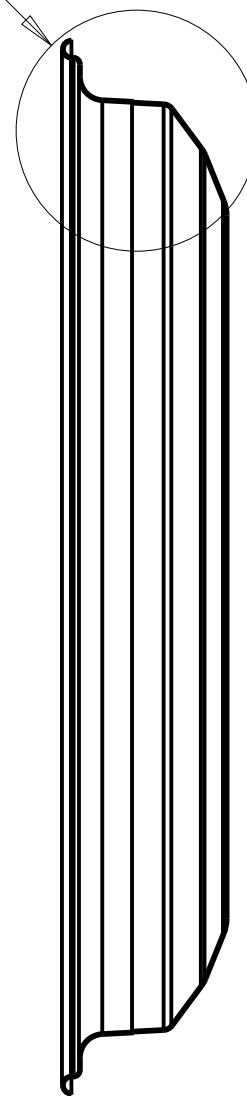
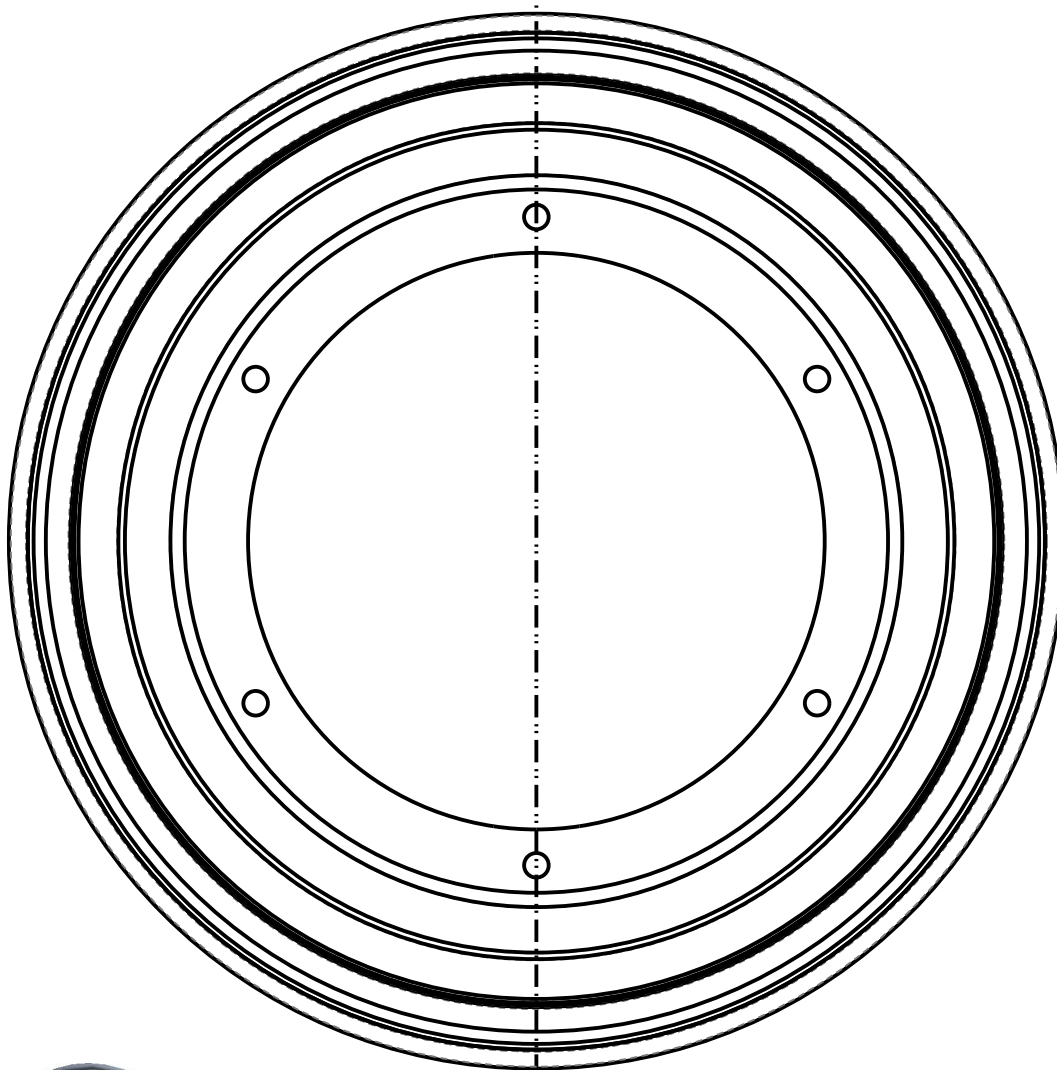
- [1] FORMULA STUDENT GERMANY - FSG Rules 2019 v1.1
- [2] K. KORNTVED, J. HERBOLL, M. LAURITSEN, K. BORDING y H. LETO - Design and Analysis of a Formula Student Carbon Fibre Rim
- [3] SEAN PHILLIPS - Wheel anatomy 201: Beads and flanges
- [4] SEBASTIÁN LORENZO - Fibra de carbono: guía básica para conocer uno de los materiales más importantes de la F1 actual
- [5] GONZALO OTEGUI FERNÁNDEZ - Diseño de sistema de suspensión para vehículo de Formula Student
- [6] NICOLÁS SERRANO MARTÍNEZ - Diseño, simulación y optimización de un monocoque de fibra de carbono para la Formula Student
- [7] RICARDO YAÑEZ-VALDEZ y RUBÉN SILVA-DÁVILA - Introducción básica en el manejo de HyperWorks
- [8] ALTAIR UNIVERSITY - Tutorial: Composite optimization of a skateboard with OptiStruct
- [9] ALTAIR UNIVERSITY - Tutorial: Composite optimization with OptiStruct 11.0 on the example of a Formula Student monocoque
- [10] GURIT - Guide to composites
- [11] CARBON.EE - Carbon fiber: All patterns explained
- [12] ALTAIR HYPERWORKS INSIDER - Optimization of Laminate Composite Structures: Recent Advances and Applications
- [13] ENGMORPH - Mesh quality parameters in Finite Element Analysis
- [14] ALTAIR HYPERWORKS - HyperWorks Tips and Tricks: Surface Deviation Meshing

Appendices

A Planos

SECTION_A

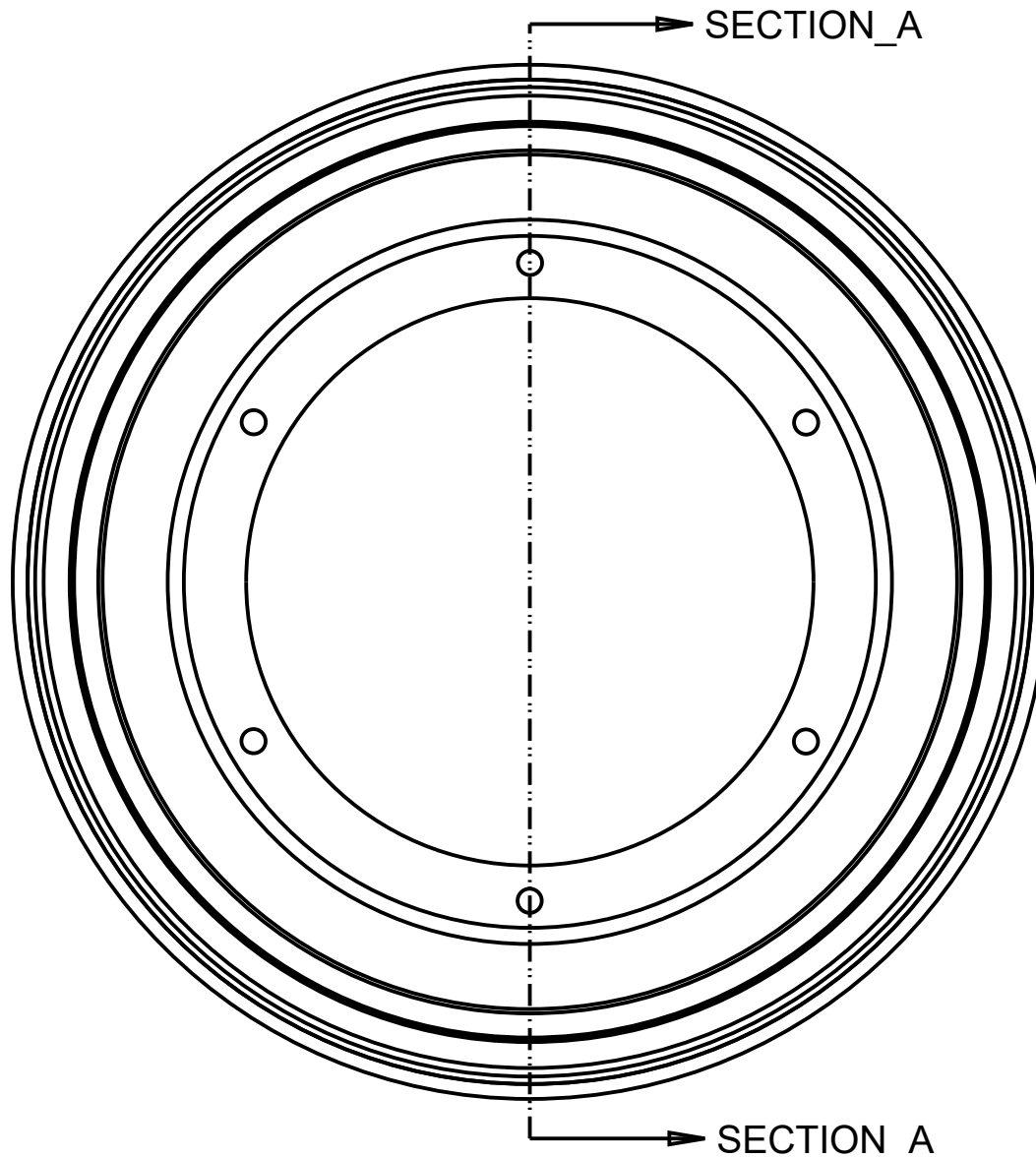
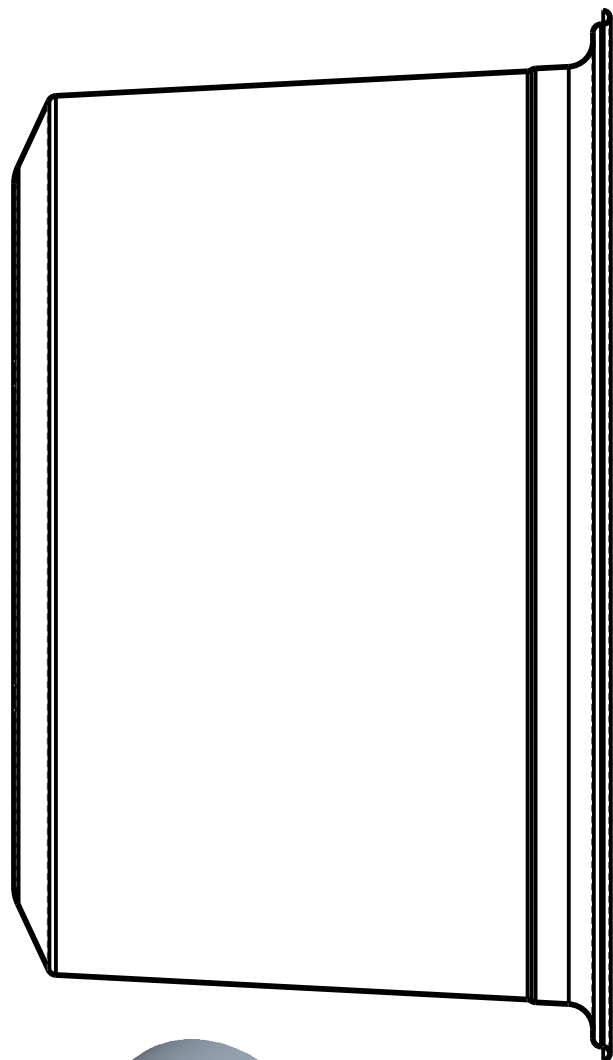
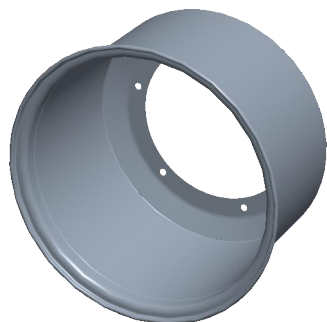
SEE DETAIL A



SECTION_A



TOLERANCIAS/TOLERANCES ISO 2768-1(m) ISO 2768-2(K)		MATERIAL Carbon Fiber		MASA / MASS	NOMBRE / NAME top_rim_v01_1_1_1.prt	
tecun e Racing		DISEÑADO/DESIGNED María Serrano	APROBADO/APPROVED Éric Roig	FORMATO / SIZE A4	ESCALA / SCALE 0.5	PLANO Nº / DRAWING Nº
FICHERO/DRAWING FILE: 2166778 (/Productos/TeR19/PFGs/Maria)						PAG. 1/1



TOLERANCIAS/TOLERANCES		MATERIAL		MASA / MASS	NOMBRE / NAME	
ISO 2768-1(m) ISO 2768-2(K)		Carbon Fiber			bottom_rim_v01_1_1_1_1.prt	
tecun eRacing		DISEÑADO/DESIGNED	APROBADO/APPROVED	FORMATO / SIZE	ESCALA / SCALE	PLANO Nº / DRAWING Nº
		María Serrano	Èric Roig	A4	0.5	
FICHERO/DRAWING FILE: 2166800 (/Productos/TeR19/PFGs/Maria)						PAG. 1/1

B Tutorial

TECNUN - UNIVERSIDAD DE NAVARRA

APÉNDICE B

MEMORIA DEL PROYECTO: DISEÑO, SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE UNA LLANTA DE
CARBONO PARA LA FORMULA STUDENT

Tutorial para la optimización de una llanta de carbono con Altair OptiStruct

Autores:

María SERRANO MARTÍNEZ

Septiembre 2019



tecnun
Universidad
de Navarra

1 Objeto

Este tutorial tiene como objetivo explicar de forma clara los pasos a dar para realizar una optimización de una llanta de carbono de Formula Student con Altair OptiStruct, aunque es aplicable a otras piezas. Se detallan los pasos con imágenes aclaratorias.

2 Introducción a OptiStruct

Lo primero de todo es abrir Altair HyperMesh, donde vamos a preparar el modelo para la posterior optimización. Al iniciar el programa aparece un menú con el título *User Profiles*, donde elegiremos la opción *OptiStruct*.

Lo primero que vamos a ver es el *Graphics Area* (Figura 1).

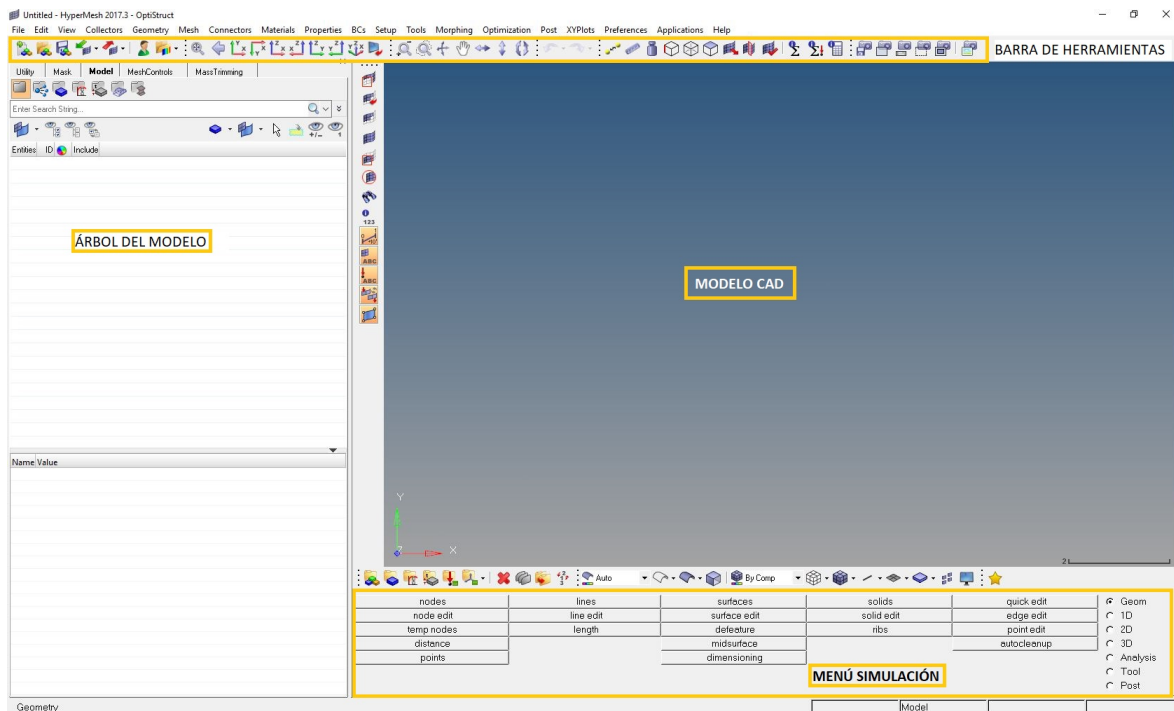


Figura 1: Vista del Graphics Area de HyperMesh

Como en otros programas de simulación, tenemos a la izquierda un árbol del modelo donde irán apareciendo los parámetros de la simulación a medida que los vayamos creando; una zona (azul) donde veremos la geometría; una barra de herramientas en la zona superior con controles; y un menú en la zona inferior con el que trabajaremos la mayor parte del tiempo.

2.1. Controles y selección

Los controles de posición, zoom y selección en HyperMesh son:

- Desplazamiento: ctrl + botón izquierdo
- Zoom: ctrl + rueda
- Selección múltiple de elementos: shift + botón izquierdo

IMPORTANTE: al seleccionar elementos para alguna acción es importante saber que una vez se ha seleccionado uno, no se puede des-seleccionar. Por eso hay que ir con cuidado, especialmente si es una acción que involucra muchos elementos.

CREACIÓN DE SETS: como se explica más adelante, hay acciones en las que solo necesitamos seleccionar un número determinado de elementos (como en la creación de las capas). Para ello existen los *Sets*, que no son más que grupos de elementos a los que podemos acudir fácilmente cuando queramos crear capas y aplicar cargas.

3 Preparación de la simulación

3.1. Importar la geometría

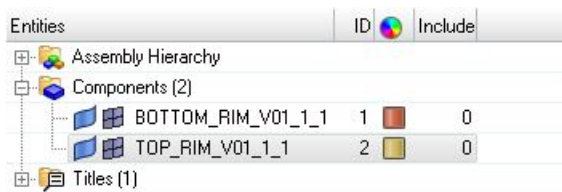
Lo primero de todo es importar la geometría de la llanta que vamos a simular. Como la llanta de carbono es un composite, debemos importarla como una superficie, para apilar sobre ella las diferentes capas de carbono.

En el siguiente menú de la Figura 2 tenemos varias opciones. Con la primera creamos una sesión de *HyperMesh* nueva, la segunda nos permite abrir una sesión ya existente. La tercera opción es la de guardado. La cuarta opción, que es la que usaremos, sirve para importar la geometría, aunque también se pueden importar modelos *.fem* o *.hm*.

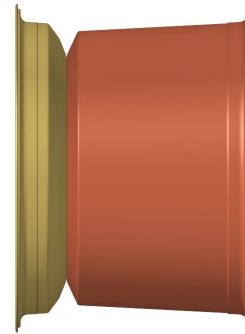


Figura 2: Opciones de carga de archivos y modelos

Importamos la geometría como un STEP formado por dos piezas. En el árbol del modelo nos aparecerán los componentes importados (Figura 3a). Aquí tenemos la libertad de ocultar o aislar los componentes.



(a) Árbol del modelo tras importar la geometría



(b) Geometría importada

Figura 3: Importar la geometría

Si se quiere editar la geometría (principalmente eliminar líneas o añadir nodos), esto se puede hacer desde el menú en **Geometry > edge edit** y elegir las opciones convenientes.

3.2. Mallado

Con la geometría ya importada vamos a crear el mallado. En **2D > automesh > surface deviation** vamos a crear un mallado con un tamaño de elemento fijo y algunas medidas en las que puede variar, para que se ajuste mejor a la geometría. Además, refinaremos la zona de los tornillos, ya que se darán ahí las tensiones máximas.



Figura 4: Panel del mallado con refinamiento

Para refinar, vamos a **refine...** y elegimos con la opción **lines** las líneas de contorno de los agujeros de fijación de la llanta al buje. Hay que elegir tanto las líneas de la pieza superior como las de la

inferior. Elegimos un tamaño de elemento y clickamos **assign**. A continuación, **return** y elegimos el resto de parámetros de la Figura 4. En **surfs** seleccionamos las superficies a mallar. Si utilizamos la opción **all** o **displayed** seleccionaremos las superficies más rápido.

Hay que tener cuidado con el tamaño de los elementos a refinar. En el menú del mallado está la opción **min elem size**, que tiene que tener un valor menor o igual al del elemento refinado. Si no, dará error. Una vez le demos a **mesh** el mallado se creará y abajo a la izquierda, en la zona donde aparecen los mensajes, podremos ver el número de elementos creados.

3.3. Checkear el mallado

El mallado puede no tener la calidad necesaria o la deseada. Para comprobarlo, HyperMesh ofrece una herramienta. Para acceder a ella clickamos en **Tool > check elems**. Esto nos abre un nuevo menú como el siguiente de la Figura 5.

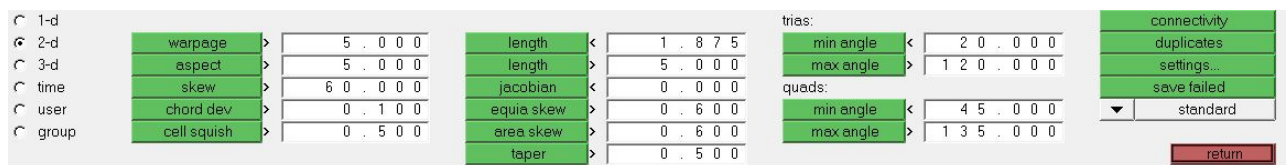


Figura 5: Panel de chequeo de los elementos

Aquí podemos comprobar todas las opciones de calidad de elemento que ofrece Altair de una forma sencilla. Los valores de cada criterio se han dejado por defecto, pero se pueden cambiar en la propia casilla. Para checkear un criterio, se clicka sobre el nombre en verde y en la zona de mensajes abajo a la izquierda nos informa sobre los elementos que no lo cumplen, como muestra la Figura 6 a continuación.

0 of 154818 (0%) failed. The maximum warpage is 3.33.

Figura 6: Checkeo del warpage

Si algún elemento es defectuosos, es decir, no cumple con los criterios de calidad, la simulación dará un error cuando le demos a optimizar. Revisar los elementos a partir de ese error es bastante complicado, ya que hay muchas variables y parámetros referenciados al mallado y los cambios pueden

hacer que estas variables se queden desactualizadas. Por ello se recomienda encarecidamente checkear los elementos antes de proseguir.

3.4. Checkear los elementos

Vamos a trabajar con materiales compuestos, por lo que la orientación y disposición de los elementos es vital. HyperMesh ofrece una herramienta para comprobar las normales y dirección de los elementos.

En **2D >composites** llegamos a un menú como el de la siguiente Figura 7.



Figura 7: Dirección y normales de los elementos

Estas opciones permiten comprobar de forma visual la orientación de los elementos y sus normales, que definirán el posterior apilamiento de las capas de carbono sobre la superficie de referencia importada en el primer paso. Un ejemplo de las normales de los elementos se observa en la siguiente Figura 8.

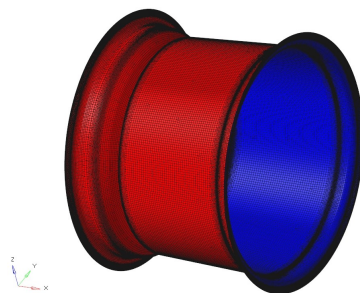


Figura 8: Vista de las normales de los elementos

Si algún elemento está mal se debe cambiar desde aquí.

3.5. Creación del material

El carbono tipo prepreg que vamos a utilizar no está definido aún en el programa, hay que hacerlo a mano. Para ello accedemos a **2D >HyperLaminate** y en el menú que aparece creamos con el botón derecho un nuevo material del tipo **MAT8** (ortótropo).

Aquí introduciremos las propiedades del carbono que estamos utilizando, el SE 84LV del fabricante Gurit. Al acabar clickamos en **Apply** para crearlo.

En el árbol del modelo podemos comprobar que el material se haya creado correctamente (véase Figura 9).

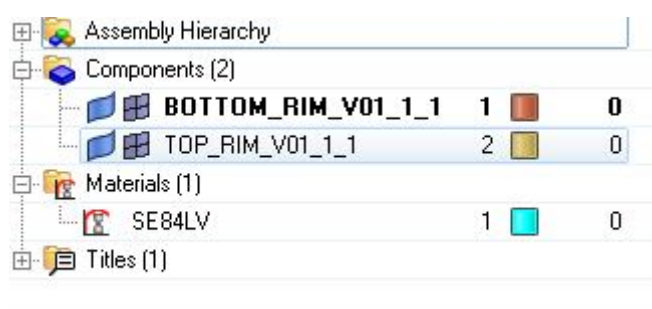


Figura 9: Material en el árbol del modelo

3.6. Creación de las capas

Con el material ya creado es hora de crear las capas del laminado con el que haremos un primer análisis estático lineal, que nos orientará sobre el resultado final de la optimización.

Para crear una capa, clickamos con el botón derecho en el árbol del modelo y **Create >Ply**. Aparecerá un menú en el que definiremos los parámetros de la capa como se ve en la Figura 10.

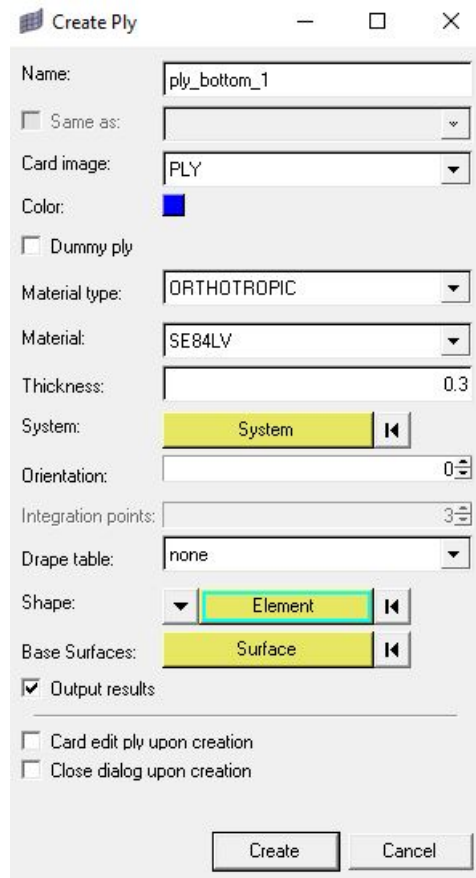


Figura 10: Menú para la creación de las capas

En la opción **Shape >Element** resaltada en la imagen tendremos la opción de seleccionar los elementos que forman cada capa. Si la geometría es sencilla (por ejemplo, si ocupa toda una pieza) podemos seleccionar fácilmente los elementos con la opción **all** o **displayed**. Pero si solo queremos seleccionar unos pocos, se recomienda crear un Set específico y cambiar la opción **Shape >Element** por **Shape >Set** en el menú desplegable de este botón.

IMPORTANTE: si creamos las capas seleccionando los elementos sobre el modelo CAD, el programa crea automáticamente un Set para cada capa, que contiene los elementos seleccionados por el usuario. Si después se decide modificar el mallado, habrá que actualizar los Sets para que las referencias de las capas sean correctas. Por esto en el apartado 3.3 se recomienda checkear la calidad de los elementos antes de seguir con la simulación.

[illegible]

Figura 11: Sublaminado de la pieza superior

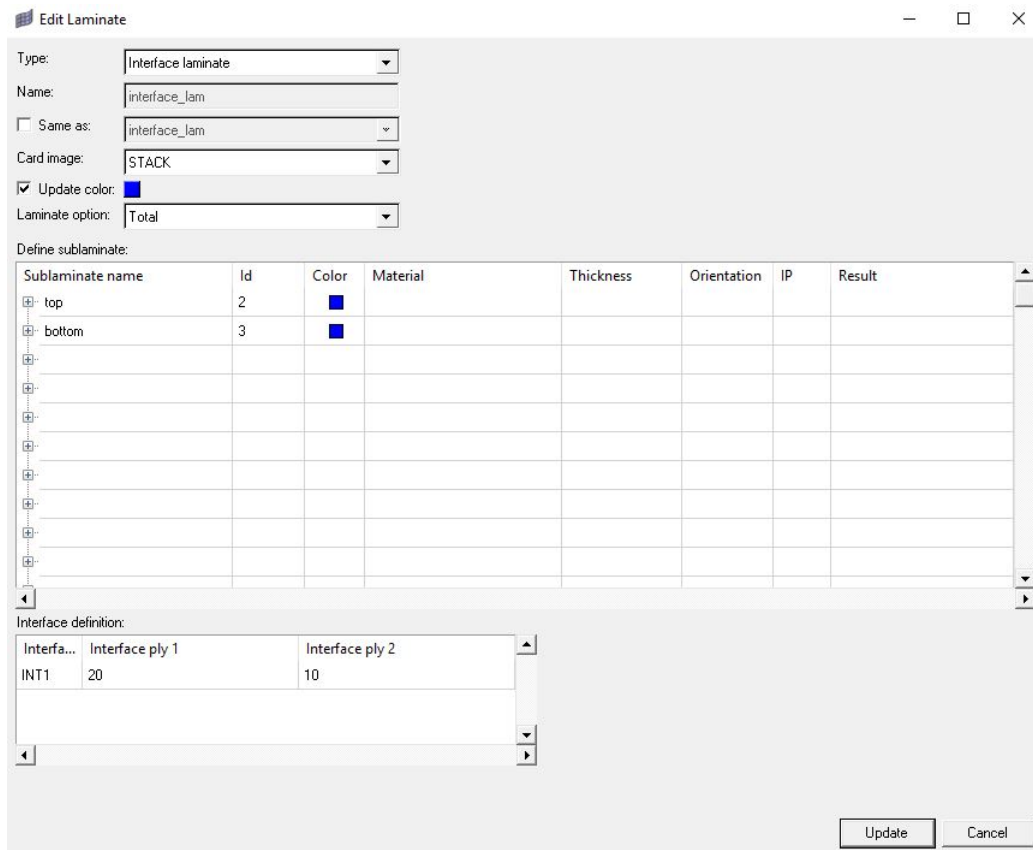


Figura 12: Interface laminate

3.8. Propiedad PCOMPP

Para poder hacer la optimización que queremos es necesario definir la propiedad PCOMP, que define las capas de una forma global y es capaz de relacionarlas entre sí, además de poder recibir información externa para su definición.

En la barra de herramientas de la parte inferior encontramos las opciones de la Figura 13.



Figura 13: Opciones de la barra de herramientas inferior

La opción de las propiedades es la cuarta. Clickamos en ella y nos aparecerá el siguiente menú (Figura 14).

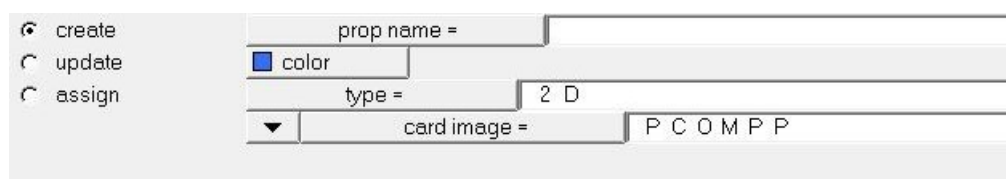


Figura 14: Crear la propiedad PCOMPP

Le damos un nombre a la propiedad y en *card image* > **PCOMPP**. Después *create*. Una vez creada hay que asignarla a los elementos del modelo en la pestaña *assign*.

En el árbol del modelo podemos ver los detalles de la propiedad. Si clickamos en ella desde el árbol nos aparecerá el siguiente menú en el que detallaremos las opciones de apilamiento de las capas como **Z0 Options >REAL >Z0 >-3**. Así conseguimos que las capas se apilen correctamente.

IMPORTANTE: Altair no permite realizar optimizaciones con el Free Size que vamos a utilizar si la opción de Z0 es **TOP** o **BOTTOM**.

En este momento ya podemos ver las capas que hemos creado de una forma más visual. En la barra de herramientas inferior seleccionamos la opción By Prop y elegimos el formato de visualización de la Figura 15.



Figura 15: Formato de visualización de las capas

Esto nos permite ver las capas por separado. Para cambiar el color de las capas y que no queden todas con el color azul que viene por defecto, se pueden seleccionar todas las capas a la vez en el árbol del modelo, clickar sobre el cuadro de color de una cualquiera y especificar **Automático**. Esto facilita la comprensión del laminado.

Para comprobar que las capas se han apilado correctamente es muy útil la herramienta **Tool >hidden line**, que permite cortar por un plano la llanta y ver la sección de esta, como se observa en la Figura 16.

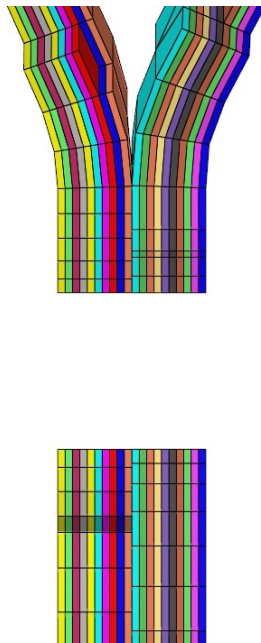


Figura 16: Sección de la llanta

3.9. Nodo remoto y barras rígidas

Los esfuerzos a los que está expuesta la llanta están originados en el *contact patch* del neumático. Para parametrizarlo en el programa se crea un nodo en el punto donde estaría el *contact patch* y se transmiten las fuerzas de ahí a la llanta por medio de unas barras rígidas que van unidas del nodo a la superficie de apoyo del neumático en la llanta.

Lo primero que se debe crear es el nodo. Para ello iremos a **Geometry > nodes > create** e introduciremos las coordenadas del punto. Después ya podemos crear las barras rígidas.

Las barras las vamos a crear como un componente nuevo. En el árbol del modelo, con el botón derecho, le damos a **Create > component**. Con el botón derecho en este nuevo componente clickamos en Make current. Esto significa que vamos a estar trabajando en el componente. Ahora en **ID > rigids > create** creamos las barras. Para ello seleccionamos como nodo independiente el que hemos creado en el *contact patch*, y como nodos dependientes los nodos de la zona de contacto entre el neumático y la llanta (es un punto delicado, se recomienda prestar especial atención para no seleccionar un área mayor que el real). El resultado es como el de la Figura 17.

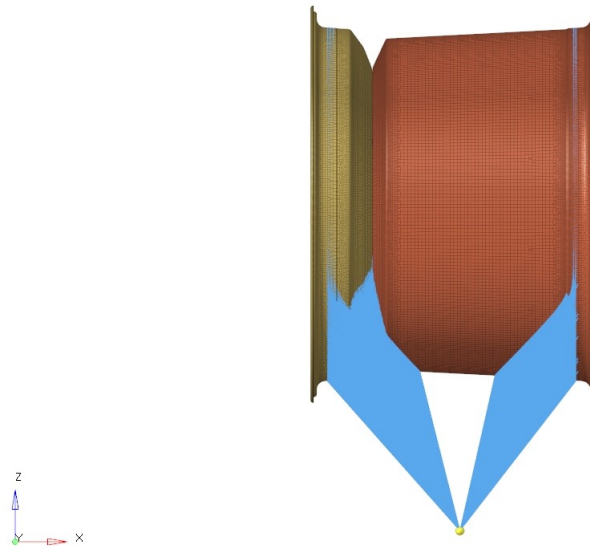
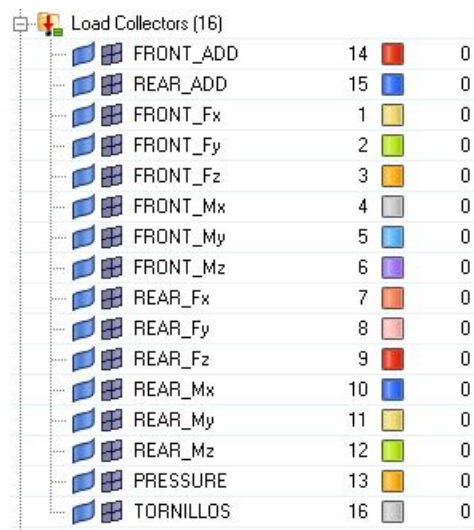


Figura 17: Nodo remoto y barras rígidas

3.10. Creación de las cargas

En este proyecto se van a simular dos escenarios distintos con 3 fuerzas y 3 momentos de distinto valor en cada uno de ellos y misma presión y restricciones de movimiento en ambos. Por la forma en que se definen las cargas en Altair se ha decidido crear cada una de esas fuerzas y momentos por separado.

Lo primero que hay que hacer es crear los *load collectors* de cada fuerza. Una vez tengamos los *load collectors* podremos darles su valor a cada uno. En el árbol del modelo, botón derecho y **Create >Load collector**. Le damos el nombre que queramos y listo. Si en una hipótesis de carga hay más de una restricción o fuerza, hay que crear otro *load collector* que englobe todas. Así, el resultado de *load collectors* de este proyecto queda como en la siguiente Figura 18.



Load Collector	Number	Color	Value
FRONT_ADD	14	Red	0
REAR_ADD	15	Blue	0
FRONT_Fx	1	Yellow	0
FRONT_Fy	2	Green	0
FRONT_Fz	3	Orange	0
FRONT_Mx	4	Grey	0
FRONT_My	5	Light Blue	0
FRONT_Mz	6	Purple	0
REAR_Fx	7	Dark Orange	0
REAR_Fy	8	Pink	0
REAR_Fz	9	Dark Red	0
REAR_Mx	10	Dark Blue	0
REAR_My	11	Light Yellow	0
REAR_Mz	12	Light Green	0
PRESSURE	13	Orange	0
TORNILLOS	16	Grey	0

Figura 18: Resultado final de cargas

A continuación vamos a dar el valor a cada fuerza, momento y restricción, de una en una. Cada vez que queramos crear una fuerza tenemos que poner el *load collector* en *Make current*. Después, en la barra de herramientas superior, **BCs >Create >Forces**. Nos aparecerá un menú en la zona inferior de la pantalla y tendremos que introducir el valor, seleccionar el nodo en el que está aplicado, la dirección en la que actúa y el tamaño de la flecha de visualización.

Lo mismo ocurre con los momentos, la presión y con la restricción de movimiento en los tornillos, aunque en estos casos será **BCs >Create >Moments**, **BCs >Create >Pressure** y **BCs >Create >Constraints**. Para comprobar que las hemos creado bien, clickamos sobre cada load collector en el árbol del modelo y su *Card Image* nos informará del tipo de carga que hemos creado: LOAD para fuerzas y momentos, SPC para restricciones y PLOAD4.

En este caso, para cada hipótesis de cargas vamos a tener 6 cargas y una presión aplicadas. Altair no permite definir hipótesis de cargas con más de una carga, por lo que tenemos que crear una carga combinada por cada hipótesis de carga. Para ello hemos creado los *load collectors* FRONT ADD y REAR ADD. Antes de poder unir las cargas en cada uno de estos *load collectors* se tiene que cambiar su *Card Image* de LOAD a LOADADD. Una vez hayamos hecho esto, nos aparecerá la opción de definir el número de cargas que vamos a incluir. En nuestro caso definimos 7. Después las añadimos una a una, teniendo en cuenta que el factor de escala con el que actúan es 1. El resultado se ve en la Figura 19.

Name	Value
Solver Keyword	LOADADD
Name	FRONT_ADD
ID	14
Color	
Include	[Master Model]
Card Image	LOADADD
User Comments	Do Not Export
S	1.0
☒ LOAD_Num_Set =	7
Data: S1, ...	

LOAD_Num_Set =		
	S1	L1
1	1.0	(1) FRONT_Fx
2	1.0	(2) FRONT_Fy
3	1.0	(3) FRONT_Fz
4	1.0	(4) FRONT_Mx
5	1.0	(5) FRONT_My
6	1.0	(6) FRONT_Mz
7	1.0	(13) PRESSURE

(a) FRONT ADD en detalle

(b) Definición del factor de actuación

Figura 19: FRONT ADD de la hipótesis de carga de la rueda delantera

3.11. Creación de las hipótesis de carga

Ahora que tenemos las cargas definidas solo falta crear las hipótesis de carga. En el árbol del modelo, botón derecho y **Create >Load Step**. Crearemos dos en este proyecto, uno para la rueda delantera y otro para la trasera.

Clickamos en cada *Load Step* y en el menú que aparece en la zona inferior definimos **Analysis type >Linear Static** y en SPC y LOAD las restricciones y cargas de la hipótesis, respectivamente. En LOAD recordamos que añadiremos la carga con *Card Image* tipo LOADADD, pues es la que contiene todas las cargas aplicadas. Los mismo ocurriría si tuviéramos más de una restricción, pero en vez de LOADADD pondríamos una *Card Image* tipo SPCADD. El resultado de un *Load Step* se muestra en la Figura 20.

Name	Value
Solver Keyword	SUBCASE
Name	FRONT LoadStep
ID	1
Include	[Master Model]
User Comments	Do Not Export
Subcase Definition	
Analysis type	Linear Static
SPC	(16) TORNILLOS
LOAD	(14) FRONT_ADD
SUPPORT1	<Unspecified>
PRETENSION	<Unspecified>
MPC	<Unspecified>
DEFORM	<Unspecified>
STATSUB (PRELOAD)	<Unspecified>
STATSUB (PRETENS)	<Unspecified>
SUBCASE OPTIONS	
LABEL	☒
label	FRONT LoadStep

Figura 20: Resultado de una hipótesis de carga

3.12. Variables de salida del análisis

Llegados a este punto ya podemos realizar un primer análisis estático de la llanta. Definimos primero las variables de salida que queremos que el programa nos calcule. En nuestro caso, los resultados de tensión, deformación y desplazamiento.

Para definir la salida, en *Analysis >control cards >GLOBAL OUTPUT REQUEST* y ahí seleccionamos las variables.

Con esto ya podemos realizar la simulación. Primero elegimos un nombre y destino en el que guardar la simulación. Después chequearemos que no haya ningún error en la simulación seleccionando la opción *run options >check >OptiStruct*. Una vez nos diga que está todo correcto, cambiaremos la opción *run options >analysis >OptiStruct* (véase Figura 21).

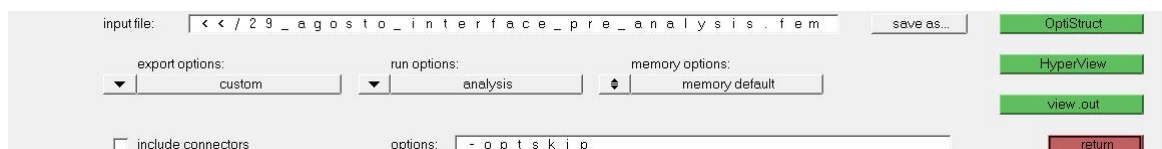


Figura 21: Menú de análisis

4 Free Size Optimization

Para la primera fase de optimización se definen las supercapas, es decir, capas de carbono de un grosor muy elevado. Para hacerlo de forma rápida se pueden seleccionar todas las capas a la vez y cambiar el grosor de una vez.

A continuación se crea la variable de diseño que vamos a utilizar para la optimización. En **Analysis > optimization** encontramos un nuevo menú como el de la Figura 22.

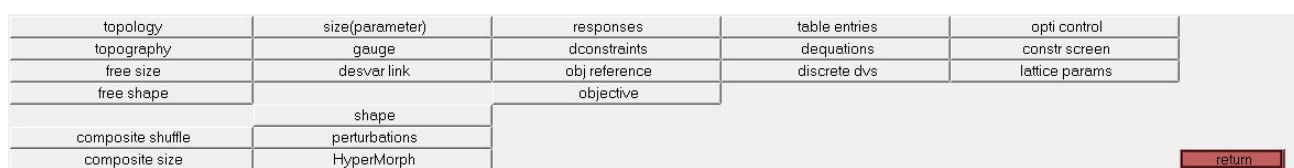


Figura 22: Menú de optimización

En la opción **free size** creamos una nueva variable y la asignamos al laminado del *interface laminate*. Después, en la opción **composites**, definimos un grosor mínimo de laminado para asegurarnos de que no deja zonas sin nada de material (véase Figura 23).

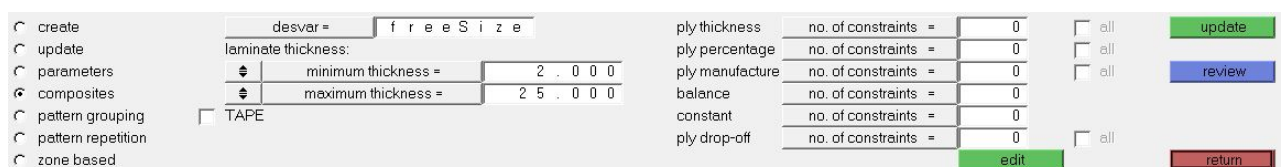


Figura 23: Grosor mínimo del laminado

Después definimos las respuestas de la optimización. En **Analysis > optimization > responses** creamos dos, una para la masa total y otra para el desplazamiento de los nodos. El propio menú da la opción para seleccionar estas respuestas. En el caso de los desplazamientos se debe especificar los nodos respecto a los cuales se va a calcular esta variable (en nuestro caso, todos).

A continuación se definen las restricciones de las respuestas, es decir, limitar la deformación a 2.5 mm. En la opción **Analysis > optimization > dconstraints** seleccionamos la respuesta de desplazamiento que hemos creado y detallamos los límites permitidos (véase la Figura 24).

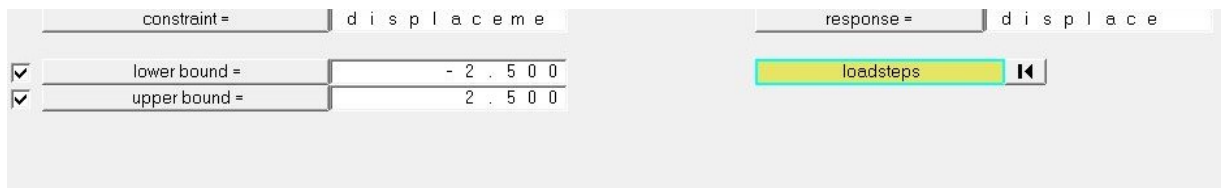


Figura 24: Restricción de desplazamiento

Por último, se define la función de optimización de la simulación. En **Analysis >optimization >objective** especificamos minimizar la respuesta de masa creada.

Para obtener los resultados del *Free Size* debemos acivar en **Analysis >control cards >OUTPUT >FSTOSZ**. Ahora ya podemos optimizarlo, aunque se recomienda hacer un chequeo previo desde la ventana de **Analysis >OptiStruct >run options >check >OptiStruct**. Una vez la simulación no de errores, optimizamos con **Analysis >OptiStruct >run options >optimization >OptiStruct**.

Esta simulación puede tardar algo más que la del análisis, pero en la ventana que muestra *OptiStruct* podemos ir siguiendo los resultados de cada iteración, también de forma gráfica en la opción de la esquina superior derecha *Graph*.

5 Size Optimization

Tras la optimización del *Free Size*, obtenemos una geometría con muchas capas de grosores muy diferentes, la mayoría de ellos por debajo del grosor de las capas reales (0.3 mm). En la siguiente Figura 25 se observan este tipo de capas.

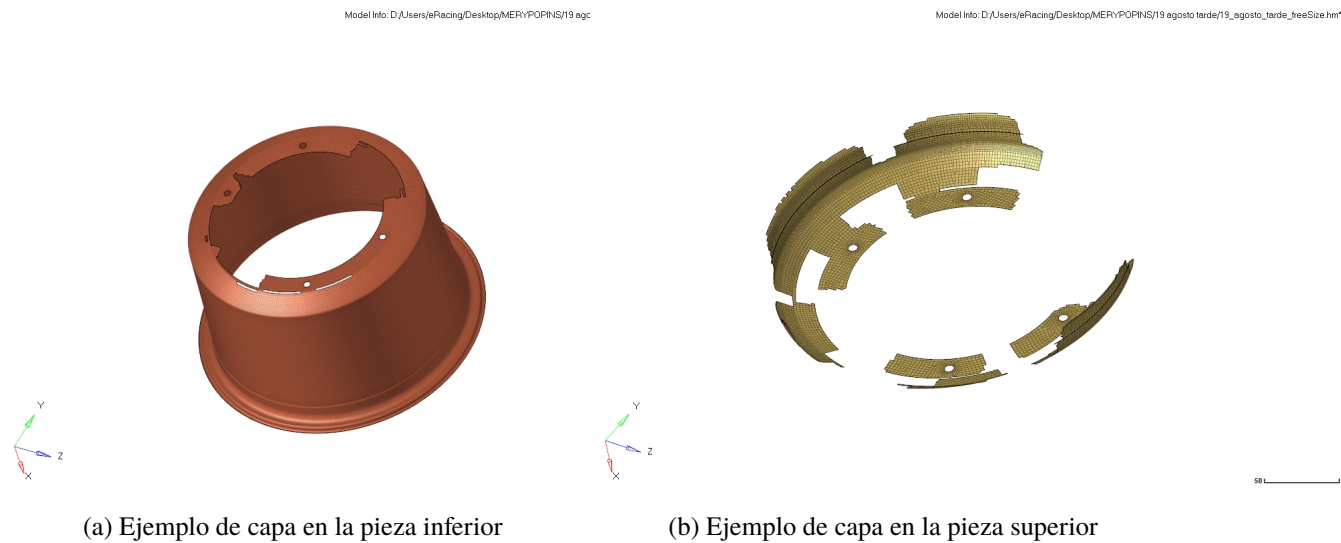


Figura 25: Detalle de las capas del Free Size

En HyperMesh, importamos este modelo como **Import Solver Deck** y elegimos el archivo *.fem* con el número de la última iteración. Veremos que el árbol del modelo ha variado. Ahora tenemos más capas, junto con sus propias variables de diseño (véase Figura 26).

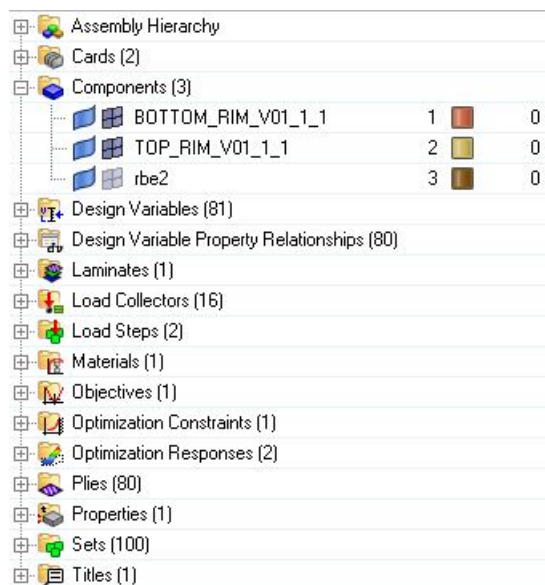


Figura 26: Árbol del modelo tras el Free Size

Debemos actualizar cada una de estas capas. Para ello seleccionamos una a una las capas y con el botón derecho **Isolate** y **Edit**. En el menú que aparece clickamos **Update**.

Después tenemos que actualizar las variables de diseño de cada capa una a una también. En **Analysis >optimization >size (parameters)** seleccionamos cada variable de diseño y cambiamos el límite superior por 0.3 mm (véase Figura 27). Hay que acordarse de dar a **Update**.

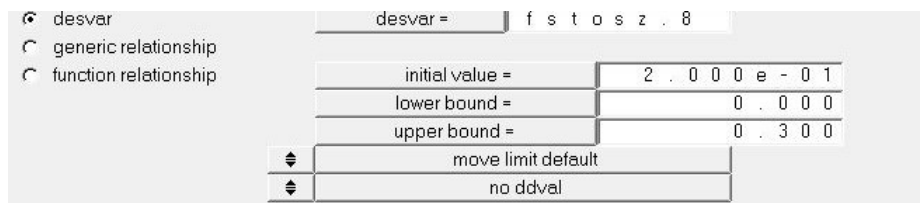


Figura 27: Menú de las variables de diseño

Es un trabajo repetitivo pero importante, por lo que hay que estar muy atento a no saltarse ninguna capa y a no actualizar ninguna capa sin haberla aislado antes.

Por último, definimos la propiedad **TMANUF** en cada capa a 0.3 mm, especificando así que el grosor de fabricación permisible es de 0.3 mm.

Como en pasos anteriores, definimos en **Analysis >control cards >OUTPUT** que el número de variables sea 3 y añadimos las salidas de **STOSZH** con **FREQ >YES** y **DESIGN >ALL** (véase Figura 28). Ahora ya podemos realizar la optimización como antes: hacemos un chequeo previo desde la ventana de **Analysis >OptiStruct >run options >check >OptiStruct**. Una vez la simulación no de errores, optimizamos con **Analysis >OptiStruct >run options >optimization >OptiStruct**.

	KEYWORD	FREQ	[BUNDLES]	METHOD	IGNORE
OUTPUT	FSTOSZ		4		
OUTPUT	SZTOSH	YES			
OUTPUT	DESIGN	ALL			

Figura 28: Control cards del Size Optimization

6 Shuffle Optimization

La solución del *Size Optimization* ya es fabricable, solo queda reorganizar las capas para conseguir la secuencia óptima de apilamiento. Repetimos el proceso de importar el modelo *.fem* con la última

iteración del *Size Optimization* y observamos que el número de capas se ha reducido considerablemente, además de tener todas un grosor exacto de 0.3 mm.

Lo único que falta por hacer es ir a *Analysis >composite shuffle* y dar a *review* y *update* a la variable del *shuffle optimization* que ya existe. Después en el mismo menú vamos a la pestaña de *parameters* y definimos que las capas de 45° y -45° son iguales, y en *edit* definiremos un *MAXSUCC* de 2 para *ALL*, que significa que solo puede haber dos capas de la misma orientación seguidas como mucho.

A partir de aquí volvemos a optimizar de la misma forma que antes: *Analysis >OptiStruct >run options >optimization >OptiStruct*.

La solución de esta última optimización se puede ver desde Excel. Abrimos el programa y desde ahí abrimos el archivo *.out* generado por *OptiStruct*, que tendrá una forma como la de la siguiente Figura 29, donde está especificado el orden de apilamiento de la configuración final.

Stacking sequence for STACK 1

Iteration 0	Iteration 1	Iteration 2	Iteration 3	Iteration 4	Legend
1401	3101	11402	11402	11402	90.0 degrees
2101	8101	5401	5401	5401	60.0 degrees
2401	1401	5101	5101	5101	45.0 degrees
3101	5101	4401	4401	4401	30.0 degrees
3401	2101	6401	6401	6401	0.0 degrees
4101	2401	4101	4101	4101	-30.0 degrees
4401	4101	3101	3101	3101	-45.0 degrees
5101	10101	8101	8101	8101	-60.0 degrees
5401	5401	7101	7401	7401	
6401	4401	9401	7101	7101	
7101	3401	9101	9401	9401	
7401	8401	10101	9101	9101	
8101	7101	2101	10101	10101	
8401	7401	1401	1401	1401	
9101	10401	2401	2101	2101	
9401	6401	3401	2401	2401	
10101	9101	8401	3401	3401	
10401	9401	7401	8401	8401	
11101	12101	10401	10401	10401	
11401	11101	12101	12101	12101	
11402	13101	11401	11401	11401	
12101	18101	11101	11101	11101	
12401	15101	13101	13101	13101	
13101	12401	18101	18101	18101	
13401	14101	15101	15101	15101	
14101	14401	14101	14401	14401	
14401	11401	14401	15401	15401	
15101	15401	15401	14101	14101	
15401	17101	17101	17101	17101	
16101	13401	17401	17401	17401	
16401	18401	13401	13401	13401	
17101	17401	18401	18401	18401	
17401	19101	19101	19101	19101	
18101	11402	20401	20401	20401	
18401	16101	12401	19401	19401	
19101	19401	19401	12401	12401	
19401	20401	16101	16101	16101	
20401	16401	16401	16401	16401	

Figura 29: Resultado de la secuencia del Shuffle Optimization

7 Visualización de resultados

En este apartado se explica cómo se realiza la visualización de resultados en Altair. Para ver la solución de la simulación tenemos que utilizar la herramienta HyperView. Tras iniciar el programa veremos que el Graphics Area es muy similar al de HyperMesh (véase la Figura 30).

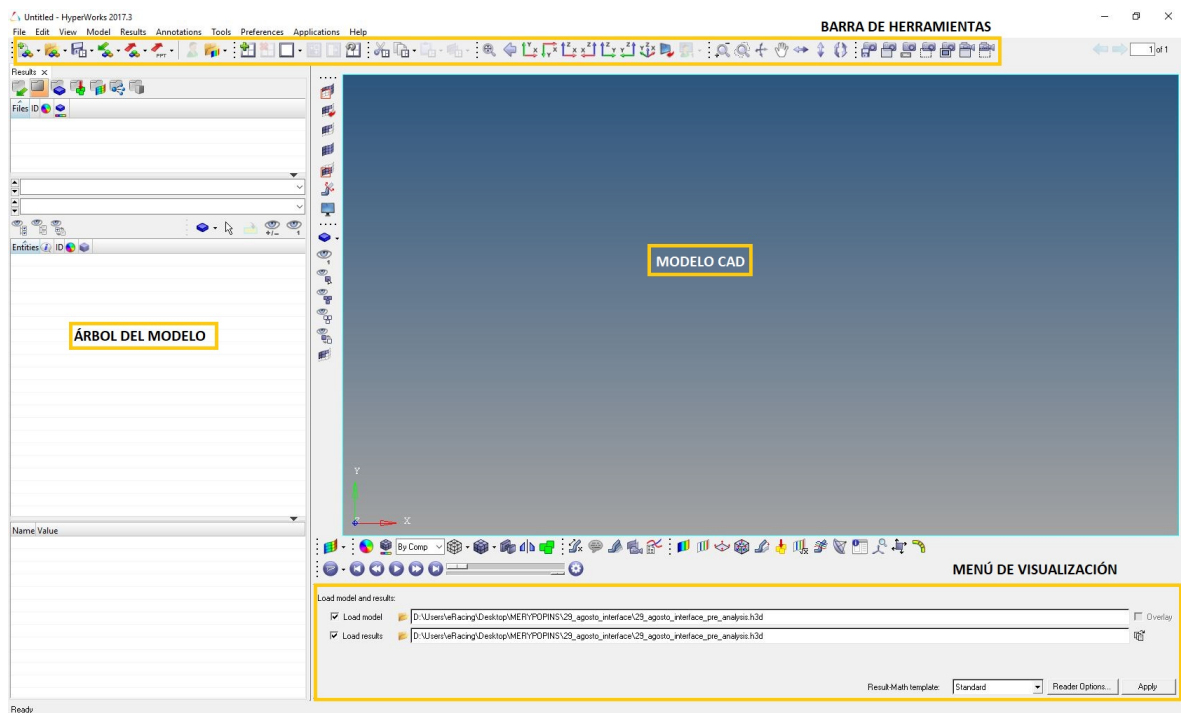


Figura 30: Vista del Graphics Area de HyperView

Tenemos que cargar el resultado a mano, clickando en el botón de la Figura 31, que se encuentra en la barra de herramientas superior.



Figura 31: Botón para cargar los resultado

Esto nos abre el siguiente menú de la Figura 32, donde tendremos que especificar el archivo que queremos cargar. Los archivos de resultados tienen extensión *.h3d*.

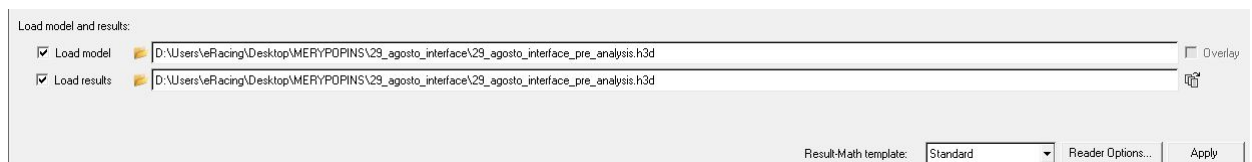


Figura 32: Selección de resultados

Veremos como a continuación se carga el modelo CAD con el que hemos trabajado. Para poder

visualizar los resultados utilizaremos la barra de herramientas inferior, que nos da varias opciones de visualización. A continuación se observa en la Figura 33 las opciones de uno de esos modos.

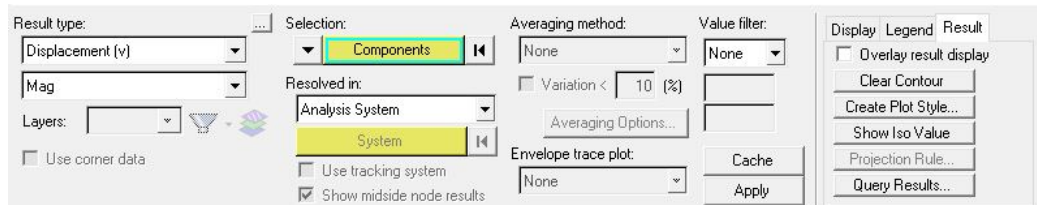


Figura 33: Visualización de resultados

Los resultados del análisis estático se muestran por separado para cada hipótesis de carga. Si queremos cambiar la hipótesis que estamos visualizando, lo podemos hacer desde el árbol del modelo de dos formas: o bien eligiendo el *LoadStep* directamente en el primer desplegable encima del árbol del modelo, o bien en el propio árbol, seleccionando la hipótesis de carga y clickando en **Make current**, como en la Figura 34.

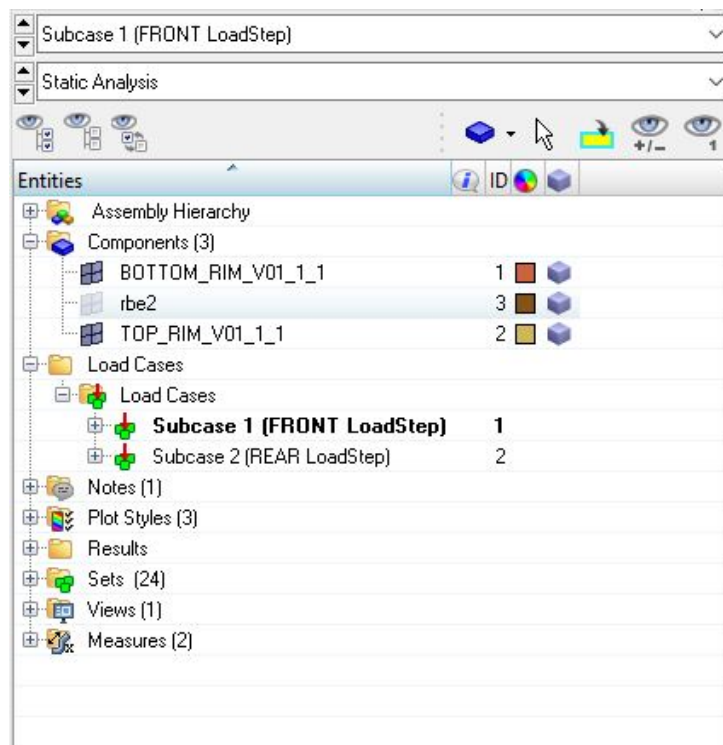


Figura 34: Selección de la hipótesis de carga