

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Título del Trabajo Fin de Grado



Grado en Ingeniería Mecánica

DISEÑO DE UNA SUSPENSIÓN DEL TIPO TELELEVER

Francisco Labiano Mezquíriz

Vanesa Estremera Carrera

Pamplona, 29/06/2016

RESUMEN

El presente proyecto trata sobre el diseño de un sistema de suspensión delantera alternativa para una motocicleta de competición de Moto3.

Dicho proyecto surge a raíz de la competición universitaria MotoStudent, en la cual la Universidad Pública de Navarra participa en esta edición. Es por ello por lo que se ha decidido realizar un diseño alternativo, ya que en esta competición se exige un cierto grado de innovación.

Como se trata de una motocicleta eléctrica se ha creído que las características de este sistema de suspensión pueden acoplarse adecuadamente a las características de la moto.

Primero se ha realizado un estudio de todas las posibles cargas que puedan actuar en la motocicleta para después aplicarlas sobre las distintas piezas y analizar los resultados mediante un análisis por elementos finitos. Y en el caso de obtener buenos resultados, mejorar el diseño de dichas piezas.

LISTADO DE PALABRAS CLAVE

- Suspensión
- Suspensión alternativa
- Suspensión delantera
- Motocicleta
- Horquilla convencional
- Telelever
- MotoStudent
- Cargas
- Elementos finitos



Indice

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	OBJETIVO	4
1.2	ANTECEDENTES	4
1.2.1	MotoStudent	4
2	INTRODUCCIÓN A LA SUSPENSIÓN	6
2.1	HISTORIA DE LA SUSPENSIÓN	6
2.2	TIPOS DE SUSPENSIÓN DELANTERA ACTUALES	9
2.2.1	Horquilla telescópica	9
2.2.2	Telelever	10
2.2.3	Duolever	10
2.3	CONCEPTOS BASICOS SOBRE SUSPENSIÓN.....	11
2.3.1	Principios de la suspensión	11
2.3.2	Manejabilidad.....	12
2.3.3	Adherencia o agarre a la carretera.....	12
2.3.4	Estabilidad	12
2.3.5	Movimientos lineales y angulares.....	13
2.3.6	Geometría básica de la motocicleta.....	13
2.3.7	Batalla.....	16
2.3.8	Peso y su posición	16
2.4	MOTIVO DE LA ELECCIÓN.....	16
3	ANÁLISIS DE ESFUERZOS	17
3.1	CÁLCULOS TEÓRICOS.....	17
3.1.1	Movimiento rectilíneo.....	18
3.1.2	Fuerzas de resistencia aerodinámica	18
3.1.3	Fuerzas verticales en estado estacionario	19
3.1.4	Fuerza de resistencia causada por la pendiente de la carretera	20
3.1.5	Equilibrio en estado estacionario.....	21
3.1.6	Movimiento lineal transitorio	22
3.1.7	Curva en estado estacionario.....	29
3.1.8	Cargas debidas a las irregularidades del terreno	35
3.1.9	Cargas finales para utilizar en el análisis FEM.....	43
3.1.10	Traslado de las cargas al punto de aplicación	44
4	ANALISIS POR ELEMENTOS FINITOS.....	47



4.1	Desplazamientos en X	47
4.2	Desplazamientos en Y	47
4.3	Desplazamientos en Z	47
4.4	Tensiones de Von Mises	48
5	BIBLIOGRAFIA	50





1 INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVO

El objetivo del presente proyecto es el diseño de la suspensión delantera de una motocicleta eléctrica de competición para la categoría *Moto3*.

Más concretamente se centrará en el cálculo y el diseño de los distintos elementos necesarios para realizar la adaptación de una suspensión de *horquilla convencional* a una suspensión alternativa del tipo *Telelever*.

La moto que se va a diseñar es para la competición universitaria *MotoStudent*, en la cual se busca un cierto grado de innovación. Es por ello por lo que se ha decidido realizar esta adaptación, ya que la *horquilla convencional* es un sistema de suspensión ampliamente desarrollado y empleado, mientras que el sistema *telelever* apenas es utilizado y, debido a sus características, se cree que puede ser interesante para esta aplicación.

1.2 ANTECEDENTES

En cuanto a los antecedentes a este proyecto, únicamente se dispone de los proyectos realizados por compañeros para anteriores ediciones de *MotoStudent*; en uno de los cuales se presentaba una suspensión alternativa de paralelogramo y en el otro el diseño de las tijas para una suspensión convencional. Solo se dispone de estos proyectos debido a que en ediciones anteriores la suspensión delantera era suministrada por la propia organización de la competición.

Como ya se ha dicho antes, este proyecto surge a raíz de la competición *MotoStudent*, la cual se presentará brevemente a continuación.

1.2.1 MotoStudent

Se trata de una competición promovida por la fundación *Moto Engineering Foundation* y *TechnoPark Motorland* en la que los diferentes equipos provenientes de todo el mundo deben diseñar y desarrollar un prototipo de moto de competición que deberá superar distintas fases y pruebas impuestas por la organización. Además de superar estas pruebas, también tiene una gran importancia innovar.

En esta edición cabe destacar que habrá dos categorías diferentes:

- *MotoStudent Petrol*
- *MotoStudent Electric*

La primera de ellas se caracteriza porque emplea un sistema de propulsión mediante un motor de combustión interna; mientras que la segunda utiliza un sistema totalmente eléctrico.

Para los equipos inscritos en la categoría *electric* (en la cual pertenece el equipo de la UPNA) la organización envía el siguiente kit, cuyos componentes deben ser utilizados obligatoriamente:



- Motor eléctrico *AFPM Heinzmann PMS* refrigerado por aire.
- Dispositivo Vigilante de aislamiento (IMD) *Bender Isometer*.
- 1 juego de neumáticos slick *Dunlop* delantero y trasero.
- 1 juego de llantas delantera y trasera *Marchesini M10RS Kompe Moto3*.
- Pinzas y bombas de freno *J.Juan* (Delanteras y traseras).

Tanto el proyecto como la moto serán juzgados y evaluados a lo largo de varias pruebas frente a sus competidores para determinar el mejor proyecto y la mejor moto.

Primero habrá una fase previa que consiste en una serie hitos y entregas de documentación que no son puntuables pero si pueden acarrear penalizaciones en las fases siguientes si no se cumplen los plazos correspondientes.

Después de esta fase previa se realizarán verificaciones técnicas a las motos para garantizar que cumplen unos requisitos mínimos de resistencia, seguridad y funcionamiento. Estas verificaciones se dividen en: verificación estática de seguridad, verificación de seguridad en banco y en verificación dinámica de seguridad en pista. Si estos no se superan no se podrá participar en las fases finales de la competición.

Las fases finales de la competición son: *fase MS1* y *fase MS2*.

La *fase MS1* es una fase demostrativa en la que los equipos participantes deberán mostrar y explicar el diseño del prototipo realizado y el proyecto de industrialización para su producción en serie. Para poder puntuar en la siguiente fase, es necesario superar el 40 % de esta *fase MS1*.

La *fase MS2* consiste en unas pruebas dinámicas y en una carrera. Las pruebas dinámicas se dividen a su vez en pruebas en pista y en box. Las de pista son una prueba de frenada, otra de aceleración y una gymkhana; mientras que la de box es una prueba mecánica de montaje y desmontaje de distintas partes de la moto. En cuanto a la carrera, habrá una carrera para la categoría *petrol* independiente de la carrera de la categoría *electric*. Ambas cuentan con entrenamientos y clasificación. La carrera de *petrol* constará de 8 vueltas y la de *electric* será de 5.

En cuanto a los sistemas de suspensión, el reglamento expresa que son de configuración libre. Están prohibidos aquellos sistemas de suspensión activos o semi-activos y/o controles electrónicos de cualquier parámetro de la suspensión, incluyendo aquellos que controlen la regulación de altura.

Los reglajes de suspensión sólo pueden ser realizados de manera manual y mediante ajustes mecánicos/hidráulicos.

La Organización podrá no aceptar la participación de una moto cuyo sistema de suspensión se determine peligroso para su participación en las pruebas en pista.

En lo que a la suspensión delantera se refiere, se permiten sistemas de cualquier tipo: horquilla convencional, horquilla invertida, telelever, duolever, basculante delantero, etc.

Los amortiguadores del sistema de suspensión delantera no podrán montar botellas o depósitos exteriores o anexos al cuerpo principal.

Están prohibidos los amortiguadores de suspensión delantera de tipo "presurizado", con precarga de aire/gas.

En el caso de utilizar suspensión delantera de tipo horquilla (convencional o invertida), éstas deberán permitir únicamente el ajuste de precarga de muelle.

No se permite la instalación de horquillas que ofrezcan cualquier otro tipo de ajustes.

2 INTRODUCCIÓN A LA SUSPENSIÓN

Como ya se ha dicho, este proyecto trata sobre el diseño de la suspensión delantera de una motocicleta. Pero antes de introducirse plenamente en los aspectos técnicos hay que introducir cierta información acerca de lo que es una suspensión. Se expondrá brevemente su evolución con el paso del tiempo y se explicarán ciertos conceptos básicos sobre las suspensiones.

2.1 HISTORIA DE LA SUSPENSIÓN

Obviamente al comienzo de los tiempos la tecnología con que contaban las motos era muy escasa; concretamente la suspensión era inexistente.

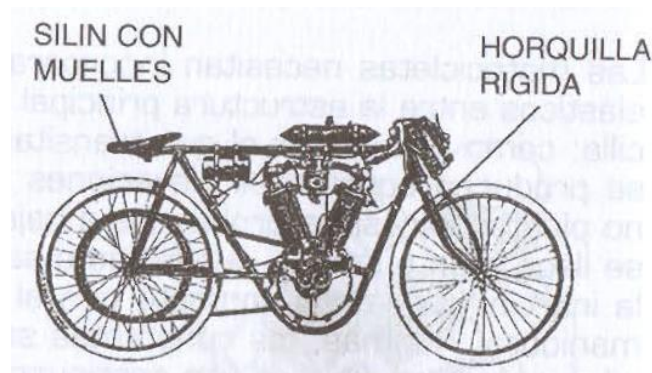


Fig. 2.1. Peugeot de competición del año 1904.

Normalmente el piso por donde se transita no es perfectamente uniforme produciéndose elevaciones y hundimientos del conjunto continuamente, lo cual puede generar cierta incomodidad al piloto. Esto a bajas velocidades no supone un gran problema, pero conforme aumenta la velocidad esto puede provocar que se pierda el contacto con el suelo, lo que dificultaba el control y la direccionalidad de la moto. Conforme fue mejorando la tecnología de las motos, la velocidad de estas fue aumentando. Con lo que comenzó a ser necesario introducir elementos elásticos entre las ruedas, que deben estar en contacto continuo con el suelo, y el resto del bastidor.

Los primeros elementos que se introdujeron fueron unos muelles en el asiento, los cuales no servían de mucho.

Posteriormente, hasta prácticamente la Segunda Guerra Mundial, convivieron diversos tipos de suspensión que contenían únicamente amortiguación mecánica mediante resortes o ballestas.



Fig. 2.2. Moto Guzzi Normales de 500 c. c. de 1922.

Hasta los años 40, aproximadamente, el sistema más empleado fue el de paralelo deformable de la firma *Webb*, que es el que monta la moto de la imagen.

Otro sistema que tuvo bastante éxito durante esta época fue el de tipo *Earles*, conformado por una sección rígida que iba desde la pipa de la dirección hasta detrás del eje de la rueda; y la suspensión se realizaba mediante un basculante los elementos amortiguadores.

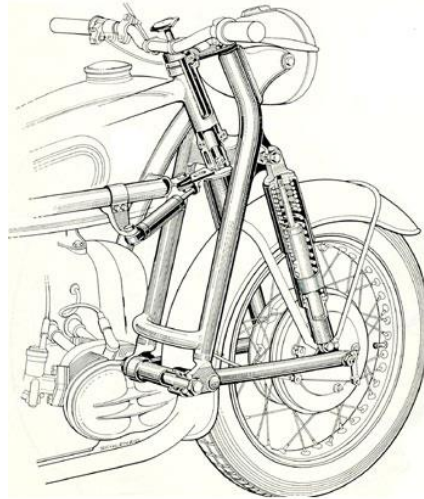


Fig. 2.3. Horquilla tipo Earles

En sus últimos años, este sistema comenzó a incorporar amortiguación hidráulica, lo que le dio cierta ventaja respecto a las demás.

Estos dos sistemas fueron los que más éxito obtuvieron pero también cabe destacar las horquillas tipo *Girder*, que contaban con resorte superiores paralelos.



Fig. 2.4. Horquilla tipo Girder

También cabe destacar al fabricante *Scott*, que entre 1908 y 1931 produjo motocicletas con horquillas telescópicas, pero estas no contaban con amortiguación hidráulica, lo que hizo que no tuvieran mucho éxito.

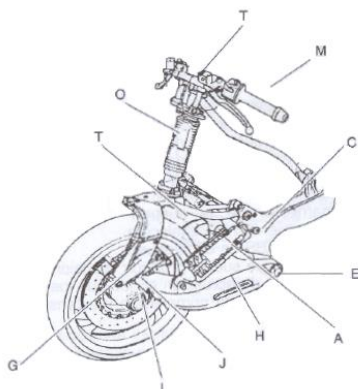
El gran paso se dio en 1935 cuando *BMW* comenzó a producir motocicletas que incorporaban horquillas telescópicas con amortiguador hidráulico de serie. Sistema que aún en la actualidad es prácticamente el único empleado. Con el paso de los años este sistema, tanto en su configuración convencional como invertida, ha ido mejorando, ya sea incorporando mejores sistemas hidráulicos, mejores materiales o mejores componentes; pero el funcionamiento es básicamente el mismo desde entonces.



Fig. 2.5. Horquilla telescópica invertida

A pesar de que con el paso de los años la *horquilla telescópica* ha demostrado que es el mejor sistema, aun se siguen desarrollando distintos sistemas con el fin de mejorar el control, la direccionalidad y el confort de las motos.

Otro ejemplo destacado es la suspensión *Swing Arm* desarrollada por Yamaha en 1993, que es completamente diferente al sistema de horquilla telescópica. Este sistema está formado por un basculante horizontal, que se ancla en el chasis y que se encarga de la amortiguación y suspensión mediante un amortiguador; y por un sistema articulado desde el manillar hasta la rueda que se encarga de la dirección de la misma. Para que la dirección no se vea afectada por el movimiento de la rueda, este sistema cuenta con un mecanismo telescópico que permite la variación de la distancia vertical entre los elementos del sistema articulado de dirección.



[8]

DISEÑO DE UNA SUSPENSIÓN DEL TIPO TELELEVER

Fig. 2.6. Suspensión Swing Arm.

Fig. 2.7. Bimota Tesi.

Muy parecido a este sistema *Swing Arm* es el sistema *hub-centre* desarrollado por *Bimota*, que también cuenta con un basculante con amortiguador y un sistema articulado para la dirección, pero este último de distintas características.

Por último también destacar los sistemas *Telelever* y *Duolever* desarrollados por *BMW*. Los cuales se explicarán en el siguiente apartado.

2.2 TIPOS DE SUSPENSION DELANTERA ACTUALES

Hasta ahora se ha hablado de los primeros sistemas de suspensión que surgieron y de los más empleados en el mercado desde entonces hasta nuestros días. A continuación se expondrán brevemente los sistemas más empleados actualmente.

2.2.1 Horquilla telescópica

La *horquilla telescópica* es el sistema de suspensión delantera más extendido de todos. El esquema básico de este sistema está formado por dos brazos unidos a la pipa de la dirección mediante las tijas y a la rueda mediante el buje. Cada uno de los brazos está constituido por dos tubos concéntricos de modo que uno de ellos (barra) desliza dentro del otro (botella). Y dentro de ambos se encuentran el muelle, que absorbe las cargas e irregularidades del terreno; y el sistema hidráulico, unido a la botella y que controla las oscilaciones del muelle.

Hay dos tipos de horquilla telescópica, la convencional y la invertida. En la horquilla convencional las barras van ancladas a las tijas y las botellas al eje de la rueda. Mientras que en la horquilla invertida son las botellas las que van ancladas a las tijas y las barras al eje de la rueda. La principal ventaja de la invertida respecto de la convencional es que se reduce la masa suspendida en el tren delantero. Otra importante ventaja es que como las botellas son más resistentes, flexionan menos y permiten un mejor deslizamiento de las barras dentro de las botellas.

Tanto la horquilla convencional como la invertida presentan las siguientes ventajas respecto a otros sistemas de suspensión:

- tienen un diseño simple que facilita su ensamblaje y hacen que este sea económico.
- como bien se ha dicho antes, este sistema se lleva empleando desde la II Guerra Mundial. Con lo que el diseño y material de los distintos componentes se han optimizado al máximo, obteniéndose un muy buen funcionamiento.
- tienen un comportamiento predecible.
- en frenada se comprimen, reduciendo el avance y la batalla, lo que favorece la entrada en curva. Mientras que al acelerar, el avance y la batalla aumentan, dando estabilidad a la moto.
- tienen una apariencia limpia y atractiva de cara al usuario.



DISEÑO DE UNA SUSPENSION DEL TIPO TELELEVER

Fig. 2.8. Horquilla telescópica invertida.

2.2.2 Telelever

La suspensión delantera del tipo *Telelever* es un sistema de suspensión alternativo desarrollado por *BMW* en 1993. Al igual que los sistemas *Swing Arm* y de *hub-center*, desarrollados por *Yamaha* y respectivamente, este sistema también separa la función de dirección de la de suspensión/amortiguación, lo que mejora el confort a la hora de conducir la motocicleta.

Este sistema está compuesto por una horquilla telescópica, un puente entre las botellas de la horquilla, un brazo basculante y un amortiguador y un muelle helicoidal anclados entre el brazo basculante y el chasis. La horquilla telescópica se encarga de guiar la rueda delantera para dirigir la motocicleta; mientras que el resto de elementos se encargan de la suspensión y amortiguación.

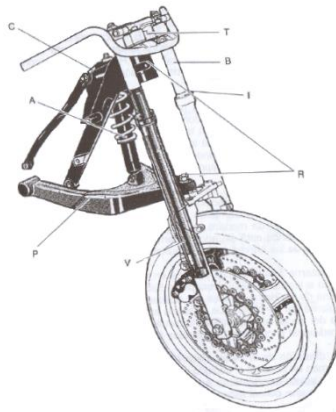


Fig. 2.9. Suspensión *Telelever*.

Con respecto a las *horquillas telescópicas* convencionales la suspensión *Telelever* presenta diversas ventajas. La más importante es que, como las fuerzas son absorbidas por el muelle y el amortiguador en vez de por la horquilla, se consigue una respuesta más suave y rápida del sistema de suspensión.

Otra ventaja importante es que todo el sistema presenta una mayor rigidez, reduciéndose la flexión de los distintos elementos (sobre todo de las barras de la horquilla) mejorando así su funcionamiento.

También presenta gran ventaja en las frenadas ya que, al no producirse hundimiento de la suspensión, la reducción de la batalla es menor y el ángulo de lanzamiento y el avance aumentan (en vez de disminuir como con las horquillas telescópicas convencionales) dando mayor estabilidad y pudiendo conseguirse una frenada óptima (incluso con la motocicleta inclinada) y un mejor paso por curva.

Debido a que la horquilla telescópica solo se ve afectada por la transferencia de carga este sistema otorga a la motocicleta un buen comportamiento direccional.

Y, por último, decir que las masas no suspendidas de este sistema son menores.

2.2.3 Duolever

Este sistema es otra suspensión alternativa diseñada por *BMW* a partir de un diseño patentado por *Norman Hossack* en los años 80 y del sistema *Telelever*. Se podría considerar que es como la segunda generación de *Telelever*. Consta más o menos de las mismas ventajas respecto a las *horquillas convencionales* que el *Telelever*.

Desde el punto de vista cinemático, el es un paralelogramo en el que dos trapecios sirven de guía para el soporte de la rueda. También cuenta con un conjunto de muelle y amortiguador que une el trapecio

inferior con el chasis y es el encargado de absorber las distintas cargas. Y entre la pipa de la dirección y el soporte de la rueda dispone de una articulación en forma de bisagra que no proporciona soporte estructural, sino que se encarga de transmitir los movimientos de la dirección y que no. De este modo se separa de una forma aún más efectiva las funciones de dirección y de suspensión/amortiguación.



Fig. 2.10. Suspensión Duolever.

La principal ventaja del *Duolever* respecto al *Telelever* es que, al sustituir la *horquilla telescópica* por el soporte rígido de la rueda y la articulación de bisagra, tiene una mayor rigidez torsional durante la extensión-compresión y en los giros consiguiéndose una suspensión de alta precisión y que la rueda se mantenga más estable.

Recalcar que, al igual que el *Telelever*, también presenta el efecto de anti hundimiento; con lo que en frenadas bruscas el muelle aun tendrá recorrido de reserva para absorber irregularidades o para frenar mientras se traza una curva sin perder estabilidad direccional.

2.3 CONCEPTOS BASICOS SOBRE SUSPENSIÓN

Una vez presentados los distintos sistemas de suspensión actuales se va a proceder a explicar ciertos conceptos básicos sobre suspensión. Primero, para poder justificar la elección del *sistema Telelever* para este proyecto y segundo, para poder entender los distintos cálculos que se presenten a lo largo del proyecto.

2.3.1 Principios de la suspensión

El sistema de suspensión es el conjunto de elementos que unen el chasis con la superficie rodante. La suspensión de una moto tiene una doble finalidad; por un lado debe mantener el contacto en todo momento entre la rueda y el pavimento y, por otro, procurar que las partes de la moto que están ancladas a las ruedas, es decir, todo aquello que no son las ruedas y la parte fija a ellas, (que se denomina masa no suspendida) se mantenga en una trayectoria rectilínea respecto del suelo. Así, una suspensión debe tener dos cualidades: la elasticidad, para evitar golpes secos en el bastidor debidos a las irregularidades del terreno y la amortiguación, que impida un excesivo balanceo de los elementos que constituyen la suspensión [1]. A parte de todo esto, el sistema de suspensión, en la mayoría de los casos también asume la función de dirección de la motocicleta.

Las suspensiones están, a su vez, formadas por dos sub-sistemas. Uno formado por elementos elásticos, muelles helicoidales en la gran mayoría de los casos, cuya función es almacenar la energía cinética de las masas suspendidas al sobrepasar cualquier tipo de irregularidad y devolverla una vez se pasa la

irregularidad para que dichas masas vuelvan a su posición inicial. Y el segundo sub-sistema está formado por los elementos de amortiguación, cuya función es absorber parte de la energía devuelta por el muelle a las masas suspendidas para que todo el sistema vuelva cuanto antes y de la forma más suave a su posición inicial.

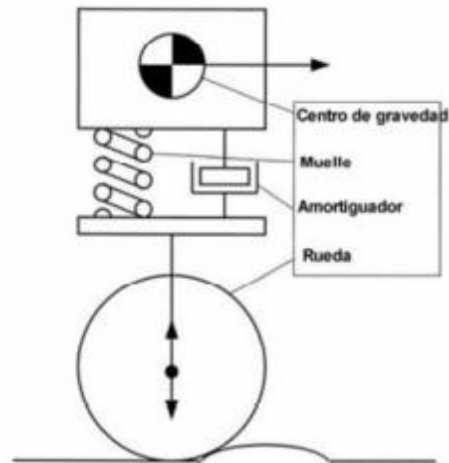


Fig. 2.11. Esquema básico sistema de suspensión.

Todos estos conceptos que se están planteando se refieren tanto a los sistemas de suspensión delantera como de suspensión trasera.

2.3.2 Manejabilidad

La manejabilidad nos indica la facilidad, el estilo y el tacto con que la motocicleta responde a nuestras acciones. Depende fundamentalmente de la geometría, la rigidez del chasis, el peso y su distribución y del tipo de neumáticos y su tamaño [1]. Aparte de las propias características dinámicas y geométricas de la moto, la manejabilidad también depende del propio piloto, ya que con su postura puede hacer varias determinadas propiedades geométricas de la motocicleta.

2.3.3 Adherencia o agarre a la carretera

Indica la aptitud de la motocicleta para mantenerse en contacto con el suelo a través de los neumáticos. Depende principalmente del tipo de neumáticos y su tamaño, de las características de la suspensión, del peso y su distribución, y de la rigidez que existe entre ambas ruedas para que puedan mantener la relación correcta entre ellas [1]. Actualmente este concepto choca un poco con el concepto de *manejabilidad*. Así que a la hora de diseñar la geometría básica de la motocicleta habrá que buscar una relación de compromiso entre ambos conceptos en función del uso al que vaya destinado la motocicleta.

2.3.4 Estabilidad

La estabilidad se puede definir de las siguientes maneras:

- La aptitud para mantener la maniobra propuesta (por ejemplo continuar en línea recta o trazar una curva) sin que exista una tendencia inherente a desviarse de la trayectoria elegida [1].
- La aptitud para volver a la maniobra propuesta cuando alguna fuerza externa produce una perturbación (por ejemplo, un bache, viento lateral, etc.) [1].

2.3.5 Movimientos lineales y angulares

En este apartado se analizarán brevemente los movimientos básicos que puede realizar la motocicleta. Estos se dividirán en lineales y angulares.

Los lineales son:

- Longitudinales (hacia delante): el motor y los frenos se encargan de controlar este movimiento.
- Verticales (hacia arriba o hacia abajo): estos movimientos se deben a las irregularidades del terreno.
- Laterales (hacia los lados): estos se deben principalmente al viento lateral.

En cuanto a los movimientos angulares, estos se producen en tres ejes que forman ángulos rectos entre ellos:

- Eje de inclinación (roll axis)
- Eje de cabeceo (pitch axis)
- Eje de guiñada (yaw axis)

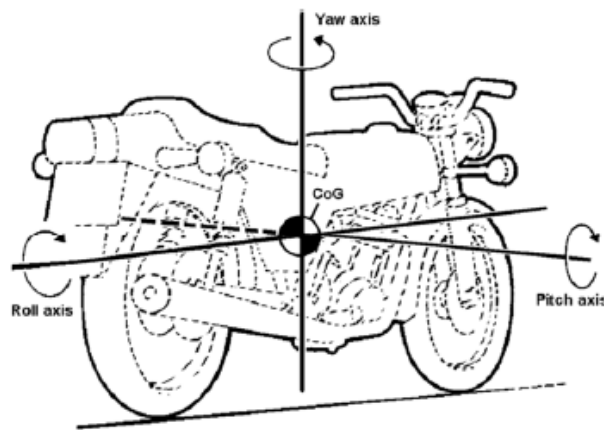


Fig. 2.12. Ejes principales de rotación.

Los movimientos angulares son:

- movimiento de inclinación: se produce al inclinar la motocicleta para trazar una curva.
- Movimiento de guiñada: principalmente se produce cuando se gira alrededor de una curva, aunque también puede producirse debido al viento lateral.
- Movimiento de cabeceo: se produce al acelerar, al frenar o al sobrepasar irregularidades debido a la transferencia de carga.

2.3.6 Geometría básica de la motocicleta

Este apartado es el punto de partida fundamental para el diseño de la motocicleta. Ya que los parámetros que se explican a continuación determinarán las distintas características del comportamiento de la motocicleta explicadas anteriormente.

2.3.6.1 Avance

Este concepto se define como la distancia entre el punto donde el eje de la dirección cortaría al suelo y el punto de contacto entre el neumático y el suelo. En la siguiente imagen el avance es *Front ground trail*.

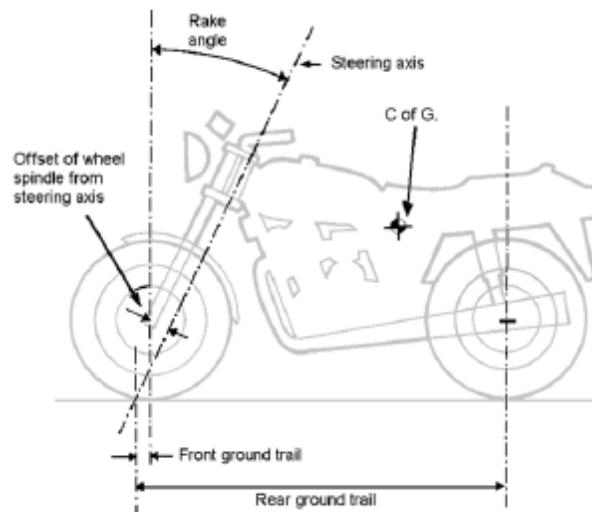


Fig.2.13. Geometría básica de la motocicleta.

Este parámetro tendrá una gran influencia en la estabilidad direccional de la motocicleta así como en la inclinación de la misma para trazar una curva.

A menudo se hace una distinción entre dos tipos distintos de avance. Al que se acaba de definir se le conoce como avance en el suelo. Y al otro se le conoce como avance real. Este último es la distancia en ángulo recto entre el eje de la dirección y el punto de contacto del neumático con el suelo.

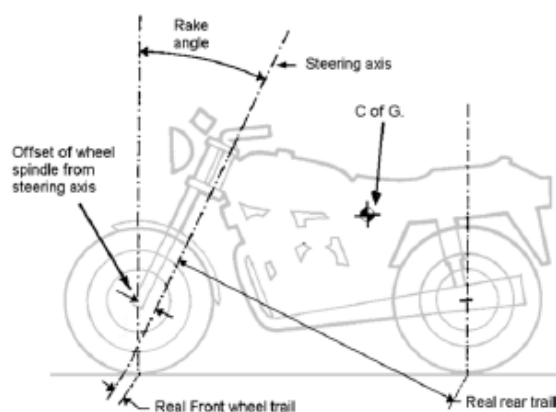


Fig. 2.14. Avance real.

Cuando el eje de la dirección corta al suelo por delante del punto de contacto entre el neumático y el suelo se dice que el avance es positivo. Mientras que si corta por detrás será negativo.

Que el avance sea positivo es lo que da estabilidad a la motocicleta, ya que provoca un efecto de autocentrado en las ruedas. Este efecto genera un momento que tiende a girar las ruedas hacia su posición inicial cuando alguna causa las hace girar. Sin embargo, si el avance es negativo, la motocicleta se vuelve inestable, ya que al girarse la rueda, en vez de producirse el efecto de autocentrado, se genera un efecto que refuerza la perturbación que ha hecho girar la rueda.

El valor del avance de una motocicleta no se mantiene siempre constante, puesto que habrá factores que hagan que su valor varíe. Estos factores pueden ser el ángulo de inclinación, el ángulo de giro de la dirección o el radio del perfil del neumático.

El avance tiene efectos secundarios en el ángulo de giro de la dirección y en el tacto de la motocicleta en línea recta. Al inclinar la motocicleta para trazar una curva, el avance hará que la pipa de la dirección suba o baje más en función de la inclinación, lo cual afectará al ángulo de giro que deberá aplicar el piloto. En cuanto al tacto en línea recta, el avance hará que se transmita más o menos la sensación de agarre del neumático al piloto.

2.3.6.2 Lanzamiento

El lanzamiento es el ángulo de inclinación que presenta el eje de la dirección con respecto a la vertical.

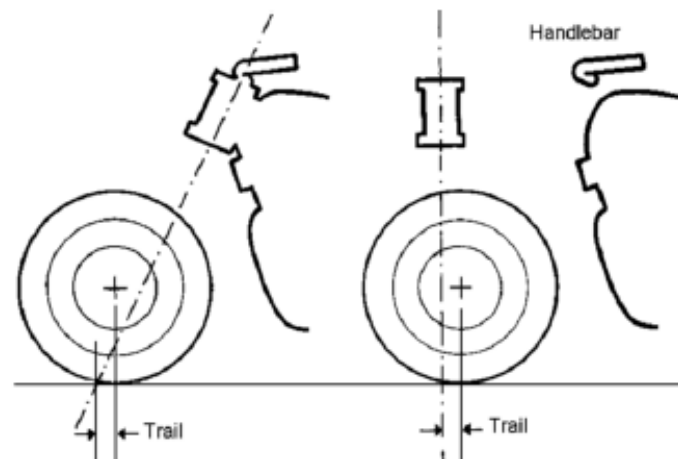


Fig. 2.15. Lanzamiento.

Este ángulo influirá en el avance de la moto, y por tanto, en la estabilidad de la misma. Para un valor dado del avance en el suelo, un mayor lanzamiento provocará que el efecto autoalineante de la rueda sea mucho menor. En la práctica, cuanto mayor sea el lanzamiento mayor tendrá que ser el avance para que se mantenga la estabilidad de la motocicleta. Los efectos negativos del lanzamiento se acentúan con ángulos grandes de giro del manillar.

En la actualidad el valor del lanzamiento para las motos de competición oscila entre los 20 y los 23 grados.



2.3.7 Batalla

La batalla es la distancia entre los ejes de las ruedas. Al igual que los dos parámetros anteriores también influye en la estabilidad de la motocicleta. Como todos los parámetros tiene efectos positivos y efectos negativos. Con lo que nuevamente habrá que buscar una relación de compromiso para tratar de amplificar los efectos positivos y reducir los negativos. Por ejemplo a mayor batalla se obtendrá mayor estabilidad direccional, sin embargo se requerirá un mayor esfuerzo para trazar curvas. Sin embargo, a menor batalla, la motocicleta será más manejable pero menos estable. La batalla también tendrá una notoria influencia en la transferencia de cargas que se produce de una rueda a la otra en aceleraciones o frenadas. Cuanto mayor sea la batalla, menor será la transferencia.

2.3.8 Peso y su posición

En líneas generales, cuanto menor sea el peso de la motocicleta mejor. Ya que mejor será la aceleración y mejor respuesta tendrá ante cualquier acción del piloto.

La posición del peso será tan importante o más que el propio peso de la motocicleta. Ya que la distribución de pesos variará la posición del CdG y, con él, variarán las características y el comportamiento de la moto.

Cuanto más bajo este el CdG mejor será el equilibrio de la motocicleta y menor será la transferencia de carga de una rueda a la otra al acelerar o frenar.

La distribución de pesos también influye en la tracción, ya que cuanto más cargada este la moto en la parte trasera, mayor será la transmisión de la fuerza propulsora al suelo. Pero por lo general es mejor que la motocicleta esté más cargada en la parte delantera, ya que así se mantiene más el contacto de la rueda con el suelo y se mejora la estabilidad direccional.

2.4 MOTIVO DE LA ELECCIÓN

Una vez expuestos todos estos parámetros ya se pueden dar explicaciones sobre la elección del *sistema Telelever* para la suspensión delantera de la motocicleta.

Uno de los motivos principales es la buena estabilidad direccional que presenta este sistema. Esto se debe a que se consigue separar la función de dirección de la función de suspensión, con lo que, al realizarse por separado, ambas funciones se realizarán mejor, ya que no habrá que buscar una relación de compromiso entre ambas.

Debido a esta estabilidad direccional con la que cuenta el sistema, se permite “jugar” más con otros parámetros geométricos para conseguir mejorar otras características de la moto. Por ejemplo, con este sistema se puede reducir el ángulo de lanzamiento. Lo cual mejorará la estabilidad direccional. Otra posibilidad es reducir la batalla para conseguir mejorar la manejabilidad de la motocicleta.

Otra consideración importante es que este sistema no presenta el fenómeno de hundimiento ante grandes frenadas, lo cual permite apurar más la frenada, pudiendo incluso frenar mientras se inclina la moto para trazar una curva, lo cual puede ser una característica interesante de cara a la carrera.

Una desventaja de este sistema es que presenta más componentes que una horquilla convencional y, por lo tanto, necesita más espacio. Pero al tratarse de una motocicleta eléctrica y no disponer esta de sistema de refrigeración por agua (cosa que está prohibida por la organización) se puede aprovechar el espacio que ocuparía este, con lo que el problema de espacio no será un problema.

Lo que sí es un problema es el peso de los componentes, por eso se trata de aligerarlos.

3 ANÁLISIS DE ESFUERZOS

El siguiente paso en este proyecto será dar valores a los distintos parámetros geométricos y calcular las cargas que actúan sobre la motocicleta para poder analizar algunos de los componentes de la motocicleta.

Como se está realizando una motocicleta para la competición de MotoStudent, en la que han participado compañeros en ediciones anteriores, se tomarán como base algunos de los datos empleados por los compañeros.

3.1 CÁLCULOS TEÓRICOS

En este apartado se analizarán y calcularán las distintas fuerzas que puedan actuar sobre la motocicleta durante su conducción. En concreto se analizarán los casos que supongan esfuerzos máximos para la misma, como pueden ser las aceleraciones, frenadas y pasos por curvas. Es importante realizar correctamente este estudio para poder obtener simulaciones lo más próximas a la realidad que permitan saber si los distintos componentes de la motocicleta soportarán dichas cargas. Esto último se realizará mediante análisis de elementos finitos.

Estas fuerzas actuarán en los neumáticos a través de su punto de contacto con el suelo y después se transmitirán a la motocicleta. La geometría que define el prototipo influirá en la forma en que estas fuerzas afectan a la motocicleta. Con lo que es importante realizar un diseño adecuado de todos los componentes de la misma.

Una vez conocidas las cargas se podrá hacer un primer diseño de las distintas piezas. Este deberá realizarse de forma que las piezas soporten todos los esfuerzos que actúen sobre ellas sin romperse. Cuando se obtengan los resultados de los análisis de elementos finitos se introducirán distintos cambios en las piezas con el fin de conseguir un diseño óptimo de las mismas en cuanto a resistencia y peso, que son aspectos importantes de cara a la carrera.

El primer paso que se dará en el cálculo de cargas será definir el peso total de la motocicleta. Como el proyecto aún se encuentra en la fase de diseño es difícil saber con exactitud el peso de la moto, así que se tomará como base el reglamento técnico impuesto por la organización de la competición. Este dice textualmente “El peso mínimo total de la motocicleta sin piloto será de 95 Kg para ambas categorías, incluyendo todos los líquidos que pudieran ser necesarios para el funcionamiento de la moto. En cualquier momento del Evento, el peso total de la motocicleta debe estar por encima del peso mínimo indicado.” Como el prototipo a diseñar es una motocicleta eléctrica se supondrá que el peso de esta en seco y con todos los líquidos necesarios para su funcionamiento es el mismo puesto que no tendrá gasolina y la lubricación será muchísimo menor, con lo que los líquidos necesarios únicamente supondrán una variación del peso de unos cuantos gramos. En cuanto al peso del piloto, como aún no es conocido, se supondrá un peso medio. Todo ello se muestra en la siguiente tabla.

m_{moto} (kg)	95
m_{piloto} (kg)	75
m_{total} (kg)	170

Tabla 3.1. Tabla de pesos.

Otro factor importante a definir es el coeficiente de adherencia, que se supondrá el máximo. Esto es en condiciones de asfalto seco y la motocicleta montando neumáticos blandos.

μ_p	1.2
---------	-----

Tabla 3.2. Coeficiente adherencia.

3.1.1 Movimiento rectilíneo

Las primeras fuerzas a analizar serán las de oposición al avance de la motocicleta, que se igualarán a la fuerza de aceleración que produce el motor. Estas fuerzas se dan durante el movimiento en estado estacionario y depende fundamentalmente de tres fenómenos:

- Resistencia aerodinámica al avance de la motocicleta
- La componente del peso debida a la pendiente que pueda presentar el terreno
- Resistencia a la rodadura del neumático

3.1.2 Fuerzas de resistencia aerodinámica

Cualquier resistencia al avance de la motocicleta debida a la aerodinámica se puede representar mediante tres fuerzas:

- Resistencia al avance F_D (drag force), que se opone al movimiento longitudinal.
- Fuerza de elevación F_L (lift force), cuya tendencia será elevar la motocicleta.
- Fuerza lateral F_S (lateral force), que empujará la motocicleta hacia lados.

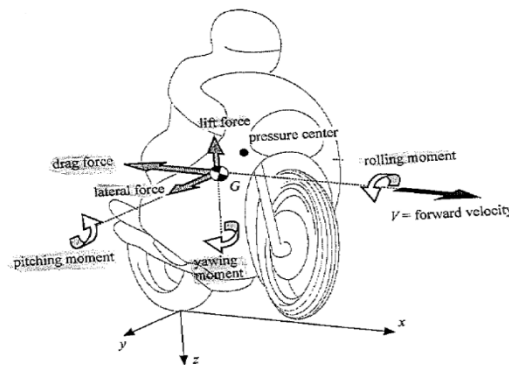


Fig. 3.1. Fuerzas de resistencia aerodinámica

Estas tres fuerzas actúan en el centro de presiones, que es un punto que se encuentra ligeramente adelantado y por encima del centro de gravedad (CdG). Por ello estas fuerzas generarán momentos en el CdG:

- balanceo (Rolling moment)
- cabeceo (pitching moment)
- guiñado (yawing moment)

Como el centro de presiones y el CdG se encuentran muy próximos, el valor de estos momentos será muy pequeño. Con lo que se podrán despreciar y suponer que las fuerzas actúan en el CdG.

Al estar estudiando el movimiento rectilíneo se podrá despreciar la fuerza lateral, ya que será varios órdenes de magnitud menor que las otras dos fuerzas, que son en las que se centrará este estudio. La fuerza de resistencia al avance (F_D) tendrá una importante influencia en la velocidad máxima alcanzable por la motocicleta y en el comportamiento de aceleración de la misma. Mientras que la fuerza de elevación (F_L) tenderá a reducir las cargas verticales en los neumáticos, sobre todo en el delantero. Estas dos fuerzas se calcularán como se muestra a continuación:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.167 \cdot 0.41 \cdot 0.4043 \cdot 44.44^2 = 191.057 \text{ N}$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.167 \cdot 0.0257 \cdot 0.4043 \cdot 44.44^2 = 11.976 \text{ N}$$

ρ (kg/m ³ , densidad aire en condiciones normales)	1.167
A (m ² , área frontal)	0.4043
v (m/s, velocidad máxima aproximada de la motocicleta)	44.44
C _D (coeficiente de resistencia aerodinámica)	0.41
C _L (coeficiente de elevación)	0.0257

Tabla 3.3. Parámetros aerodinámicos.

El área frontal comprende tanto a la motocicleta como al piloto, el cual se supone que adopta la postura de menor resistencia aerodinámica. A partir de este valor se podrán calcular los valores de los coeficientes de resistencia al avance y de elevación.

Los valores de C_D y C_L dependen mucho de la forma de la motocicleta y especialmente del carenado. El valor de estos coeficientes no es muy significativo ya que no sirve para poder compararlos con los de otras motocicletas y ver cuál presenta menos resistencia; por lo que se emplean el área de resistencia aerodinámica y el área de elevación, los cuales sí sirven para ser comparados. Estas áreas se calculan respectivamente como:

$$C_D \cdot A = 0.41 \cdot 0.4043 = 0.166 \text{ m}^2$$

$$C_L \cdot A = 0.0257 \cdot 0.4043 = 0.01 \text{ m}^2$$

Por último decir que la elevación de la motocicleta es peligrosa porque reduce la carga en las ruedas y por lo tanto la adherencia en el neumático, por lo que interesa que este valor sea pequeño.

3.1.3 Fuerzas verticales en estado estacionario

En este caso se van a calcular las fuerzas verticales de reacción entre las ruedas y el suelo debidas a las distintas cargas que sufrirá la motocicleta. Estas reacciones están muy influenciadas por la situación del CdG.

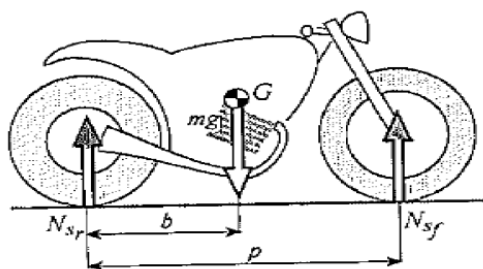


Fig. 3.2. Equilibrio vertical estado estacionario.

Como se está considerando el estado estacionario, para hallar las reacciones verticales en los neumáticos se supondrá que la motocicleta está estacionada. Las reacciones se calcularán mediante las siguientes ecuaciones:

$$m \cdot g = N_f + N_r = 1667.7 \text{ N}$$

$$N_f = \frac{m \cdot g \cdot b}{p} = \frac{170 \cdot 9.81 \cdot 0.697}{1.255} = 926.8 \text{ N}$$

$$N_r = \frac{m \cdot g \cdot (p - b)}{p} = \frac{170 \cdot 9.81 \cdot (1.255 - 0.697)}{1.255} = 740.9 \text{ N}$$

Siendo para el prototipo a estudiar:

b (m)	0.697
p (m)	1.255

Tabla 3.4. Valores geométricos.

Es lógico que las dos normales igualen al peso total de la motocicleta pero no de igual forma, ya que estas dependerán de la posición del CdG. En el caso supuesto la reacción de la rueda delantera (N_f) es mayor que la de la trasera (N_r) puesto que la motocicleta está más cargada en la parte delantera.

3.1.4 Fuerza de resistencia causada por la pendiente de la carretera

Ahora se supondrá que la motocicleta se encuentra en un tramo con pendiente. Debido a ello el peso total de la motocicleta presentará dos componentes, una normal al suelo y otra en la dirección de movimiento de la motocicleta. Esta última será la que se va a calcular a continuación puesto que es la que genera la resistencia al avance.

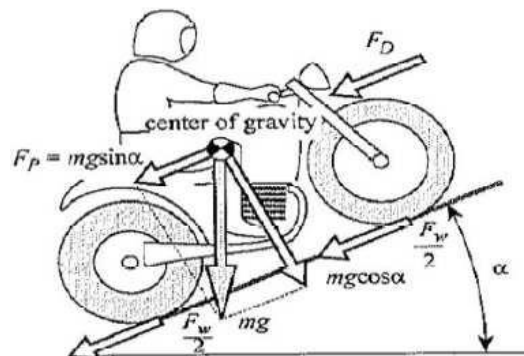


Fig. 3.3. Equilibrio en pendiente.

El ángulo α representa la pendiente del asfalto. Para este caso se ha considerado la máxima pendiente que presenta el circuito de *MotorLand Aragón*, que es donde será la carrera.

α	10°	0.175 rad
----------	-----	-----------

Tabla 3.5. Pendiente.

$$F_p = m \cdot g \cdot \text{sen} \alpha = 170 \cdot 9.81 \cdot \text{sen} 0.175 = 290.36 \text{ N}$$

En los cálculos de los siguientes apartados esta fuerza no se tendrá en cuenta ya que la pendiente es prácticamente nula en todo el trazado.

3.1.5 Equilibrio en estado estacionario

Para el equilibrio en estado estacionario también se considera que el centro de presiones coincide con el CdG. A esta hipótesis hay que añadirle las siguientes hipótesis con respecto al modelo del sistema moto-piloto:

- La fuerza de rodadura es cero ($F_w = 0$).
- La fuerza aerodinámica de elevación es cero ($F_L = 0$).
- La fuerza de resistencia aerodinámica F_D es la única que se opone al avance de la motocicleta.

Junto a la fuerza de resistencia aerodinámica habrá que tener en cuenta las siguientes fuerzas para realizar el equilibrio del sistema:

- El peso total de la motocicleta (considerando también el del piloto).
- Fuerza de empuje S , que es la fuerza que aplica el suelo a la motocicleta a través del punto de contacto entre el suelo y el neumático trasero.
- Las reacciones verticales de los neumáticos delantero y trasero, N_f y N_r respectivamente.

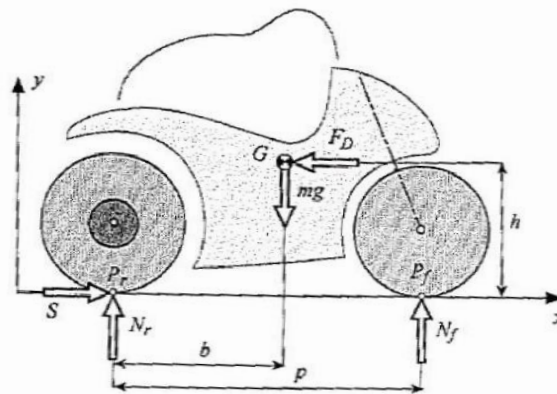


Fig.3.4. Equilibrio estado estacionario.

Mediante las ecuaciones de equilibrio de la motocicleta se podrán obtener los valores de las reacciones verticales N_f y N_r . Como se está analizando el estado estacionario, la velocidad de la motocicleta será constante, por lo que la aceleración será nula.

- Equilibrio de fuerzas horizontales: $S - F_D = 0 \rightarrow S = F_D = 191.057 \text{ N}$
- Equilibrio de fuerzas verticales: $m \cdot g - N_f - N_r = 0$
- Equilibrio de momentos respecto al CdG: $S \cdot h + N_f \cdot (p - b) - N_r \cdot b = 0$

La fuerza aerodinámica se calcula para el caso de velocidad máxima, por lo que será la misma que en el apartado *Fuerzas de resistencia aerodinámica*.

Las reacciones verticales sobre las ruedas se podrán calcular como:

$$N_f = \frac{m \cdot g \cdot b}{p} - \frac{S \cdot h}{p} = \frac{170 \cdot 9.81 \cdot 0.697}{1.255} - \frac{191.057 \cdot 0.542}{1.255} = 844.252 \text{ N}$$

$$N_r = \frac{m \cdot g \cdot (p - b)}{p} + \frac{S \cdot h}{p} = \frac{170 \cdot 9.81 \cdot (1.255 - 0.697)}{1.255} + \frac{191.057 \cdot 0.542}{1.255} = 823.448 \text{ N}$$



Siendo:

b (m)	0.697
p (m)	1.255
h (m)	0.542

Tabla 3.6. Valores geométricos.

Se puede observar que ambas reacciones están compuestas por un término estático que depende de la distribución del peso debida a la geometría básica de la motocicleta y un término dinámico que depende de la fuerza de empuje y la altura del CdG. Este término dinámico $\left(\frac{S \cdot h}{p}\right)$ se conoce como transferencia de carga.

Analizando los resultados obtenidos se puede observar que el peso está repartido más uniformemente entre las dos ruedas; la reacción del neumático delantero ha disminuido mientras que la del trasero ha aumentado con respecto a las reacciones verticales calculadas en el apartado anterior. Esto se debe a la transferencia de carga que se produce del neumático delantero al trasero durante el movimiento a velocidad constante.

3.1.6 Movimiento lineal transitorio

En el presente caso se considerará un estado estacionario y que la motocicleta tiene un movimiento rectilíneo. Se supondrán las mismas hipótesis y ecuaciones de equilibrio de las fuerzas verticales y de momentos del apartado anterior.

- $F_w = F_L = F_p = 0$
- Equilibrio de fuerzas verticales: $m \cdot g - N_f - N_r = 0$
- Equilibrio de momentos respecto al CdG: $S \cdot h + N_f \cdot (p - b) - N_r \cdot b = 0$

En cuanto a la ecuación de equilibrio de fuerzas horizontales, esta dependerá de si es aceleración o frenada puesto que si es aceleración, la fuerza de empuje será positiva; mientras que si es frenada, será negativa.

3.1.6.1 Aceleración

Ahora se procederá a calcular las reacciones y cargas que actúan sobre la motocicleta en función de la aceleración. Estas serán máximas cuando la aceleración sea máxima. La aceleración máxima se calculará de tres formas distintas: limitada por el motor, limitada por la tracción y limitada por la rodadura. Y de estas tres aceleraciones se escogerá la que sea más limitante.

Limitado por el motor

En este caso el factor limitante será el propio motor, así que se obtendrán la máxima aceleración y la máxima fuerza de empujes proporcionados por este.

La fuerza de empuje se equilibrará con la suma de las inercias y la fuerza de resistencia aerodinámica.

$$S^* = F_D + m^* \cdot \ddot{x} \rightarrow \ddot{x} = \frac{S^* - F_D}{m^*}$$

Donde m^* es la masa equivalente de la motocicleta. Para calcularla se tendrá en cuenta la energía cinética de los elementos rotatorios importantes de la motocicleta, que son las dos ruedas y el motor. El resto de elementos rotatorios que pueda tener la motocicleta no se tendrán en cuenta ya que sus inercias serán despreciables frente a las inercias de los elementos anteriormente mencionados.

$$m^* = m + \text{efecto de las inercias rotacionales} = m + I_{\omega r} \cdot \tau_r^2 + I_{\omega f} \cdot \tau_f^2 + I_{\omega m} \cdot \tau_m^2 =$$

$$= 170 + 0.35 \cdot 3.326^2 + 0.3 \cdot 3.472^2 + 0.00586 \cdot 7.725^2 = 177.5 \text{ kg}$$

Masa total motocicleta	m (kg)	170
Inercia rueda trasera	$I_{\omega r}$ (kg·m ²)	0.35
Ratio velocidad rueda trasera	τ_r (m ⁻¹)	3.326
Inercia rueda delantera	$I_{\omega f}$ (kg·m ²)	0.3
Ratio velocidad rueda delantera	τ_f (m ⁻¹)	3.472
Inercia del motor	$I_{\omega m}$ (kg·m ²)	0.00586
Ratio velocidad angular del motor	τ_m (m ⁻¹)	7.725

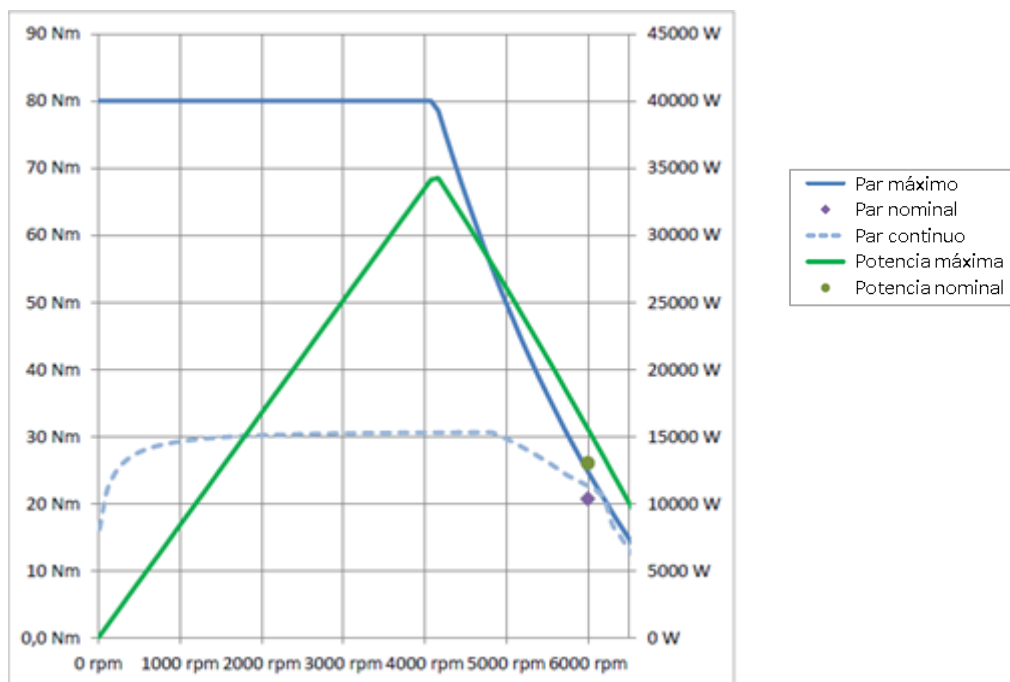
Tabla 3.7. Valores inerciales.

Siendo: $\tau_r = \frac{1}{R_r} = \frac{1}{0.30065} = 3.326 \text{ m}^{-1}$

$$\tau_f = \frac{1}{R_f} = \frac{1}{0.288} = 3.472 \text{ m}^{-1}$$

$$\tau_m = \frac{\omega_m}{v_r} = \text{relación de transmisión} \cdot \frac{1}{R_r} = 2.18 \cdot \frac{1}{0.30065} = 7.725 \text{ m}^{-1}$$

$$\text{relación de transmisión} = \frac{\phi \text{ primitivo corona (mm)}}{\phi \text{ primitivo piñón (mm)}} = \frac{85}{36.6} = 2.18$$



Grafica 3.1. Funcionamiento del motor.



En la gráfica se puede ver que el par máximo es de 80 N·m y este se obtiene desde 0 rpm hasta 4100 rpm aproximadamente. Con estos datos se pueden calcular la velocidad lineal de la rueda trasera y la fuerza de empuje máxima que dará el motor.

La velocidad lineal de la rueda trasera se podrá calcular a partir del ratio de velocidad angular del motor y el máximo régimen de trabajo del motor, puesto que se trata de obtener la máxima aceleración que produce el motor.

$$\omega_m = 4100 \cdot \frac{2\pi}{60} = 429.35 \text{ rad/s}$$

$$v_{\text{rueda}} = \frac{\omega_m}{\tau_m} = \frac{429.35}{7.725} = 55.582 \text{ m/s}$$

Y la fuerza de empuje máxima se puede calcular a partir del par máximo y del ratio de velocidad angular del motor:

$$S^* = T \cdot \frac{\omega_m}{v_{\text{rueda}}} = 80 \cdot \frac{429.35}{55.582} = 617.969 \text{ N}$$

Una vez obtenida esta fuerza de empuje, ya se pueden calcular la aceleración máxima del motor y las reacciones verticales de las ruedas.

$$\ddot{x} = \frac{S^* - F_D}{m^*} = \frac{617.969 - 298.813}{177.5} = 1.795 \text{ m/s}^2$$

En este caso la resistencia aerodinámica se calcula con la velocidad lineal de la rueda trasera.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot 1.167 \cdot 0.41 \cdot 0.4043 \cdot 55.582^2 = 298.813 \text{ N}$$

$$N_f = \frac{m \cdot g \cdot b}{p} - \frac{S^* \cdot h}{p} = \frac{170 \cdot 9.81 \cdot 0.697}{1.255} - \frac{617.969 \cdot 0.542}{1.255} = 659.756 \text{ N}$$

$$N_r = \frac{m \cdot g \cdot (p - b)}{p} + \frac{S^* \cdot h}{p} = \frac{170 \cdot 9.81 \cdot (1.255 - 0.697)}{1.255} + \frac{617.969 \cdot 0.542}{1.255} = 1007.904 \text{ N}$$

Debido a la aceleración se produce una transferencia de carga de la rueda delantera a la trasera; ello queda reflejado en las reacciones de ambas ruedas, siendo mucho mayor la de la rueda trasera.

Limitado por la tracción

En este apartado las consideraciones a tener en cuenta para el equilibrio de fuerzas horizontales son las mismas que en el anterior apartado. Con lo que la fuerza de empuje se calculará también como:

$$S = m \cdot \ddot{x} + F_D \rightarrow \ddot{x} = \frac{S - F_D}{m}$$

Suponiendo que el motor pueda proporcionar la potencia adecuada, la fuerza de empuje deberá ser menor o igual al producto del coeficiente de adherencia y la reacción vertical de la rueda trasera.

$$S \leq \mu_p \cdot N_r$$

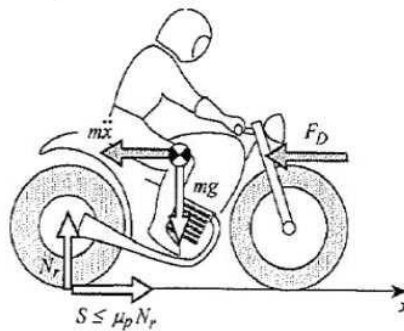


Fig. 3.5. Equilibrio aceleración limitada por la tracción.

Como se sigue considerando estado estacionario, la reacción de la rueda trasera se seguirá calculando como:

$$N_r = \frac{S \cdot h + m \cdot g \cdot (p - b)}{p}$$

Entonces mediante estas tres ecuaciones se obtiene:

$$\ddot{x} \leq \frac{\mu_p \cdot g \cdot \frac{p - b}{p}}{1 - \mu_p \cdot \frac{h}{p}} - \frac{F_D}{m}$$

Analizando esta última expresión se ve que la aceleración se irá reduciendo conforme aumente la resistencia aerodinámica, y esta aumentará conforme aumente la velocidad de la motocicleta. Con lo que la aceleración máxima se producirá cuando F_D sea cero y, por lo tanto, con velocidad cero. Esto ocurre porque parte de la fuerza de empuje es igualada a la resistencia aerodinámica y no es utilizada para acelerar la motocicleta.

Después de estas consideraciones, la aceleración máxima se calcula como:

$$\ddot{x} = \frac{\mu_p \cdot g \cdot \frac{p - b}{p}}{1 - \mu_p \cdot \frac{h}{p}} = \frac{1.2 \cdot 9.81 \cdot \frac{1.255 - 0.697}{1.255}}{1 - 1.2 \cdot \frac{0.542}{1.255}} = 10.861 \text{ m/s}^2$$

Con la aceleración máxima se calcula la fuerza de empuje máxima:

$$S = m \cdot \ddot{x} + F_D = 170 \cdot 10.861 + 0 = 1846.42 \text{ N}$$

Y, por último, ya se puede obtener la reacción vertical de la rueda trasera.

$$N_r = \frac{S \cdot h + m \cdot g \cdot (p - b)}{p} = \frac{1846.42 \cdot 0.542 + 170 \cdot 9.81 \cdot (1.255 - 0.697)}{1.255} = 1538.683 \text{ N}$$

Como es lógico, la suma de las reacciones verticales de los neumáticos deberá igualar al peso total de la motocicleta. Así que la reacción vertical del neumático delantero será:

$$N_f = m \cdot g - N_r = 170 \cdot 9.81 - 1538.683 = 129.017 \text{ N}$$

Se aprecia claramente que en este caso la reacción del neumático trasero es muchísimo mayor que la del delantero. Esto se debe, una vez, a la transferencia de carga producida al acelerar la motocicleta; la cual provocara que el neumático trasero cargue con casi todo el peso de la motocicleta, pero sin que se llegue a producir el levantamiento de la rueda delantera.

Limitada por la rodadura

El factor limitante en este caso es el levantamiento de la rueda delantera, es decir, cuando la reacción vertical de la rueda delantera se hace cero. Por lo que todo el peso de la motocicleta se apoya en la rueda trasera.

$$N_f = \frac{m \cdot g \cdot b - S \cdot h}{p} = 0 \text{ N}$$

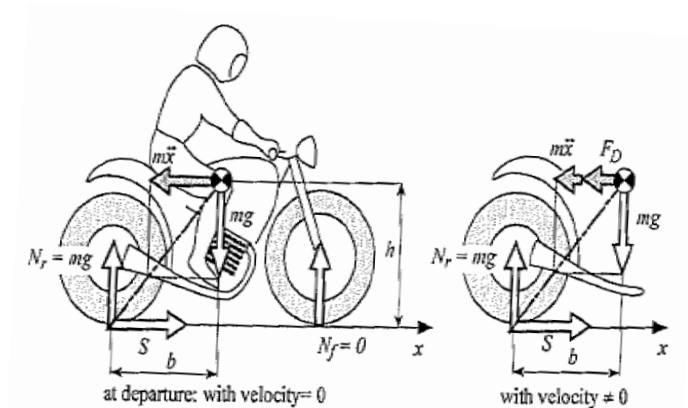


Fig.3.6. Equilibrio aceleración limitada por la rodadura.

- Equilibrio de fuerzas horizontales: $S = m \cdot \ddot{x} + F_D$
- Equilibrio de fuerzas verticales: $N_r = m \cdot g$
- Equilibrio de momento respecto al CdG: $S \cdot h - m \cdot g \cdot b = 0$

A partir de los distintos equilibrios se obtiene que:

$$S = \frac{m \cdot g \cdot b}{h} = \frac{170 \cdot 9.81 \cdot 0.697}{0.542} = 2145.02 \text{ N}$$

$$\ddot{x} = \frac{S - F_D}{m} = \frac{2145.02 - 0}{170} = 12.618 \text{ m/s}^2$$

Al igual que en la *aceleración limitada por la tracción*, esta se reduce conforme aumenta la resistencia aerodinámica. Con lo que esta aceleración será también máxima a velocidad cero.

Conclusión

El cálculo de la aceleración máxima se ha realizado puesto que las cargas derivadas de esta serán también las máximas y serán las empleadas para realizar el análisis por elementos finitos de las distintas piezas de la motocicleta.

De los tres casos planteados anteriormente se han obtenido las siguientes aceleraciones:

Aceleración limitada por el motor (m/s ²)	1.795
Aceleración limitada por la tracción (m/s ²)	10.861
Aceleración limitada por la rodadura (m/s ²)	12.618

Tabla 3.8. Aceleraciones.

La mayor de las aceleraciones es la obtenida en el caso de *aceleración limitada por la rodadura*, pero dicha aceleración nunca podrá ser alcanzada por la motocicleta puesto que existe un factor mucho más limitante que lo impide. Dicho factor es el motor de la motocicleta y la relación de transmisión entre este y la rueda trasera. Con lo que las cargas que se considerarán en el análisis por elementos finitos serán las que se obtengan a partir de la *aceleración limitada por el motor*.

3.1.6.2 Frenada

Después de calcular las reacciones y cargas debidas a la aceleración se procederá a hacer lo mismo pero en el caso de frenada. Al igual que en el caso anterior se calcularán las mayores deceleraciones y se considerará que se frena solamente con el freno delantero, lo que proporcionará las cargas máximas. Para el cálculo de dichas deceleraciones se plantearán dos casos: frenada limitada por la tracción y frenada limitada por el vuelco.

Limitada por la tracción

En la frenada se produce el efecto contrario a la aceleración. La reacción vertical de la rueda delantera va aumentando conforme se reduce la de la rueda trasera. Esto se debe a la transferencia de carga, que en este caso será contraria a la que se sufría en la aceleración, de la rueda trasera a la delantera. Para poder calcular esta transferencia se actúa de igual forma que en los casos anteriores, aplicando los equilibrios de fuerzas horizontales, verticales y de momentos respecto del CdG; que serán respectivamente:

$$m \cdot \ddot{x} = -F_f - F_r = -F$$

$$m \cdot g - N_r - N_f = 0$$

$$-F \cdot h - N_r \cdot b + N_f \cdot (p - b) = 0$$

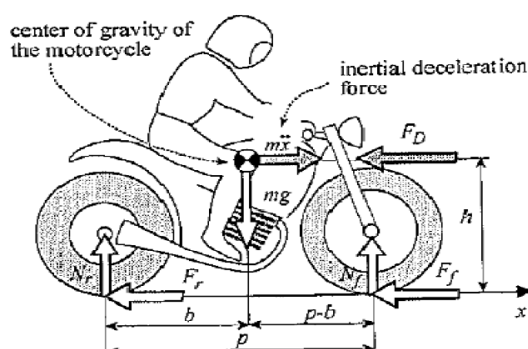


Fig. 3.7. Equilibrio frenada limitada por la tracción.

Las reacciones verticales de ambas ruedas serán:

$$N_f = \frac{m \cdot g \cdot b}{p} + F \cdot \frac{h}{p} = \frac{170 \cdot 9.81 \cdot 0.697}{1.255} + 2001.24 \cdot \frac{0.542}{1.255} = 1791.482 \text{ N}$$

$$N_r = \frac{m \cdot g \cdot (p - b)}{p} - F \cdot \frac{h}{p} = \frac{170 \cdot 9.81 \cdot (1.255 - 0.697)}{1.255} - 2001.24 \cdot \frac{0.542}{1.255} = -123.782 \text{ N}$$

Con estas se expresiones se observa que la transferencia de carga depende en gran parte de la fuerza total de frenada (F). Cuando esta fuerza total de frenada sea máxima, la reacción de la rueda trasera se hará mínima mientras que la reacción de la delantera se hará máxima. Esta fuerza máxima se dará en el límite de deslizamiento del neumático y se calculará como:

$$\begin{aligned} F &= F_f + F_r = \mu \cdot (N_f + N_r) = \mu \cdot m \cdot g = 1.2 \cdot 170 \cdot 9.81 = 2001.24 \text{ N} \\ F_f &= \mu \cdot N_f = 1.2 \cdot 1791.482 = 2149.778 \text{ N} \\ F_r &= \mu \cdot N_r = 1.2 \cdot (-123.782) = -148.538 \text{ N} \end{aligned}$$

Los resultados reflejan que la reacción vertical del neumático delantero es mayor que el peso total de la motocicleta ($m \cdot g = 170 \cdot 9.81 = 1667.7 \text{ N}$) y que la fuerza de frenada en la rueda trasera tiene signo negativo, lo cual indicara que sería una fuerza de empuje en vez de frenada. Ambas cosas son imposibles en cálculos estáticos, lo que hace pensar que habrá un factor más limitante para la deceleración máxima que el deslizamiento del neumático.

Del equilibrio de fuerzas horizontales se obtiene:

$$\ddot{x} = \frac{-F}{m} = \frac{-2001.24}{170} = -11.772 \text{ m/s}^2$$

Limitada por vuelco

En este caso el factor limitante será el momento en el que se produce el levantamiento de la rueda trasera o, lo que es lo mismo, cuando la reacción de la rueda trasera se hace cero debido a la transferencia de carga a la rueda delantera que se produce al frenar.

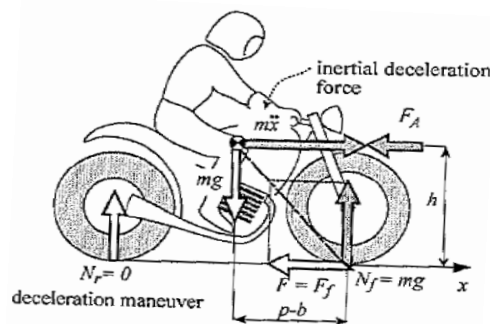


Fig. 3.8. Frenada limitada por el vuelco.

Esto quiere decir que la reacción de la rueda delantera igualará al peso total de la moto. Como consecuencia de esto, la dirección de la resultante entre la reacción vertical de la rueda delantera y la fuerza de frenada pasará a través del CdG.

Los equilibrios de las fuerzas horizontales y verticales se mantienen igual que en el caso anterior, mientras que el equilibrio de momentos respecto al CdG será ahora:

$$F \cdot h - N_f \cdot (p - b) = 0 \rightarrow F = \frac{N_f \cdot (p - b)}{h} = \frac{1667.7 \cdot (1.255 - 0.697)}{0.542} = 1714.755 \text{ N}$$



$$N_f = m \cdot g = 170 \cdot 9.81 = 1667.7 \text{ N}$$

El valor de esta fuerza de frenada da una idea de la tendencia al vuelco de la motocicleta. Si tiene un valor bajo, que no es el caso, volcará fácilmente; y cuanto mayor sea su valor, menor tendencia al vuelco tendrá. A partir de la fórmula se puede concluir que cuanto menor sea el peso y más alto y adelantado este el CdG de la motocicleta menor será el valor de la fuerza de frenada.

Calculada la fuerza de frenada ya se podrá calcular la deceleración máxima. Esta se obtendrá mediante la ecuación de movimiento, que podrá plantearse de dos formas: ignorando la resistencia aerodinámica y teniéndola en cuenta.

Ignorando la resistencia aerodinámica la deceleración máxima será:

$$m \cdot \ddot{x} = -F \rightarrow \ddot{x} = \frac{-F}{m} = \frac{-1714.755}{170} = -10.087 \text{ m/s}^2$$

Teniendo en cuenta la resistencia aerodinámica queda:

$$m \cdot \ddot{x} = -F - F_D \rightarrow \ddot{x} = \frac{-F - F_D}{m} = \frac{-1714.755 - 191.057}{170} = -11.211 \text{ m/s}^2$$

En la fórmula se aprecia que la resistencia aerodinámica contribuye a obtener una mayor deceleración. Con lo que esta será máxima cuando la resistencia aerodinámica sea máxima, es decir, cuando la motocicleta alcance la velocidad máxima.

Conclusión

En frenada también ocurrirá que las cargas que actúan sobre la motocicleta serán máximas cuando la deceleración sea máxima.

De los dos casos estudiados se obtiene:

Deceleración limitada por la tracción (m/s ²)	-11.772
Deceleración limitada por el vuelco (sin F _D) (m/s ²)	-10.087
Deceleración limitada por el vuelco (con F _D) (m/s ²)	-11.211

Tabla 3.9. Decleraciones

La mayor de las deceleraciones es la obtenida en el caso de *deceleración limitada por la tracción*, pero dicha deceleración nunca podrá conseguirse debido a los factores expuestos anteriormente y a la existencia de un factor más limitante que lo impide, el vuelco de la motocicleta. Con lo que las cargas que se considerarán en el análisis por elementos finitos serán las que se obtengan a partir de la *deceleración limitada por el vuelco*, considerando la resistencia aerodinámica de la motocicleta.

3.1.7 Curva en estado estacionario

Al trazar una curva la motocicleta tendrá un comportamiento diferente que en movimiento lineal y sufrirá cargas diferentes. En este caso las mayores cargas serán laterales en vez de longitudinales.

En función de las características de la motocicleta, en un movimiento estacionario en curva, esta puede tener un comportamiento sub-virador, sobre-virador o neutro. Lo que afectará a la manejabilidad de la misma y al estilo de conducción del piloto.

Para poder calcular las distintas cargas primero habrá que analizar diversos aspectos, como son la inclinación de la motocicleta y su comportamiento direccional.

Inclinación de la motocicleta en giro estático

Primero se analizará un caso ideal a modo de ayuda para comprender mejor el comportamiento de la moto al inclinarse y después ya se desarrollará el caso real.

Ángulo ideal de inclinación

Cuando la motocicleta se inclina para realizar un giro estático, esta se mantiene gracias a la acción de los momentos generados por dos fuerzas. Una de ellas es la fuerza centrífuga que genera un momento que tiende a devolver la motocicleta a su posición vertical y la otra es el peso, cuyo momento tiende a que la motocicleta se incline más.

Para este caso ideal se van a introducir las siguientes hipótesis:

- estado estacionario, es decir, la motocicleta va a velocidad constante en una curva de radio constante
- se desprecian los efectos giroscópicos
- el espesor de los neumáticos es nulo

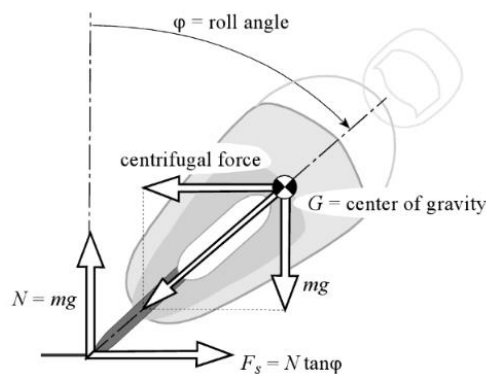


Fig.3.9. Equilibrio paso por curva.

A partir del equilibrio de momentos se puede calcular el ángulo ideal de inclinación en función de la velocidad y del radio de giro. Siendo:

- velocidad lineal: $v = \Omega \cdot R_C$
- fuerza centrífuga: $F_C = R_C \cdot m \cdot \Omega^2 = m \cdot \frac{v^2}{R_C}$
- peso: $F_P = m \cdot g$

En este caso el ángulo de inclinación se calculará de igual forma para ambos neumáticos:

$$\beta_i = \varphi_i = \arctg \frac{F_C}{F_P} = \arctg \frac{R_C \cdot \Omega^2}{g} = \arctg \frac{v^2}{g \cdot R_C}$$

Siendo β_i el ángulo ideal de inclinación del neumático delantero y φ_i el ángulo ideal de inclinación para el neumático trasero.

Como bien se ha dicho antes este ángulo es una aproximación debido a las hipótesis que se han planteado anteriormente.

Ángulo de inclinación efectivo

Ahora se procederá a calcular el ángulo de inclinación efectivo que ya será más próximo a la realidad. Se consideran las mismas hipótesis salvo la del espesor de los neumáticos, que ahora se asume que tienen los siguientes espesores:

Anchura neumático delantero (m)	$2 \cdot t_f$	0.088
Media anchura neumático delantero (m)	t_f	0.044
Anchura neumático trasero (m)	$2 \cdot t_r$	0.1151
Media anchura neumático trasero (m)	t_r	0.05755

Tabla 3.11. Valores de los neumáticos..

Esto último supondrá un ángulo de inclinación mayor para equilibrar los momentos de la fuerza centrífuga y del peso.

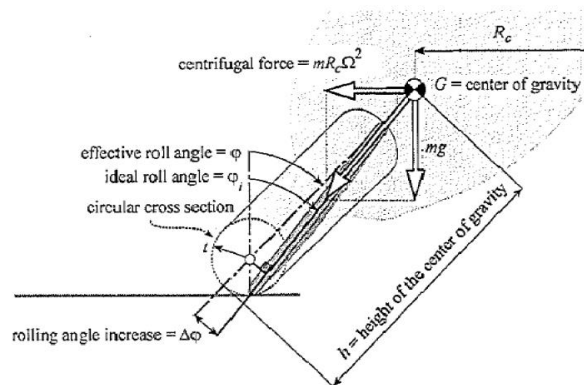


Fig. 3.10. Efecto angulos de inclinación.

Ángulo de inclinación efectivo:

- neumático delantero: $\beta = \beta_i + \Delta\beta = \beta_i + \arcsen \frac{t_f \cdot \text{sen}\beta_i}{h - t_f}$
- neumático trasero: $\varphi = \varphi_i + \Delta\varphi = \varphi_i + \arcsen \frac{t_r \cdot \text{sen}\varphi_i}{h - t_r}$

Cuanto mayor sea la anchura del neumático mayor será el ángulo de inclinación; y lo mismo ocurrirá si se reduce la altura del CdG.

Además de la geometría de la moto, también influye mucho en este aspecto la posición del piloto; ya que, según como se coloque, variará la posición del CdG (del conjunto motocicleta y piloto). La posición más favorable es aquella en la que el piloto se descuelga hacia el interior de la curva, lo que hará que el CdG se desplace también hacia el interior, reduciéndose el ángulo de inclinación.

Velocidad de las ruedas durante un giro

Lo primero que hay que especificar en este apartado es que entre el neumático y la rueda se produce un deslizamiento longitudinal al frenar, acelerar o dar una curva. Dicho deslizamiento se podrá despreciar en condiciones estáticas ya que se debe a la resistencia de rodadura.

Por lo que para calcular la velocidad de cada rueda no se considerará este deslizamiento entre el neumático y la rueda ya que se está estudiando el caso de giro estático. La velocidad de cada rueda se calculará en función de la velocidad lineal de la siguiente manera:

$$\omega_r = -\frac{v}{\rho_r + t_r \cdot \cos\varphi}$$

$$\omega_f = -\frac{v}{(\rho_f + t_f \cdot \cos\beta) \cdot \cos\Delta}$$

Un aspecto a destacar es que los neumáticos en una curva giran más rápido debido a que el punto de contacto entre el neumático y el asfalto se encuentra en una circunferencia de menor tamaño debido a la inclinación.

A partir de simulaciones realizadas en el circuito de MotorLand Aragón por compañeros para anteriores ediciones de MotoStudent se obtienen las características de una de las curvas más exigentes del circuito, ya que en ella se dan las mayores fuerzas laterales sobre la motocicleta. En concreto se trata de una curva cerrada que se da a gran velocidad y con un ángulo de inclinación cercano al máximo.

Mediante la simulación se extraen los siguientes datos:

Radio de giro (m)	R_C	68
Velocidad de giro (rad/s)	Ω	0.4
Ángulo cinemático de dirección (rad)	Δ	0.0128

Tabla 3.12. Valores simulación.

Con los que se obtendrán:

$$\beta_i = \varphi_i = \arctg \frac{27.2^2}{9.81 \cdot 68} = 0.734 \text{ rad}$$

$$v = 0.4 \cdot 68 = 27.2 \text{ m/s} = 97.92 \text{ km/h}$$

$$F_c = 68 \cdot 170 \cdot 0.4^2 = 1849.6 \text{ N}$$

$$\beta = \beta_i + \Delta\beta = 0.734 + \arcsen \frac{0.044 \cdot \text{sen}0.734}{0.542 - 0.044} = 0.793 \text{ rad} = 45.43^\circ$$

$$\varphi = \varphi_i + \Delta\varphi = 0.734 + \arcsen \frac{0.057 \cdot \text{sen}0.734}{0.542 - 0.057} = 0.813 \text{ rad} = 46.6^\circ$$

$$\omega_f = -\frac{27.2}{(0.244 + 0.044 \cdot \cos0.793) \cdot \cos0.0128} = -98.961 \text{ rad/s}$$

$$\rho_f = R_f - t_f = 0.288 - 0.044 = 0.244$$

$$\omega_r = -\frac{27.2}{0.243 + 0.057 \cdot \cos0.813} = -96.235 \text{ rad/s}$$

$$\rho_r = R_r - t_r = 0.301 - 0.057 = 0.243$$

Comportamiento direccional de la motocicleta en el giro

Al igual que en el caso anterior se supone que se realiza un giro estático y a esto se le añade la suposición de que cada rueda gira en rodadura perfecta por lo que el vector velocidad de cada una de ellas estará contenido en el plano de su respectiva rueda.

Cuando se realiza un giro las ruedas no siguen exactamente la misma dirección que la motocicleta, esto se debe al deslizamiento lateral que sufren las ruedas. Este deslizamiento se expresa mediante el ángulo de deslizamiento λ , también conocido como ángulo de deriva.

El ángulo de deriva se calcula en función de la rigidez del neumático y de la inclinación de este. Cada neumático tendrá un coeficiente de rigidez de deriva y otro de comba.

Rigidez comba delantero (rad^{-1})	k_{ϕ_f}	2.132
Rigidez comba trasero (rad^{-1})	k_{ϕ_r}	2.08
Rigidez deriva delantero (rad^{-1})	k_{λ_f}	18.122
Rigidez deriva trasero (rad^{-1})	k_{λ_r}	18.72

Tabla 3.13. Valores rigidez.

- ángulo deriva delantero:

$$\lambda_f = \frac{1 - k_{\phi_f}}{k_{\lambda_f}} \cdot \beta = \frac{1 - 2.132}{18.122} \cdot 0.793 = -0.049 \text{ rad} = -2.838^\circ$$

- ángulo deriva trasero:

$$\lambda_r = \frac{1 - k_{\phi_r}}{k_{\lambda_r}} \cdot \varphi = \frac{1 - 2.08}{18.72} \cdot 0.813 = -0.047 \text{ rad} = -2.688^\circ$$

Ángulo de dirección efectivo

Este es el resultado del efecto que causan los ángulos de deriva de las dos ruedas en el ángulo de dirección cinemática aplicado por el piloto.

$$\Delta^* = \Delta + \lambda_r - \lambda_f = 0.0128 + (-0.047) - (-0.049) = 0.0148 \text{ rad} = 0.85^\circ$$

En el caso de que los ángulos de deriva fuesen iguales, el ángulo de dirección efectivo será igual al ángulo de dirección cinemática aplicado por el piloto.

En este tipo de curvas, rápidas y con mucha inclinación de la motocicleta, el ángulo de dirección en el momento de máxima inclinación, que es cuando más se le exige a la motocicleta, es prácticamente nulo (este es el calculado). El máximo ángulo de dirección se aplica justo antes de entrar en la curva con la motocicleta recta, que se irá reduciendo hasta el mínimo según vaya entrando en la curva.

Ratio de la dirección

Este parámetro permitirá conocer cuál será el comportamiento direccional de la motocicleta, que depende de diversos factores como la distribución de masas o las propiedades de los neumáticos.

Este ratio de la dirección se obtiene de la siguiente forma: $\xi = \frac{R_{Cf}}{R_{Cr}}$

En función de su valor el comportamiento de la motocicleta será sub-virador, neutral o sobre-virador.

- si $\xi < 1 \rightarrow$ comportamiento subvirador $\rightarrow \lambda_r < \lambda_f$
- si $\xi = 1 \rightarrow$ comportamiento neutral $\rightarrow \lambda_r = \lambda_f$
- si $\xi > 1 \rightarrow$ comportamiento sobrevirador $\rightarrow \lambda_r > \lambda_f$

Para una motocicleta es mejor el comportamiento sobre-virador ya que este hará que la motocicleta tienda a meterse hacia dentro la curva, con lo que el piloto tendrá que aplicar un menor giro del manillar para dar la curva. Con esta tendencia se puede producir una pérdida de adherencia de la rueda trasera que provoque la caída del piloto. Pero es más fácil mantener el control de la motocicleta si la pérdida de adherencia es en la rueda trasera que en la delantera.

En el caso de este prototipo se tiene:

$$\lambda_r = -0.047 \text{ rad} > \lambda_f = -0.049 \text{ rad}$$

Con lo que su ratio de dirección será:

$$\xi > 1$$

Y, por lo tanto, tendrá comportamiento sobre-virador; lo que significa que será más manejable.

Fuerzas en curva

Como es lógico, en paso por curva las expresiones de las reacciones verticales de los neumáticos serán distintas ya que el movimiento ya no es rectilíneo. La resistencia aerodinámica también generará una transferencia de carga de pequeño valor, la cual se podrá despreciar en los cálculos. Las expresiones quedarán de la siguiente manera:

$$N_f = \frac{m \cdot g \cdot b}{p} - F_D \cdot \frac{h}{p} \cdot \cos\beta \rightarrow N_f = \frac{m \cdot g \cdot b}{p} = \frac{170 \cdot 9.81 \cdot 0.697}{1.255} = 926.803 \text{ N}$$

$$N_r = \frac{m \cdot g \cdot (p - b)}{p} + F_D \cdot \frac{h}{p} \cdot \cos\varphi \rightarrow N_r = \frac{m \cdot g \cdot (p - b)}{p} = \frac{170 \cdot 9.81 \cdot (1.255 - 0.697)}{1.255} = 740.897 \text{ N}$$

Considerando que la curva es de un radio grande en comparación con la batalla de la motocicleta (68/1.255) y despreciando la resistencia aerodinámica, las fuerzas laterales de cada uno de los neumáticos se calcularán de la siguiente manera:

$$F_{sf} = \frac{N_f \cdot v_f^2}{g \cdot \cos\Delta \cdot R_{cr}} = \frac{926.803 \cdot 24.146^2}{9.81 \cdot \cos 0.0128 \cdot 68} = 810.125 \text{ N}$$

$$v_f = \omega_f \cdot \rho_f = 98.961 \cdot 0.244 = 24.146 \text{ m/s}^2$$

$$F_{sr} = \frac{N_r \cdot v_r^2}{g \cdot R_{cr}} = \frac{740.897 \cdot 23.395^2}{9.81 \cdot 68} = 607.875 \text{ N}$$

$$v_r = \omega_r \cdot \rho_r = 96.23 \cdot 0.243 = 23.395 \text{ m/s}^2$$

Conclusiones

Estas tres situaciones planteadas (aceleración, frenada y paso por curva) han servido para calcular las máximas cargas teóricas que podrían actuar sobre la motocicleta. Como ya se ha explicado, de cada una de las situaciones se utilizarán las cargas derivadas del caso más limitante. A continuación se muestra una tabla con las máximas cargas de cada situación:

Aceleración limitada por el motor	
Reacción vertical delantera (N_f)	659.796 N
Reacción vertical trasera (N_r)	1007.904 N
Fuerza de empuje (S^*)	617.969 N
Frenada limitada por el vuelco	
Reacción vertical delantera (N_f)	1667,7 N
Reacción vertical trasera (N_r)	0 N
Fuerza frenada rueda delantera (F_f)	1714.755 N
Fuerza frenada rueda trasera (F_r)	0 N
Fuerzas en curva	
Reacción vertical delantera (N_f)	926.803 N
Reacción vertical trasera (N_r)	740.897 N
Fuerza lateral rueda delantera (F_{sf})	810.125 N
Fuerza lateral rueda trasera (F_{sr})	607.875 N

Tabla 3.14. Cargas calculadas.

Como este proyecto trata sobre el desarrollo de una suspensión delantera alternativa se emplearán para el análisis por elementos finitos de las distintas piezas las cargas de la situación que más exija a la parte delantera de la motocicleta, ya que serán las que absorba la suspensión delantera. Así que se emplearán las cargas derivadas de la frenada limitada por el vuelco. Más adelante se explicará cómo se distribuyen dichas cargas por los distintos componentes de la suspensión.

3.1.8 Cargas debidas a las irregularidades del terreno

En los cálculos de las diversas cargas que aparecen en los casos planteados anteriormente se supone que el terreno es perfectamente plano, lo cual no es así. Cuando la motocicleta pase por algún tipo de badén o rizado sufrirá cargas dinámicas verticales mayores. Estas cargas también habrá que calcularlas puesto que pueden coincidir con un caso de máxima exigencia para la motocicleta, es decir, que pase un badén o un rizado a la vez que frena, acelera o da una curva. Así que para saber si los distintos componentes soportan estas cargas dinámicas habrá que realizar su correspondiente estudio. Para ello se emplea el modelo de mono-suspensión de un grado de libertad, que se explicará a continuación.

3.1.8.1 Mono-suspensión con un grado de libertad

Dentro de este modelo se analizan distintos aspectos para llegar a determinar las cargas dinámicas que afectarán a la motocicleta como son el comportamiento dinámico de la suspensión y su movimiento oscilatorio debido a las irregularidades de la carretera, el confort de pilotaje y la aceleración vertical.

Al adoptar este modelo se asumen las siguientes suposiciones;

- la motocicleta recorre una carretera sinusoidal
- circula a velocidad v constante
- las masas no suspendidas son despreciables
- la motocicleta se puede representar mediante dos mono-suspensiones separadas

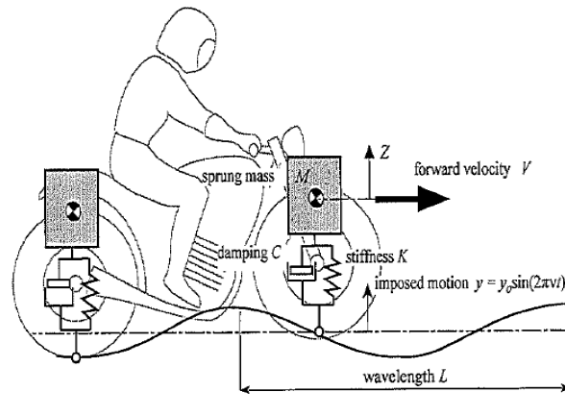


Fig. 3.11. Irregularidades del terreno.

3.1.8.2 Comportamiento dinámico

El objetivo de analizar el comportamiento dinámico de la suspensión es obtener una aproximación de cómo será la respuesta del sistema ante acciones dinámicas que originen falta de estabilidad en la motocicleta.

Como se ha dicho antes el asfalto no es perfectamente plano y generará unas cargas verticales a frecuencias próximas a las de la masa suspendida que originarán grandes desplazamientos y pérdida de peso adherente en las ruedas.

El esquema de cada una de las mono-suspensiones es el siguiente:

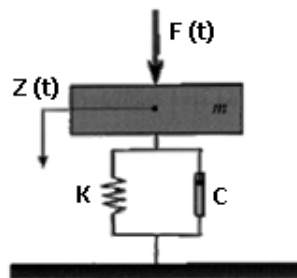


Fig. 3.12. Mono-suspensión de 1 dgl.

Y la ecuación del movimiento del sistema es:

$$m \cdot \ddot{Z}(t) + C \cdot \dot{Z}(t) + K \cdot Z(t) = F(t)$$

A partir de ella se obtendrán las frecuencias naturales suponiendo:

$$F(t) = 0$$

$$Z(t) = Z \cdot e^{\omega t}$$

Con lo que la ecuación característica del sistema queda:

$$m \cdot Z \cdot \omega^2 \cdot e^{\omega t} + C \cdot Z \cdot \omega \cdot e^{\omega t} + K \cdot Z \cdot e^{\omega t} = 0$$

Cuyas soluciones son:

$$\omega_{1,2} = -\frac{C}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{C}{2m}\right)^2 - \frac{K}{m}}$$

Debido a esta doble solución de la ecuación característica, $Z(t)$ se escribirá ahora:

$$Z(t) = A \cdot e^{\omega_1 t} + B \cdot e^{\omega_2 t} = e^{-\frac{C}{2m}t} \cdot [A \cdot e^{I \cdot t} + B \cdot e^{-I \cdot t}]$$

Donde:

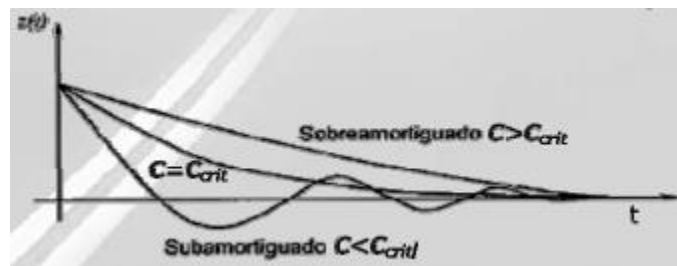
- A y B son dos constantes que dependen de las condiciones iniciales impuestas en $t = 0$
- $I = \sqrt{\left(\frac{C}{2m}\right)^2 - \frac{K}{m}}$

El término I será el que determine si el sistema es oscilatorio o no en función de si es real o imaginario. Cuando $I = 0$ el sistema es no oscilatorio y amortiguado. De esta condición se saca el valor del amortiguamiento crítico que determinara si el sistema es sobre-amortiguado o sub-amortiguado.

$$I = 0 \rightarrow \left(\frac{C}{2m}\right)^2 = \frac{K}{m} \rightarrow C_{crit} = 2m \cdot \sqrt{\frac{K}{m}} = 2 \cdot \sqrt{K \cdot m}$$

En función del amortiguamiento que se suponga o que se quiera obtener el sistema será:

- Sobre-amortiguado no oscilatorio: $C > C_{crit} \rightarrow I > 0 \rightarrow \left(\frac{C}{2m}\right)^2 > \frac{K}{m}$
- Sub-amortiguado oscilatorio o sub-crítico: $C < C_{crit} \rightarrow I < 0 \rightarrow \left(\frac{C}{2m}\right)^2 < \frac{K}{m}$
- Con amortiguamiento crítico: $C = C_{crit} \rightarrow I = 0$



Gráfica 3.2. Amortiguamientos.

De los tres posibles sistemas el más favorable es el sub-crítico puesto que va reduciendo suavemente sus oscilaciones hasta volver a su posición de equilibrio. Mientras que si el sistema es sobre-amortiguado o con amortiguamiento crítico, el sistema no oscilaría y volvería de forma brusca a su posición de equilibrio. Lo cual empeoraría la manejabilidad de la motocicleta y el confort de pilotaje. Entonces para los distintos cálculos se supondrá un amortiguamiento sub-crítico, con lo que sus frecuencias naturales serán números complejos que se pueden escribir de la siguiente manera:

$$\omega_{1,2} = \sigma \pm i \cdot \omega_n$$



Siendo:

- Factor de amortiguamiento: $\sigma = -\frac{C}{2m}$
- Frecuencia natural del sistema amortiguado: $\omega_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m} - \left(\frac{C}{2m}\right)^2}$ [Hz]

Un parámetro que será importante a tener en cuenta en estos cálculos es el amortiguamiento relativo que se obtiene de la siguiente manera:

$$\xi = \frac{C}{C_{crit}}$$

Ahora el factor de amortiguamiento se puede reescribir en función del amortiguamiento relativo como:

$$\sigma = \xi \cdot \omega$$

Donde ω es la frecuencia fundamental del sistema no amortiguado.

$$\omega = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m}} \quad [\text{Hz}]$$

Definidos todos estos parámetros se puede comenzar a suponer valores para analizar el comportamiento dinámico del sistema.

La primera suposición es que la masa total suspendida de la motocicleta se reparte de igual forma en la suspensión delantera y en la trasera. Esta masa suspendida se supone que será aproximadamente de unos 125 kg. Con lo que la masa empleada en estos cálculos será:

$$m = \frac{\text{masa total suspendida}}{2} = \frac{125}{2} = 62.5 \text{ kg}$$

En cuanto al amortiguamiento relativo, en los vehículos actuales toma valores de entre 0.2 y 0.4. Para la suspensión a estudio se supondrá un amortiguamiento relativo de:

$$\xi = 0.3$$

Y la frecuencia fundamental del sistema no amortiguado se supondrá:

$$\omega = 1 \text{ Hz}$$

Con este valor se puede obtener la constante de rigidez K del muelle mediante la siguiente expresión:

$$K = 4 \cdot \pi^2 \cdot m \cdot \omega^2 = 4 \cdot \pi^2 \cdot m = 4 \cdot \pi^2 \cdot 62.5 \cdot 1^2 = 2467.401 \text{ N/m}$$

Con la rigidez del muelle ya se puede calcular el valor del amortiguamiento:

$$C = \xi \cdot C_{crit} = \xi \cdot 2 \cdot \sqrt{K \cdot m} = 0.3 \cdot 2 \cdot \sqrt{2467.401 \cdot 62.5} = 235.619$$

Y la frecuencia natural del sistema amortiguado será:

$$\omega_n = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m} - \left(\frac{C}{2m}\right)^2} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{2467.401}{62.5} - \left(\frac{235.619}{2 \cdot 62.5}\right)^2} = 0.954 \text{ Hz}$$

3.1.8.3 Movimiento oscilatorio impuesto por las irregularidades de la carretera

Como ya se ha dicho antes, se supone que la motocicleta circula por una carretera sinusoidal. Esto provocará un movimiento de la suspensión que hará que el punto de contacto de la rueda con el suelo tenga un movimiento armónico definido de la siguiente manera:

$$y = y_0 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot \nu \cdot t)$$

Donde $\nu = \frac{v}{L}$ es la frecuencia del movimiento debido a las irregularidades del terreno.
 En estado estacionario el ratio de amplitudes entre Z_0 (del movimiento vertical de la masa suspendida) e Y_0 (del movimiento armónico) es:

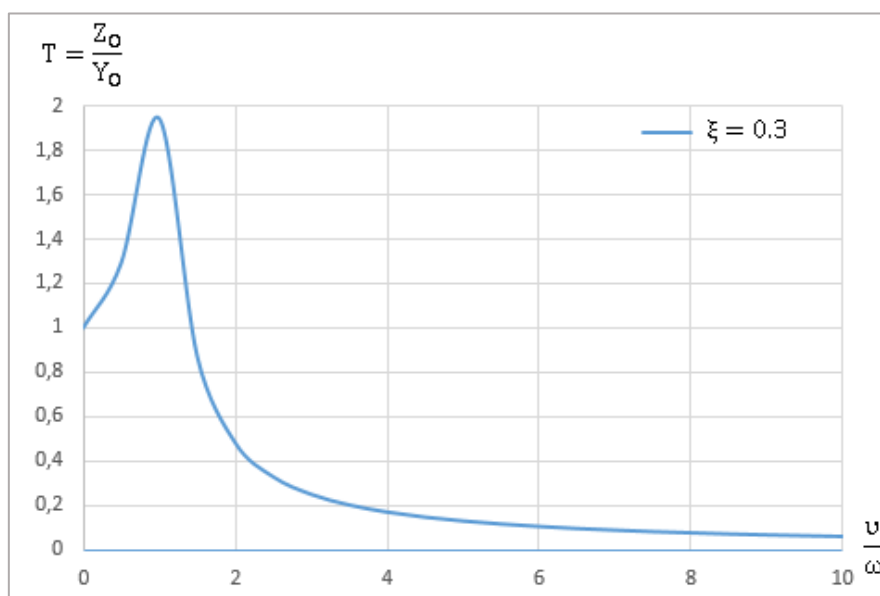
$$T = \frac{Z_0}{Y_0} = \frac{1 + \left(2 \cdot \xi \cdot \frac{\nu}{\omega}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{\nu}{\omega}\right)^2\right)^2 + \left(2 \cdot \xi \cdot \frac{\nu}{\omega}\right)^2}}$$

Este ratio dependerá de la frecuencia del movimiento (ν) que, a su vez, dependerá de las irregularidades del terreno. A este ratio de amplitudes (T) se le conoce como transmisibilidad.

A continuación se muestra mediante una tabla y su correspondiente gráfica la evolución de la transmisibilidad en función de la frecuencia del movimiento para el amortiguamiento relativo y la frecuencia fundamental supuestos.

ν	ν/ν_n	T
0	0	1
1	1	1,944
2	2	0,483
3	3	0,251
4	4	0,171
5	5	0,131
6	6	0,106
7	7	0,09
8	8	0,078
9	9	0,068
10	10	0,061

Tabla 3.15. Tabla de frecuencias.



Gráfica 3.3. Transmisibilidad.



Mediante la fórmula, la tabla o el gráfico se ve que la transmisibilidad es igual a 1 cuando $\frac{v}{\omega} = \sqrt{2} = 1.414$ y el amortiguamiento relativo sea de 0.3.

Se presta atención a este valor porque será el que determine si la introducción de la suspensión será beneficiosa o perjudicial para el comportamiento de la motocicleta y el confort de pilotaje. Puesto que:

- Si $\frac{v}{\omega} < 1.414 \rightarrow T > 1 \rightarrow$ la suspensión amplifica las oscilaciones, lo cual no interesa.
- Si $\frac{v}{\omega} > 1.414 \rightarrow T < 1 \rightarrow$ la suspensión reduce las oscilaciones, que es de lo que se trata.

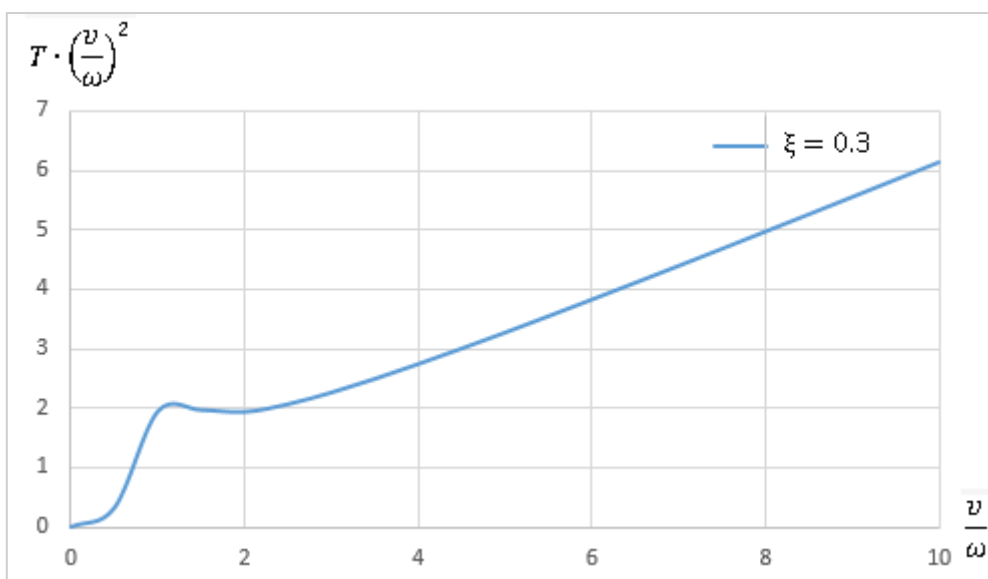
Con valores de amortiguamiento relativo superiores a 0.4 la amplificación de las oscilaciones que produce la transmisibilidad para valores de $\frac{v}{\omega} < 1.414$ es menor, lo cual puede parecer una ventaja. Sin embargo, esto hace que la respuesta del sistema para grandes velocidades sea peor.

3.1.8.4 Confort de pilotaje

Para analizar el confort de pilotaje se tendrá en cuenta la transmisibilidad de las aceleraciones verticales del sistema al piloto, ya que el confort de este está directamente relacionado con las aceleraciones que pueda percibir su cuerpo. Para ello se empleará un gráfico que relacione $\frac{v}{\omega}$ con el parámetro $T \cdot \left(\frac{v}{\omega}\right)^2$ (transmisibilidad de aceleraciones verticales).

v/vn	$T^*(v/vn)^2$
0	0
1	1,944
2	1,934
3	2,26
4	2,738
5	3,269
6	3,823
7	4,391
8	4,966
9	5,548
10	6,133

Tabla 3.16. Tabla de frecuencias.



Gráfica 3.4. Transmisibilidad de la aceleración.

Independientemente del amortiguamiento relativo, esta curva tomará el valor de 2 cuando $\frac{v}{\omega}$ sea igual a 1.414. Por debajo de este valor, la transmisibilidad de la aceleración aumenta muy rápidamente. A partir de este punto la transmisibilidad sigue aumentando pero de forma más suave. Este crecimiento dependerá de la pendiente que presenta la recta que, a su vez, depende del amortiguamiento relativo. Cuanto mayor sea el amortiguamiento, mayor será la pendiente y mayor será el crecimiento de la transmisibilidad. Y al revés, cuanto menor sea el amortiguamiento, menor pendiente y crecimiento más lento. Como se trata de una moto de competición, lo que se busca es que la suspensión haga posible un buen comportamiento de la motocicleta y que esta no sufra tanto las distintas cargas que puedan actuar sobre ella; en vez del confort del piloto, dentro de unos límites.

3.1.8.5 Aceleración vertical

Como se ha dicho en el apartado anterior el confort del piloto está directamente relacionado con las aceleraciones verticales de la masa suspendida de la motocicleta. Así que es importante hacer un buen estudio de dichas aceleraciones para poder ajustar más precisamente el confort de pilotaje. El confort será mejor cuando el pico de máxima aceleración vertical sea mínimo.

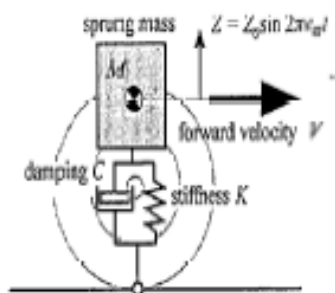


Fig. 3.13. Aceleración vertical.

La variación de la aceleración vertical de la masa suspendida dependerá del amortiguamiento relativo supuesto y de las características de un movimiento armónico. Dicho movimiento armónico se definiría de la siguiente manera:

$$Z(t) = Z_0 \cdot e^{-\xi(2\pi\omega) \cdot t} \cdot \text{sen}(q_n \cdot t)$$

Donde q_n es la frecuencia natural del amortiguador.

$$q_n = \omega \cdot \sqrt{1 - \xi^2} = 1 \cdot \sqrt{1 - 0.3^2} = 0.954 \text{ Hz}$$

Definida la ecuación que sigue el movimiento armónico se puede obtener la ecuación de la aceleración vertical, que será:

$$\ddot{Z}(t) = Z_0 \cdot \xi \cdot (2\pi \cdot \omega)^2 \cdot e^{-\xi \cdot (2\pi \cdot \omega) \cdot t} \cdot \text{sen}(q_n \cdot t) - 2 \cdot Z_0 \cdot \xi \cdot (2\pi \omega) \cdot e^{-\xi \cdot (2\pi \cdot \omega) \cdot t} \cdot q_n \cdot \cos(q_n \cdot t) - Z_0 \cdot q_n^2 \cdot e^{-\xi \cdot (2\pi \cdot \omega) \cdot t} \cdot \text{sen}(q_n \cdot t)$$

Que depende de la amplitud del perfil del suelo.

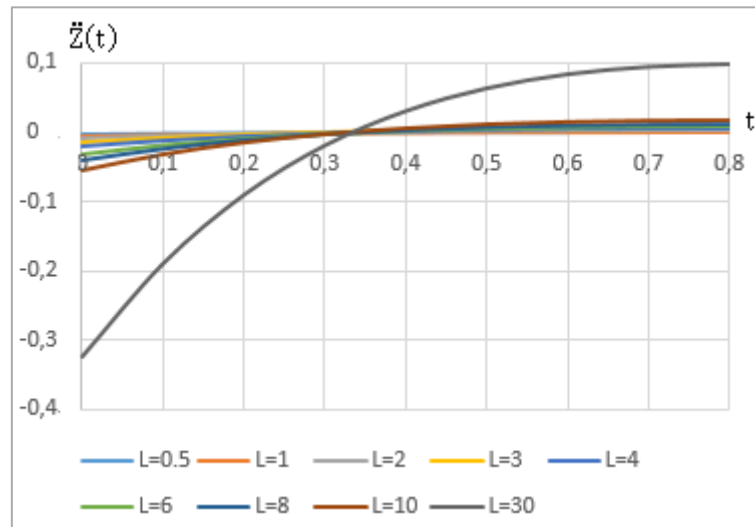
A continuación se muestra una tabla y su correspondiente gráfica que representan la variación de la aceleración vertical en el tiempo en función de las siguientes características del movimiento armónico: amplitud, velocidad y longitud de onda. Estas características del movimiento armónico dependerán del asfalto del circuito y de la velocidad a la que circule la moto.

En los circuitos de hoy en día no es normal que haya grandes irregularidades en el asfalto pero siempre puede darse algún rizado o badén. Los rizados pueden representarse como ondas senoidales de pequeña amplitud ($Y_0 = 0.05 \text{ m}$) y pequeña longitud de onda; mientras que los badenes también se pueden representar con ondas senoidales pero de mayor amplitud ($Y_0 = 0.1 \text{ m}$) y mayor longitud de onda.

De las experiencias y proyectos realizados por compañeros para anteriores ediciones de *MotoStudent* se saca la conclusión de que las mayores aceleraciones verticales aparecen cuando el movimiento armónico se produce al pasar un badén a velocidad máxima ($Y_0 = 0.1 \text{ m}$; $v = 44.44 \text{ m/s}$). Para distintas longitudes de onda se tienen las siguientes aceleraciones verticales:

t	$\ddot{Z}(t) \text{ (m/s}^2\text{)}$								
	L=0,5 m	L=1 m	L=2 m	L=3 m	L=4 m	L=6 m	L=8 m	L=10 m	L=30 m
0	-0,00243	-0,00486	-0,00975	-0,01471	-0,01977	-0,03031	-0,04166	-0,05408	-0,32320
0,1	-0,00142	-0,00284	-0,00570	-0,00860	-0,01156	-0,01772	-0,02435	-0,03162	-0,18895
0,2	-0,00068	-0,00135	-0,00271	-0,00409	-0,00550	-0,00843	-0,01158	-0,01504	-0,08986
0,3	-0,00014	-0,00028	-0,00056	-0,00085	-0,00114	-0,00174	-0,00239	-0,00311	-0,01856
0,4	0,00023	0,00047	0,00094	0,00141	0,00190	0,00291	0,00400	0,00519	0,03103
0,5	0,00048	0,00096	0,00193	0,00291	0,00391	0,00599	0,00824	0,01069	0,06389
0,6	0,00063	0,00126	0,00254	0,00383	0,00514	0,00789	0,01084	0,01407	0,08407
0,7	0,00071	0,00143	0,00286	0,00432	0,00580	0,00889	0,01222	0,01586	0,09480
0,8	0,00074	0,00148	0,00298	0,00449	0,00603	0,00925	0,01271	0,01651	0,09864

Tabla 3.17. Aceleraciones verticales en función de la longitud de onda.



Grafica 3.5. Aceleraciones verticales en función de la longitud de onda.

La primera conclusión que se saca de la gráfica es que las mayores aceleraciones verticales se dan justo en el instante inicial de la irregularidad y en pocas décimas de segundo esta se reduce casi por completo gracias a la actuación de la suspensión.

La segunda conclusión es que la máxima aceleración que se obtiene es con una longitud de onda de 30 m y su valor es de 0.3232 m/s^2 . Esta se produce, como todas, a bajas frecuencias, es decir, en el rango en el que la transmisibilidad amplifica el efecto de esta aceleración en el piloto. Pero como el valor de esta aceleración es muy reducido se puede tomar como válido de cara al confort de pilotaje y al comportamiento de la motocicleta.

Con esta aceleración y la masa suspendida delantera se puede calcular la carga debida a las irregularidades del terreno aplicando la ley de Newton:

$$F = m \cdot a = 69.47 \cdot 0.3232 = 22.45 \text{ N}$$

Como el CdG de la motocicleta no está centrado respecto a la batalla, sino que está algo adelantado, la masa suspendida delantera será algo mayor de la mitad de la masa suspendida total y su valor será aproximadamente de 69.47 kg.

Esta carga habrá que sumársela a todas las cargas verticales máximas calculadas anteriormente para realizar el análisis por elementos finitos.

3.1.9 Cargas finales para utilizar en el análisis FEM

En este apartado se va a especificar cuáles son finalmente las cargas que se van a emplear en el análisis por elementos finitos de los distintos componentes de la suspensión delantera. Se utilizarán las máximas cargas obtenidas en el caso de *frenada limitada por el vuelco*. Se han elegido estas cargas porque la situación de frenada es la que más exige a la motocicleta y, sobre todo, a la parte delantera de la misma. Y, en concreto, las del caso en el que el limitante es el vuelco de la motocicleta porque es imposible que se superen dichas cargas y porque así se evita un sobredimensionamiento excesivo de las piezas. Esto último aseguraría que las piezas aguanten cualquier exigencia pero tendrían un peso demasiado grande, lo cual es un inconveniente para una motocicleta de competición.

Entonces, como ya se dijo, primero habrá que sumar la carga debida a las irregularidades del terreno a todas las cargas verticales. Y, una vez hecho esto, se mayorarán todas las cargas con un coeficiente de seguridad de 1.5, el cual es suficiente para abarcar todos los posibles errores que se hayan cometido.

Por lo tanto, las cargas finales a emplear serán:

		Sin mayorar	Mayorada(1.5)
F longitudinal delantera	F_f	1714.755 N	2572.132 N
F vertical delantera	N_f	$1667.7 + 22.45 = 1690.15$ N	2535.225 N
F lateral delantera	F_{sf}	0 N	0 N
F longitudinal trasera	F_r	0 N	0 N
F vertical trasera	N_r	0 N	0 N
F lateral trasera	F_{sr}	0 N	0 N

Tabla 3.18. Cargas FEM.

Como todas las cargas que afectan a la parte trasera de la motocicleta y la fuerza lateral delantera son nulas, no será necesario tenerlas en cuenta en el siguiente apartado, lo que facilitará los cálculos.

3.1.10 Traslado de las cargas al punto de aplicación

Una vez mayoradas las cargas, habrá que trasladarlas a los distintos puntos de aplicación para poder realizar el análisis de cada uno de los componentes de la suspensión delantera.

El primer paso es trasladar las cargas del punto de contacto entre el neumático y el suelo al eje de la rueda.

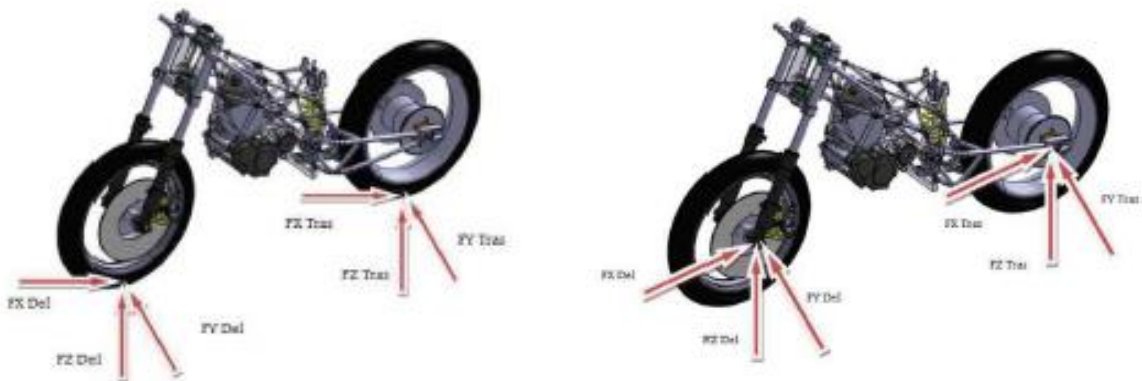


Fig. 3. 14. Traslacion de cargas del suelo al eje.

$$F_{\text{longitudinal suelo}} = F_{\text{longitudinal eje}} = F_f = 2572.132 \text{ N}$$

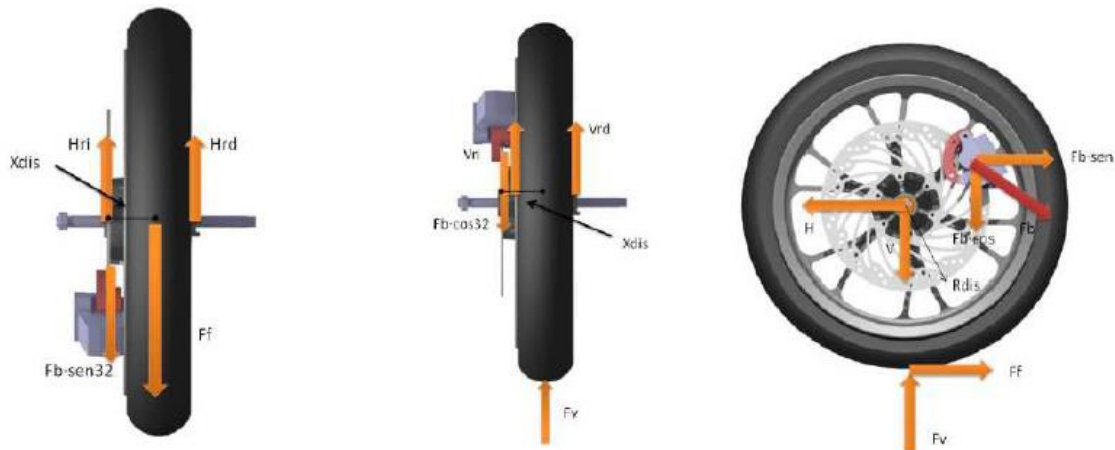
$$F_{\text{vertical suelo}} = F_{\text{vertical eje}} = N_f = 2535.225 \text{ N}$$

El segundo paso es calcular todas las cargas que actúan en el eje y después trasladarlas a los distintos puntos de aplicación para poder analizar los distintos componentes.

3.1.10.1 Traslado de cargas horquilla convencional

A la hora de calcular las cargas en el eje de la rueda habrá que tener en cuenta, aparte de las fuerzas desplazadas desde el punto de contacto del neumático con el suelo, la fuerza que realiza la pinza de freno sobre el disco. Ya que la acción de la pinza de freno influirá sobre la fuerza longitudinal.

Para ello se empleará el siguiente modelo:



Imagen

Donde:

- α es el ángulo que forma la fuerza de frenado de la pinza sobre el disco (F_b) con la vertical.
 $\alpha = 40.6^\circ$
- H_{ri} y H_{rd} son la fuerza horizontal que ejercen al eje los rodamientos izquierdo y derecho respectivamente.
- V_{ri} y V_{rd} son la fuerza vertical que ejercen al eje los rodamientos izquierdo y derecho respectivamente.
- H es la fuerza horizontal que se ejerce en el eje de la rueda
- V es la fuerza vertical que se ejerce en el eje de la rueda
- X_{dis} es la distancia del plano de la rueda delantera al disco de freno
 $X_{dis} = 68.42 \text{ mm}$
- X_i y X_d son la distancia del plano de la rueda delantera al rodamiento izquierdo y al rodamiento derecho respectivamente.
 $X_i = X_d = 101 \text{ mm}$
- R_{dis} y R_{del} son los radios del disco y de la rueda respectivamente.
 $R_{dis} = 160 \text{ mm}$
 $R_{del} = 288 \text{ mm}$

Definidas todas las fuerzas que actúan y sus correspondientes distancias se procederá a realizar el equilibrio de fuerzas y momentos en horizontal y en vertical:

- Horizontal

$$F_b \cdot \text{sen}(40.6^\circ) + F_f = H_{ri} + H_{rd}$$

$$H_{rd} \cdot X_d + F_b \cdot \text{sen}(40.6^\circ) \cdot X_{dis} = H_{ri} \cdot X_i$$

$$F_b \cdot R_{dis} = F_f \cdot R_{del}$$

- Vertical

$$V_{ri} + V_{rd} + N_f = F_b \cdot \text{cos}(40.6^\circ)$$

$$V_{rd} \cdot X_d + F_b \cdot \text{cos}(40.6^\circ) \cdot X_{dis} - V_{ri} \cdot X_i = 0$$

Resolviendo las distintas ecuaciones se obtiene:

F_b	4629.8376
H_{ri}	3813.09022
H_{rd}	1772.02072
V_{ri}	1680.71724
V_{rd}	700.639397

Tabla 3.19. Reacciones eje.

Debido a la acción de la pinza del freno, que está situada en la parte izquierda, el rodamiento izquierdo sufre unas cargas mucho mayores. Este efecto se transmitirá a lo largo de toda la horquilla. Con lo que para los cálculos se trabajará por separado el lado derecho del izquierdo.

El siguiente paso es trasladar las cargas a la tija a través de la horquilla. Esto se realizará una vez más mediante los correspondientes equilibrios de fuerzas y momentos aplicados a ambos lados de la horquilla. Para ello se supondrán las barras y las botellas como un único elemento rígido.

Las ecuaciones de equilibrio serán por tanto:

$$\begin{aligned}
 F_{ti} + H_{ri} \cdot \text{sen}(22) - V_{ri} \cdot \text{cos}(22) &= 0 \\
 R_{tti} - R_{pi} + H_{ri} \cdot \text{cos}(22) + V_{ri} \cdot \text{sen}(22) &= 0 \\
 R_{pi}(L - d_p) - H_{ri} \cdot \text{cos}(22) \cdot L - V_{ri} \cdot \text{sen}(22) \cdot L &= 0 \\
 -R_{ttd} + R_{pd} + V_{rd} \cdot \text{sen}(22) - H_{rd} \cdot \text{cos}(22) &= 0 \\
 F_{td} = V_{rd} \cdot \text{cos}(22) + H_{rd} \cdot \text{sen}(22) & \\
 R_{pd}(L - d_p) + V_{rd} \cdot \text{sen}(22) \cdot L - H_{rd} \cdot \text{cos}(22) \cdot L &= 0
 \end{aligned}$$

Resolviendo se obtiene:

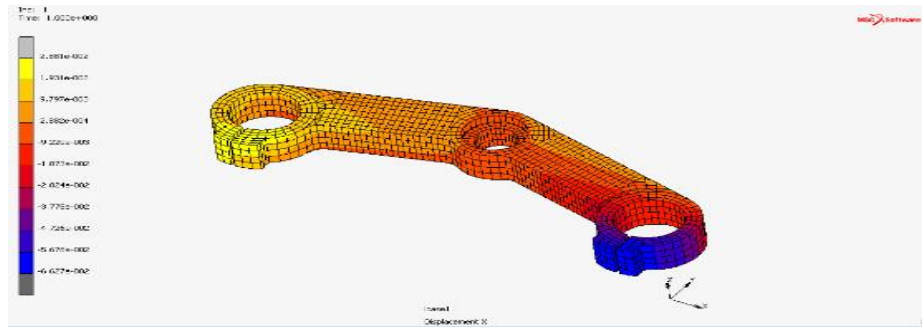
F_{ti}	129.925156
R_{tti}	2459.44873
R_{pi}	6624.49218
R_{ttd}	815.19681
F_{td}	1313.43218
R_{pd}	2195.72168

Tabla 3.20. Reacciones en la tija

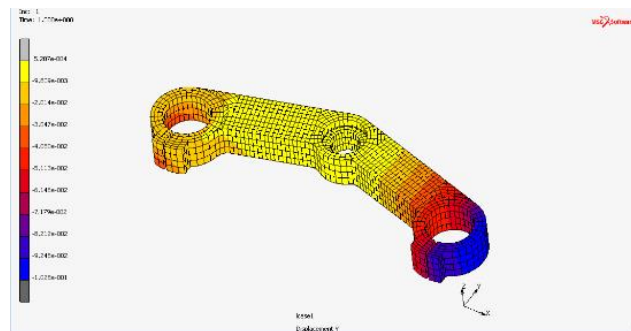
4 ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

Con estas cargas obtenidas ya se puede realizar el análisis por elementos finitos de la tija superior del sistema Telelever. Cuyo resultado será el que se muestra a continuación.

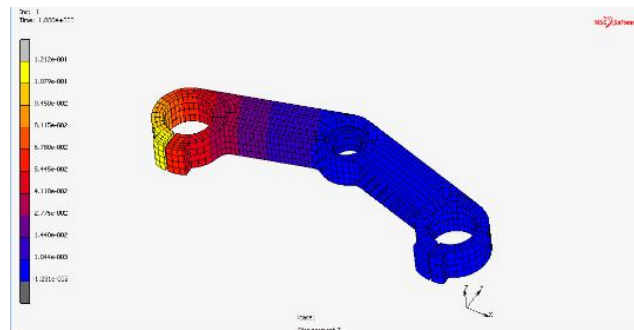
4.1 Desplazamientos en X



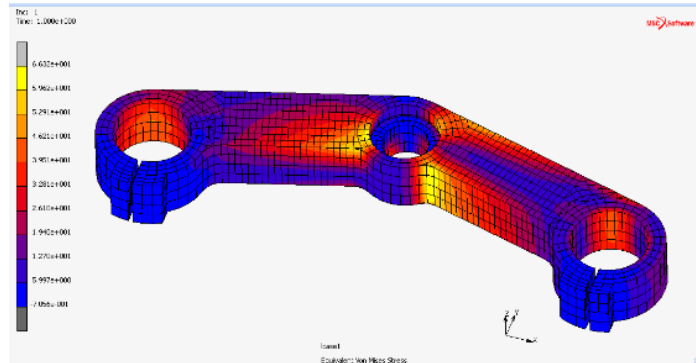
4.2 Desplazamientos en Y



4.3 Desplazamientos en Z



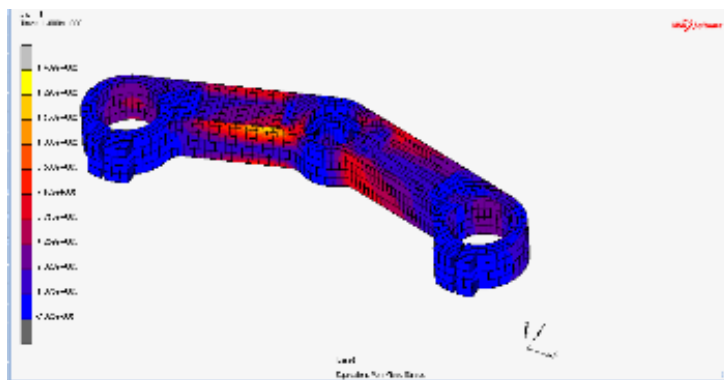
4.4 Tensiones de Von Mises



En las imágenes se aprecia como los puntos de la parte derecha sufren unos desplazamientos mucho mayores que los de la parte izquierda debido a los momentos que generan las fuerza que actúan en el lado derecho, que son mucho mayores.

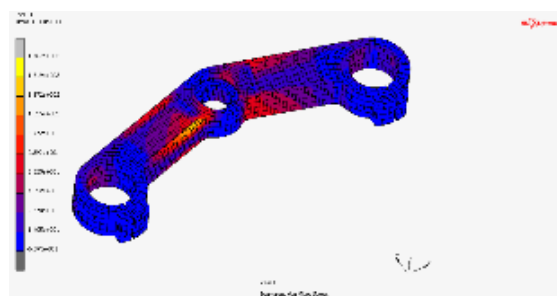
En cuanto a las tensiones de Von Mises se se aprecia que donde alcanzan mayores valores es entorno al punto de anclaje de la tija al chasis y en donde se producen cambios bruscos de la sección. Pero de todas formas los valores máximos alcanzados quedan lejos del límite de tensión del acero.

A continuación se realizará un vaciado de la pieza para tratar de aligerarla.



En este nuevo caso se aprecia que las tensiones máximas se han trasladado a las paredes de las cavidades, que serán ahora la parte más débil de la pieza. Pero de todas formas se sigue sin llegar a alcanzar el límite elástico..

El siguiente paso de mejora será realizar la tija en otro material, como puede ser el aluminio. El resultado será el que se muestra a continuación.





El diseño sigue aguantando las cargas máximas y es tres veces más ligero. Así que se puede dar por buena la mejora realizada en esta pieza.

Esta sería la forma de trabajar en todas las demás piezas que componen el sistema de suspensión Telelever diseñado. Dichas piezas se encuentran representadas en el anexo planos.



5 BIBLIOGRAFIA

- BMW MOTORRAD ESPAÑA

http://www.bmw-motorrad.es/es/es/index.html?content=http://www.bmw-motorrad.es/es/es/technology_detail/suspension/item_telelever.html¬rack=1

- AUTO-MECATRONICA.BMW & MINI SPECIALIST

<https://automecatronica.wordpress.com/2011/10/27/sistemas-de-suspension-bmw-telever-y-paralever/>

- Motorcycle handling and chassis design. The art and science-Tony Foale
- Motocicletas-Arias Paz
- Reglamento técnico MotoStudent
- Motorcycle dynamics- Vittore Cossalter
- Ingeniería de motocicletas.-Cesar Diaz de Cerio y Jose Sancho
- Apuntes de automoción-Vanesa Estremera.

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Título del Trabajo Fin de Grado



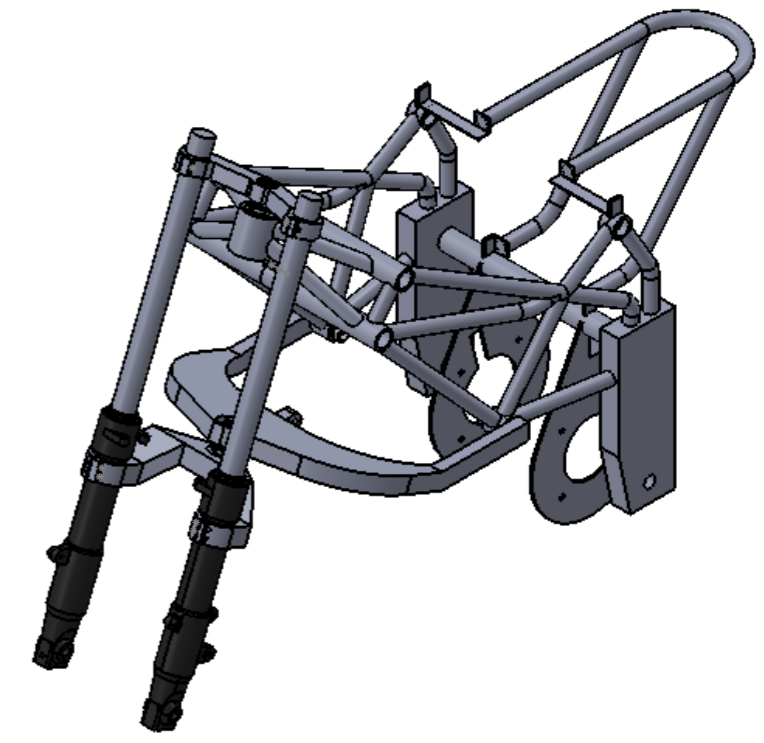
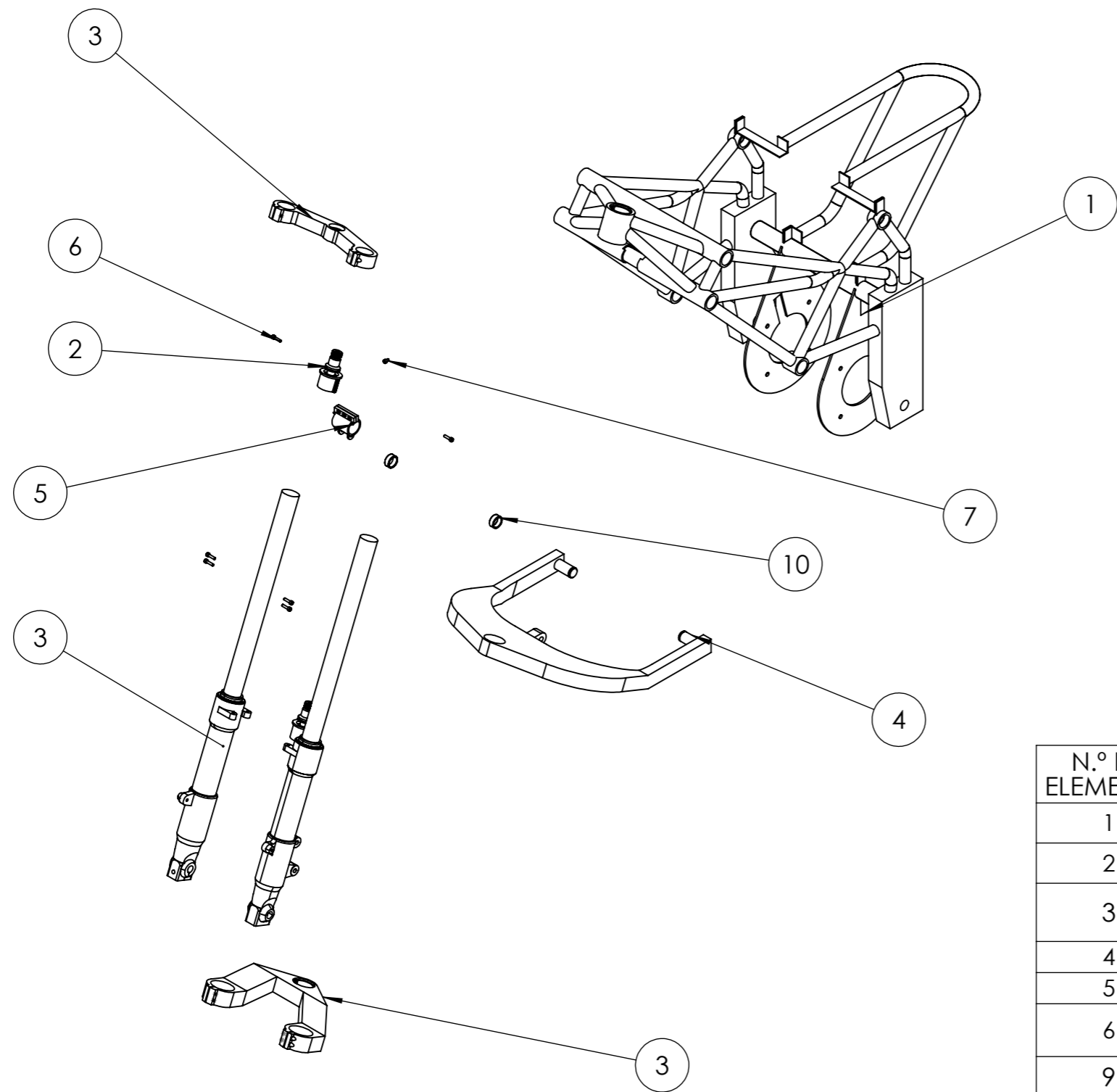
Grado en Ingeniería Mecánica

ANEXO-PLANOS

Francisco Labiano Mezquíriz

Vanesa Estremera Carrera

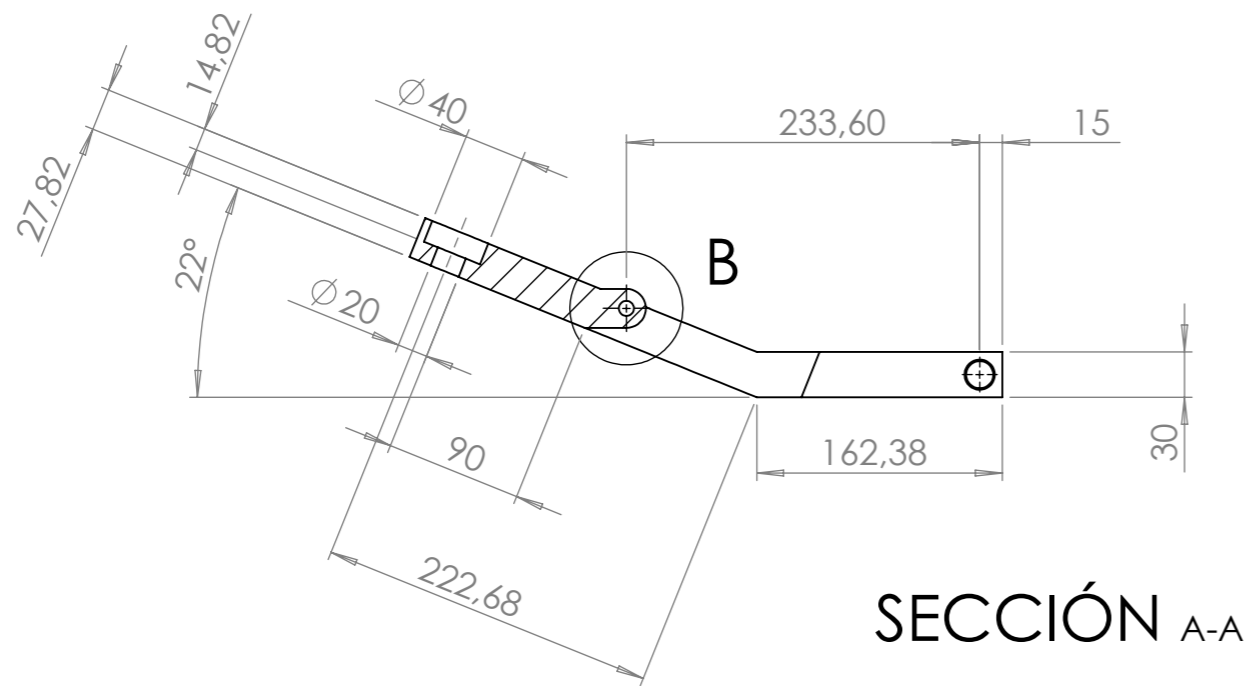
Pamplona, 29/06/2016



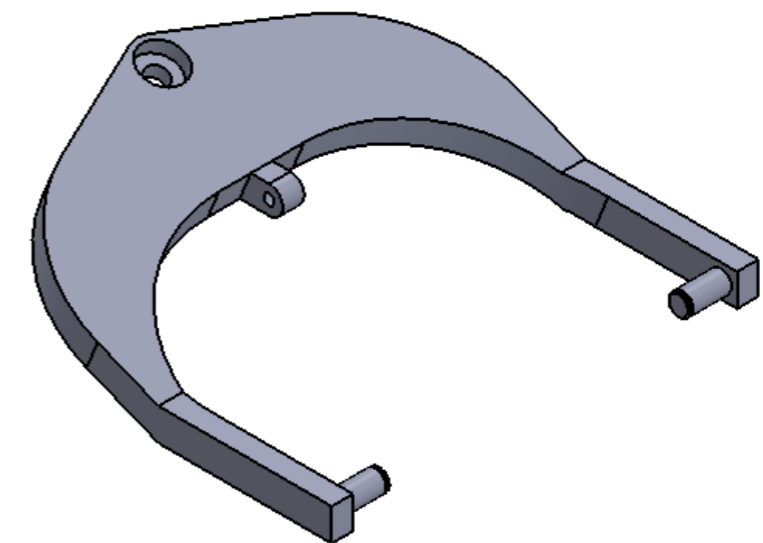
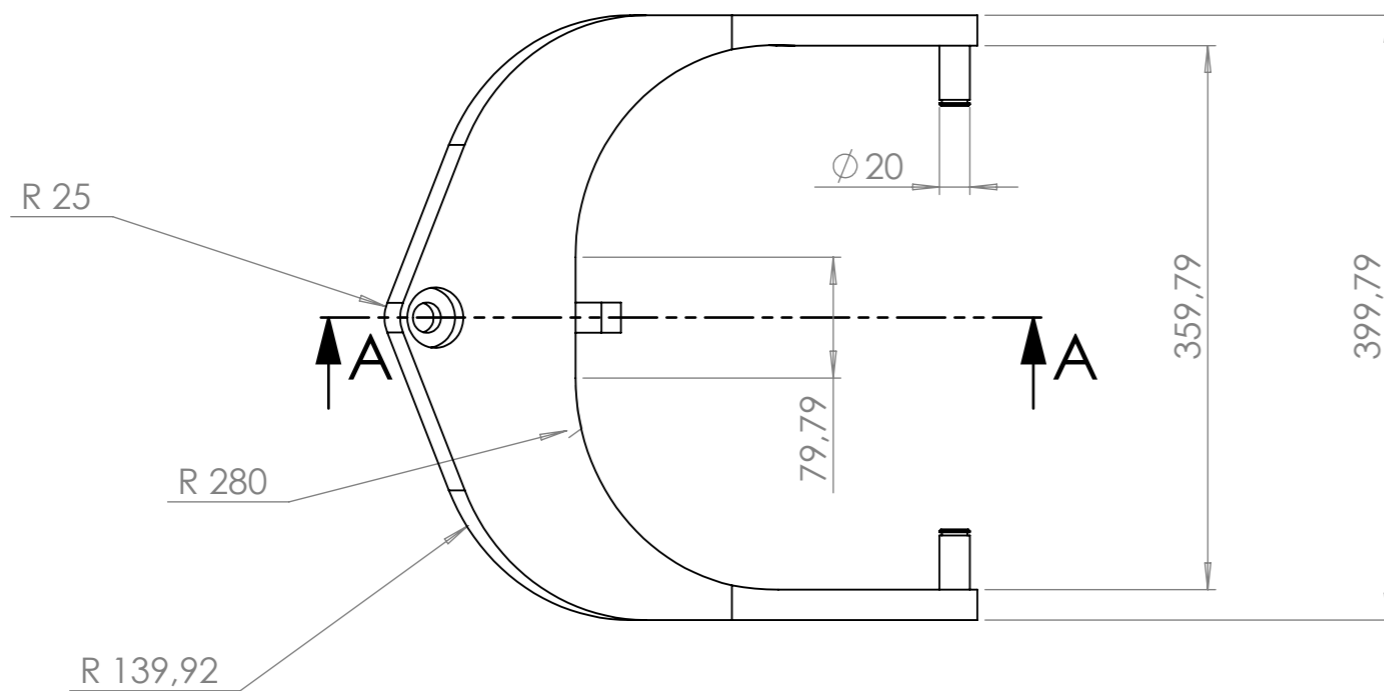
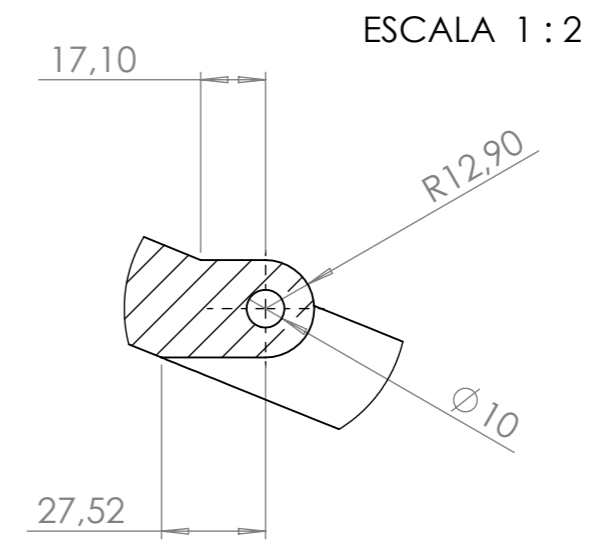
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	CHASIS		1
2	RÓTULA	RÓTULA COMERCIAL	2
3	HORQUILLA	HORQUILLA YAMAHA YZF-R125 PAIOLI	1
4	BRAZO INFERIOR	PLANO 2	1
5	ABRAZADERA	PLANO 5	1
6	DIN 912 M4 x 16 --- 16N	TORNILLOS TIJA Y PUENTE	6
9	DIN 912 M4 x 8 --- 8N	TORNILLOS ABRAZADERA	3
10	DIN 5405 - K20X24X10 - 26,SI,AC,26	RODAMIENTOS DE AGUJASD6	2
10	TIJA	PLANO 3	1
11	PUENTE HORQUILLA	PLANO 4	1

PROYECTO: DISEÑO DE UNA SUSPENSIÓN DEL TIPO TELELEVER		FIRMA:		
PLANO 1: PLANO DE CONJUNTO		MATERIAL:	PESO:	
AUTOR: Francisco Labiano Mezquíriz		ESCALA: 1:10	FECHA: 24/06/2016	

**Edición de estudiante de SolidWorks.
Sólo para uso académico.**



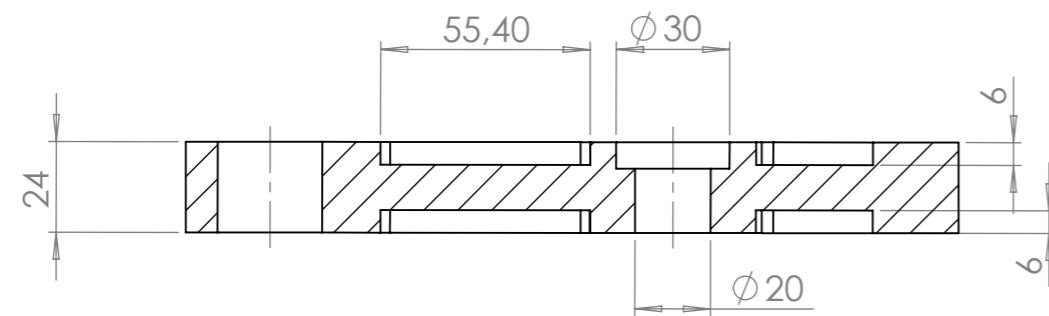
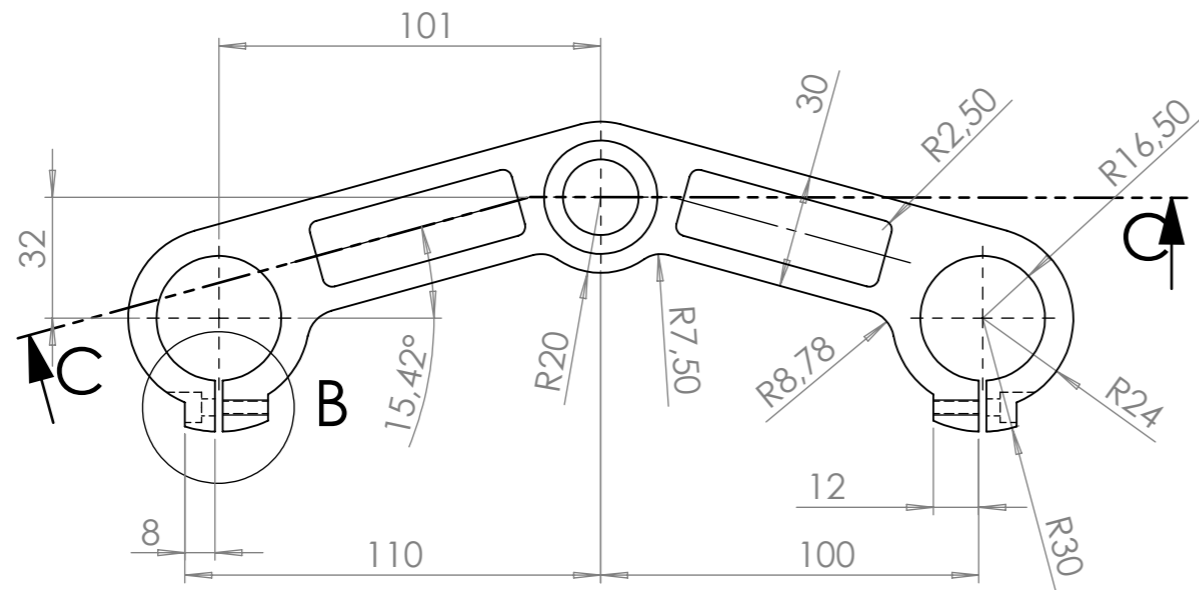
DETALLE B



**Edición de estudiante de SolidWorks.
Sólo para uso académico.**

PROYECTO: DISEÑO DE UNA SUSPENSIÓN DEL TIPO TELELEVER		FIRMA:	
PLANO 2: BRAZO INFERIOR		MATERIAL: ACERO S-355	PESO: 3.03 kg
AUTOR: Francisco Labiano Mezquíriz	ESCALA: 1:5	FECHA: 24/06/2016	

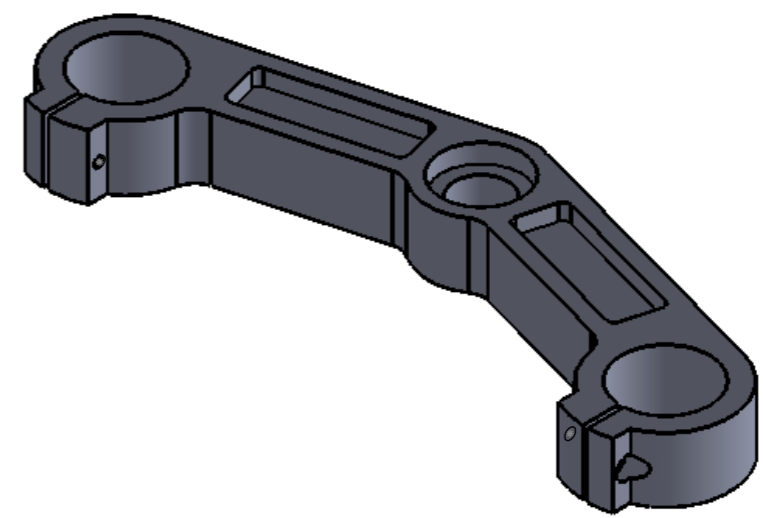
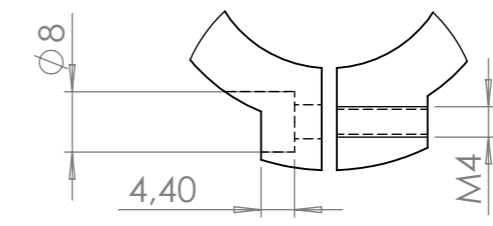




SECCIÓN C-C

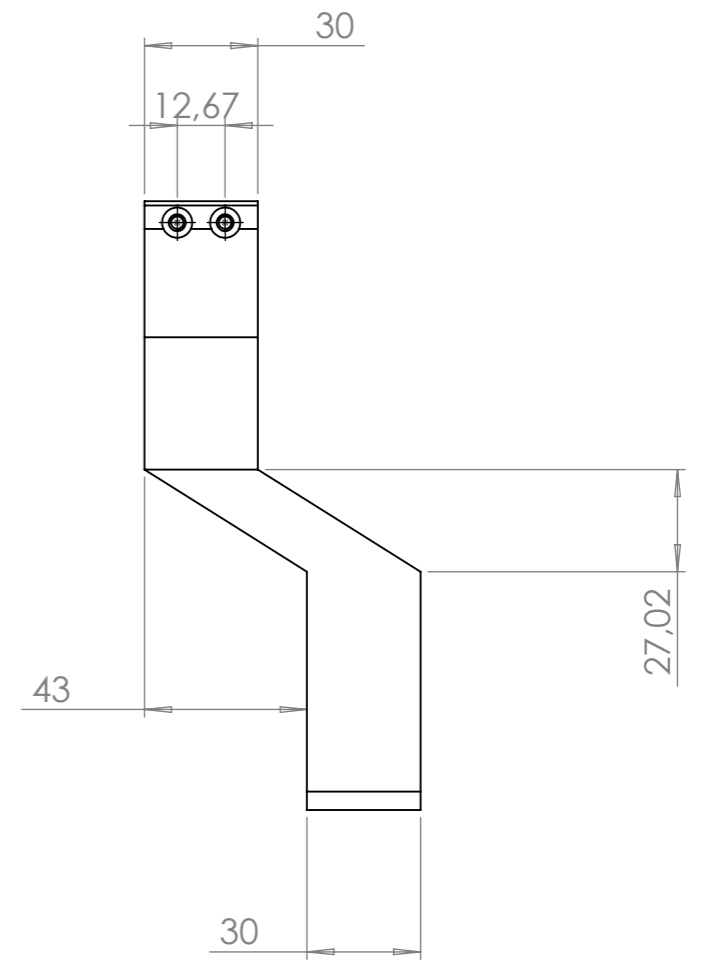
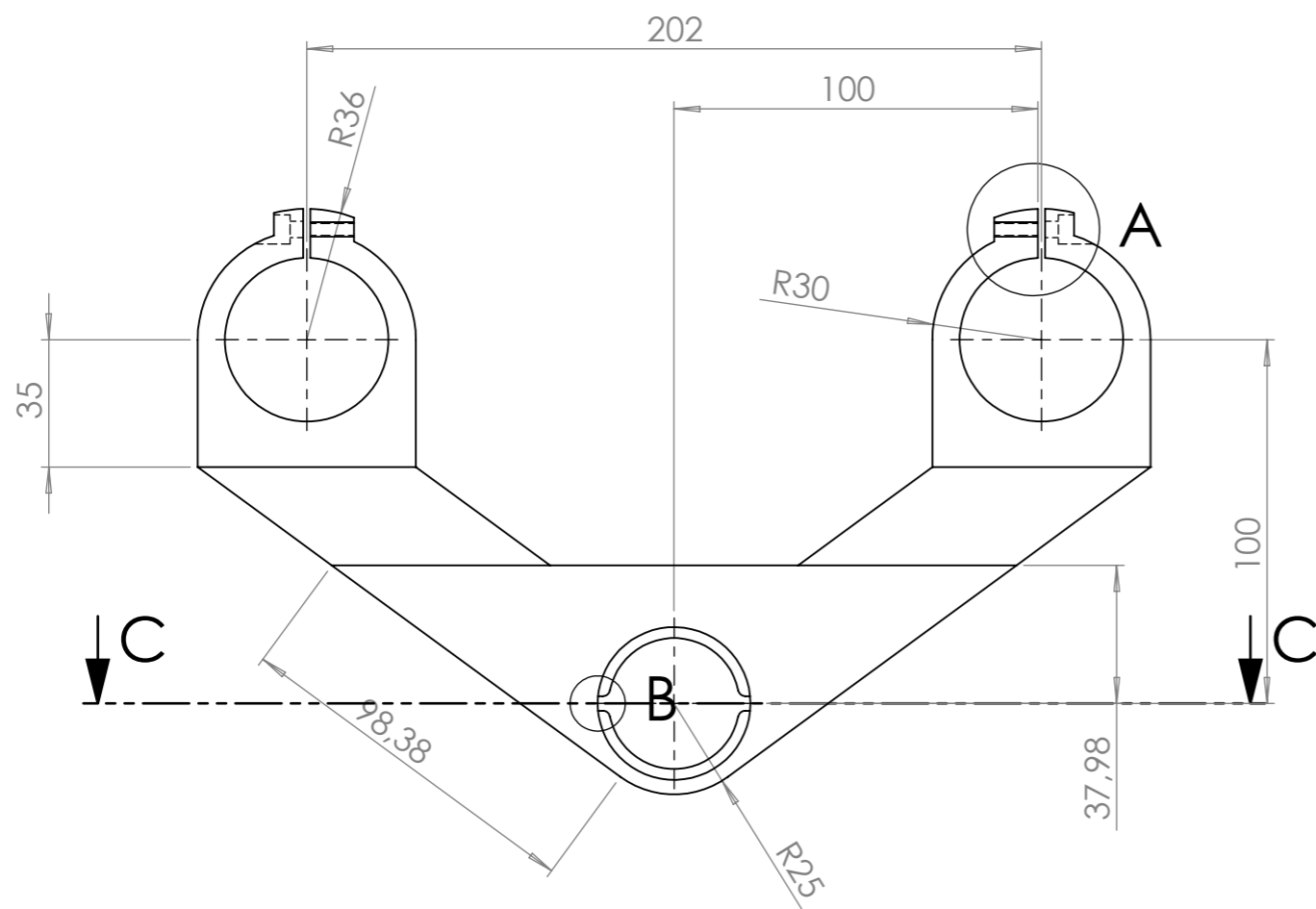
DETALLE B

ESCALA 1 : 1

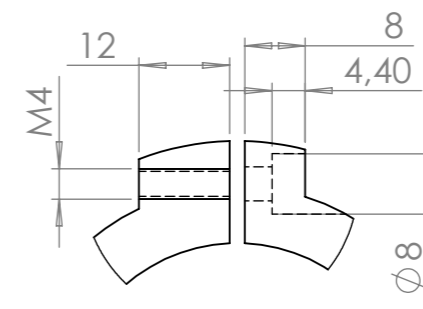
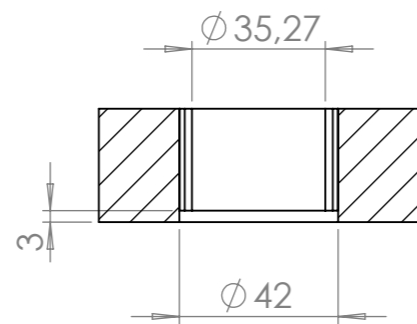


**Edición de estudiante de SolidWorks.
Sólo para uso académico.**

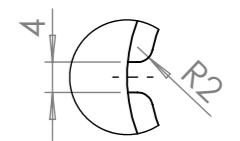
PROYECTO: DISEÑO DE UNA SUSPENSIÓN DEL TIPO TELELEVER		FIRMA:		
PLANO 3:	TIJA	MATERIAL: ALUMINIO 6061	PESO: 0.39 kg	
AUTOR: Francisco Labiano Mezquíriz	ESCALA: 1:2	FECHA: 24/06/2016		



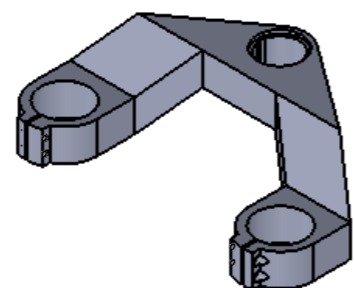
SECCIÓN C-C



DETALLE A
ESCALA 1 : 1

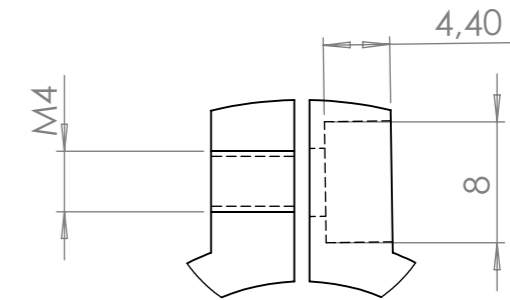
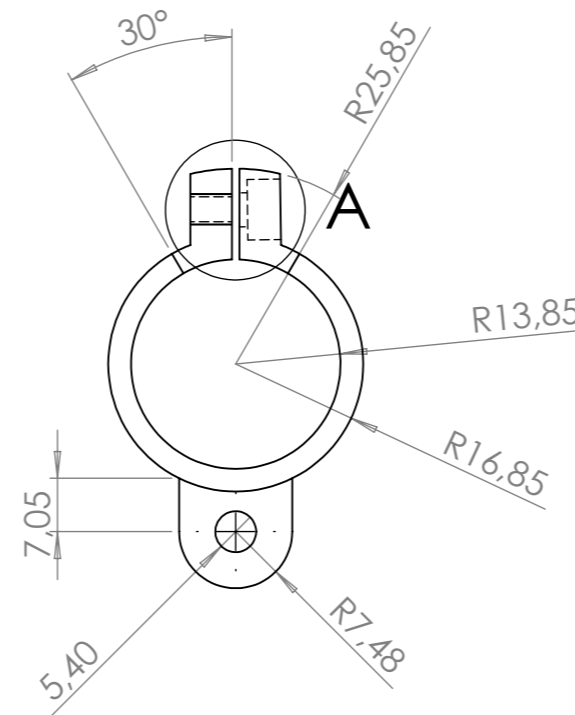
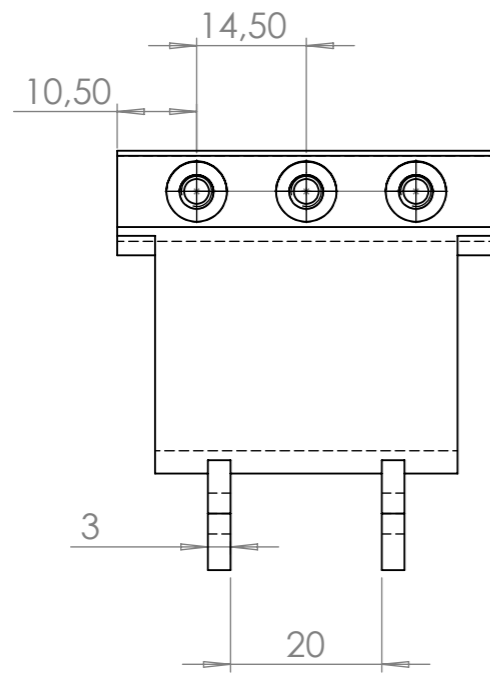


DETALLE B
ESCALA 1 : 1

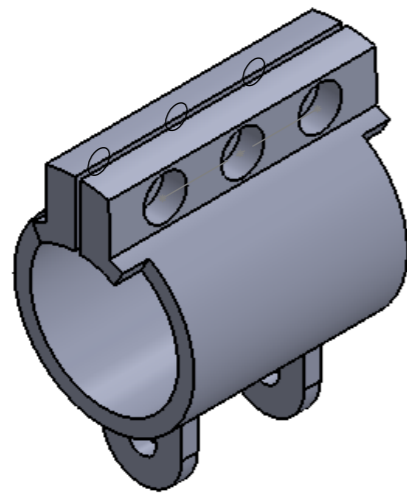
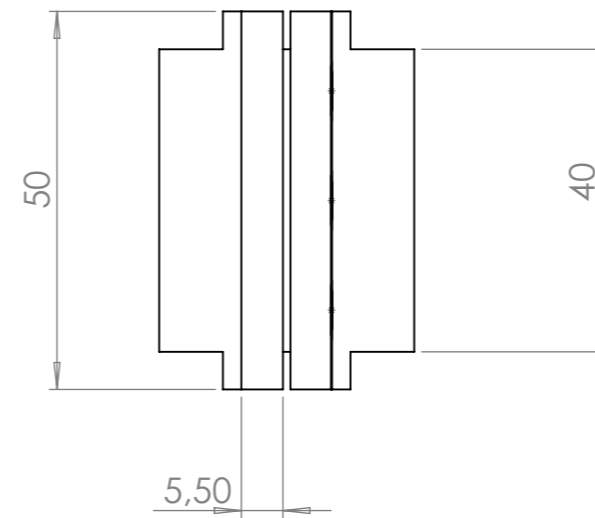


Edición de estudiante de SolidWorks.
Sólo para uso académico.

PROYECTO: DISEÑO DE UNA SUSPENSIÓN DEL TIPO TELEVER		FIRMA:		
PLANO 4: PUENTE HORQUILLA		MATERIAL: ACERO S-355	PESO: 2.98 kg	
AUTOR: Francisco Labiano Mezquíriz		ESCALA: 1:2	FECHA: 24/06/2016	



DETALLE A
ESCALA 2 : 1



**Edición de estudiante de SolidWorks.
Sólo para uso académico.**

PROYECTO: DISEÑO DE UNA SUSPENSIÓN DEL TIPO TELELEVER		FIRMA:		
PLANO 5: ABRAZADERA		MATERIAL: ACERO S-355	PESO: 0.63 kg	
AUTOR: Francisco Labiano Mezquíriz		ESCALA: 1:1	FECHA: 24/06/2016	