



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

“Diseño y estudio de una llanta de automóvil”

“Design and study of a car wheel”

Autor/es

Jorge Torres Gómez

Director/es

Jesús Cuartero Salafranca

Titulación del autor

Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2021

Resumen: “Diseño y estudio de una llanta de automóvil”

En el presente proyecto se realiza el diseño de una llanta de automóvil con el objetivo de, en un hipotético caso, poder ser fabricada.

Para lograr el objetivo del proyecto es necesario atender aspectos indispensables, el material del que se fabricaría la llanta y el proceso de fabricación por el que debe pasar son dos de ellos. Otro de los aspectos indispensables, ya relacionados con la realización del diseño de la llanta, es la búsqueda de las diferentes normativas que afectan al diseño, la realización de los bocetos y, por último, el paso de los bocetos al software 3D.

Una vez habiendo llegado a este punto, es necesario someter el diseño al análisis de elementos finitos para saber si resiste las diferentes cargas a las que está sometida en su periodo de vida, para ello se calculan las máximas fuerzas a las que se somete la llanta y se simulan varias de las pruebas a las que se debería someter una llanta según la normativa europea.

Por último, se realiza un análisis topológico del diseño con el fin de conseguir una reducción del peso inicial. Una vez realizado el análisis topológico de la pieza, se sacan diversas conclusiones sobre los cambios que podrían efectuarse y se hace un rediseño sobre el diseño inicial que, obviamente, será sometido al análisis por elementos finitos para ver si es apto o no para su posterior fabricación.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN | 7 |
| MEMORIA | |
| 1. ELEMENTOS y DEFINICIONES | 8 |
| 1.1 DEFINICIONES Y PARTES | 8 |
| 2. TIPOS DE LLANTA | 9 |
| 2.1 NÚMERO DE PIEZAS | 9 |
| 2.2 MATERIALES | 10 |
| 2.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN..... | 13 |
| 2.4 ELECCIÓN | 18 |
| 3. NORMA..... | 19 |
| 3.1 DIMENSIONADO..... | 19 |
| 3.2 DESIGNACIÓN..... | 22 |
| 4. DISEÑO | 24 |
| 4.1 HISTORIA..... | 24 |
| 4.2 BOCETO..... | 27 |
| 4.3 SOFTWARE 3D (SolidWorks)..... | 30 |
| 4.4 RESULTADO FINAL..... | 35 |
| 5. FUERZAS..... | 37 |
| 5.1 FUERZAS..... | 37 |
| 5.2 CONDICIONES DE CONTORNO | 45 |
| 5.3 MATERIAL..... | 45 |
| 6. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS..... | 46 |
| 6.1 RESULTADOS..... | 46 |
| 6.2 ANÁLISIS y RESUMEN DE RESULTADOS..... | 50 |
| 7. ANÁLISIS TOPOLÓGICO | 52 |
| 8. REDISEÑO..... | 55 |
| 8.1 CAMBIOS EN EL DISEÑO..... | 55 |
| 8.2 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES | 56 |
| 9. CONCLUSIONES..... | 60 |
| ANEXOS | |
| ANEXO 1 (Propiedades de los materiales)..... | 62 |
| ANEXO 2 (cálculos detallados) | 64 |
| BIBLIOGRAFÍA | 69 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Elementos de la llanta..... | 8 |
| Figura 2. Llanta monobloque (Vossen EVO-3R), | 9 |
| Figura 3. Llanta de 2 piezas (Sviipe.1 AP2X), base y núcleo de aleación de aluminio 6061-T6 y tornillería de titanio, | 9 |
| Figura 4. Llanta de 3 piezas (Sviipe R6008 AP3X), base, núcleo y garganta de aleación de aluminio 6061-T6 y tornillería de titanio..... | 9 |
| Figura 5. Llanta de aleación de acero (TREBL R-1724) | 10 |
| Figura 6. SBW COY (Aleación de magnesio ZK60-T1, forjada) | 11 |
| Figura 7. Vossen EVO-2R (Aleación de aluminio 6061-T6, forjado) | 11 |
| Figura 8. Carbon Revolution CR9 | 12 |
| Figura 9. HRE 3D+ printed titanium | 13 |
| Figura 10. Llenado de molde en el proceso de fundición inclinada | 15 |
| Figura 11. Secuencia de estirado del perfil de llanta | 16 |
| Figura 12. Una de las 5 piezas que componen la base de la llanta..... | 17 |
| Figura 13. Perfil de llanta (norma UNE 69026:2007)..... | 19 |
| Figura 14. Agujero de válvula de $\varnothing 11,3$, para válvula metálica. Llantas de aleación ligera (norma UNE 69026:2007) | 20 |
| Figura 15. Agujero de válvula de $\varnothing 11,3$, para válvula metálica. LLantas de aleación ligera (norma UNE 69026:2007) | 21 |
| Figura 16. Ferrari 250 GT Berlinetta Lusso (1962) y llantas de radio de alambre..... | 24 |
| Figura 17. Ford 1937 y llantas de acero prensado | 25 |
| Figura 18. Boceto de llanta | 25 |
| Figura 19. Llanta Renault..... | 25 |
| Figura 20. Llanta Bugatti La Voiture Noire..... | 25 |
| Figura 21. Vossen S17-16 (40 radios)..... | 26 |
| Figura 22. Vossen EVO-1 (10 radios o 5 dobles) | 26 |
| Figura 23. Diferentes tipos de concavidad para diferentes anchuras de llanta | 26 |
| Figura 24. Diferencia de ET según la concavidad de la llanta | 27 |
| Figura 25. Punta de flecha original..... | 27 |
| Figura 26. V de 3 radios..... | 27 |
| Figura 27. Multirradio de 20 radios..... | 27 |
| Figura 28. Evolución del diseño de “puntas de flecha” | 28 |
| Figura 29. Diferentes bocetos del resultado final de la llanta..... | 29 |
| Figura 30. Prueba de mecanizado en el diseño de llanta final..... | 29 |
| Figura 31. Diferentes tipos de concavidades..... | 29 |
| Figura 32. Bocetos del del diseño final para dos concavidades diferentes | 30 |
| Figura 33. Croquis y resultado del perfil o núcleo de llanta | 31 |
| Figura 34. Croquis y resultado de la base de llanta..... | 31 |
| Figura 35. Croquis y resultado del corte de forma de la base..... | 32 |
| Figura 36. Cortes para las diferentes alturas..... | 33 |
| Figura 37. Resultado tras la extrusión de los cortes..... | 33 |
| Figura 38. Redondeos de 2.5, 30 y 12 mm. | 33 |
| Figura 39. Medidas y resultado del agujero de la válvula | 34 |
| Figura 40. Roscas y tornillos para llantas de aleación ligera | 34 |
| Figura 41. Medidas y proceso de la ejecución de los agujeros de los pernos | 34 |
| Figura 42. Croquis y resultado del embellecedor de la llanta | 35 |

| | |
|---|----|
| Figura 43. Tapa o embellecedor de agujero de buje | 35 |
| Figura 44. Llanta cromada con diferentes embellecedores | 36 |
| Figura 45. Llanta con diferentes acabados (granate, oro y morado)..... | 36 |
| Figura 46. Presión de inflado y fuerza lateral ejercida por el talón del neumático..... | 37 |
| Figura 47. Distribución de la presión en el perfil de llanta | 38 |
| Figura 48. Distribución de la fuerza lateral ejercida por el neumático en la llanta..... | 38 |
| Figura 49. Creación mediante revolución del elemento para aplicar la carga | 39 |
| Figura 50. Distribución del peso | 40 |
| Figura 51. Diagrama del sólido libre en situación de frenada | 40 |
| Figura 52. Distribución del momento de frenado M_f , llanta sobre la llanta | 42 |
| Figura 53. Diagrama del sólido libre en situación de paso por curva..... | 43 |
| Figura 54. Distribución de la fuerza de rozamiento horizontal debida a la fuerza centrífuga | 44 |
| Figura 55. Aplicación de las condiciones de contorno | 45 |
| Figura 56. Tensión de Von Mises (MPa), magnitud de la deformada, escala x50 | 46 |
| Figura 57. Desplazamientos en mm (vista real del resultado de la deformada)..... | 47 |
| Figura 58. Tensión de Von Mises (MPa), magnitud de la deformada, escala x50 | 47 |
| Figura 59. Desplazamientos en mm (resultado real de la deformada)..... | 48 |
| Figura 60. Tensión de Von Mises (MPa), en situación de impacto (escala real)..... | 48 |
| Figura 61. Resultado del análisis de vida de la llanta en ciclos, situación de frenada con carga del 90%..... | 49 |
| Figura 62. Resultado del análisis de vida de la llanta en ciclos para la situación en curva con cargas del 75% | 50 |
| Figura 63. Cambio de estructura molecular en el proceso de estirado del aro | 51 |
| Figura 64. Estudio topológico 1 | 52 |
| Figura 65. Estudio topológico 2 | 53 |
| Figura 66. Estudio topológico 3..... | 53 |
| Figura 67. Estudio topológico 4 | 54 |
| Figura 68. Cambios en el rediseño..... | 55 |
| Figura 69. Tensión de Von Mises (MPa), magnitud de la deformada, escala x50 | 56 |
| Figura 70. Desplazamientos en mm (resultado real de la deformada..... | 56 |
| Figura 71. Tensión de Von Mises (MPa), magnitud de la deformada, escala x50 | 57 |
| Figura 72. Desplazamientos en mm (resultado real de la deformada)..... | 57 |
| Figura 73. Resultado del análisis de vida de la llanta en ciclos, situación de frenada con carga del 90%..... | 58 |
| Figura 74. Resultado del análisis de vida de la llanta en ciclos para la situación en curva con cargas del 75% | 58 |
| Figura 75. Medidas Audi RS5 | 68 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Dimensiones de llanta según anchura (norma UNE 69026:2007) | 20 |
| Tabla 2. Diámetro de llanta (norma UNE 69026:2007)..... | 20 |
| Tabla 3. Designación de resaltes (norma UNE 69026:2007)..... | 21 |
| Tabla 4. Desarrollo de resalte (norma UNE 69026:2007)..... | 22 |
| Tabla 5. Tipos de vehículos según el carácter de la designación..... | 23 |
| Tabla 6. Propiedades de la aleación de aluminio 6082-T6 | 45 |
| Tabla 7. Peso de los diseños | 55 |
| Tabla 8. Diferentes pesos según medidas para una llanta (Concaver-CVR1) | 59 |

| | |
|--|----|
| Tabla 9. Propiedades mecánicas de aceros aleados con carbono..... | 62 |
| Tabla 10. Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio y magnesio | 62 |
| Tabla 11. Propiedades mecánicas de diferentes fibras de carbono..... | 63 |
| Tabla 12. Propiedades mecánicas de aleaciones de titanio | 63 |

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se va a tratar el diseño de una llanta para turismo. Para el caso del trabajo se escoge el modelo de turismo Audi RS5 del que se facilitan las medidas de la llanta y del vehículo para los futuros cálculos.

El objetivo del trabajo es diseñar una llanta desde el inicio, comenzando por los bocetos y más adelante mediante la utilización de un software 3D en el que se realizará el diseño final y las pruebas de simulación para medir las tensiones y deformaciones a las que está sometida la llanta.

El primer paso será entender el tipo de mercado en el que se sitúa, analizando los tipos de llantas según el número de piezas, materiales y diferentes procesos de fabricación que se encuentran en el sector.

Una vez situados y con una idea clara de lo que se quiere y se puede hacer, el siguiente paso es analizar la normativa y los diferentes estilos de llanta que existen según el diseño, dibujo o forma, seguidamente se produce la lluvia de ideas inicial respecto al diseño de la llanta, se perfecciona y se lleva del papel al programa 3D teniendo en cuenta también la normativa vigente, en este caso se obedece a un conjunto de normas **UNE** pero también podrían haberse utilizado otras como la **DIN 7817** o las **ETRTO** (The European Tyre and Rim Technical Organisation).

Habiendo completado el diseño de la llanta se procede a la realización de los cálculos pertinentes y las simulaciones y se analizan los resultados obtenidos en ellas.

El último de los pasos es la optimización topológica de la llanta y su rediseño con el fin de obtener una reducción en el peso del diseño inicial sin comprometer demasiado los resultados de las tensiones y deformaciones iniciales, que deben de seguir siendo válidos.

La realización de este proyecto se efectúa con el fin de poner a prueba los conocimientos previos adquiridos en la titulación de Ingeniería Mecánica. Se trata de un ejercicio ingenieril de diseño de producto, que comprende tanto el diseño inicial, como la utilización de un software 3D de diseño y simulación y la comparación y selección de materiales y procesos de fabricación según las propiedades mecánicas que se deseen, teniendo también en cuenta el tipo de vehículo para el que está destinado el producto.

Por último, cabe destacar que para tanto para el dimensionado de la llanta, como para el cálculo de según qué fuerzas, ha sido necesario escoger un modelo de vehículo de referencia del que sacar algunas medidas indispensables para la realización de dicho proyecto, el modelo escogido ha sido un Audi RS5 debido a la facilidad a la hora de recabar información sobre el este.

1. ELEMENTOS y DEFINICIONES

Antes de ponernos a explicar los diferentes tipos de llantas, el diseño, las simulaciones y demás temas del proyecto, creo que es necesario pararse a explicar los diferentes elementos y medidas que vamos a estar nombrando a lo largo del trabajo. Para ello, creo que es igual, o más importante, el hecho de disponer de una imagen en la que poder fijarse para comprender de mejor forma todos los conceptos.

1.1 DEFINICIONES Y PARTES

- **Diámetro:** medida desde lo alto del asiento de talón y que se expresa en pulgadas.
- **Ancho:** distancia tomada desde los bordes internos de llanta y expresada también en pulgadas.
- **Offset, ET o desplazamiento de llanta:** distancia entre el plano medio del ancho de llanta y el plano de apoyo o montaje de la llanta. El offset puede tener un valor positivo, negativo o cero dependiendo de la concavidad y tipo de llanta. La medida del offset o ET suele darse en mm.
- **PCD o anclaje de llanta:** se compone de 2 números (Ej. 5x112), el primero referente al número de tornillos del que dispone la llanta puede ser 4,5,6... El segundo indica el diámetro de la circunferencia que pasa por el centro de los agujeros de los pernos, así, una llanta como la del ejemplo, 5x112, tiene 5 agujeros de perno dispuestos en una circunferencia de 112 mm de diámetro.
- **Buje:** orificio central que encaja con el buje del vehículo y que posiciona la rueda
- **Asiento talón:** zona de la llanta destinada al soporte radial del neumático.
- **Pestaña o resalte:** protuberancia en el perfil de llanta que proporciona un soporte lateral al neumático.
- **Agujero de válvula:** agujero en la llanta que aloja la válvula para inflar el neumático

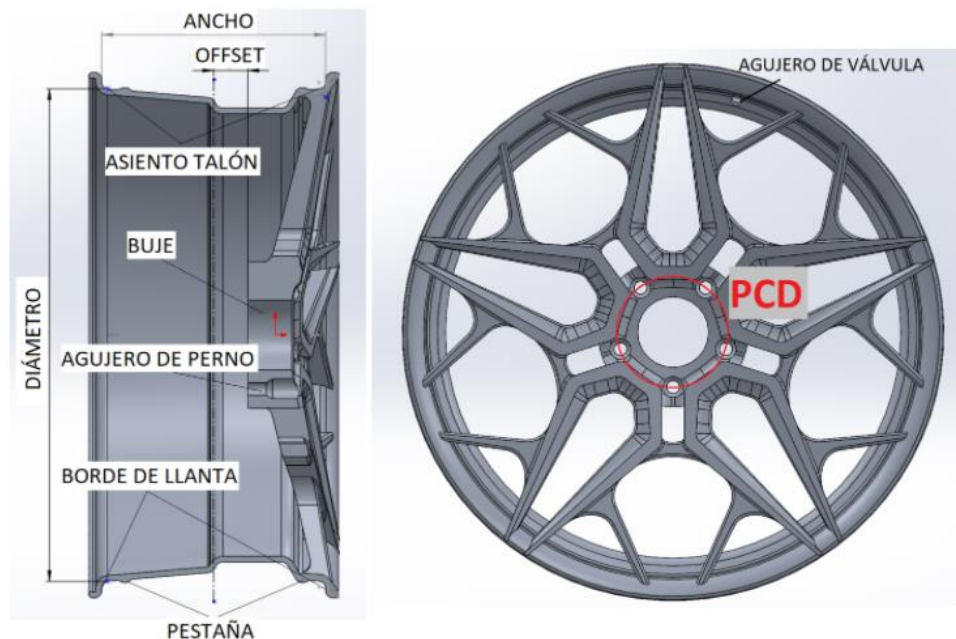


Figura 1. Elementos de la llanta

2. TIPOS DE LLANTA

2.1 NÚMERO DE PIEZAS

Previo al diseño de la llanta, es necesario documentarse de los tipos de llantas existentes según las dimensiones, número de piezas, materiales y formas. Se van a exponer entonces los diferentes tipos de llantas y, más adelante, en los siguientes apartados del proyecto, se darán las razones del por qué se eligen unos u otros.

Existen 3 tipos de llantas según el número de piezas de las que estén formadas, así pues, tenemos las llantas de 1 pieza o monobloque, 2 piezas y 3 piezas. Las diferentes piezas son unidas mediante tornillos y tuercas (a excepción de las monobloque ya que no llevan ningún tipo de unión) de alta resistencia a lo largo del perímetro de la llanta y están formadas por un núcleo (aro de llanta) y una base (parte exterior de la llanta), en el caso de 2 piezas, y un núcleo, garganta y base, en el caso de formarse por 3 piezas.

Las razones por las que encontramos llantas de más de una pieza son, primero por el costo a la hora de reparar la llanta. Al estar separada la base de la llanta del núcleo de la llanta, si alguna de las dos o tres partes sufre un daño, como pueda ser una deformación del aro o un golpe fuerte que pueda llegar a generar una fisura en la parte exterior de la llanta, se puede cambiar una de las dos/tres piezas por separado evitando el gasto de una llanta completamente nueva, cuyo coste, en el caso de ser de 2 o 3 piezas es bastante elevado.

La segunda razón por la cual encontramos llantas de varias piezas son las dimensiones de la rueda. Sabemos que cuando se cambian unas llantas, además de buscar un rendimiento superior para el coche, en cuanto a resistencia de la llanta, si se quiere entrar a circuito por ejemplo, o algo más trivial como pueda ser la reducción de peso, hay un factor muy importante como es la estética, más en estos tiempos que vemos diseños de lo más extravagantes en el mundo del automóvil, pues bien, si lo que se quiere es una rueda con dimensiones enormes, con requerimientos de un ET negativo y una garganta muy profunda o cóncava por ejemplo, es necesario que la llanta esté formada por varias piezas.

A continuación, se muestran los 3 tipos de llanta según el número de piezas y sus despieces:



Figura 2. Llanta monobloque (Vossen EVO-3R),

Figura 3. Llanta de 2 piezas (Svipe 1 AP2X), base y núcleo de aleación de aluminio 6061-T6 y tornillería de titanio,

Figura 4. Llanta de 3 piezas (Svipe R6008 AP3X), base, núcleo y garganta de aleación de aluminio 6061-T6 y tornillería de titanio.

2.2 MATERIALES

Existen multitud de materiales con los que puede ser fabricada una llanta, la elección del material está vinculado al uso de la llanta o los requerimientos de la misma y al precio final del producto que, además de depender del material, está ligado al proceso de fabricación.

- **ACERO**

El primer material del que vamos a hablar es el acero. Este tipo de llanta es la más barata de todas, primero por su barato proceso de fabricación, segundo por sus propiedades y tercero por sus diseños.

Se trata de una llanta resistente pero muy pesada, una de las ventajas es que, si sufren algún tipo de golpe, gracias a su ductilidad, la llanta termina por doblarse en vez de fracturarse, esto las hace también más seguras. El tamaño de la llanta también es más limitado, llegan a unas 20" de diámetro con anchuras de hasta 6,5", dimensiones que hacen que la llanta pueda ser resistente ya que, si su tamaño fuese mayor, las propiedades del aro se verían comprometidas. Las llantas de acero eran muy populares hace unas décadas, pero ahora se ven cada vez menos y están mayormente destinadas a vehículos que deben cargar altos pesos y vehículos de gama baja. Su precio es muy reducido y la convierte en la llanta más económica del mercado, con un coste de unos 40 euros por llanta.



Figura 5. Llanta de aleación de acero (TREBL R-1724)

- **ALEACIÓN**

Para hablar de las llantas de aleación debemos tener en cuenta que, la calidad, prestaciones y precio de la misma están íntimamente relacionados con el proceso de fabricación al que están sometidos y el tipo de materiales del que están compuestas. Como más adelante se hablará de los diferentes procesos de fabricación existentes, se van a separar las llantas de aleación en dos grandes grupos, las llantas de aleación de aluminio y de magnesio.

Comenzando por las llantas de aleación de aluminio, poseen grandes propiedades, algunas compartidas con las de magnesio y que las diferencian de las del acero, entre ellas encontramos la dureza y rigidez que reducen la desviación de las ruedas en curvas y las hace más resistentes a impactos. Gracias a la aleación de metales ligeros y además a la gran variedad de formas y diseños, permiten una mejor disipación del calor en el interior de la llanta y en las pinzas y discos de freno. Ofrecen mayor durabilidad ya que son menos susceptibles a las condiciones climáticas y, por último,

son menos pesadas que las de acero (depende también del tamaño de llanta, en llantas de poco diámetro y ancho, el peso es parecido o incluso superior), hay que tener en cuenta que todas estas propiedades dependen de los elementos aleantes y del proceso de fabricación de la llanta, que puede ser fundición o forja. Las llantas de aleación de aluminio son actualmente bastante comunes en los vehículos sobre todo de media y alta gama.

Las llantas de aleación de magnesio, como se ha dicho, comparten algunas de sus propiedades con las de aleación de aluminio e incluso son mejores en algunas de ellas, son todavía más duras y resistentes, la disipación de calor es igual e incluso mayor que en las de aluminio y su peso es aproximadamente un 20-25% menor. Uno de los inconvenientes en su resistencia a la corrosión, aunque, a lo largo de los años, las mejoras en el tratamiento de superficies de magnesio han resuelto gran parte de estos problemas, históricamente otra de las desventajas de este material ha sido la inflamabilidad, problema que, actualmente, ha sido solucionado gracias a la mejora de las aleaciones.

Las llantas de aleación de magnesio tienen a priori mejores propiedades incluso que las de aleación de aluminio, esto evidentemente también influye en el precio de las mismas, por ello estas llantas, aunque pueden conseguirse para cualquier vehículo, su uso está destinado a vehículos de competición como pueden ser la F1, MotoGP o competiciones de rallys.

El precio de las llantas de aleación de aluminio, al igual que sus propiedades, dependen del proceso de fabricación y del tipo de aleación, son más asequibles que las de aleación de magnesio y se mueven en precios que van desde los 100 hasta el precio que uno desee gastar, ya algunas marcas incluso fabrican estas de manera personalizada. En cuanto a las llantas de aleación de magnesio, los precios que se encuentran en el mercado son de a partir de unos 2000 euros.



Figura 7. Vossen EVO-2R (Aleación de aluminio 6061-T6, forjado)



Figura 6. SBW COY (Aleación de magnesio ZK60-T1, forjada)

Por lo general, las aleaciones de aluminio, utilizadas para la fabricación de llantas, son sometidas a un tratamiento térmico T6, que se trata de un tratamiento térmico de

solución y envejecimiento artificial mientras que las aleaciones de magnesio son sometidas a un T4, que supone que el envejecimiento es natural.

Algunas de las aleaciones de aluminio y magnesio que son comúnmente utilizadas en el sector del automóvil para la fabricación de llantas son las siguientes:

-Aleaciones de aluminio: 6061-T6, EN AW 6082-T6. Estas aleaciones están formadas por elementos como el silicio, hierro, cobre, magnesio, etc.

-Aleaciones de magnesio: AZ80A-T4, AZ91-T4, ZK60A-T1. Las aleaciones de magnesio están designadas generalmente por 2 letras, que equivalen a los 2 elementos de mayor concentración en la llanta, seguido de 2 números, que indica los porcentajes de estos 2 elementos y una letra más después de estos 2 dígitos que indican si uno de los elementos ha sido modificado.

Por ejemplo, la aleación AZ91-T4 tiene como elementos principales el aluminio (9%) y el zinc (1%).

- **FIBRA DE CARBONO**

Las llantas de fibra de carbono son uno de los últimos avances en materia automovilística referida a las llantas. Estas llantas las montan los turismos de mayor gama, marcas del más alto nivel como Koenigsegg, Lamborghini o Porsche las están implementando en algunos de sus mejores y más preciados vehículos.

Las propiedades de estas llantas, alta resistencia, máxima rigidez, dureza, resistencia a la corrosión, disipación del calor y un menor peso incluso que las llantas de aleación de magnesio debido a su baja densidad. Son llantas que, por el momento, no se pueden conseguir de manera sencilla dada la escasez de fabricantes y por las medidas de llanta disponibles en el mercado. El diseño de estas llantas es más simple que el de las llantas de aleación ya que por su proceso de fabricación no pueden obtener formas del todo complejas y se limitan a una llanta clásica de radios.



Figura 8. Carbon Revolution CR9

- **ALEACIÓN DE TITANIO**

La aleación de titanio es quizá el material más innovador de todos los presentados, tan solo es utilizado por una marca, HRE, quienes apuestan por esta tecnología para el futuro.

Las características más notables de este material son su alto módulo de Young y límite elástico, muy superiores al resto de materiales. Estas dos propiedades hacen que la pieza que se fabrique tenga una resistencia a la deformación extraordinaria.

Por otra parte, si a esto le añadimos la baja densidad propia del material, tenemos una llanta que necesita menos material que una llanta de aleación convencional, ya que goza de mejores propiedades mecánicas y, además, este material es de baja densidad, por tanto, la reducción de peso es notable.

Este tipo de llanta, como se explicará más adelante, es muy exclusivo por la innovación que ha supuesto en el mercado y además por el proceso de fabricación con el que se realiza.



Figura 9. HRE 3D+ printed titanium

Las propiedades de todos los materiales expuestos en este apartado se encuentran situadas en las tablas del Anexo 1.

2.3 PROCESOS DE FABRICACIÓN

Son varios los procesos de fabricación de una llanta dependiendo del material del que estén compuestas, por ello se van a diferenciar los procesos según los materiales también, primero se explicará el proceso de fabricación de las llantas de acero, después los diferentes procesos de fabricación para las llantas de aleación y por último el de las llantas de fibra de carbono.

- **ACERO**

Se parte de una plancha de acero que, previamente, habrá sido sometida a un proceso de laminación, dejando un espesor de unos 4mm. La chapa resultante es cortada en dos secciones mediante una prensa, la primera trata de un corte transversal a la chapa que posteriormente se convertirá en el perfil o núcleo de la llanta. El segundo corte, en forma circular, corresponde a la base de la llanta.

El primer corte pasa por un proceso de curvado que dota de una forma cilíndrica a la pieza, posteriormente es soldada y pasa por un proceso de eliminación de la posible escoria y material sobrante procedente de la soldadura, seguidamente, la pieza es perfilada mediante 3 fases de rodillos para tener la forma adecuada del perfil.

El segundo corte, inicialmente, pasa por varios procesos de embutición, para darle la forma deseada a la base y, posteriormente, por diferentes procesos de punzonado, primero para realizar el agujero del buje, el siguiente para realizar los agujeros de los pernos y, por último, varios agujeros en la base con el objetivo de reducir el peso de la llanta.

Las dos piezas son unidas mediante soldadura y son recubiertas con imprimaciones y pinturas que las hacen resistentes a la corrosión.

Cada pieza por separado antes de ser soldada pasa por un proceso de verificación, se toman diferentes medidas y se comprueban tolerancias para ver si cumplen los requisitos.

- **ALEACIONES**

Existen 3 tipos de procesos para llantas construidas mediante aleaciones ligeras: fundición, forjado y flow forming.

Fundición: las llantas de fundición se fabrican mediante un proceso de fundición a baja presión, la aleación se transporta mediante la aplicación de presión de gas, desde el horno de calentamiento a través de un tubo ascendente hasta el molde o coquilla y, una vez solidificado, se enfría en agua. Después de esto, se lleva a cabo un control visual de calidad, se elimina la rebaba y se mide la llanta.

Posteriormente la llanta se examina mediante rayos X con el objetivo de comprobar si se pudiesen haber formado bolsas de aire, grietas u otras imperfecciones.

El siguiente paso es hacer el agujero del perno con un taladro.

Para conseguir estructuras más resistentes la llanta pasa por un tratamiento térmico con el objetivo de homogeneizar la estructura del material y mejorar así sus propiedades mecánicas.

Para ultimar la forma de la llanta, la pieza pasa por un mecanizado para mejorar el acabado y cumplir con las tolerancias necesarias.

Por último, para conseguir el mejor acabado, las llantas pasan por un proceso de cepillado, barnizado y refrentado con el objetivo de eliminar cualquier posible rebaba que haya podido quedar después del proceso de mecanizado y proteger las llantas contra la corrosión.

Otros procesos de fundición son utilizados en la fabricación de llantas como, por ejemplo, la fundición inclinada. En este proceso, el metal se vierte en una taza de sujeción mientras el molde está en su posición horizontal. Con un tiempo de ciclo preestablecido, la máquina de fundición eleva la rueda a una posición vertical, lo que permite que el metal entre en la cavidad a una velocidad de vertido lenta y continua. Tras esto, la pieza también debe pasar otros procesos como los anteriores, controles de calidad, mecanizado, eliminación de rebabas, etc.

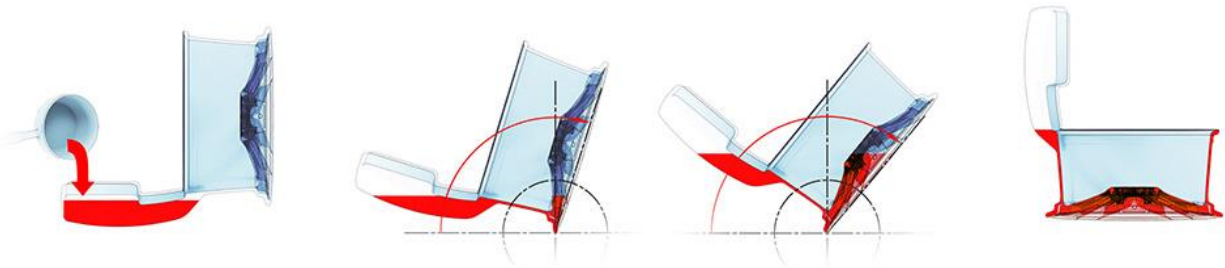


Figura 10. Llenado de molde en el proceso de fundición inclinada

Forjado: Las llantas forjadas poseen grandes propiedades mecánicas gracias a su proceso de fabricación. El proceso comienza con grandes bloques de aleación de forma cilíndrica que son cortados en bloques más pequeños para su manipulación. El bloque es calentado a unos 480°C, se procede entonces al forjado mecánico, en forja rotativa, que consta de 2 o 3 prensados y que aplica en torno a 4000 toneladas de fuerza, este proceso dota de grandes propiedades la pieza ya que mejora la microestructura y macroestructura del material y orienta las fibras.

Para la creación del perfil de llanta, la pieza, después de enfriarse, es transportada para ser moldeada en frío. Se coloca la rueda en un eje giratorio que hace las veces de macho y tiene la forma del perfil de llanta y se estira la pieza mediante unos rodillos dándole la forma adecuada. Posteriormente, la pieza es calentada a 530°C aproximadamente (dependiendo de la aleación) y enfriada en agua.

A continuación, se procede a la eliminación de las rebabas y después se mecaniza la llanta, se dibuja su forma y se realizan los agujeros de los pernos. Antes de pasar por el último proceso de cepillado, barnizado y pintado, las llantas se someten a un control de calidad para asegurar que las dimensiones y tolerancias son las correctas.

Por último, como hemos dicho, las llantas pasan por diferentes procesos para dejar con un acabado perfecto la llanta.

Flowforming o conformación por estirado: este proceso tiene como objetivo mejorar las propiedades del aro de las llantas de fundición mediante la alteración de la estructura molecular. La pieza se somete a un proceso de fundición en el que el molde no tiene la forma del aro de la llanta, sino que se asemeja más a la forma de la pieza que sale de un proceso de forja como el comentado anteriormente. Esta pieza moldeada se sumerge en agua para endurecer la parte exterior de la llanta (o dibujo) y la parte coloreada en rojo en la *Figura 11*, sin enfriar en agua, es sometida al mismo proceso de estirado o laminado mediante rodillos, que las llantas forjadas. Las posteriores operaciones son las mismas que las llantas de fundición comunes, eliminación de rebaba, comprobación con rayos X, tratamiento térmico y mecanizado.

El proceso de flowforming tiene la cualidad de direccionar el grano de la microestructura y hacer así mucho más resistente el perfil o aro de llanta, además se consiguen espesores menores y por tanto también se reduce el peso de la llanta en comparación con las llantas moldeadas convencionales.



Figura 11. Secuencia de estirado del perfil de llanta

- **FIBRA DE CARBONO**

Las llantas de fibra de carbono están fabricadas mediante procesos muy diferentes a los comentados anteriormente, la primera de las diferencias es que se trata de una fabricación que casi podríamos describir como artesanal. Es importante tener en cuenta para este proceso el tipo de fibra que se utiliza es una fibra llamada “pre-impregnada”, se refiere a una fibra de refuerzo que ha sido impregnada con una resina o matriz, con anterioridad al momento de su uso, que se comporta como un tejido y que necesita de un proceso de curación con calor.

En un primer lugar la matriz se cura solo parcialmente y tiene un estado pegajoso, cuando la resina se lleva a temperaturas elevadas, vuelve a un estado líquido momentáneamente antes de endurecerse completamente.

La fibra es cortada en piezas de diversos tamaños y formas y son colocadas, una a una, por un operario, en un molde con la forma de la llanta. Después de este proceso, la llanta es envuelta al vacío en plásticos y metida en un horno para otorgar la dureza y rigidez características de este material. Por último, se le quitan las posibles rebabas y se le da un acabado brillante que protege el material de las inclemencias del tiempo y la corrosión.

- **TITANIO CON IMPRESORA 3D**

Es el proceso más innovador de los mencionados anteriormente y además el más exclusivo también. *HRE* es la marca responsable del desarrollo de este tipo de llanta, de la mano de GE Additive, única empresa del mundo en este momento en comercializar máquinas basadas en el proceso de EBM o impresión 3D de fusión por haz de electrones. Las aplicaciones de esta tecnología están centradas en los sectores médico y aeronáutico, y su uso va desde el desarrollo de implantes a piezas de motor o álabes de turbina.

El proceso de fabricación comienza con el modelado 3D a través de un programa CAD, como podría ser el caso de cualquiera de los procesos anteriores, después el modelo 3D pasa por un software de corte llamado Slicer 3D, este se encarga de dividir el modelo en láminas correspondientes a las diferentes capas de la pieza. La máquina cuenta con un tanque de polvo, en este caso aleación de titanio, que esparce una capa fina de polvo previamente calentada, esta capa de polvo es atacada mediante un haz de electrones cuyo objetivo es que las partículas de polvo se fusionen allá por donde pasa el haz. Este proceso debe hacerse al vacío para evitar la oxidación de las partículas de polvo debido al calor del haz, el proceso anterior se repite capa por capa,

una vez fusionada la primera capa de polvo, se esparce de una nueva capa de polvo y el haz vuelve a actuar, así hasta completar el modelado de la pieza. Una vez llevado a cabo este primer paso, un operario coge la pieza y elimina el polvo sobrante con una máquina de aire comprimido y un cepillo y, posteriormente, la pieza pasa por un tratamiento térmico para eliminar las tensiones que hayan podido generarse en la pieza. Particularizando más en el diseño de la llanta, se trata de una llanta de 2 piezas cuya base está compuesta por 5 piezas iguales fabricadas mediante el proceso de EBM, unidas mediante uniones atornilladas que son, a su vez, los agujeros de los pernos de la llanta y, el aro de llanta, fabricado de fibra de carbono. El desperdicio de material en este proceso de fabricación es mínimo, entorno al 5%, debido a que gran parte del polvo sobrante puede reutilizarse.

La utilización de esta tecnología supone varias ventajas, la primera el tiempo de fabricación de la pieza, muy inferior al de las llantas forjadas, la segunda, los diseños que pueden llevarse a cabo con esta tecnología no tienen límites y pueden ser de una elevada complejidad y además de todo esto las propiedades mecánicas del material son extraordinarias, su alto módulo elástico ($E > 100 \text{ GPa}$) y límite elástico ($G > 424 \text{ Mpa}$), hacen que sea un material muy resistente con una densidad muy baja.

El peso de esta llanta para unas dimensiones de 20"/9" es de unos 7.5 Kg, lo cual, para una llanta con las propiedades mecánicas de esta, es muy destacable, más aún, comparándola con una llanta forjada, con muy buenas propiedades mecánicas también, pero que con esas medidas rondaría un peso aproximado de 13 Kg.



Figura 12. Una de las 5 piezas que componen la base de la llanta

2.4 ELECCIÓN

Habiendo explicado los tipos de llantas existentes, diferentes materiales y procesos de fabricación, es hora de elegir el tipo de llanta que va a ser diseñada.

La llanta va a ser de una pieza ya que simplifica aspectos importantes a la hora de proyectar el diseño en el programa y hacer la simulación de elementos finitos, algunos de estos son, el caso de las uniones atornilladas entre el núcleo y base de llanta en llantas de más de una pieza y la normativa a seguir a la hora de diseñar el perfil de llanta.

El material seleccionado es una aleación de aluminio 6082-T6, la elección de esta aleación se debe a las grandes propiedades mecánicas que posee, valores altos de módulo y límite elásticos, ductilidad y una baja densidad propia de las aleaciones de aluminio.

Se descartan otros materiales, como la fibra o la aleación de titanio debido a que no sería del todo realista diseñar una llanta que, de momento, solo está al alcance de unos pocos, no tanto en el tema económico, que también, si no en los procesos de fabricación de estos materiales.

El proceso de fabricación seleccionado es el de forja, este proceso de fabricación, como se ha explicado anteriormente, mejora las propiedades del material con el que se trabaja debido a las deformaciones y tratamientos térmicos a los que se somete la pieza.

Conseguir los valores de las propiedades mecánicas de un material que ha sido sometido a estos procesos no es algo trivial ya que es necesaria la realización de ensayos experimentales para obtener dichos valores, por ello más adelante se comentará cómo se han realizado las simulaciones.

Al seleccionar este material y proceso de fabricación, aleación de aluminio de altas prestaciones y proceso de forja, hay que situar la llanta en un mercado "premium", y de salir a la venta, el producto final rondaría los aproximadamente 600 o 700 euros por llanta. Algunas de las marcas que se sitúan en este tipo de mercado son BBS, Vossen o Vertini entre otras.

3. NORMA

Dentro de la norma encontramos dos secciones, la primera trata sobre el dimensionado del perfil de llanta que viene dado por la anchura y diámetro de la llanta que se diseña, además de tener en cuenta otros factores como el tipo de vehículo o neumático que se va a montar en la llanta.

La segunda parte de la norma es la designación de la llanta, al igual que los neumáticos, las llantas son designadas con un código en el que se indican las medidas y forma del perfil para saber si pueden ser montadas o no en cada vehículo.

3.1 DIMENSIONADO

Como ya se ha explicado en la introducción del proyecto, existen diferentes normas referentes al tema del dimensionado de llantas, en este caso se ha utilizado la norma UNE ya que es la que pone a disposición la universidad.

Las normas utilizadas para este proyecto han sido las normas UNE 69026, 69018 y 69012. Existen diferencias dependiendo del vehículo para el que está destinada una llanta, como el proyecto trata sobre una llanta para turismo, no se van a explicar las distintas medidas o criterios entre la llanta que tratamos y otras como podrían ser para vehículos agrícolas, motocicletas o vehículos pesados.

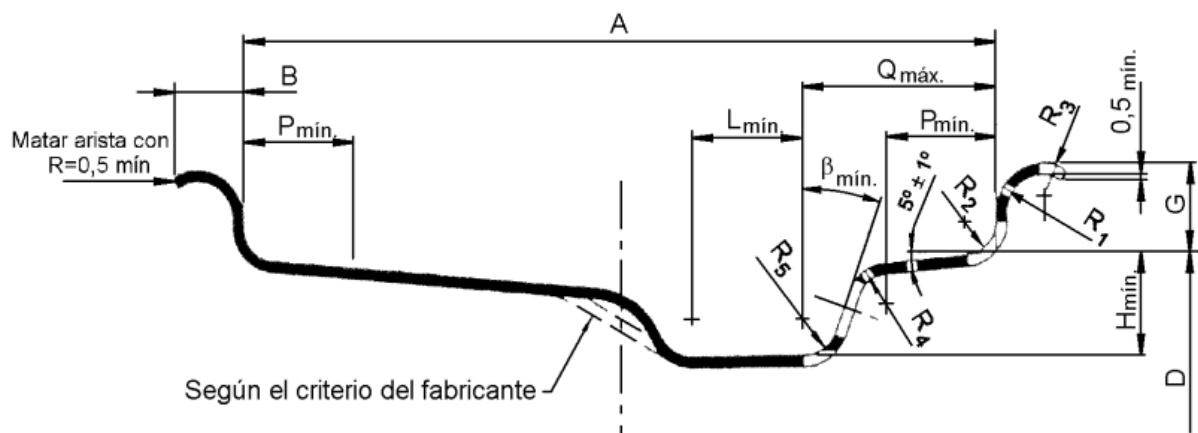


Figura 13. Perfil de llanta (norma UNE 69026:2007)

Lo primero es ver la representación de lo que es un perfil básico de llanta y las diferentes medidas a tener en cuenta (norma UNE 69026:2007).

Hay que tener en cuenta que, aunque sean muchas las medidas a tener en cuenta, las medidas más representativas, y en las que están basadas el resto, son la anchura y diámetro de la llanta.

Antes se explicaba que la llanta que se está diseñando es para un vehículo en particular, el Audi RS5, pero más bien es una referencia ya que la misma llanta puede ser instalada en diferentes vehículos, pues bien, el hecho de tomar una referencia es la elección de la anchura y diámetro de la llanta, pues es a partir de estas 2 cotas que podemos obtener el resto de dimensiones.

El vehículo seleccionado calza unas llantas de 20" de diámetro y 9" de ancho.

Las medidas de diámetro y anchura pueden variar según la llanta, pero existen unas medidas ya estipuladas. El diámetro de llanta varía de pulgada en pulgada y el ancho de llanta varía de media en media pulgada, así podemos encontrar llantas desde 10, 12,13 hasta incluso 24 pulgadas de diámetro (en turismos) y de anchuras desde 3, 3.5...hasta las 13.5 pulgadas.

| Código de anchura | Medidas (mm) | | | | | | | | | | | |
|-------------------|--------------|-------|------|----------|-------|------|----------|------|------|----------------|----------------|------|
| | A | | B | | G | P | H | L | Q | R ₁ | R ₂ | β |
| | | | mín. | máx. (1) | ± 0,6 | mín. | mín. (2) | mín. | máx. | mín. | máx. | mín. |
| 9J | 228,5 | ± 1,5 | 11 | 15 | 17,3 | 19,5 | 17,3 | 22 | 45 | 9,5 | 6,5 | 20° |

Tabla 1. Dimensiones de llanta según anchura (norma UNE 69026:2007)

| 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 |

Tabla 2. Diámetro de llanta (norma UNE 69026:2007)

En referencia al agujero de la válvula, la norma distingue diferentes tipos de ranuras: según el tamaño del agujero, el material de la llanta y por último el montaje de esta.

Dependiendo del diámetro del agujero de válvula distinguimos 2 tamaños, uno más pequeño de 11,3 mm y otro algo más grande, de 15,7 mm.

Según el material del que esté fabricada la llanta tenemos 2 grandes grupos, agujeros para llantas de chapa de acero y para llantas de aleación ligera.

Por último, según el montaje y el tipo de válvula, existen 3 tipos de agujeros de válvula, el primero para llantas que montan neumáticos sin cámara, llamadas "tubeless", el segundo para neumáticos con cámara y por último el agujero para válvulas snap-in, estos últimos con algún requerimiento más en el diseño de la ranura. Esta última categoría tiene mucha relación con el tipo de vehículo para el que está diseñada la llanta ya que, no todos los vehículos montan un neumático con cámara o sin ella, en este caso se trata de una llanta para turismos y por tanto, salvo excepciones, como algún todoterreno 4x4, el neumático que debería de montar posteriormente es un neumático sin cámara.

En este caso, por tanto, se trata de una llanta tubeless, de aleación ligera, y que se ha optado por un agujero de diámetro 11,3 mm, por tanto, la norma es la siguiente.

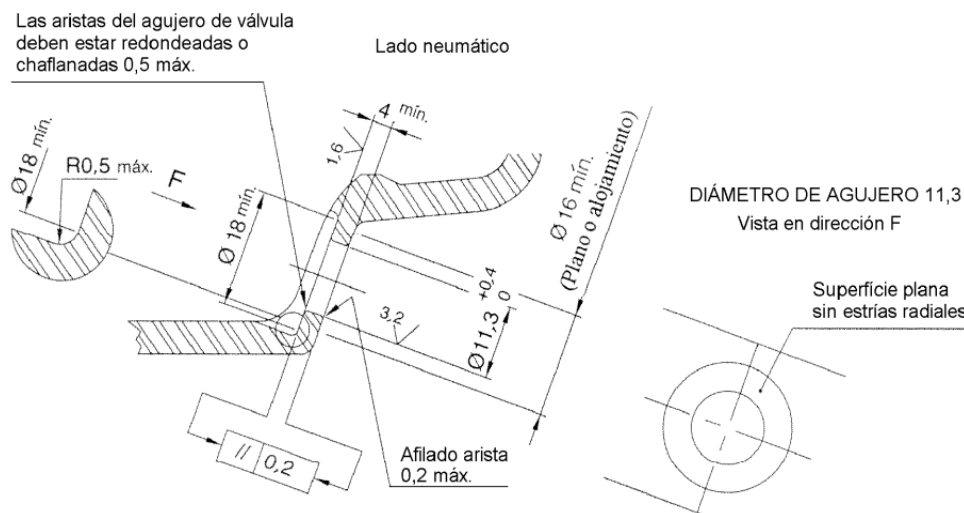


Figura 14. Agujero de válvula de $\varnothing 11,3$, para válvula metálica. Llantas de aleación ligera (norma UNE 69026:2007)

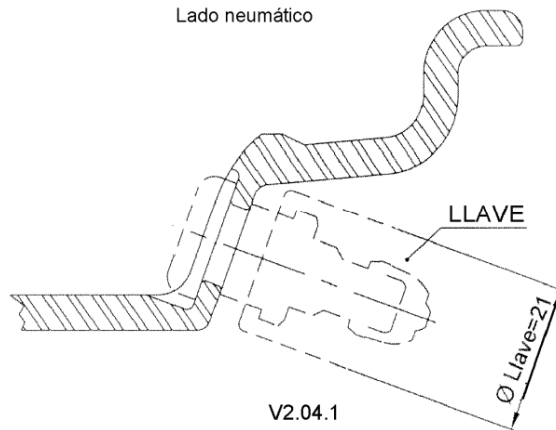


Figura 15. Agujero de válvula de $\varnothing 11,3$, para válvula metálica. Llantas de aleación ligera (norma UNE 69026:2007)

Una vez distinguidas también las llantas según el montaje (neumático con y sin cámara), hay que tener en cuenta que las llantas tubeless deben estar provistas de resaltes de seguridad para su correcto montaje.

Según la norma, existen 6 tipos de llantas, según la forma encontramos 3 tipos, resalte redondeado, plano y redondeado extendido y según el número de resaltes encontramos 2 grupos, con 1 resalte (si solo se dispone de un resalte siempre se sitúa en el lado exterior) y con 2 resaltes, uno en el lado exterior y otro en el interior. A continuación se muestra una tabla con la designación, la forma de resalte según el lado (externo o interno) y el marcado, que es la manera de nombrar el tipo de llanta.

| 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 |

Tabla 3. Designación de resaltes (norma UNE 69026:2007)

Todos los resaltes llevan cotas asociadas a su forma, como es normal, ya que cada uno de ellos es diferente, pero existe una medida, que aparece en todos los tipos de resalte, llamada desarrollo del resalte, que se calcula como πD , siendo el diámetro del punto más alto del resalte, y que indica la altura del resalte.

| 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 |

Tabla 4. Desarrollo de resalte (norma UNE 69026:2007)

Al tratarse de una llanta, como veremos más adelante en la parte de diseño, de dimensiones de diámetro y ancho considerables, normalmente destinadas a vehículos más potentes, se ha optado por un perfil H2, de dos resaltes redondeados, para tener un mejor acople del neumático en la llanta, que sabemos que va a someterse a fuerzas altas.

3.2 DESIGNACIÓN

La mejor manera de plantear este apartado es poner un ejemplo e ir explicando uno a uno los términos que aparecen en él, así pues, el ejemplo que se va a poner es el correspondiente a la llanta que se trata en el proyecto.

9.0Jx20H2 (ET35, 5x112)

-El primero de los términos se refiere a la anchura del perfil en pulgadas, en este caso **9.0"**.

-El segundo término, en este caso una letra, hace referencia al tipo de vehículo al que está destinada una llanta, en este caso **J**, significa que la llanta está fabricada para un turismo. Existen varios tipos de vehículos para los que puede estar diseñado una llanta y aparecen explicados en la siguiente tabla.

| | |
|-------|---|
| A | Motocicletas, bicicletas, ciclomotores, scooter, camiones ligeros, camiones, carretillas elevadoras |
| B | Turismos antiguos con llantas de 3" a 6" de ancho |
| L, AG | Vehículos agrícolas |
| MT | Motocicletas |
| F | Camiones, camiones ligeros, carretillas elevadoras |

| | |
|---------|------------------------------|
| TG | Maquinaria de obras públicas |
| S, T, V | Vehículos industriales |
| J | Turismos |
| JJ | Todoterrenos |

Tabla 5. Tipos de vehículos según el carácter de la designación

-El tercero de los términos representa el diámetro de llanta en pulgadas, en la llanta del proyecto serán **20"**.

-El cuarto término, **H2**, determina el tipo de perfil que tiene la llanta, como se ha visto en la parte del dimensionado existen varios tipos de perfil según su forma, en este caso tenemos un perfil H2 (2 resaltes), que sitúa la base honda de la llanta asimétricamente.

De ser un perfil en el que la base honda se sitúa simétricamente, la designación vendría seguida por **-S**, en este caso, de perfil H2, podría ser por ejemplo **H2-S**.

-Por último, aunque no viene como designación en la norma, el fabricante debe especificar cuál es el ET y PCD de la rueda ya que, sin estas dos medidas, no se puede saber si la llanta puede ser instalada en el vehículo.

4. DISEÑO

A la hora de elegir el diseño del dibujo de la llanta, hay que valorar algunos aspectos importantes como la concavidad de la llanta o el tipo de diseño que va a inspirar los bocetos.

4.1 HISTORIA

Las llantas han sufrido diferentes cambios a lo largo de los años, bien por los procesos de fabricación, que se han ido mejorando a lo largo de los años, o bien por las nuevas tendencias, diseños o modas que han ido apareciendo. Las primeras llantas, llantas de radios de alambre, estaban compuestas por una infinidad de radios que daban rigidez a la llanta, después de los radios aparecieron las llantas de chapa, y se empezaron a comercializar un tipo de llanta de chapa, sin ningún tipo de perforación, que constaba de una parte exterior de algún color y una pieza central cromada. A partir de aquí empezaron a fabricarse las llantas de aleación de conocemos actualmente, en un principio con diseños muy simples hasta los que se están comercializando en estos momentos.

- **Llantas de radios de alambre**

Las llantas de radios de alambre fueron comercializadas para los automóviles a partir del año 1907, su auge duró poco ya que, a finales de los años 20, la mejora en las llantas de acero prensado, más baratas, supuso la sustitución de estas. Las llantas de radios, más caras, pero a su vez menos pesadas, quedaron relegadas al mercado de los coches de mayor gama de entonces y actualmente son utilizadas sobre todo para motocicletas.

Aunque se siguen fabricando llantas de este tipo, para coches clásicos, se diferencian con las que se fabricaban entonces por ejemplo en su montaje y desmontaje.

Marcas como Ferrari montaron llantas de radios de alambre hasta el año 1967, cuando empezaron a fabricarse las primeras llantas de aleación.



Figura 16. Ferrari 250 GT Berlinetta Lusso (1962) y llantas de radio de alambre

- **Llantas de acero prensado**

Las llantas de acero prensado aparecieron a finales de los años 20 y, gracias a su reducido precio, sustituyeron a las llantas de radios de alambre. Las llantas de acero prensado de entonces solían diferenciarse por llevar la parte central cromada y el círculo exterior de la llanta de algún color, que en un principio fue negro pero que, más adelante, fue pintándose de multitud de colores.



Figura 17. Ford 1937 y llantas de acero prensado

- **Llantas radiales**

Las llantas radiales son las que conocemos actualmente como llantas de aleación. Los diseños de estas llantas son muy variados, pero realmente la base siempre es una llanta de radios en los que los estos pueden tener diferentes formas o distribuirse de maneras diferentes. Además de las formas y distribuciones, también entra en juego el número de radios de los que está dispuesta la llanta, las hay desde 4 o 5 radios, hasta llantas que intentan imitar o, dar el efecto de una llanta de radios de alambre, que superan incluso los 40 radios.

En los últimos años, han aparecido diseños de llantas que intentan dar un efecto diferente, con formas más complejas, que dan la sensación de alejarse de las formas tradicionales de radios.

En la siguiente imagen puede apreciarse como, con una base general de diseño parecida, como la que aparece a la derecha, se pueden conseguir resultados muy diferentes, en este caso la comparativa es muy exagerada ya que se compara una de las llantas que monta la marca Renault, en sus actuales vehículos, con la llanta de uno de los vehículos más exclusivos de la marca Bugatti.

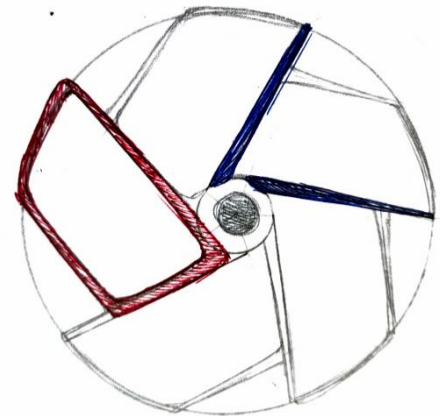


Figura 18. Boceto de llanta



Figura 19. Llanta Renault



Figura 20. Llanta Bugatti La Voiture Noire

De igual manera, las llantas de radios convencionales pueden estar dispuestas en radios simples, dobles e incluso triples, la base seguirá siendo una llanta de un número radios determinado, 5 por ejemplo, o distribuidas de manera pentagonal, pero el número de radios será de 10 en el caso de que se trate de una llanta de radios dobles.



Figura 21. Vossen S17-16 (40 radios)

Figura 22. Vossen EVO-1 (10 radios o 5 dobles)

- **Concavidad**

El siguiente factor influyente en el diseño de la llanta es la concavidad o profundidad de la de la misma. La concavidad de una llanta puede ser muy diferente dependiendo del diseño y de lo que se pretenda con ese diseño, lo más normal en llantas que montan los vehículos de serie es una llanta con muy poca concavidad o ninguna, esto se debe a que cuanto mayor es la concavidad de la llanta, mayor debe ser el tamaño de la llanta y por tanto se necesitan mayores dimensiones de neumático. Además, si tenemos una llanta de una anchura determinada, por ejemplo, 8J, que corresponde 203mm, una mayor concavidad significará, un menor ET y, por tanto, una vez montada en el coche, sobresaldrá más de este, pudiendo llegar a rozar con las salpicaderas.



Figura 23. Diferentes tipos de concavidad para diferentes anchuras de llanta

La concavidad también acepta diferentes formas, en la imagen anterior se aprecia como la llanta, inicialmente plana o sin concavidad, cuando se acerca al centro, a los agujeros de los pernos y el buje, se produce una curva, bastante pronunciada, con la que se obtiene el ET deseado, sin embargo, en la imagen que aparece a continuación,

donde se muestran dos concavidades con inclinaciones diferentes, se puede observar como la curva aparece desde el exterior de llanta hasta que llega al buje, lo que provoca también un efecto visual que hace parecer la llanta más ancha de lo que realmente es.

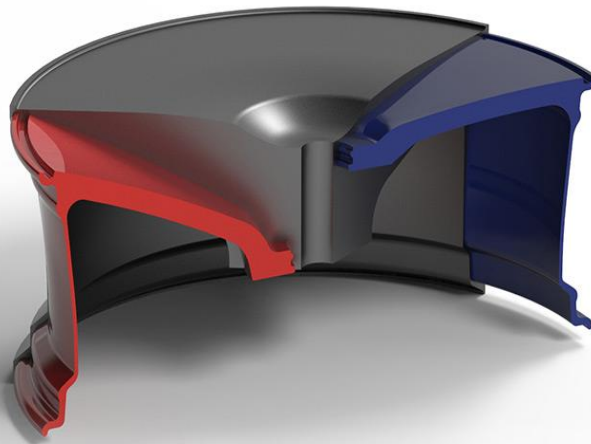


Figura 24. Diferencia de ET según la concavidad de la llanta

4.2 BOCETO

Una vez sabemos cuáles son los parámetros de diseño y sabiendo el tipo de llanta que se ha elegido, el primer paso a la hora de diseñar la llanta es el boceto.

Son varios los bocetos que se han realizado con el fin de encontrar un patrón base que pudiese servir como referencia. Todos los bocetos, a excepción de uno, tienen, como base de simetría, un pentágono, de esta manera se tiene una guía para tirar las líneas y realizar los diferentes bocetos. A continuación, se van a comentar cada uno de los bocetos por encima y se va a ver la evolución hasta el diseño final.

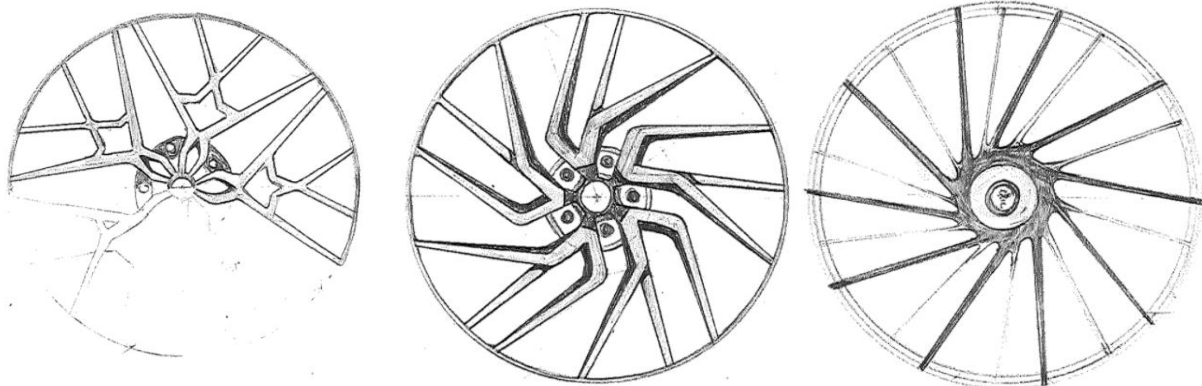


Figura 25. Punta de flecha original

Figura 26. V de 3 radios

Figura 27. Multirradio de 20 radios

1. La primera idea o idea inicial (*Figura 25*), es una llanta de base pentagonal, en la que los radios principales se asemejan a “puntas de flecha”, este tipo de diseño, como se verá más adelante, es en el que se basa el diseño final por su forma agresiva.
2. La segunda idea (*Figura 26*) es una llanta con formas más abstractas, una base pentagonal en la que encontramos radios triples, la forma inicial del radio se asemeja a una forma de V, con ángulos muy pronunciados y un radio adicional, más fino y situado en el centro de la V, para dar mayor rigidez a la llanta. Las partes más oscuras simulan desniveles o chaflanes, la finalidad de estos es la de conservar la forma principal de la llanta, más fina, pudiendo obtener radios más gruesos, sin alterar el dibujo principal y así obtener una llanta más resistente.
3. En el siguiente boceto (*Figura 27*) encontramos una llanta multirradial, en este caso de 20 radios. Se aprecia como los radios salen de manera tangencial al círculo central con el fin de variar el diseño clásico de este tipo de llanta con radios rectos. Con el objetivo de crear un diseño más clásico, en vez de llevar los agujeros de los pernos vistos, en este caso, se esconden bajo un embellecedor cromado. Otro de los aspectos importantes es el color de los radios, más oscuros en el caso de los radios principales, y más claros los radios secundarios.

Finalmente, el diseño elegido es el primero, a partir del cual se va a evolucionar hasta el diseño final. La progresión del diseño es la siguiente:

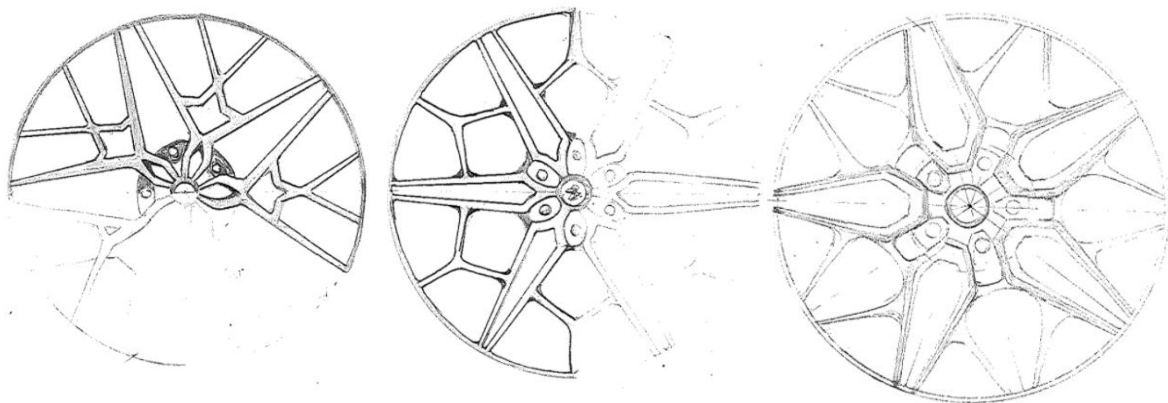


Figura 28. Evolución del diseño de “puntas de flecha”

A partir del primer diseño, explicado anteriormente, se realiza una prueba con una base hexagonal y se cambian algunos aspectos del diseño, entre ellos la simplificación de los radios adicionales ya que, los del primer diseño, se veían demasiado cargados. El principal problema de la base hexagonal, aparece al colocar los agujeros de los pernos debido a que la llanta que debe de disponer de 5 agujeros de pernos, y tal y como está dibujado el boceto, sería complicado obedecer a una simetría.

Por ello se realiza un último boceto, el cual, representa el diseño final de la llanta.

Como se ha dicho, está basado en radios en forma de “puntas de flecha”, los radios adicionales se simplifican todavía más en este diseño, consiguiendo líneas rectas y muy agresivas y, a priori, dando bastante rigidez al diseño. Se retoma también la base pentagonal en la llanta, por la simplicidad a la hora de colocar los agujeros de los pernos.

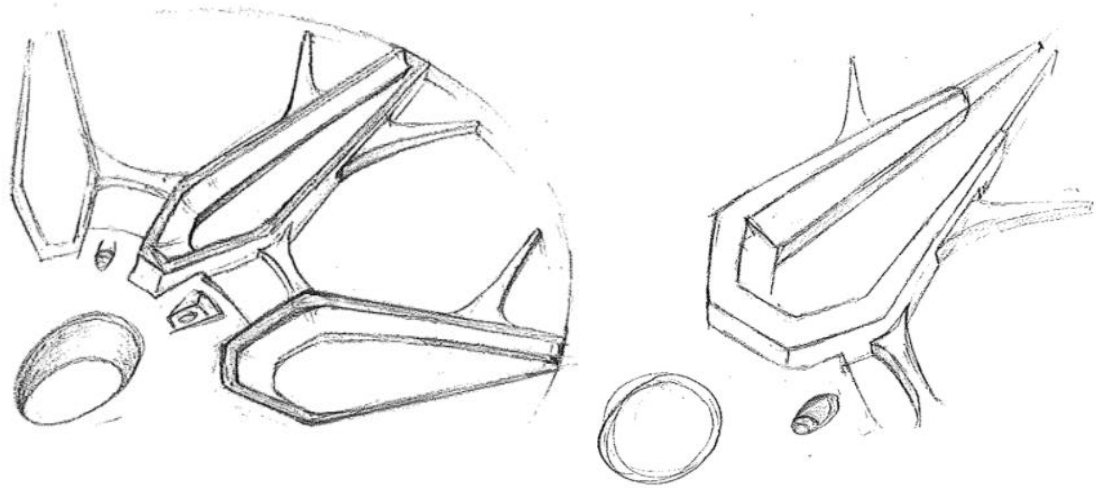


Figura 29. Diferentes bocetos del resultado final de la llanta

Para resaltar los radios principales, además de mediante redondeos y chaflanes, como en el segundo boceto presentado, se opta por variar la altura de los radios secundarios, dándole diferentes alturas a la llanta, esto en el resultado final se traduce en una llanta con una apariencia más compleja, más agresiva, y con un aspecto 3D característico.

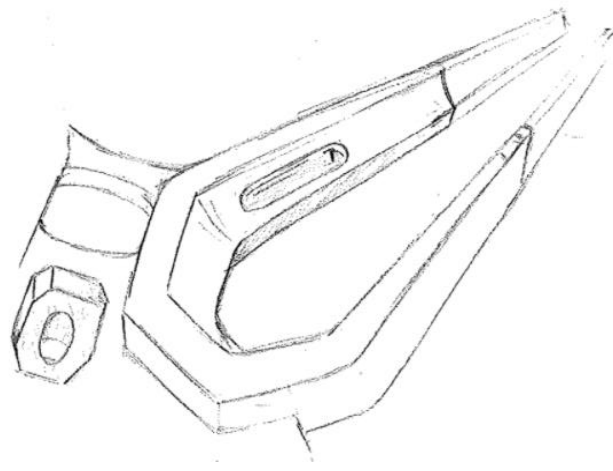


Figura 30. Prueba de mecanizado en el diseño de llanta final

En este último boceto se baraja la posibilidad de, en los agujeros de los pernos, realizar un mecanizado en forma de octógono y crear así otra altura en la llanta, aunque al final esta idea será descartada.

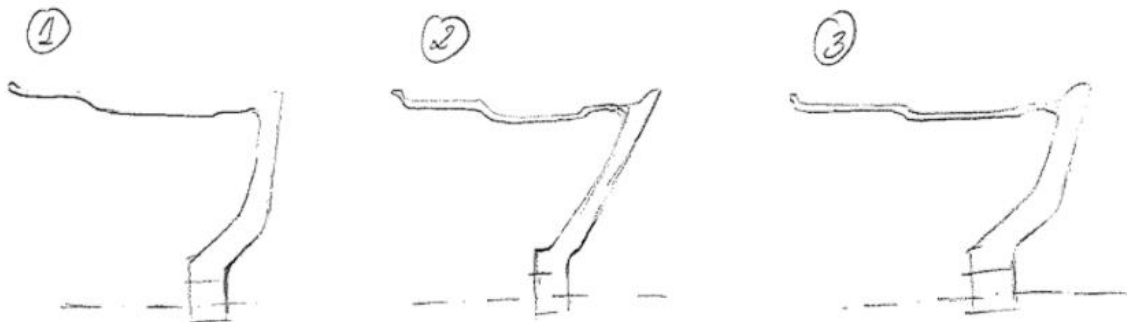


Figura 31. Diferentes tipos de concavidades

Para el tipo de concavidad, se opta por una curva que comience directamente en el radio exterior de la llanta (2ª opción), este tipo de concavidad hace que la llanta parezca más ancha, debido a la profundidad que aparenta tener y hace que, una vez montada en el coche, de una sensación de mayor amplitud.

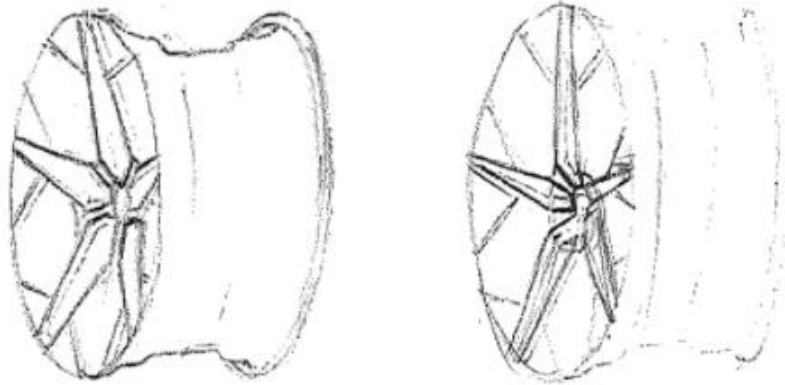


Figura 32. Bocetos del del diseño final para dos concavidades diferentes

Una de las partes que también está presente en el diseño o acabado es el embellecedor del centro de la llanta, que es utilizado para cubrir el agujero del buje y que puede dar un aspecto bastante singular a la llanta. Si la llanta, como se ha dicho, se sitúa en un mercado de gama media-alta, los detalles también deben obedecer a este estatus y estar a la altura.

4.3 SOFTWARE 3D (SolidWorks)

Para este apartado se va a comenzar haciendo un esquema de las operaciones principales que se llevan a cabo a la hora de trasladar el diseño de la llanta al programa y, más adelante, se dará una explicación de cada una de ellas. En el esquema tan solo aparecen 4 operaciones, aunque es obvio que no solo se han utilizado 4 operaciones para la realización de la llanta, el resto de las operaciones, o son operaciones secundarias como redondeos o bien son operaciones que podrían realizarse en cualquier momento sin variar el orden del resto.

1. Revolución del perfil
2. Revolución de la concavidad de la llanta
3. Corte del dibujo de la llanta
4. Corte para segundas alturas
5. Resto de operaciones (redondeos, agujeros de pernos y de válvula, etc.)
6. Tapa o embellecedor del del buje

1. Perfil

Lo más importante en este apartado es realizar el croquis de la manera correcta debido a que, como se ha explicado en apartados anteriores, está sujeto a la norma. Antes de dibujar el croquis en el programa, se debe hacer uno a mano para guiarte a la hora de dar valor a las medidas, pero, conforme se iba dibujando el croquis en el programa, te dabas cuenta de que muchas de las medidas, siempre siguiendo la

norma, que se habían pensado, eran erróneas y por tanto las medidas finales acabaron siendo muy diferentes a las pensadas originalmente.

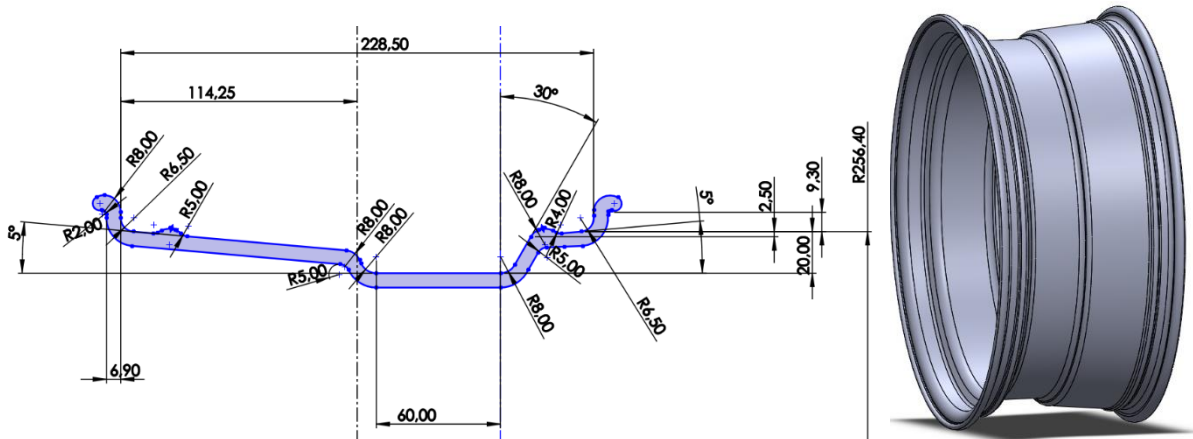


Figura 33. Croquis y resultado del perfil o núcleo de llanta

2. Concavidad

La concavidad que se ha elegido finalmente es una concavidad con inclinación directa desde el radio exterior de la llanta, el valor de esta inclinación va a venir dado por el ET que debe de tener la llanta (35mm en este caso) y la anchura del buje. Por tanto, igual que a la hora de realizar el perfil, se dibuja el croquis y se revoluciona.

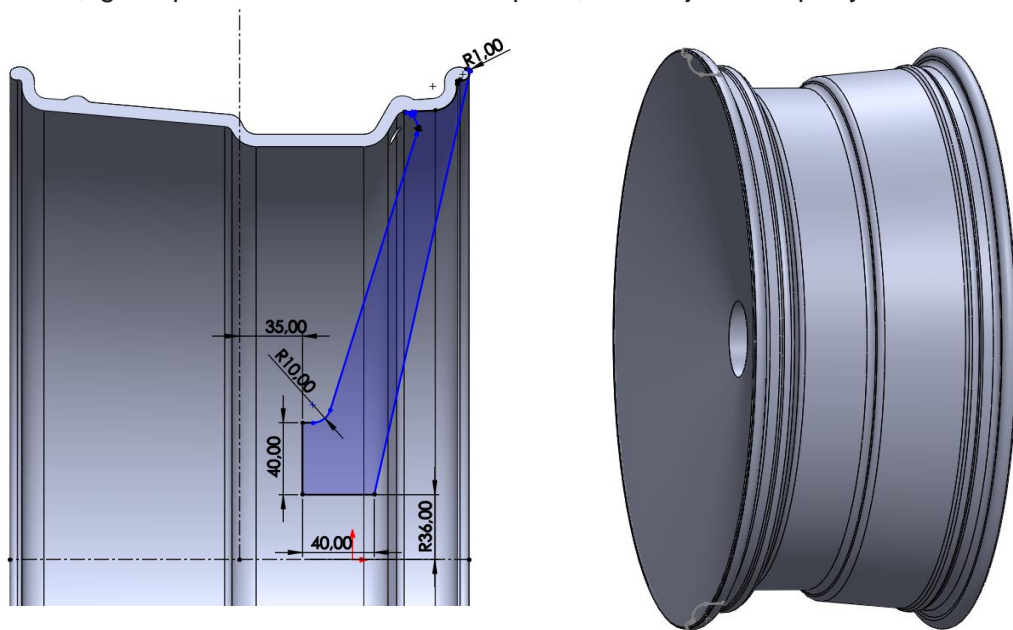


Figura 34. Croquis y resultado de la base de llanta

3. Dibujo principal de la base

El siguiente paso es plasmar el boceto del diseño, para ello, aunque quizá no sea lo más correcto, se ha dibujado directamente en el programa sin necesidad de hacer planos o medidas de antemano ya que realmente sería muy costoso o, en el caso de utilizar un programa de CAD 2D para realizar las medidas, no sería más que hacer lo mismo dos veces. Para la creación del dibujo se realiza solamente medio patrón del dibujo de la llanta que, mediante la simetría, completamos y, posteriormente, con la operación de matriz circular, se completa el resto del dibujo de forma exacta. Después

de esto se utiliza la herramienta de extrusión de corte y conseguimos la forma general del dibujo de la llanta.

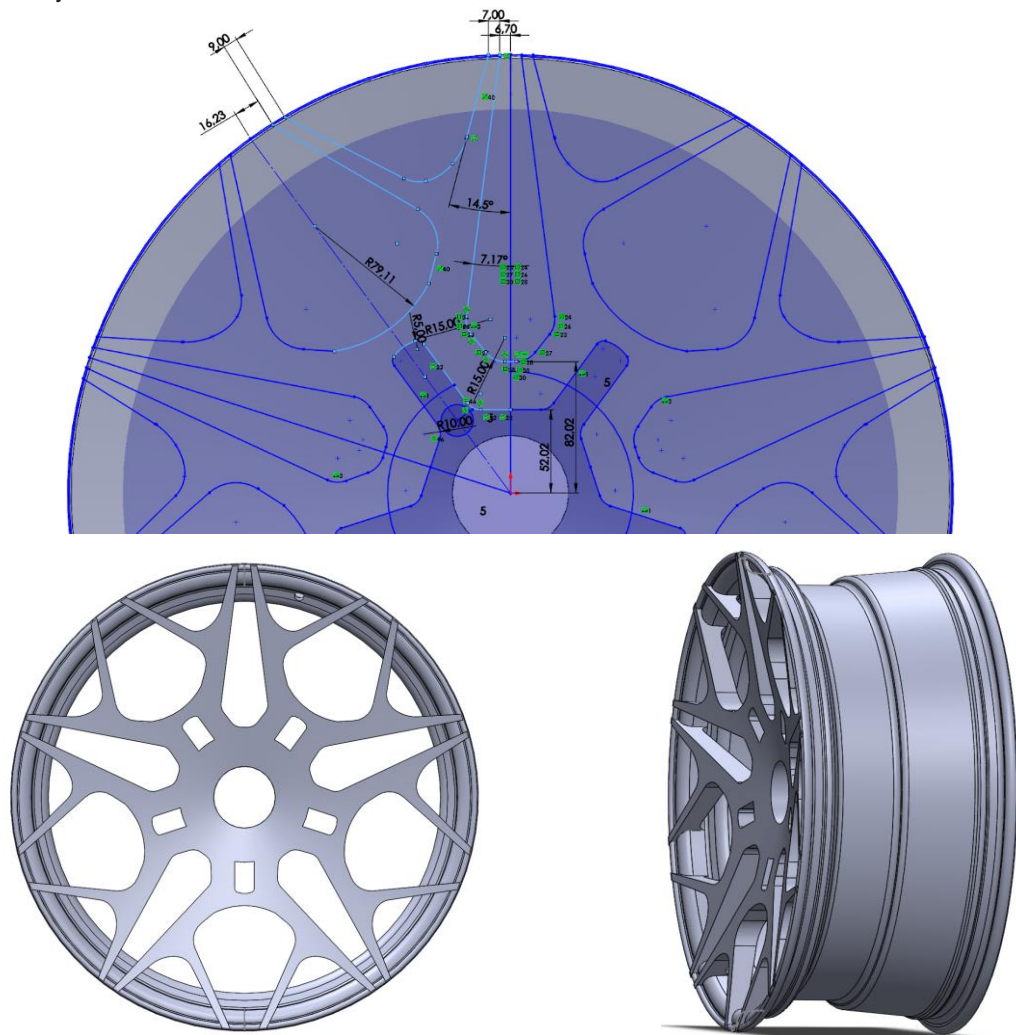


Figura 35. Croquis y resultado del corte de forma de la base

4. Segundas alturas

Una vez obtenido el diseño base de la llanta, procedemos a realizar el corte de las diferentes alturas para que salga a la luz el diseño real que se desea.

El proceso en este paso es el mismo que en el anterior, se croquiza el patrón con la forma deseada, se hace una matriz circular y se extruye el corte, aunque esta operación es ligeramente diferente a la otra debido a que el corte debe obedecer a la inclinación de la concavidad. En vista de que se necesitan diferentes alturas, son tres las operaciones que se realizan para completar este paso.

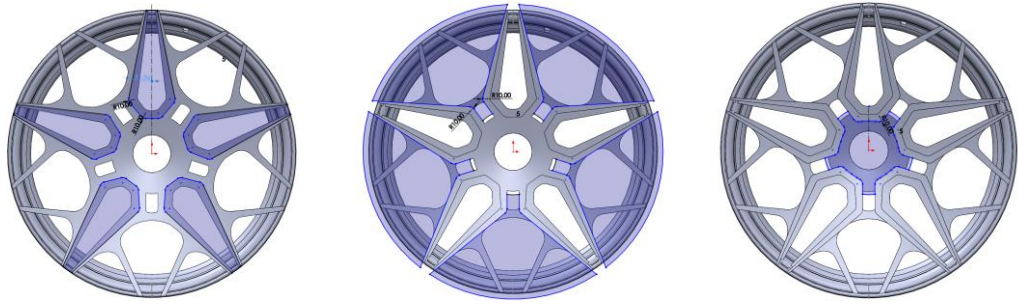


Figura 36. Cortes para las diferentes alturas



Figura 37. Resultado tras la extrusión de los cortes

5. Resto de operaciones

- En este apartado entran las operaciones de redondeo de aristas, la mayoría de estas son destinadas a eliminar las aristas vivas, reducir los puntos de concentración de tensiones y también redondeos fuertes puramente estéticos que dan un mejor acabado a la llanta.

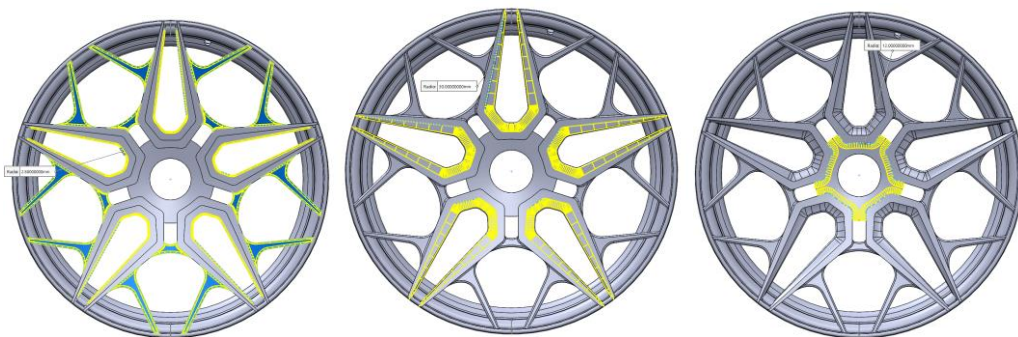


Figura 38. Redondeos de 2.5, 30 y 12 mm.

- Otra operación que se realiza, mediante el asistente de taladro, es el agujero de la válvula que, al igual que el perfil, debe obedecer a la norma y además debe realizarse también un redondeo de 0.5mm.

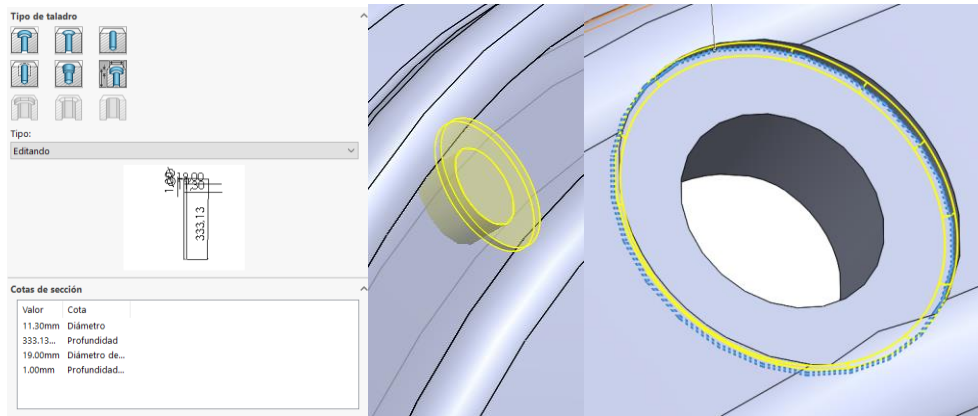


Figura 39. Medidas y resultado del agujero de la válvula

- Las siguientes operaciones, mediante la extrusión de corte y nuevamente el asistente de taladro, es la realización de los agujeros de los pernos.

En primer lugar, se extruye el corte de 5 cilindros hasta la profundidad especificada y después se realizan los agujeros de los pernos con el asistente de taladro, en el que escogemos un taladro de cabeza circular y cónica debido a que las llantas de aleación, a diferencia de las llantas de acero, son montadas con tornillos de cabeza cónica hexagonal.



Figura 40. Roscas y tornillos para llantas de aleación ligera

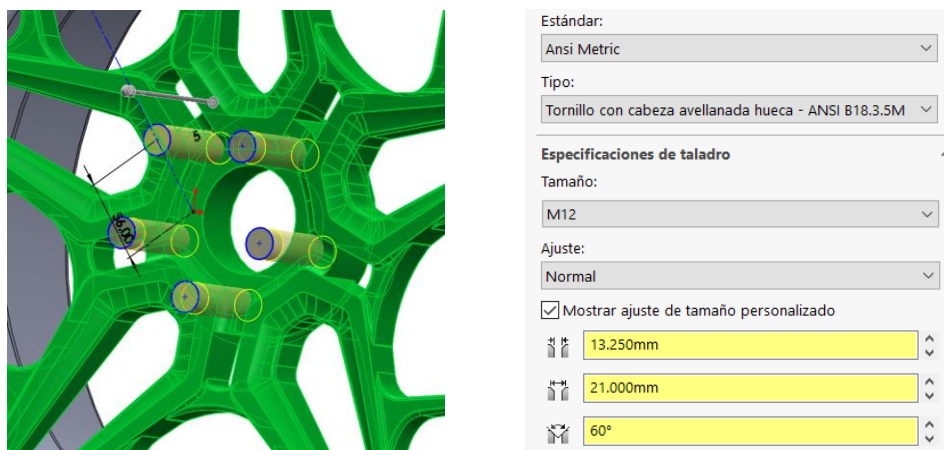


Figura 41. Medidas y proceso de la ejecución de los agujeros de los pernos

- Por último, realizamos una operación de revolución que va a servir como embellecedor de la llanta.

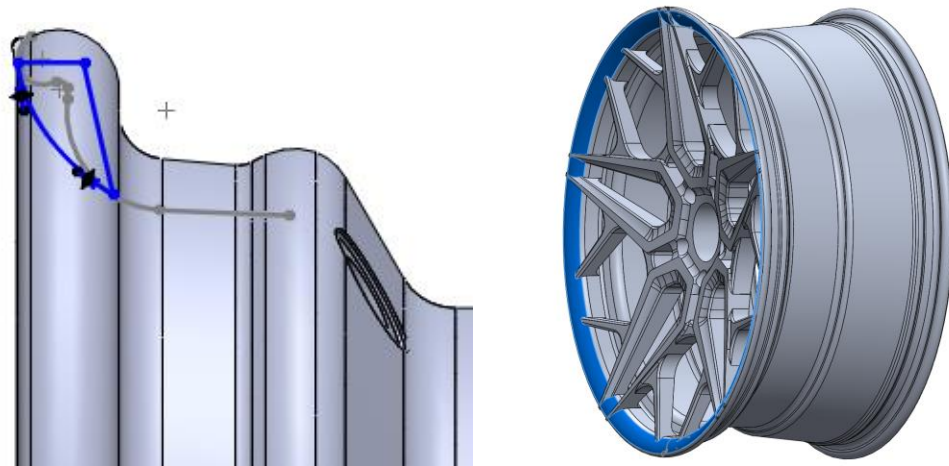


Figura 42. Croquis y resultado del embellecedor de la llanta

6. Tapa del buje

Su única utilidad es la de evitar la entrada de suciedad en el buje y además sirve como elemento estético de la llanta en el que pueden ir grabados símbolos o letras y puede ser también de diversos colores para darle un aspecto más estético a la llanta.

Se ha optado por grabar en esta pieza el símbolo de la Universidad de Zaragoza debido a que este trabajo no está a cargo de ninguna empresa y por tanto no tiene o no está relacionado con ninguna marca.



Figura 43. Tapa o embellecedor de agujero de buje

4.4 RESULTADO FINAL

El resultado del ensamblaje, de la llanta con el embellecedor, se pasa a la extensión SolidWorks Visualize, en el que se pueden conseguir mejores acabados. La imagen resultante no llega a ser fotorrealista debido a las licencias de las que se dispone, pero aun así, el resultado es bastante bueno.

La idea a la hora de la hipotética salida de la llanta al mercado real es dar al cliente la total libertad en cuanto a la personalización, dando la posibilidad de cambiar el color tanto del embellecedor, como de la llanta.

A continuación, se muestran algunos de los ejemplos, el primero haría referencia a una llanta cromada en la que, en cada una de las imágenes, se personaliza de manera diferente el embellecedor del buje y, en las imágenes posteriores, se muestran diferentes acabados de la llanta.



Figura 44. Llanta cromada con diferentes embellecedores



Figura 45. Llanta con diferentes acabados (granate, oro y morado)

5. FUERZAS

Este es quizás el apartado más importante de todos ya que, si los cálculos de las fuerzas no se aproximan bien a las fuerzas reales a las que va a estar sometida la llanta, los valores de tensiones y desplazamientos reales pueden ser muy diferentes a los de la simulación y, por consiguiente, puede que la llanta falle durante su ciclo de vida.

Una correcta aplicación de las fuerzas, condiciones de contorno y propiedades del material seleccionado, son necesarias para un buen planteamiento del problema y la obtención de resultados coherentes.

5.1 FUERZAS

La llanta puede estar sometida a diferentes fuerzas como pueden ser la de frenado, centrífuga en curva o la de aceleración, pero, estas fuerzas, aparecen dependiendo del movimiento y situación en la que se encuentre el vehículo y por lo general no se manifiestan todas de vez. Por otro lado, la llanta está sometida a 2 cargas constantes independientemente de la situación en la que se encuentre el vehículo, es decir, que aparecen tanto estáticamente como dinámicamente y estas son el peso, del vehículo y la presión del neumático.

A continuación, se van a explicar una por una las fuerzas a las que puede estar sometida la llanta.

- **Peso, presión y fuerza lateral**

La presión de inflado del neumático actúa de dos maneras en el perfil de la llanta debido a que según la zona de la que se trate, actúa o no el total de la presión, así es como el valor de la presión actúa directamente en la base del perfil (base honda) agujero de válvula y los resaltes y, de manera indirecta, en el asiento talón y el borde de llanta.

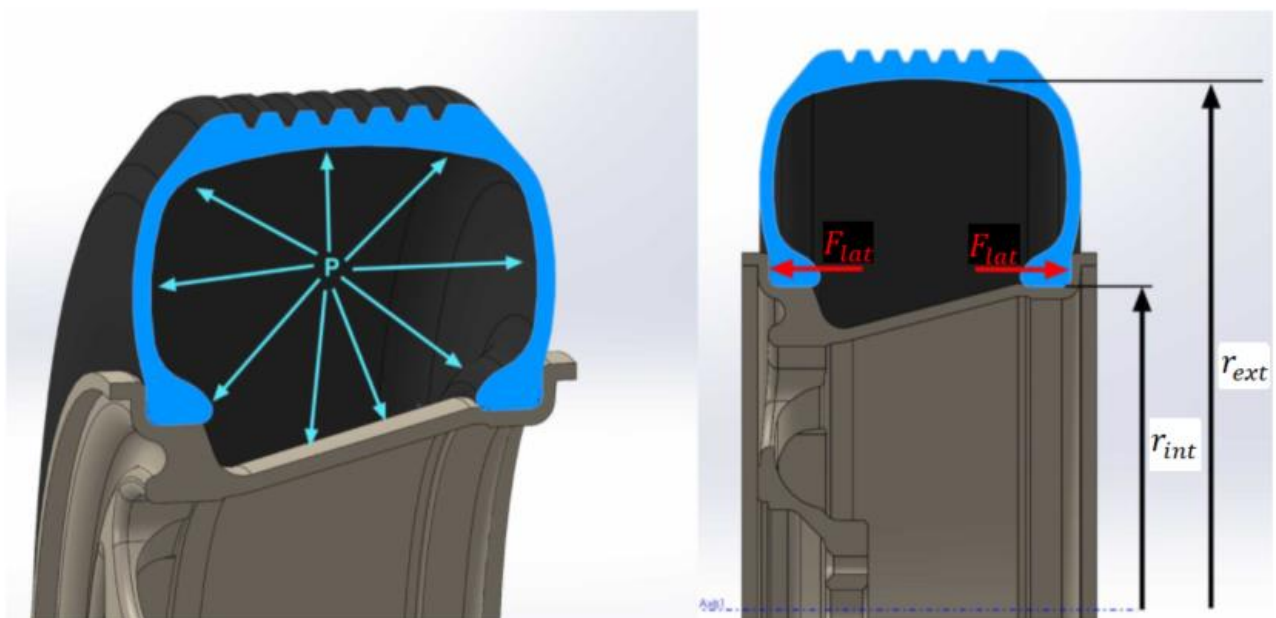


Figura 46. Presión de inflado y fuerza lateral ejercida por el talón del neumático

La presión de inflado del neumático puede ser mayor o menor dependiendo de las recomendaciones del fabricante. El valor de la presión que se ha seleccionado es de $P = 0.28 \text{ MPa}$.

En la siguiente imagen se puede ver en profundidad la distribución de fuerzas a lo largo del perfil de la llanta, en la pestaña, en la base honda de la llanta y en el agujero de válvula.

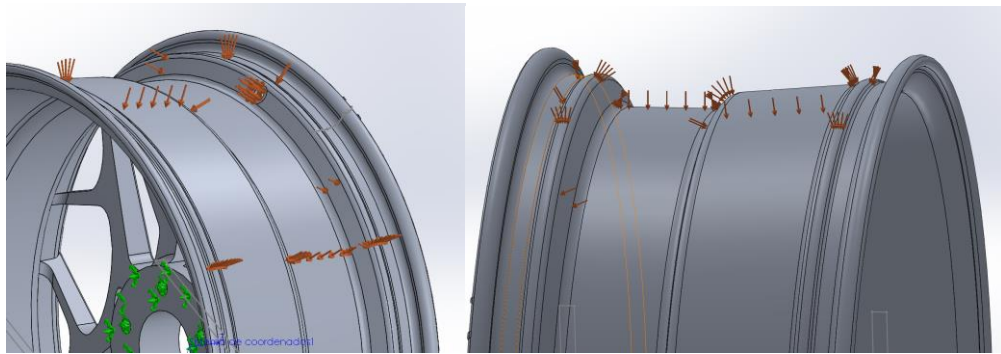


Figura 47. Distribución de la presión en el perfil de llanta

La siguiente fuerza, como consecuencia también de la presión de inflado de neumático, es la fuerza lateral ejercida por el neumático en el borde de llanta, F_{lat} . Para calcular la fuerza ejercida por el neumático, en la pared lateral de la llanta, debemos saber primero el área de del neumático en el que actúa la presión de inflado de forma lateral, que es el área proyectada en el plano vertical. Mediante la presión y el área, podemos hallar la fuerza total que es ejercida de manera lateral en el neumático por la presión.

Una vez calculada la fuerza lateral que es soportada por la pared del neumático, hay que tener en cuenta que esta presión no es ejercida por completo en el borde de la llanta si no que, la mitad de esta fuerza es soportada por la pared lateral del neumático y, la otra mitad, se ve reflejada en el borde de llanta, por tanto, la fuerza que actúe en el borde de la llanta será la mitad de la fuerza total que es ejercida en la pared del neumático.

$$F_{lat} = \frac{1}{2} P \pi (r_{ext}^2 - r_{int}^2)$$

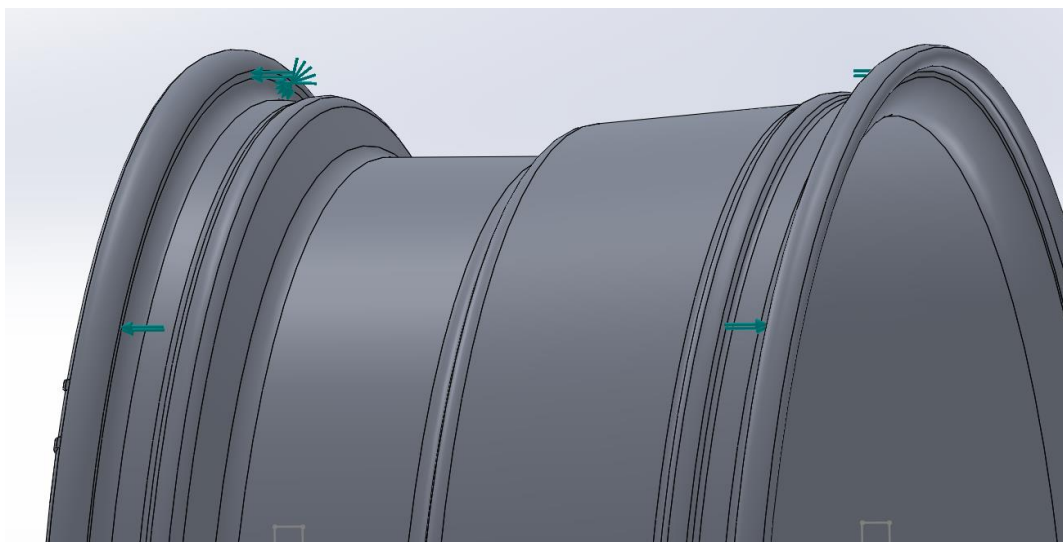


Figura 48. Distribución de la fuerza lateral ejercida por el neumático en la llanta

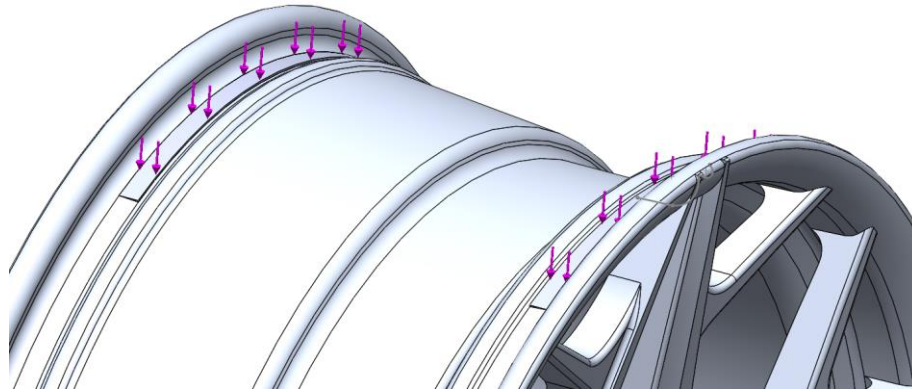


Figura 50. Distribución del peso

Una vez comentadas las fuerzas que actúan de manera sistemática en el vehículo, se van a explicar las fuerzas que son dependientes del movimiento o acción que esté realizando el vehículo, estas son las fuerzas de rodadura, frenado, aceleración y centrífuga en curva.

En cuanto a la fuerza de frenado y aceleración, estas fuerzas se aplican de manera idéntica en la llanta y es obvio que no pueden producirse al mismo tiempo, por ello, solamente se va a calcular la fuerza producida en la frenada. La razón por la cual se calcula la fuerza de frenado y no la aceleración es porque el vehículo está sometido a una mayor carga en esta acción.

La manera más sencilla de ver esto es la siguiente, el coche que se pone de ejemplo en este trabajo tiene una aceleración de 0-100 Km/h en 4 segundos mientras que, el tiempo para realizar la acción contraria, 100-0 Km/h, es de menos de 3 segundos.

- **Situación de frenada**

Cuando se produce una deceleración en un vehículo, es lógico que la distribución de peso en los ejes varíe notablemente, aumentando en el eje delantero y disminuyendo en el trasero.

Se plantea el diagrama del sólido libre, y se tienen en cuenta las hipótesis de: se trata como sólido rígido y, sólo se mueve en una dirección.

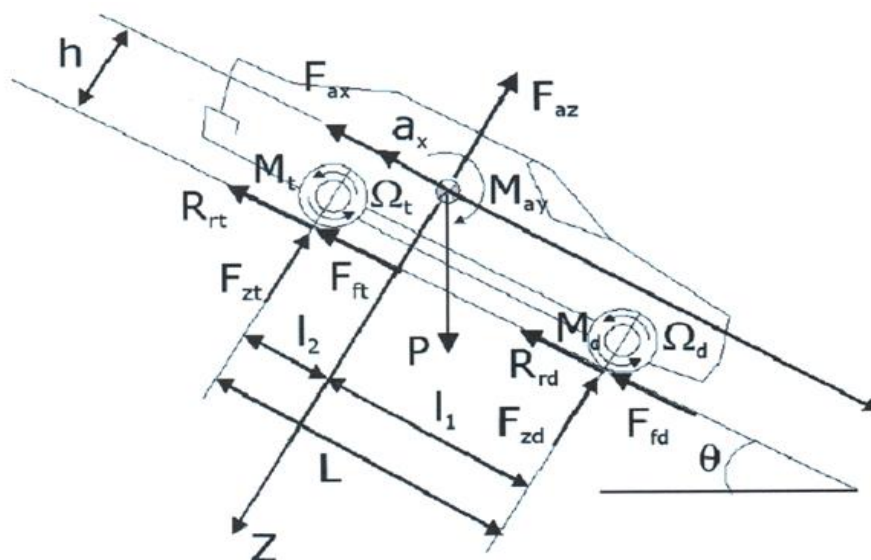


Figura 51. Diagrama del sólido libre en situación de frenada

Donde:

- h : altura del centro de gravedad del vehículo
- L : batalla
- F_{ax} y F_{az} : fuerzas aerodinámicas en los dos ejes
- M_{ay} : momento debido a la aerodinámica producido en el eje y
- F_{zd} y F_{zt} : reacción normal en los ejes delantero y trasero
- F_{fd} y F_{ft} : fuerzas de frenado en los ejes
- R_{rd} y R_{rt} : fuerzas de rodadura
- M_d y M_t : momento de frenada
- a_x : deceleración del vehículo
- Ω_d y Ω_t : deceleración angular en las ruedas
- θ : pendiente del suelo
- F_i : fuerza de inercia $F_i = m_v a_v$

Se realiza el sumatorio de fuerzas en el eje x, y los sumatorios de momentos en las ruedas delantera y trasera.

$$\begin{aligned} \sum F_x = m_v a_v &\rightarrow F_{ax} + F_{ft} + F_{fd} + R_{rt} + R_{rd} - P \operatorname{sen} \theta = m_v a_v \\ \sum M_d = 0 &\rightarrow F_{zd} = \frac{P \cos \theta l_2 + (m_v a_v + P \operatorname{sen} \theta - F_{ax})h}{L} \\ \sum M_t = 0 &\rightarrow F_{zt} = \frac{P \cos \theta l_1 - (m_v a_v + P \operatorname{sen} \theta - F_{ax})h}{L} \end{aligned}$$

Suponiendo una superficie horizontal ($\theta=0$) se tiene que:

$$\begin{aligned} \sum F_x = m_v a_v &\rightarrow F_f + R_r = m_v a_v \rightarrow P(f_r + \mu) = m_v a_v \rightarrow P\mu_a = m_v a_v \\ \sum M_d = 0 &\rightarrow F_{zd} = \frac{P l_2 + (m_v a_v - F_{ax})h}{L} \\ \sum M_t = 0 &\rightarrow F_{zt} = \frac{P l_1 - (m_v a_v - F_{ax})h}{L} \end{aligned}$$

Y sabiendo que las fuerzas de frenado, aerodinámica y rodadura responden a:

$$\begin{aligned} F_f &= P\mu \\ R_r &= P f_r \\ F_{ax} &= \frac{1}{2} v^2 \rho S C_x \end{aligned}$$

Se obtiene:

$$\begin{aligned} F_{zd} &= \frac{P l_2}{L} + \frac{P(f_r + \mu) - F_{ax}}{L} h \\ F_{zt} &= \frac{P l_1}{L} - \frac{P(f_r + \mu) - F_{ax}}{L} h \end{aligned}$$

Sustituyendo los coeficientes de rodadura y rozamiento por el coeficiente de adherencia obtenemos la transferencia de peso entre ejes:

$$TP = \frac{P\mu_a - F_{ax}}{L} h$$

A partir de la transferencia de peso, se halla la normal y, mediante el coeficiente de adherencia y el radio del neumático, se pueden calcular la fuerza que comprende las fuerzas de rozamiento y rodadura y el momento que resulta de esta fuerza en el eje delantero, que es el que mayor carga soporta en la frenada. A partir de aquí, se divide el momento por 2 para obtener el momento que actúa en la llanta:

$$F_{a,d} = F_{f,d} + R_{r,d} = F_{zd}\mu_a$$

$$M_d = F_{a,d} R$$

$$M_{f,llanta} = \frac{M_{f,d}}{2}$$

Las cargas calculadas se distribuyen de la siguiente manera:

- Al peso aplicado anteriormente se le suma la transferencia de peso debida a la frenada del vehículo y, por tanto, tan solo es necesario cambiar el valor que se ha aplicado.
- Para aplicar el momento de frenada calculado, se utiliza el mismo procedimiento que para el peso y se aplica en el elemento Carga.

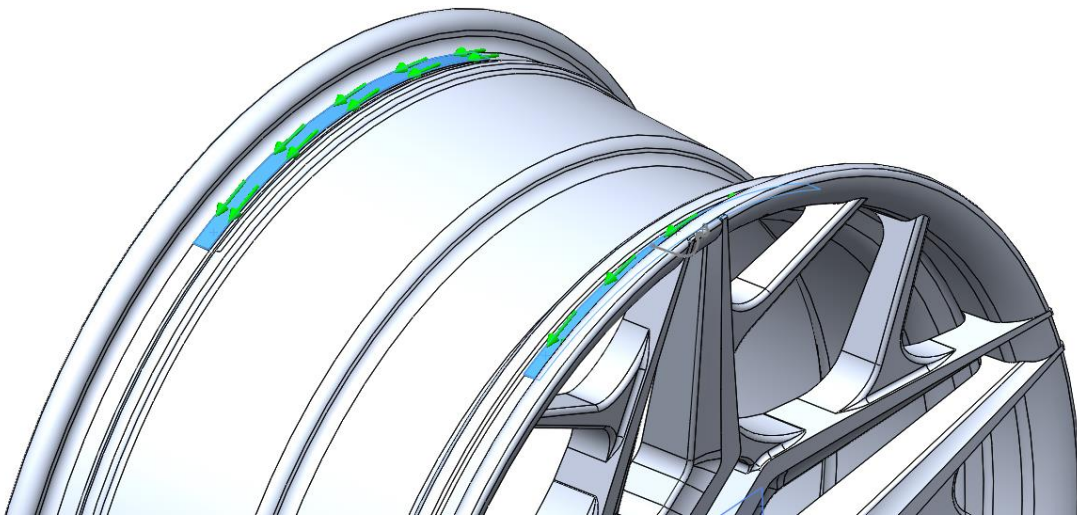


Figura 52. Distribución del momento de frenado ($M_{f,llanta}$) sobre la llanta

- **Situación de paso por curva**

Al igual que sucede con la fuerza de frenado, en el paso por curva también se da una transferencia de peso, si bien esta no es entre los dos ejes si no de un lado del eje al otro.

Se plantea el diagrama del sólido libre de nuevo, despreciando las fuerzas aerodinámicas:

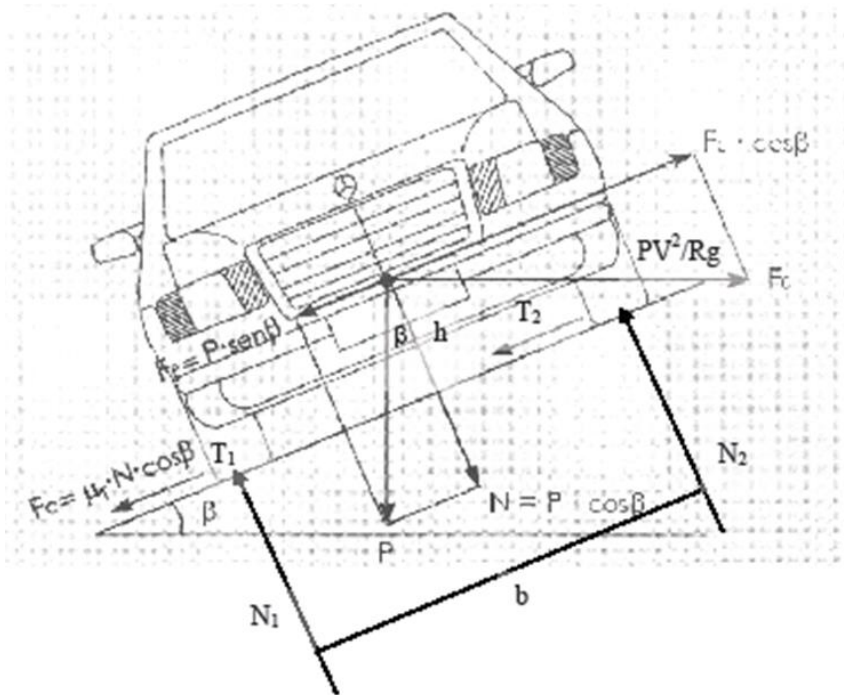


Figura 53. Diagrama del sólido libre en situación de paso por curva

Donde:

- T_1 y T_2 : fuerzas de rozamiento
- F_c : fuerza centrífuga
- N_1 y N_2 : reacción normal con el suelo
- β : pendiente del suelo
- b : distancia entre ruedas
- P : peso del vehículo
- h : altura del centro de gravedad

Se plantean los sumatorios de fuerzas y momentos:

$$\begin{aligned} \sum F_y = 0 &\rightarrow F_c \cos \beta = P \operatorname{sen} \beta + T_1 + T_2 \\ \sum F_z = 0 &\rightarrow P \cos \beta + F_c \operatorname{sen} \beta = N_1 + N_2 \\ \sum M_i = 0 &\rightarrow N_2 = \frac{F_c \operatorname{sen} \beta + P \cos \beta}{2} + \frac{F_c \cos \beta - P \operatorname{sen} \beta}{b} h \\ \sum M_d = 0 &\rightarrow N_1 = \frac{F_c \operatorname{sen} \beta + P \cos \beta}{2} - \frac{F_c \cos \beta - P \operatorname{sen} \beta}{b} h \end{aligned}$$

Suponiendo $\beta=0$ se obtiene:

$$\begin{aligned}\sum F_y = 0 &\rightarrow F_c = T_1 + T_2 = P\mu \\ \sum F_z = 0 &\rightarrow P = N_1 + N_2 \\ \sum M_i = 0 &\rightarrow N_2 = \frac{P}{2} + \frac{F_c}{b}h \\ \sum M_d = 0 &\rightarrow N_1 = \frac{P}{2} - \frac{F_c}{b}h\end{aligned}$$

Donde la transferencia de peso entre ruedas resulta:

$$TP = P \frac{\mu h}{b}$$

La llanta derecha es la que está sometida a mayor carga, por tanto, la fuerza de rozamiento que nos interesa es T_2 y, al igual que ocurría con la fuerza lateral de presión, calculada anteriormente, la fuerza de rozamiento no se aplica directamente en la llanta si no que, aproximadamente la mitad de esta fuerza es soportada por el perfil del neumático y la otra mitad es aplicada directamente sobre la llanta.

$$T_2 = N_2\mu$$

A la hora de distribuir la carga, esta ha de aplicarse tan solo en la sección de la llanta que tiene contacto con la calzada.

Al ser una fuerza horizontal, debe aplicarse en el borde de llanta y en una parte del resalte de la llanta.

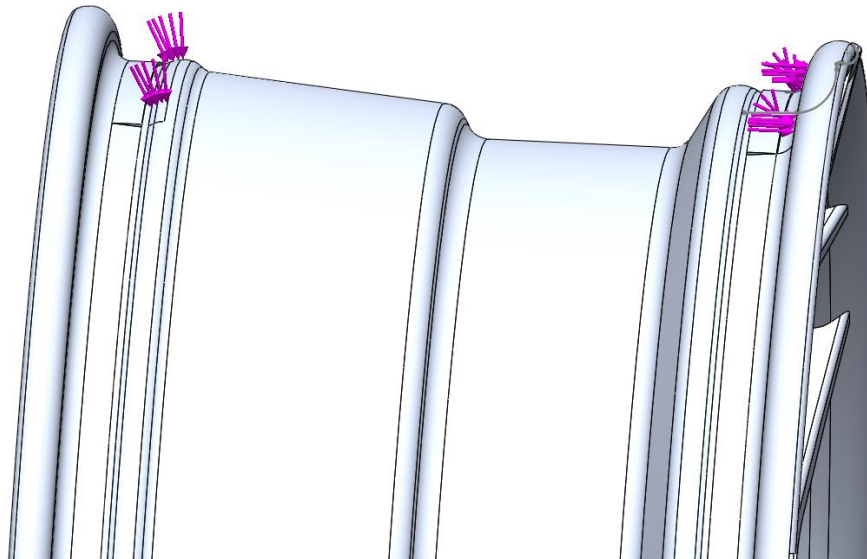


Figura 54. Distribución de la fuerza de rozamiento horizontal debida a la fuerza centrífuga

5.2 CONDICIONES DE CONTORNO

Para la correcta posición de las condiciones de contorno, debemos pensar de qué manera hemos colocado las fuerzas, las fuerzas que hemos aplicado en la llanta están situadas en las posiciones reales donde se aplicarían las cargas, por tanto, las restricciones de desplazamientos deben situarse de la misma manera.

La solución es aplicar las condiciones de contorno en los agujeros de los bujes y en la cara interior de la base de la llanta, la cual tiene contacto con la estructura del vehículo.

A la hora de aplicar las CC, se restringen los giros y desplazamientos en todas las direcciones.

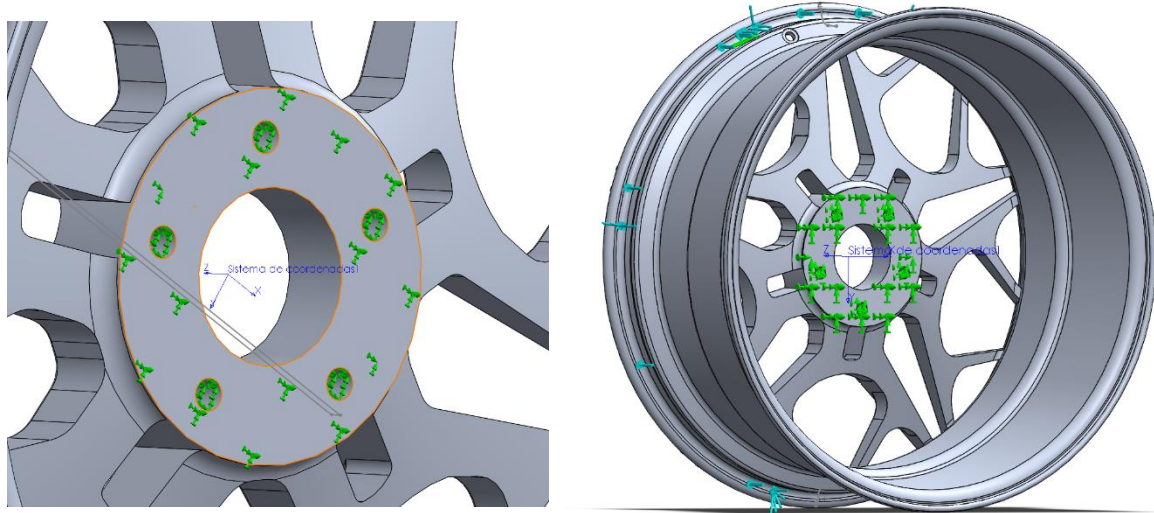


Figura 55. Aplicación de las condiciones de contorno

5.3 MATERIAL

El material seleccionado es una aleación de aluminio 6082-T6, comentado anteriormente y cuyas propiedades se detallan en la siguiente tabla.

| Propiedades | Valor |
|-----------------------------------|-----------------------------|
| Módulo elástico | 7300 MPa |
| Coefficiente de Poisson | 0.33 |
| Densidad de masa | 2700 MPa |
| Límite elástico | 310 MPa |
| Coefficiente de expansión térmica | $2.4e - 05$ K ⁻¹ |

Tabla 6. Propiedades de la aleación de aluminio 6082-T6

6. ANÁLISIS DE ELEMENTOS FINITOS

Para el análisis de elementos finitos, además de las fuerzas calculadas en el apartado anterior, nos servimos del “Reglamento nº 124 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE)” que aparece publicado en el Boletín Oficial del Estado (referencia: DOUE-L-2006-82689).

Este documento sirve de guía a la hora de realizar la simulación de lo que serían las pruebas reales a las que tiene que someterse la llanta para conseguir la homologación, a pesar de ello y debido a que estas pruebas se ejecutan mediante máquinas o procesos de cierta dificultad a la hora de ser recreados mediante un programa, se intentan asemejar de la mejor forma posible. En cualquier caso, una vez realizadas las simulaciones y obtenidos los valores deseados de tensiones y deformaciones, sería necesario fabricar varias probetas de la pieza que deberían ser sometidas a las pruebas reales para obtener su homologación.

Una vez explicado esto, se van a presentar los resultados de los diferentes análisis realizados.

6.1 RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones. Únicamente son definidos los trazados de tensiones de Von Mises y los desplazamientos en cada una de las pruebas a excepción de las pruebas de fatiga en las que se muestra la vida total de la llanta.

1. Situación de frenado

Resultados de la simulación de la llanta estando sometida a la mayor carga de frenada posible, correspondiente a las fuerzas de frenado, presión, fuerza lateral y peso calculadas en el apartado 5.1.

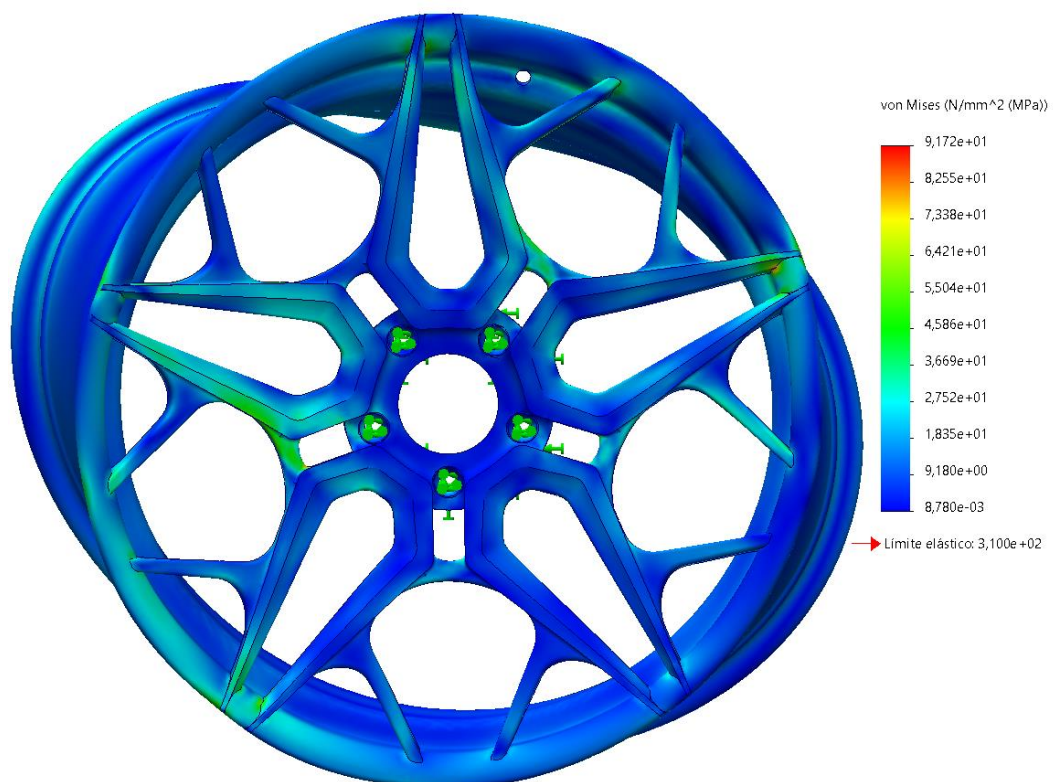


Figura 56. Tensión de Von Mises (MPa), magnitud de la deformada, escala x50

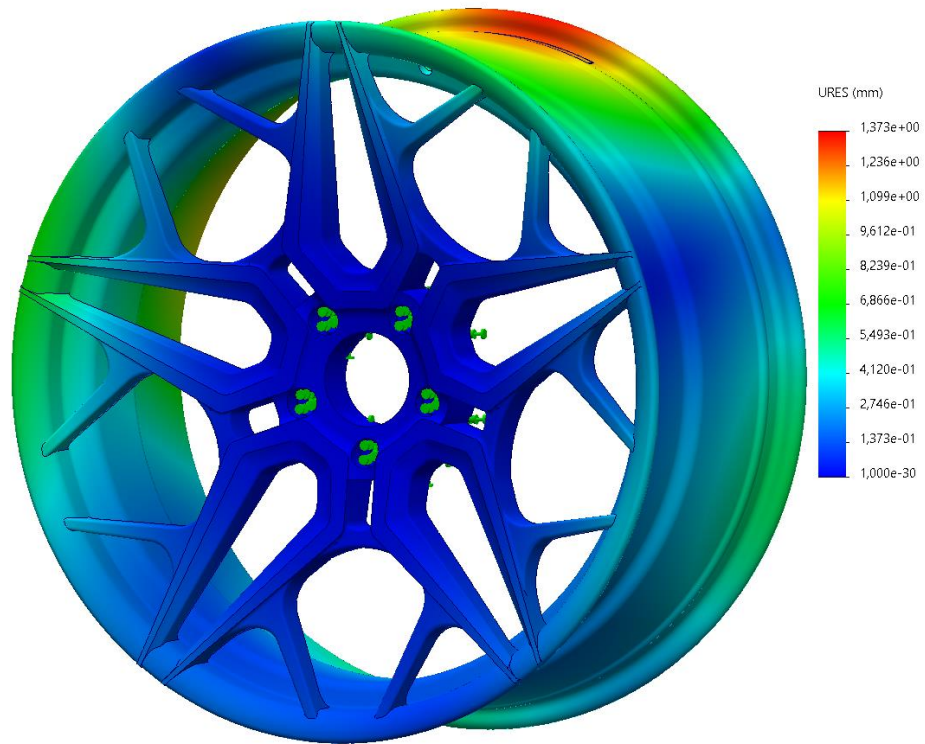


Figura 57. Desplazamientos en mm (vista real del resultado de la deformada)

2. Situación de paso por curva

Resultados del análisis de la llanta estando sometida a la mayor carga en curva, correspondiente a las fuerzas de paso por curva, presión, fuerza lateral y peso calculadas en el apartado 5.1.

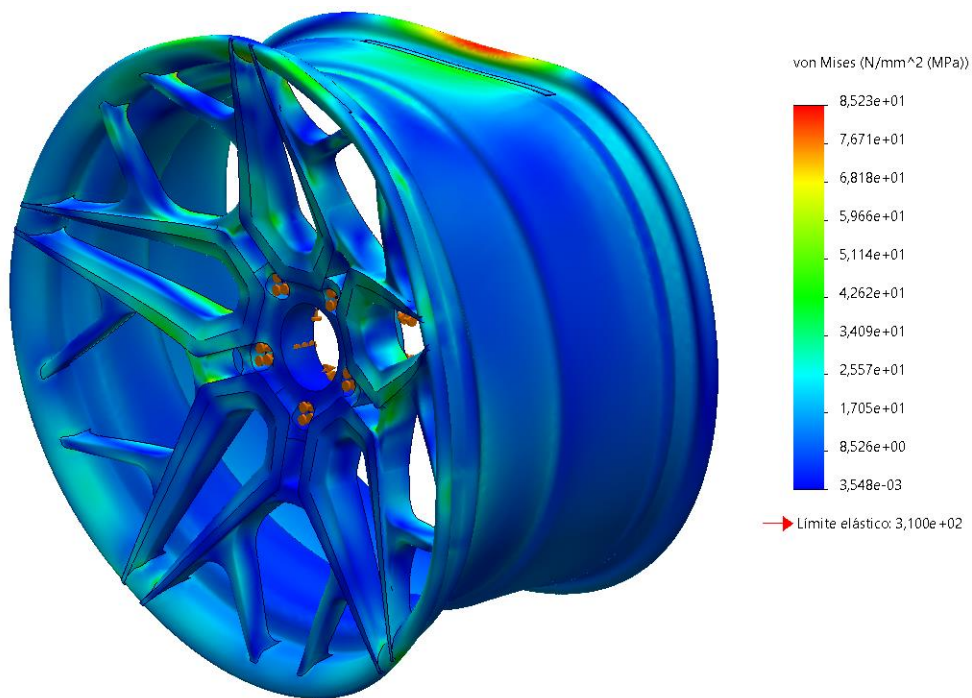


Figura 58. Tensión de Von Mises (MPa), magnitud de la deformada, escala x50

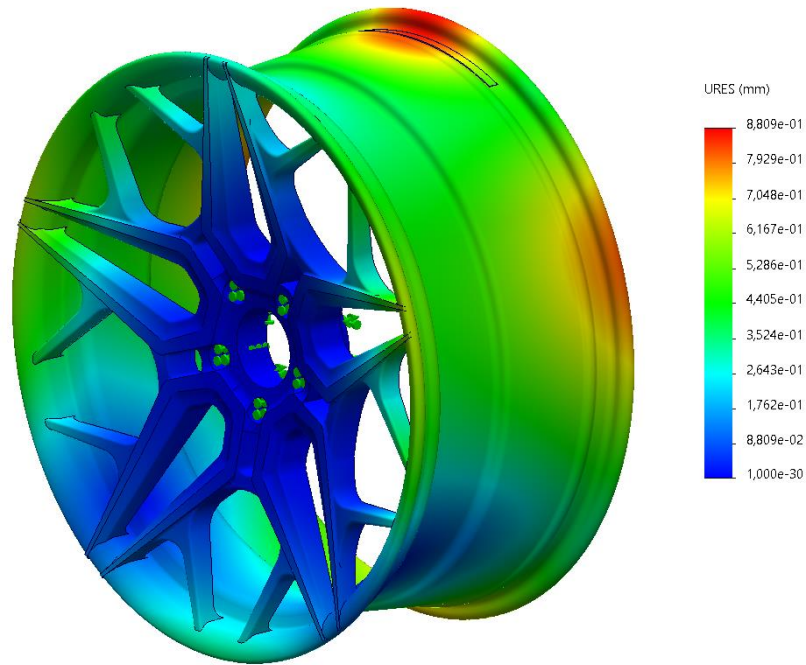


Figura 59. Desplazamientos en mm (resultado real de la deformada)

3. Prueba de impacto

Impacto de un objeto de 673 Kg, de forma rectangular, con una cara de impacto de 200x350 mm, en la llanta situada con un ángulo de 13° respecto a la horizontal y una caída de 230 mm. Para esta simulación se crea un ensamblaje entre el bloque y la llanta, se dan unas condiciones iniciales de caída al bloque y se aplican las condiciones de contorno necesarias para que el bloque caiga de manera totalmente vertical.

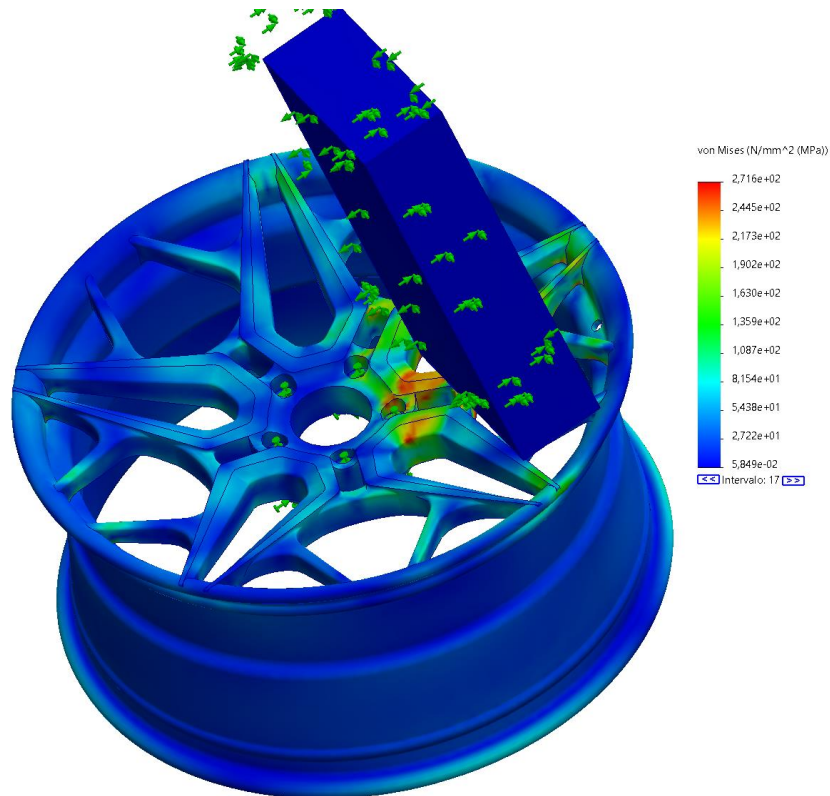


Figura 60. Tensión de Von Mises (MPa), en situación de impacto (escala real)

Debido a que es difícil sacar una imagen de esta prueba, es necesario saber que el objeto de impacto logra penetrar en la llanta, luego se podría decir que sufre una fisura en uno de los radios, aunque las deformaciones son prácticamente nulas. El reglamento comenta que, si una fisura es producida en la zona directamente golpeada por el objeto, la llanta sigue siendo válida y por tanto la llanta pasa la prueba de impacto.

4. Fatiga en situación de frenada

Ensayo de fatiga para una fuerza de frenado del 90% correspondiente al “Reglamento nº 124 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE), ANEXO 9” y que obedece a la fórmula $M_t = SF_v R_{dyn}$

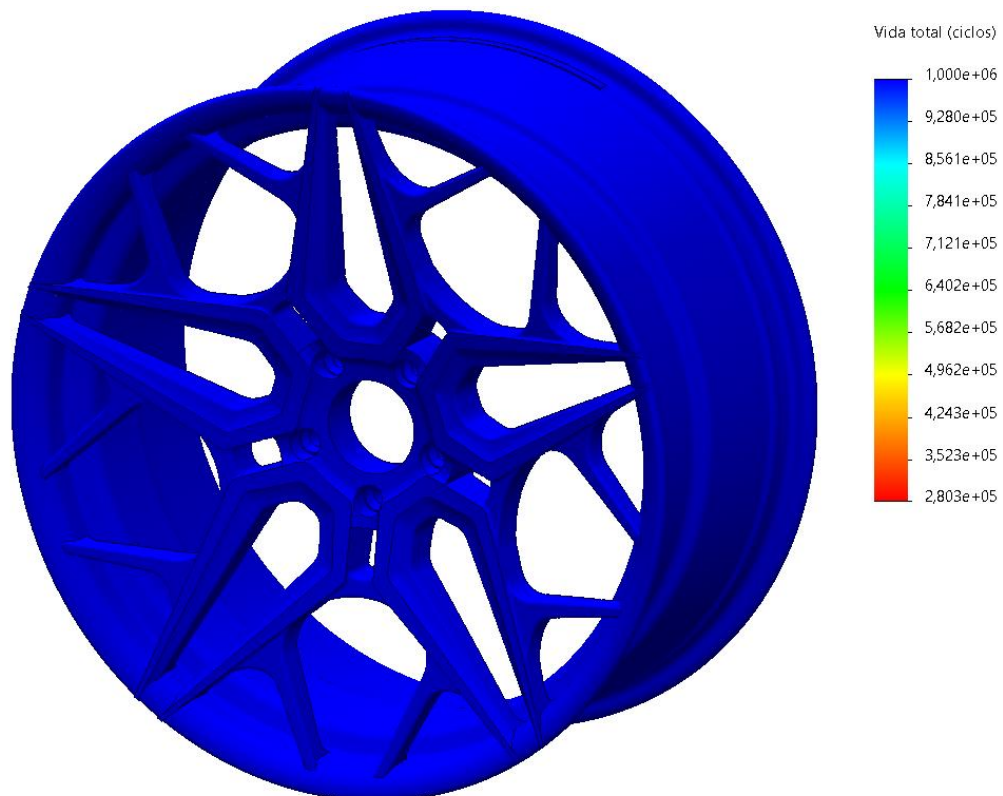


Figura 61. Resultado del análisis de vida de la llanta en ciclos, situación de frenada con carga del 90%

5. Fatiga en situación de paso por curva

Esta simulación, por su dificultad, ya que se plantea de manera que es necesaria una máquina con una masa en desequilibrio y que ejerza un momento, se plantea de manera que se aplican los porcentajes de carga y ciclos aparecidos en el reglamento, pero en este caso de las cargas calculadas en el apartado 5.1 para esta situación.

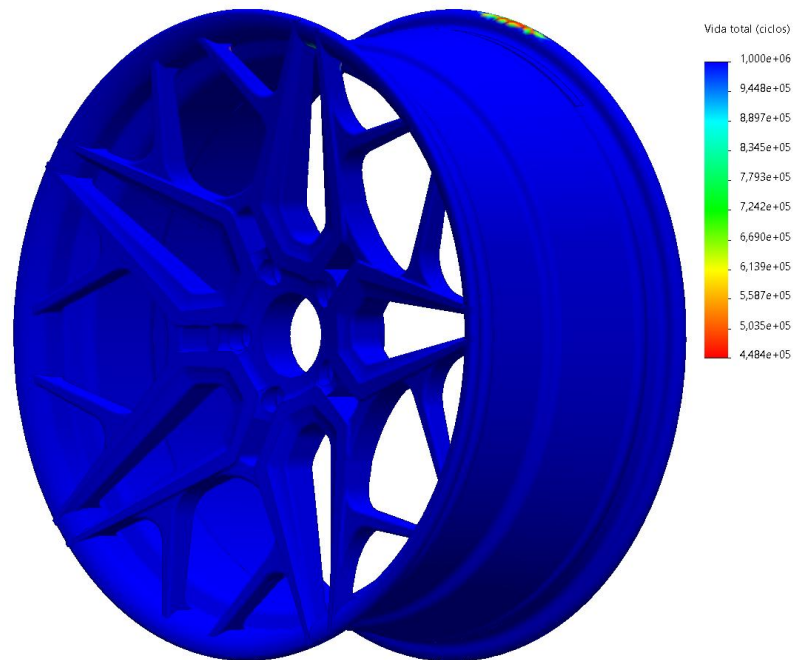


Figura 62. Resultado del análisis de vida de la llanta en ciclos para la situación en curva con cargas del 75%

Finalmente, los resultados de todas las pruebas nos dan resultados válidos, con un coeficiente de seguridad superior a 2 y superando siempre los límites puestos por el reglamento en las pruebas de fatiga.

6.2 ANÁLISIS y RESUMEN DE RESULTADOS

1. Situación de frenado

Se sitúa un punto de concentración de tensiones en la unión entre uno de los radios de la punta de flecha y el perfil de la llanta.

El mayor desplazamiento se encuentra en la parte interna del perfil de llanta, algo normal al ser la parte de la llanta en la que no encontramos radios y por tanto tiene menor rigidez.

| Tensión máxima | Desplazamiento máximo | CS |
|----------------|-----------------------|------|
| 91.72 MPa | 1.373 mm | 3.37 |

2. Situación de paso por curva

Al tratarse de una fuerza que actúa de forma lateral en el borde de llanta, encontramos los puntos de mayores tensiones y desplazamientos en la parte interna del perfil de llanta.

| Tensión máxima | Desplazamiento máximo | CS |
|----------------|-----------------------|------|
| 85.23 MPa | 0.8 mm | 3.63 |

3. Prueba de impacto

Sin fracturas visibles que atravesen una sección del elemento central del soporte de la rueda, requisito indispensable para dar la prueba como válida.

| Tensión máxima |
|----------------|
| 271.6 MPa |

4. Fatiga en situación de frenada

Aparición de los primeros fallos en $2.8 * 10^5$ ciclos en un punto de concentración de tensiones, unión entre uno de los radios y el perfil de llanta.

| Ciclos de vida mínimos | Ciclos de vida necesarios |
|------------------------|---------------------------|
| $2.8 * 10^5$ | $2 * 10^5$ |

5. Fatiga en situación de paso por curva

Aparición de los primeros fallos a partir de los $4.484 * 10^5$ ciclos en la parte interna del perfil de la llanta y en algunos puntos de concentración de tensiones, unión entre los radios y el perfil de llanta.

| Ciclos de vida mínimos | Ciclos de vida necesarios |
|------------------------|---------------------------|
| $4.484 * 10^5$ | $2 * 10^5$ |

Como se observa en los resultados de las simulaciones, la zona más débil de la llanta se encuentra en la parte interna del perfil de llanta. La manera de reducir las tensiones y desplazamientos en esta zona es algo compleja debido a que un mayor espesor del perfil aumentaría demasiado el peso y, además, al sobrepasar cierto espesor, los resultados comienzan a ser desfavorables.

Es importante tener en cuenta que las propiedades del material que se ha escogido (6082-T6 forjado) no contempla las propiedades resultantes del proceso de estirado del aro de la llanta, en el cual se cambia la estructura molecular, redireccionando el grano y dotando el aro de mayor rigidez, se puede esperar entonces que los resultados reales de las pruebas sean mejores incluso de los obtenidos.

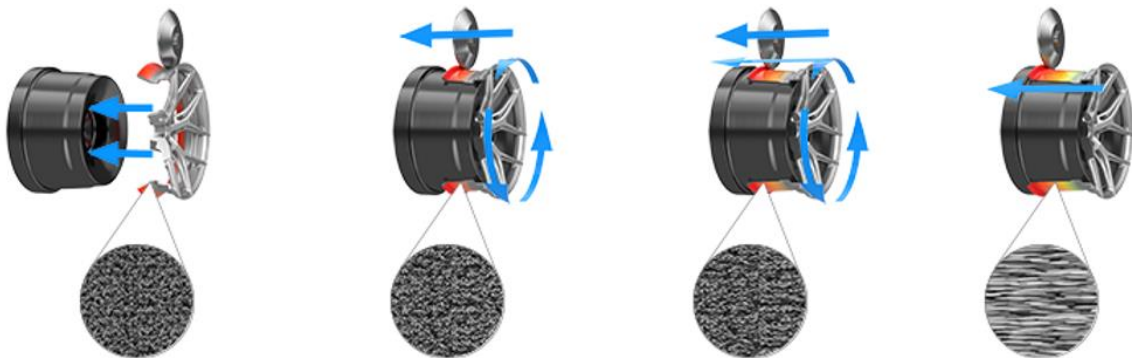


Figura 63. Cambio de estructura molecular en el proceso de estirado del aro

7. ANÁLISIS TOPOLÓGICO

La herramienta de análisis topológico en programas de CAD 3D nos ayuda a mejorar el diseño de una pieza según unos parámetros como pueden ser la reducción de masa, cambios en el diseño con el fin de soportar mayores tensiones o disminuir las deformaciones de una pieza. En este caso, en el que la pieza diseñada ya ha pasado las simulaciones necesarias y no presenta problemas en cuanto a tensiones y deformaciones, se requiere de un análisis topológico con el objetivo de disminuir el peso final de la llanta.

Este análisis, obviamente, debe eliminar o reducir espesores o partes de la llanta sin comprometer el estado de la llanta, esto es restringiendo las tensiones y desplazamientos para que no sobrepasen los valores límite.

Para la realización del análisis topológico, dado que el proceso computacional es bastante pesado y requiere de bastante tiempo, únicamente se realizará el análisis sobre las simulaciones estáticas realizadas para la fuerza máxima de frenado y la centrífuga en curva en la primera situación.

Cuando se realiza cada uno de los análisis es necesario fijar ciertas caras de la pieza que queremos que se mantengan, este es el caso del aro de la llanta, que como sabemos está sujeto a la normativa y, también, los agujeros de los pernos y el buje, además de estos, se realizan varias pruebas con el fin de restringir en cada una de ellas caras diferentes y así obtener un resultado que nos pueda ayudar de manera más clara a la hora de rediseñar la llanta. Por tanto, en cada una de las pruebas realizadas se restringen las paredes exteriores del aro de la llanta, el buje y los agujeros de los pernos y, las diferentes caras que se restringen en cada una de las pruebas serán comentadas a continuación una por una.

1. Restricción de la cara interna de la base de la llanta.

Peso: 8.24 Kg

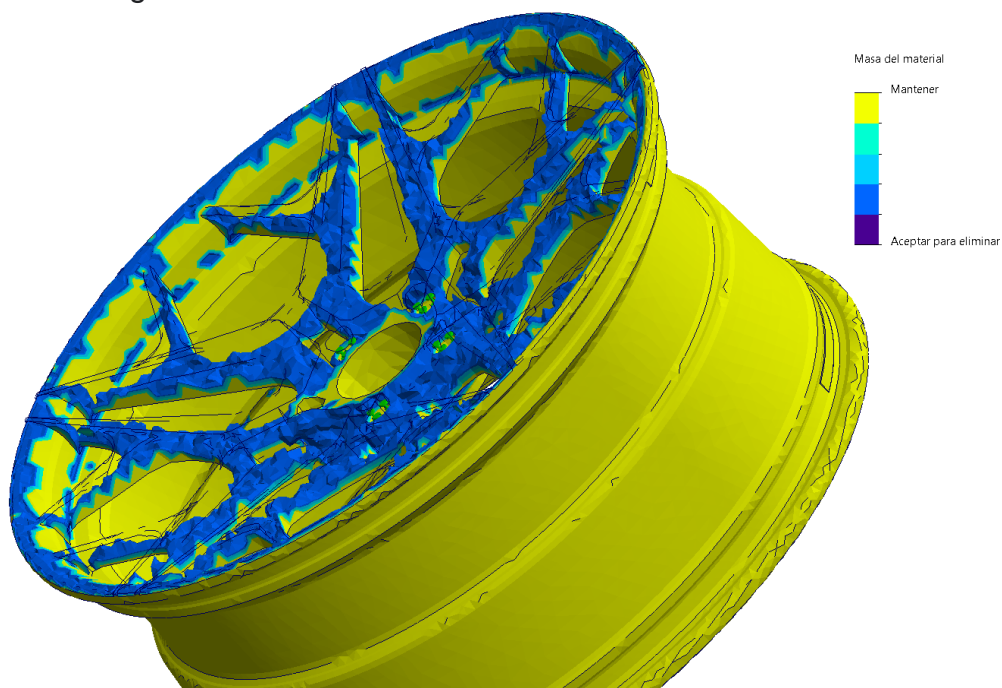


Figura 64. Estudio topológico 1

2. Restricción de las caras laterales de los radios de la llanta
Peso: 8.3 Kg

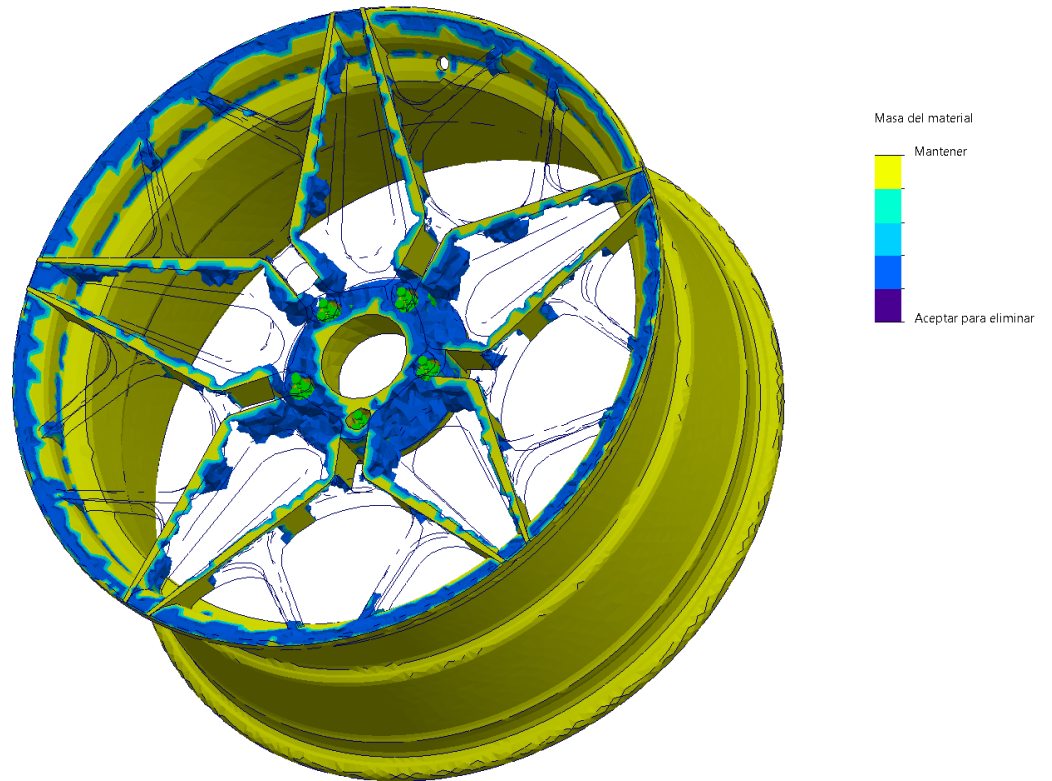


Figura 65. Estudio topológico 2

3. Restricción en las caras exteriores de la base.
Peso: 7.98 Kg

el elemento: 7,98189Kg

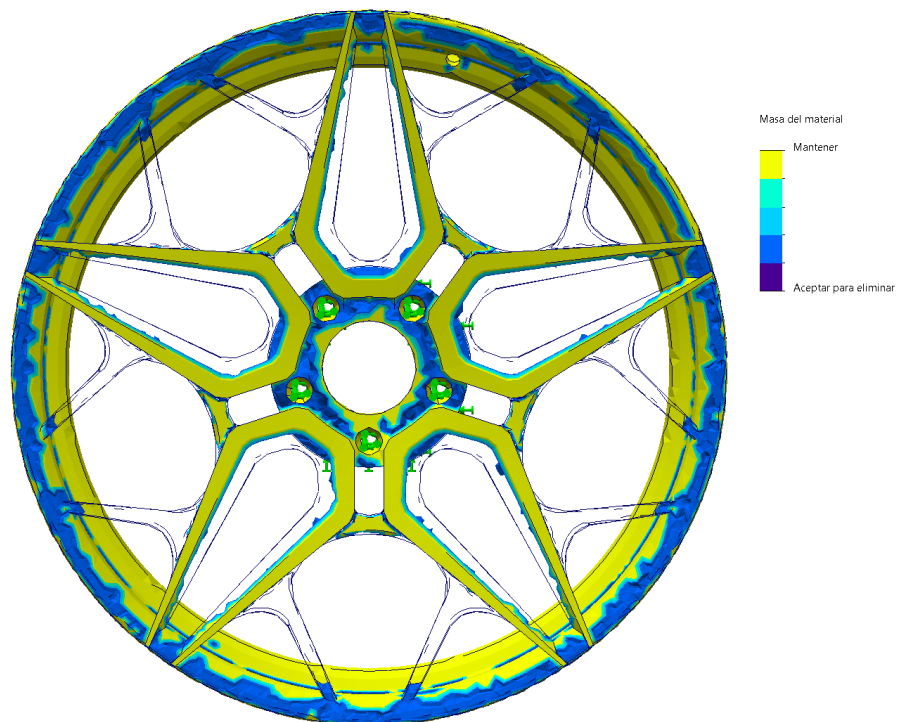


Figura 66. Estudio topológico 3

4. Restricción de las caras laterales de los radios.
Peso: 7.94 Kg

Masa calculada del elemento: 7.94256Kg

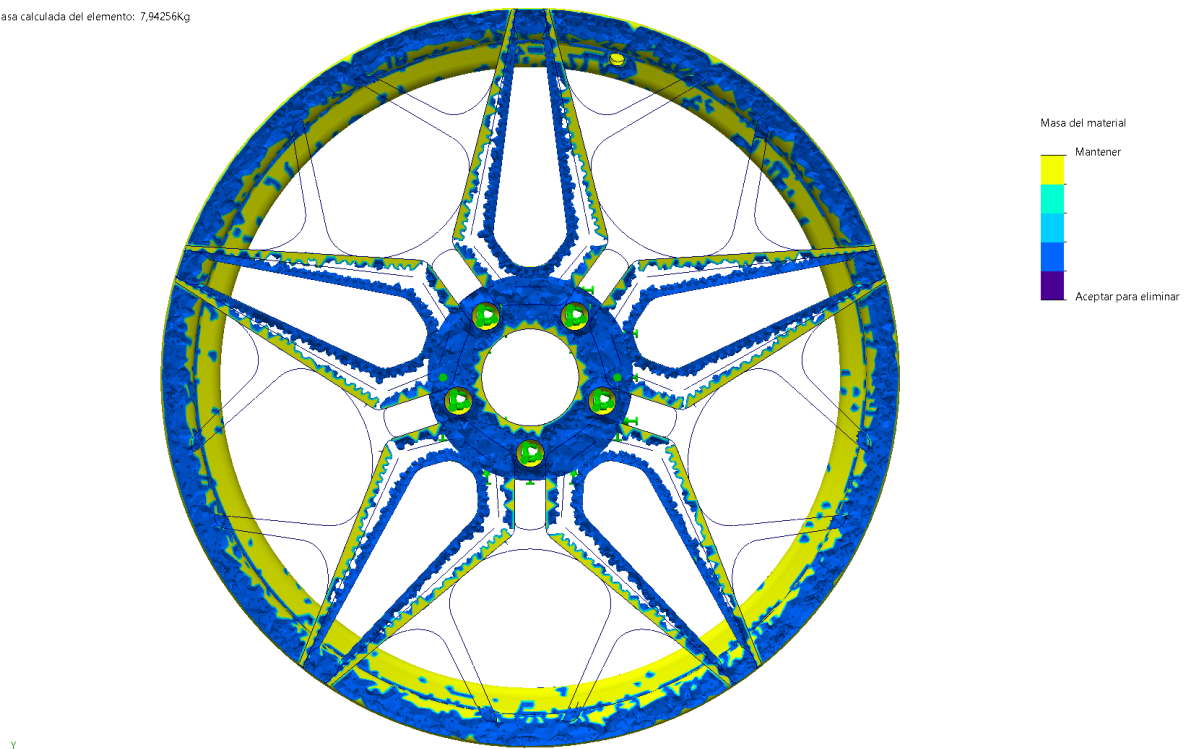


Figura 67. Estudio topológico 4

- **CONCLUSIÓN**

Como se ha explicado anteriormente, el análisis realizado tan solo se ha efectuado en la primera situación de las cargas debido a que es el más desfavorable, debido a esto, ya que las cargas se sitúan únicamente encima de uno de los radios de punta de flecha, hace que, en algunos de los análisis, desaparezcan algunos de los radios de la llanta que no han sido restringidos con el fin de simplificar el análisis.

Los análisis que más información o que mejor información otorgan, son el primero y el cuarto, en los que se puede apreciar como el espesor de la base puede verse reducido y, además, los radios principales pueden reducir su masa haciendo unos orificios entre medio.

8. REDISEÑO

Una vez realizado el análisis topológico y habiendo sacado conclusiones de los cambios que pueden darse en el diseño para conseguir una reducción de peso, se procede al rediseño de la llanta.

8.1 CAMBIOS EN EL DISEÑO

Se realizan orificios en el núcleo de la llanta, tanto en la parte exterior como la interior y se exagera más la concavidad sin cambiar los valores del ET, lo que hace que haya una reducción de material.

| Peso diseño original | Peso del rediseño |
|----------------------|-------------------|
| 14.72 Kg | 13.06 Kg |

Tabla 7. Peso de los diseños

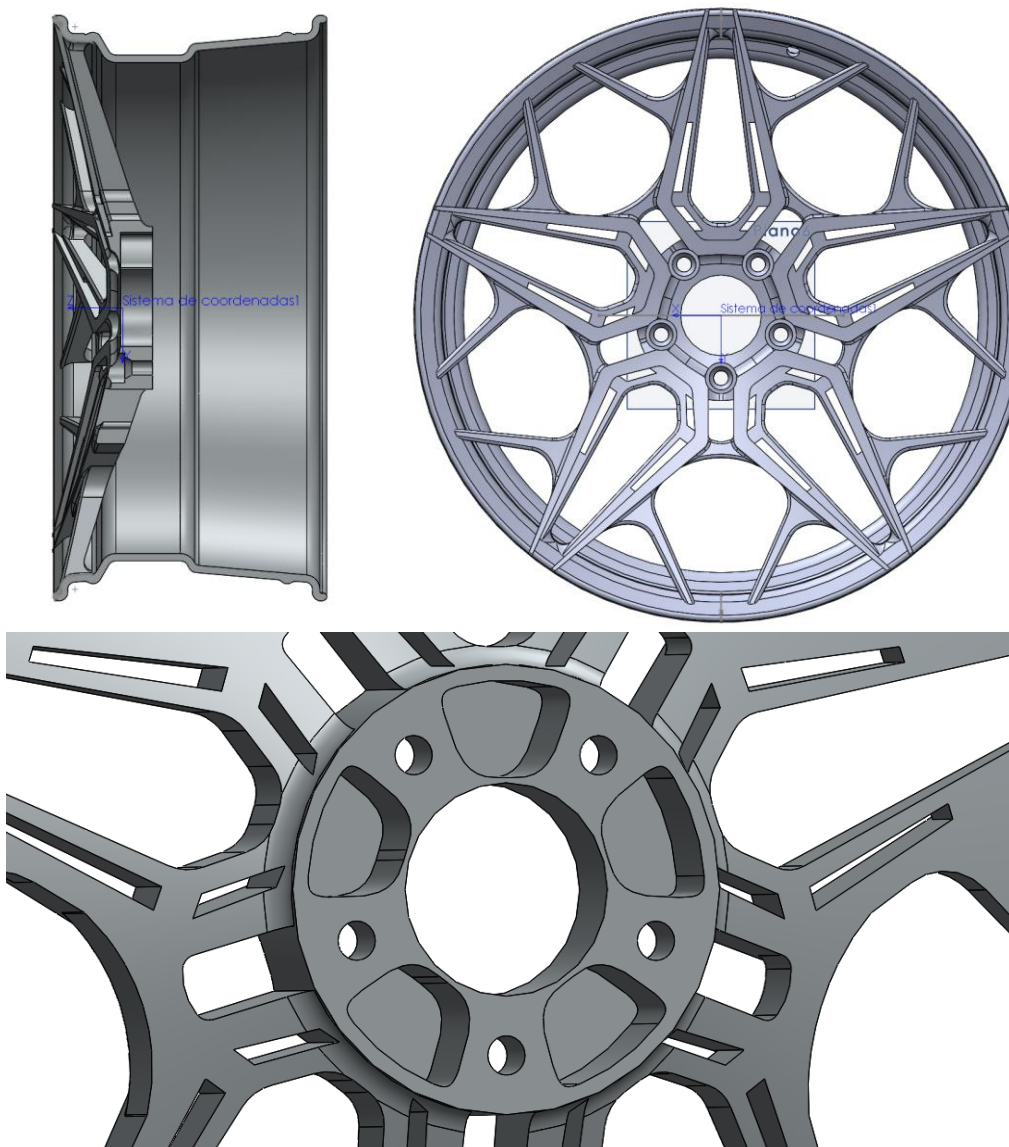


Figura 68. Cambios en el rediseño

8.2 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

1. Situación de frenado

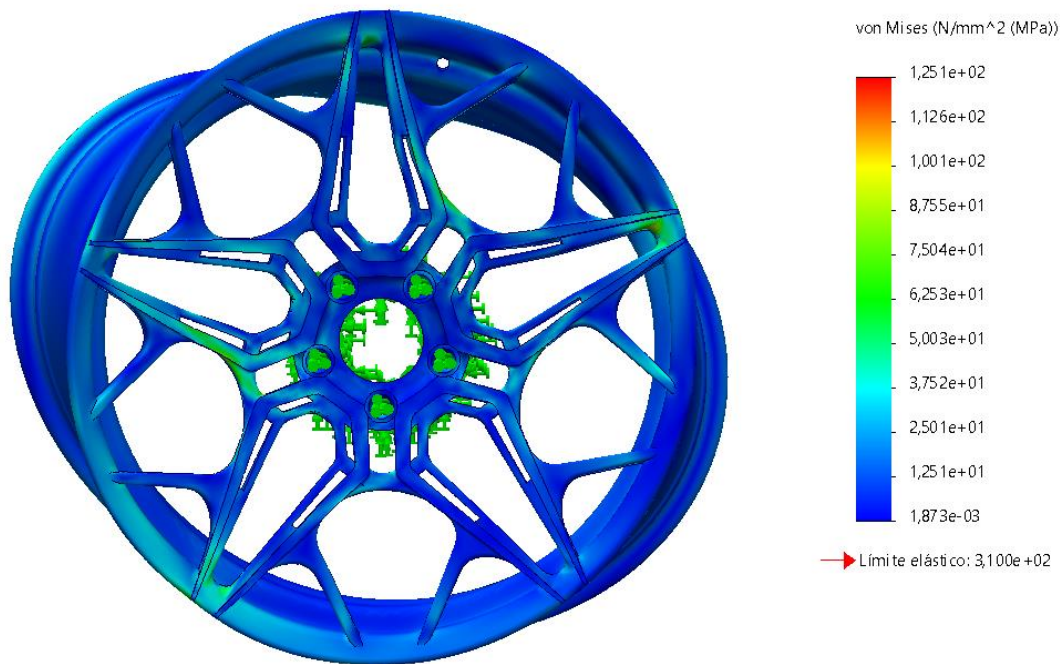


Figura 69. Tensión de Von Mises (MPa), magnitud de la deformada, escala x50

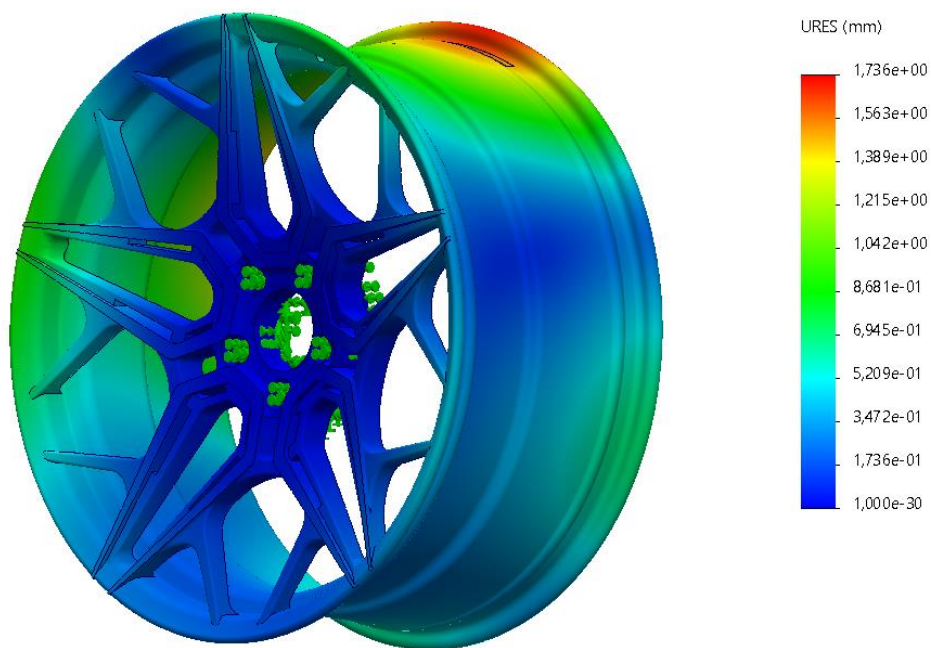


Figura 70. Desplazamientos en mm (resultado real de la deformada)

| Tensión máxima | Desplazamiento máximo | CS |
|----------------|-----------------------|------|
| 125.1 MPa | 1.736 mm | 2.47 |

2. Situación de paso por curva

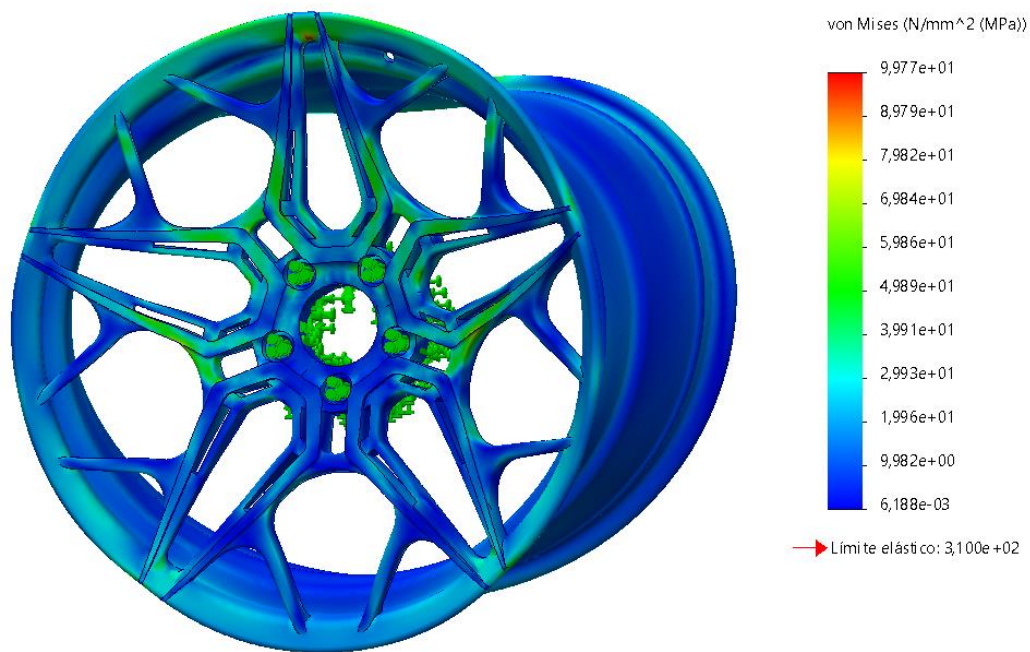


Figura 71. Tensión de Von Mises (MPa), magnitud de la deformada, escala x50

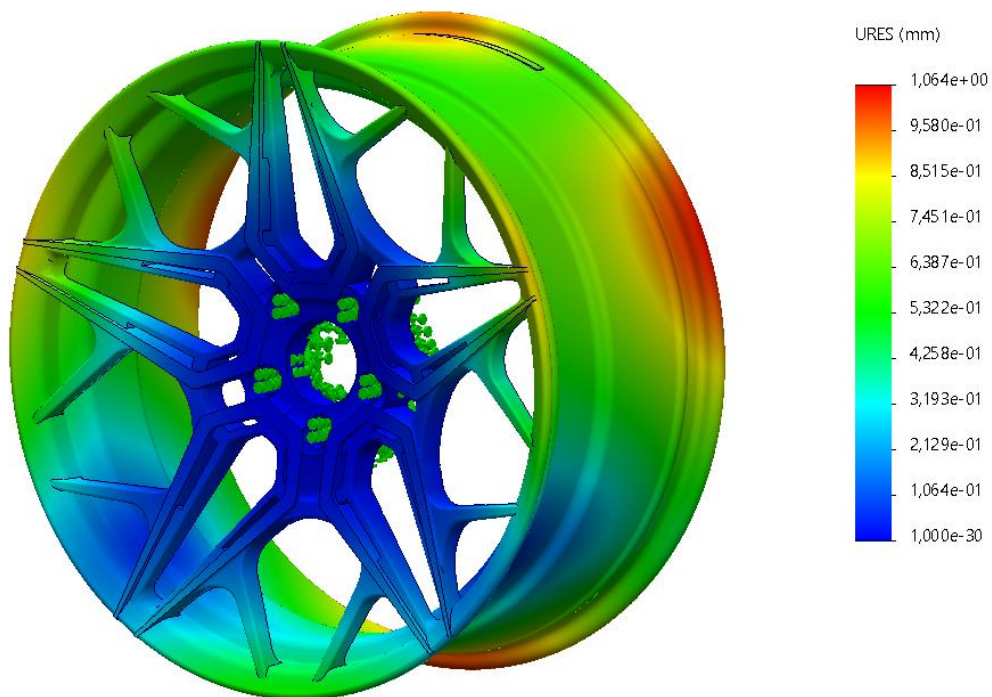


Figura 72. Desplazamientos en mm (resultado real de la deformada)

| Tensión máxima | Desplazamiento máximo | CS |
|----------------|-----------------------|------|
| 99.77 MPa | 1.064 mm | 3.10 |

3. Fatiga en situación de frenada

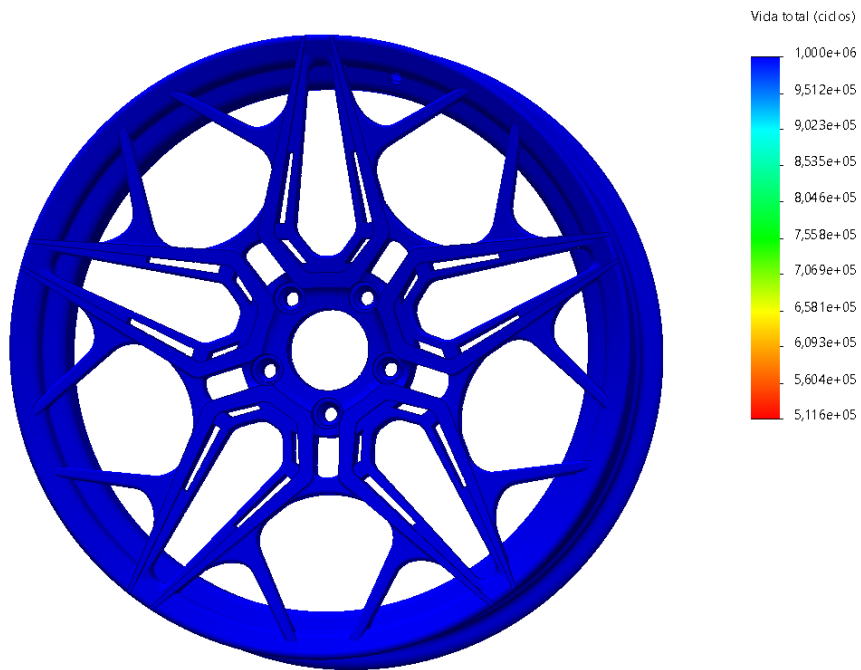


Figura 73. Resultado del análisis de vida de la llanta en ciclos, situación de frenada con carga del 90%

| Ciclos de vida mínimos | Ciclos de vida necesarios |
|------------------------|---------------------------|
| 5.11×10^5 | 2×10^5 |

4. Fatiga en situación de paso por curva

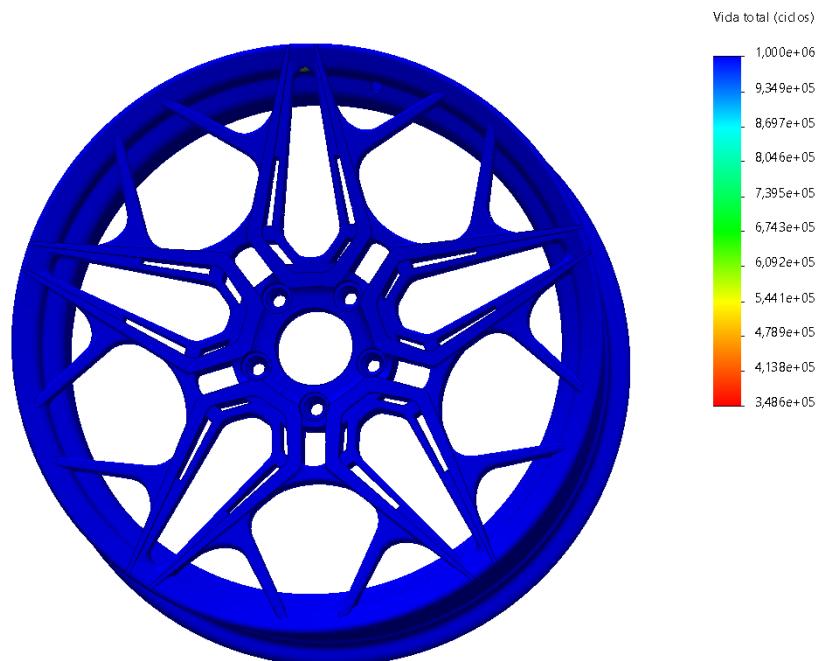


Figura 74. Resultado del análisis de vida de la llanta en ciclos para la situación en curva con cargas del 75%

| Ciclos de vida mínimos | Ciclos de vida necesarios |
|------------------------|---------------------------|
| 3.48×10^5 | 2×10^5 |

Los resultados indican que la llanta es válida y, además, en pruebas como las de fatiga, se consiguen mejores resultados por incluir en el diseño un redondeo en las uniones de los radios con el perfil donde se situaban algunos puntos de concentración de tensiones

A continuación se presenta la tabla de pesos para una llanta del mismo tipo que la diseñada y según las medidas de diámetro y anchura en la que podemos ver que la llanta diseñada viene pesando dentro de los parámetros de otras marcas.

| Size | ET/PCD | Wheel weight | Wheel weight + box | Load | Concave profile |
|-------------|----------|--------------|--------------------|------|-----------------|
| CVR1 | | | | | |
| 19x8,5 | 20/Blank | 11,7 kg | 13,7 kg | 725 | Performance |
| 19x8,5 | 45/5x112 | 10,8 kg | 12,8 kg | 725 | Performance |
| 19x8,5 | 35/5x120 | 11 kg | 13 kg | 725 | Performance |
| 19x9,5 | 20/Blank | 11,7 kg | 13,7 kg | 725 | Deep |
| 19x9,5 | 45/5x112 | 11 kg | 13 kg | 725 | Deep |
| 19x9,5 | 35/5x120 | 11 kg | 13 kg | 725 | Deep |
| 20x8,5 | 20/Blank | 12,7 kg | 14,7 kg | 760 | Performance |
| 20x8,5 | 45/5x112 | 11,9 kg | 13,9 kg | 760 | Performance |
| 20x8,5 | 35/5x120 | 11,9 kg | 13,9 kg | 760 | Performance |
| 20x9 | 20/Blank | 13,4 kg | 15,4 kg | 760 | Performance |
| 20x9 | 45/5x112 | 12,4 kg | 14,4 kg | 760 | Performance |
| 20x9 | 35/5x120 | 12,8 kg | 14,8 kg | 760 | Performance |
| 20x9,5 | 22/Blank | 13,2 kg | 15,2 kg | 760 | Mid |
| 20x10 | 20/Blank | 13,3 kg | 15,3 kg | 760 | Mid |
| 20x10 | 45/5x112 | 12,6 kg | 13,6 kg | 760 | Mid |
| 20x10 | 45/5x120 | 12,6 kg | 13,6 kg | 760 | Mid |
| 20x10,5 | 15/Blank | 13,5 kg | 15,5 kg | 760 | Deep |
| 20x12 | 32/Blank | 14,5 kg | 16,5 kg | 760 | Deep |

Tabla 8. Diferentes pesos según medidas para una llanta (Concaver-CVR1)

9. CONCLUSIONES

La realización de este proyecto ha supuesto un reto desde el primer momento, principalmente por tratar de algo que, a pesar de tener una estrecha relación con la titulación cursada, indaga en un tema muy concreto como es el diseño de una llanta.

Fueron dos las razones principales por las que se eligió este tema para el proyecto, la primera, el gusto por los vehículos y, la segunda, el hecho de poder diseñar un producto o pieza que tuviese también una parte artística y que no solo sirviese para realizar su función si no que también importase su estética.

A lo largo del trabajo se tocan varias ramas relacionadas con las ingeniería, la elección de materiales, los diferentes procesos de fabricación, la búsqueda y uso de las normativas, el diseñado y modelado de piezas 3D, el cálculo de fuerzas y el uso de software para el análisis de elementos finitos, muchos de los procesos realizados en este trabajo eran nuevos o se tenía un conocimiento muy básico sobre ellos y, por ello, creo que este proyecto es un ejercicio bastante completo que me ha hecho indagar sobre diferentes conceptos de los que se tenían nociones básicas.

El resultado final del proyecto son dos diseños de llanta (el segundo realizado a partir del primero) que a priori podrían llegar a ser fabricados y que cumplen las normativas vigentes, dicho esto, el objetivo del proyecto finalmente ha concluido de manera satisfactoria y prueba de ellos son los resultados obtenidos en las simulaciones.

Para realizar este proyecto han sido indispensables gran cantidad de horas de trabajo, no solo de búsqueda de información sobre propiedades de materiales, diferentes cálculos de fuerzas, cargas existentes, procesos de fabricación, etc. sino también, por la necesidad de aprender a utilizar un software 3D, como es SolidWorks, del cual no se tenía ningún conocimiento previo si bien a lo largo de estos años se han tratado programas de índoles parecidas en la titulación. Esto me ha permitido obtener nuevos conocimientos en áreas muy interesantes sobre el diseño de producto y la utilidad de herramientas de gran utilidad como el análisis topológico.

El proyecto por supuesto tiene posibilidades de ser continuado. Como sabemos, la llanta es fabricada mediante un proceso de forja en el que posteriormente encontramos también un fresado de la pieza con el que se realiza el diseño del dibujo de la llanta, este proceso puede ser diseñado también mediante la utilización de softwares 3D, el orden de los movimientos, diferentes herramientas que son utilizadas, etc.

También podría realizarse un estudio de mercado, realizar un presupuesto del coste que supondría la producción de la llanta he incluso más centrado en el área logística, la obtención de materiales y distribución del producto.

Por último, como ya se ha comentado anteriormente, más que realizar un trabajo, la realización de este proyecto ha servido como fuente de conocimiento, dándome una idea de lo que realmente me gustaría hacer en un futuro, yendo relacionado con el diseño de producto mediante softwares 3D y, además, para saber más sobre que trata la ingeniería y el hecho de tener que realizar un proyecto en el que, para llegar a una solución, debes enfrentar cientos de problemas para poder cumplir tu objetivo.

ANEXOS

“Diseño y estudio de una llanta de automóvil”

“Design and study of a car wheel”

Autor/es

Jorge Torres Gómez

Director/es

Jesús Cuartero Salafranca

Titulación del autor

Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2021

ANEXO 1 (Propiedades de los materiales)

En este anexo se van a exponer las propiedades de los diferentes materiales que se comentan en el Tema 2, referente a los tipos de llantas que existen según el material con el que se fabrican.

- **Acero**

Las llantas de acero son fabricadas mediante aleaciones de acero con carbono debido a sus mejores propiedades, tanto de módulo como de límite elástico.

| Propiedades | AISI 1015 | 1023 Chapa (SS) | AISI 1020 laminado en frio | Unidades |
|-----------------------------------|------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Módulo elástico | 205000 | 204999.9984 | 205000 | <i>MPa</i> |
| Coefficiente de Poisson | 0.29 | 0.29 | 0.29 | - |
| Módulo cortante | 80000 | 79999.99987 | 80000 | <i>MPa</i> |
| Densidad de masa | 7870 | 7858.000032 | 7870 | <i>Kg/m³</i> |
| Límite de tracción | 385 | 425.0000032 | 420 | <i>MPa</i> |
| Límite elástico | 325 | 282.685049 | 350 | <i>MPa</i> |
| Coefficiente de expansión térmica | 1.2e-05 | 1.2e-05 | 1.17e-05 | <i>K⁻¹</i> |
| Conductividad térmica | 52 | 52 | 51.9 | <i>W/m K</i> |
| Calor específico | 486 | 486 | 486 | <i>J/Kg K</i> |

Tabla 9. Propiedades mecánicas de aceros aleados con carbono

- **Aleaciones de aluminio y magnesio**

A continuación, se presentan las propiedades de cuatro aleaciones, dos de ellas referentes a aleaciones de aluminio y otras dos de magnesio.

| Propiedades | 6061-T6 | 6082-T6 (forjado) | ZK60-T1 | AZ60A-T1 | Unidades |
|-----------------------------------|----------------|--------------------------|----------------|-----------------|-------------------------|
| Módulo elástico | 69000 | 73000 | 44800 | 45000 | <i>MPa</i> |
| Coefficiente de Poisson | 0.33 | 0.33 | 0.35 | 0.35 | - |
| Módulo cortante | 26000 | | 17000 | 17000 | <i>MPa</i> |
| Densidad de masa | 2700 | 2700 | 1830 | 1830 | <i>Kg/m³</i> |
| Límite de tracción | 310 | | 365 | 365 | <i>MPa</i> |
| Límite elástico | 275 | 310 | 305 | 302-290 | <i>MPa</i> |
| Coefficiente de expansión térmica | 2.4e-05 | 2.4e-05 | 2.5e-05 | 2.5e-05 | <i>K⁻¹</i> |
| Conductividad térmica | 166.9 | | 160 | 160 | <i>W/m K</i> |
| Calor específico | 896 | | 1000 | 1000 | <i>J/Kg K</i> |

Tabla 10. Propiedades mecánicas de aleaciones de aluminio y magnesio

- **Fibra de carbono**

Las fibras de carbono se pueden clasificar por su valor de módulo elástico, según esta clasificación podemos encontrar diferentes clases de fibras, en este caso: SM ("Standard modulus"), HM ("High modulus") e IM ("Intermediate modulus").

| Propiedades | Fibras SM | Fibras IM | Fibras HM | Unidades |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|
| Contenido de carbono | 95 | 95 | <99 | % |
| Diámetro de la fibra | 6-8 | 6-8 | 5-8 | μm |
| Módulo elástico | 220-241 | 290-297 | 345-448 | <i>GPa</i> |
| Densidad de masa | 1800 | 1800 | 1900 | <i>Kg/m³</i> |
| Límite de tracción | 3450-4830 | 3450-6200 | 3450-5520 | <i>MPa</i> |
| Conductividad térmica | 20 | 20 | 50-80 | <i>W/m K</i> |
| Límite elástico | 2400-2600 | 2500-2900 | 2900-3200 | <i>MPa</i> |
| Coefficiente de Poisson | 0.25 | 0.25 | 0.25 | |

Tabla 11. Propiedades mecánicas de diferentes fibras de carbono

- **Titanio**

Clasificación de tres aleaciones diferentes de titanio.

| Propiedades | Ti-5Al-2.5Sn | Ti-8Al-1Mo-1V | Ti-8Mn (recocido) | Unidades |
|-----------------------------------|--------------|---------------|-------------------|-------------------------|
| Módulo elástico | 110300 | 120000 | 105000 | <i>MPa</i> |
| Coefficiente de Poisson | 0.31 | 0.32 | 0.37 | - |
| Módulo cortante | 48000 | 46000 | 344 | <i>MPa</i> |
| Densidad de masa | 4480 | 4370 | 370 | <i>Kg/m³</i> |
| Límite de tracción | 861 | 937 | | <i>MPa</i> |
| Límite de compresión | 830 | | 9e-06 | <i>MPa</i> |
| Límite elástico | 827 | 910 | 4510 | <i>K⁻¹</i> |
| Coefficiente de expansión térmica | 9.4e-06 | 8.5e-06 | 0.85 | <i>W/m K</i> |
| Conductividad térmica | 7.8 | 6 | 10.9 | <i>J/Kg K</i> |
| Calor específico | 530 | 502 | 495 | |

Tabla 12. Propiedades mecánicas de aleaciones de titanio

ANEXO 2 (cálculos detallados)

- Cálculo de la fuerza lateral y el peso de la llanta, fuerzas que actúan de manera estática en la llanta.

- **Peso**

El dato de peso que nos da la marca, de 1860Kg, hace referencia al peso del coche en vacío, por ello se toma la decisión de sumarle a este peso 400Kg extra para obtener las máximas fuerzas a las que se vería sometida la llanta.

$$P_v = m_v g = (1860 + 400) 9.8 = 22148 \text{ N}$$

$$P_{eje} = \frac{1}{2} P_v = 11074 \text{ N}$$

$$P = \frac{1}{2} P_{eje} = 5537 \text{ N}$$

- **Fuerza lateral debida a la presión de inflado**

$$F_{lat} = \frac{1}{2} P \pi (r_{ext}^2 - r_{int}^2)$$

Donde P se refiere a la presión de inflado del neumático, r_{ext} se refiere al radio exterior del neumático y r_{int} al radio interior del neumático, este último coincidente con el valor del diámetro de llanta, en este caso 20", lo equivalente a 256,4 mm.

Para el cálculo del radio exterior de neumático se sigue el siguiente procedimiento, la nomenclatura del neumático, expresada de la siguiente manera, 275/30, hace referencia a la anchura de neumático y al porcentaje del ancho de neumático que supone el perfil, de esta manera, si calculamos el perfil, sabiendo que es un 30% de los 275mm de la medida correspondiente la anchura y le sumamos el radio interior, obtenemos el radio exterior del neumático.

$$r_{ext} = (275 * 0,3) + 256.4 = 338,9 \text{ mm}$$

Sabiendo los valores de la presión y de los radios, calculamos la F_{lat} .

$$F_{lat} = \frac{1}{2} 0.28 \pi (338,9^2 - 256.4^2) = 21600,7 \text{ N}$$

-Cálculo de fuerzas dinámicas en el vehículo, movimientos de frenado y paso por curva del vehículo.

- **Situación de frenada**

Para el cálculo de la fuerza de frenado es necesario primero el cálculo del centro de gravedad del vehículo, teniendo en cuenta las medidas del vehículo (algunas disponibles en la web oficial de Audi y otras, como la altura del centro de gravedad, proporcionada por su departamento técnico) y la distribución de pesos para un vehículo de motor delantero y tracción total tenemos:

$$CG_{d,x} = \frac{P_{eje}}{P_v} L = \frac{11074}{22148} 2.766 = 1.383 \text{ m}$$

$$CG_{d,x} = CG_{t,x}$$

$$CG_{d,y} = 571 \text{ mm}$$

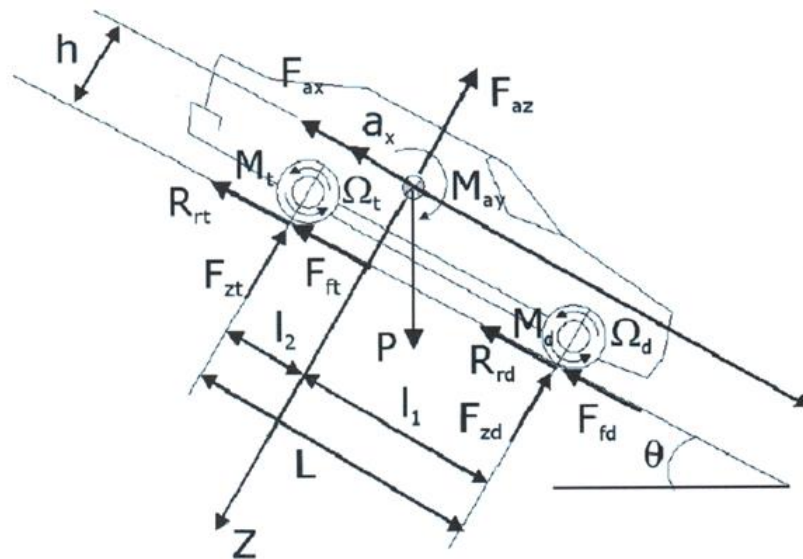
Para el cálculo de la deceleración máxima, se cogen los datos de frenada de vehículos del mismo tipo en pruebas de 100-0 Km/h, en los que las menores distancias de frenado obtenidas rondan los 32 m, de esta manera se calcula la deceleración y el coeficiente máximo de adherencia.

$$D_f = \frac{v^2}{2 a_v} \rightarrow a_v = \frac{v^2}{2 D_f} = \frac{27,77^2}{2 * 32} = 12,05 \text{ m/s}^2$$

$$F_{max} = P \mu_a = (P_{d,d} + P_{t,d}) \mu_a = a_v m_v$$

$$\mu_a = \frac{m_v a_v}{P} = \frac{a_v}{g} = \frac{12,05}{9.8} = 1.22$$

Se plantea el diagrama del sólido libre y se resuelven las ecuaciones de fuerzas y momentos.



Donde:

- h : altura del centro de gravedad del vehículo
- L : batalla
- F_{ax} y F_{az} : fuerzas aerodinámicas en los dos ejes
- M_{ay} : momento debido a la aerodinámica producido en el eje y
- F_{zd} y F_{zt} : reacción normal en los ejes delantero y trasero
- F_{fd} y F_{ft} : fuerzas de frenado en los ejes
- R_{rd} y R_{rt} : fuerzas de rodadura
- M_d y M_t : momento de frenada
- a_x : deceleración del vehículo
- Ω_d y Ω_t : deceleración angular en las ruedas
- θ : pendiente del suelo
- F_i : fuerza de inercia $F_i = m_v a_v$

Sumatorio de fuerzas y momentos

$$\sum F_x = m_v a_v \rightarrow F_{ax} + F_{ft} + F_{fd} + R_{rt} + R_{rd} - P \operatorname{sen} \theta = m_v a_v$$

$$\sum M_d = 0 \rightarrow F_{zd} = \frac{P \cos \theta l_2 + (m_v a_v + P \operatorname{sen} \theta - F_{ax})h}{L}$$

$$\sum M_t = 0 \rightarrow F_{zt} = \frac{P \cos \theta l_1 - (m_v a_v + P \operatorname{sen} \theta - F_{ax})h}{L}$$

Suponiendo una superficie horizontal ($\theta = 0$) se tiene que:

$$\sum F_x = m_v a_v \rightarrow F_f + R_r = m_v a_v \rightarrow P(f_r + \mu) = m_v a_v \rightarrow P\mu_a = m_v a_v$$

$$\sum M_d = 0 \rightarrow F_{zd} = \frac{P l_2 + (m_v a_v - F_{ax})h}{L}$$

$$\sum M_t = 0 \rightarrow F_{zt} = \frac{P l_1 - (m_v a_v - F_{ax})h}{L}$$

Siendo TP, la transferencia de peso entre ejes:

$$TP = \frac{P\mu_a - F_{ax}}{L} h = \frac{22148 * 1,23 - 345,4}{2,766} 0,521 = 5066,21 \text{ N}$$

Y sabiendo que las fuerzas de frenado, aerodinámica y rodadura responden a:

$$F_f = P\mu$$

$$R_r = P f_r$$

$$F_{ax} = \frac{1}{2} v^2 \rho S C_x = \frac{1}{2} 27.77^2 * 1,29 * 2,17 * 0.32 = 345,4 \text{ N}$$

Se obtienen el resultado de los pesos después de efectuarse la transferencia de pesos y el momento de frenado generado en la rueda:

$$F_{zd} = \frac{P l_2}{L} + \frac{P(f_r + \mu) - F_{ax}}{L} h = 16140,21 \text{ N}$$

$$F_{zt} = \frac{P l_1}{L} - \frac{P(f_r + \mu) - F_{ax}}{L} h = 6007,79 \text{ N}$$

$$F_{a,d} = F_{f,d} + R_{r,d} = F_{zd} \mu_a = 16140,21 * 1,22 = 19691,05 \text{ N}$$

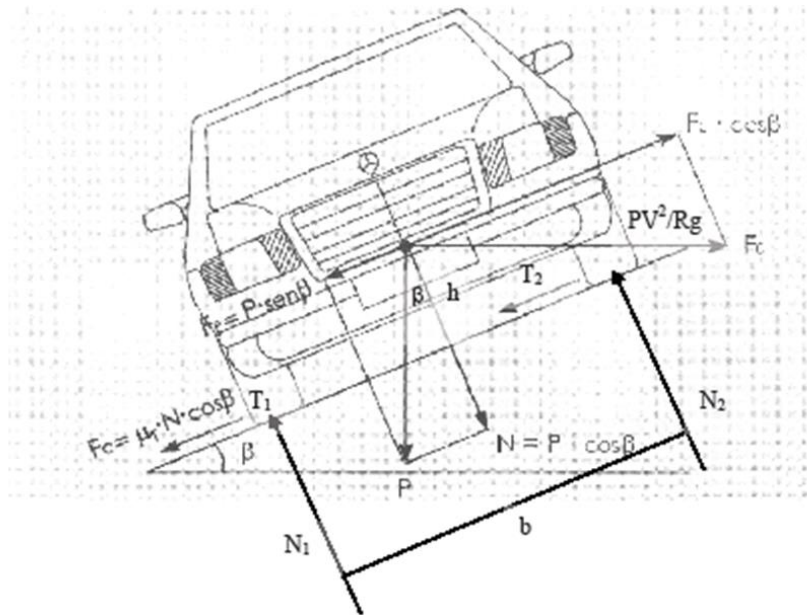
$$M_d = F_{a,d} R = 19691,05 * 0,3389 = 6673,29 \text{ Nm}$$

$$M_{f, llanta} = \frac{M_{f,d}}{2} = 3336,6 \text{ Nm}$$

- **Situación en el paso por curva**

Para el cálculo de la fuerza centrífuga es necesario saber también situar el centro de gravedad, en este caso viene dado por las propias cotas que nos proporciona la marca y sabiendo que la distribución de pesos debe ser igual en las ruedas tanto de la izquierda como la derecha del vehículo.

El siguiente paso es plantear el diagrama del sólido libre y resolver los sumatorios.



Donde:

- T_1 y T_2 : fuerzas de rozamiento
- F_c : fuerza centrífuga
- N_1 y N_2 : reacción normal con el suelo
- β : pendiente del suelo
- b : distancia entre ruedas
- P : peso del vehículo
- h : altura del centro de gravedad

Sumatorio de fuerzas y momentos

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_c \cos \beta = P \sin \beta + T_1 + T_2$$

$$\sum F_z = 0 \rightarrow P \cos \beta + F_c \sin \beta = N_1 + N_2$$

$$\sum M_i = 0 \rightarrow N_2 = \frac{F_c \sin \beta + P \cos \beta}{2} + \frac{F_c \cos \beta - P \sin \beta}{b} h$$

$$\sum M_d = 0 \rightarrow N_1 = \frac{F_c \sin \beta + P \cos \beta}{2} - \frac{F_c \cos \beta - P \sin \beta}{b} h$$

Suponiendo $\beta = 0$, se obtiene:

$$\sum F_y = 0 \rightarrow F_c = T_1 + T_2 = P\mu$$

$$\sum F_z = 0 \rightarrow P = N_1 + N_2$$

$$\sum M_i = 0 \rightarrow N_2 = \frac{P}{2} + \frac{F_c}{b}h$$

$$\sum M_d = 0 \rightarrow N_1 = \frac{P}{2} - \frac{F_c}{b}h$$

Por último, se calculan las fuerzas correspondientes para hallar la fuerza de rozamiento lateral en la llanta.

$$TP = P \frac{\mu h}{b} = 22148 \frac{1,188 * 0,521}{1,598} = 8578,5 \text{ N}$$

$$N_2 = \frac{P}{2} + TP = \frac{22148}{2} + 8578,5 = 19652,51 \text{ N}$$

$$T_2 = N_2\mu = 19652,51 * 1,188 = 23347,18 \text{ N}$$

$$T_{llanta} = \frac{T_2}{2} = 11673,6 \text{ N}$$

-Los valores de las medidas del vehículo tomadas en los cálculos aparecen representados en los planos del vehículo que nos proporciona la marca.

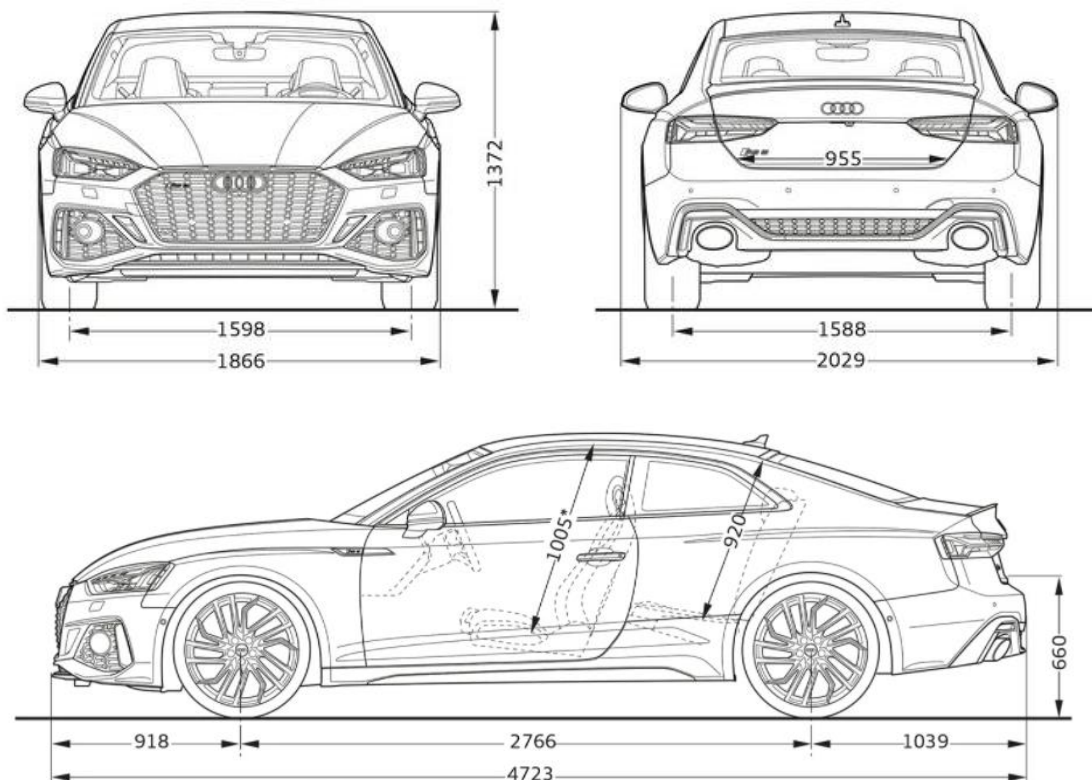


Figura 75. Medidas Audi RS5

BIBLIOGRAFÍA

- **Cálculos de fuerzas**

<https://www.engineersrule.com/finite-element-analysis-of-pneumatic-tire-loading-on-wheel/>

<https://www.race.es/wp-content/uploads/2014/04/InformeRACEGOODYEAR-Neumaticos-y-asfalto-2014-juntos-por-tu-seguridad.pdf>

<https://www.neumaticos-uniroyal.es/turismo/catalogo-de-neumatico/educacion-vial/las-fuerzas-fisicas-al-tomar-curvas>

<https://periodismodelmotor.com/50-coches-mejor-frenan/169573/>

<https://fuerzasautomovilisticas9c.weebly.com/peso.html>

https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_de_peso

http://www.dgt.es/Galerias/la-dgt/empleo-publico/oposiciones/doc/2013/TEMA_4_GESTION_TECNICA_TRAFICO.doc

<https://causadirecta.com/especial/calculo-de-velocidades/tablas/tabla-de-factores-de-rozamiento-del-pavimento-para-neumaticos-de-goma>

<http://www2.fisica.unlp.edu.ar/materias/fisicageneralcn/Resistenciarodadura.pdf>

http://www.blogmecanicos.com/2017/12/la-resistencia-la-rodadura-y-la_5.html

https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/12864/PFC_Rafael_IbanezdeAldecoa_Garcia.pdf?sequence=1&isAllowed=y

<http://creandoconciencia.org.ar/enciclopedia/accidentologia/la-fisica-de-la-colision/COMPORTAMIENTO-DEL-VEHICULO.pdf>

CRIADO OCAÑA, Elena. *Diseño y cálculo del sistema de frenado para un prototipo formula student*. Trabajo de fin de carrera, Universidad Carlos II de Madrid, Leganés, 2012.

ESCRICHE VILLARROYA, Diego. *Llanta de automóvil en aleación de aluminio destinada a personalización masiva*. Trabajo de fin de carrera, Universidad Jaume I, Julio, 2017.

- **Definiciones y partes de una llanta**

<https://www.diariomotor.com/que-es/mecanica/llantas-medidas-tipos/#pcd>

- **Fabricación de llantas y materiales**

<https://www.ozracing.com/es/mundo-oz/tecnologia/produccion>

<https://ingemecanica.com/tutoriales/materiales.html#tabla1>

<https://www.3dnatives.com/es/fusion-por-haz-de-electrones-les-explicamos-todo/#>

S. Cecchel, D. Ferrario, G. Cornacchia. Heat treatments of EN AW 6082 aluminum forging alloy: effect on microstructure and mechanical properties. *International Journal of the Italian Association for Metallurgy*. Marzo, 2020.

http://www.aimnet.it/la_metallurgia_italiana/2020/marzo/cecchel.pdf

- **Normativa y documentos oficiales**

Norma española: *UNE 69026:2007, UNE 69018:2002, UNE 26018:1977, UNE 69001:2001.*

Boletín Oficial del Estado: Reglamento nº 124 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE) que aparece publicado en el Boletín Oficial del Estado (referencia: DOUE-L-2006-82689). Diciembre, 2006.

- **Videos de Youtube**

KONIG WHEELS USA. *What is Flow Forming technology? – Konig Wheels.*

<https://www.youtube.com/watch?v=5WtM12r969I&list=LL&index=10>

Tectran Corporation. *Flow formed, flow forming wheel production.*

https://www.youtube.com/watch?v=FTezzyi20_0&list=LL&index=11

FlowForm Wheels. *FlowForm Wheels | A Look Inside The Factory.*

<https://www.youtube.com/watch?v=C6nMHWsWPMg&list=LL&index=12>

TrailBuilt Off-Road. *Cast Wheels vs Flow Form vs Forged Wheels.*

<https://www.youtube.com/watch?v=a3F5OkdAvPU>

VossenWheels. *How It's Made Part 4 of 5 | Manufacturing.*

<https://www.youtube.com/watch?v=JQ87n-tTddo>

- **Marcas de llantas que han servido de referencia**

Vossen - <https://vossenwheels.com/>

Concaver - <https://concaverwheels.com/>

Svipe - <https://www.svipemotorsports.com>

Vertini - <http://vertiniwheels.com/>

BBS - <https://bbs.com/>

OZ - <https://www.ozracing.com/>

Rennen Forged - <http://www.rennenforged.com/>