



**Universidad
Rey Juan Carlos**

Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo Fin de Grado

**DISEÑO DE UNA LLANTA PARA
AUTOMÓVILES DEPORTIVOS**

Daniel de la Vega Molina

Director: Alberto Jesús Cano Aragón

Curso Académico 2023/24



**Universidad
Rey Juan Carlos**

Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

El presente trabajo, titulado *Diseño de una llanta para automóviles deportivos*, constituye la memoria correspondiente a la asignatura Trabajo Fin de Grado que presenta D. *Daniel de la Vega Molina* como parte de su formación para aspirar al Título de Graduado en Ingeniería Mecánica. Este trabajo ha sido realizado en *Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología* en el *Departamento de Tecnología Química, Energética y Mecánica* bajo la dirección de *Alberto Jesús Cano Aragón*.

Móstoles, 08 de julio de 2024

Resumen

Este trabajo se centra en el diseño de una llanta para un vehículo deportivo que está sometido a grandes esfuerzos, centrándose en un marco teórico y afrontando las distintas etapas necesarias para llevar a cabo un correcto diseño de este componente.

Como primer paso, se lleva a cabo un estudio de la evolución de las llantas a lo largo de la historia. Este análisis permite comprender sus distintas características, destacando entre ellas los materiales empleados, prestaciones ofrecidas y las distintas partes que lo componen.

Una vez realizada la revisión de la evolución histórica de este componente, se procede a realizar los cálculos de las cargas aplicadas. Estas cargas se producen en las distintas situaciones a las que se verá sometida una llanta, para estos cálculos se decide tomar como base el modelo Alpine A110, elegido por su bajo peso y comportamiento deportivo.

A partir de los datos de este modelo, una vez realizados los cálculos de cargas aplicadas, se prosigue con un análisis mediante el método de elementos finitos con un modelo base que es realizado mediante herramientas de diseño asistido por ordenador. Para este análisis se emplea un material elástico lineal, sobre el que se observan como afectan las tensiones en este componente.

Para el correcto diseño de este componente, se realiza una selección del material empleado. Tras revisar los materiales ya empleados en llantas y observar cómo se distribuyen las tensiones en el modelo inicial, se decide optar por el empleo de fibra de carbono. Esta es la solución más prometedora en este tipo de vehículos por su excelente relación resistencia a tracción frente a densidad, esta relación resulta en una mejora del peso y por lo tanto una mejora en las respuestas dinámicas del vehículo.

Tras realizar distintas configuraciones de laminados y geometría, se obtiene el diseño final de la llanta. Este diseño se somete a un análisis por el método de elementos finitos, pero para su desarrollo real debería superar ciertos ensayos experimentales. En este trabajo no se realizarán dichos ensayos experimentales, ya que se trata de un diseño teórico.

ÍNDICE

Resumen.....	3
1 Introducción	6
1.1 Antecedentes.....	6
1.2 Tipos de llanta	8
1.3 Materiales y métodos de fabricación	10
1.3.1 Acero.....	10
1.3.2 Aleaciones no ferrosas	11
1.3.3 Fibra de carbono.....	13
1.3.4 Aleación de titanio	14
2 Objetivos	16
3 Metodología/Cálculos.....	17
3.1 Cargas aplicadas	17
3.2 Diseño inicial.....	26
3.3 Simulación inicial.....	35
3.3.1 Condiciones de contorno.....	35
3.3.2 Tensiones obtenidas	40
3.4 Selección del material.....	42
3.5 Simulación inicial material seleccionado	49
3.5.1 Aspectos generales de la simulación.....	49
3.5.2 Resultados situaciones de carga	56
4 Resultados y discusión/Solución técnica.	70
4.1 Diseño final superficies	70
4.2 Simulación final.....	74
4.2.1 Llanta delantera.....	74
4.2.2 Llanta trasera.....	81
4.3 Diseño final	91

5	Conclusiones	94
	Anexos	95
	Anexo 1: Cálculos detallados.....	95
6	Bibliografía	98

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Para entender el origen de la rueda es necesario entender su significado, que según la RAE es el siguiente:

Rueda, del latín: rota.

1. f. Pieza mecánica en forma de disco que gira alrededor de un eje.

Teniendo esta definición en cuenta, la mayoría de los historiadores apuntan a que su origen fue alrededor del año 3500 a.C. en la antigua Mesopotamia y su uso era en tornos de alfarería. Estas ruedas eran realizadas en piedra inicialmente, como se puede observar en la *Ilustración 1*. Posteriormente, se realizaron en madera reforzada con metales, estas se radiaron y más tarde se realizaron en acero reforzado con hule, hasta obtener finalmente las ruedas actuales de diversos materiales con cámara de aire.



Ilustración 1. Evolución de la rueda. [2]

A lo largo de la historia las ruedas de madera se han aplicado en carros que eran tirados por caballos, pero no es hasta 1885 cuando surge el primer automóvil funcional, este era el Benz Patent Motorwagen, pudiéndose observar este modelo en la *Ilustración 2*. Este se considera el inicio de las ruedas actuales ya que contaban con una llanta multiradio de acero y estaban recubiertas de hule (material polimérico) en todo su contorno. Estas ruedas se llevaron a cabo gracias al proceso de vulcanización, introducido por Charles Goodyear en 1839, en este proceso se obtenía caucho macizo.



Ilustración 2. Benz Patent Motorwagen. [5]

Las exigencias de las carreteras de esa época provocaban que se doblasen las llantas, ya fuesen de acero simples o acero recubiertas de goma maciza. Gracias a John Boyd Dunlop se introduce el neumático en 1888. Dunlop, que estaba harto de ver a su hijo con un triciclo con llantas macizas, quiso mejorar este vehículo introduciéndole aire mediante una válvula en el interior de unos tubos de goma alojados en el interior de una cubierta de loneta. Con la solución de Dunlop aplicada a los automóviles se mejoró la comodidad en la conducción y una mejor tracción gracias a su capacidad de adaptarse a terrenos irregulares y absorber impactos.

El siguiente avance en las llantas es llevado a cabo por Ford, que a principios del siglo XX logra fabricar llantas de acero fundido de una sola pieza, logrando así una mayor seguridad y velocidades mayores en los automóviles.

Se le otorga a Ettore Bugatti el título de introducir la primera llanta de aleación no ferrosa, fue en su Tipo 35 de 1924, modelo que se observa en la *Ilustración 3*. Este empleaba una llanta de aluminio fundido, esto constituye un ahorro de peso y eficiencia en la frenada. Las llantas de aleaciones no ferrosas suponen un gran avance, ya que son más ligeras y tienen una mayor rigidez, estas están formadas por aluminio y aleaciones de silicio o magnesio.



Ilustración 3. Bugatti Type 35. [6]

En la actualidad se usa considerablemente la llanta de acero por su bajo coste, pero son las llantas de aleaciones no ferrosas las más empleadas por los fabricantes por estética. Los avances en morfología y materiales empleados siguen evolucionando hoy en día, haciendo que las llantas sean más ligeras y resistentes con los avances tecnológicos.

1.2 Tipos de llanta

Según el número de piezas que conforman una llanta se pueden clasificar en monobloque, es decir una pieza y multi-pieza, de 2 o 3 partes. Las llantas multi-pieza surgen en 1971 para su uso en competición, ya que permitían a los equipos cambiar más rápido la configuración de llanta según sus necesidades. Estas llantas pueden clasificarse en:

- 1 pieza:

Estas llantas se conocen como monobloque, ya que están conformadas de una única pieza en su totalidad. Este tipo de llantas son las más ligeras ya que necesitan menos piezas para su conformado y son más resistentes, en contraposición al sufrir algún tipo de daño son difíciles de reparar y son más caras de fabricar. En la *Ilustración 4*, puede observarse este tipo de llantas, en concreto en una llanta de aleación de aluminio.



Ilustración 4. Llanta 1 pieza. [10]

- 2 piezas:

Las llantas de dos piezas se dividen en otras dos clases. Algunos fabricantes atornillan la cara de la llanta al cuerpo de la llanta que cuenta con un reborde para el montaje de esta cara, mientras que otros sueldan la cara de la llanta al núcleo de esta con la profundidad de la cara que se requiera, siendo esta última configuración más personalizable. En la *Ilustración 5*, puede observarse una llanta de 2 piezas, estando la cara de la llanta atornillada al cuerpo de esta. Los precios de las llantas de dos piezas empiezan muy por debajo de la media de las ruedas de tres piezas, pero son más caras que las monobloque ya que cuentan con más elementos para su construcción. La ventaja principal que ofrecen estas llantas es que son más sencillas de reparar sin la llanta sufriese algún daño.



Ilustración 5. Llanta 2 piezas. [10]

- 3 piezas:

Este tipo de llantas están formadas por el núcleo, el labio exterior y la cara. Normalmente, todas las piezas se mantienen unidas con tornillos y sellante aplicado en el interior o en el exterior del conjunto para sellar la rueda. Pudiendo observarse estas tres piezas junto con los tornillos y tuercas en la *Ilustración 6*. La principal ventaja de este tipo de llantas es su elevada personalización, además de que están disponibles en una gran variedad de tamaños y son fáciles de reparar al contar con más piezas desmontables. La parte negativa de estas llantas es que al contar con un mayor número de piezas su precio se encarece notablemente.



Ilustración 6. Llanta de 3 piezas. [11]

En la actualidad las llantas más empleadas son las monobloque ya que son más baratas, dependiendo del material empleado y sus propiedades mecánicas son superiores al estar conformadas de una sola pieza. Las llantas multi-pieza se siguen usando a nivel estético por su gran personalización, dejando de emplearse en competición.

1.3 Materiales y métodos de fabricación

A lo largo de la historia las llantas se han fabricado con diversos materiales y mediante distintos métodos de fabricación que han ido mejorándose con el paso de los años. Los principales materiales empleados, así como sus métodos de fabricación, son los siguientes:

1.3.1 Acero

Las llantas de acero son las más livianas de todas, estas llantas han sido estándar en la mayoría de los vehículos de bajo coste durante décadas y eran un referente en el mercado, antes de que las llantas de aleaciones no ferrosas mejorasen su coste de producción. El acero (una aleación de hierro y carbono) es un metal más duro que la mayoría de los demás materiales para llantas, pero esta resistencia conlleva un aumento de peso significativo. Este material se sigue empleando, además de por su bajo coste, por la ductilidad que ofrece el acero. Al ser un material dúctil puede deformarse al sufrir algún

golpe y no fracturarse como ocurriría con otro tipo de materiales, dotándole esta cualidad de una mayor seguridad.

Para formar estas llantas primero se lamina el acero, dejando una lámina con un espesor de unos 4mm. A partir de esta chapa laminada, mediante dos cortes, se obtiene por un lado la cara de la llanta y por el otro el núcleo de esta. La chapa de la cara de la llanta se somete a procesos de embutición hasta obtener la forma deseada y posteriormente se perforan los agujeros del buje, pernos y otros adicionales para reducir peso y crear flujo de aire para refrigerar los frenos. La chapa del núcleo se somete a un proceso de curvado y cuando se obtiene la forma cilíndrica se suelda. Una vez que se obtienen las chapas de la cara y el núcleo, se sueldan para obtener la llanta en su totalidad. La forma básica en que se fabrican las llantas de acero significa que hay muy poca flexibilidad en lo que respecta al diseño o a cualquier tipo de toque artístico.

La mayoría de las empresas sortean la naturaleza poco atractiva de las llantas de acero prensado colocando un juego de tapacubos con algún distintivo para disimular el metal en bruto e imitar un juego de aleaciones más caras y elegantes.

1.3.2 Aleaciones no ferrosas

Hasta hace unos diez años, las llantas de aleaciones no ferrosas estaban reservadas a los modelos más altos de la gama de un fabricante, pero ahora las pueden equipar prácticamente cualquier utilitario urbano del mercado. Basadas en una estructura de aluminio o magnesio, las llantas de aleación son mucho más ligeras que las de acero con la misma resistencia.

Estos materiales son más flexibles y maleables durante su producción, lo que aumenta las posibilidades de diseño. Esta libertad de diseño se traduce en una mejor distribución de cargas y disipación del calor de los frenos.

Las propiedades de ambos materiales dependen de sus aleantes, pero por lo general el magnesio presenta propiedades superiores de resistencia, dureza, disipación del calor y densidad. Como desventaja frente al aluminio, el magnesio presenta peor resistencia a la corrosión y tienen un coste mayor.

Las llantas de aleación se producen mediante aleación, forjado o Flow Forming.

- **Fundición:**

Mediante este método de fabricación el metal base se calienta hasta que se funde. Después, con la ayuda de una herramienta de vacío, el metal se funde en su forma final tras verterse en un molde.

La pieza fundida se taladra y recorta perfectamente una vez que se enfría. Aunque el proceso de fundición es rápido y asequible, tiene el inconveniente de producir un material menos duradero que una llanta forjada, tema que trataremos en la siguiente sección.

La principal ventaja de las llantas de fundición es el precio. Es la forma menos costosa de fabricar una llanta, por se reduce el precio de estas llantas.

Las llantas de fundición son seguras y una buena elección para los conductores habituales, pero no son adecuadas para vehículos de carreras o todoterreno. Las llantas de aleación de fundición tienen más posibilidades de romperse con ese tipo de conducción agresiva.

- Forjado:

Una llanta forjada se fabrica a partir de una gran pieza cilíndrica de aluminio o magnesio macizo. Esta pieza se corta a la medida deseada y se calienta a unos 500°C. Entonces se pasa a la forja rotativa, donde se le aplican al menos 900 bares de presión para que tome forma. Este proceso contribuye a que las llantas forjadas sean más resistentes que las de fundición.

Tras pasar por la forja, se coloca la pieza en un eje giratorio donde es estirada en frío mediante unos cilindros, hasta obtener la forma deseada. Después se somete a un mecanizado para obtener la forma final, dándole a la cara la geometría buscada y realizando los agujeros de pernos y buje.

El forjado uniforme produce una integridad estructural más fuerte con menos material que una llanta de fundición. Este proceso es más costoso, por lo que las llantas forjadas son más caras.

Las ventajas de las llantas forjadas son numerosas. Al eliminar las cavidades, la porosidad y la contracción a lo largo del proceso de fabricación, se obtiene una llanta más resistente.

Además, las llantas forjadas tienen una estructura de grano más apretada que las de fundición, lo que las hace mecánicamente más fuertes y mejora su resistencia al desgaste con el paso del tiempo. Con esta técnica, también se consigue una maniobrabilidad y un rendimiento superiores.

A la hora de decidir entre llantas forjadas y de fundición, el estilo de conducción, el terreno y el precio son factores muy importantes. Pero hay otro tipo de llanta a tener en cuenta. La forma fluida, que es nuestro tercer tipo de rueda.

- Flow Forming:

Este es un proceso relativamente nuevo en comparación con las ruedas fundidas y forjadas. Primero las llantas se fabrican mediante fundición a baja presión con un espesor mayor que el final.

Después pasan a una máquina especializada que calienta la parte exterior de la sección fundida y utiliza rodillos para dar forma aplicando presión a la llanta, consiguiendo así la anchura y la forma

deseadas. Este paso puede observarse en la *Ilustración 7*. Por último, se estira el núcleo de la llanta mediante rodillos, pero esta vez en frío, consiguiendo así la forma final y orientando la microestructura.

Las llantas obtenidas son similares a las forjadas, pero a un precio más asequible. El resultado es una rueda más ligera y resistente que la de fundición, pero no tan robusta como la de forja.

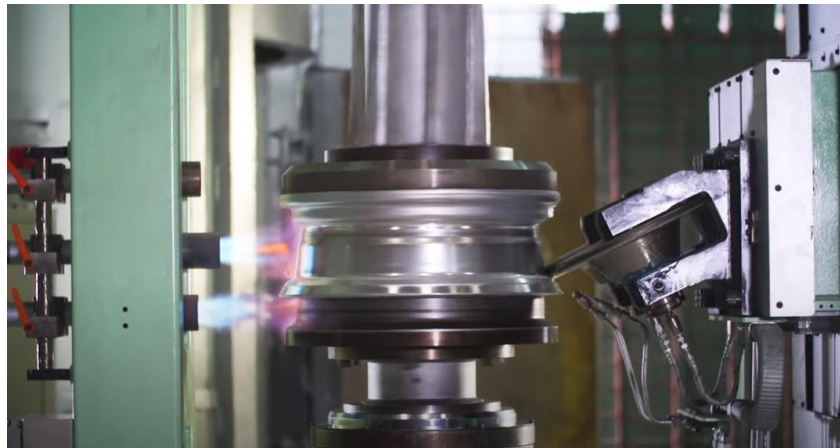


Ilustración 7. Fabricación mediante Flow Forming. [14]

Tanto las llantas de aleaciones de aluminio, como las de magnesio, se suelen someter a tratamientos térmicos tras su fabricación por estos tres métodos. Las aleaciones de aluminio se someten a un tratamiento térmico de solución y envejecimiento artificial, tratamiento T6. Las aleaciones de magnesio, sin embargo, suelen someterse a un tratamiento térmico de envejecimiento natural, tratamiento T4.

1.3.3 Fibra de carbono

La fibra de carbono presenta alta resistencia mecánica, rigidez, dureza, resistencia a la corrosión y una densidad muy baja. Esto se traduce en una reducción de la inercia rotacional y de la masa no suspendida de las ruedas, la suspensión y otros componentes conectados directamente y no soportados por la suspensión de un vehículo. Esta reducción de la inercia rotacional y de la masa no suspendida, que puede llegar al 50%, suele traducirse en una aceleración más rápida con menos esfuerzo, una reducción de la distancia de frenado y una mejora de la maniobrabilidad.

La parte negativa de emplear este material es su elevado precio, tanto el material en sí como el método de fabricación hacen que se encarezcan este tipo de llantas.

La fabricación de llantas de fibra de carbono se lleva a cabo en gran parte de manera artesanal. Para la fabricación de estas llantas se emplea fibra pre-preg, es decir fibras de carbono que ya han sido impregnadas con resina que hace de matriz en este compuesto.

Primero se recortan las distintas geometrías de las capas de fibra de carbono mediante corte láser CNC o mediante cuchillas CNC. Una vez obtenidas todas las capas, un operario las coloca en un molde metálico dividido en dos partes, uno el de la cara y otro el del núcleo de la llanta, este paso se aprecia en la *Ilustración 8*. Cuando están todas las capas colocadas, se juntan ambas partes del molde y mediante una bolsa de vacío se genera vacío en el molde.

Posteriormente se introduce en un autoclave, donde se produce presión y temperatura sobre la pieza, mientras esta sigue en vacío dentro de la bolsa. La temperatura provoca que la matriz se cure, endureciéndose así y aportando la rigidez requerida.

Por último, se saca la llanta del molde, se le quitan posibles rebabas y se le aporta un acabado para proteger el material.

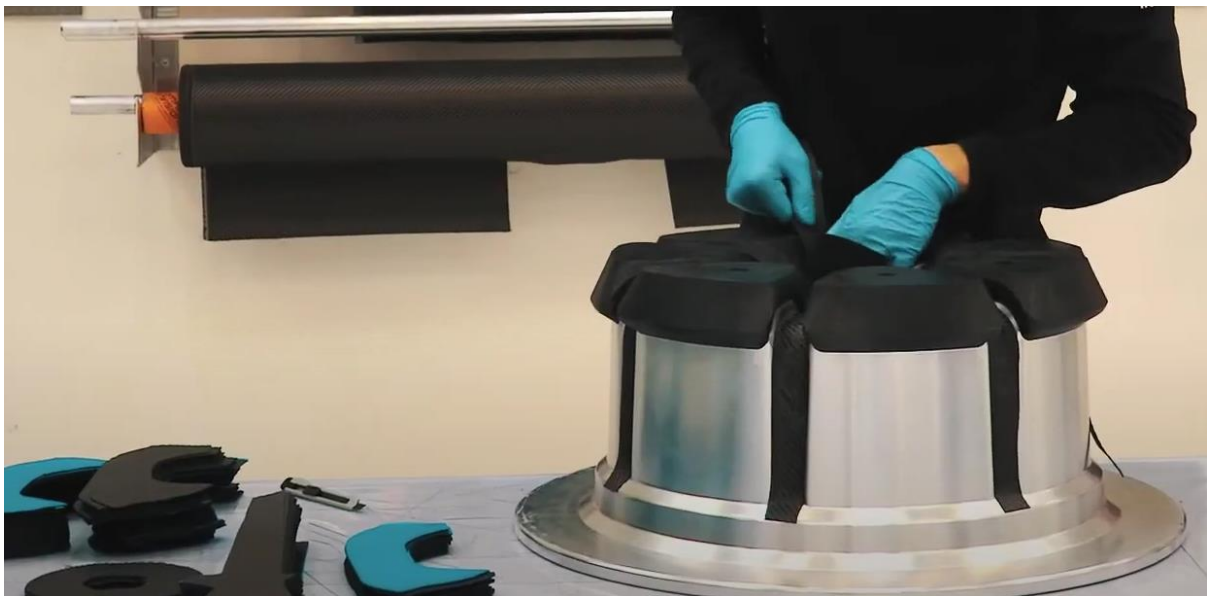


Ilustración 8. Fabricación llanta fibra de carbono Zenvo TSR-S. [16]

1.3.4 Aleación de titanio

El empleo de este material aún no está muy extendido, tan sólo hay una marca que lo ha usado y es HRE. Este material presenta una buena resistencia a la corrosión y una resistencia mecánica elevada, debido a un alto límite elástico y elevado módulo de Young. Además, presenta una densidad bastante baja, lo que lo convierte en una interesante opción para ser empleado en llantas.

HRE realiza llantas de dos piezas, con el núcleo de la llanta de fibra de carbono al que luego se le atornilla la cara de llanta que es realizada en una aleación de titanio impresa en 3D tras haber sido optimizada topológicamente su estructura. La cara de llanta se imprime en distintas piezas, que después se ensamblan para conformar la cara completa. Pudiéndose observar el resultado de esta llanta en la *Ilustración 9*.

El método de fabricación de este componente es completamente distinto a los anteriores, ya que se realiza mediante impresión 3D. En concreto esta técnica es impresión EBM, es decir por haz de electrones. La aleación de titanio en forma de polvo se almacena en un tanque y se van depositando capas de este polvo precalentando. Estas capas de polvo se van fundiendo gracias a una pistola de electrones, estos electrones se extraen de un filamento de tungsteno al vacío y se proyectan acelerados sobre el polvo de titanio. Toda la fabricación se realiza en vacío para evitar interferencias con el haz de electrones.

Una vez que se completa esta operación, un operario retira la pieza de la máquina de impresión y luego retira el polvo de la pieza, este polvo es reciclado para otras piezas. A continuación, se eliminan los soportes temporales empleados como soporte en la impresión, estos soportes también son reciclados.

Tras quitar el polvo de la pieza, se realiza un mecanizado CNC para cumplir con las tolerancias necesarias para el ensamblaje. En comparación al mecanizado tras un forjado, la cantidad de material eliminado es mínimo.

Por último, se limpia la pieza de posibles grasas y se ensambla junto con las distintas partes de la cara de la llanta y el núcleo de la llanta, obteniendo así una llanta de fibra de carbono y aleación de titanio.



Ilustración 9. Llanta HRE 3D+ de aleación de titanio. [17]

2 Objetivos

El objetivo de este trabajo es realizar el diseño de una llanta para un vehículo deportivo. Para lograr este objetivo, se efectúan diversas etapas.

Realizar una revisión de la normativa vigente: Revisar la normativa aplicada a llantas de automóviles en España.

Realizar análisis estructurales y de simulación: Emplear herramientas de análisis de elementos finitos (FEA) para evaluar el comportamiento estructural de la llanta bajo diferentes condiciones de carga. Pudiendo observar así los esfuerzos a los que está sometida una llanta.

Realizar una selección de materiales: Se evalúan las propiedades mecánicas, la disponibilidad de materiales y las limitaciones asociadas con los distintos procesos de fabricación.

Diseñar el modelo conceptual de la llanta: Utilizar software de diseño asistido por ordenador (CAD) para desarrollar un modelo de la llanta que cumpla con los requisitos de rendimiento, resistencia y estética para un vehículo deportivo. Optimizando el peso de la llanta, manteniendo siempre la seguridad y durabilidad de esta.

3 Metodología/Cálculos

A continuación, se detallan los pasos seguidos para la obtención del resultado del diseño de una llanta para un vehículo deportivo. Todos los cálculos se realizan de manera teórica y deberían realizarse los respectivos ensayos para llevarlo a cabo en la realidad.

3.1 Cargas aplicadas

A través del *Reglamento nº 124 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) — Prescripciones uniformes relativas a la homologación de ruedas para vehículos de pasajeros y sus remolques*, documento recogido también en el BOE, se estudian los ensayos a los que debería someterse una llanta para un vehículo de pasajeros una vez que se ha producido.

En este documento se detallan las características de estos ensayos que son: ensayo de materiales, ensayo de corrosión, ensayo de flexión rotativa, ensayo de rodadura, ensayo de impacto y ensayo de par alternante.

Ya que todos estos ensayos son experimentales, se procede a realizar un estudio de cargas aplicadas de manera teórica. Estas cargas se obtendrán de las distintas situaciones en las que se encontrará un vehículo deportivo. Para ello se toman los datos necesarios del modelo Alpine A110, modelo elegido por su ligereza y buena distribución de cargas. En concreto se selecciona el modelo A110GT, ya que sus prestaciones son mayores.

Los principales datos de este modelo son:

- Peso: 1.102Kg
- Potencia: 300CV
- Velocidad máxima: 285Km/h
- Distribución de peso: 42:58
- Aceleración y frenada: 0-100Km/h en 4,2s y 120-0Km/h en 49,3m
- Medidas llantas: delanteras 7,5Jx18 ET35 y traseras 8,5Jx18 ET46
- Medidas neumáticos: delanteros 205/40R18 y traseros 235/40R18
- Diámetro del eje: 66,1mm
- Patrón de pernos: 5x114,3mm
- Tamaño de rosca: M12

En la *Ilustración 10* pueden observarse las medidas del modelo seleccionado, estas medidas se emplearán para calcular los distintos casos de carga en un vehículo deportivo.

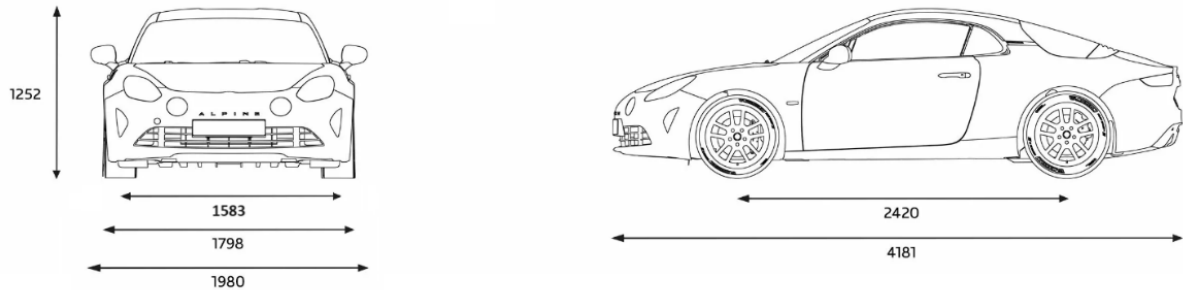


Ilustración 10. Medidas modelo Alpine A110. [21]

Las principales cargas a las que se verá sometida una llanta son la presión de inflado, cargas en las paredes laterales y la reacción vertical con el suelo.

Presión de inflado

La carga debida a la presión de inflado en los neumáticos seleccionados, según Alpine, va desde 0,26MPa hasta 0,3MPa. Por lo que se selecciona el máximo de 0,3MPa, esta se transmite directamente a las zonas internas que no están en contacto con el neumático.

Además, la presión de inflado se transmite sobre las paredes laterales de la llanta. Para obtener esta carga, hay que integrar la presión sobre la superficie del neumático. La integración es bastante sencilla porque sólo nos interesa el área del flanco proyectada sobre el plano vertical. Esta área viene dada por $\pi \cdot (R_{ext}^2 - R_{int}^2)$. El área se multiplica por la presión P para obtener la fuerza total que actúa sobre cada pared lateral del neumático. La fuerza que actúa sobre la pestaña de la llanta es la mitad, ya que la parte inferior de la pared lateral está limitada por la llanta, mientras que la parte superior de la pared lateral está limitada por la banda de rodadura del propio neumático. Por lo tanto, estas fuerzas vienen dadas por la ecuación:

$$F_{wall} = \frac{1}{2} \cdot P \cdot \pi \cdot (R_{ext}^2 - R_{int}^2)$$

A partir de las medidas de los neumáticos que presenta Alpine en su modelo, 205/40R18 delante y 235/40R18 atrás, se pueden obtener los radios interno y externo. El radio interno se obtiene mediante el valor R18, en este caso son 18" lo que equivale a 457,2mm. El radio externo se obtiene mediante el valor 205/40 en el caso de las delanteras, donde el primer número representa el ancho del neumático y el segundo el porcentaje del perfil de este, resultando así un 40% de 205mm y añadiéndole a esto el radio interno.

Delante se obtienen los valores:

$$R_{int} = 457,2mm$$

$$R_{ext} = 0,4 \cdot 205mm + 457,2mm = 539,2mm$$

$$F_{wall} = \frac{1}{2} \cdot P \cdot \pi \cdot (R_{ext}^2 - R_{int}^2) = \frac{1}{2} \cdot 0,3MPa \cdot \pi \cdot [(539,2mm)^2 - (457,2mm)^2] = 38.502N$$

En el caso de las ruedas traseras:

$$R_{int} = 457,2mm$$

$$R_{ext} = 0,4 \cdot 235mm + 457,2mm = 551,2mm$$

$$F_{wall} = \frac{1}{2} \cdot P \cdot \pi \cdot (R_{ext}^2 - R_{int}^2) = \frac{1}{2} \cdot 0,3MPa \cdot \pi \cdot [(551,2mm)^2 - (457,2mm)^2] = 44.669N$$

La distribución de estas cargas puede observarse en la *Ilustración 11*, así como los radios interno y externo, mencionados anteriormente.

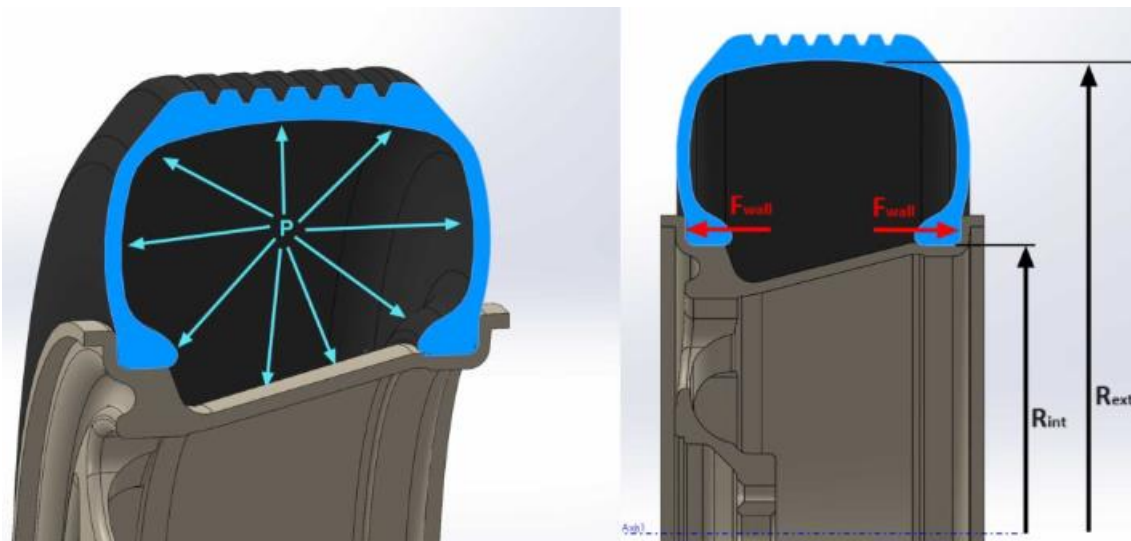


Ilustración 11. Cargas presión inflado. [22]

Las cargas debidas a la presión de inflado siempre actuarán sobre la llanta. A continuación, se estudiarán las distintas cargas que se sumarán a esta presión de inflado, dependiendo de la situación en la que se encuentre el vehículo. A las distintas situaciones de carga, presentes en la *Tabla 1*, se les añadirá un multiplicador dinámico.

Tabla 1. Casos de carga y factores dinámicos. [23]

Caso de carga	Factor de multiplicación dinámico
Velocidad máxima	3,0 en cargas verticales
Paso por curva	1,3 en cargas verticales y laterales
Frenada	1,3 en cargas verticales y longitudinales
Aceleración	1,3 en cargas verticales y longitudinales
Vertical (aerodinámica)	1,3 en cargas verticales

Velocidad máxima

En este caso se produce la máxima carga vertical, debiendo tener en cuenta el efecto de la carga aerodinámica a esa velocidad.

A partir de los datos proporcionados en la *Tabla 2*, se selecciona un valor de carga aerodinámica para el automóvil seleccionado de 2g, es decir una carga aerodinámica alta. Pese a que el Alpine A110GT no se encuentre en el rango de potencia que figura en la tabla para cargas aerodinámicas altas, su velocidad máxima de 285Km/h, hace que la carga aerodinámica que presentará este modelo a velocidad máxima sea alta.

Tabla 2. Valores típicos de carga aerodinámica. [23]

Nivel de carga aerodinámica	Potencia (CV)	Velocidad máxima (Km/h)	Carga aerodinámica a 180Km/h (g)	Carga aerodinámica a velocidad máxima (g)
Baja	<200	225	0,5	0,7
Media	200-350	250	0,75	1,4
Alta	350-700	275	0,85	2
Muy alta	>700	320	1	3,3

Con estos datos se calcula la carga del peso W y la carga vertical D , debida a la carga aerodinámica, se obtiene mediante la carga del peso y la carga aerodinámica a máxima velocidad.

$$W = m \cdot g = 1102Kg \cdot 9,81m/s^2 = 10.811N$$

$$D = W \cdot f_D = 10.811N \cdot 2 = 21.622N$$

Una vez que se obtienen estos valores, ya se puede calcular la carga vertical producida a máxima velocidad.

En una llanta delantera se obtiene mediante:

$$V_{del} = 0,42 \cdot 0,5 \cdot (W \cdot 3 + D \cdot 1,3) = 12.714N$$

Donde 0,42 representa la cantidad de peso que se transmite al eje delantero, ya que este modelo presenta una proporción 42:58. El valor de 0,5 es debido a que sólo se quiere la carga en una llanta, no las dos delanteras. Por último, los valores de 3 y 1,3 son multiplicadores dinámicos obtenidos de la *Tabla 1*.

Siguiendo el mismo procedimiento, se obtiene la carga vertical en una llanta trasera:

$$V_{tras} = 0,58 \cdot 0,5 \cdot (W \cdot 3 + D \cdot 1,3) = 17.557N$$

Frenada

La situación de frenada se produce frenando desde la velocidad máxima del vehículo hasta detenerse por completo. Se asume un coeficiente de fricción típico entre el neumático y la carretera de $\mu=1,2$.

Para este apartado se empleará el peso total efectivo, que se obtiene mediante la carga del peso y la carga vertical. Se obtiene también la cantidad de este peso efectivo que soporta el eje delantero y el trasero.

$$W_T = W + D = 10.811N + 21.622N = 32.433N$$

$$W_{del} = W_T \cdot 0,42 = 32.433N \cdot 0,42 = 13.622N$$

$$W_{tras} = W_T \cdot 0,58 = 32.433N \cdot 0,58 = 18.811N$$

Con el peso total efectivo y el coeficiente de fricción entre el neumático y la carretera, se obtiene la fuerza de frenado F_{fren} .

$$F_{fren} = W_T \cdot \mu = 32.433N \cdot 1,2 = 38.920N$$

En una situación intensa de frenada, toma gran importancia la transferencia de cargas longitudinales. Al frenar se incrementará la carga que soporta el eje delantero, así como las llantas y disminuye la carga en el eje y llantas traseras. Esta transferencia de cargas se puede apreciar en la *Ilustración 12*, como ΔV_{long} .

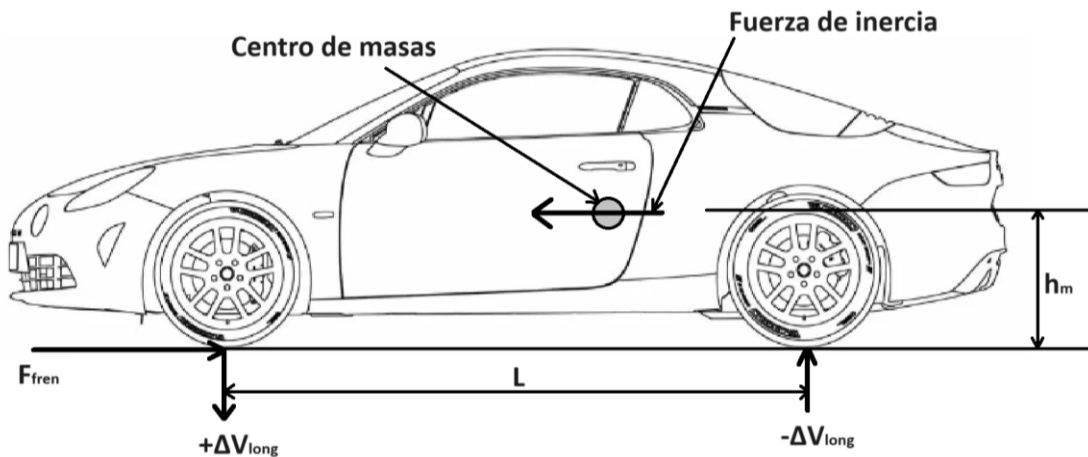


Ilustración 12. Transferencia longitudinal de cargas en frenada

A través de los datos proporcionados por Alpine, pueden obtenerse los datos necesarios para calcular la transferencia de cargas longitudinales. Estos son h_m que representa la altura del centro de masas respecto del suelo y la distancia entre ejes L , que puede observarse en la

Ilustración 10. A partir de la *Ecuación 1*, se obtiene la transferencia de cargas longitudinales.

$$\Delta V_{long} = \frac{F_{fren} \cdot h_m}{L} = \frac{38.920N \cdot 0,41m}{2,42m} = 6.594N$$

Con esta transferencia de cargas longitudinales, ya se pueden calcular las cargas en frenada de cada llanta:

$$V_{del} = 1,3 \cdot \frac{W_{del} + \Delta V_{long}}{2} = 1,3 \cdot \frac{13.622N + 6.594N}{2} = 13.140N$$

$$V_{tras} = 1,3 \cdot \frac{W_{tras} - \Delta V_{long}}{2} = 1,3 \cdot \frac{18.811N - 6.594N}{2} = 7.941N$$

Como se puede observar en estos cálculos, la transferencia de cargas longitudinales se suma en la carga vertical de la llanta y se resta en la carga vertical de la llanta trasera. Además, se divide entre dos para obtener la carga en una sola llanta y se multiplica por 1,3 ya que es el factor dinámico para una situación de frenada, como figura en la *Tabla 1*. Este factor se aplica tanto en la carga vertical, como en la transferencia de carga longitudinal.

Para obtener la fuerza de frenada se multiplican los resultados de estas cargas verticales por el coeficiente de fricción con el asfalto, siendo estas cargas longitudinales.

$$F_{longDel} = V_{del} \cdot \mu = 13.140N \cdot 1,2 = 15.768N$$

$$F_{longTras} = V_{tras} \cdot \mu = 7.941N \cdot 1,2 = 9.529N$$

Paso por curva

Para este caso, a diferencia de casos anteriores, la carga aerodinámica seleccionada será a una velocidad de 180Km/h, ya que es una velocidad a la que podría producirse un paso por una curva abierta. A través de la *Tabla 2*, se obtiene un valor de 0,85g de carga aerodinámica.

Se vuelve a calcular el peso efectivo con esta nueva carga aerodinámica, a una velocidad más baja.

$$W_T = W + D = W + W \cdot f_D = 10.811N + 10.811N \cdot 0,85 = 20.000N$$

$$W_{del} = W_T \cdot 0,42 = 20.000N \cdot 0,42 = 8.400N$$

$$W_{tras} = W_T \cdot 0,58 = 20.000N \cdot 0,58 = 11.600N$$

Al igual que en el apartado anterior, se vuelve a emplear un coeficiente de fricción entre el neumático y la carretera de $\mu=1,2$. Con este coeficiente de fricción y el peso efectivo, puede obtenerse la fuerza generada en el paso por curva.

$$F_{curva} = W_T \cdot \mu = 20.000N \cdot 1,2 = 24.000N$$

Al producirse un paso por curva, se produce una transferencia de cargas laterales, esto provoca que aumenten las cargas en las ruedas exteriores de la curva y disminuyan en las interiores, como puede observarse en la *Ilustración 13*. Esta transferencia de cargas se puede obtener mediante la *Ecuación 3*.

$$\Delta V_{lat} = \frac{F_{curva} \cdot h_m}{T} = \frac{24.000N \cdot 0,41m}{1,583m} = 6.216N$$

En esta expresión, T representa el ancho de vías, es decir la distancia entre las ruedas de un mismo eje. Pudiéndose observar esta medida en la *Ilustración 10*.

Este valor representa la transferencia de cargas laterales totales del vehículo, es prudente asumir que el 62,5% se aplica sobre la llanta delantera exterior y el 37,5% sobre la llanta trasera exterior.

$$V_{del} = 1,3 \cdot [W_{del} \cdot 0,5 + \Delta V_{lat} \cdot 0,625] = 1,3 \cdot [8.400N \cdot 0,5 + 6.216N \cdot 0,625] = 10.511N$$

$$V_{tras} = 1,3 \cdot [W_{tras} \cdot 0,5 + \Delta V_{lat} \cdot 0,375] = 1,3 \cdot [11.600N \cdot 0,5 + 6.216N \cdot 0,375] = 10.570N$$

En estas ecuaciones se ha añadido el factor de multiplicación dinámico de 1,3 para el caso de paso por curva, presente en la *Tabla 1*. Este factor se aplica tanto a la carga vertical como a la transferencia de cargas laterales.

Para obtener la fuerza de paso por curva se multiplican las cargas verticales obtenidas por el coeficiente de fricción con el asfalto. Estas cargas son laterales y de las ruedas exteriores.

$$F_{latDel} = V_{del} \cdot \mu = 10.511N \cdot 1,2 = 12.613N$$

$$F_{latTras} = V_{tras} \cdot \mu = 10.570N \cdot 1,2 = 12.684N$$

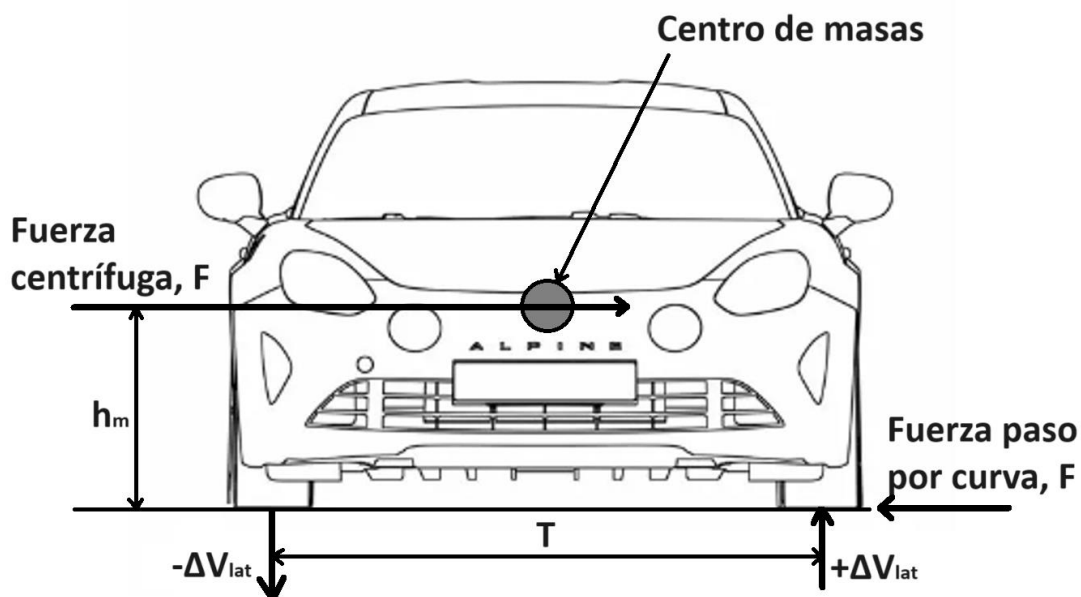


Ilustración 13. Transferencia de cargas laterales paso por curva

Aceleración

Para el cálculo de cargas en aceleración, se emplea el peso del vehículo sin tener en cuenta la acción de la aerodinámica, ya que a bajas velocidades su efecto es despreciable respecto a las demás cargas.

Para los cálculos de cargas en aceleración será necesario el peso del vehículo sin tener en cuenta la carga aerodinámica, ya calculado en el apartado de velocidad máxima.

$$W = 10.811N$$

$$W_{del} = W \cdot 0,42 = 10.811N \cdot 0,42 = 4.541N$$

$$W_{tras} = W \cdot 0,58 = 10.811N \cdot 0,58 = 6.270N$$

Con estos valores y asumiendo un coeficiente de fricción de $\mu=1,2$, se obtiene la fuerza de tracción generada en la aceleración a partir de la *Ecuación 2*.

$$F_{trac} = \frac{W_{tras} \cdot \mu}{1 - \frac{h_m \cdot \mu}{L}} = \frac{6.270N \cdot 1,2}{1 - \frac{0,41m \cdot 1,2}{2,42m}} = 9.444N$$

A partir de esta fuerza de tracción, puede obtenerse la transferencia de carga longitudinal mediante la *Ecuación 1*.

$$\Delta V_{long} = \frac{F_{trac} \cdot h_m}{L} = \frac{9.444N \cdot 0,41m}{2,42m} = 1.600N$$

En este caso de aceleración, ocurre al revés que en el caso de frenada con la transferencia de carga longitudinal. Ahora la carga en el eje trasero aumenta y disminuye en el eje delantero.

$$V_{del} = 1,3 \cdot \frac{W_{del} - \Delta V_{long}}{2} = 1,3 \cdot \frac{4.541N - 1.600N}{2} = 1.912N$$

$$V_{tras} = 1,3 \cdot \frac{W_{tras} + \Delta V_{long}}{2} = 1,3 \cdot \frac{6.270N + 1.600N}{2} = 5.116N$$

En estas cargas verticales se añade el factor de multiplicación dinámico del caso de aceleración, presente en la *Tabla 1*, tanto para cargas verticales como longitudinales.

Para obtener la fuerza de aceleración, es decir cargas longitudinales, se multiplican los resultados de cargas verticales por el coeficiente de fricción.

$$F_{longDel} = V_{del} \cdot \mu = 1.912N \cdot 1,2 = 2.294N$$

$$F_{longTras} = V_{tras} \cdot \mu = 5.116N \cdot 1,2 = 6.139N$$

Resumen situaciones de cargas

En la *Tabla 3*, se ordenan los valores de las distintas situaciones de cargas, para así poder compararlos y ver qué situaciones son más críticas. En esta tabla se puede observar que el valor de la carga vertical sobre la rueda trasera en el caso de velocidad máxima es especialmente alta, debiendo tenerlo en cuenta a la hora de realizar las simulaciones.

Además de estas cargas, siempre actuarán las cargas debidas a la presión de inflado del neumático.

Tabla 3. Casos de carga y valores de las cargas

Caso de carga	V _{del} (N)	V _{tras} (N)	F _{longDel} (N)	F _{longTras} (N)	F _{latDel} (N)	F _{latTras} (N)
Velocidad máxima	12.714	17.557	-	-	-	-
Paso por curva	10.511	10.570	-	-	12.613	12.684
Frenada	13.140	7.941	15.768	9.529	-	-
Aceleración	1.912	5.116	2.294	6.139	-	-

3.2 Diseño inicial

Para realizar un correcto diseño hay que cumplir con las dimensiones impuestas por normativa. Se sigue la norma UNE 69026 para el desarrollo de esta llanta, ya que es la aplicada en España para neumáticos, llantas y válvulas de turismos y sus remolques.

En la *Ilustración 14* pueden observarse las principales medidas necesarias para realizar el diseño del perfil de una llanta. Estas medidas están estandarizadas para evitar problemas a la hora de ensamblar el neumático con la llanta.

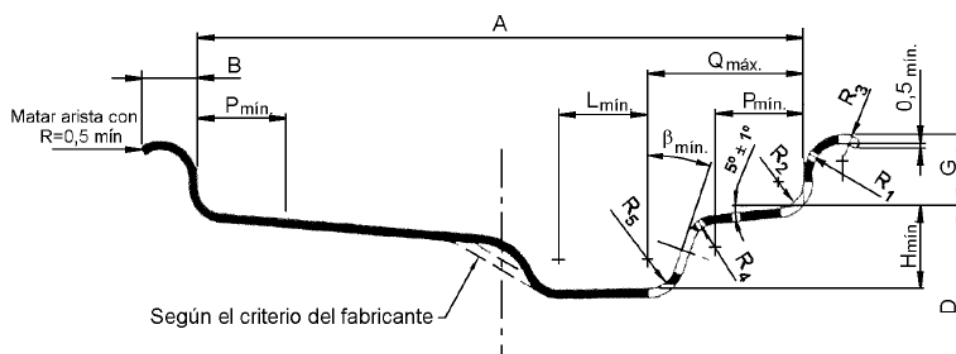


Ilustración 14. Esquema del perfil de llanta. [25]

A partir de los valores presentes en la *Tabla 4* y la *Tabla 5*, además de las medidas proporcionadas por Alpine para el modelo seleccionado, pueden establecerse las dimensiones del perfil de la llanta. A parte de estas tablas, se tienen en cuenta las especificaciones de la norma para los radios R4 y R5, que deben estar comprendidos entre 4 mm y 10 mm. El radio R3 depende de los valores reales de la curvatura y de la anchura de la pestaña, pero como máximo debe ser igual a R1.

La llanta delantera presenta las medidas 7,5Jx18 ET35. Lo que significa que tiene un código de anchura 7½J, pudiendo observarse los valores para este código en la *Tabla 4*. Presenta también un código de diámetro nominal de 18", esto equivale a 462mm de diámetro, como puede observarse en la *Tabla 5*.

Por último, el código ET35 hace referencia a la distancia entre el centro físico de la llanta y el punto en el que se apoya esta con el coche, pudiéndose observar en la *Ilustración 15*. En este caso la distancia al centro de la llanta es de 35mm. También se tiene en cuenta el diámetro del eje de 66,1mm para desarrollar el centro de la llanta, medida del eje del modelo de Alpine seleccionado.

Tabla 4. Medidas de los perfiles de llanta. [25]

Código de anchura	Medidas (mm)											
	A		B		G	P	H	L	Q	R ₁	R ₂	β
			min.	máx. (1)	± 0,6	min.	min. (2)	min.	máx.	min.	máx.	min.
3.00B	76	± 1	10	13	14,1	13	15	16	28	7,5	4,5	10°
3.50B	89	± 1	10	13	14,1	15	15	19	34	7,5	4,5	13°
4.00B	101,5	± 1	10	13	14,1	15	15	19	45	7,5	4,5	13°
4.50B	114,5	± 1	10	13	14,1	19,5	15	22	45	7,5	4,5	13°
5.00B	127	± 1	10	13	14,1	19,5	15	22	45	7,5	4,5	13°
5.50B	139,5	± 1	10	13	14,1	19,5	15	22	45	7,5	4,5	13°
6.00B	152,5	± 1	10	13	14,1	19,5	15	22	45	7,5	4,5	13°
3J	76	± 1	11	15	17,3	13	17,3	16	28	9,5	6,5	10°
3½ J	89	± 1	11	15	17,3	15	17,3	19	34	9,5	6,5	20°
4J	101,5	± 1	11	15	17,3	15	17,3	19	45	9,5	6,5	20°
4½ J	114,5	± 1	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
5J	127	± 1	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
5½ J	139,5	± 1	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
6J	152,5	± 1	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
6½ J	165	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
7J	178	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
7½ J	190,5	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
8J	203	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
8½ J	216	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
9J	228,5	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
9½ J	241,5	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
10J	254	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
10½ J	266,5	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
11J	279,5	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
11½ J	292	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
12J	305	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
12½ J	317,5	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
13J	330	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°
13½ J	3 433	± 1,5	11	15	17,3	19,5	17,3	22	45	9,5	6,5	20°

Tabla 5. Diámetros. [25]

Código de diámetro nominal	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Diámetro D especificado (mm)	253,2	304,0	329,4	354,8	380,2	405,6	436,6	462,0	487,4	512,8	538,2	563,6

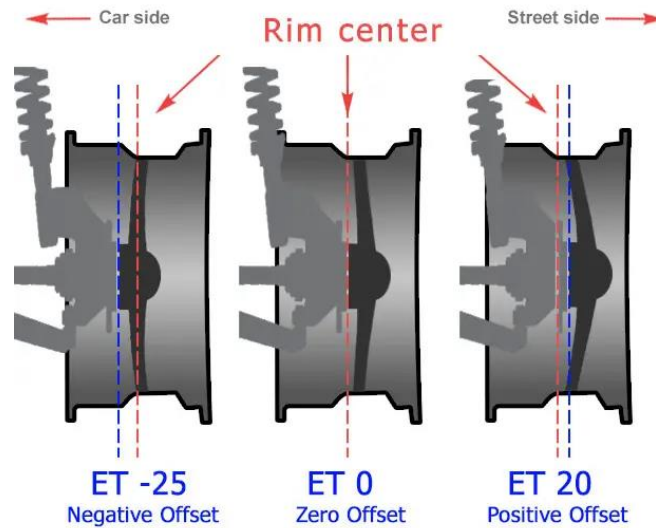


Ilustración 15. Código ET de una llanta. [26]

Las llantas traseras del modelo seleccionado presentan las medidas 8,5Jx18 ET46. Volviendo a hacer uso de las tablas se observa que son más anchas que las delanteras, esto se debe a que las ruedas motrices son las traseras y es beneficioso implantar neumáticos mayores en estas, para obtener mejores respuestas en la conducción.

En la *Tabla 6* pueden observarse los distintos resaltes de seguridad que se realizan en el cuerpo de la llanta, estos resaltes hacen que asiente mejor el neumático sobre la llanta. Para el diseño de esta llanta se ha optado por un resalte redondeado doble, es decir, un resalte redondeado tanto en el lado interior como el lado exterior de la llanta, marca H2. Dándole así una mejor base de apoyo al neumático y una mayor seguridad.

Tabla 6. Marcas resaltes de seguridad. [25]

Designación	Perfil del asiento de talón		Marcas
	Lado exterior	Lado interior	
Resalte redondeado	Resalte redondeado	Normal	H
Resalte redondeado doble	Resalte redondeado	Resalte redondeado	H2
Resalte plano	Resalte plano	Normal	FH
Resalte plano doble	Resalte plano	Resalte plano	FH2
Resalte combinado	Resalte plano	Resalte redondeado	CH
Resalte redondeado extendido	Resalte redondeado extendido	Resalte redondeado extendido	EH2

Para el desarrollo de estos resaltes redondeados se emplean las medidas presentes en la *Ilustración 16*, donde figura la distancia que debe guardarse al borde de la llanta, la altura del resalte y los distintos radios de curvatura para su desarrollo.

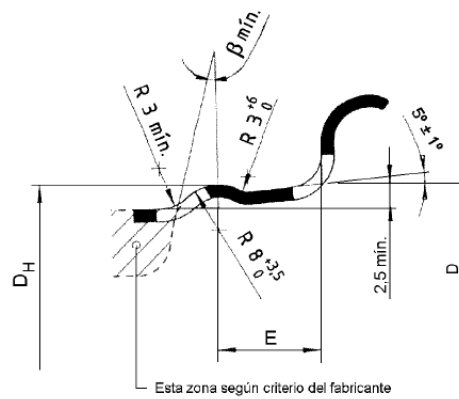


Ilustración 16. Resalte redondeado. [25]

En este caso tanto la llanta delantera como trasera, presentan un código de anchura superior a $4\frac{1}{2}J$, por lo que presentarán un valor de distancia al borde de la llanta de mínimo 21mm. Este valor se obtiene haciendo uso de la *Tabla 7*, donde figura como “E”.

Tabla 7. Dimensiones de perfil. Resalte redondeado. [25]

Código de anchura	E (mm)
3.00 B, 3J	13 mín.
3.50 B, 4.00 B, 3 $\frac{1}{2}$ J, 4 J	16 mín.
4.50 B, 4 $\frac{1}{2}$ J y superior	21 mín.
19,5 mín. permitido en llantas con anchuras de 4,50 mm (4 $\frac{1}{2}$) a 7 mm	

A partir del código de diámetro nominal se obtiene el desarrollo del resalte, que es el punto más alto de este. En este caso ambas llantas son de 18”, por lo que se emplea la *Tabla 8* para obtener la altura de este. Esta tabla nos ofrece el valor de $[\pi \cdot D_H]_{-3}^0 = 1453,6mm$, de donde se obtiene el intervalo de valores para la altura de este resalte “D_H”. El valor de esta altura es de mínimo 461,8mm y máximo 462,7mm.

Con los valores de distancia al borde de la llanta y altura del resalte, ya pueden realizarse los resaltes redondeados siguiendo la normativa UNE 69026.

Tabla 8. Desarrollos. Resalte redondeado. [25]

Código de diámetro nominal	Desarrollo del resalte redondeado πDH_{-3}^0 (mm)
10	797,6
12	957,6
13	1 037
14	1 116,8
15	1 196,6
16	1 276,4
17	1 373,8
18	1 453,6
19	1 533,4
20	1 613,2
21	1 693
22	1 772,8

A partir de todas las medidas explicadas anteriormente, se desarrolla el perfil de la llanta mediante el software de diseño asistido por ordenador, Catia V5. En la *Ilustración 17* pueden observarse las principales medidas del perfil de la llanta, como el ancho “A” que figura en la *Tabla 4*, de 190,5mm o el radio de la llanta de 231mm, ya que según la *Tabla 5* el diámetro es de 462mm. Algunas cotas han sido omitidas en esta ilustración, para poder observarse con mayor claridad.

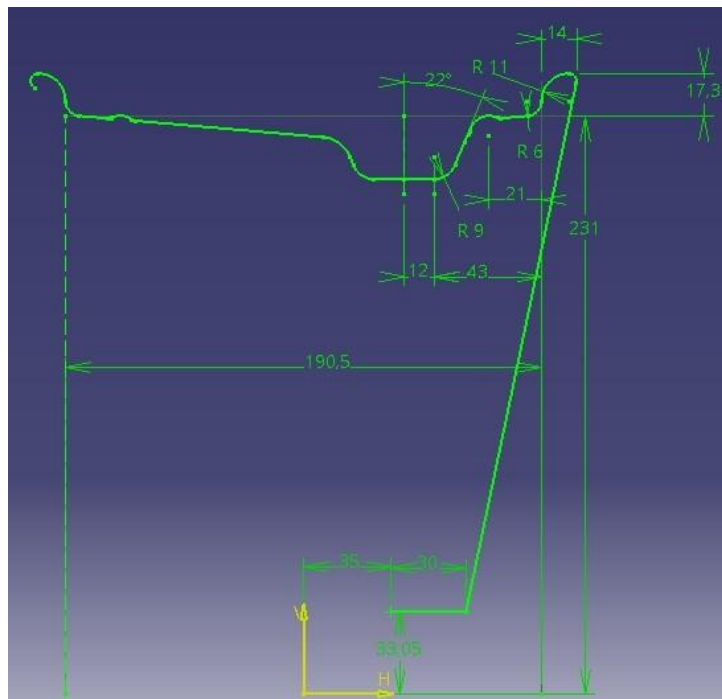


Ilustración 17. Diseño perfil llanta delantera. [27]

Una vez que se tiene este perfil, se revoluciona para obtener la superficie que se aprecia en la *Ilustración 18*.

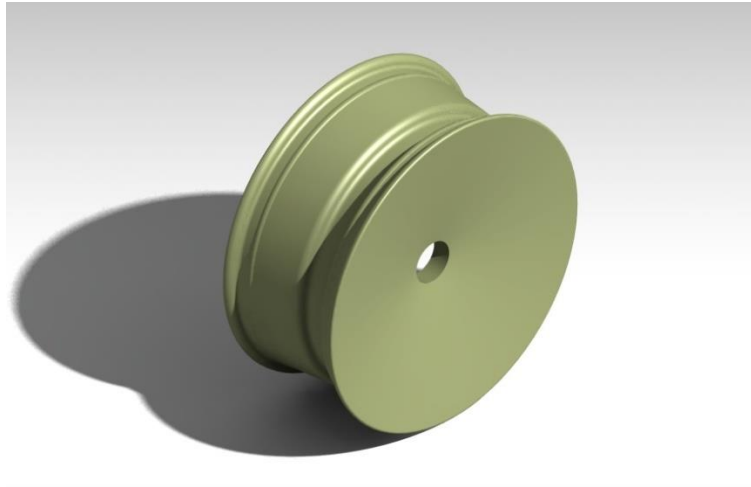


Ilustración 18. Revolución geometría llanta. [27]

Sobre esta superficie se añade el agujero necesario para la válvula de presión. A partir de la norma UNE 69026, se establece que el diámetro para el agujero de las válvulas de presión debe ser de 11,3mm, pudiendo observarse en la *Ilustración 19*.

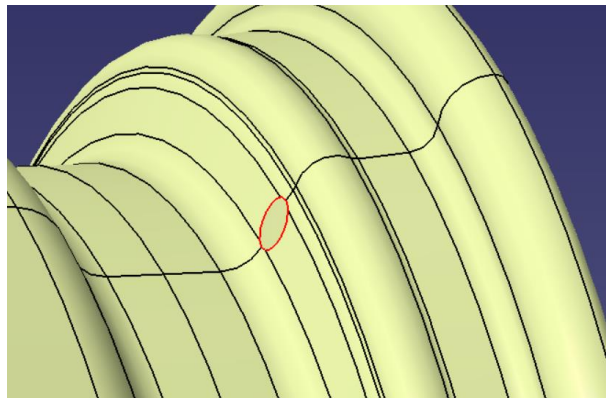


Ilustración 19. Agujero válvula de presión. [27]

Se termina el diseño de la superficie de la llanta como se observa en la *Ilustración 20*, añadiendo una cara plana donde se apoyará el buje del vehículo. Esta superficie se añade y se realiza un “recorte”, es decir se corta la superficie de la cara de la llanta y a esta se une la nueva superficie creada, generando así una única superficie.

Además, se añaden los agujeros de los pernos según las medidas que proporcionaba Alpine. Estos agujeros se realizan mediante cilindros, empleando también la función de recorte, para así dejar un reborde de estos cilindros que servirá como apoyo para los pernos. Los pernos siguen el patrón 5x114,3mm, son 5 pernos equidistantes en un círculo de 114,3mm de diámetro. Estos pernos tienen una rosca M12, es decir 12mm de diámetro cada agujero.

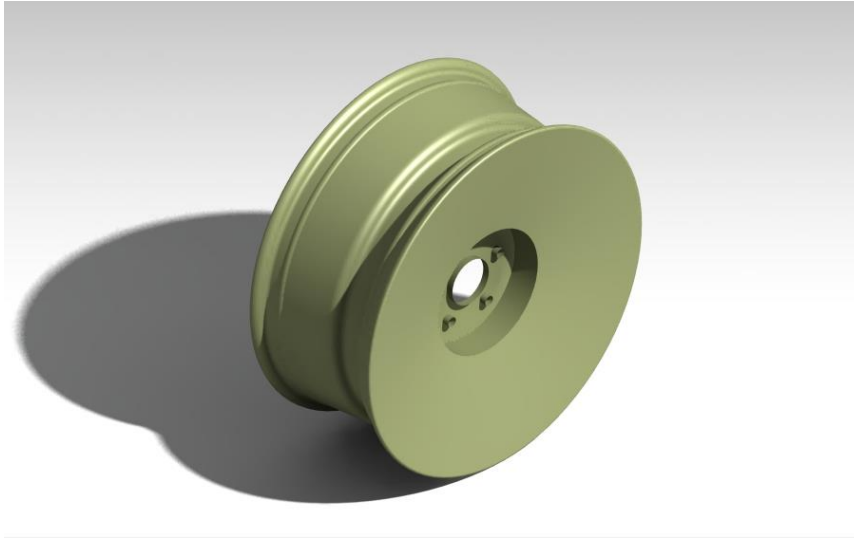


Ilustración 20. Diseño inicial superficie llanta delantera. [27]

A esta superficie se le aplica un espesor de 10mm, observándose el resultado en la *Ilustración 21*. Así se obtiene un sólido, sobre el que se puede realizar una simulación con un material elástico y lineal, observando así cómo reaccionan las tensiones.

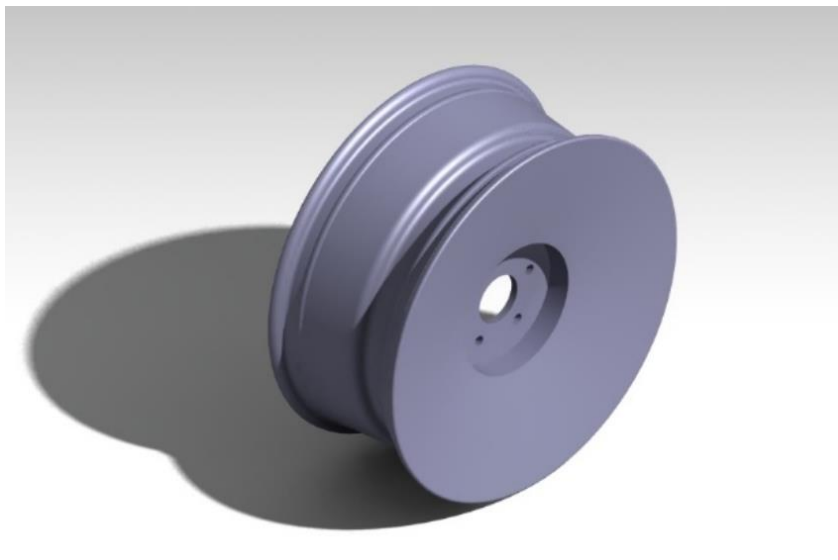


Ilustración 21. Diseño inicial sólido llanta delantera. [27]

El diseño inicial de la cara de esta llanta es completamente sólido, a partir de los resultados obtenidos en las distintas simulaciones se desarrollará la cara de la llanta. Esto es necesario para saber cómo reacciona la llanta con las distintas cargas.

A partir de los datos establecidos por normativa se desarrolla el perfil de la llanta trasera, las únicas medidas que cambian son el ancho de llanta y la distancia al centro de la llanta, ET. Esto se observa en la *Ilustración 22*, donde se aprecia que esta llanta es más ancha. Presentando una medida del ancho “A” de 216mm y distancia ET de 46mm.

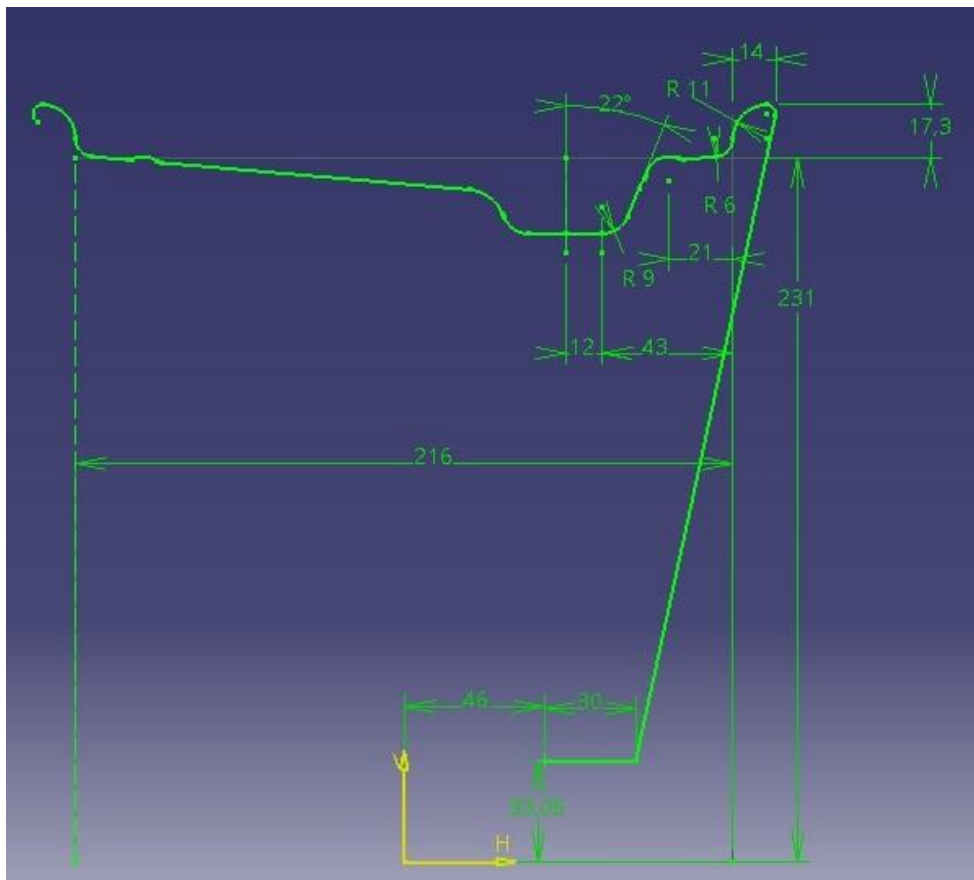


Ilustración 22. Diseño perfil llanta trasera. [27]

Realizando las mismas operaciones que con la llanta delantera, se obtiene el sólido de la llanta trasera, apreciándose en la *Ilustración 23*. Este diseño también cuenta con una cara completamente maciza, para observar con se distribuyen las tensiones antes de realizar su respectivo diseño.

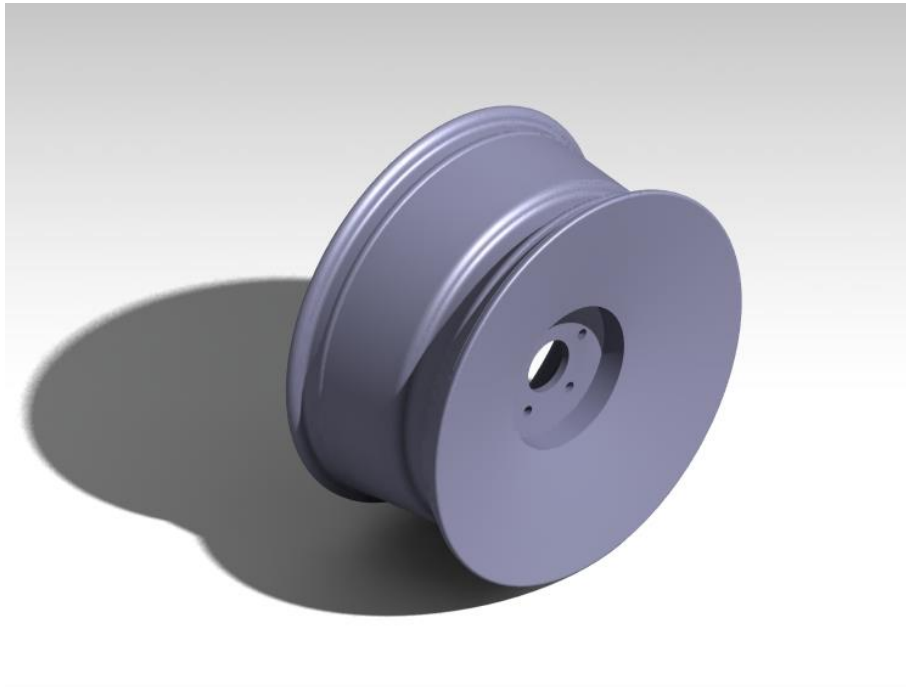


Ilustración 23. Diseño inicial sólido llanta trasera. [27]

3.3 Simulación inicial

Esta primera simulación se lleva a cabo con el propósito de ver cómo afectan las tensiones a un material elástico y lineal, para así poder elegir el material óptimo. En el apartado 3.5, se detallarán las características del programa de simulación por el método de elementos finitos empleado, Ansys Workbench, concretando los detalles para el material seleccionado. Para esta primera simulación se emplea acero, ya que su comportamiento encaja con un material elástico y lineal.

Las cargas empleadas para realizar la simulación son las debidas a la presión de inflado y a las distintas situaciones de carga. Estas situaciones de carga son velocidad máxima, paso por curva, frenada y aceleración. Las cargas por la presión de inflado siempre estarán presentes, pero los demás casos son independientes unos de otros.

A partir de los valores de la *Tabla 3*, se seleccionan los casos de cargas que se deben realizar para cada llanta. El caso de carga de velocidad máxima se emplea para la llanta trasera, ya que tiene las cargas verticales más altas. El caso de carga de paso por curva se emplea para la llanta delantera y la trasera, ya que es el único caso que genera fuerzas laterales, debido a la transferencia lateral de cargas. El caso de carga de frenada también se emplea en ambas llantas, ya que genera las fuerzas longitudinales máximas, esto se debe a la transferencia longitudinal de cargas. Además, en este caso de frenada, se genera la máxima carga vertical en la llanta delantera.

El único caso de carga que no se tendrá en cuenta es la aceleración, ya que la configuración de cargas que presenta es igual que el caso de aceleración, pero con valores de cargas menores.

3.3.1 Condiciones de contorno

A continuación, se detallan las cargas introducidas en la simulación. Este análisis se desarrolla de manera estática, ya que es una simplificación asumible por el tiempo que ahorra a la hora de realizar los cálculos. Los resultados que se obtienen con estas simulaciones sirven para prever el comportamiento de una llanta, pero siempre se deben realizar los ensayos experimentales en caso de llevar un componente como este a producción.

Restricciones de movimiento

Como se puede observar en la *Ilustración 24*, se restringen todos los movimientos en las zonas resaltadas en color azul. Estas zonas corresponden a la cara interior de la llanta que está en contacto con el buje y los agujeros de los pernos. Estas restricciones se deben a las condiciones de contorno, que físicamente impiden que estas zonas se puedan desplazar o rotar.

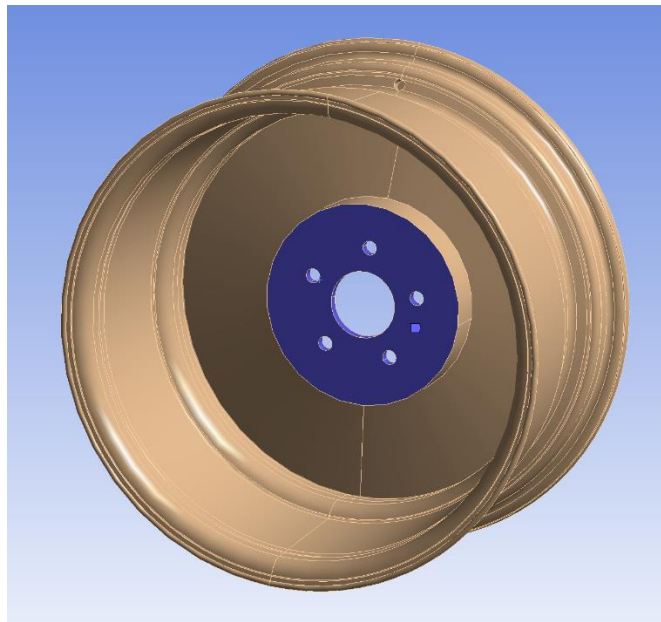


Ilustración 24. Restricciones de movimiento. [28]

Presión de inflado

Como se puede observar en la *Ilustración 25*, la presión se distribuye en las caras de la llanta que no están en contacto con el neumático, resaltadas en color rojo en esta ilustración. Esta presión se distribuye uniformemente y actúa de manera normal a las superficies de la llanta.

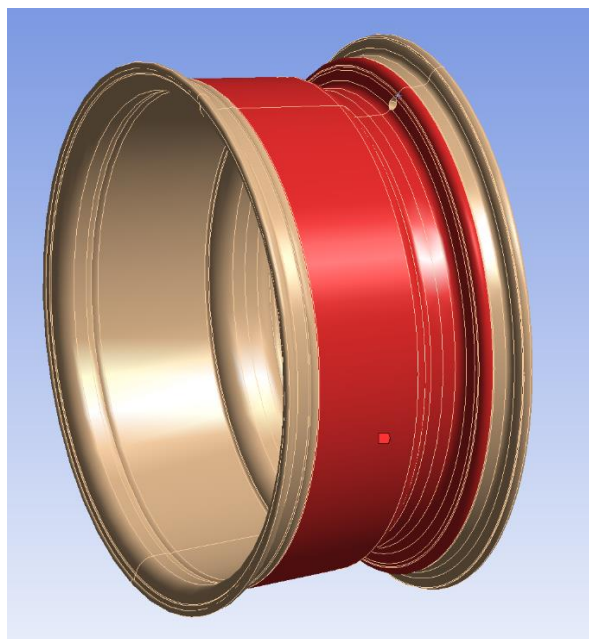


Ilustración 25. Presión de inflado. [28]

La presión de inflado genera también cargas en las paredes laterales de la llanta, donde está en contacto con la goma del neumático. Estas cargas se direccionan hacia las zonas exteriores de la llanta, simulando el efecto que haría el neumático y estando distribuidas uniformemente sobre los flancos de la llanta, pudiendo apreciarse en la *Ilustración 26*.

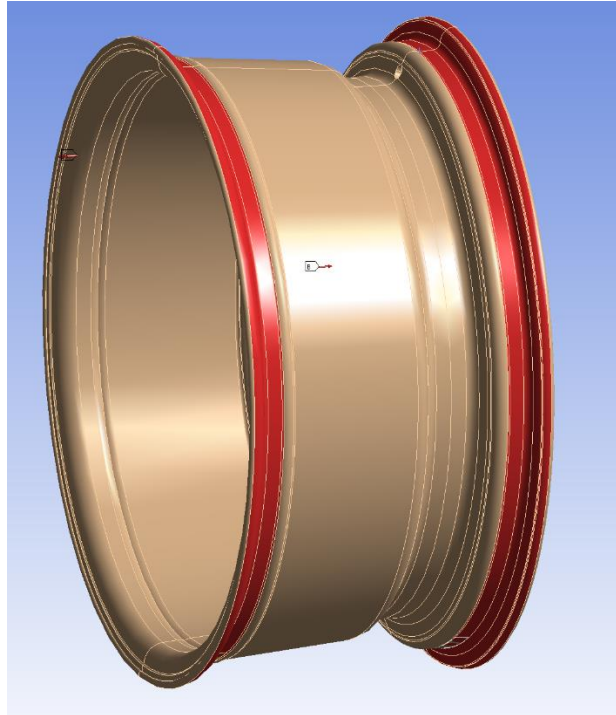


Ilustración 26. Fuerza lateral presión inflado. [28]

Carga vertical

La carga vertical se debe a la reacción que produce el asfalto, transmitiéndose la carga de manera parabólica. La carga máxima se produce en el centro de la llanta y va disminuyendo según se aleja de ese punto. Esto se puede observar en la *Ilustración 27*, donde además se observa un ángulo de aplicación, en este caso se han empleado 30°.

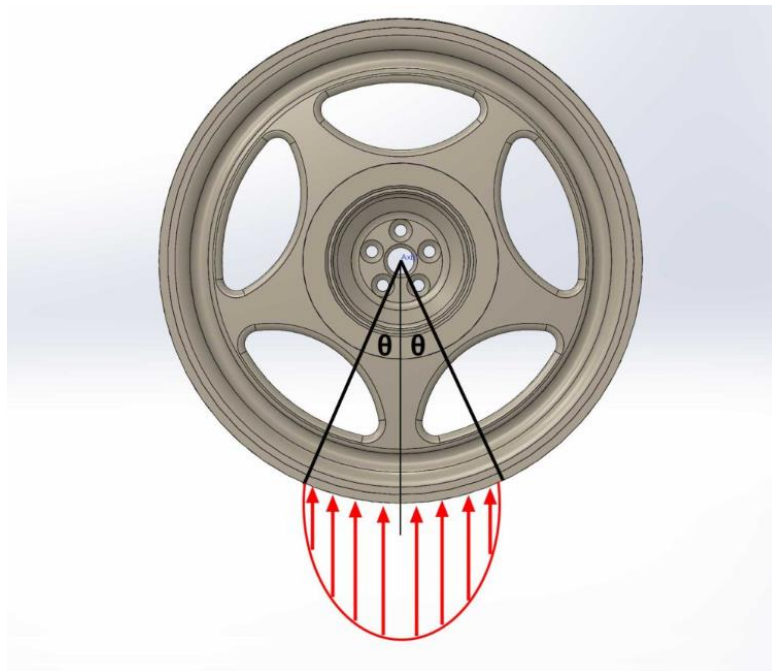


Ilustración 27. Distribución carga vertical. [22]

La carga vertical se introduce en el programa de simulación mediante una carga remota aplicada en las dos secciones de la base que están en contacto con el neumático. Estas dos secciones se han introducido previamente en el diseño de Catia para poder emplearlas ahora, sólo actúan como un elemento geométrico para introducir esta carga. Esta carga se introduce mediante componentes, seleccionando el eje Z positivo según Ansys, es decir verticalmente como se observa en la *Ilustración 28*.

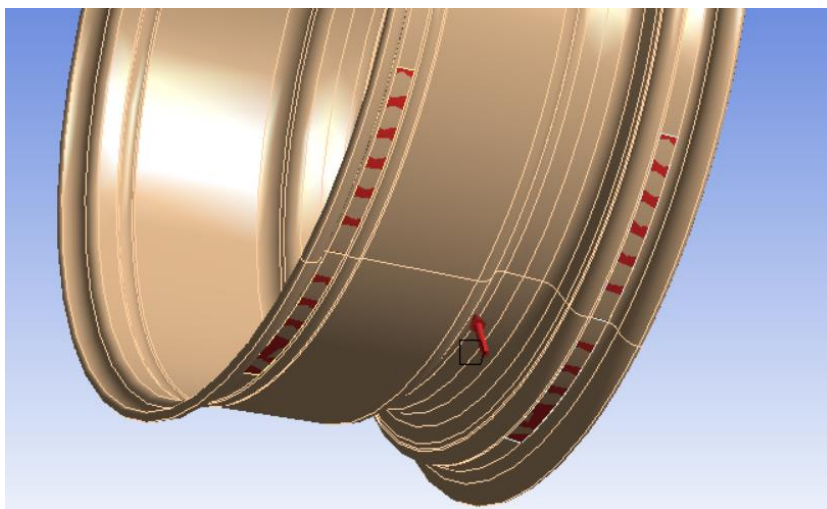


Ilustración 28. Carga vertical. [28]

Fuerza longitudinal

Las cargas que producen fuerza longitudinal son la fuerza de frenado y la fuerza de aceleración. Estas cargas se producen por la transferencia longitudinal de cargas y se distribuyen homogéneamente sobre las zonas en contacto entre el neumático y la llanta. Esta carga se introduce en la dirección de movimiento del vehículo, pudiendo observarse en la *Ilustración 29*.

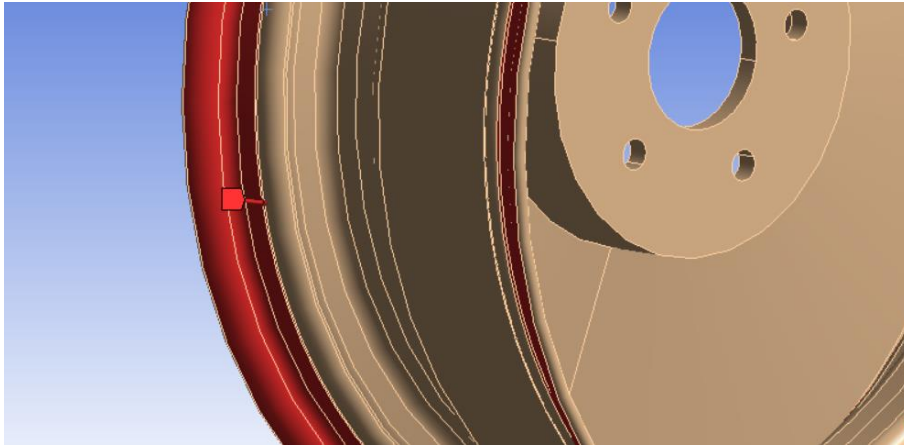


Ilustración 29. Fuerza longitudinal. [28]

Fuerza lateral

Al igual que la fuerza longitudinal, la fuerza lateral se distribuye homogéneamente sobre las zonas de contacto entre el neumático y la llanta. En este caso la fuerza lateral ocurre en un paso por curva sobre la llanta exterior, por esa razón la fuerza lateral se aplica hacia el interior de la llanta, simulando la reacción que tendría el neumático sobre la llanta.

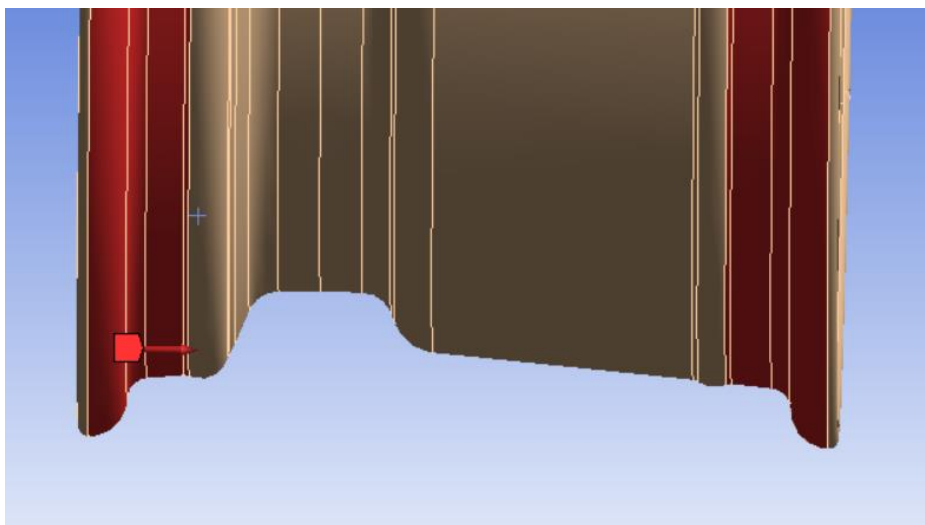


Ilustración 30. Fuerza lateral. [28]

3.3.2 Tensiones obtenidas

En la llanta delantera, el valor más alto de tensión equivalente de Von Mises, se produce en la situación de frenada. Como se puede observar en la *Ilustración 31*, se produce en la zona roja de la cara interior de la llanta, con un valor de 67,26MPa.

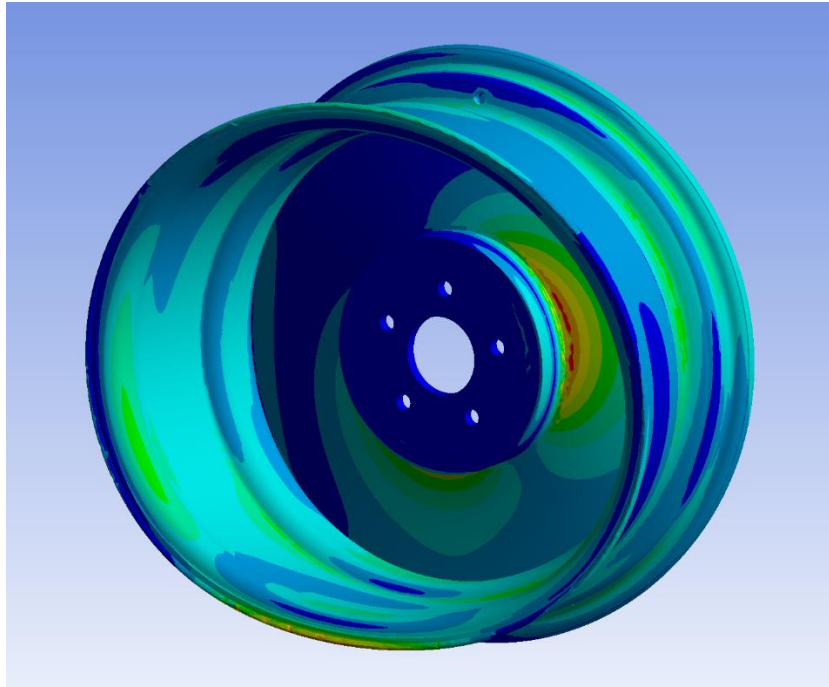


Ilustración 31. Tensión equivalente de Von Mises frenada llanta delantera. [28]

En la llanta trasera, el valor de tensión máxima se produce en la situación de velocidad máxima. El valor obtenido es de 90,8MPa y se produce en el extremo del cuerpo de la llanta, como puede apreciarse en color rojo en la *Ilustración 32*.

Este valor de tensión máxima se empleará como referencia para la selección del material, pese a que posteriormente la geometría cambie y los valores de tensión máxima sean mayores a este. Al ser un material elástico y lineal, la tensión obtenida es un buen punto de partida para seleccionar el material idóneo.

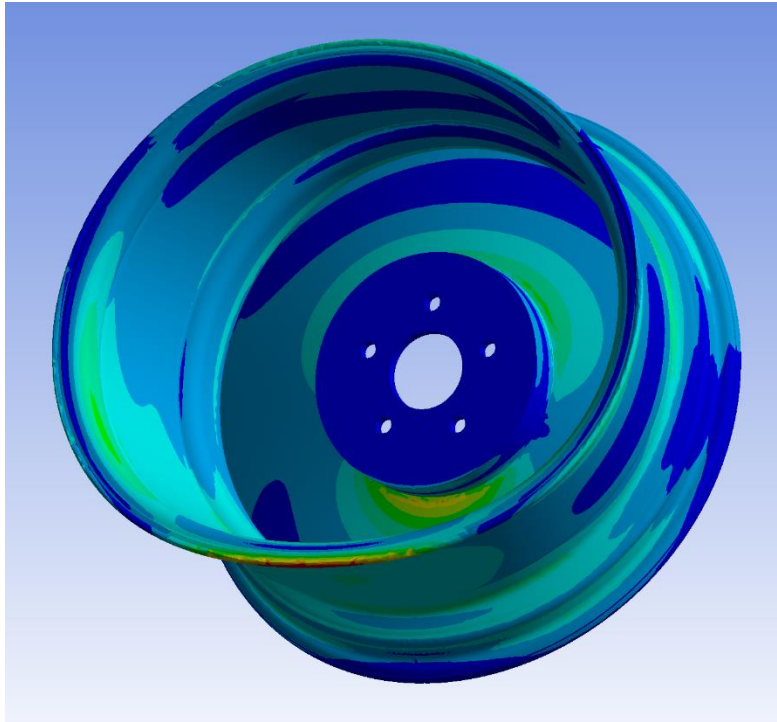


Ilustración 32. Tensión equivalente de Von Mises velocidad máxima llanta trasera. [28]

3.4 Selección del material

Teniendo en cuenta los materiales empleados actualmente, así como sus métodos de fabricación, gracias al software Ansys Granta EduPack, se procede a realizar una selección para el material idóneo para una llanta en un vehículo deportivo.

Para proceder con la selección del material, primero es necesario tener claras las necesidades en esta llanta. Teniendo en cuenta que es un vehículo deportivo, ha de ser un material ligero y con una buena resistencia mecánica. Además, ha de mantener sus propiedades al someterse a fatiga, ya que las condiciones de conducción a las que se verá sometida esta llanta son más exigentes. Otras propiedades que debe presentar el material buscado son la resistencia a la corrosión, ya que no se sabe el ambiente en el que se va a encontrar y la viabilidad de aplicar este material para la fabricación de una llanta.

Todo esto se realizará sin descuidar el coste del material. Aunque se busquen propiedades superiores que puedan incrementar su precio, es fundamental que este no sea excesivo.

Se toman todos los materiales de la base de datos que proporciona el programa y a partir de las diferentes etapas, se irán descartando las opciones que no son viables.

Primera etapa

En la primera etapa, se establecen distintos límites que deben cumplir los materiales para aguantar las condiciones ambientales. Estos límites son:

- Resistencia al agua dulce aceptable o excelente.
- Resistencia al agua salada aceptable o excelente.
- Resistencia a la radiación UV aceptable o excelente.

Tras estos límites se obtienen 2262 materiales de los 4249 iniciales.

Segunda etapa

En la segunda etapa, se añade un límite para asegurar que el material tiene una mínima resistencia a fatiga. El valor empleado de referencia es el de tensión máxima obtenida en la simulación inicial, para un material elástico y lineal. Esta tensión se produce en la situación de velocidad máxima sobre la llanta trasera, con un valor de 90,8MPa.

- Resistencia a fatiga tras 10^7 ciclos mínima de 90,8MPa.

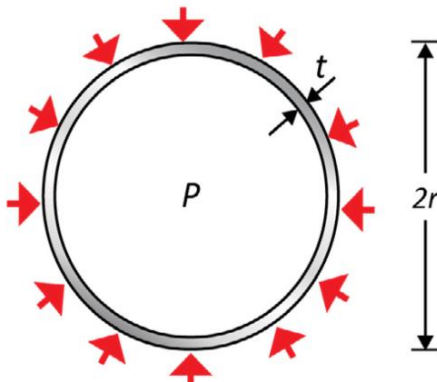
Tras esta etapa se obtienen 1438 materiales restantes.

Tercera etapa

En la tercera etapa se busca acotar los materiales con mejor resistencia mecánica y ligereza. Para ello se hará uso del libro de índices de rendimiento de Ansys. A través de este libro se asimila la llanta a una esfera sometida a presión externa.

Como se puede observar en la *Tabla 9*, se buscará maximizar el índice $\sigma_y^{2/3}/\rho$. Donde σ_y hace referencia al límite elástico y ρ hace referencia a la densidad.

Tabla 9. Índices de rendimiento esfera con presión externa. [29]

Funciones y Restricciones		Maximizar	Minimizar
Esfera con presión externa		Radio fijo; espesor de pared libre; flotabilidad limitada	$\sigma_y^{2/3}/\rho$
			$\rho/\sigma_y^{2/3}$

Para representar gráficamente este índice y obtener la pendiente de la recta de optimización se toman logaritmos en el índice a maximizar y después se compara con la ecuación de una recta.

$$M = \sigma_y^{2/3}/\rho \rightarrow \log(M) = \log\left(\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}\right) \rightarrow \log(M) = \frac{2}{3} \cdot \log(\sigma_y) - \log(\rho)$$

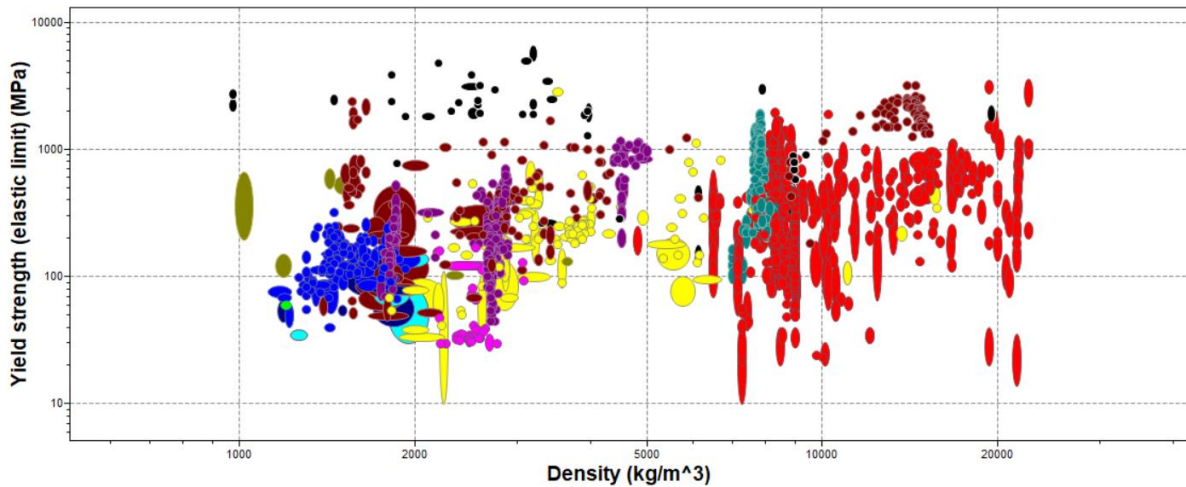
Reordenándolo para compararlo con la ecuación de una recta queda tal que:

$$\log(\sigma_y) = \frac{3}{2} \log(\rho) + \frac{3}{2} \cdot \log(M) \leftrightarrow y = m \cdot x + n$$

De donde se obtiene que el límite elástico se localiza en el eje de ordenadas, la densidad se sitúa en el eje de abscisas y la pendiente de la recta de optimización es 3/2.

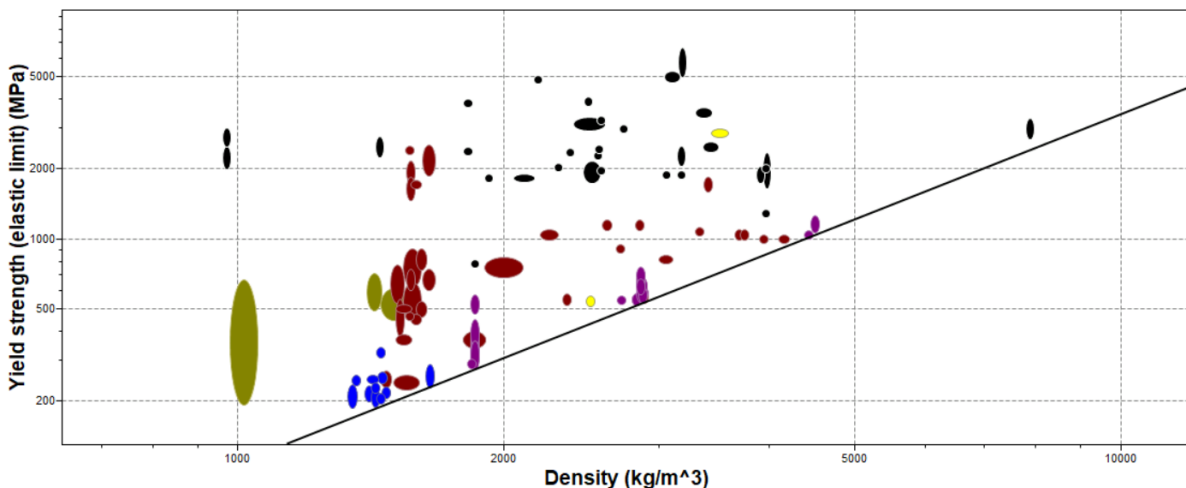
Introduciendo la densidad en el eje de abscisas y el límite elástico en el eje de ordenadas de los materiales de la segunda etapa, se obtiene la *Gráfica 1*. En esta gráfica se observa un diagrama de Ashby, donde los colores representan distintos tipos de materiales y cada elipse representa a un material. Sobre esta gráfica se introducirá una recta con el índice de optimización para seleccionar los materiales que mejores propiedades de densidad y límite elástico presenten.

Gráfica 1. Diagrama de Ashby densidad vs límite elástico. [30]



Como se puede observar en la *Gráfica 2*, se introduce la recta de optimización con pendiente 1,5 que maximiza el índice, quedándose con los valores más altos de límite elástico y los más bajos de densidad. Tras esta tercera etapa se sitúa la recta de optimización para obtener sólo los 100 mejores materiales, ya que este índice va a ser de gran importancia para la selección del material idóneo.

Gráfica 2. Optimización densidad vs límite elástico. [30]



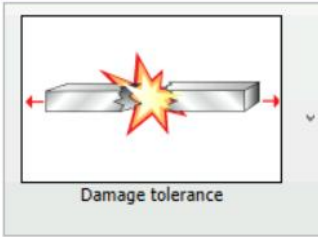
Cuarta etapa

En la cuarta etapa se buscan los materiales con menor precio y que además tengan buena tolerancia al daño. Este componente estará sometido a fatiga, por lo que debe presentar una buena tenacidad a fractura para evitar la propagación de grietas.

En la *Ilustración 33* se emplea el índice de rendimiento propio de Granta Edupack, este índice se aplica directamente sobre un eje y hay que minimizarlo. Además, este índice busca optimizar el coste del material, obteniendo así el índice de rendimiento $\frac{C_m \cdot \rho}{K_{IC}}$. En este índice C_m representa el coste del material, ρ representa la densidad y K_{IC} representa la tenacidad a fractura.

Definición de componentes

Función y carga:



Damage tolerance

Variables libres: all dimensions

Variables fijas: none

Restricción limitante: load

Optimizar: cost

Notas del componente:

Resistance to internal defects and brittle fracture

Ties, shafts, beams, panels, springs, turbine containment systems, snap-on lids, fasteners...

For optimal design combine indices with high yield strength

Índice de rendimiento

Minimizar:

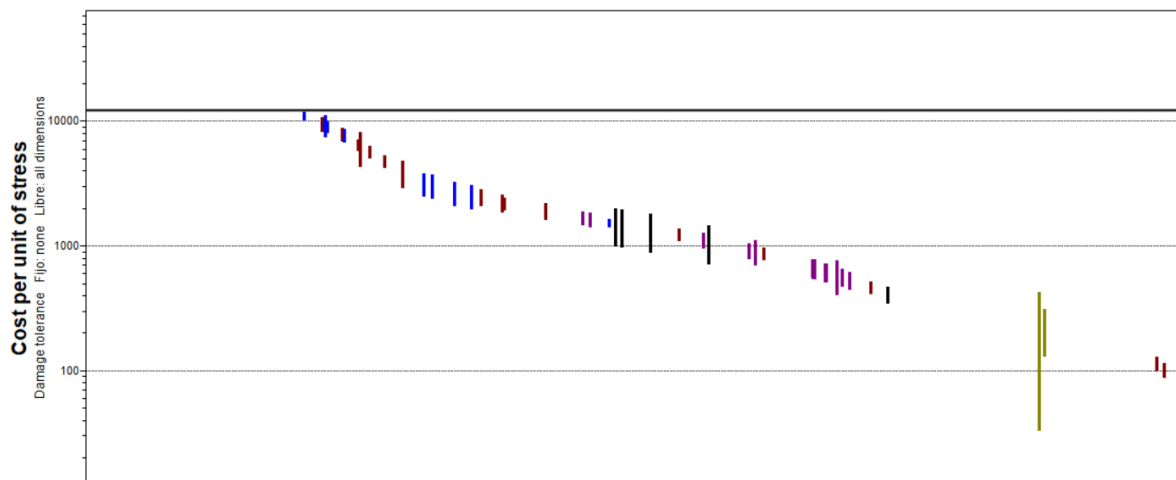
$$\frac{C_m \cdot \rho}{K_{IC}}$$

[símbolos](#)

Ilustración 33. Índice de rendimiento tolerancia al daño. [30]

En esta etapa se sitúa sobre el eje de ordenadas el índice de optimización y, como se observa en la *Gráfica 3*, se seleccionan los 50 materiales con menor valor de este índice, ya que hay que minimizarlo. En este caso se introduce una recta horizontal para la selección, descartando los materiales que quedan por encima de esta, ya que se desea obtener la máxima resistencia a fractura y el menor coste.

Gráfica 3. Optimización de coste respecto resistencia al daño. [30]



Esta etapa es necesaria, ya que, aunque el coste de la llanta vaya a ser más elevado para obtener mejores prestaciones, este no debe ser desmesurado. En esta etapa se descartan materiales

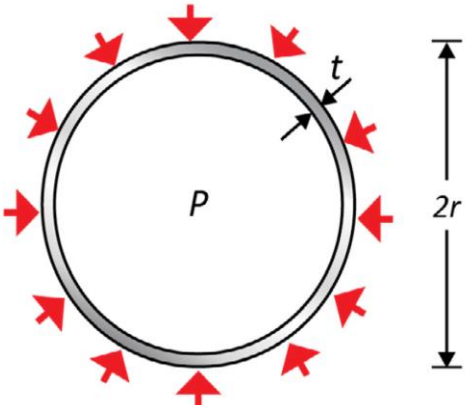
incoherentes que habían pasado las anteriores etapas, como el diamante, que presenta un precio desmesurado para esta aplicación.

Quinta etapa

Para la quinta etapa se usa de nuevo el libro de índices de Ansys, asimilando el problema a una esfera sometida a presión externa. Esta vez se buscará un material lo suficientemente rígido al estar sometido a presión externa, ya que no debe deformarse en exceso al estar sometido a grandes cargas. Además, se busca optimizar la masa, para que el material sea lo más ligero posible.

El índice de rendimiento se puede observar en la *Tabla 10*, el cual debe maximizar la expresión $\frac{E}{\rho}$. En esta expresión, E hace referencia al módulo elástico y un mayor valor de este, hará que presente mayor rigidez el material.

Tabla 10. Índices de rendimiento esfera con presión externa. [29]

Function and Constraints		Maximize	Minimize
Esfera con presión externa		E/ρ	ρ/E
	Radio fijo; espesor de pared libre; flotabilidad limitada		

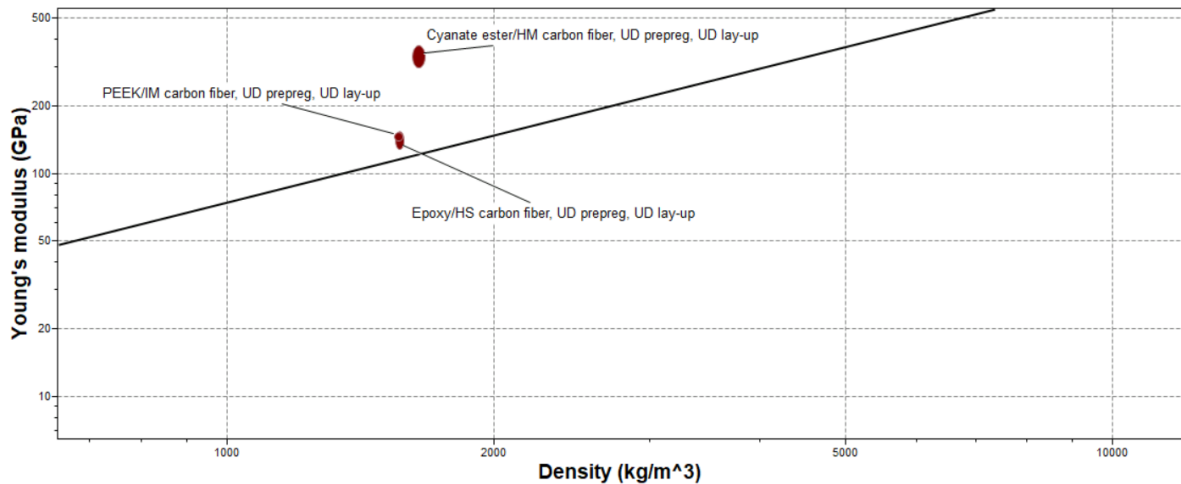
Tomando logaritmos nuevamente para representar el índice se llega a la expresión:

$$\log(E) = \log(\rho) + \log(M) \leftrightarrow y = m \cdot x + n$$

De donde se obtiene que el módulo elástico se localiza en el eje de ordenadas, la densidad se sitúa en el eje de abscisas y la pendiente de la recta de optimización es 1.

Este índice se representa con la recta de optimización en la *Gráfica 4*, donde se seleccionan valores por encima de la recta, ya que hay que maximizar el índice.

Gráfica 4. Optimización densidad vs módulo de Young. [30]



Finalmente, se obtienen 3 materiales, estos son distintos tipos de fibra de carbono y se comparan más en detalle sus principales características para saber cuál es el más adecuado.

A partir de las características observadas en la *Tabla 11* y volviendo a analizar estos materiales en cada etapa, el material más equilibrado es el *PEEK/IM carbon fiber, UD prepreg, UD lay-up*. Por lo que este es el seleccionado para la llanta de este vehículo deportivo.

Cada uno de estos materiales destacaba en alguna de las etapas de la selección, pero el que mejores propiedades reunía en general era la fibra de carbono con matriz PEEK. Este material tiene un precio intermedio, al igual que su módulo elástico. Pero presenta la densidad más baja, lo cual es de vital importancia para esta aplicación, al igual que un límite elástico bastante alto, estando la media del rango de valores de este límite elástico por encima de los otros materiales.

El material seleccionado consta de entre un 65-70% de fibra de carbono y un 30-35% de polímero, en concreto este polímero es una matriz de poliéter éter cetona o polyetheretherketone (PEEK). Este material es laminado a 0° y presenta estas propiedades al ser curado en autoclave a 380°C y 4 bares de presión. Suele emplearse en componentes aeroespaciales, depósitos a presión y componentes de automoción. Todas estas características lo hacen un material óptimo para aplicarlo en una llanta.

Tabla 11. Características materiales finales. [30]

Nombre	Densidad (kg/m ³)	Módulo elástico (GPa)	Límite elástico (MPa)	Resistencia a fractura (MPa·m ^{1/2})	Precio (€/kg)
Cyanate ester/HM					
carbon fiber					
UD prepreg	1,62·10 ³ -1,67·10 ³	299-376	1,89·10 ³ -2,53·10 ³	48,3-59	196-219
UD lay-up					
Epoxy/HS carbon fiber					
UD prepreg	1,55·10 ³ -1,58·10 ³	129-154	1,74·10 ³ -2,17·10 ³	60,2-73,5	34,9-38,8
UD lay-up					
PEEK/IM carbon fiber					
UD prepreg	1,55·10 ³ -1,57·10 ³	146-149	2,41·10 ³ -2,43·10 ³	68-83,2	98,2-111
UD lay-up					

A parte de estas características, cabe destacar que todos presentan unas temperaturas de servicio mínimas de alrededor a -50°C y máximas de al menos 150°C, pudiendo emplearse todos para la aplicación en una llanta. Al ser todos laminados prepreg su producibilidad no supone un problema, ya que, como se ha visto en apartados anteriores, el método de fabricación de llantas con fibra de carbono emplea laminados prepreg.

3.5 Simulación inicial material seleccionado

En este apartado detallan los pasos seguidos para realizar la simulación inicial con el material seleccionado, fibra de carbono. Cabe destacar que, para realizar la simulación asistida por ordenador con este tipo de material, se introduce la geometría como una superficie. Esta peculiaridad se debe a que el software de cálculo realiza un laminado sobre la superficie seleccionada, aplicando las distintas capas del material y obteniendo así cierto espesor.

3.5.1 Aspectos generales de la simulación

A continuación, se detallan las principales funciones del programa de simulación computacional por el método de elementos finitos, Ansys Workbench.

En la *Ilustración 34* se pueden observar todos los pasos seguidos para realizar la simulación de una llanta en fibra de carbono.

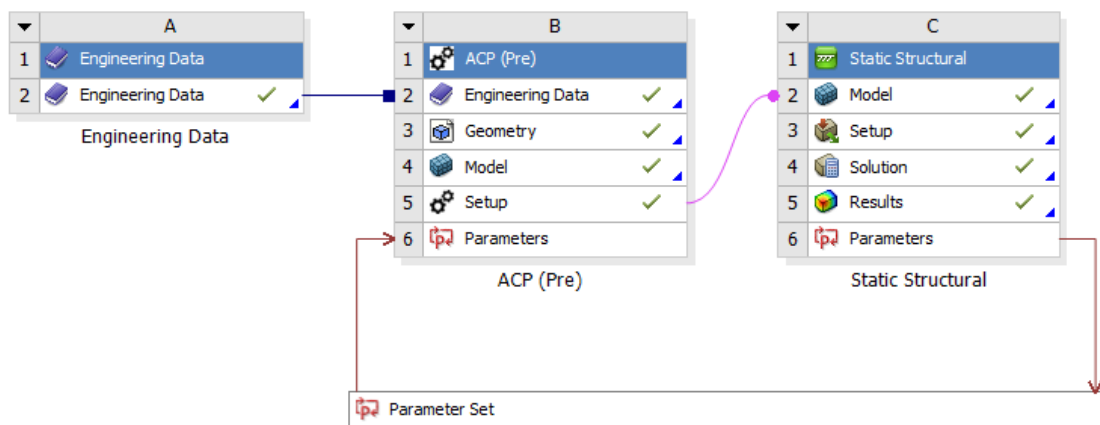


Ilustración 34. Esquema general simulación. [28]

El primer bloque representa la librería de materiales empleados. Esta base de datos contiene bastantes materiales, pero para este caso se empleará la compatibilidad del programa de simulación con el programa empleado para la selección de materiales, pudiendo así emplear el material obtenido tras la selección.

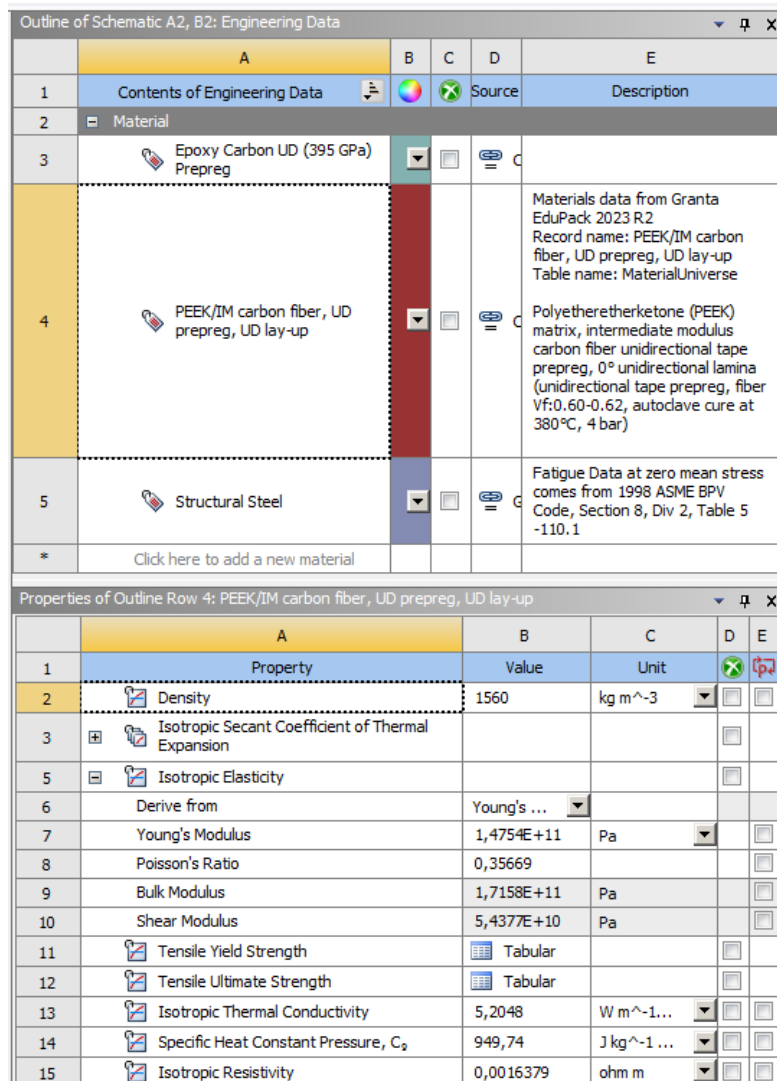
El segundo bloque representa el preproceso, estos son todos los pasos previos a la solución de las ecuaciones algebraico-diferenciales, como puede ser la definición de la malla o de los laminados.

El tercer bloque representa el proceso y postproceso, donde se definen las condiciones de contorno, aunque esto también podría hacerse en el preproceso, se realizan los cálculos de las ecuaciones

algebraico-diferenciales y se obtienen los distintos resultados como desplazamientos o factor de seguridad.

Además, se saca un bloque extra de parámetros, donde se puede acceder rápidamente a los parámetros seleccionados para realizar iteraciones de manera más rápida. Esto se empleará a la hora de variar el tamaño de malla y observar la convergencia de los resultados.

A partir del material obtenido en la selección de materiales mediante el software Ansys Granta EduPack, se exporta de este programa y se importa en la librería de materiales de Ansys Workbench. Este material es el *PEEK/IM carbon fiber, UD prepreg, UD lay-up* y se puede observar en la *Ilustración 35*, junto con sus principales datos como densidad o módulo de Young.



The image shows two screenshots from the Ansys Workbench material library. The top screenshot displays the 'Outline of Schematic A2, B2: Engineering Data' table, and the bottom screenshot displays the 'Properties of Outline Row 4: PEEK/IM carbon fiber, UD prepreg, UD lay-up' table.

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Epoxy Carbon UD (395 GPa) Prepreg				
4	PEEK/IM carbon fiber, UD prepreg, UD lay-up				Materials data from Granta EduPack 2023 R2 Record name: PEEK/IM carbon fiber, UD prepreg, UD lay-up Table name: MaterialUniverse
5	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1
*	Click here to add a new material				

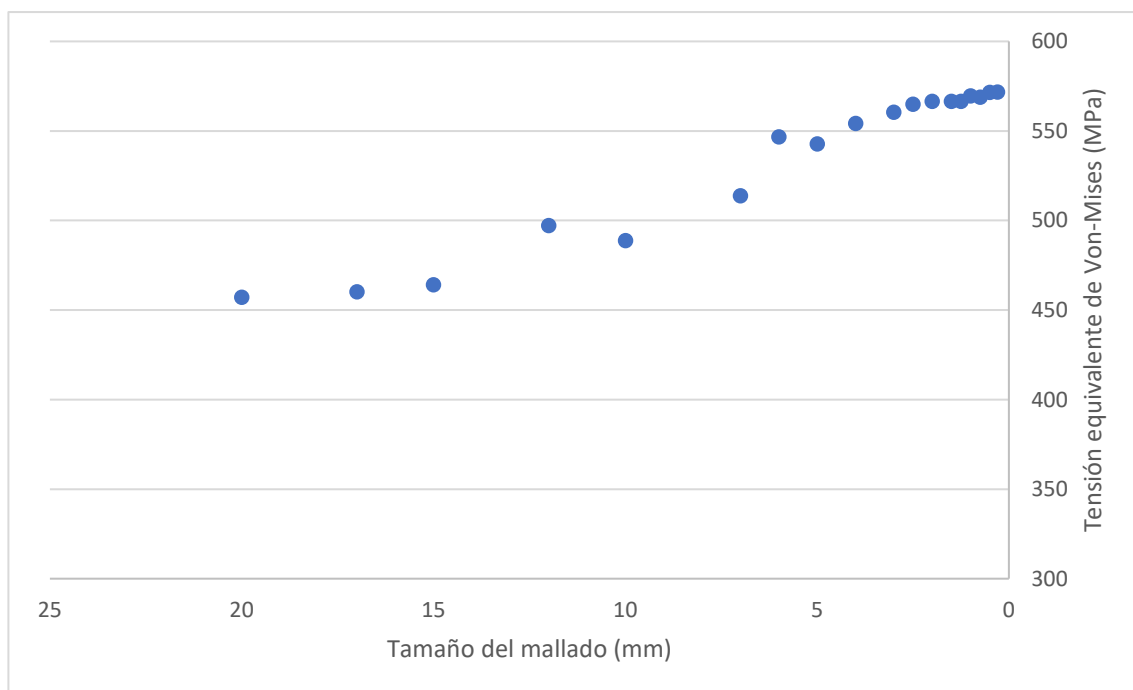
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	1560	kg m ⁻³		
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
5	Isotropic Elasticity				
6	Derive from	Young's ...			
7	Young's Modulus	1,4754E+11	Pa		
8	Poisson's Ratio	0,35669			
9	Bulk Modulus	1,7158E+11	Pa		
10	Shear Modulus	5,4377E+10	Pa		
11	Tensile Yield Strength	Tabular			
12	Tensile Ultimate Strength	Tabular			
13	Isotropic Thermal Conductivity	5,2048	W m ⁻¹ ...		
14	Specific Heat Constant Pressure, C _p	949,74	J kg ⁻¹ ...		
15	Isotropic Resistivity	0,0016379	ohm m		

Ilustración 35. Librería de materiales Ansys. [28]

A partir de las cargas en la llanta delantera en la situación de frenada se realiza un análisis de sensibilidad del tamaño de la malla. Como se observa en la *Gráfica 5*, se compara el tamaño de malla con el resultado de máxima tensión obtenida.

Los resultados para tamaños de malla grandes son muy poco precisos, pero a medida que se disminuye el tamaño de la malla, los resultados empiezan a converger. En este análisis, el error al emplear un tamaño de malla de 2mm en comparación al más pequeño simulado, de 0,3mm, es de un 0,89%. Este error es asumible, ya que emplear un mallado de 2mm ofrecerá valores coherentes y ahorrará significativamente tiempo de cálculo.

Gráfica 5. Análisis de sensibilidad



Cada vez que se introduce un nuevo diseño o se realizan cambios en la geometría, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad. Estos análisis son cruciales ya que permiten evaluar cómo afectan las variaciones en los parámetros de la malla en el resultado de la simulación. En particular, los análisis de sensibilidad ayudan a determinar si las ecuaciones diferenciales resueltas por el software de simulación convergen en un resultado estable y preciso. Ayudando así a saber si el resultado obtenido tiene coherencia respecto a los resultados de su convergencia.

Para el mallado, el orden de los elementos es controlado por ordenador, así como la disposición de la malla, permitiendo al programa que lo adapte de la mejor manera para ahorrar coste computacional a la hora de realizar la simulación. En el mallado de 2mm, para la geometría inicial de la llanta delantera, se emplean 151.209 nodos y 150.661 elementos, pudiendo observarse esta malla en la *Ilustración 36*. Aunque en esta ilustración no se aprecie con claridad debido al tamaño tan pequeño de

mallado, los elementos disminuyen su tamaño por debajo de 2mm en zonas críticas como las aristas de la cara de la llanta. Esta disminución del tamaño de malla se realiza automáticamente por el software de simulación, en zonas críticas, obteniendo valores más precisos en esas zonas y ahorrando tiempo computacional en zonas menos críticas.

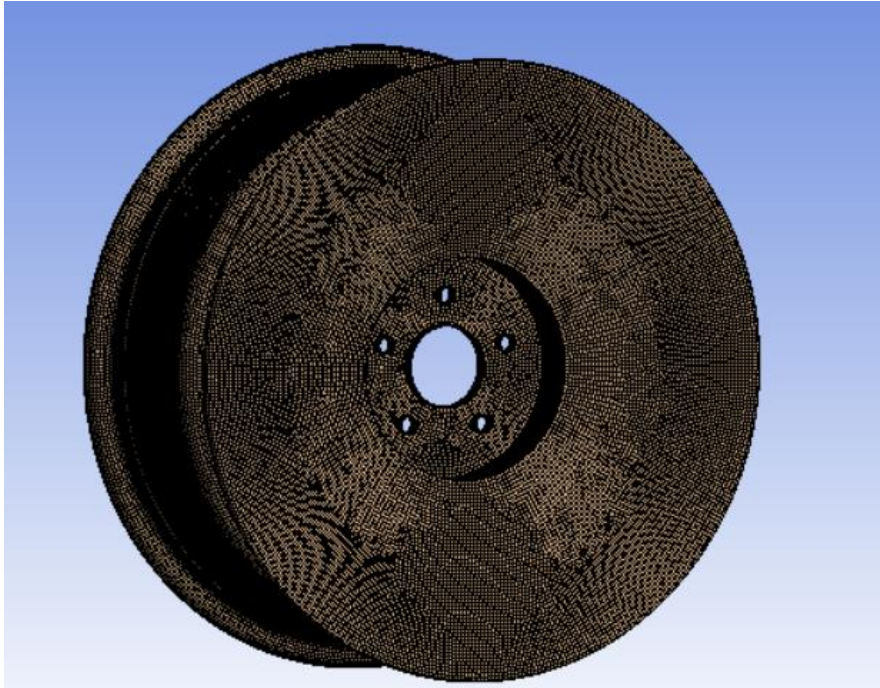


Ilustración 36. Malla 2mm llanta delantera. [28]

Como se puede ver en la *Ilustración 37* y la *Ilustración 38*, se les da nombre a las principales zonas de la llanta, ya que esto ahorrará tiempo en futuras operaciones. Estas selecciones se usan a la hora de laminar, ya que los laminados de la cara y el cuerpo de la llanta son distintos.

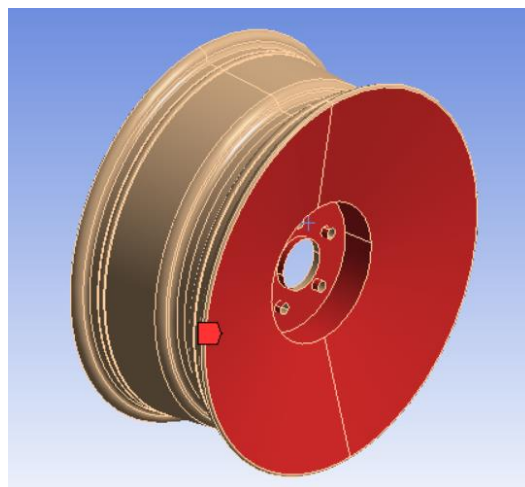


Ilustración 37. Selección cara de la llanta. [28]

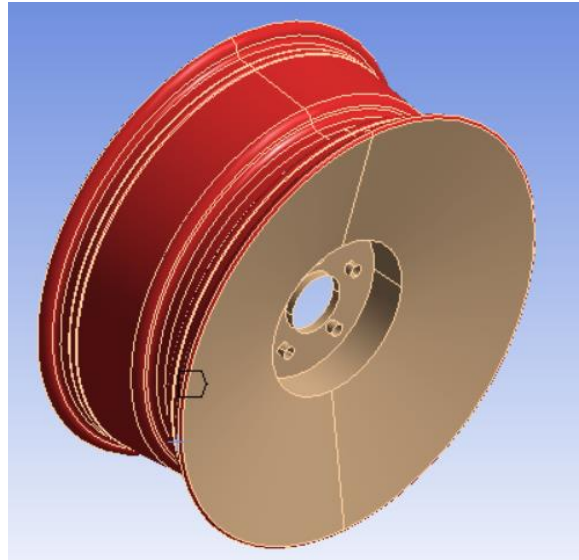


Ilustración 38. Selección cuerpo de la llanta. [28]

Para cada lamina individual se emplea el material seleccionado anteriormente, además se le da un espesor a cada capa de 0,2mm que es lo habitual en este tipo de láminas.

A la hora de realizar el laminado de estas capas de fibra de carbono, se busca una mayor isotropía en sus propiedades. Es decir, que se comporte de igual manera en todas sus direcciones, resistiendo posibles cargas sin importar la dirección de estas. Esta isotropía es necesaria en el laminado de la llanta, ya que las cargas provienen de múltiples direcciones.

La manera en la que están colocadas las fibras influye mucho en el nivel de isotropía que presenta el laminado final. El ángulo de estas debe ir alternándose entre 0°, 45°, -45° y 90° principalmente, para obtener mejores propiedades en cuanto a su isotropía. La variación de la isotropía respecto a estos ángulos de laminados puede observarse en la *Ilustración 39*.

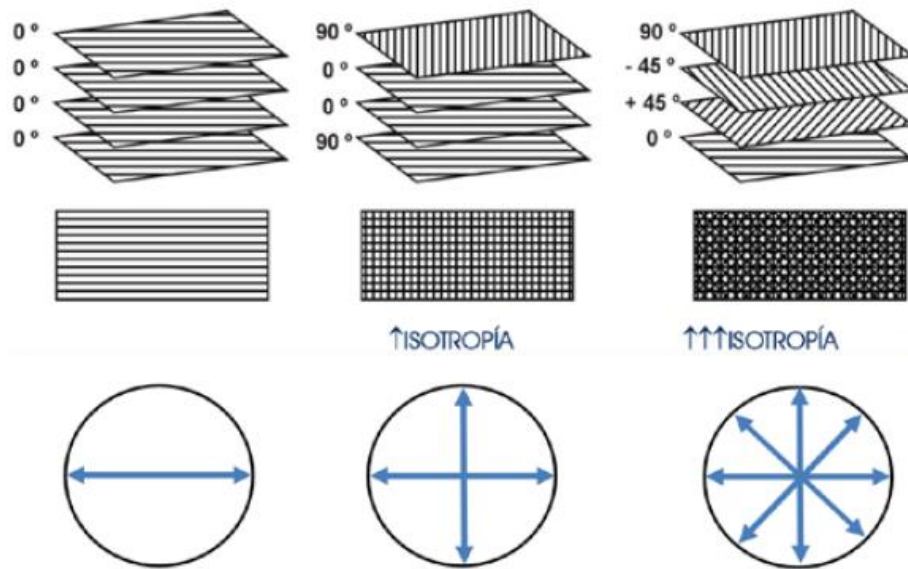


Ilustración 39. Isotropía en laminados. [32]

A partir del estudio del punto quasi isotrópico realizado por Rafael Antonio Balart, de la Universidad Politécnica de Valencia, se seleccionan los mejores laminados para el cuerpo y la cara de la llanta.

En la *Ilustración 40* se puede observar el laminado empleado para el cuerpo de la llanta. Si desglosamos este laminado, obtenemos la siguiente disposición:

[+45/-45/+45/-45/+45/-45/0/90/0/90/0/90/90/0/90/0/90/0/-45/+45/-45/+45/-45/+45]

Con un total de 24 capas, el número total (y porcentaje) de capas para cada uno de los ángulos es:

Capas orientadas a 0°: 6 [25%]

Capas orientadas a ±45°: 12 [50%]

Capas orientadas a 90°: 6 [25%]

Este laminado se realiza de manera simétrica, además se distribuyen los ángulos de manera homogénea para obtener propiedades quasi isotrópicas.

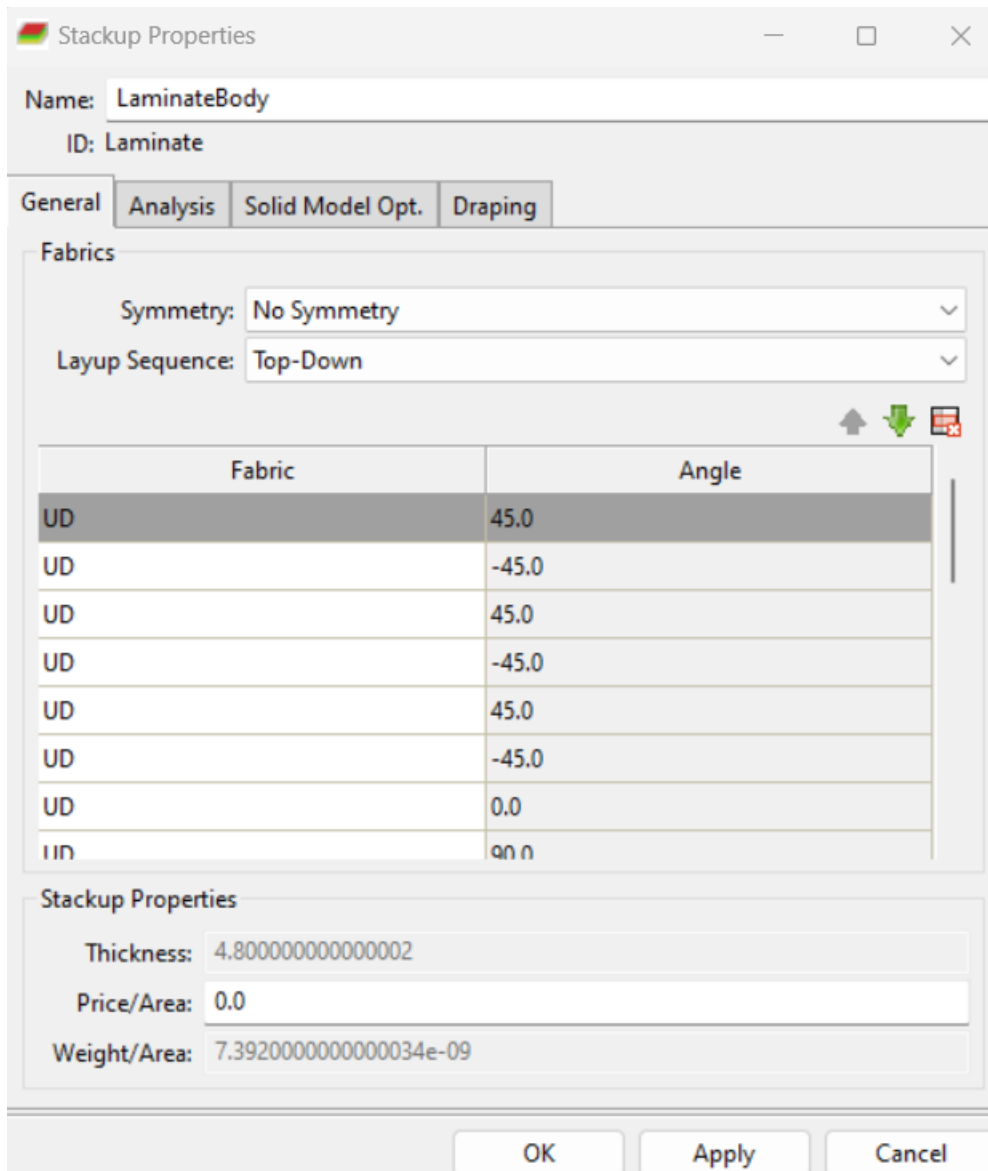


Ilustración 40. Secuencia de laminado. [28]

Para el laminado de la cara de la llanta se emplea la siguiente disposición:

[0/+45/0/-45/90/-45/+45/90/90/+45/-45/90/-45/0/+45/0]

Como se puede apreciar en el desglose del laminado:

Nº capas orientadas a 0º: 4 [25%]

Nº capas orientadas a ±45º: 8 [50%]

Nº capas orientadas a 90º: 4 [25%]

Al igual que para el laminado del cuerpo de la llanta, se reparten de igual manera el número de capas para cada ángulo. Esto se realiza para aumentar la isotropía en el laminado.

Para el laminado de la cara de la llanta se emplea una roseta paralela, en esta roseta la flecha azul indica hacia dónde va a crecer el laminado y la roja la orientación principal de las fibras, pudiendo observarse en la *Ilustración 41*. En este caso el laminado va a crecer hacia dentro, ya que la cara que se quiere conservar es la exterior.

En el cuerpo de la llanta, al igual que las zonas del buje y pernos se emplean rosetas cilíndricas, ya que se adapta mejor a la geometría de estas zonas.

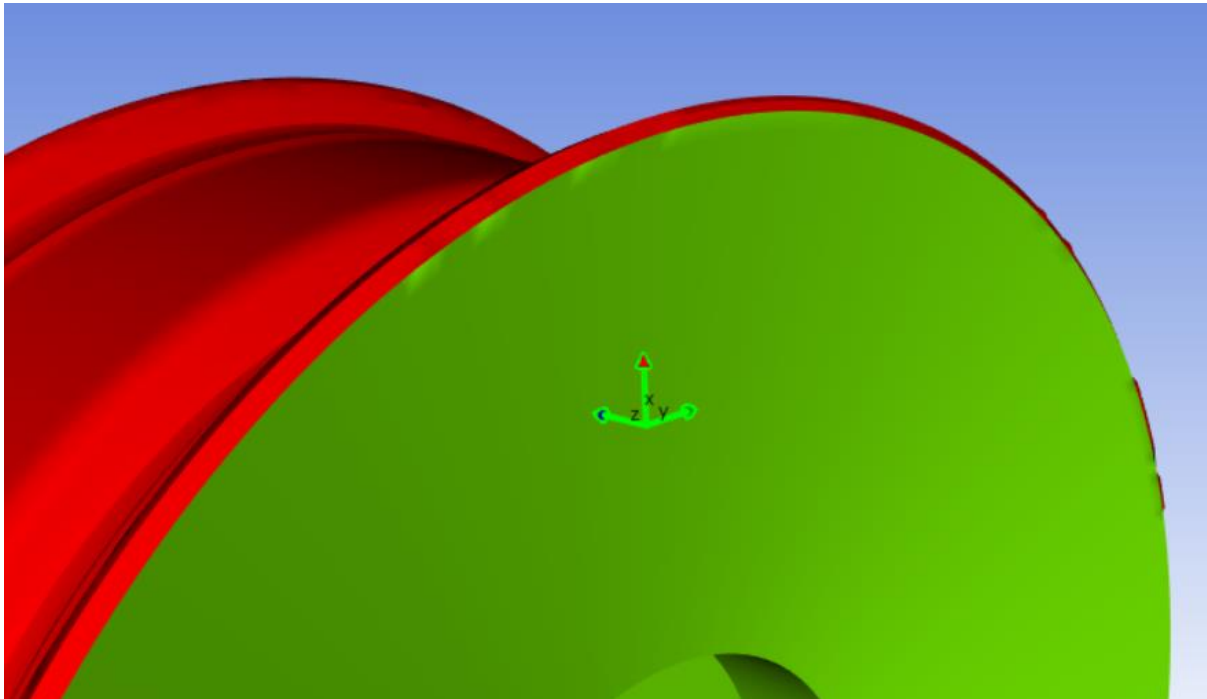


Ilustración 41. Roseta. [28]

3.5.2 Resultados situaciones de carga

A continuación, se detallan los resultados de las distintas situaciones presentes en la llanta delantera y la llanta trasera.

Situación de frenada llanta delantera

Las cargas aplicadas en la situación de frenada para la llanta delantera son las debidas a la presión de inflado, la fuerza vertical y la fuerza longitudinal. Los valores de estas, así como la manera en la que están aplicadas, pueden observarse en la *Ilustración 42*. Además, se pueden observar las zonas con movimientos restringidos, resaltadas en color azul en la ilustración.

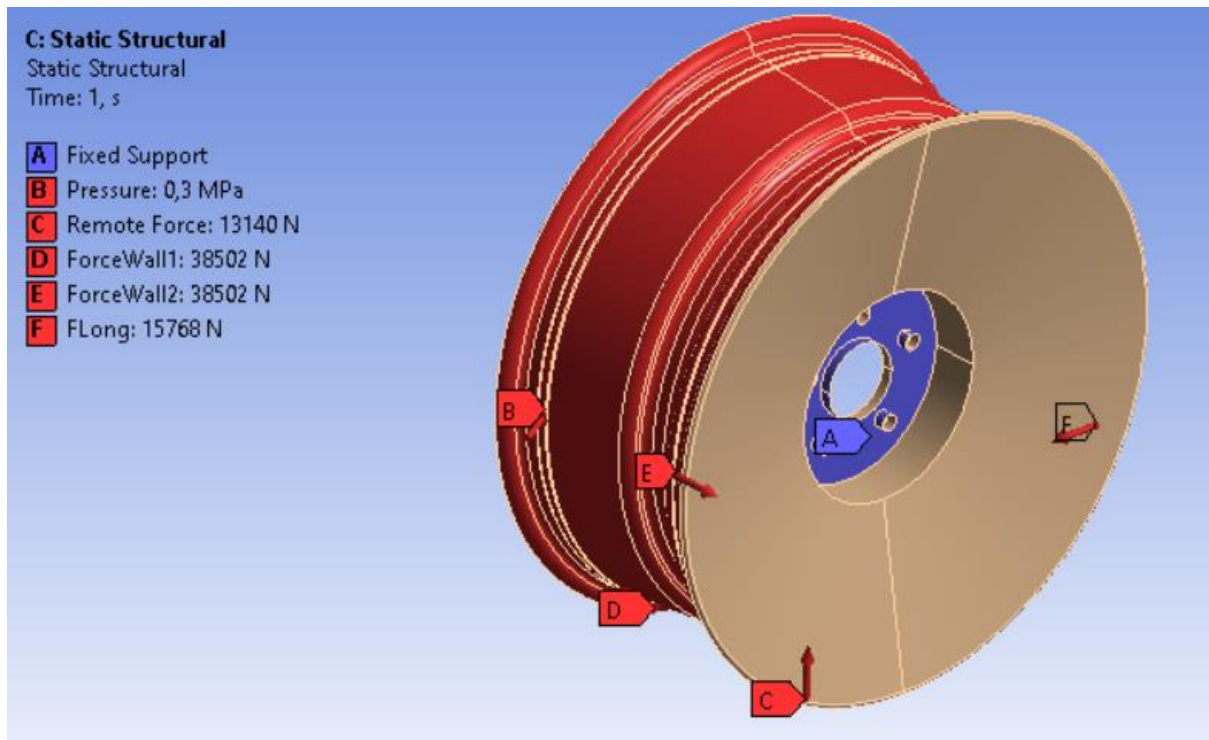


Ilustración 42. Condiciones de contorno frenada. [28]

La deformación máxima obtenida en esta situación es de 7,9mm, el cual es bastante elevada y se da en el extremo libre del cuerpo de la llanta, como se observa en la *Ilustración 43*. Por lo general, la deformación en el resto de las zonas de la llanta es de 3mm, lo que resulta algo más aceptable.

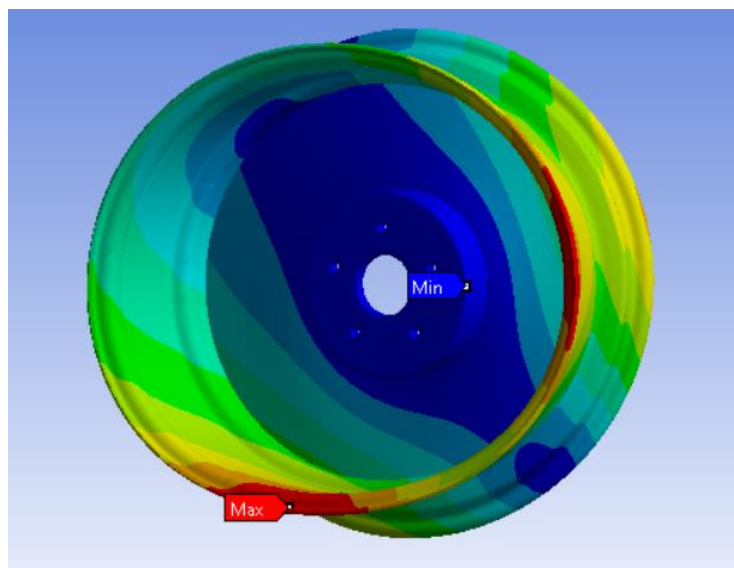


Ilustración 43. Deformación frenada. [28]

La tensión máxima obtenida en la situación de frenada para la llanta delantera es de 567MPa. La tensión obtenida es mayor que en la simulación inicial con un material elástico y lineal, ya que la geometría ahora se introduce como una superficie y el componente se realiza mediante un laminado, variando en gran medida los resultados obtenidos. Como se puede observar en la *Ilustración 44*, la zona de tensión máxima se produce en la zona de color rojo, esto es debido al concentrador de tensiones generado por el ángulo tan elevado entre la cara interior de la llanta y el resto de la cara de la llanta.

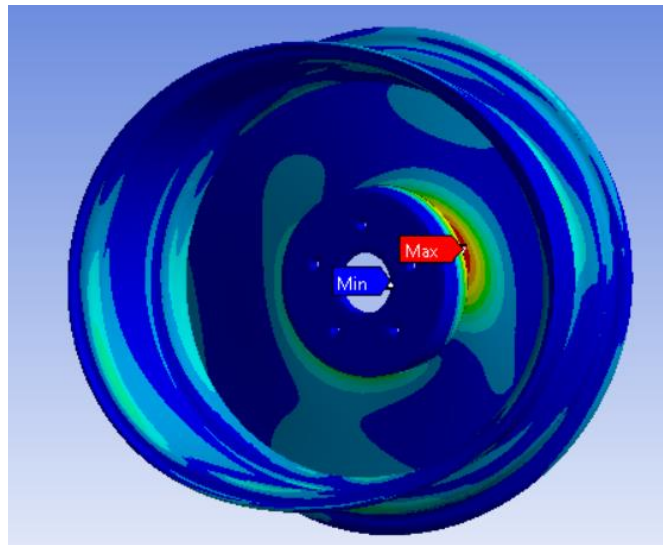


Ilustración 44. Tensión equivalente de von-Mises frenada. [28]

Para este primer diseño, el factor de seguridad obtenido es de 0,37 por lo que este diseño no resiste las cargas. La zona de fallo se da en la zona resaltada en color rojo en la *Ilustración 45*, es decir, el concentrador de tensiones explicado anteriormente.

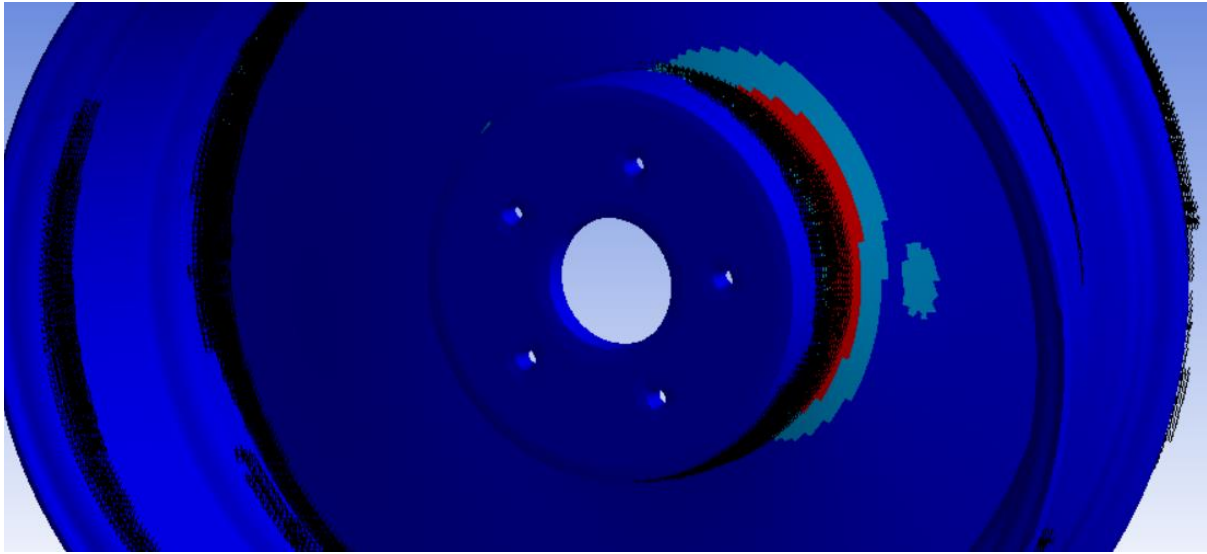


Ilustración 45. Factor de seguridad frenada. [28]

Situación de paso por curva llanta delantera

Como se observa en la *Ilustración 46*, para la situación de paso por curva en la llanta delantera, se aplican las cargas debidas a la presión, carga vertical y fuerza lateral. En esta ilustración pueden observarse los valores de estas cargas, así como la forma en la que están aplicadas.

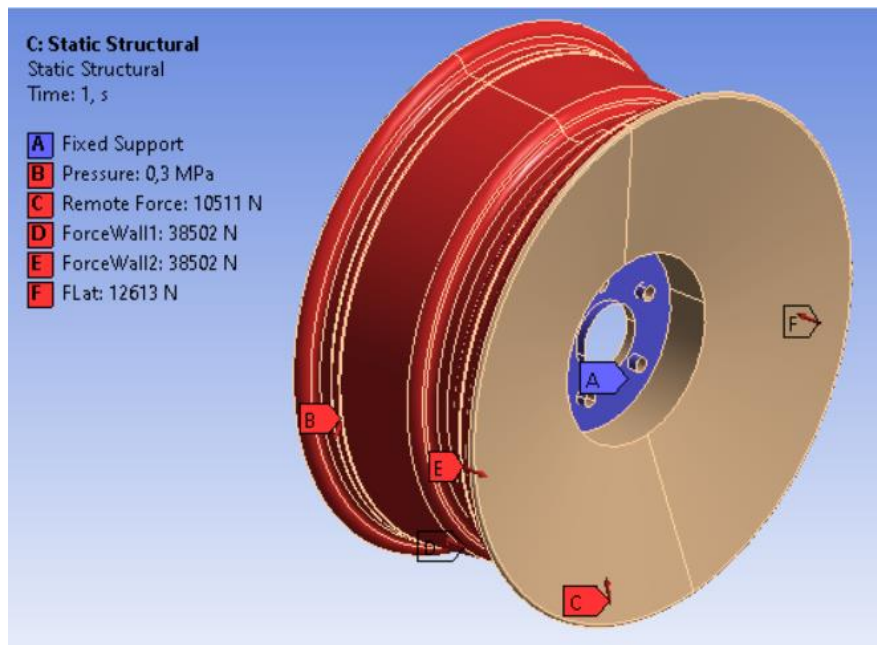


Ilustración 46. Condiciones de contorno paso por curva. [28]

La deformación máxima obtenida en la llanta delantera para la situación de paso por curva es de 6,6mm, obtenida en el extremo libre del cuerpo de la llanta. Las deformaciones pueden observarse en la *Ilustración 47*, siendo estas deformaciones menores que en el caso de frenada.

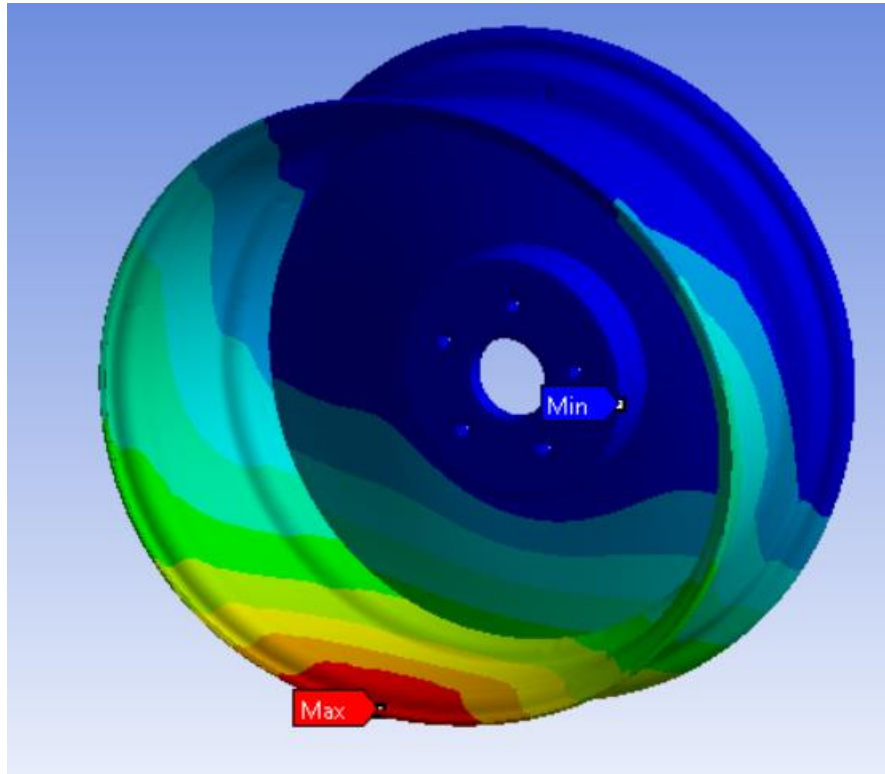


Ilustración 47. Deformación paso por curva. [28]

La tensión máxima obtenida en esta situación de paso por curva es de 466,8MPa, siendo este valor menor que en el caso de frenada para la llanta delantera. Como se puede observar en la *Ilustración 48* resaltado en color rojo, al igual que antes, la tensión máxima se da en el concentrador de tensiones de las caras internas de la llanta.

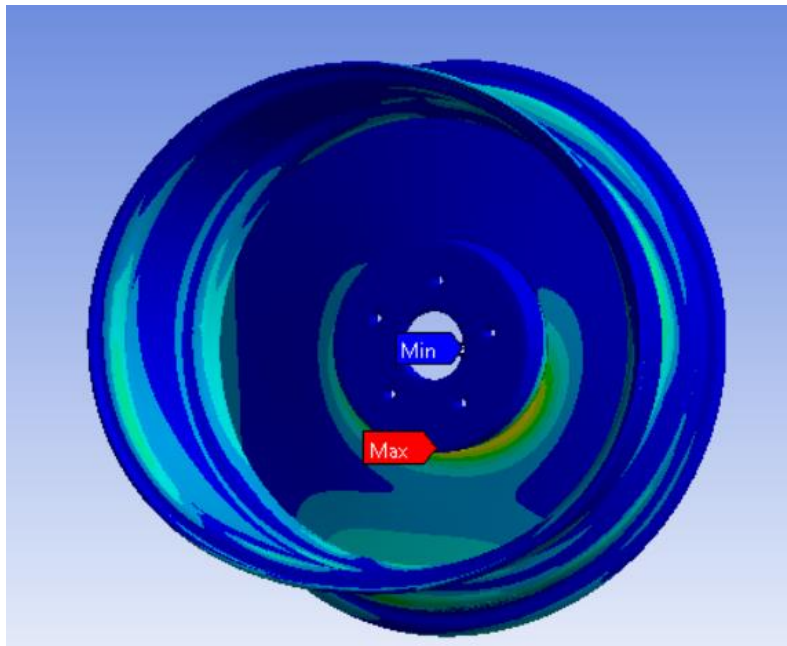


Ilustración 48. Tensión equivalente de von-Mises paso por curva. [28]

El factor de seguridad mínimo obtenido en la situación de paso por curva es de 0,38 por lo que el diseño inicial para la llanta delantera no aguanta las cargas de paso por curva. Este mínimo se puede observar en color rojo en la *Ilustración 49*, al igual que antes ocurre en el concentrador de tensiones de la cara de la llanta.

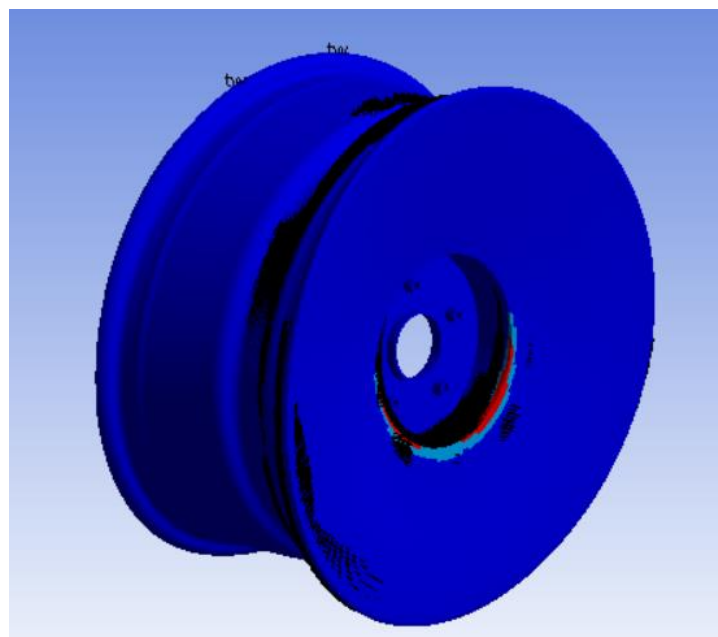


Ilustración 49. Factor de seguridad paso por curva. [28]

A través de las simulaciones iniciales para la llanta delantera, se puede observar la gran influencia del concentrador de tensiones por el ángulo existente en la cara de la llanta. A la hora de realizar el diseño final, este concentrador de tensiones debe eliminarse mediante un redondeo o un chaflán de las aristas que presenta.

Situación de velocidad máxima llanta trasera

Para la situación de máxima velocidad en la llanta trasera, las cargas aplicadas son las debidas a la presión de inflado y la carga vertical únicamente. Los valores de estas cargas, así como las restricciones de movimiento, se observan en la *Ilustración 50*.

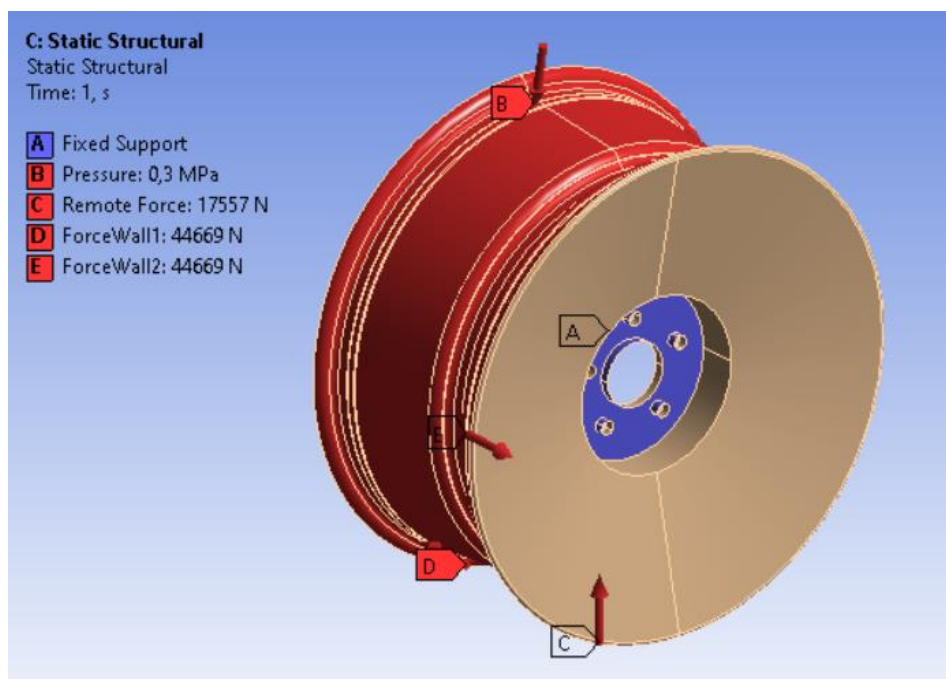


Ilustración 50. Condiciones de contorno velocidad máxima. [28]

La tensión máxima obtenida en la llanta trasera en la situación de velocidad máxima es de 539MPa y se da en la zona del concentrador de tensiones, como ya ocurría con la llanta delantera. Este valor de tensión es el más elevado para los casos de carga en la llanta trasera. En la *Ilustración 51* puede observarse claramente como se distribuyen las tensiones en la cara de la llanta, siendo mayores en las zonas más alejadas del centro de la llanta y en el concentrador de tensiones. Esto se tendrá en cuenta para el diseño final, priorizando las zonas más externas de la cara de la llanta y eliminando el concentrador de tensiones.

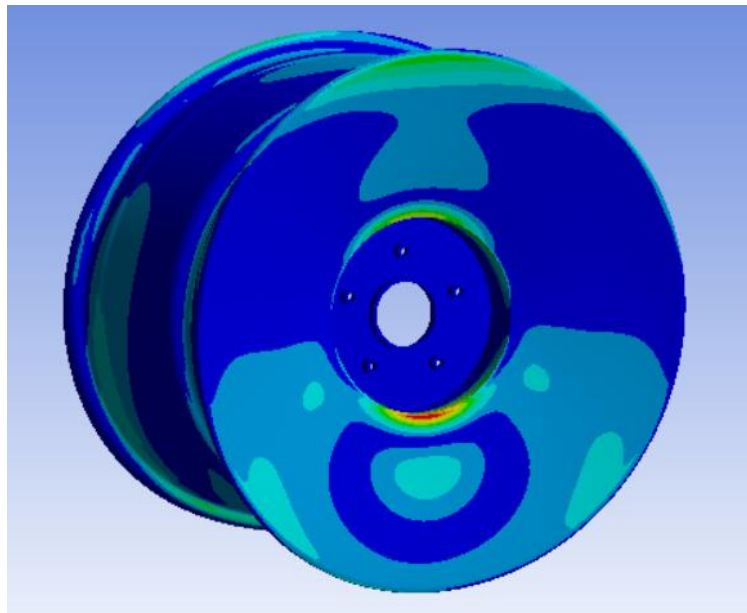


Ilustración 51. Tensión equivalente de von-Mises velocidad máxima. [28]

La deformación máxima en la situación de velocidad máxima se produce en el extremo libre del cuerpo de la llanta, deformándose 10,5mm. Esto se observa en color rojo en la *Ilustración 52*, donde se puede observar que las mayores deformaciones se producen en el cuerpo de la llanta, debiendo tenerlo en cuenta para reforzar el laminado de esta zona. Al igual que ocurría con la tensión, este valor de deformación es el más elevado en las deformaciones iniciales de la llanta trasera.

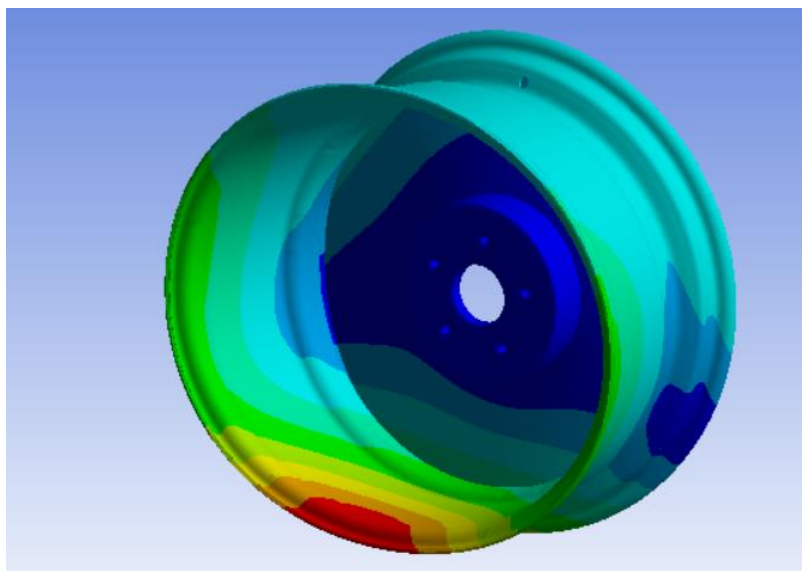


Ilustración 52. Deformación velocidad máxima. [28]

El factor de seguridad mínimo obtenido en la situación de velocidad máxima es de 0,31 y se da en la zona del concentrador de tensiones, observándose en color rojo en la *Ilustración 53*. Debido a este valor, la llanta trasera inicial no aguanta las cargas de velocidad máxima.

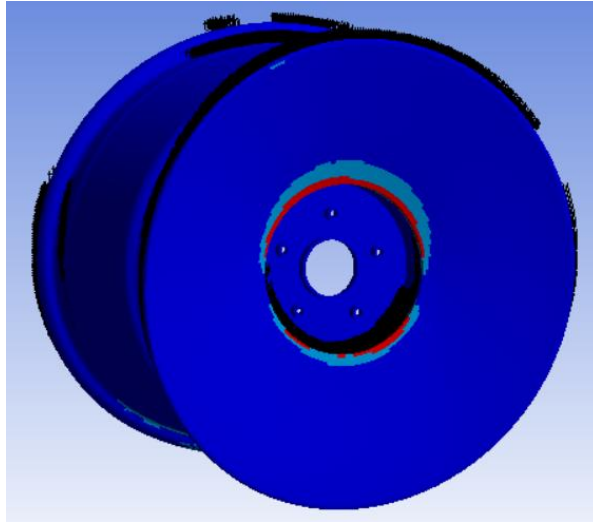


Ilustración 53. Factor de seguridad velocidad máxima. [28]

Situación de frenada llanta trasera

Para el caso de situación de frenada en la llanta trasera, se aplican las cargas de presión de inflado, carga vertical y fuerzas longitudinales. Estas cargas, así como las restricciones de movimiento, se pueden observar en la *Ilustración 54*.

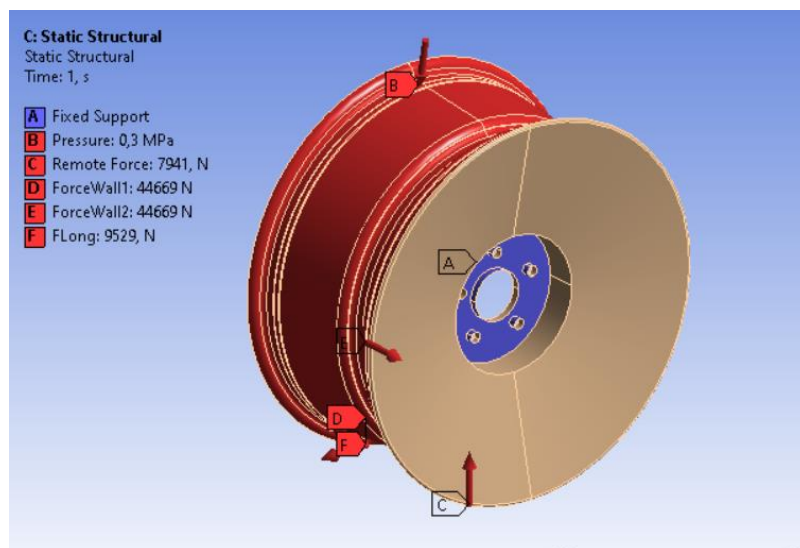


Ilustración 54. Condiciones de contorno frenada. [28]

La tensión máxima obtenida en la situación de frenada es de 384MPa, siendo notablemente inferior que en el caso de velocidad máxima. Este máximo se produce en el concentrador de tensiones de las caras internas, observándose en color rojo en la *Ilustración 55*, se produce en una zona más elevada de la llanta debido a las fuerzas longitudinales producidas.

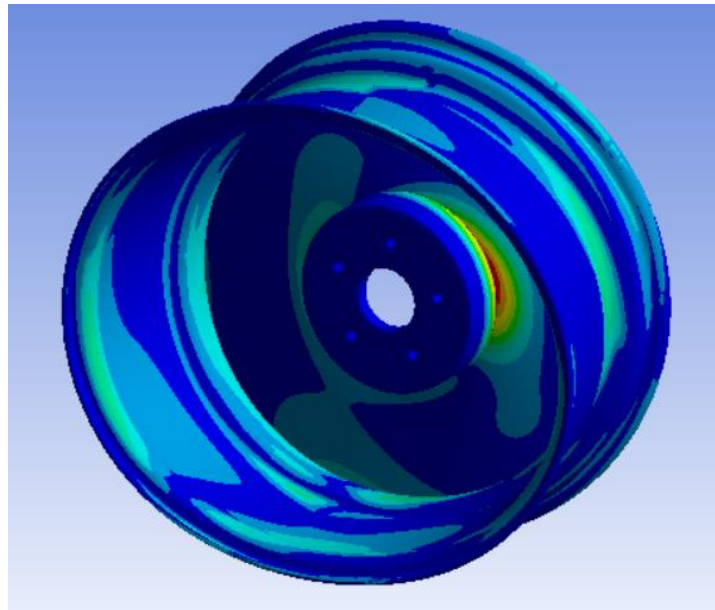


Ilustración 55. Tensión equivalente de von-Mises frenada. [28]

La deformación máxima se obtiene en el extremo libre del cuerpo de la llanta y tiene un valor de 5,5mm. En la *Ilustración 56* puede observarse esta zona en color rojo, siendo la situada más abajo en la ilustración. En general, los mayores desplazamientos se producen en el cuerpo de la llanta, en las zonas más alejadas de la cara de la llanta, ya que no cuentan con el apoyo de la esta. Para solventar este problema, se deberá reforzar el laminado del cuerpo de la llanta.

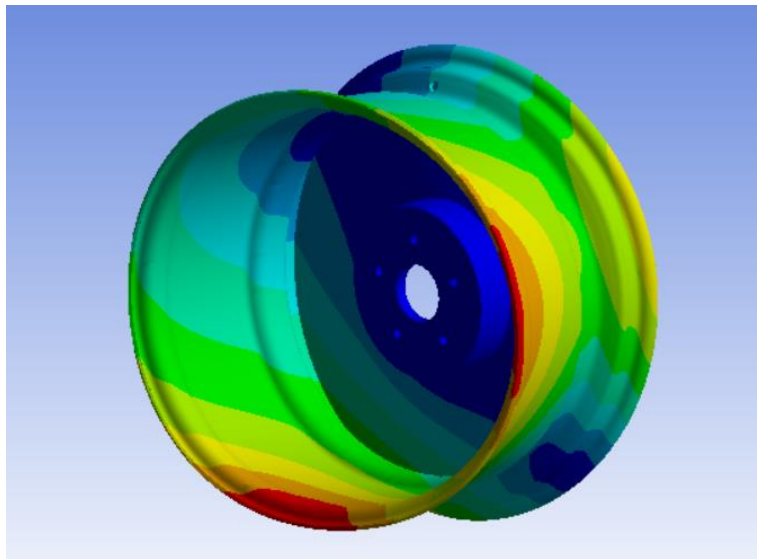


Ilustración 56. Deformación frenada. [28]

El factor de seguridad mínimo obtenido para la situación de frenada en la llanta trasera es de 0,56 y se produce la zona de concentración de tensiones. Por lo que la llanta trasera tampoco aguanta la situación de frenada. Esta zona se observa en color amarillo en la *Ilustración 57*.

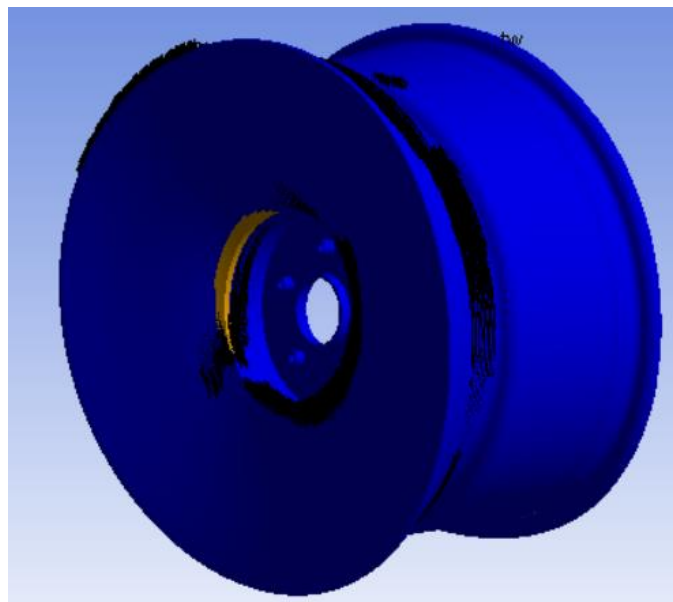


Ilustración 57. Factor de seguridad frenada. [28]

Situación de paso por curva llanta trasera

Se introducen las distintas cargas para el caso de paso por curva en la llanta trasera, estas son las debidas a la presión, la carga vertical y las fuerzas laterales. Así como las zonas con restricciones de movimiento. Estas condiciones de contorno se pueden apreciar en la *Ilustración 58*.

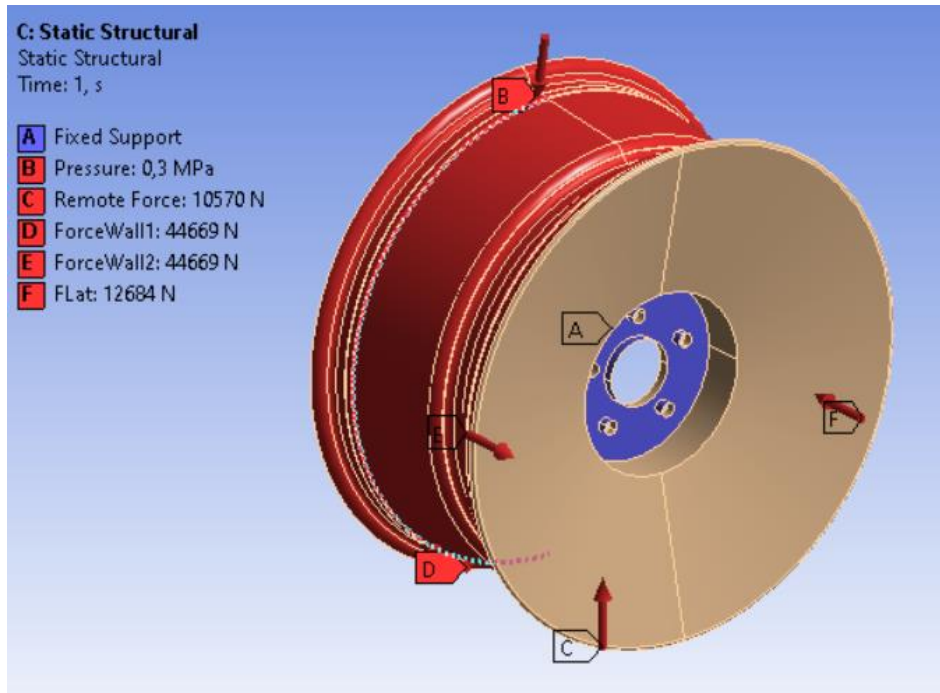


Ilustración 58. Condiciones de contorno paso por curva. [28]

La tensión máxima obtenida en el paso por curva en la llanta trasera es de 494MPa y se produce en la zona del concentrador de tensiones de las superficies de la cara de la llanta. Esta zona se observa en color rojo en la *Ilustración 59*. En esta misma ilustración se puede observar claramente también como las mayores tensiones se dan en los bordes de la cara de la llanta y en el centro, en el concentrador de tensiones.

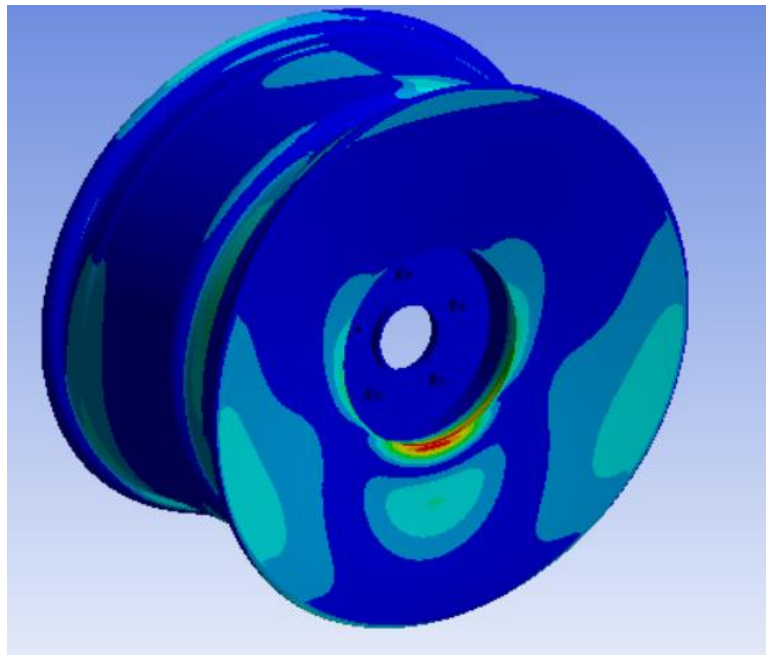


Ilustración 59. Tensión equivalente de von-Mises paso por curva. [28]

En la *Ilustración 60*, se puede observar que la deformación máxima se produce en el extremo libre del cuerpo de la llanta, resaltado en color rojo y con un valor de 7,2mm.

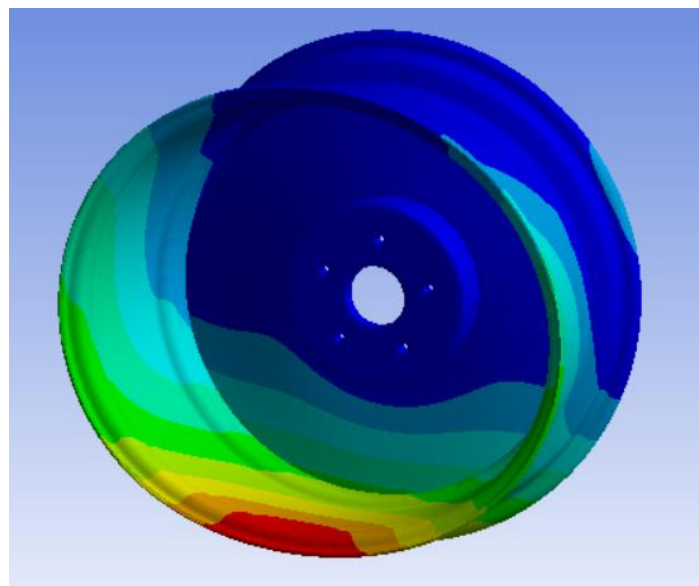


Ilustración 60. Deformación paso por curva. [28]

El factor de seguridad mínimo obtenido para la llanta trasera en la situación de paso por curva es de 0,34 y se da en la zona del concentrador de tensiones. Esta zona de factor de seguridad mínimo se

observa de color rojo en la *Ilustración 61*, sobre la arista de este concentrador de tensiones. Este diseño inicial no resiste las cargas de la situación del paso por curva, debiendo eliminar el concentrador de tensiones en el diseño final.

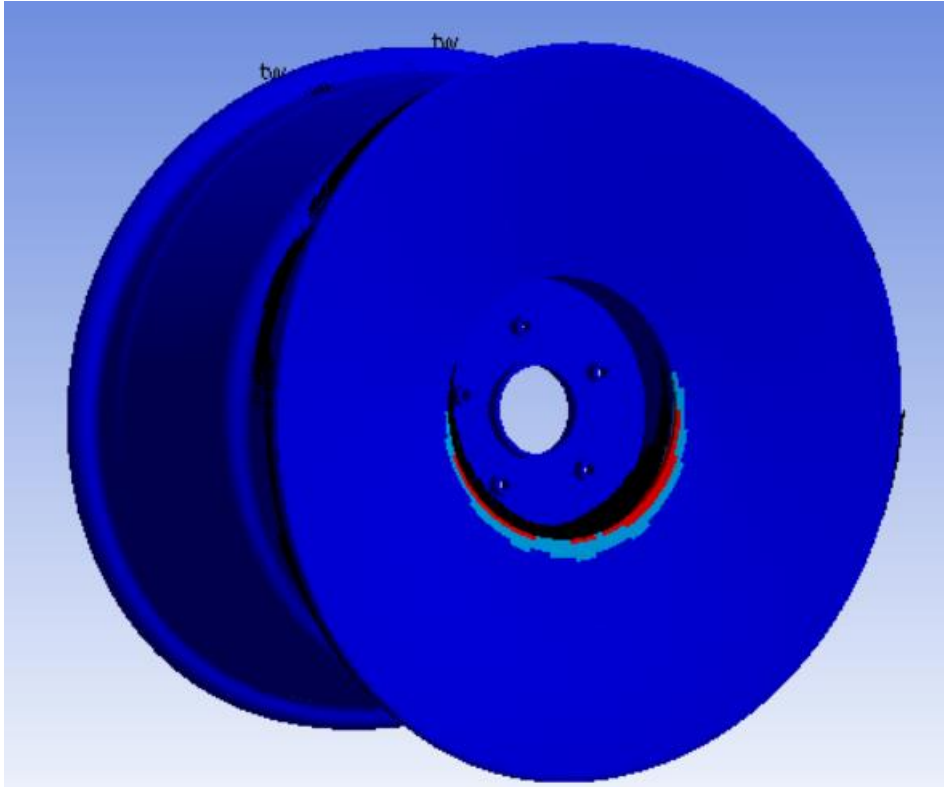


Ilustración 61. Factor de seguridad paso por curva. [28]

4 Resultados y discusión/Solución técnica.

4.1 Diseño final superficies

A partir de los resultados obtenidos en las simulaciones de los distintos casos de cargas para ambas llantas, se inicia el diseño final. Para este diseño se tienen en cuenta las zonas donde se producen mayores tensiones y deformaciones, buscando reducir los concentradores de tensiones.

El resultado del diseño final se obtiene tras múltiples diseños con sus respectivas simulaciones de cargas, buscando reducir al máximo el peso empleado y manteniendo la resistencia de estas llantas.

Lo primero que se realiza para el diseño final de la llanta, es eliminar el ángulo tan pronunciado que había entre las superficies de la cara de la llanta. La solución aplicada es un redondeo de la arista que había en esta zona, observándose en resultado en la *Ilustración 62*. Al redondear esta arista, se van a disminuir las tensiones acumuladas en esa zona, haciendo que la llanta aguante cargas mayores y distribuyendo mejor estas cargas.

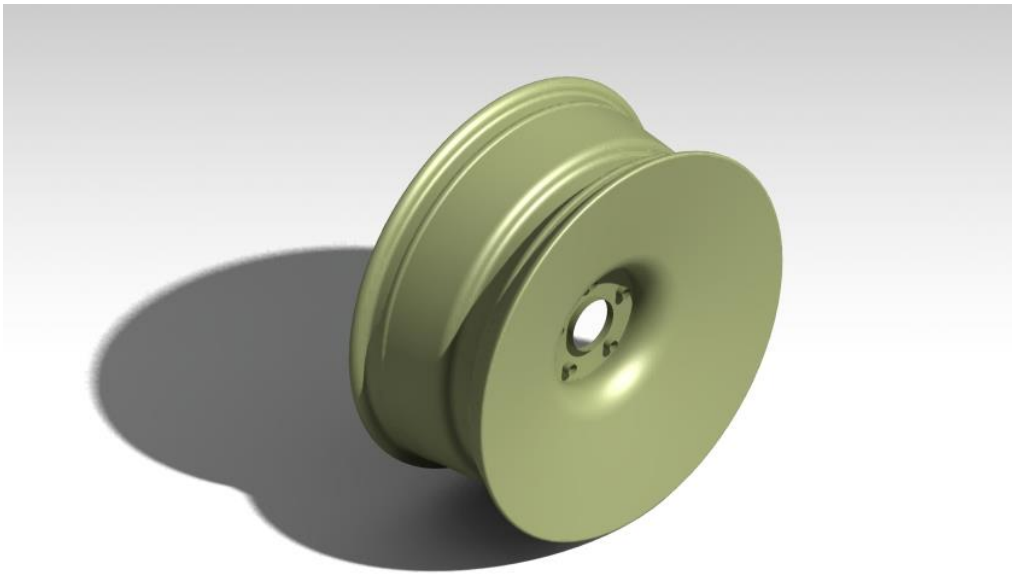


Ilustración 62. Redondeo arista concentrador de tensiones. [27]

Se añaden distintas secciones como se observa en la *Ilustración 63*, para después quitarlas de la cara de la llanta. Estas secciones de corte se añaden teniendo en cuenta los resultados de las simulaciones y buscando distribuir lo mejor posible las cargas sobre ellas.

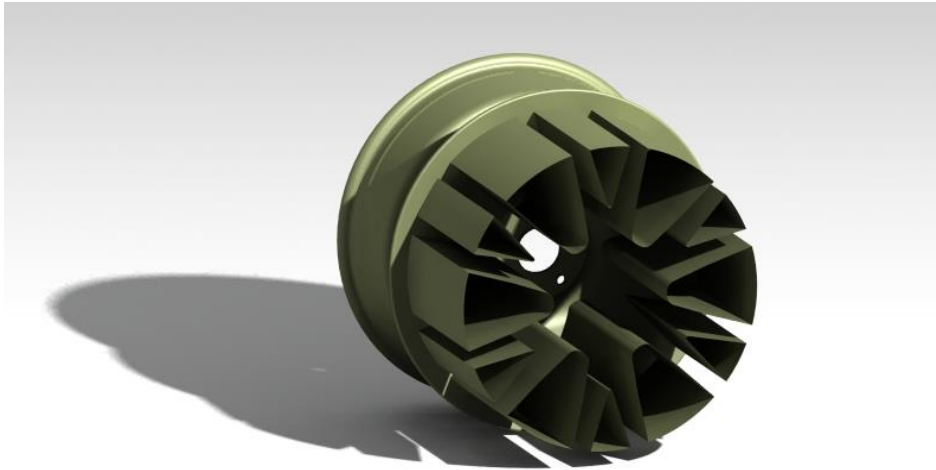


Ilustración 63. Secciones de corte. [27]

En la *Ilustración 64* se puede observar el diseño final de la llanta delantera, realizado mediante superficies.

En el resultado de tensiones se observaban zonas más críticas en el radio externo de la cara de la llanta. Por esta razón, el diseño consta de 6 radios principales, que luego se dividen en 2, abarcando así una mayor superficie y repartiendo mejor las cargas de las zonas externas con mayores tensiones.

Además, se redondean las principales aristas presentes en el diseño de estos radios, evitando así los concentradores de tensiones que generan.

Al estar fabricada con fibra de carbono, la llanta presenta limitaciones en cuanto a su geometría. Sin embargo, los resultados mecánicos obtenidos justifican plenamente estas restricciones.

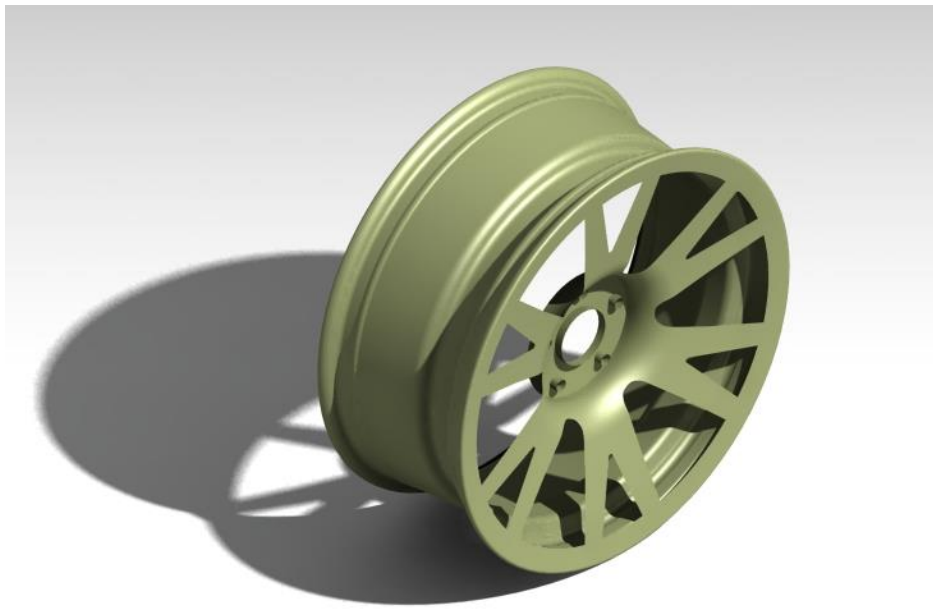


Ilustración 64. Superficie final llanta delantera. [27]

En el diseño de la cara de la llanta, se presta atención a dejar suficiente espacio para facilitar el acceso a la válvula de presión, como se observa en la *Ilustración 65*. Esto es fundamental para permitir el inflado y desinflado adecuado de los neumáticos, así como para la verificación y ajuste de la presión de aire, garantizando así la seguridad y el rendimiento óptimo del vehículo.

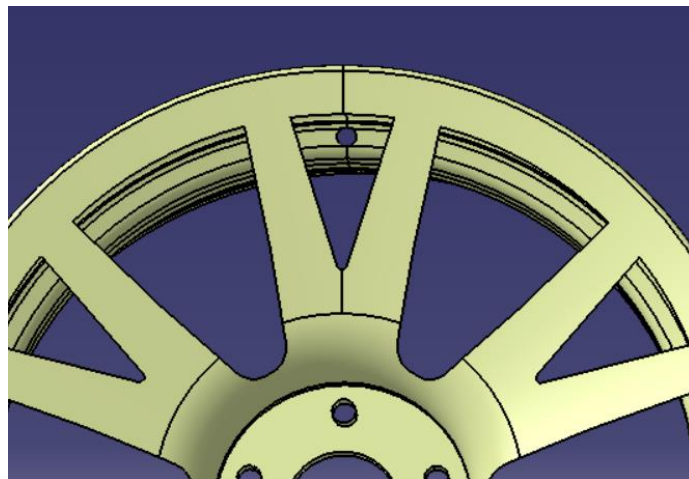


Ilustración 65. Agujero válvula diseño final. [27]

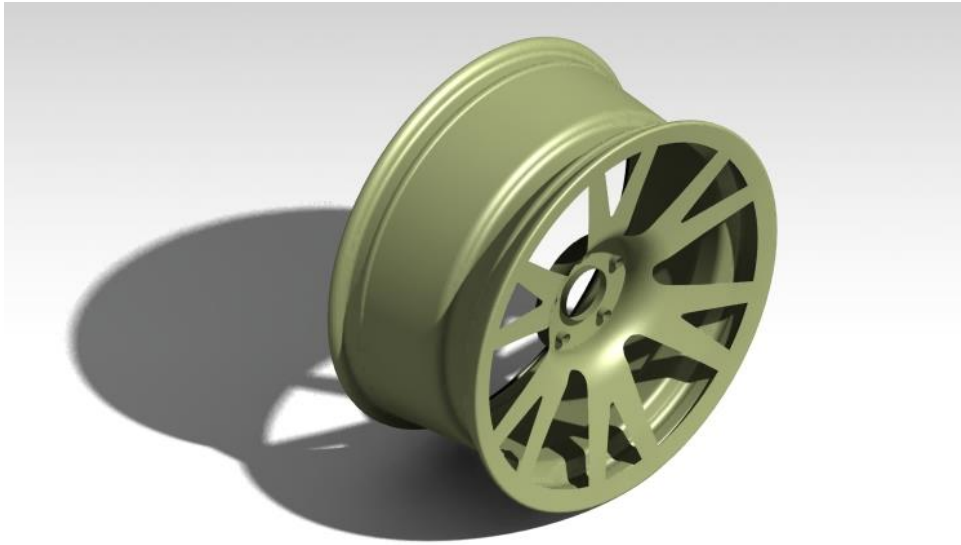


Ilustración 66. Superficie final llanta trasera. [27]

De manera análoga que con la llanta delantera, se crean las distintas operaciones en la cara de la llanta trasera, llegando al resultado de la *Ilustración 66*. Tras estas operaciones, se obtienen las superficies necesarias para proceder con las simulaciones de los distintos casos de carga en ambas llantas y poder verificar la integridad estructural de estos componentes.

4.2 Simulación final

4.2.1 Llanta delantera

Mallado llanta delantera

Para el análisis final de la llanta delantera, se emplea un tamaño de malla de 2mm, presente en la *Ilustración 67*. En este mallado se emplean 133.083 nodos y 131.506 elementos. El número de nodos y elementos es menor que en el caso inicial, esto es debido a las superficies que se han extraído para reducir peso.



Ilustración 67. Mallado 2mm llanta delantera. [28]

Laminado llanta delantera

Para el laminado de la llanta delantera, al igual que con el caso inicial, se emplean distintos laminados en el cuerpo de la llanta y la cara de esta.

El cuerpo de la llanta presenta el siguiente laminado:

[+45/-45/+45/-45/+45/-45/+45/-45/0/90/0/90/0/90/0/90/SYM]

Representando únicamente la mitad del laminado, ya que es simétrico.

Con un total de 32 capas, el número total (y porcentaje) de capas para cada uno de los ángulos es:

Capas orientadas a 0°: 8 [25%]

Capas orientadas a ±45°: 16 [50%]

Capas orientadas a 90°: 8 [25%]

Para la cara de la llanta se emplea el siguiente laminado:

[+45/0/-45/0/+45/90/-45/90/+45/0/-45/90/0/-45/0/+45/90/+45/90/-45/0/+45/0/-45/0/+45/0/
-45/90/+45/90/-45/90/+45/-45/90/SYM]

Sólo se presenta la mitad del laminado, ya que es simétrico.

Con un total de 72 capas, el número total (y porcentaje) de capas para cada uno de los ángulos es:

Capas orientadas a 0°: 18 [25%]

Capas orientadas a $\pm 45^\circ$: 36 [50%]

Capas orientadas a 90°: 18 [25%]

En ambos laminados se respeta la simetría y se reparten las capas de igual manera entre los principales ángulos, obteniendo así mejores resultados en el laminado final.

Para el cuerpo de la llanta se obtiene un espesor de 6,4mm, mientras que para la cara de esta es algo más elevado, con 14,4mm.

Situación de frenada llanta delantera

Las cargas aplicadas en la situación de frenada para la llanta delantera son las debidas a la presión de inflado, la fuerza vertical y la fuerza longitudinal. Además, se restringen los movimientos de las zonas resaltadas en color azul en la *Ilustración 68*. Estas condiciones de contorno se aplican de igual manera que en el caso inicial.

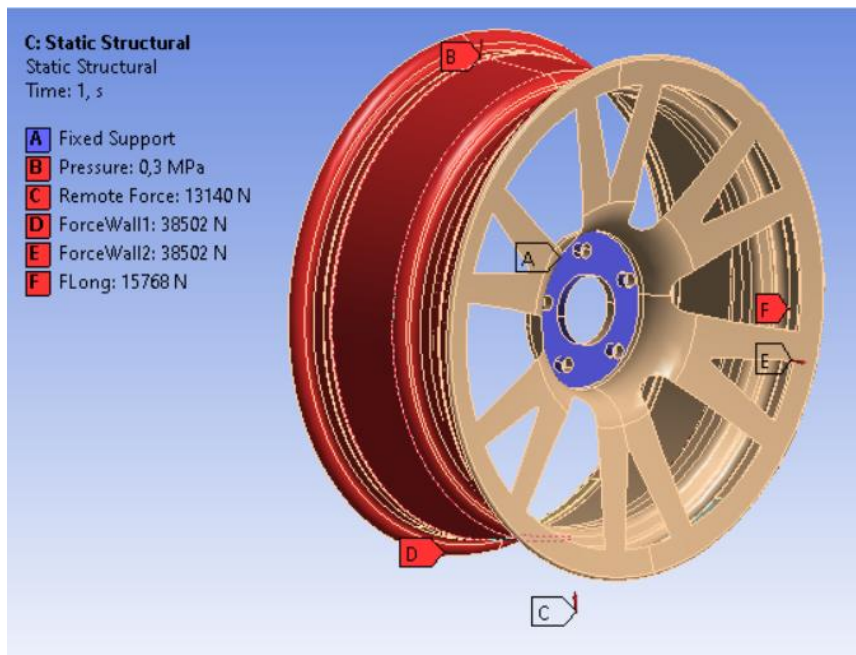


Ilustración 68. Condiciones de contorno frenada. [28]

La tensión máxima obtenida en la situación de frenada es de 260MPa, como se aprecia en la *Ilustración 69*. Esta tensión es notablemente inferior a la tensión máxima obtenida inicialmente. Esto se debe a que las cargas se distribuyen mejor y se han eliminado los concentradores de tensiones.

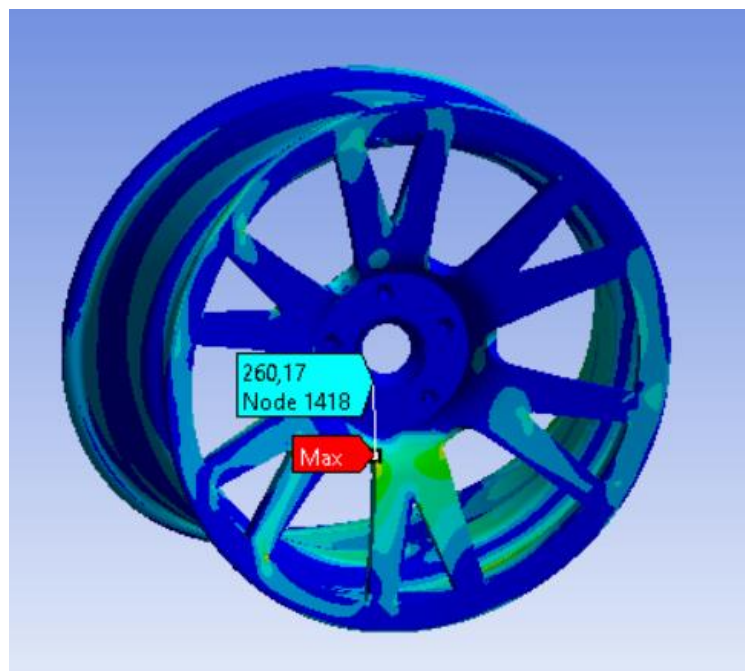


Ilustración 69. Tensión equivalente de von-Mises frenada. [28]

La deformación máxima obtenida en esta situación es de 2,8mm y se da en el extremo libre del cuerpo de la llanta, como se observa en la *Ilustración 70*. Se ha reducido a más de la mitad el desplazamiento máximo inicial.

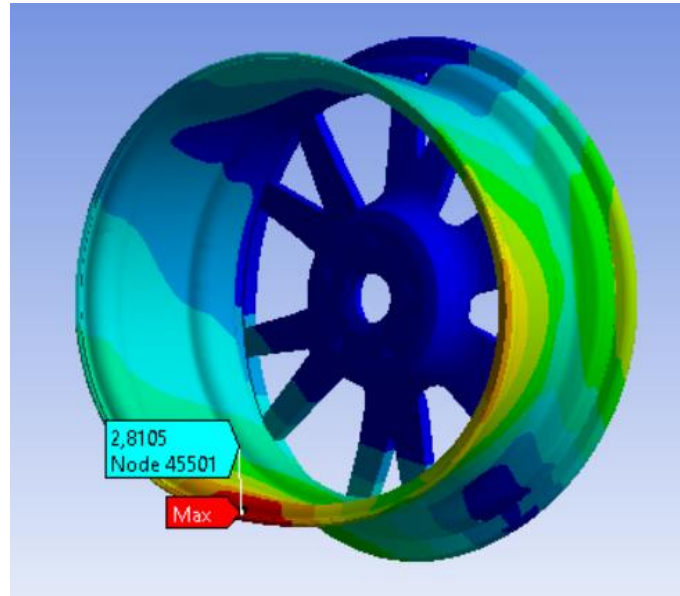


Ilustración 70. Deformación frenada. [28]

El factor de seguridad mínimo obtenido en el caso de frenada es de 2,5, como se puede observar en la *Ilustración 71*. El factor de seguridad mínimo buscado para estas simulaciones es de 2, por lo que cumple con el objetivo. El resto de la llanta tiene por lo general un factor de seguridad de 10, siendo este bastante elevado.

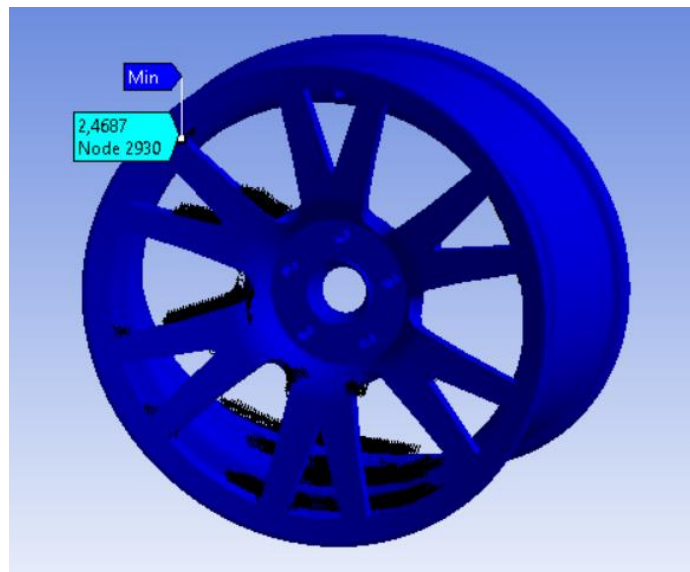


Ilustración 71. Factor de seguridad frenada. [28]

Situación de paso por curva llanta delantera

Para la situación de paso por curva en la llanta delantera, se aplican las cargas debidas a la presión, carga vertical y fuerza lateral. Pudiendo observarse en la *Ilustración 72*, donde se aplican estas cargas, así como las restricciones de movimiento.

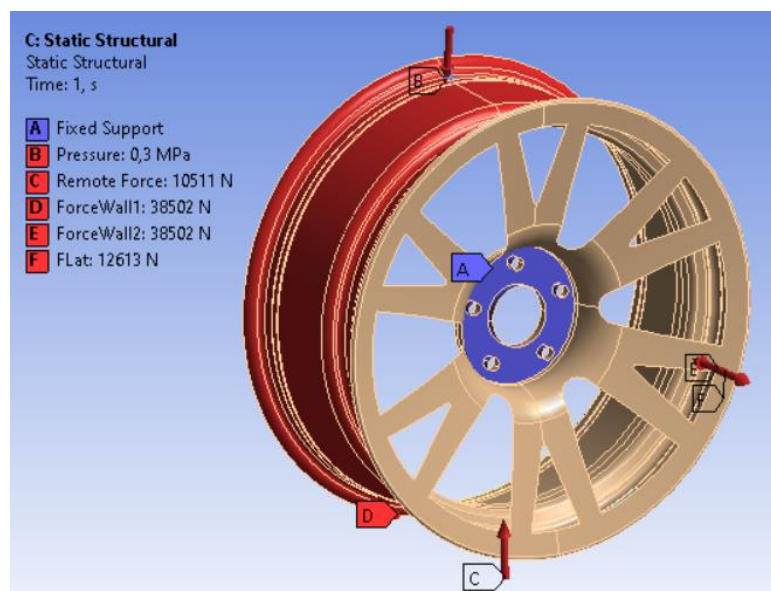


Ilustración 72. Condiciones de contorno paso por curva. [28]

En la Ilustración 73 se observa la tensión máxima obtenida para el caso de paso por curva, con un valor de 200MPa. Reduciéndose así a la mitad la tensión obtenida inicialmente en esta misma situación de cargas, esto se debe a las mejoras aplicadas en el diseño.

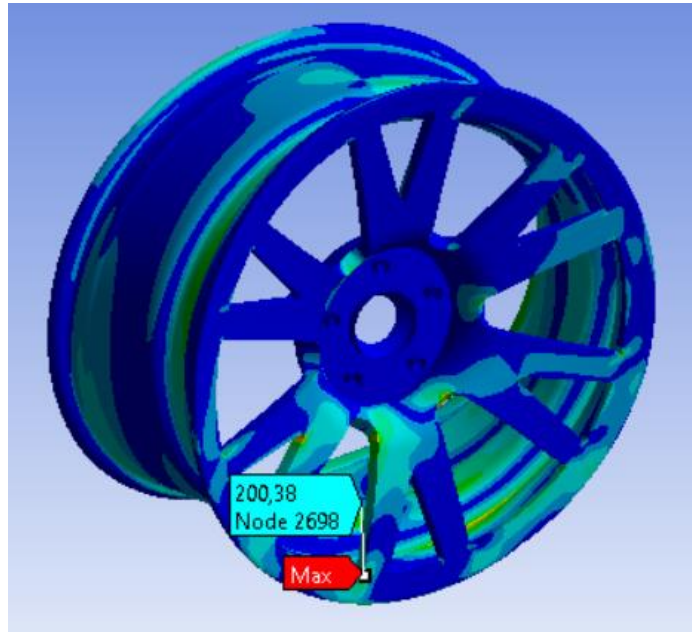


Ilustración 73. Tensión equivalente de von-Mises paso por curva. [28]

La deformación máxima obtenida es de 2,4mm, obtenida en el extremo libre del cuerpo de la llanta, como se aprecia en la Ilustración 74. Esta deformación es asumible, ya que la llanta no sobrepasa la zona elástica del material, recuperando su forma inicial tras dejar de aplicarse las cargas.

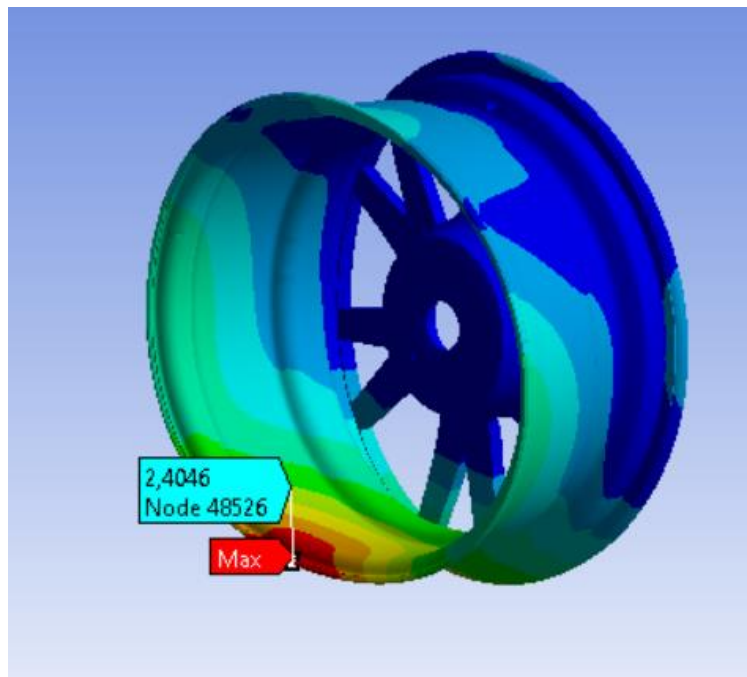


Ilustración 74. Deformación paso por curva. [28]

En la *Ilustración 75*, se observa que el factor de seguridad mínimo obtenido en la situación de paso por curva es de 2,6, por lo que resiste las cargas aplicadas y cumple con el factor de seguridad mínimo establecido de 2. De manera general, al igual que en la situación de frenada, se obtienen factores de seguridad de 10 en otros puntos de la llanta, siendo estos bastante elevados.

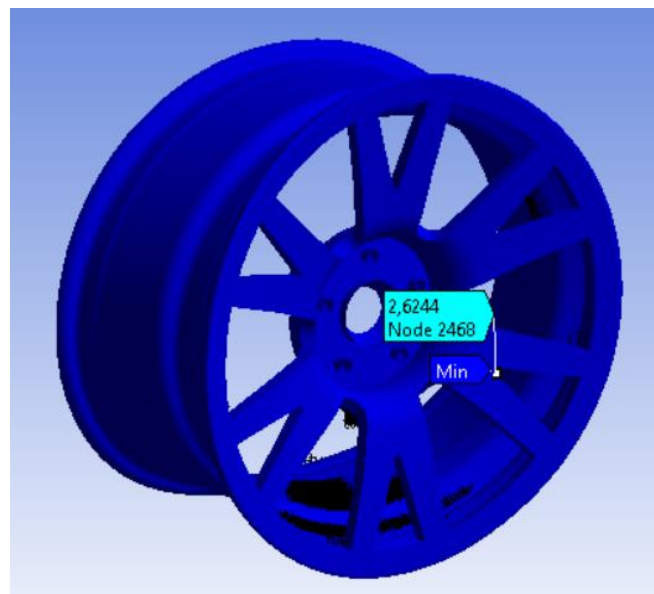


Ilustración 75. Factor de seguridad paso por curva. [28]

4.2.2 Llanta trasera

Mallado llanta trasera

Como se aprecia en la *Ilustración 76*, para el análisis final de la llanta delantera, se emplea un tamaño de malla de 2mm. En este mallado se emplean 142.059 nodos y 140.467 elementos. El número de nodos y elementos es algo mayor que en la llanta delantera, esto es debido a que la llanta trasera es más ancha y, por tanto, tiene más superficie que debe ser mallada.

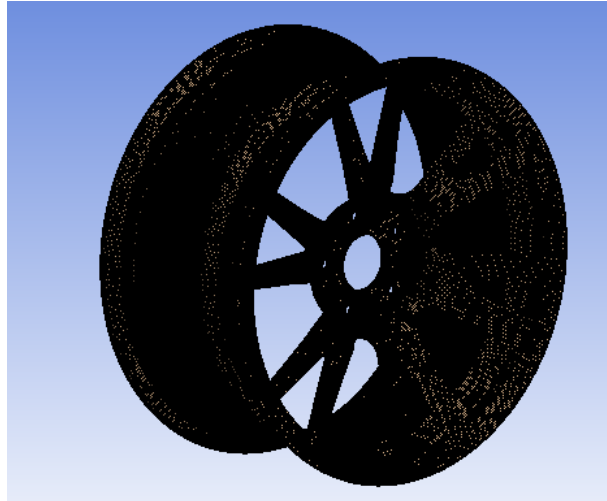


Ilustración 76. Mallado 2mm llanta delantera. [28]

Laminado llanta trasera

Para el laminado de la llanta trasera aumenta el número de capas tanto en el cuerpo, como en la cara de la llanta. Esto se debe a que, para la llanta trasera, las situaciones de cargas son más exigentes.

El cuerpo de la llanta presenta el siguiente laminado:

[+45/-45/+45/-45/+45/-45/+45/-45/+45/-45/0/90/0/90/0/90/0/90/0/90/SYM]

Representando únicamente la mitad del laminado, ya que es simétrico.

Con un total de 40 capas, el número total (y porcentaje) de capas para cada uno de los ángulos es:

Capas orientadas a 0°: 10 [25%]

Capas orientadas a ±45°: 20 [50%]

Capas orientadas a 90°: 10 [25%]

Para la cara de la llanta se emplea el siguiente laminado:

[+45/0/-45/90/+45/0/-45/0/+45/90/-45/90/+45/0/-45/90/0/-45/0/+45/90/+45/90/-45/0/+45/0/
-45/0/+45/0/-45/90/+45/90/-45/90/+45/-45/90/SYM]

Sólo se presenta la mitad del laminado, ya que es simétrico.

Con un total de 80 capas, el número total (y porcentaje) de capas para cada uno de los ángulos es:

Capas orientadas a 0°: 22 [25%]

Capas orientadas a $\pm 45^\circ$: 44 [50%]

Capas orientadas a 90°: 22 [25%]

Puede parecer un número elevado de capas, pero el espesor de cada capa es bastante bajo. Obteniendo así más isotropía, ya que las propiedades de las capas están más mezcladas.

Para el cuerpo de la llanta se obtiene un espesor de 8mm, mientras que para la cara de esta es algo más elevado, con 16mm. Ambos son espesores bastante reducidos, obteniéndose así un peso menor en la llanta.

Situación de velocidad máxima llanta trasera

Para la situación de máxima velocidad, las cargas aplicadas son las debidas a la presión de inflado y la carga vertical. Los valores de estas cargas, así como las restricciones de movimiento, se observan en la *Ilustración 77*.

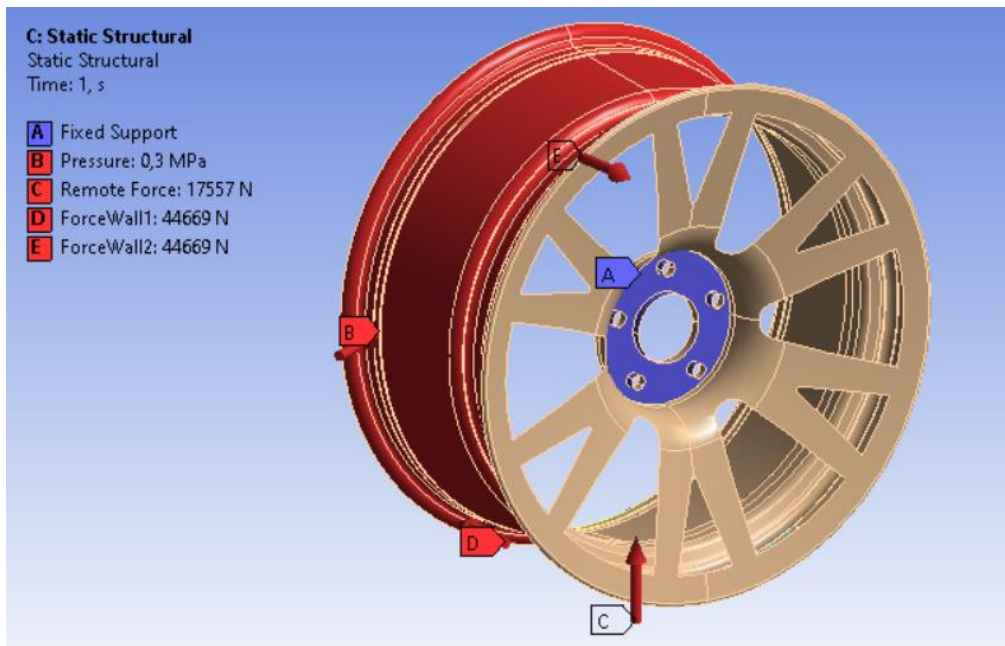


Ilustración 77. Condiciones de contorno velocidad máxima. [28]

En la *Ilustración 78* se observa el resultado de tensión máxima obtenida en la llanta trasera en la situación de velocidad máxima, con un valor de 232MPa, disminuyendo a la mitad la tensión que sufría la llanta inicial. Esta tensión se da en la unión de dos de los radios. Es normal que en estas zonas se acumulen mayores tensiones, por eso han sido redondeadas, para disminuir esta tensión acumulada.

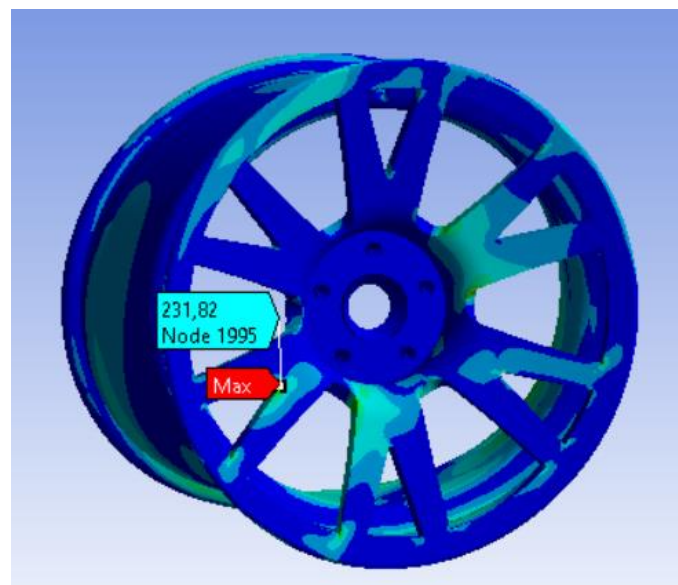


Ilustración 78. Tensión equivalente de von-Mises velocidad máxima. [28]

La deformación máxima se produce en el extremo libre del cuerpo de la llanta, deformándose 2,9mm, como se observa en la *Ilustración 79*. Es la deformación más elevada obtenida en las simulaciones finales, pero la llanta recuperará su forma original ya que no llega a plastificar el material, por lo que esta deformación es asumible.

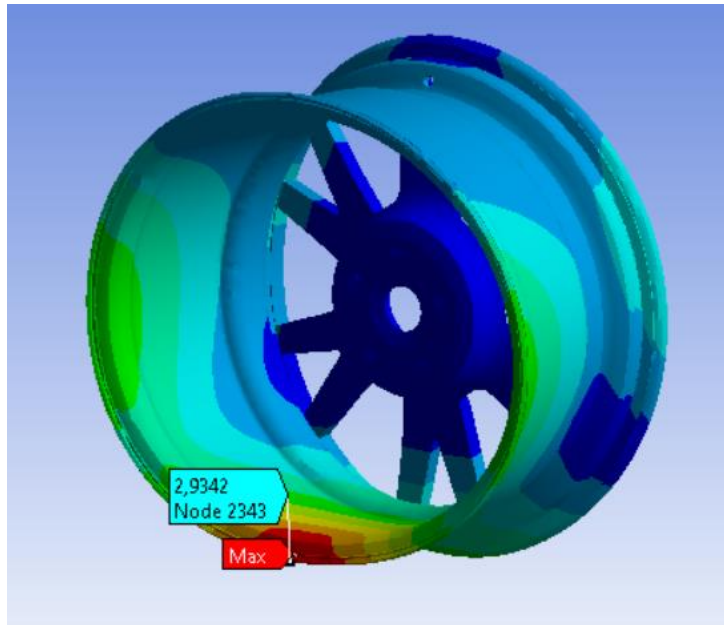


Ilustración 79. Deformación velocidad máxima. [28]

El factor de seguridad mínimo, obtenido en la *Ilustración 80*, es de 2,04 y el mínimo buscado era 2. Cumple con el objetivo con poco margen, pero dada la situación de cargas, con una carga vertical tan elevada, es poco probable que se alcance una situación con el doble de esta carga para provocar el fallo en la llanta. Por esta razón, se puede dar por válida la llanta trasera en la situación de velocidad máxima.

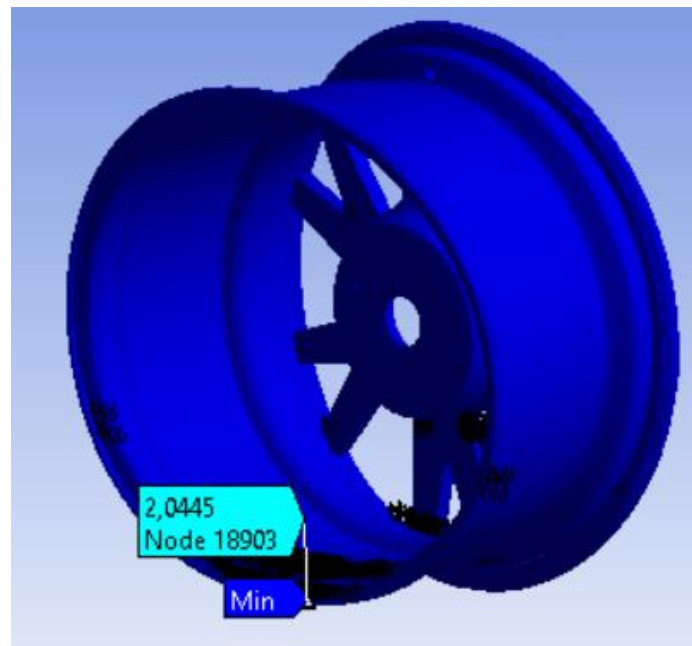


Ilustración 80. Factor de seguridad velocidad máxima. [28]

Situación de frenada llanta trasera

Para el caso de situación de frenada se aplican las cargas de presión de inflado, carga vertical y fuerzas longitudinales, así como las restricciones de movimiento, pudiendo observarse en la *Ilustración 81*.

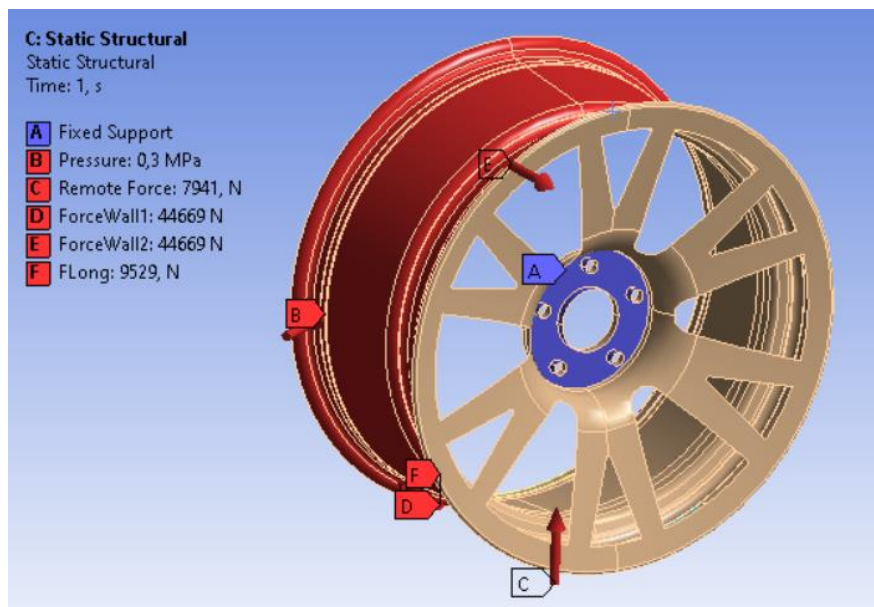


Ilustración 81. Condiciones de contorno frenada. [28]

Como se puede apreciar en la *Ilustración 82*, la tensión máxima obtenida para la situación de frenada es de 98MPa. Esta tensión es mucho menor que en el caso inicial. Esto es debido a que se reducen los concentradores de tensiones y que se emplean más capas, repartiendo las cargas sobre ellas.

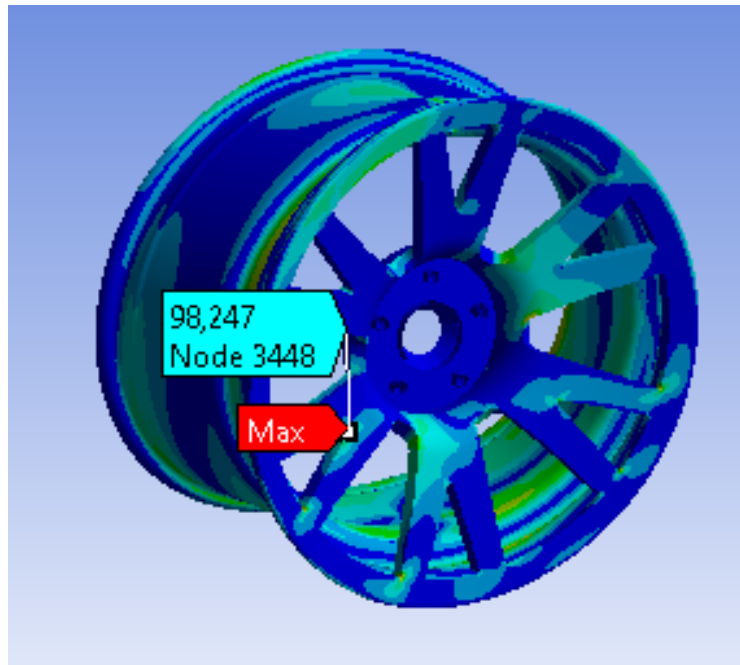


Ilustración 82. Tensión equivalente de von-Mises frenada. [28]

La deformación máxima se obtiene en el extremo libre del cuerpo de la llanta y tiene un valor de 1,3mm, como se puede apreciar en la *Ilustración 83*. Este valor es bastante bajo en comparación a otras situaciones, ya que en la situación de frenada las cargas no son tan elevadas sobre la llanta trasera.

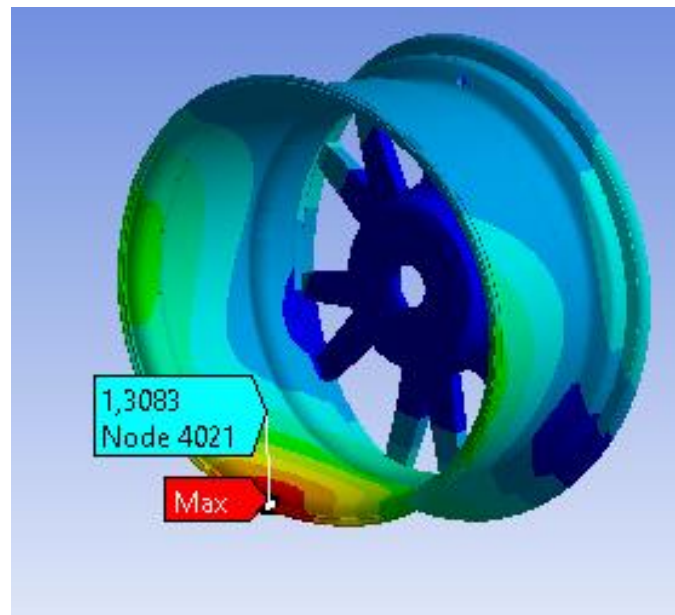


Ilustración 83. Deformación frenada. [28]

El factor de seguridad mínimo obtenido es de 3,6 y como se aprecia en la *Ilustración 84*, se produce en el extremo libre del cuerpo de la llanta. La llanta trasera resiste la situación de frenada con un margen de seguridad elevado.

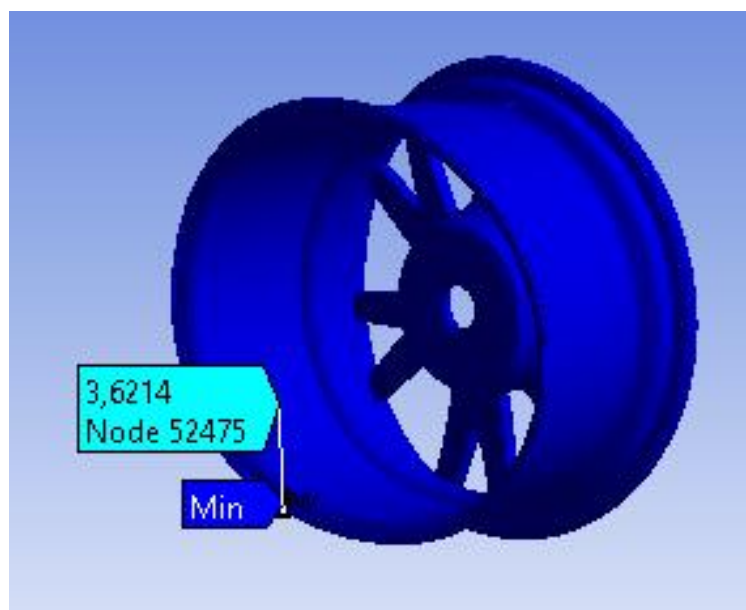


Ilustración 84. Factor de seguridad frenada. [28]

Situación de paso por curva llanta trasera

Gracias a la *Ilustración 85*, se pueden observar las distintas cargas para el caso de paso por curva en la llanta trasera, estas son las debidas a la presión, la carga vertical y las fuerzas laterales, resaltadas todas ellas en color rojo. Así como las zonas con restricciones de movimiento, resaltadas en color azul.

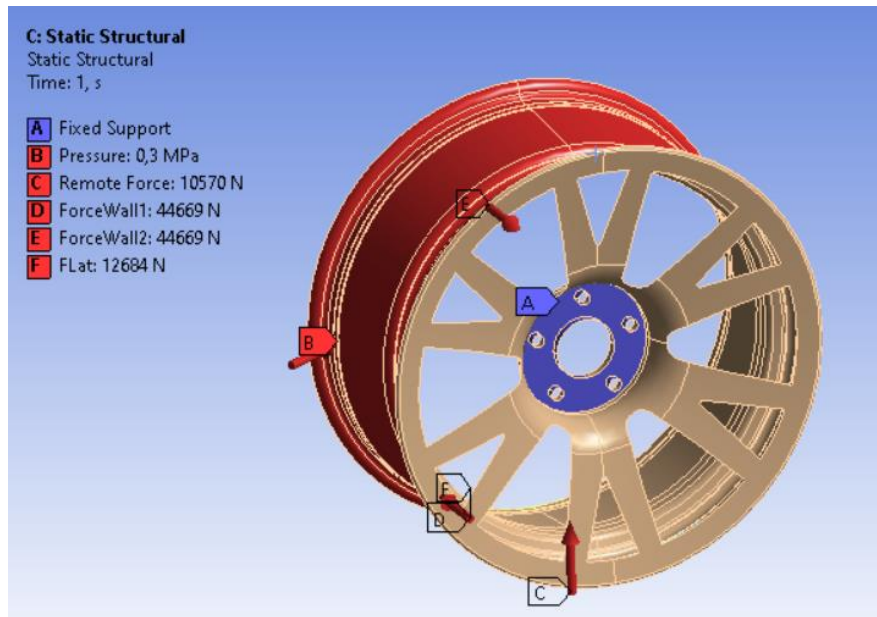


Ilustración 85. Condiciones de contorno paso por curva. [28]

En la *Ilustración 86*, se aprecia la tensión máxima obtenida en el paso por curva en la llanta trasera, con un valor de 197MPa. Por lo que se reduce a la mitad la tensión máxima del diseño inicial para el caso de carga de paso por curva.

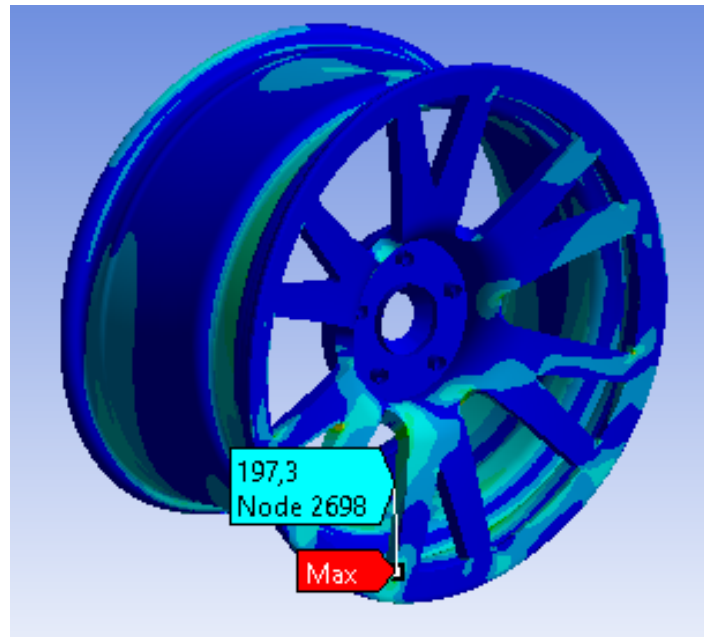


Ilustración 86. Tensión equivalente de von-Mises paso por curva. [28]

La deformación máxima, como se aprecia en la *Ilustración 87*, se obtiene en el extremo libre del cuerpo de la llanta y es de 1,9mm. Al igual que en la situación de frenada, esta deformación es bastante baja.

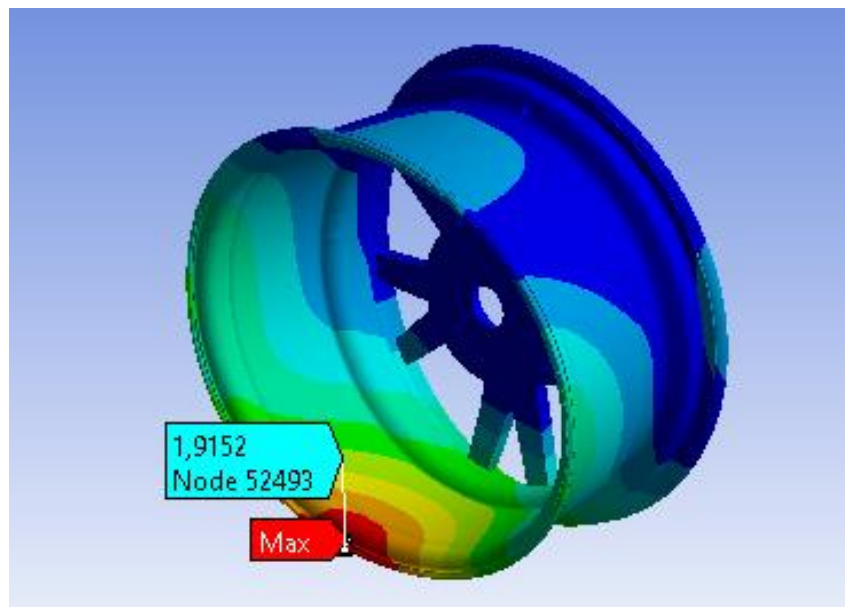


Ilustración 87. Deformación paso por curva. [28]

El factor de seguridad mínimo obtenido para la llanta trasera en la situación de paso por curva es de 2,7 y se da en el extremo libre del cuerpo de la llanta, como se aprecia en la *Ilustración 88*. La llanta trasera resiste la situación de paso por curva con suficiente margen de seguridad.

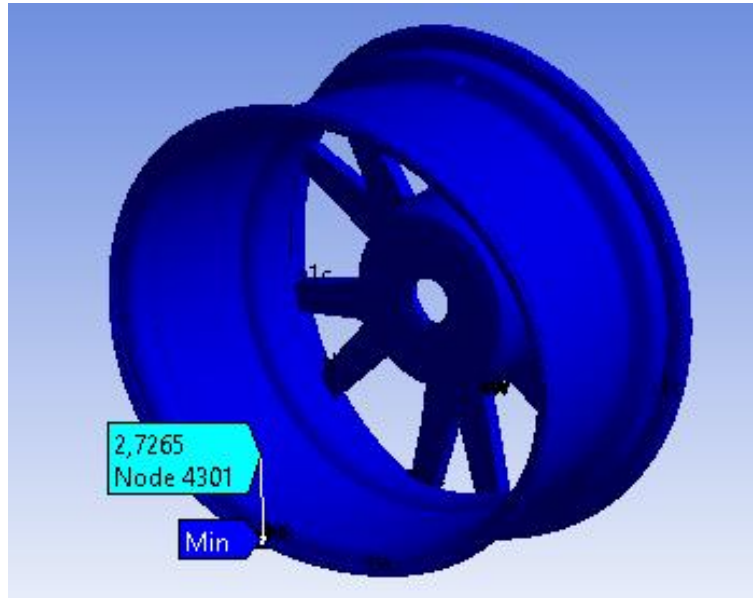


Ilustración 88. Factor de seguridad paso por curva. [28]

Tras este último caso de carga, con los resultados obtenidos, se puede afirmar que ambas llantas resisten todos los casos de carga de manera teórica. En todos los casos el factor de seguridad es de al menos 2, dejando así suficiente margen para los posibles defectos que pueda este componente en la realidad o por si sufriese casos de carga más severos.

4.3 Diseño final

Tras realizar las simulaciones y obtener los distintos laminados, se le da el espesor respectivo a cada parte de llanta trasera y delantera. Para ello se separan las superficies de la llanta y se emplea la función “thick surface” que realiza una superficie normal a la seleccionada y aplica espesor entre ambas, esta función es equivalente al proceso de laminación que se llevaría a cabo en estas llantas.

En la llanta delantera se aplican los espesores de 6,4mm para el cuerpo de la llanta y 14,4mm para la cara de esta. Pudiendo observarse el resultado final de la llanta sólida en la *Ilustración 89*.

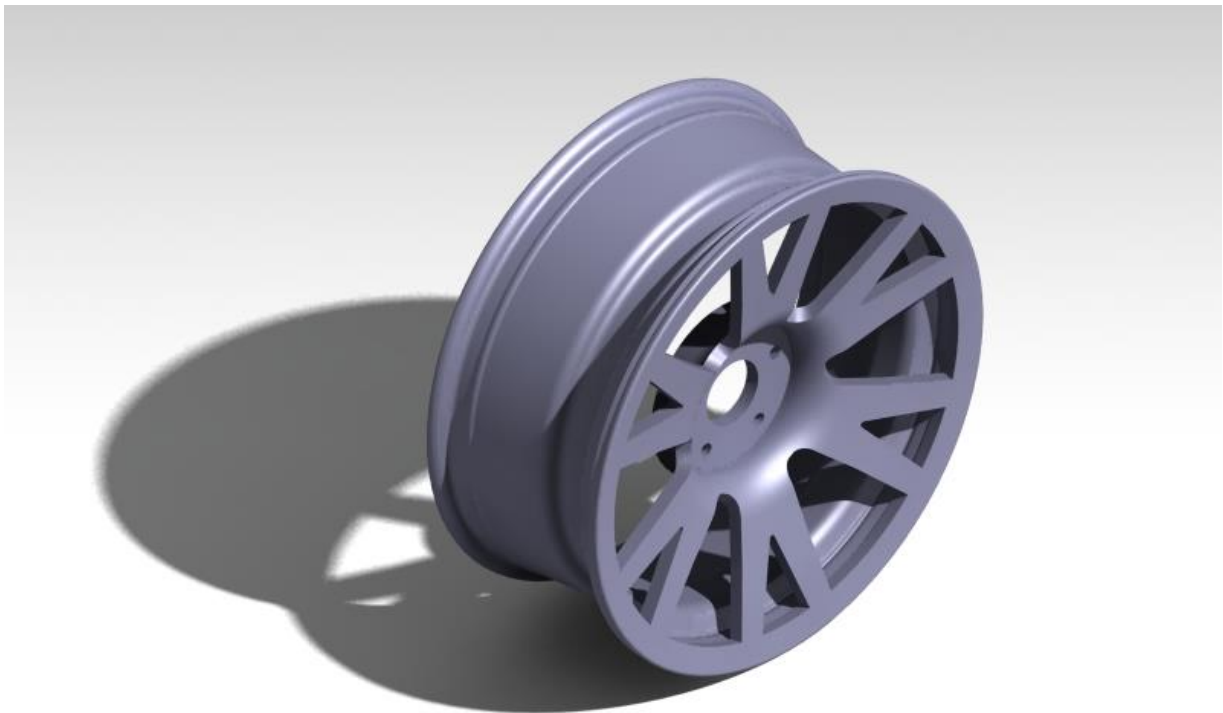


Ilustración 89. Llanta delantera final. [27]

En la llanta trasera se aplican los espesores de 8mm en el cuerpo de la llanta y 16mm en la cara de esta. Los espesores de la llanta trasera son mayores, pudiendo observarse en la *Ilustración 90*. Los espesores han resultado mayores debido al empleo de más capas, ya que las cargas en la llanta trasera eran más severas.

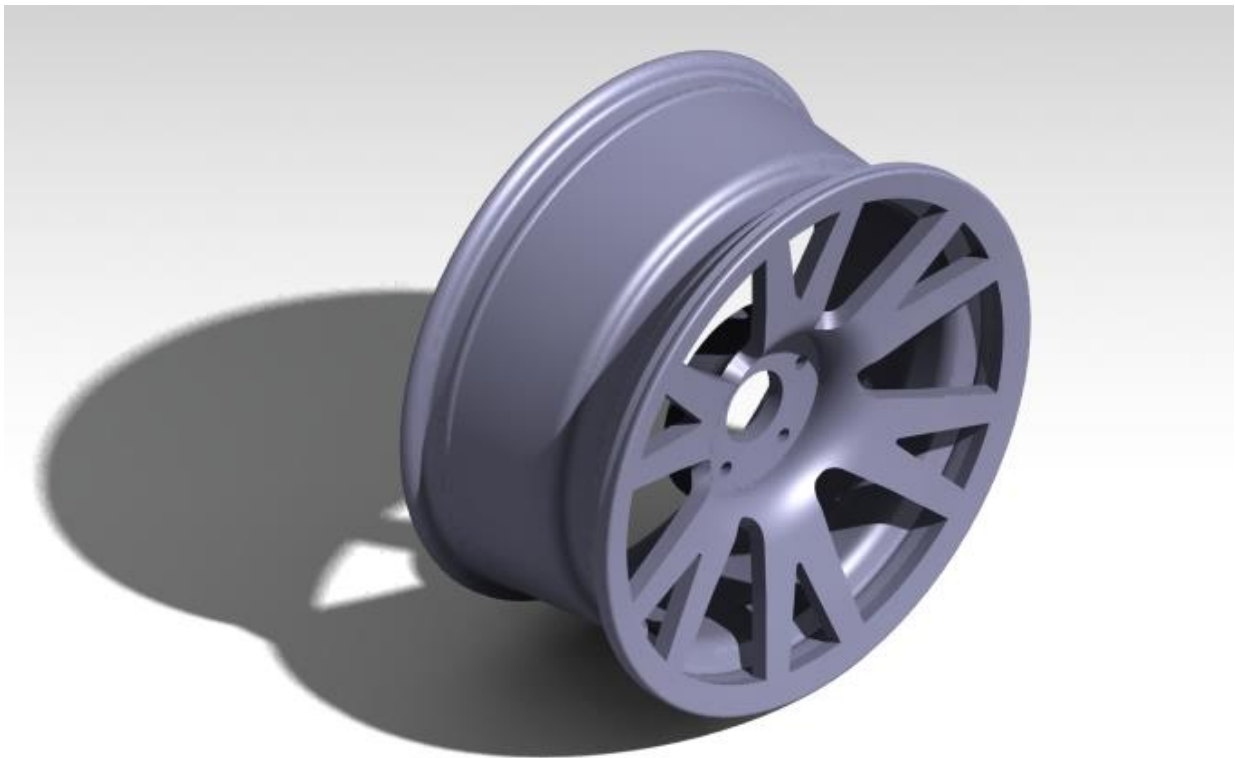


Ilustración 90. Llanta trasera final. [27]

Como se observa en la *Ilustración 91* y la *Ilustración 92*, se añade la densidad de la fibra de carbono empleada, que es de 1.556Kg/m³ y el propio programa calcula la masa de las llantas a partir de la densidad y el volumen. La llanta trasera presenta una masa de 8,1Kg y la delantera de 6,5Kg.

La masa de ambas llantas es bastante reducida en comparación a unas llantas de medidas similares fabricadas mediante aluminio, en las que la masa suele ser de entre 8 y 13Kg. El empleo de fibra de carbono en llantas ahorra alrededor de 15Kg de masa no suspendida en total, mejorando el comportamiento del vehículo.

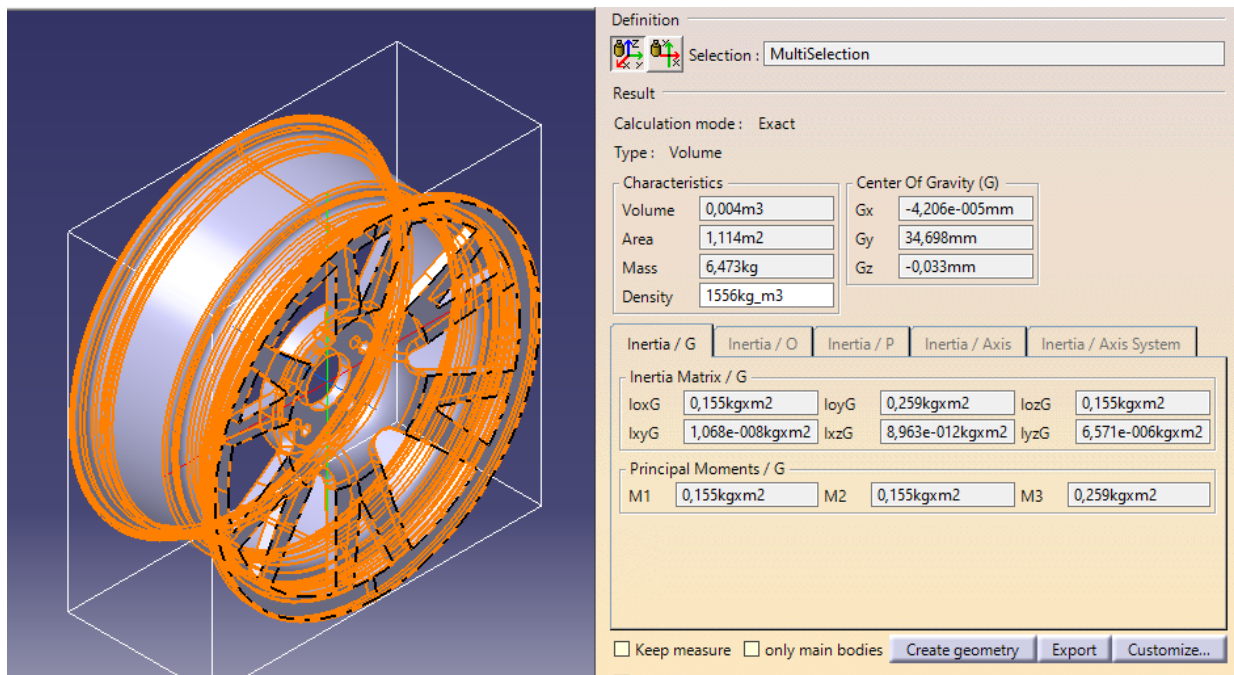


Ilustración 91. Masa llanta delantera. [27]

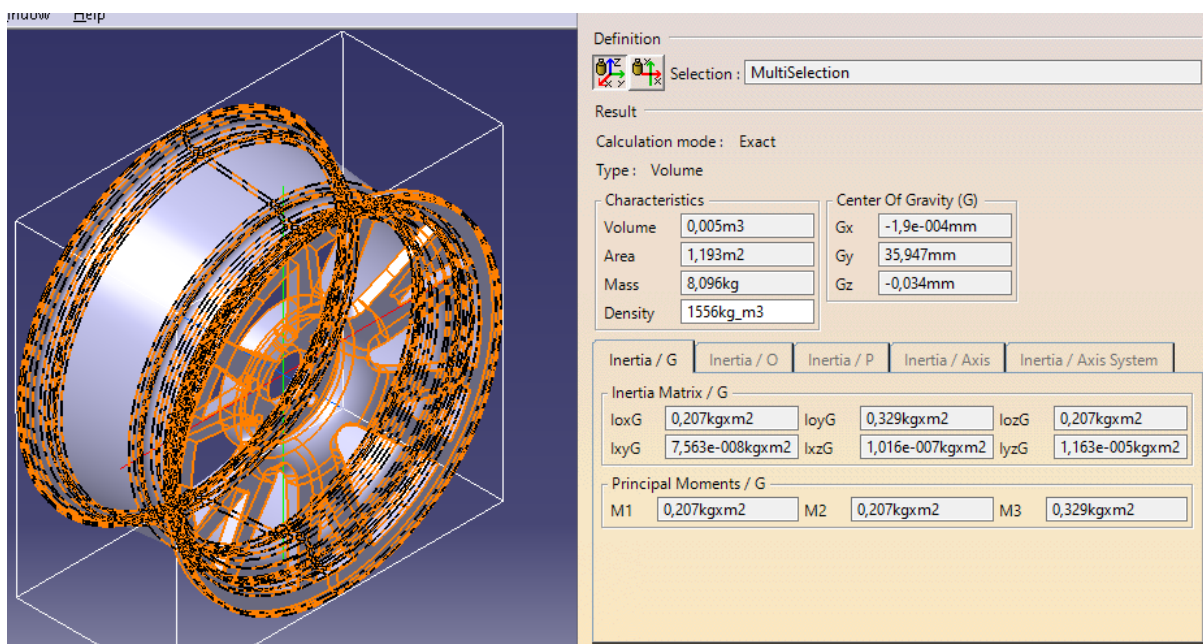


Ilustración 92. Masa llanta trasera. [27]

5 Conclusiones

El diseño de una llanta para un vehículo deportivo representa la aplicación de la ingeniería para buscar las mejoras de rendimiento y eficiencia de estos vehículos. A lo largo de este trabajo, se han alcanzado varios hitos importantes que resumen los logros y contribuciones realizadas.

Estudio de las tecnologías de fabricación: En este proyecto se han explorado métodos de fabricación innovadores y procesos optimizados que permiten una producción más eficiente y rentable de componentes livianos y resistentes para la industria automotriz. Destacan los avances que supone el empleo de la fibra de carbono para componentes en vehículos deportivos. Además, se estudian otros métodos innovadores de fabricación, como es la impresión 3D.

Optimización del material empleado: La fibra de carbono ha demostrado una reducida densidad en comparación a otros materiales empleados en la fabricación de llantas. A esta baja densidad, se le añade una buena resistencia mecánica. Esto se traduce en una reducción del material necesario y por tanto una mejora notable en el peso no suspendido, la agilidad, la respuesta de la dirección y la eficiencia de combustible en un vehículo deportivo. Además, este material compuesto es empleado mediante laminación, por lo que en este proyecto se ha buscado optimizar los laminados empleados, para reducir el número de capas empleadas y por tanto la masa del componente final.

Empleo de programas de simulación: A través del programa de simulación por el método de elementos finitos, se puede observar el comportamiento de este componente frente a distintos casos de carga. Además, el empleo de estos programas supone un gran ahorro de tiempo de cálculo, ya que obtener estos resultados por formas convencionales sería una ardua tarea.

En resumen, el diseño de una llanta de fibra de carbono para automóviles deportivos no solo representa una mejora en el rendimiento y la eficiencia, sino que también destaca el potencial de la ingeniería de materiales para impulsar la innovación y la sostenibilidad en la industria automotriz. Este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de los materiales compuestos y su aplicación en vehículos de alto rendimiento

Anexos

Anexo 1: Cálculos detallados

Aceleración y frenada

Como la masa de un coche puede considerarse constante, la velocidad de aceleración depende de la fuerza disponible para impulsar el coche hacia delante. Esta fuerza de tracción actúa sobre la superficie de contacto de las ruedas traseras motrices. Podemos convertir un análisis dinámico en un simple análisis estático empleando el principio de d'Alembert, que establece que el coche resiste eficazmente la aceleración hacia delante con una fuerza de reacción inercial imaginaria que actúa a través del centro de masas. Esta fuerza es igual y opuesta a la fuerza de tracción, como puede observarse en la *Ilustración 93*.

Realizando un equilibrio de momentos en la parte de contacto delantera, se llega a:

$$F \cdot h_m = \Delta V_{long} \cdot L \therefore$$

$$\Delta V_{long} = \frac{F \cdot h_m}{L} \quad 1$$

De igual manera ocurre en una situación de frenada con la fuerza de frenado generada en las ruedas delanteras, que sería equivalente a la fuerza de tracción en el caso de aceleración.

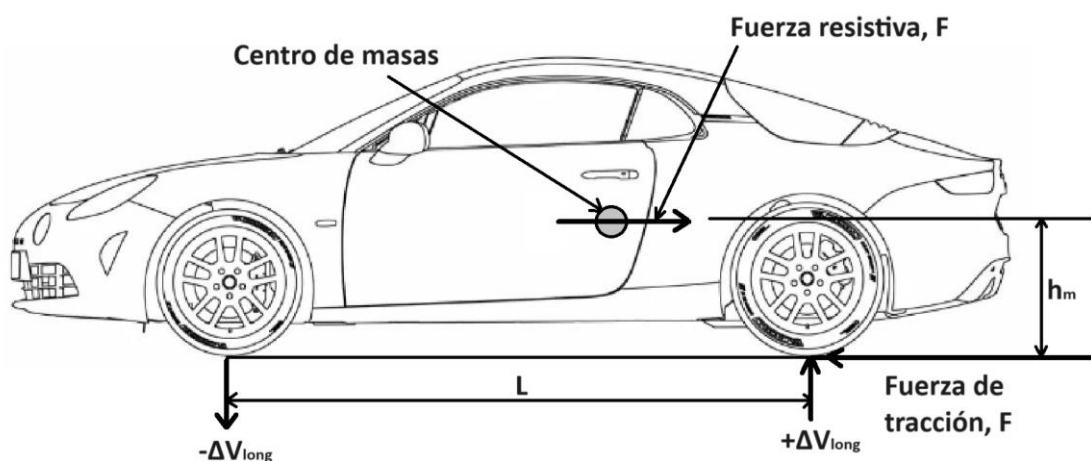


Ilustración 93. Transferencia de cargas longitudinales

Aceleración

La fase inicial del límite de tracción produce los niveles más altos de fuerza de tracción y, por tanto, de transferencia de carga longitudinal. A efectos de diseño, esto produce las mayores cargas sobre la suspensión trasera. La *Ilustración 94* muestra el mismo vehículo que la *Ilustración 93*, con cargas estáticas añadidas y la fuerza resistiva imaginaria eliminada.

La expresión para la fuerza de tracción se obtiene mediante el coeficiente de fricción del neumático y el asfalto, μ , multiplicado por la fuerza normal que actúa. Quedando la expresión:

$$F = (\Delta V_{long} + W_R) \cdot \mu$$

Y mediante la *Ecuación 1* obtenida anteriormente,

$$F = \left(\frac{F \cdot h_m}{L} + W_R \right) \cdot \mu \therefore$$

$$F - \frac{F \cdot h_m \cdot \mu}{L} = W_R \cdot \mu \therefore$$

$$F = \frac{W_R \cdot \mu}{1 - \frac{h_m \cdot \mu}{L}}$$

2

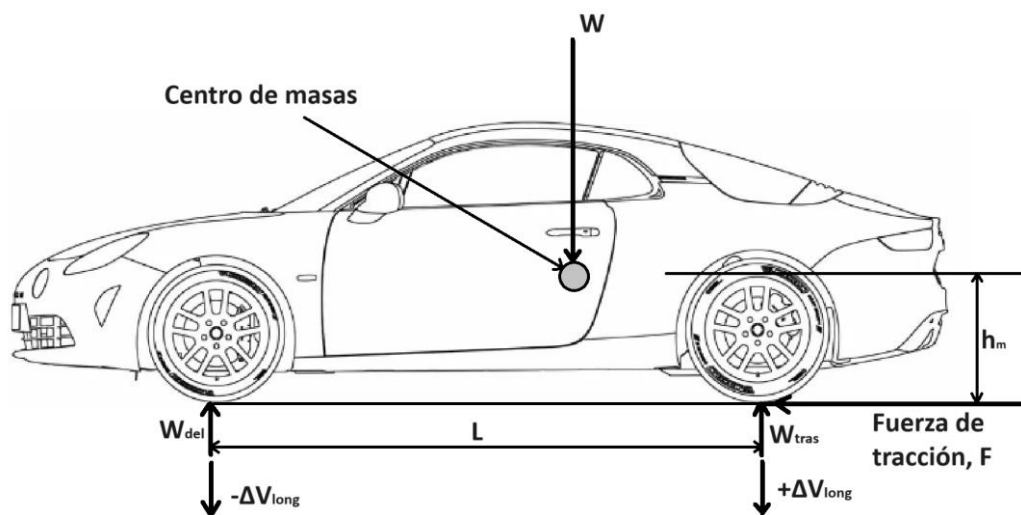


Ilustración 94. Límite de tracción

Paso por curva

Como se puede observar en la *Ilustración 13*, como la fuerza centrífuga pasa por el centro de masas, que está por encima de la superficie de la carretera, se crea un momento o par de vuelco que provoca una transferencia lateral de cargas. En las curvas, la carga sobre las ruedas exteriores aumenta y la carga sobre las ruedas interiores disminuye en la misma proporción.

Realizando un equilibrio de momentos en una de las ruedas, se obtiene:

$$F \cdot h_m = \Delta V_{lat} \cdot T \therefore$$

$$\Delta V_{lat} = \frac{F \cdot h_m}{T} \quad 3$$

6 Bibliografía

- [1] *Diccionario de la lengua española*. [En línea]. Real Academia Española, 2024. Disponible en: <https://dle.rae.es/>
- [2] BULLIET, Richard W. *The wheel: Inventions and reinventions*. Columbia University Press, 2016.
- [3] VENTURA, Dalia. *¿Dónde se inventó la rueda y por qué tardó tanto en aparecer?* [En línea]. BBC News Mundo, 2017. Disponible en: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-41728685>
- [4] GARCÍA BARTUAL, Mario. *Karl Benz y la creación del primer automóvil*. [En línea]. La Vanguardia, 2019. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/historiayvida/historia-contemporanea/20191125/471783996973/karl-benz-automovil.html>
- [5] HUGIE, Tyson. *Benz Patent-Motorwagen*. [En línea]. The Journal Classic Cars, 2021. Disponible en: <https://journal.classiccars.com/2021/06/10/pick-of-the-day-1886-benz-patent-motorwagen-a-replica-of-the-first-car/>
- [6] BOTHWELL, John. *Bugatti Type 35B: The 1920s Hypercar*. [En línea]. The Journal Classic Cars, 2017. Disponible en: <https://journal.classiccars.com/2017/08/24/bugatti-type-35b-the-1920s-hypercar/>
- [7] OLIVERA, Pablo. *LLANTAS, SU HISTORIA Y EVOLUCIÓN*. [En línea]. AutoveloX Magazine, 2019. Disponible en: <http://autoveloXmagazine.com/historia-del-automovil/llantas-su-historia-y-evolucion/>
- [8] *Choosing the Right Rims: Things You Need to Know*. [En línea]. Auto Cars Fans, 2016. Disponible en: <https://www.autocarsfans.com/choosing-the-right-rims-things-you-need-to-know.html>
- [9] MATIC, Mateja. *WHAT ARE 2 & 3 PIECE WHEELS? THE ULTIMATE GUIDE TO MULTI PIECE RIMS*. [En línea]. Nefarious Racing, 2023. Disponible en: <https://nefariousracing.com/what-are-multi-piece-wheels/>
- [10] *Motorsport Wheels*. [En línea]. BRAID Wheels. Disponible en: <https://www.braid-wheels.com/>
- [11] SOKOLOVSKI, Marko. *Three Piece Wheels*. [En línea]. Low Offset. Disponible en: <https://low-offset.com/workshop/3-piece-wheels/>
- [12] FERNIE, Michael. *Different Wheel Types And How They're Manufactured*. [En línea]. CarThrottle, 2016. Disponible en: <https://www.carthrottle.com/news/different-wheel-types-and-how-theyre-manufactured>
- [13] *HOW ARE CAR WHEELS MADE A GLIMPSE INTO CAR WHEEL MANUFACTURERS*. [En línea]. TireAgent, 2022. Disponible en: <https://www.tireagent.com/blog/how-are-wheels-rims-made>

- [14] *Flow Formed Wheels*. [En línea]. König Wheels. Disponible en: <https://konigwheels.com/wheels/flow-formed-wheels/>
- [15] FRANCIS, Scott. *One-piece, one-cure, infused carbon fiber wheel is ready to roll*. [En línea]. Composites World, 2020. Disponible en: <https://www.compositesworld.com/articles/one-piece-one-cure-infused-carbon-fiber-wheel-is-ready-to-roll>
- [16] *Zenvo TSR*. [En línea]. Zenvo Automotive. Disponible en: <https://zenvoautomotive.com/tsr-s-2/>
- [17] *The World's First 3D-Printed Titanium Wheel HRE3D+*. [En línea]. HRE. Disponible en: <https://www.hrewheels.com/wheels/concepts/hre3d>
- [18] SÁNCHEZ, Susana. *Fusión por haz de electrones*. [En línea]. 3D Natives, 2019. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/fusion-por-haz-de-electrones-les-explicamos-todo/>
- [19] *Documento DOUE-L-2006-82689*. Boletín Oficial del Estado.
- [20] *Reglamento nº 124 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) — Prescripciones uniformes relativas a la homologación de ruedas para vehículos de pasajeros y sus remolques*. DOUE núm. 375, 2006.
- [21] *Alpine A110*. [En línea]. Alpine cars. Disponible en: <https://www.alpinecars.es/gama/a110.html>
- [22] MUELANER, Jody. *Finite Element Analysis of Pneumatic Tire Loading on Wheel*. [En línea] Engineers Rule, 2020. Disponible en: <https://www.engineersrule.com/finite-element-analysis-of-pneumatic-tire-loading-on-wheel/>
- [23] SEWARD, Dereck. *Race Car Design*. Lancaster University, 2014.
- [24] NEWHEY, Adrian. *How to Build a Car*. Harper Collins Publishers, 2017.
- [25] *Neumáticos, llantas y válvulas. Llantas de base honda para vehículos de turismo y sus remolques*. UNE 69026, 2007.
- [26] *Wheel ET*. Wheel PCD. [En línea]. Disponible en: <https://wheelpcd.co.uk/wheel-et-explained/>
- [27] *Catia V5, Computer Aided Design*. Dassault Systemes.
- [28] *Ansys Workbench, Simulation Software*. ANSYS.
- [29] TYLER, Kaitlin y PARNELL, Harriet. *Performance Indices Reference Booklet*. ANSYS, 2022.
- [30] *Ansys Granta EduPack, Materials Selector*. ANSYS.

[31] BABA, Ali. *Car wheel rim finite element analysis*. [En línea] SesamX, 2023. Disponible en:
https://www.sesamx.io/doc/tutorials/car_wheel_rim#car_wheel_rim_finite_element_analysis

[32] BALART, Rafael Antonio. *Estimación del punto “quasi isotrópico” de laminados de material compuesto a través de gráficos “carpet plot” con eLamX*. Universidad Politécnica de Valencia, 2021.

[33] *Preimpregnados*. Castro Composites. [En línea]. Disponible en:
<https://www.castrocompositesshop.com/es/8-preimpregnados>