



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO INDUSTRIAL

Título del proyecto:

DISEÑO Y CÁLCULO DE CHASIS PARA MOTOCICLETA  
DE DIRT TRACK EQUIPADA CON SISTEMA  
TRACKLEVER EN LA SUSPENSIÓN

MEMORIA

Carlos Espiga Goñi

César Díaz de Cerio

Pamplona, 2 de Noviembre de 2013

## ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN .....	5
2. OBJETIVO .....	6
3. ANTECEDENTES .....	8
3.1. SPEEDWAY .....	8
3.1.1. Conducción.....	11
3.1.2. Principales reglas.....	12
3.2. DIRT TRACK.....	18
3.3. TRACKLEVER .....	21
3.3.1. Evolución lógica.....	21
3.3.2. Historia .....	21
3.3.3. Ventajas .....	26
4. ANÁLISIS TÉCNICO.....	28
4.1. El “SQUAT” .....	28
4.1.1. Transferencia de carga (peso) .....	28
4.1.2. “Squat” y hundimiento (“dive”).....	30
4.1.3. Conclusiones .....	38
4.2. ANÁLISIS TRACKLEVER.....	39
5. DATOS DE PARTIDA .....	41
5.1. MOTOR .....	41
5.2. NEUMÁTICOS .....	47
5.3. LLANTAS .....	50
5.4. FRENOS .....	51
5.5. TRANSMISIÓN .....	52
5.6. SUSPENSIÓN DELANTERA .....	56
5.7. CARROCERÍA.....	59
5.8. MEDICIONES.....	60
5.8.1. Hago Speedway motor JAP.....	60
5.8.2. KR 600 Rotax.....	61
6. GEOMETRÍA GENERAL.....	62

6.1. INTRODUCCIÓN .....	62
6.2. CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS.....	65
6.2.1. Geometría básica de la motocicleta.....	65
6.2.2. Avance.....	66
6.2.3. Lanzamiento (inclinación del ángulo de la dirección) .....	70
6.2.4. Distancia entre ejes.....	79
6.2.5. Peso (masa) y su posición .....	81
6.2.6. Centro de gravedad óptimo .....	88
6.3. ELECCIÓN INICIAL DE LOS PARÁMETROS .....	92
7. ANÁLISIS DE ESFUERZOS .....	94
7.1. ESTADO ESTACIONARIO .....	95
7.2. RESISTENCIA AERODINÁMICA.....	96
7.3. RESISTENCIA CAUSADA POR LA PENDIENTE .....	98
7.4. MOVIMIENTO LINEAL ESTACIONARIO (EQUILIBRIO).....	99
7.5. MOVIMIENTO LINEAL TRANSITORIO .....	101
7.5.1. Aceleración.....	101
7.5.1.1. Limitada por el motor.....	101
7.5.2. Frenada .....	106
7.6. CURVA EN ESTADO ESTACIONARIO.....	109
7.6.1. Inclinación de la moto en giro estático.....	109
7.6.2. Comportamiento direccional de la moto en el giro .....	111
7.6.3. Fuerzas en curva.....	112
7.7. CARGAS DEBIDAS A LAS IRREGULARIDADES DEL SUELO .....	115
7.8. CARGA SOPORTADA POR EL PIÑÓN DE REENVÍO.....	116
7.9. CARGAS FINALES PARA UTILIZAR EN EL ANÁLISIS <i>FEM</i> .....	118
7.8.1. Caso 1. Aceleración máxima.....	119
7.8.2. Caso 2. Frenada máxima .....	119
7.8.3. Caso 3. Paso por curva (conducción estándar).....	120
7.8.4. Caso 4. Paso por curva (conducción Dirt Track) .....	120
8. CHASIS DE LA MOTOCICLETA.....	121
8.1. GENERALIDADES .....	121
8.2. TIPOS Y CARACTERÍSTICAS .....	122

8.2.1. Chasis de ciclomotor .....	123
8.2.2. Chasis de scooter .....	124
8.2.3. Chasis tubular .....	125
8.2.4. Chasis de viga.....	129
8.2.5. Chasis de motor estructural .....	132
8.3. ANÁLISIS DE LAS NECESIDADES .....	133
8.3.1. Primer análisis .....	133
8.3.2. Necesidades funcionales .....	134
8.3.3. Selección del tipo de chasis según necesidades .....	135
9. SUSPENSIÓN TRASERA.....	139
9.1. GENERALIDADES .....	139
9.2. COMPONENTES .....	140
9.2.1. Amortiguación.....	140
9.2.2. Basculante .....	152
9.3. ANÁLISIS DE LA NECESIDADES (AMORTIGUACIÓN) .....	158
9.3.1. Primer análisis .....	158
9.3.2. Necesidades funcionales .....	159
9.3.3. Selección del tipo de amortiguación según necesidades.....	160
9.4. ANÁLISIS DE LAS NECESIDADES (BASCULANTE).....	164
9.4.1. Primer análisis .....	164
9.4.2. Necesidades funcionales .....	165
10. DISEÑO PRELIMINAR .....	170
10.1. INTRODUCCIÓN .....	170
10.2. DISEÑO CONCEPTUAL .....	171
10.2.1. Configuración geométrica .....	171
10.2.2. Parámetros geométricos .....	172
10.2.3. Bocetos .....	174
10.2.4. Selección de la geometría.....	177
10.3. DISEÑO DE ANCLAJES Y UNIONES .....	178
10.3.1. Pipa de dirección .....	178
10.3.2. Anclaje del basculante en el chasis .....	179
10.3.3. Eje del basculante.....	180

10.3.4. Jaula.....	180
10.3.5. Anclajes de los amortiguadores.....	181
10.3.6. Anclaje para el eje de la rueda .....	181
10.3.7. Anclajes auxiliares .....	183
10.4. SELECCIÓN DE DIÁMETROS Y ESPESORES .....	185
11. ANÁLISIS EN ELEMENTOS FINITOS .....	186
11.1. CHASIS .....	186
11.1.1. Primeros ensayos.....	186
11.1.2. Rediseño .....	193
11.1.3. Ensayos finales .....	194
11.2. BASCULANTE .....	199
11.2.1. Primeros ensayos.....	199
11.2.2. Rediseño .....	201
11.2.3. Ensayos finales .....	203
11.3. ELECCIÓN DEL MODELO FINAL .....	206
11.4. ELECCIÓN DEL ACERO .....	207
12. CONCLUSIÓN .....	212
BIBLIOGRAFÍA .....	213
ANEXO I. HISTORIA DEL CHASIS .....	214
ANEXO II. HISTORIA DE LA SUSPENSIÓN TRASERA.....	235

## 1. INTRODUCCIÓN

La evolución de la motocicleta a lo largo de la historia es algo que siempre ha dependido de la utilización que de ella ha demandado la sociedad. Por supuesto, la evolución tecnológica ha sido vital en dicho proceso evolutivo, pero casi siempre ha dependido de las necesidades que este tipo de vehículo tan peculiar ha cubierto en la sociedad.

En España, por ejemplo, después del periodo restrictivo vivido tras los conflictos de mediados de siglo, la motocicleta fue el vehículo de transporte por excelencia, dado que la sociedad demandaba un medio de locomoción, ante todo económico, dejando muy en segundo plano el carácter lúdico que siempre la ha caracterizado. A medida que la situación económica mejora, la demanda de motocicletas evoluciona drásticamente, potenciando el carácter lúdico de sus modelos.

A principios de los 80, cuando comenzó a levantarse el veto a las importaciones de motos japonesas, se vivió en España un auge importante, ayudado también por el éxito internacional de las nuevas generaciones de pilotos. Y es que es cierto que la evolución de la motocicleta ha corrido paralela a la competición, siendo ésta, en muchos casos, el motor de la evolución de las gamas, así como la impulsora de nuevos estilos y tipos de motocicletas.

Asimismo, la evolución de la sociedad en cuanto a la planificación y aumento de los periodos de ocio, influye decisivamente en los gustos y necesidades del usuario.

## 2. OBJETIVO

Hace ya más de quince años, José Luís Belil ideó un innovador sistema, el Tracklever. El sistema reinventa el tren trasero para convertirlo en lo que, según palabras de José Luís, “siempre debería haber sido”.

El basculante convencional no mantiene el ángulo adecuado y a causa del efecto del tiro de cadena, se generan unas componentes de fuerza verticales que afectan a la suspensión y, como consecuencia, a las reacciones de la moto. Con el Tracklever toda la fuerza es transmitida en la dirección correcta.



*Figura 2.1. Motocicleta dotada del sistema Tracklever.*

En la foto se aprecia el pronunciado ángulo del basculante, la ausencia de disco en la llanta trasera y el plato central de transmisión que incluye en su interior el sistema de frenado.

También hay que destacar que el basculante y el plato de tracción están en el mismo eje, formando un grupo coaxial que independiza la tensión de la cadena del recorrido de la suspensión.

Este sistema deja independiente la suspensión de la rueda posterior de los efectos de la cadena de transmisión. Con ello se evitan los latigazos típicos que aparecen cuando se escapa la rueda al abrir el gas.

En 1.997, el profesor de la Universidad Pública de Navarra y tutor de este proyecto, César Díaz de Cerio, ya llevó a cabo el estudio de distintas adaptaciones que es necesario aplicar en una moto básica, incluido el Tracklever, para asemejarla lo más posible a una moto de Dirt Track. En dicho estudio, que a su vez fue presentado como

proyecto fin de carrera, quedó pendiente un cálculo más profundo y elaborado de la estructura del chasis y del basculante.

De modo, que el objetivo principal de este proyecto consiste en el diseño de ambos elementos (dotados del sistema Tracklever), adaptándose de la mejor forma posible a las características de las competiciones Dirt Track.

Más concretamente se pretende diseñar un chasis con una buena relación rigidez/peso capaz de soportar todos los elementos de los que se compone una motocicleta y tener un buen comportamiento dinámico. Además de un basculante que consiga asimilar las nuevas características que supone el nuevo sistema de suspensión/transmisión.

Para ello se estudiarán las distintas alternativas existentes en la actualidad en el mercado, analizando y valorando cada una de ellas, y comparándolas entre sí. Todo ello con el objetivo de dar con la mejor solución que permita alcanzar los fines perseguidos. Esto supone un intenso proceso de información, investigación y recopilación de datos de diversas fuentes, que permitan obtener el conocimiento suficiente para poder realizar la elección de modo acertado.

Tras la elección del tipo y material del que se realizarán tanto el chasis como el basculante, se realizarán diferentes prediseños que serán valorados mediante herramientas de elementos finitos en busca del diseño que mejor se ajuste a las necesidades.

Una vez el prediseño haya terminado se procederá a realizar un estudio más detallado mediante elementos finitos del comportamiento de ambos elementos ante diferentes situaciones de carga.

Por último solo faltará un diseño en detalle para su posterior fabricación.

### 3. ANTECEDENTES

#### 3.1. SPEEDWAY

Aunque con este proyecto se desea diseñar una motocicleta de Dirt Track, son muchas las similitudes que comparte con el Speedway, por esta razón se realiza un breve estudio de esta variante del motociclismo.

El Speedway es una modalidad motociclista sobre circuitos no asfaltados, donde las motos dan vueltas a un circuito ovalado, de entre 260 y 425 metros de longitud (*Longtrack*), siempre opuestos al sentido de las agujas del reloj. La superficie puede ser de distinta naturaleza: tierra, granito, arena, arcilla o hierba (*Grasstrack*).

Su origen es controvertido. Pese a que existen documentos que demuestran que ya en 1.902 se disputaban este tipo de carreras en EE.UU., con las principales marcas como Harley Davidson e Indian, compitiendo entre sí, el Speedway en su forma actual se originó en Nueva Gales del Sur, Australia. En 1.926, a un joven neozelandés, John Hoskins, que buscaba salvar de la bancarrota a una sociedad de agricultores, se le ocurrió la idea de organizar carreras de motos en el hipódromo de sus ferias. Esta idea fue un éxito y pronto se extendió por el resto de Australia. Los circuitos australianos eran mucho más cortos que los americanos (1/4 de milla) y para que el suelo resultara más liso se esparcían cenizas sobre la pista. Esto permitió que en aquellos años, Billy Lamont sobre una AJS de cuadro elevado, lograra recorrer la curva con la moto en derrapaje controlado, inventando de este modo el estilo de conducción del Speedway.



Figura 3.1. Estilo de conducción Speedway.

Debido a los lazos existentes entre Australia y Gran Bretaña, el deporte pronto llegó a las islas con la primera competición en High Beech en 1.928. Dado que Inglaterra tenía ciudades mayores y más concentradas que Australia, un mayor número de

competiciones con mejores premios pudieron ser organizadas e inevitablemente se convirtió en el destino de los mejores pilotos del mundo. Pronto se preparó una pista especial, el Cristal Palace de Londres, con espectaculares curvas de ceniza y capacidad para más de 30.000 espectadores. Además la creación en 1.929 de una liga de equipos fue el espaldarazo definitivo para el Speedway y para su extensión a otras naciones europeas como Suecia, Noruega, Finlandia, Dinamarca, Polonia, URSS y Checoslovaquia.

La FIM reconoció oficialmente el Campeonato del Mundo Individual en 1949, homologando los campeonatos disputados desde 1.936. De 1.936 a 1.960 las finales se disputaron siempre en el estadio de Wembley. Luego se disputaron en Suecia, Polonia y otras naciones Europeas.

Las motos utilizadas en Speedway no se parecen a ninguna máquina que se pueda ver por las carreteras abiertas. Deben pesar un mínimo de 77 kilogramos, tienen un solo engranaje y se caracterizan por su aceleración fulgurante, pero no tienen freno, suspensión trasera o marchas. El embrague se utiliza como un mecanismo de liberación en el inicio de las pruebas. Mediante el uso de un motor diferente y de diferentes piñones de la rueda trasera, la relación de transmisión se puede ajustar para diferentes tamaños de pista y condiciones.

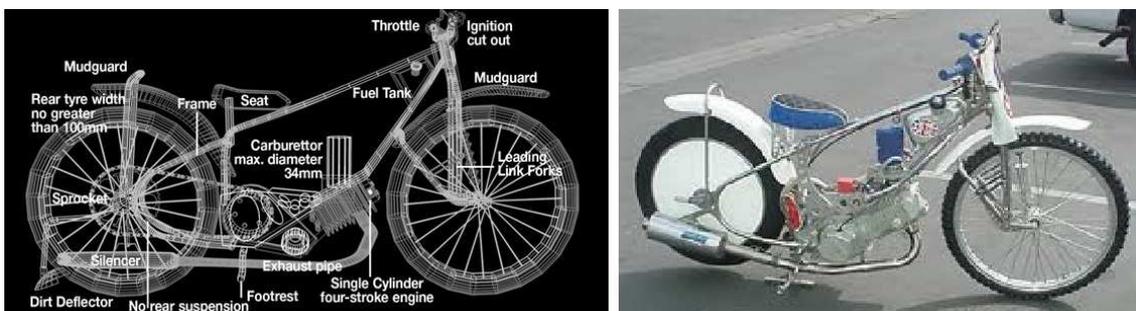


Figura 3.2. Motocicletas características de Speedway.

Los motores son de 4 tiempos monocilíndricos de 4 válvulas con refrigeración por aire. Se utiliza metanol en lugar de gasolina para permitir que los motores funcionen con relaciones de compresión muy elevadas y todas las motos deben tener un dispositivo de desconexión de seguridad instalado de forma que corta el circuito de suministro eléctrico tirando de una cuerda de seguridad atada a la muñeca derecha del piloto.

Las motos corren en sentido contrario a las agujas del reloj alrededor de un circuito oval de superficie resbaladiza. Esto obliga a los corredores a deslizar sus máquinas de costado en las curvas barriendo con la rueda trasera la pista, pero conservando el control para llevar la moto adelante y alrededor de la curva. Aunque los circuitos generalmente miden entre 250 y 400 metros, son bastante estrechos. Existe también una barrera de seguridad entre el borde exterior de la pista y el público.

La mayoría de las carreras se componen de 4 corredores que deben dar 4 vueltas a la pista con salida parada. Se consiguen 3 puntos por el primer puesto, 2 por el segundo y 1 por el tercero. Un corredor no consigue puntuar cuando termina cuarto, cuando se cae o cuando es excluido de la carrera. En algunos países las carreras constan de 6 corredores, pero esto es poco habitual en Europa, donde los circuitos son más estrechos.



Figura 3.3. Carrera de Speedway.

Hasta aquí, las similitudes con el Dirt-Track son muchas, pero las motos de Speedway, al no llevar suspensión, pueden tomar las curvas mucho más rápido porque no sufren reacciones extrañas cuando van derrapando. Comparando dos carreras de ambas especialidades, se puede ver que en el Speedway, las motos se colocan prácticamente en la dirección de la fuerza centrífuga, para contrarrestarla con la potencia que da el motor, y el manillar forma un ángulo de casi 90° con el chasis. Cruzar tanto la moto en Dirt-Track implica una caída segura.



Figura 3.4. Diferencia de conducción entre Speedway (izqda.) y Dirt Track (dcha.).

Una competición de Speedway se compone habitualmente de 20 carreras y existen varios tipos de carreras, individuales y por equipos. Muchos de los principales países con tradición en Speedway tienen ligas en las que se compite por equipos, y las más fuertes son la inglesa, la sueca y la polaca. Y no es inusual que los pilotos punteros

compitan en dos o más ligas, al mismo tiempo que representan a sus países en Campeonatos del Mundo.

### 3.1.1. Conducción

La posición del eje de la rueda trasera es muy importante, sobre todo en conductores poco experimentados. Las reglas generales son:

- Cuanto más se adelante el eje, habrá menos control y más tracción.
- Cuanto más se atrase el eje, habrá más control y menos tracción.
- Si la rueda delantera derrapa en las curvas, significa que la batalla es muy corta.
- Si la rueda trasera derrapa al salir de la curva, posiblemente sea debido a que el chasis es muy largo (entre otras causas). Un corredor experimentado puede controlar derrapajes de la rueda delantera acelerando antes. Pero si hay un bache, cansancio o falta de confianza, esto puede dar lugar a pérdida de posiciones o un accidente. Por esto la posición de la rueda trasera es muy importante.

Es un error creer que los pilotos van de pie en el Speedway. Muchos principiantes cometen el error de intentar apoyarse en la estribera derecha con el trasero sin tocar el sillín y su pie izquierdo fuera, con lo cual sus piernas están separadas. Esto no solo hace que se cargue mucho peso en la estribera derecha, sino que hace que la moto se mueva libremente de lado a lado entre las piernas. Así además se consigue que los brazos se cansen mucho antes.

La mejor posición es con el pie delantero apoyado en la estribera, pero con el muslo derecho contra el sillín y mediante el aumento o reducción de la presión sobre el pie izquierdo, la pierna derecha se convierte en una palanca para controlar la inclinación de la moto en las curvas.



Figura 3.5. Posturas características en la conducción de motocicletas de Speedway.

De esta manera, variando el peso sobre ambos pies, más los movimientos del tronco, más el control del acelerador, el piloto puede vencer la fuerza de gravedad en las curvas, variando la tracción y la dirección.

En los neumáticos utilizados en las motos de Speedway se emplean presiones muy bajas, del orden de 0,5 bares en la delantera y 1 bar en la trasera. Asimismo son de gran diámetro para poder pasar más cómodamente las pequeñas ondulaciones que se puedan dar en la pista.

### **3.1.2. Principales reglas**

#### **3.1.2.1. Disposición del circuito**

El circuito debe estar formado por dos rectas unidas por sendas curvas aproximadamente semicirculares, el borde interior debe estar marcado por una línea continua que contraste con la superficie del circuito. Es obligatorio que exista una valla de seguridad en el borde exterior del circuito, hecha de madera o tela metálica.

En la mitad de una de las rectas, se marca una línea de salida blanca, dividida en cuatro partes iguales (o seis, si este es el número de corredores en cada manga), con líneas blancas perpendiculares a la salida, distanciadas al menos un metro entre sí. Justamente sobre la línea de salida se encuentra una valla de salida, hecha con dos o tres bandas de tela que cruzan el circuito, accionada mediante un resorte que el juez de salida acciona por control remoto.

#### **3.1.2.2. Posiciones de salida**

Los corredores deben tomar posiciones en la línea de salida según hayan sido determinadas por el programa de carreras. Cuando no exista orden de salida, se echará a suertes con una moneda para decidirlo. Una vez se han decidido los puestos de salida, no podrán ser cambiados.

#### **3.1.2.3. Calentamiento de 2 minutos**

Los corredores tienen dos minutos antes de cada manga, indicados a partir de un toque de sirena y un semáforo, para preparar la salida. Cualquier corredor que no esté preparado, o dirigiéndose con el motor en marcha hacia la salida antes de que finalicen estos dos minutos, será eliminado de la carrera.

El período entre la finalización de una manga y el comienzo de la siguiente, no debe exceder de 5 minutos, a menos que en opinión de los jueces exista una razón válida para un retraso. En estos 5 minutos están incluidos los 2 minutos de calentamiento.

#### **3.1.2.4. Salida**

Se utiliza la salida parada (con el motor en marcha) en todas las mangas.

A instancia del juez, los pilotos participantes se alinearán detrás de la valla de salida en las posiciones que les correspondan y se detendrán, encendiéndose entonces el semáforo verde para indicar que la salida es inminente y que el juez de salida va a levantar la valla. Después de no menos de dos segundos, la valla es levantada. Si la valla no puede ser accionada por fallo mecánico, el juez podrá dar la salida apagando el semáforo verde.

Un corredor es eliminado de la carrera si toca la valla de salida una vez que se ha encendido la luz verde.

Un corredor podrá, a condición de que la luz verde no se haya encendido, solicitar un retraso dentro de los dos minutos de calentamiento levantando el brazo.

Una vez que la valla de salida se ha levantado, un corredor puede ser empujado por ayudantes designados en los primeros metros para poner en marcha el motor. Esta distancia está marcada y un corredor será excluido si su motor no funciona cuando los tacos de su rueda delantera sobrepasan esa marca.

#### **3.1.2.5. Dirección de la carrera**

La carrera se disputa en sentido contrario a las agujas del reloj.

#### **3.1.2.6. Inicio y final de la carrera**

El inicio y final de una carrera ocurre cuando cualquier parte de la rueda delantera de la moto pasa sobre la línea de salida o llegada mientras el piloto está en contacto con la moto.

#### **3.1.2.7. Finalización de la carrera**

Una manga dura 4 vueltas a menos que se diga lo contrario.

Cuando el piloto cruce la línea de llegada después de completar el número designado de vueltas, el juez de llegada lo indicará agitando la bandera de cuadros blancos y negros. En el supuesto de que la carrera sea detenida agitando la bandera de cuadros antes de que el líder haya completado las vueltas estipuladas, la carrera será repetida. Si la bandera de cuadros no se enseña después de completar todas las vueltas, los resultados se mantendrán no obstante.

Las carreras que duran 4 vueltas o menos se consideran terminadas en 3 minutos después de que se haya dado la salida. En ese instante, cualquier corredor que no haya

completado las 4 vueltas será eliminado. Una carrera no se repetirá una vez se considere que ha finalizado.

### **3.1.2.8. Resultados**

El resultado de una carrera no podrá ser cambiado mediante protesta, una vez que sea comunicado por el juez. Éste, no obstante, antes de abandonar el circuito, podrá efectuar cuantas correcciones considere necesarias. Si un corredor es excluido de una carrera, el resto de pilotos avanzarán una posición en esa carrera.

La autoridad bajo cuyas normas se dispute la competición podrá cambiar el resultado de una carrera si considera que se han vulnerado las normas o que el árbitro las ha interpretado incorrectamente.

### **3.1.2.9. Asistencias**

Un piloto no recibirá ninguna asistencia durante una carrera aparte de la permitida en los 30 primeros metros, de lo contrario será excluido de la carrera. Cualquier contacto con la moto o con el piloto se considerará asistencia externa.

### **3.1.2.10. Conducción peligrosa o antideportiva**

Un piloto que conduzca de forma peligrosa o antideportiva será excluido de la carrera. Cuando, en opinión del juez esa conducta suponga un riesgo para el resto de corredores, la carrera se suspenderá y repetirá. No se podrá impugnar la decisión del juez referida a conducción antideportiva.

### **3.1.2.11. Respeto de los límites internos del circuito**

Un piloto será excluido de la carrera si ambas ruedas de su moto cruzan el borde interno del circuito, a menos que dicha acción sea en pro de la seguridad de otros pilotos o por culpa de otro piloto.

### **3.1.2.12. Corredores doblados**

Cualquier corredor doblado será excluido de la carrera.

### **3.1.2.13. Falta de competitividad**

Una vez que se levanta la valla de salida, los corredores deben competir lo mejor que puedan. Aquellos que no lo hagan serán eliminados y pueden incurrir en sanciones posteriores.

### **3.1.2.14. Indicación de las exclusiones**

El árbitro indica a un corredor que ha sido excluido accionando la luz de exclusión correspondiente al color de su casco. Los oficiales de salida, en presencia de estas luces, agitarán la bandera negra y un disco del color adecuado. El piloto eliminado debe abandonar la pista inmediatamente o incurrirá en sanciones posteriores.

### **3.1.2.15. Repetición de las carreras**

El árbitro podrá detener la carrera después de una salida nula o cuando en su opinión, pueda ser peligroso continuarla. El árbitro indica que la carrera se ha suspendido, encendiendo unas luces rojas dispuestas a lo largo del circuito. También se podrán emplear banderas rojas además de las luces.

Los pilotos que participen en una carrera repetida, ocuparán sus lugares iniciales. Los pilotos sustitutos ocuparán los lugares de los sustituidos.

Cuando un corredor se ha considerado por el juez el causante de la repetición de la carrera, puede ser excluido de ésta, no pudiendo ser sustituido.

Un corredor puede no participar en la repetición si no ha salido, si se ha retirado o si ha sido eliminado en la manga repetida. El árbitro puede permitir que un corredor que se haya caído en aras de la seguridad o por acciones antideportivas de otros, tome parte en la repetición.

Todo corredor elegido para tomar parte en una repetición pero incapaz de hacerlo será sustituido por otro corredor.

Todo corredor elegido para tomar parte en una repetición podrá cambiar su moto.

Si una carrera se suspende después de que el líder haya comenzado la última vuelta, no será repetida. Si un corredor no puede terminar la carrera como consecuencia de algún comportamiento antideportivo, o peligroso de otro corredor, o por seguridad, se considerará que ha terminado la carrera en la posición que ocupaba justo antes del suceso.

### **3.1.2.16. Duelos**

Los duelos se refieren a las carreras entre dos corredores.

Las posiciones de salida son A y C, o B y D (llamando A, B, C y D a las 4 calles de la pista de dentro a fuera).

Si un corredor fuera eliminado o se cayese, el otro deberá continuar hasta el final. El árbitro, de todas formas, podrá adjudicar la carrera a un corredor que no pueda terminarla como consecuencia de la acción del otro piloto.

Si un piloto es excluido de una carrera por infracción en la salida o por exceder el tiempo de dos minutos de calentamiento, la carrera se concede a su oponente.

### **3.1.2.17. Uso de reservas**

A menos que se diga otra cosa, un piloto reserva tiene en una carrera una de las siguientes funciones:

- Sustituir a un piloto ausente.
- Sustituir a un corredor eliminado por infracción de salida o de calentamiento.
- Sustituir a un corredor incapaz de correr por lesión o avería.
- Sustituir a un piloto elegido para una repetición pero incapaz de hacerlo.
- Sustituir a un piloto por razones tácticas, en competiciones por equipos.

### **3.1.2.18. Cascos y protecciones**

En todas las carreras y entrenamientos oficiales, los pilotos deberán llevar un casco homologado y convenientemente atado. Cuando estos lleven viseras, deben ser desmontables y hechas de goma o material blando. El árbitro podrá multar a aquel corredor que no use un casco apropiado, y confiscar aquellos cascos que no considere efectivos.

Los pilotos deberán llevar monos protectores de cuero o material análogo, con protecciones en hombros, caderas o rodillas. Además deberán llevar guantes y botas hasta la rodilla. Pañuelos y bufandas no deben ser susceptibles de ocasionar peligro en caso de accidente.

En caso de llevar gafas, éstas no deben ser susceptibles de astillarse.

### **3.1.2.19. Colores identificativos de los cascos**

Los colores empleados son rojo, azul, blanco y a cuadros amarillos y negros.

El árbitro podrá multar a aquel corredor que emplee otros colores o cuya identificación se suelte durante la carrera.

### **3.1.2.20. Chaquetas de carrera**

Los pilotos suelen llevar chaquetas con su identificación o la de su equipo.

### **3.1.2.21. Suspensión**

El árbitro podrá suspender la competición si las condiciones meteorológicas así lo hicieran aconsejable.

### 3.2. DIRT TRACK

El Dirt Track, o Flat Track como también se conoce, es una de las formulas más antiguas y con mayor tradición en Estados Unidos. La traducción literal de Dirt Track es “pista sucia”. A comienzos del siglo XX se organizaban carreras que se corrían sobre óvalos peraltados contruidos de madera. Originalmente, las motos solo se utilizaban para tirar de las bicicletas con las que se corría unas curiosas y alocadas carreras con peraltes de hasta 45°.

Pero cuando las bicicletas fueron sustituidas por motos hubo una rápida evolución mecánica y las velocidades aumentaron mucho. Con ello también aumentó el peligro ya que las maderas se astillaban causando graves lesiones en caídas y en muchos casos la muerte de los valientes (y muy poco equipados) pilotos de la época.

Actualmente esta especialidad motociclista se desarrolla en pistas ovales de superficie endurecida y muy lisa en forma de dos semicírculos unidos por dos rectas. Según la longitud se divide en Mile (1.600 m) y Half Mile (800 m) para motos de hasta 750 cm<sup>3</sup>, y Short Track (400 m). En todos los casos se corre en sentido contrario a las agujas del reloj.



Figura 3.6. Momentos de una carrera de Dirt Track.

El Short Track es la variante para la que se diseña la motocicleta de este proyecto. Es el equivalente estadounidense al Speedway europeo. En esta modalidad las motos son más parecidas a las clásicas que las de Speedway (muy particulares y especializadas). La cilindrada máxima fue en principio 250 cm<sup>3</sup>, luego 350 y 500, hasta los 600 cm<sup>3</sup> actuales. En todas las pruebas se autoriza el freno trasero desde 1.969, ya que hasta entonces estaban prohibidos todo tipo de frenos (como en Speedway).



*Figura 3.7. Moto característica de Dirt Track.*

La importancia del Dirt Track radica en que es un excelente entrenamiento para los pilotos de velocidad, ya que, más que las diferencias mecánicas, cuenta la habilidad del piloto que le permita pasar por las curvas más deprisa que sus contrincantes. En los óvalos de milla se llegan a pasar las curvas derrapando a casi 200 km/h. Para un piloto que domine esta habilidad se hace mucho más fácil controlar derrapes que a otro que no haya practicado antes Dirt Track. La proporción es de aproximadamente la mitad del recorrido deslizando en curva.

Por este motivo los pilotos estadounidenses dominaron durante muchos años el Campeonato del Mundo de Velocidad de 500 cm<sup>3</sup>, donde se producían fácilmente los derrapes debido a la elevada potencia de las motos.

Ya hace bastante tiempo se empezó a practicar en Europa, ya que los pilotos punteros de velocidad europeos lo utilizaban como entrenamiento.

Conseguir la máxima tracción posible es el factor clave para ganar en Dirt Track. Cuanto mejor traccione la moto, menos desliza y mejor se aprovecha la potencia del motor y más deprisa se puede tomar la curva y acelerar a la salida de la misma. Por este motivo se utilizan preferiblemente motores de cuatro tiempos por su mayor suavidad a la hora de transmitir el par motor al suelo, la rueda no desliza de golpe y se puede controlar mejor el deslizamiento de la moto.

Aquí el recubrimiento de la pista es lo que define la puesta a punto de la moto para cada pista. Los circuitos de milla y media milla tienen una base dura, normalmente asfalto, recubierta por una capa de yeso triturado, arena, sal marina, suciedades diversas y agua. Todos estos elementos se mezclan en unas propiedades que varían de un circuito a otro. El paso de las motos y la humedad y temperatura atmosféricas también influyen

notablemente en el estado del suelo. De esta forma, de una carrera a otra y de un año a otro, la pista cambia sin cesar.

### 3.3. TRACKLEVER

#### 3.3.1. Evolución lógica

Hace ya más de diez años José Luís Belil ideó este innovador sistema. El sistema reinventa el tren trasero para convertirlo en lo que, según palabras de José Luís, “siempre debería haber sido”. El basculante convencional no mantiene el ángulo adecuado y a causa del efecto del tiro de cadena, se generan unas componentes de fuerza verticales que afectan a la suspensión y como consecuencia a las reacciones de la moto. Con el Tracklever toda la fuerza es transmitida en la dirección correcta.

También hay que destacar que el basculante y plato de tracción están en el mismo eje, formando un grupo coaxial que independiza la tensión de la cadena del recorrido de la suspensión.

Este sistema deja independiente la suspensión de la rueda posterior de los efectos de la cadena de transmisión. Con ello se evitan todos los latigazos típicos que aparecen cuando se escapa la rueda al abrir el gas.

Por la configuración del chasis y del basculante, la moto se hace más corta de batalla cuando se frena, y eso ayuda mucho a entrar en las curvas. Al no estar sometida la rueda a los efectos parásitos del tiro de la cadena, también se ahorra en neumáticos, que se gastan menos y mejor.

#### 3.3.2. Historia

##### *Montesa Crono 350*

El sistema que emplea este modelo, considerado el primer paso evolutivo hacia el Tracklever, se basa en la existencia de dos cadenas, un piñón intermedio y una colocación exacta de todos estos elementos.

Del piñón de potencia del motor sale una cadena hacia otro piñón, ambos con el mismo número de dientes. Desde este segundo piñón sale otra cadena hasta el plato de transmisión de la rueda. La relación secundaria de transmisión se realiza entre estos dos elementos.

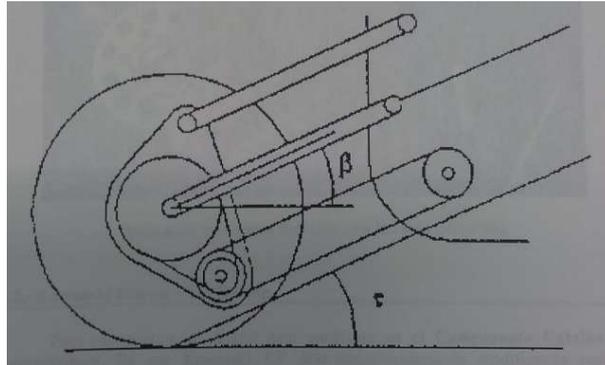


Figura 3.8. Sistema de transmisión de la Montesa Crono 350.

El anclaje del basculante se sitúa en unas pletinas soldadas al chasis de manera que siga una dirección paralela al ángulo “anti-squat” (término que se estudiará en apartados siguientes). Paralelo al basculante se sitúa el tirante de reacción que enlaza con la pieza mecanizada que une el piñón intermedio al eje de la rueda.

Para que este sistema sea efectivo han de mantenerse las distancias relativas entre los elementos independientemente de los movimientos de la suspensión, así como el tirante de reacción paralelo al basculante. Esto se logra haciendo que los triángulos que forman el anclaje del basculante, el piñón de potencia y el anclaje del tirante de reacción al chasis por un lado, y el que forman el eje de la rueda, el del piñón intermedio y el anclaje trasero del tirante de reacción por el otro, sean homólogos y congruentes, es decir, sus ángulo tienen que ser iguales y además su posición espacial la misma.

El sistema funcionaba bien en la práctica, aunque tenía mucha complejidad mecánica y aumentaba bastante el peso, y, más importante, el peso no suspendido (cuanto menor sea éste, mejor se comporta la suspensión), al añadir muchos componentes a la suspensión trasera. Además de esto, las dos cadenas suponen una pérdida de potencia, sobre todo la del piñón intermedio a la rueda puede calentarse excesivamente debido a su corta longitud.



Figura 3.9. Montesa Crono 350.

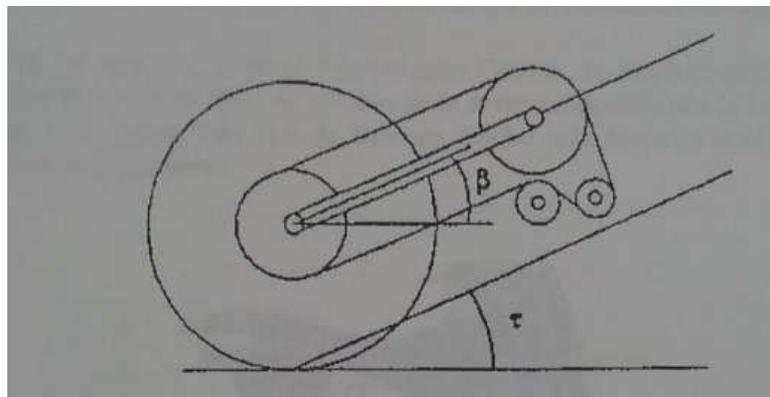
### ***Kawasaki Bilever – Tot Racing***

José Luís Belil es un arquitecto barcelonés hijo, nieto y hermano de ingenieros, que ha encontrado en su proyecto la manera de dedicar su pasión por la tecnología a su vocación inicial por las motos.

En 1.987, su diseño Bilever ganó un primer Campeonato de Catalunya (equivalente en nivel a un auténtico Campeonato de España) de supermotard al incorporarlo a una Kawasaki 500 2T.

Aquel primer proyecto estaba dotado de un peculiar sistema de transmisión que, con una única y larga cadena, “rodeaba” a un par de segundos piñones, uno de ellos situado concéntricamente con el eje de basculante. Éste se montaba ya en una posición mucho más elevada, de modo que “atacaba” ya la horizontal con un pronunciado ángulo, entre 25 y 30°.

De esta forma se elimina la necesidad de dos cadenas y de las diversas uniones y articulaciones de piezas de la realización anterior. Además de mantener el peso no suspendido al no añadir elementos en la rueda posterior.



*Figura 3.10. Configuración del sistema Bilever para la Kawasaki Bilever – Tot Racing.*

Sobre esta disposición hubo que realizar modificaciones lógicas en todo el prototipo, pero la más importante fue la de disminuir el diámetro del plato concéntrico con el eje del basculante. Esto fue debido a que, al acelerar en las curvas de manera que se perdiera el agarre, la suspensión no era totalmente neutra: se apreciaban pequeños rebotes de frecuencia alta (casi temblores), que mermaban la capacidad de transmitir toda la potencia al suelo.

Estos rebotes eran debidos a la disminución del centro de gravedad de la moto por el mayor hundimiento de la suspensión debido a la fuerza centrífuga. Esto hacía que el ángulo  $\tau$  disminuyera, pero menos que lo que disminuía el ángulo del basculante sobre

la horizontal (el basculante giraba más por ser más corto y tener que desplazar su extremo la misma distancia aproximadamente que el centro de gravedad).

Por esto, la fuerza de reacción creaba un momento sobre el basculante que comprimía la suspensión. Para compensar este momento se disminuyó en sucesivas pruebas el número de dientes del plato de hasta 10 dientes menos que el de la rueda.

Con este nuevo plato, la fuerza de la cadena creaba otro momento sobre el eje del basculante opuesto al de la fuerza de reacción, con lo que se anulaban y se evitaban los rebotes mencionados, aunque se perdía la posición de neutralidad en la aceleración en línea recta o en curvas de radio grande en las que la inclinación era menor.



Figura 3.11. Imagen de la Kawasaki 500 con sistema Bilever, y de la aplicación de este mismo sistema a una moto de carretera.

### **Tracklever**

A aquellos éxitos, les siguió un proyecto de final de carrera en la ETSEIB de Barcelona dirigido por Antonio Cobas. El proyecto de Belil ganó “el Primer Premio del Jurado” de la Universidad de Ingeniería de Barcelona. Se construyó una maqueta de madera.

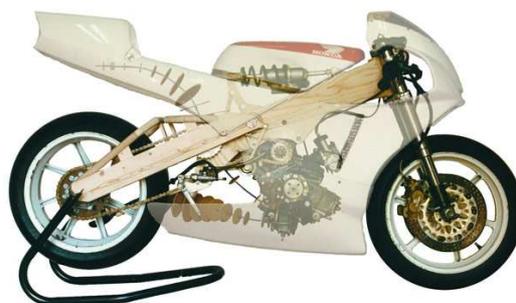


Figura 3.12. Prototipo de madera.

Este sistema deja independiente la suspensión de la rueda posterior de los efectos de la cadena de transmisión. Con ello se evitan todos los flaneos y latigazos típicos que aparecen cuando se escapa la rueda al abrir el gas.

El Tracklever consiste en la evolución final a la que se ha llegado unificando estos conceptos y experiencias, llegando al extremo de poder adaptar chasis ya existentes, sin necesidad de partir de cero. Para ello se disponen dos platos dentados concéntricos con el basculante, y un tercero en la rueda trasera, todos ellos con el mismo número de dientes. Uno de ellos recibe la potencia desde el piñón de salida del motor, mientras otro, que gira solidario al primero, traslada esta potencia a la rueda trasera gracias a una segunda cadena, de forma que se eliminan los momentos que se crean con el movimiento de ésta.

Aun así, si se realiza un chasis dotado de Tracklever, la mejor solución es dotar al mecanismo de piñón de reenvío (tal y como se hizo en la Kawasaki Bilever), sin recurrir a coronas concéntricas, con el fin de buscar mayor estabilidad.

Otro caso de aplicación de este sistema es la Gas-Gas 300 2T de Supermotard, que batió los récords vigentes en las pistas del Campeonato de España.

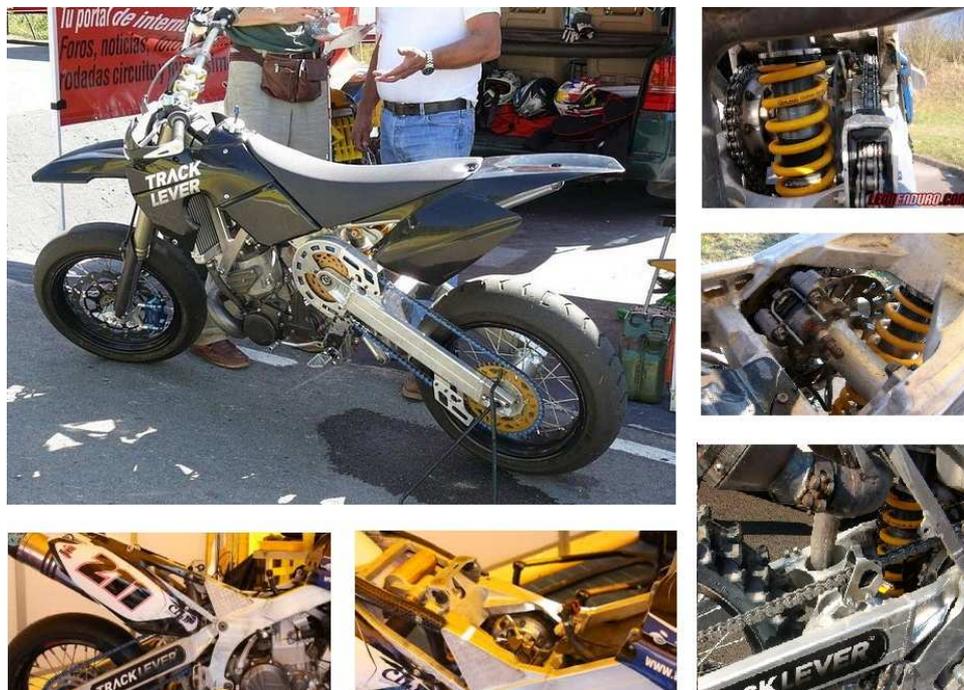


Figura 3.13. Gas Gas 300 2T con sistema Tracklever.

Y para finalizar, cabe destacar la Yamaha YZF 450 Tracklever, que es el proyecto definitivo que reúne todas estas experiencias.

En este caso también se montan dos frenos de pequeño diámetro atrás, en el mismo eje de transmisión secundario. Por dos motivos, primero, que un único disco podría, en condiciones de mucho calor, llegar a sufrir recalentamiento. Y segundo, que en el espacio disponible no cabe un disco de diámetro mayor.

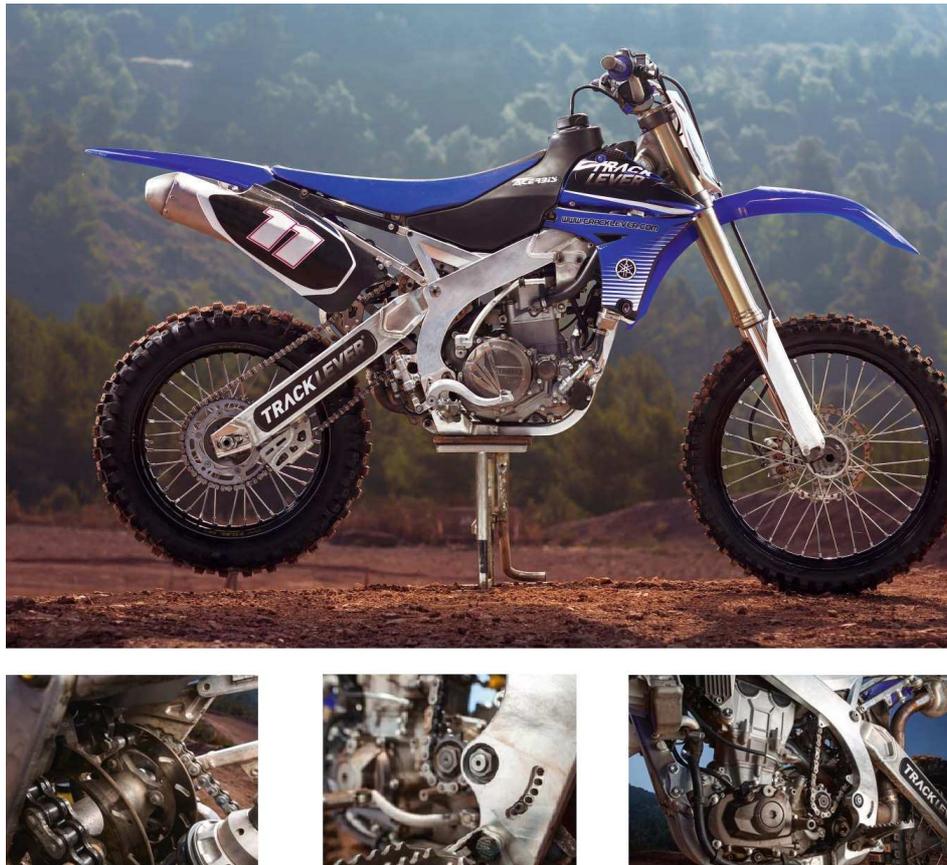


Figura 3.14. Yamaha YZF 450 con sistema Tracklever.

Debido a que el Tracklever es el sistema utilizado en el diseño de este proyecto, se realiza un análisis más detallado en los siguientes apartados.

### 3.3.3. Ventajas

La gran ventaja del sistema de transmisión Tracklever es su capacidad de traccionar, sobre todo en derrapada larga, porque evita completamente el latigazo final y el habitual “high-side”.

De alguna manera, el Tracklever busca y consigue el mismo efecto que una telescópica (acortar la moto en la entrada de las curvas al frenar y abrirse y alargarse para tener mejor estabilidad a mayor velocidad) pero en el tren posterior.

Además, la Tracklever gasta y consume mucho menos tanto la goma trasera como el “mousse”. Se ha comprobado y constatado que a igualdad de uso, ambos duran el doble que en una moto de serie.

Así, la Tracklever conserva perfectamente la trayectoria en las “subidas imposibles” o “hill-climbs”, sobre todo en condiciones muy difíciles de adherencia por terreno suelto o barro, o sobre piedras y escalones.

Otra de las ventajas del Tracklever es que tras pasar sobre baches grandes, la moto no salta tanto hacia arriba, sino que lo hace siempre más plana: la suspensión no se extiende tanto. Al saltar menos, no choca tanto contra las crestas sucesivas (eso se comprueba claramente al subir escalones) y la moto se estabiliza por sí sola más fácilmente, se cruza menos, y no hace falta cortar gas.

En frenada, el basculante inclinado en la dirección “anti-squat” (se dedica el siguiente apartado a este término) del Tracklever y el efecto del tiro del ramal inferior de la cadena hacen que la moto se clave al suelo, “saltando” menos que la de serie.

## 4. ANÁLISIS TÉCNICO

Aunque el objetivo de este apartado es el análisis del Tracklever, se cree conveniente realizar un estudio de las bases en las que se fundamenta este sistema. De modo que las siguientes páginas se dedican a profundizar en temas como la transferencia de carga y el “squat”.

### 4.1. El “SQUAT”

#### 4.1.1. Transferencia de carga (peso)

Normalmente se dice transferencia de peso, pero realmente es una expresión incorrecta. El peso es la atracción gravitatoria de todas las partículas de la moto hacia el centro de la tierra, y por conveniencia normalmente se considera que la suma de esas fuerzas actúa desde el centro de gravedad. Ni la aceleración ni la frenada pueden provocar que este peso se transfiera a ninguna parte. Por este motivo es preferible usar el término "transferencia de carga".

Todos estamos familiarizados con la transferencia de carga. Cada vez que se aprieta la maneta de freno o se gira el acelerador se puede sentir cómo la carga de un neumático se reduce mientras la del otro aumenta. La cantidad varía de una moto a otra, pero hay una cosa que se cumple en todas y que a menudo se olvida, la carga vertical total que soportan ambos neumáticos es siempre la misma en condiciones estables. En otras palabras, si al frenar se transfieren 50 Kgf a la rueda delantera entonces a la vez la trasera se está descargando 50 Kgf, la suma de la carga en ambos neumáticos debe ser igual al peso total de la moto. Por ejemplo, si al acelerar la rueda delantera se levanta, entonces el neumático trasero estará soportando todo el peso de la moto. Excepto para las condiciones transitorias momentáneas, la carga vertical total que soportan los neumáticos será siempre igual al peso total de la moto y el piloto (más las fuerzas aerodinámicas).

Las motocicletas experimentan estos efectos a un nivel mucho mayor que otros tipos de vehículo debido a que su centro de gravedad está situado relativamente alto en comparación con su corta distancia entre ejes. En promedio esta relación es del 50%, lo cual es considerablemente mayor, que en un automóvil normal. Un fórmula 1 tendría una relación mucho menor todavía. Las motocicletas de competición y las de carretera tienen valores parecidos debido a que son de proporciones similares, mientras que las de motocross son más altas y por lo tanto tienen una relación mayor, esto explica su mayor tendencia a levantar la rueda delantera.

Tal y como se verá más adelante, la geometría de detalle de la suspensión puede afectar a la distribución de fuerzas dentro de la moto, extendiendo o comprimiendo la

suspensión, pero estas reacciones internas no afectarán a las cargas externas. La transferencia de carga en una moto tiene cuatro fuentes principales:

- Inercial: proviene de las fuerzas necesarias para acelerar y frenar la moto.
- Aerodinámica: la fuerza de resistencia aerodinámica tiende a levantar la parte delantera de la moto y a cargar la trasera.
- Posicional: cuando se desciende por una colina el tren delantero soporta más peso y viceversa.
- El momento de reacción: aparece al acelerar el cigüeñal, el embrague, etc. Esto sólo tiene aplicación en motocicletas con motor transversal. Un cigüeñal girando hacia delante transfiere cierta carga a la parte trasera y un cigüeñal girando hacia atrás reduce la carga en el tren trasero. Esto no tiene aplicación cuando el motor gira a una velocidad constante.

### Cálculo de la transferencia de carga

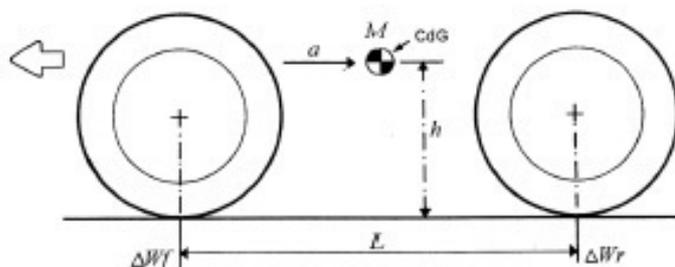


Figura 4.1. Cálculo de la transferencia de carga.

Donde:

$L$  = distancia entre ejes

$h$  = altura del CdG

$M$  = masa de la moto

$a$  = aceleración

$\Delta W_f$  = transferencia de carga delante

$\Delta W_r$  = transferencia de carga detrás

$g$  = constante gravitatoria

Entonces:

$$\text{Fuerza horizontal en el CdG} = M \cdot a/g$$

$$\text{Momento debido a esa fuerza} = M \cdot a \cdot h/g$$

Este momento debe ser contrarrestado por otro igual debido a la transferencia de carga que actúa sobre la distancia entre ejes  $L$ .

Por consiguiente:

$$\Delta W_r \cdot L = -\Delta W_f \cdot L = M \cdot a \cdot h/g$$

Así que la transferencia de carga es:

$$\Delta W_r = -\Delta W_f = M \cdot a \cdot h/g \cdot L$$

Se puede ver que la transferencia de carga es proporcional a la masa de la moto, la altura del CdG y la aceleración, y es inversamente proporcional a la distancia entre ejes.

Considerando los efectos que la aceleración produce en la transferencia de carga total, se observa que los únicos parámetros que importan son la distancia entre ejes, la altura del centro de gravedad, la aceleración existente y la masa de la moto y el piloto. La posición longitudinal del centro de gravedad no afecta a la transferencia de carga pero sí que afecta a la carga existente en cada rueda. Por ejemplo, cuando el centro de gravedad está retrasado, inicialmente ya existe menos carga en el tren delantero por lo que hará falta menos transferencia de carga para que la rueda delantera se levante.

#### 4.1.2. “Squat” y hundimiento (“dive”)

Estos son términos que se refieren a cambios de cabeceo y altura de la parte suspendida de la moto. El hundimiento es un cabeceo hacia adelante que ocurre normalmente al frenar, mientras que el “squat” se refiere a una rotación hacia atrás normalmente debida a la aceleración y a las fuerzas aerodinámicas. Si no existe algún mecanismo para evitarlo, es obvio que la transferencia de carga bajo aceleración causará algo de “squat”, o sea que el parte delantera se levantará y la de atrás se hundirá. En la práctica la cantidad de compresión de la suspensión se ve total o parcialmente compensada por

ciertas reacciones del basculante y otros aspectos de tipo geométrico. Dependiendo del diseño, las fuerzas de aceleración o frenada y sus reacciones internas pueden causar que la suspensión se extienda o se comprima.

Esto ocurre con motocicletas con transmisión secundaria por cadena o por cardan, pero primero se analizará la transmisión por cardan, ya que es algo muy fácil de entender.

### *Transmisión por cardan*

Si se provoca una aceleración brusca estando la moto parada, en algunas motos con transmisión por cardan, se puede sentir cómo la parte trasera de la moto se levanta conforme el piñón conductor trata de trepar por la corona. Expresándolo de otra forma, el alojamiento de la corona está sujeto a un par igual y opuesto que el que soporta la corona propiamente dicha. Este par actúa en el basculante, que entonces tiende a girar hacia atrás, extendiendo la suspensión y tendiendo a levantar el chasis a través de su eje de giro. Al igual que esta fuerza hacia arriba, el basculante también empuja hacia delante sobre el chasis, y esta es la fuerza que impulsa y acelera la moto. En la siguiente figura se pueden ver las fuerzas dibujadas.

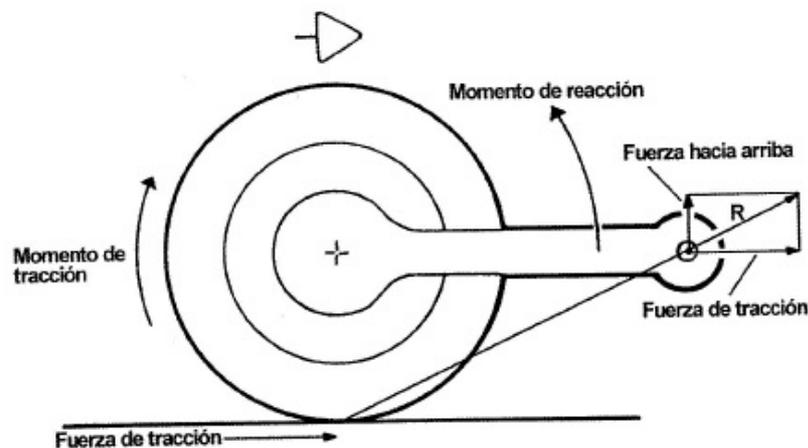


Figura 4.2. Fuerzas que actúan sobre el basculante en una transmisión por cardan.

Con una transmisión convencional por cardan, el momento que hace girar la rueda produce un par opuesto en el alojamiento de la corona dentada que tiende a rotar el basculante hacia atrás, levantando el anclaje del basculante al chasis, y por lo tanto la parte trasera de la moto.

La fuerza de tracción en el neumático, al final actúa a través del eje con fuerzas de tipo horizontal y vertical. Estas fuerzas pueden ser consideradas como una única fuerza  $R$  que actúa en la dirección mostrada (dibujada desde la huella de contacto del neumático hasta el eje del basculante). Esta línea se conoce como "línea de fuerza". La fuerza

vertical levanta la parte trasera de la moto, trabajando en contra del “squat” que se produce debido a la transferencia de carga.

Se van a aplicar estas fuerzas a la parte suspendida de la moto y se verá qué ocurre. La figura siguiente muestra cómo actúan las fuerzas de tracción y las de la suspensión, soportando la parte suspendida de la moto, a la que se le han quitado las ruedas para ver todo un poco más claro. La línea de acción de la resultante de las fuerzas de tracción ha sido dibujada para cada una de las dos ubicaciones imaginarias del eje del basculante (líneas 1 y 2).

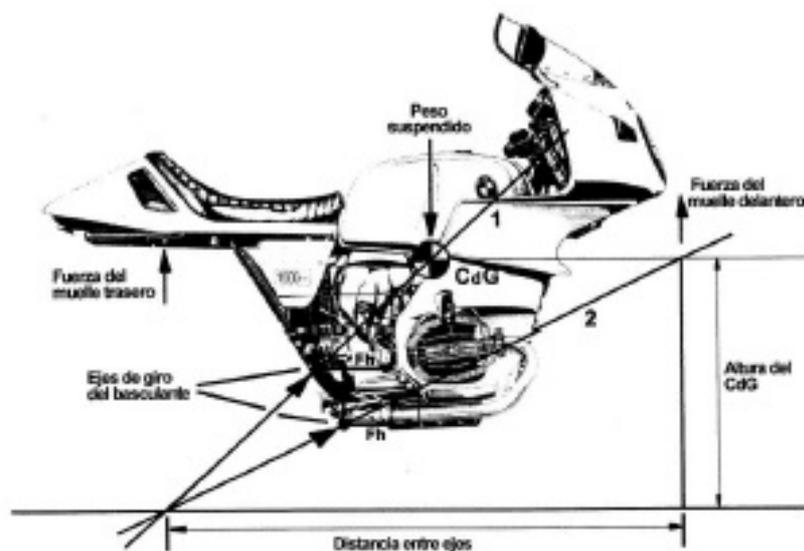


Figura 4.3. Fuerzas de tracción y suspensión, soportando la parte suspendida de la moto.

La línea 1 pasa por el CdG combinado de moto y piloto y la línea 2 pasa por la intersección de una línea vertical que pasa a través del eje delantero y otra que marca la altura del CdG. Obviamente ninguna de estas dos posiciones refleja la posición real del eje del basculante de esta moto y de hecho la posición de la línea 2 sería ciertamente poco práctica. De todas formas estas líneas representan dos ejemplos especialmente importantes del caso general y merece la pena considerarlos, sean prácticos o no.

Para simplificar las cosas imaginemos que la distribución de peso es 50/50 y que la altura del centro de gravedad es la mitad de la distancia entre ejes, y para simplificarlas todavía más se asume que las fuerzas de la suspensión actúan verticalmente y que pasan por los ejes de las ruedas.

Se considera la línea 1. La fuerza horizontal en el eje del basculante ( $F_h$ ) intenta acelerar la masa de la moto, pero también crea un momento de rotación alrededor del centro de gravedad que tiende a rotar la moto hacia atrás, o diciéndolo de otra forma, causa “squat”. Por otro lado, la fuerza vertical ( $F_v$ ) tiende a levantar la moto,

reduciendo la carga del muelle de la suspensión. También crea un par que tiende a rotar la moto hacia adelante alrededor del CdG, es lo que podríamos llamar un efecto “anti-squat”. En este caso, como la línea de fuerza pasa a través del CdG, los momentos de “squat” y “anti-squat” se equilibran el uno con el otro y la fuerza vertical que queda tiende a levantar la parte suspendida de la motocicleta sin que exista ningún momento de cabeceo.

Ahora se observa la línea de fuerza 2, que representa un eje del basculante mucho más bajo y/o adelantado. Esta línea tiene la mitad de inclinación que la anterior, lo que significa que la fuerza vertical se verá también reducida a la mitad. Si se vuelve a considerar una aceleración similar a la del caso anterior, la parte delantera casi se estará levantando y por lo tanto todo el peso estará cargado sobre el neumático trasero. Sin embargo, la fuerza de tracción horizontal del neumático solo producirá ahora la mitad de la fuerza vertical total necesaria para soportar el peso, la otra mitad proviene de la suspensión. Por lo tanto podemos ver que la suspensión trasera soporta únicamente la mitad del peso de la moto, pero esto es exactamente lo mismo que soportaba cuando la moto estaba en reposo. Así, en este caso la suspensión trasera ni se comprime ni se extiende al acelerar. Al igual que antes el muelle delantero no tiene carga y la rueda delantera comienza a levantarse, aunque como la suspensión trasera no se extiende, el CdG queda un poco más bajo y por lo tanto podremos acelerar un poco más fuerte antes de que la rueda delantera se levante.

Como se ha mencionado anteriormente, las líneas 1 y 2 representan dos casos especiales de “anti-squat”. El primero no crea un momento residual de cabeceo y tiende a elevar toda la moto de forma plana. Realmente, la moto no se mantiene horizontal porque lo normal es que la suspensión trasera tenga un muelle más duro comparado con la distribución de peso (una frecuencia de suspensión más alta), y por lo tanto realmente la parte trasera se levantará un poco menos que la delantera. Para equilibrar esto, tendríamos que montar el eje del basculante un poco más alto o un poco más retrasado que el caso de la línea 1.

El segundo caso equilibra de forma exacta cualquier movimiento de la suspensión trasera, pero la delantera se elevaría igual que antes, generando “squat” sin que se hundiera la parte trasera.

¿Qué características de “anti-squat” se deben buscar? ¿Qué es lo mejor? Con respecto al tren delantero, no se puede hacer mucho, se debe aceptar que la parte delantera es independiente de la trasera y que se elevará dependiendo de la ubicación del CdG. O sea que lo único que es relevante en este aspecto es el comportamiento del tren trasero.

Si la línea de fuerza pasa muy cerca del CdG (con carga), la moto se eleva al acelerar, y a muchas personas este tipo de comportamiento les resulta perturbador. Cuando uno va rápido, existe un continuo movimiento arriba y abajo conforme bajas la velocidad y vuelves a acelerar de nuevo, en una zona de curvas este efecto puede ser muy perjudicial para la conducción. Además de este problema, existen unas cuantas desventajas más de esta geometría de “anti-squat”. Estos efectos son menos evidentes, pero muy importantes, sobre todo con máquinas más potentes. En primer lugar, si se aplica suficiente potencia como para que el par que se produce en el basculante soporte todo o casi todo el peso, la suspensión trasera se extenderá a tope de forma que se

convertirá en algo completamente sólido. Está claro que esto no es algo precisamente bueno. En segundo lugar, al acelerar fuerte de forma brusca, la rueda trasera y la parte posterior de la moto tienden a separarse la una de la otra de forma muy rápida. Debido a que la masa de la moto es considerablemente superior a la del conjunto de la rueda, es la rueda la que trata de alejarse más de la moto. Esto provoca un incremento momentáneo de la carga del neumático, que se comprime en la zona de contacto con la carretera. Los neumáticos tienen algo de amortiguamiento, pero no mucho y por lo tanto esta compresión repentina puede ser precursora de rebotes del neumático o de “chattering”, ambos efectos son muy nocivos para una buena conducción, como ya se sabe. Este problema se puede agravar si la suspensión se extiende a tope, porque si la suspensión pasa a ser algo sólido entonces tampoco nos podrá ofrecer amortiguamiento que ayude a reducir el “chattering”.

### Transmisión por cadena

Puede parecer sorprendente, pero se pueden analizar las características del “squat” de la transmisión por cadena usando métodos gráficos prácticamente idénticos a los que se han usado en el caso de la transmisión por cardan. La imagen siguiente muestra cómo la cadena tira hacia atrás de la mayor parte de la moto, pero la fuerza hacia delante en el basculante es mayor.

Como muestra el dibujo, con el basculante y la cadena apuntando hacia arriba, la componente vertical de la fuerza de la cadena es hacia abajo y actúa favoreciendo el “pro-squat”, la componente vertical de la fuerza del basculante es mayor y actúa hacia arriba produciéndose así un efecto global de “anti-squat”.

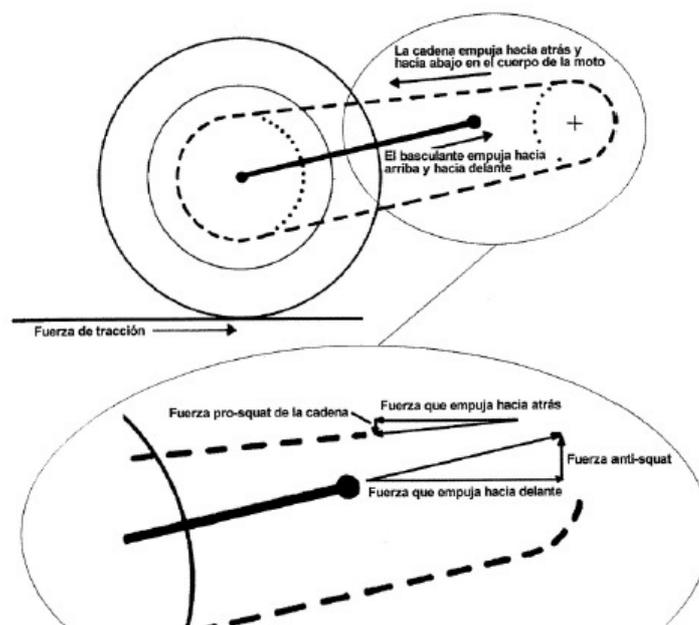


Figura 4.4. Fuerzas de la cadena y el basculante.

Tal y como se verá más adelante, cuando la suspensión se comprime mas allá de la posición horizontal, el extremo delantero de la cadena y el basculante apuntan hacia abajo. Cuando esto ocurra el tiro de la cadena producirá un efecto “anti-squat”, mientras que la fuerza del basculante actuará produciendo un efecto opuesto de “squat”. Podemos determinar si el efecto global es “pro-squat” o “anti-squat” construyendo una línea de fuerza tal y como se muestra en la imagen anterior.

En el caso de transmisión por cadena podemos determinar un “Centro instantáneo de Fuerzas” dibujando líneas a lo largo de la cadena y del basculante. El punto donde se crucen estas líneas puede considerarse como el punto a través del cual actúan las fuerzas combinadas del basculante y de la cadena, esta fuerza debe ser compensada por fuerzas iguales y opuestas en la huella de contacto del neumático.

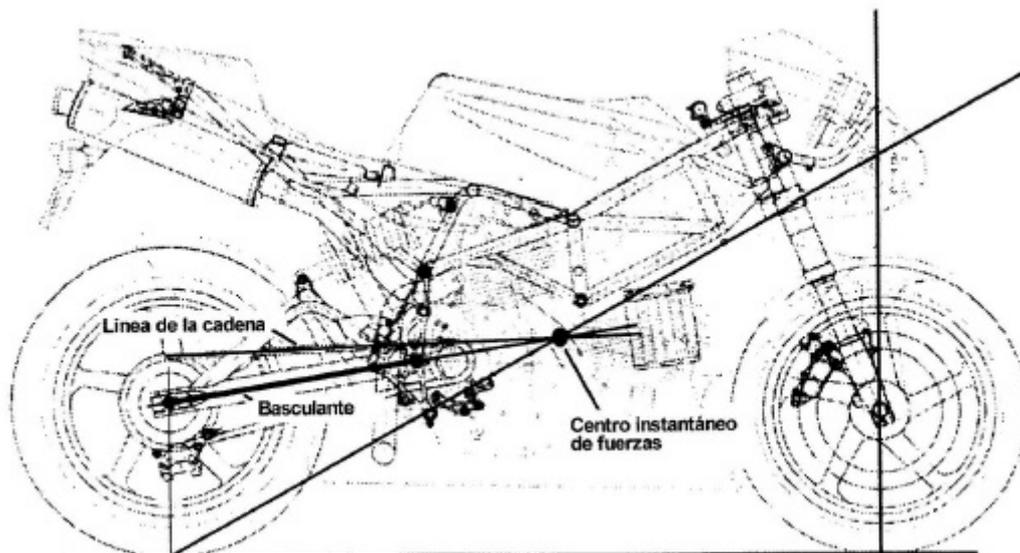


Figura 4.5. Donde se cortan las proyecciones de la cadena y del basculante se encuentra el Centro instantáneo de Fuerzas.

Se puede ver que las inclinaciones de las líneas de fuerza son muy similares en todos los casos y están muy cercanas al nivel necesario para asegurar un acoplamiento mínimo entre el movimiento de la suspensión trasera y los efectos que se producen al acelerar. De todas formas, la situación puede cambiar de forma radical a lo largo del recorrido de la suspensión. Conforme la suspensión trasera se comprime por cualquier motivo, generalmente el efecto “anti-squat” disminuirá y en algunos casos se transformará en “pro-squat”, y como ya se explicó antes, esto produce un efecto equivalente a una reducción de la dureza del muelle trasero.

Volviendo a examinar la siguiente imagen:

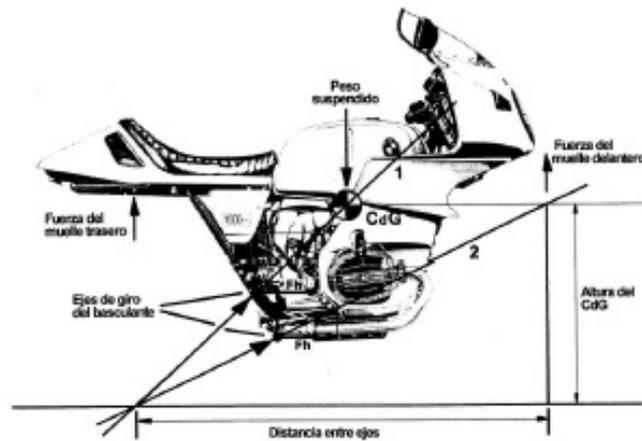


Figura 4.6. Fuerzas de tracción y suspensión, soportando la parte suspendida de la moto.

Se puede ver que la línea 2 representa un grado de “anti-squat” que equilibra de forma exacta la tendencia al “squat” inducida por la transferencia de carga debida a la aceleración, liberando de forma efectiva a la suspensión trasera de los efectos producidos por las fuerzas de tracción. Nos referiremos a este nivel de “anti-squat” como 100%. Si la línea de fuerza estuviera al nivel del suelo entonces se tendría un “anti-squat” cero y la compresión residual de la suspensión sería únicamente debida a la transferencia de carga, esto lógicamente debería representar el 0%. Una línea de fuerza con la mitad de inclinación que en caso de un “anti-squat” del 100%, produciría la mitad de fuerza hacia arriba en el tren trasero y por lo tanto se podría decir que produce un 50% de “anti-squat”. Utilizando esta escala porcentual se tiene una manera simple de medir el “anti-squat” y se puede así comparar diferentes máquinas y posiciones de la suspensión. La imagen siguiente muestra la posición de la línea de fuerza para distintos valores de “anti-squat”.

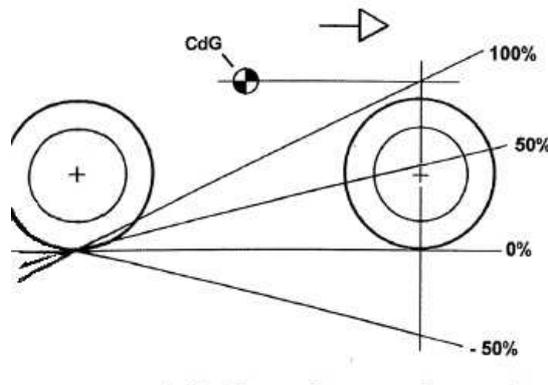


Figura 4.7. Se muestran cuatro líneas de fuerza distintas con sus correspondientes porcentajes de “anti-squat”. El 100% tiene lugar cuando la línea de fuerza pasa sobre el eje delantero a la altura del CdG. Esto separa de forma efectiva las fuerzas de tracción de la respuesta de la suspensión. Un 0 % indica que no existe “anti-squat”. Este caso tiene lugar cuando la línea de fuerza es horizontal.

Una línea con una inclinación negativa muestra el caso en el que las reacciones de la cadena y del basculante se suman a la compresión de la suspensión en lugar de oponerse a ella (“pro-squat”). La siguiente imagen muestra como varía el porcentaje de “anti squat” con distintas posiciones relativas entre el basculante y la cadena.

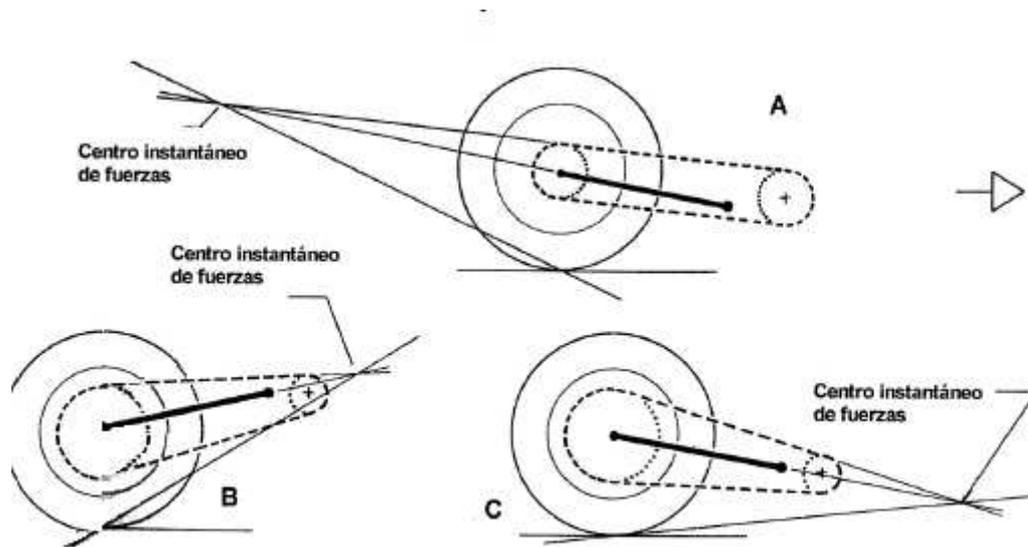


Figura 4.8. Variación del porcentaje de “anti-squat” con distintas posiciones relativas entre el basculante y la cadena.

El ejemplo A muestra cómo cuando el basculante y la cadena divergen hacia delante el centro de fuerzas se encuentra ubicado detrás de la rueda. Esto no tiene un significado especial ya que es la línea de fuerza que va desde este centro de fuerzas a la huella de contacto del neumático la que es realmente importante. De todos modos, cuando el centro de fuerzas está detrás de la rueda, si además está sobre el nivel del suelo existiría “pro squat” y “anti squat” si el centro de fuerzas está por debajo del nivel del suelo. Es justo al contrario que cuando el centro de fuerzas se encuentra por delante de la rueda trasera.

Los casos B y C representan la misma máquina con la suspensión trasera en los dos extremos del recorrido. El caso B muestra un elevado grado de “anti-squat” con la suspensión extendida.

Las explicaciones anteriores se han centrado en situaciones en las que la moto está acelerando. Cuando se cierra el acelerador o se reducen marchas, ocurren situaciones opuestas. Esto es, la moto tiende a levantarse debido a la transferencia de carga y por lo tanto se necesita equilibrar las fuerzas para producir un efecto de anti-levantamiento.

Estas fuerzas son menores pero todavía amplían más el rango de variación de posiciones de la motocicleta. Al decelerar con el motor, la parte inferior de la cadena se encuentra

bajo tensión y por lo tanto los centros instantáneos de fuerzas deben determinarse usando ese lado de la cadena, de forma que en general el porcentaje de anti-levantamiento no será igual al porcentaje de “anti-squat” para la misma posición de la suspensión.

En el pasado, este fue un aspecto de diseño que fue ignorado durante mucho tiempo y ciertamente su importancia era menor cuando los niveles de potencia eran más bajos. Sin embargo, los niveles de potencia de hoy en día y los grandes recorridos de suspensión han demandado más atención hacia este aspecto que es de gran importancia en la preparación de motos de competición y también en motocross. De hecho actualmente algunos chasis de carreras se construyen con la posibilidad de ajustar la altura del eje del basculante, de forma que se pueden variar las características de “anti-squat” para adaptarse mejor a los distintos circuitos y estilos de conducción de los pilotos.

El tamaño del piñón también tiene un efecto en el comportamiento del “anti-squat”, tal y como se puede ver a continuación en la imagen:

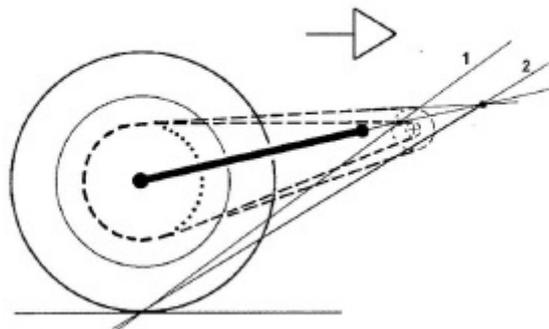


Figura 4.9. Efecto del tamaño del piñón en el comportamiento “anti-squat”.

Parece que hacen falta medidas más drásticas si se pretende conseguir un buen control de las características de “anti-squat”, y resulta muy sorprendente que sea el sector de las motos de campo, con sus largos recorridos de suspensión y muelles blandos, el que haya experimentado una mayor actividad en este aspecto.

#### 4.1.3. Conclusiones

Hemos visto que cuanto más cerca esté una suspensión de ser equilibrada, la tracción que puede ofrecer es mayor. El “anti-squat” 100% es el “squat” necesario que debe desarrollar la suspensión para contrarrestar completamente el efecto de transferencia de masa.

## 4.2. ANÁLISIS TRACKLEVER

En el diseño de motocicletas, también las de campo, “todo está inventado ya”. Sin embargo, el resultado final de casi un siglo de evolución es que actualmente “todas son iguales, como gotas de agua”. Hay alguna variación en cuanto al propulsor y también en cuanto al material usado en el chasis, pero casi todas las motos de “off road” montan un eje de piñón de salida de cadena no concéntrico al eje del basculante, cuyo recorrido se controla mediante un amortiguador dotado casi siempre de progresividad.

En el diseño de las motos, los parámetros que configuran su concepto básico están interconectados: si atrasas el centro de gravedad, por ejemplo, ganas tracción, pero la moto se levanta mucho delante; si alargas el basculante, derrapas más en aceleración y la moto será más estable a velocidad elevada, pero también, inevitablemente más torpe.

Esta mezcla de todos los conceptos, suele llevar a reglas fijas y a problemas comunes que son aceptados como inevitables. Uno de ellos es la interacción entre el “tiro de cadena” y el comportamiento del basculante y, por tanto, de la suspensión trasera. Un fenómeno que en caso de pérdida de agarre causa el “inevitable” serpenteo en aceleración y puede acabar en “high-side”.

El sistema convencional con salida de cadena por piñón con eje adelantado al del basculante tiene buena respuesta cuando hay “grip”, es decir, mientras no se pierde adherencia en la rueda. Pero en las ocasiones en que se producen pérdidas constantes de adherencia (lo que causa las derrapadas típicas del “off-road”), se produce lo que puede llamarse “efecto martillo”. Cada vez que, con el gas abierto, la moto derrapa, y la rueda se escapa, el tiro de cadena abre el basculante. Cuando el neumático vuelve a tener “grip”, la rueda se frena, y su momento de inercia empuja la moto hacia delante.

En el Tracklever, el propio ángulo de dirección del basculante, que coincide con el ángulo “anti-squat” de la moto, elimina el problema.

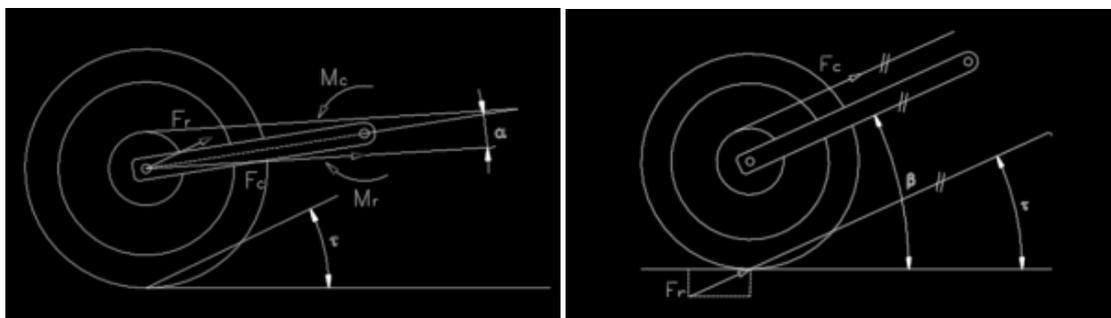


Figura 4.10. Análisis de un sistema estándar (izqda.) frente a un sistema Tracklever (dcha.)

El sistema Tracklever consigue además, al colocar el basculante inclinado entre 25° y 30°, unas variaciones de geometría que podrían asimilarse a las que consigue en el tren anterior una horquilla telescópica: la moto es corta en los ángulos, pero “alarga” la batalla para ganar estabilidad en las curvas rápidas. De esta forma, el Tracklever anula los puntos muertos de adherencia en la transición entre frenada y aceleración, facilitando el empalmar la derrapada de frenada con la de salida de curva, y eliminando el latigazo final.

## 5. DATOS DE PARTIDA

### 5.1. MOTOR

Actualmente, casi todas las motos de mediana y gran cilindrada, disponen de unos propulsores con un buen par motor y una potencia suficiente en toda su gama, como para poder gozar de una conducción cómoda y efectiva.

Los motores alternativos de cuatro y dos tiempos son los más utilizados en las motocicletas desde sus inicios.

En general, puede decirse que el campo de aplicación de los motores de cuatro tiempos es la propulsión de cualquier tipo de vehículo. No obstante, ha de competir en las pequeñas cilindradas con el motor de dos tiempos, que le aventaja en simplicidad y ligereza. A pesar de ello, puede considerarse como el más versátil, ya que es capaz de aceptar un mayor número de aplicaciones.

A continuación se realiza un breve análisis de ambos tipos.

#### *Motor alternativo de dos tiempos*

Su característica fundamental es la sencillez, pues los únicos órganos en movimiento son el pistón, la biela y, por supuesto, el cigüeñal o eje motor. La potencia específica (potencia por litro de cilindrada) es la mayor en términos generales, por realizar doble número de carreras de trabajo que un motor de cuatro tiempos que funcione al mismo régimen. Su consumo específico (gramos de combustible por caballo y hora) es también el más elevado de los dos. En cuanto al rendimiento (relación entre potencia suministrada y consumo de combustible) es el menor, y se puede cifrar en torno a 20%. Ello se debe a la baja relación de compresión real, de la que depende en primer término tal parámetro, así como a la imperfección en el gobierno de los gases de admisión y escape, parte de los cuales escapan sin quemar por el escape, sobre todo en ciertos regímenes.

Produce menos vibraciones en término generales que un motor de cuatro tiempo, pues se consigue el equilibrado ideal con un menor número de cilindros. La regularidad en la entrega de par es mejor que en el de cuatro tiempos, por ser mayor la frecuencia de explosiones. El ruido puede, aunque no necesariamente, ser mayor que en el otro caso, por lo crítico que resulta el diseño del escape y lo perjudicial que es su silenciamiento para la potencia final. Contamina más que ninguno, por dos motivos: la emisión de productos sin quemar y el uso de aceite en la mezcla, cuya combustión produce residuos carbonosos. Este último aspecto se ha mejorado bastante en motores experimentales que utilizan sistemas de inyección de gasolina y de aceite. Es, en general, el motor más ligero de todos.

Su fiabilidad es la menor de los dos, especialmente en motores exigidos, debido en principio al imperfecto sistema de engrase que emplea. Su mantenimiento es prácticamente nulo, y los costes de fabricación y reparación son los más bajos. Por todo lo visto, se comprende que su campo de aplicación preferente está en las pequeñas cilindradas de uso corriente en ciclomotores y scooters, donde no importa su elevado consumo específico, por el escaso de la potencia requerida, y sí la sencillez y el bajo coste de adquisición.

### ***Motor alternativo de cuatro tiempos***

Es el de uso más extendido. Su potencia específica es intermedia, y su consumo específico el menor de los dos. Además, el rendimiento mecánico es bueno: entre el 20% el 28%. Esta razón es la que recomienda su uso en cilindradas medias y altas, destinadas a la producción de potencias elevadas.

Las vibraciones y regularidad de funcionamiento, sin ser malas, se ven perjudicadas en la comparación con su rival. Las primeras se pueden evitar total o parcialmente con el uso de los adecuados ejes de equilibrado. El nivel de ruido es el más contenido, así como la emisión de contaminantes, por lo que se impone en los países con normativas más exigentes al respecto. La ligereza no es una virtud destacada del motor de cuatro tiempos, por la utilización obligada de culatas de cierta complicación y el uso cada vez más acusado de sistemas adicionales.

La fiabilidad que se ha conseguido en su desarrollo a lo largo de los años es óptima: sin lugar a dudas la mejor de los dos. Su mantenimiento, por el contrario, no es precisamente desdeñable, siendo el mayor de todos (existen dispositivos que evitan el realizar reglajes de válvulas y de carburación, aunque su uso es casi nulo en el momento actual en motocicletas). En cuanto a los costes de adquisición y reparación, se sitúa en un lugar superior al de dos tiempos.

### ***Solución adoptada***

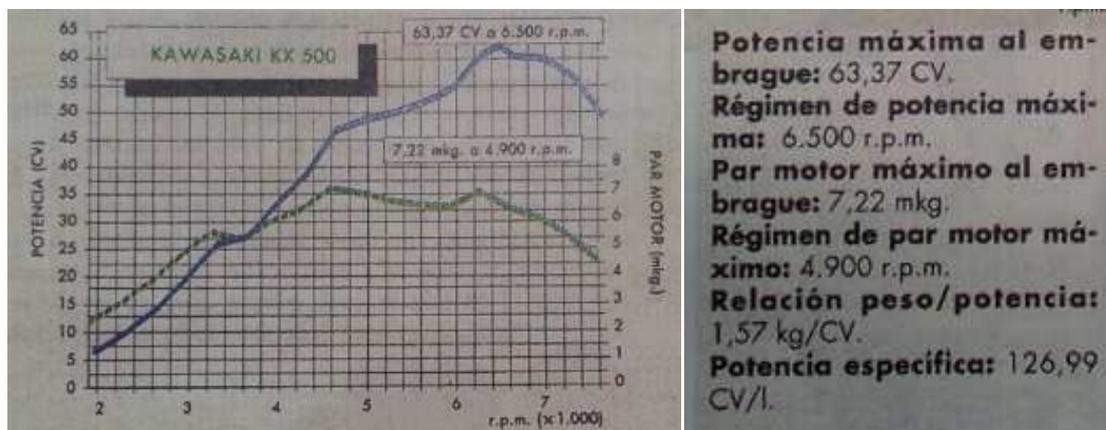
El motor elegido para llevar a cabo este proyecto es un **Kawasaki KX 500, de 500 cm<sup>3</sup> y dos tiempos.**



*Figura 5.1. Kawasaki KX 500 de 500 cm<sup>3</sup> de dos tiempos.*

Se eligió este motor de dos tiempos por dos razones. Una de ellas es la evidente disminución de peso respecto a uno de cuatro tiempos de igual potencia. La otra es probar que no se necesita la suavidad de un motor de cuatro tiempos para transmitir la potencia al terreno, ya que el sistema Tracklever es mucho más efectivo en este sentido.

Además, los motores de 500 de dos tiempos de motocross tienen una curva de par más plana que sus hermanos de menor cilindrada, y el poder de retención es aceptable, sobre todo teniendo en cuenta la disminución de peso del conjunto. No obstante es un motor potentísimo, y más en la unidad potenciada que se va a utilizar, que es el de la Kawasaki Bilever – Tot Racing (de la que ya se ha hablado con anterioridad), que da 70 CV de potencia.



Grafica 5.1 y tabla 5.1. Datos del motor empleado.

A continuación se muestra la ficha técnica de motocicleta en cuestión.

Modelo: Kawasaki KX 500 1993

Estilo: Cross

#### **MOTOR**

Tipo: 499 cc. Refrigerado por líquido. Monocilíndrico. 2 tiempos.

Cilindro/Separación: 86 mm x 86 mm

Compresión: 8.3 : 1

Fuel System: Keihin PWK 39

Encendido: Electronic CDI

Admisión: Por láminas

Escape: Válvula de escape KIPS

Arranque: Por palanca

#### **BASTIDOR**

Chasis: Simple cuna desdoblada a la altura del cilindro. Tubos de acero al cromomolibdeno de sección circular.

Subchasis: Subchasis desmontable. Tubos de acero al cromomolibdeno de sección rectangular.

#### **SUSPENSIÓN DELANTERA**

Tipo: Horquilla invertida, regulable en hidráulica a compresión y extensión. Barras de 43 mm.

Recorrido: 310 mm

#### **SUSPENSIÓN TRASERA**

Tipo: Monoamortiguador regulable (hidráulico a compresión y extensión y precarga del muelle). Sistema Uni Track.

Recorrido: 330 mm

#### **TRANSMISIÓN**

Caja de cambios: 5 velocidades

Transmisión trasera: Cadena

#### **RUEDAS Y NEUMÁTICOS**

Neumático delantero: 80/100-21

Neumático trasero: 120/90-19

Frenos delanteros: Disco de 220 mm. Pinza de dos pistones.

Frenos traseros: Disco de 190 mm. Pinza de un pistón.

Llanta delantera: Aluminio 21"

Llanta trasera: Aluminio 19"

DIMENSIONES	
Largo total:	2190 mm
Alto total:	1205 mm
Ancho total:	815 mm
Distancia al suelo:	370 mm
Altura del asiento:	950 mm
Distancia entre ejes:	1490 mm
Estanque-reserva:	9,9 l
Peso en seco:	100 kg

Tabla 5.2. Ficha técnica de la Kawasaki KX 500.

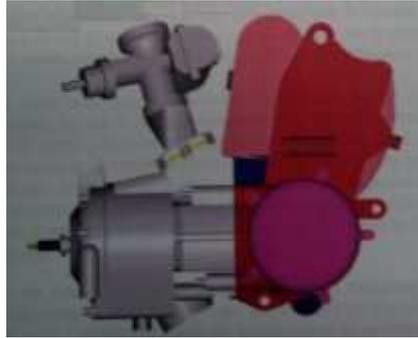
Hay precedentes de motores de dos tiempos en Dirt Track. En los años setenta algunos pilotos corrían con motores de dos tiempos tetracilíndricos de 750 cm<sup>3</sup>, que fueron prohibidos por su peligrosidad debido a la elevada potencia de que disponían.

Por razones de sencillez mecánica y de eliminar peso, al motor se le desmontará el pedal de arranque con todos sus mecanismos internos. El pedal de arranque no es necesario, ya que es perfectamente posible poner la moto en marcha dándole un empujón. A la hora de emplear la moto en diseño para competiciones exigentes, se considerará eliminar alguna relación de la caja de cambios por las mismas razones comentadas anteriormente, pero sólo si se ve que la marcha a eliminar es totalmente prescindible.



Figura 5.2. Motor empleado.

La posición del motor en esta moto no va a ser la usual, con el cilindro en dirección vertical, sino que se va a girar 90° hacia adelante, de manera que el cilindro quede horizontal y los cárteres verticales. Se ha consultado y no hay problemas con la lubricación de los elementos internos del motor.



*Figura 5.3. Posición adecuada para la colocación del motor.*

La brida de admisión del carburador queda girada 90° respecto a la posición original, con lo que éste mantiene el ángulo adecuado para el correcto nivel en la cuba, pero apuntando hacia el lado derecho de la moto, que, por otra parte, es el que menos suciedad recibe. En el lado izquierdo le llegaría toda la tierra que desprende la rueda delantera cuando el piloto va haciendo contramanillar en las curvas. De esta manera se puede instalar un filtro de potencia directamente sobre el propio carburador. Con el ángulo adecuado respecto al eje longitudinal de la moto, se puede lograr una mejora notable en la admisión porque el aire incide directamente sobre la admisión. Cuanto más rápido se avanza, más presión tiene el aire en la admisión, asemejándose (salvando las distancias), al efecto de una sobrealimentación.

## 5.2. NEUMÁTICOS

Los neumáticos son el componente más significativo de todo el vehículo. El resto de la moto se debe diseñar en función de los neumáticos que se hayan elegido como óptimos para lo que se desea de la moto. La elección de neumáticos determinará la anchura de llantas, el tamaño de los frenos, horquillas, tijas, basculantes, recorrido de la cadena e incluso la geometría de la dirección.

Los neumáticos son los encargados en último término de mantener la motocicleta en la dirección adecuada, tanto durante la trayectoria recta como en la de las curvas. Este trabajo no es sencillo, ya que se hace necesario mantener la adherencia entre el terreno y el neumático en situaciones muy diferentes, tanto por el tipo de suelo, como por las condiciones de humedad, temperatura y velocidad.

Las medidas de los neumáticos están limitadas por razones de pérdida de potencia y de maniobrabilidad, ya que el rozamiento entre la banda de rodadura y el suelo absorbe potencia, y además, si la sección es muy elevada, empeora la facilidad para inclinar la moto.

Los neumáticos de empleo campestre tienen algunas diferencias con respecto a los de carretera. No sólo a nivel de banda de rodadura, sino en otros detalles. Normalmente necesitan una gran elasticidad, para soportar los continuos baches, por lo que sus perfiles son altos y la anchura entre los talones bastante pequeña, permitiendo una gran deformación de los hombros que ayude a la suspensión. En estos neumáticos, el taco varía de una especialidad a otra, y llevan presiones menores para que se puedan deformar y ajustarse mejor a las irregularidades del terreno.

Además de la deformación general del neumático, existe la posibilidad de que un elemento determinado del dibujo se deforme o se desplace. Esto no nos interesa demasiado en los neumáticos de carretera o de carreras., pero puede tener sus ventajas en las motos de todo terreno, porque el movimiento suele servir para que el dibujo no se llene de barro.

### *Solución adoptada*

Al contrario que en las motos europeas de Dirt Track, que son normalmente adaptaciones de motos de Supermotard y llevan neumáticos de carretera anchos y de pequeño diámetro, en este diseño se van a utilizar neumáticos relativamente más estrechos y de mayor diámetro. Esto es porque los neumáticos anchos no tienen buena direccionabilidad en tierra. Además los neumáticos anchos generalmente son para competición en asfalto, por lo que su carcasa es muy dura y no se adaptan bien a las pequeñas irregularidades del terreno y no consiguen el mejor agarre.

Debido a que, generalmente, en los reglamentos de competiciones de Dirt Track, no se permiten la utilización de neumáticos específicos de tierra, se adoptarán neumáticos de "trail" (mixto entre campo y carretera). Estos neumáticos son de carretera, pero su compromiso con el campo hace que tengan medidas de todo-terreno y una carcasa más

blanda que los puramente de asfalto. Incluso se pueden tallar para que tengan más dibujo y evacuen mejor la tierra.

Se ha elegido la gama “Michélin Sirac”, por la fiabilidad comprobada de estas gomas y por su disponibilidad de medidas. El dibujo original es muy adecuado para el propósito de esta moto.



*Figura 5.4. Neumáticos escogidos para el diseño.*

Las medidas elegidas son **80/100-21” para la rueda delantera, y 120/80-18” para la trasera.**

El numerador representa la anchura del neumático y el denominador la relación “altura de la sección/anchura”. La altura de la sección se considera la distancia entre el perímetro de la llanta hasta el perímetro del neumático. Por lo tanto el radio de la rueda será el radio de la llanta (conocido) + altura de la sección.

Altura de la sección delantera:

$$1 = \frac{x}{80} \rightarrow x = 80 \text{ mm}$$

Altura de la sección trasera:

$$0,8 = \frac{x}{120} \rightarrow x = 96 \text{ mm}$$

Diámetro de la llanta delantera:

$$21 \cdot 25,4 = 533,4 \text{ mm}$$

Radio de la llanta delantera:

$$\frac{533,4}{2} = 266,7 \text{ mm}$$

Diámetro de la llanta trasera:

$$18 \cdot 25,4 = 457,2 \text{ mm}$$

Radio de la llanta trasera:

$$\frac{457,2}{2} = 228,6 \text{ mm}$$

**Radio de la rueda delantera:**

$$266,7 + 80 = \mathbf{346,7 \text{ mm}}$$

**Radio de la rueda trasera:**

$$228,6 + 96 = \mathbf{324,6 \text{ mm}}$$

### 5.3. LLANTAS

Las llantas comenzaron siendo de radios metálicos, similares a las utilizadas por las bicicletas. Aunque los modelos pioneros disponían de llantas de madera con radios gruesos dispuestos en posición totalmente radial, esta disposición dejó paso rápidamente a los materiales metálicos, de mayor elasticidad y resistencia.

#### *Solución adoptada*

Las llantas empleadas serán de **radios realizadas en aluminio**. Las medidas de las mismas serán las apropiadas a los neumáticos escogidos, es decir, la llanta **delantera** será de **21"**, y la **trasera de 18"**.

## 5.4. FRENOS

La capacidad de detención del vehículo es imprescindible, hasta el punto de que una motocicleta jamás debe alcanzar una velocidad superior a la que le permitan sus frenos.

Los frenos se han mantenido sin avances significativos durante muchos años, y en otros periodos un modelo con graves defectos de frenada era algo común en el mercado. Actualmente sin embargo, tanto el público como los fabricantes están perfectamente concienciados de la importancia de la frenada, y es uno de los puntos en los que se realiza una mayor y más intensa investigación. Llegando a ser en ocasiones importante argumento para la venta del vehículo.

Actualmente, los frenos más utilizados con mucha diferencia, son los frenos de disco. Tienen un accionamiento totalmente externo, lo que redonda en la mejora de uno de los principales problemas que presentan otros sistemas anteriores, el sobrecalentamiento y la pérdida de rendimiento consiguiente.

### *Solución adoptada*

Como en toda moto de Dirt Track, **se prescinde del freno delantero**. Para mejorar la frenada, en el buje trasero se montará el **disco trasero de 190 mm** de diámetro de la Kawasaki KX 500 con la bomba hidráulica del freno delantero en el manillar. Con esta bomba se aumenta la potencia de frenado y se mejora el tacto, lo que es muy importante en una moto sólo con freno trasero. Las botas de motocross que se utilizan son muy rígidas y dan muy poco tacto al piloto, con lo que es más difícil dosificar la frenada en las motos normales, con el freno trasero en el pie.

Se podría caer en el error de montar un freno trasero mayor con el propósito de obtener más potencia de frenado y reducir el calentamiento. Sin embargo, esto no es necesario. La potencia se incrementa suficientemente con la instalación de la bomba de manillar y, además, al ser las mangas muy cortas, el freno no tiene tiempo para calentarse hasta extremos en los que pierda la eficacia. De esta forma también se consigue mantener el peso y las inercias del tren trasero.

## 5.5. TRANSMISIÓN

Para que el movimiento generado en el motor llegue hasta la rueda trasera, se requiere la utilización de diversos mecanismos en serie que forman un conjunto cuya denominación usual es la de transmisión o, más técnicamente, “cadena cinemática”.

En el caso más sencillo, que consistiría en la aplicación directa del eje del motor al eje de la rueda, se presentan dos dificultades esenciales: la primera, que si bien un motor de motocicleta, dependiendo de la cilindrada, puede necesitar girar a unas 4.000 r.p.m. para proporcionar la potencia suficiente como para hacerla circular a unos 100 km/h, a ese régimen la rueda obligaría a hacerlo a no menos de 200 km/h si es de un tamaño normal. La segunda dificultad sería, que siempre se debería arrancar la moto “a empujón”, salvo que se cuente con un motor de arranque suficientemente potente como para impulsarla desde parado hasta por ejemplo 50 km/h, donde un motor normal empezaría a proporcionar cierta potencia. En definitiva, se comprende la necesidad de emplear relaciones de transmisión distintas en función de las circunstancias.

Se recordará que el par o esfuerzo de rotación en el cigüeñal de un motor, depende de muchos factores que hacen que varíe finalmente en función del régimen de giro. Además, la potencia es proporcional simultáneamente a dicho par (igualmente relacionado con la “cantidad” de explosiones por minuto). Pero además, para que se produzca la deseada estabilidad en el desarrollo de la marcha, debe funcionar a unas RPM que estén comprendidas entre dos valores: por abajo, el de par máximo, y por arriba, el de potencia máxima. Pues bien, es mediante el conocimiento de estos y algunos otros datos como se llega finalmente a determinar las características de la transmisión más adecuada, que suele componerse de transmisión primaria, embrague, cambio y transmisión secundaria.

### *Transmisión primaria*

Los elementos que se encargan de comunicar el movimiento del cigüeñal al embrague, reciben el nombre de transmisión primaria. Esta primera etapa en la transmisión suele estar dotada de una primera desmultiplicación, entendiéndose por esto una disminución de la velocidad de giro del eje al que se transmite el movimiento respecto del original. Para ello, no hay más que dotar de un mayor número de dientes a la rueda dentada del embrague respecto de la del cigüeñal.

Hay que tener en cuenta que un motor de motocicleta gira por necesidades constructivas en unos regímenes máximos que varían entre las 6.000 r.p.m. de los más tranquilos, a las 14.000 r.p.m. de los más revolucionados. El régimen de giro de las ruedas puede variar desde unas 1.000 r.p.m. en un modelo turístico, hasta unas 2.000 r.p.m. en las más rápidas. Es necesario establecer en la velocidad más larga una reducción variable, pero que se puede estimar entre 5 y 8 veces la del cigüeñal. No es muy positivo que esta desmultiplicación se realice de golpe, ya que la diferencia entre el número de dientes de los piñones aumenta las pérdidas mecánicas, por lo que se suele repartir entre la

transmisión primaria, y la establecida entre el motor y la rueda trasera, con una proporción cercana en ambas.

Los dos métodos más comunes para realizar la transmisión primaria son la cadena y los engranajes. En el primer caso, los ejes del cigüeñal y del embrague giran en el mismo sentido, y en el segundo al contrario, lo que provoca una construcción distinta del motor. También se pueden instalar ejes intermedios de transmisión, pero no son muy frecuentes porque aumentan el volumen del motor, su número de piezas y las pérdidas mecánicas.

La tendencia más habitual en la actualidad es la transmisión por engranajes que anula el posible mantenimiento y reduce el tamaño del motor. En este caso, la rueda del cigüeñal conecta directamente con la de la campana del embrague.

### ***Cambio de velocidades***

En principio se indicará que la ubicación habitual hoy en día de la palanca de accionamiento del cambio, se lleva a cabo en el lado izquierdo de la misma, accionándose el mismo para pasar a una marcha superior (multiplicar) en sentido ascendente, y al contrario, es decir, en sentido descendente, cuando se reduce a una marcha inferior. El punto muerto se ubica entre primera y segunda, disponiéndose un rebaje en el fiador para así determinar su posición. No obstante, siempre hay un punto muerto entre cada dos relaciones. En algún modelo de competición se ubica dicho punto muerto en la posición inferior, por debajo de la primera relación.

Esta posición de la palanca se adoptó a principios de los 70, impuesta por la legislación norteamericana, dado que éste es un mercado con gran potencial, y se estimó oportuno unificar la producción. Las motos inglesas e italianas, que eran las que predominaban en el mercado por aquel entonces, no sólo disponían la palanca en el lado derecho, sino que su accionamiento es inverso, realizándose en sentido ascendente para reducir y descendente para multiplicar. Este sistema parece más razonable, por cuanto las operaciones de cambio se realizan de forma más equilibrada para la estabilidad de la motocicleta, ya que intervienen extremidades de lados opuestos (mano izquierda para el embrague y pie derecho para el cambio).

Al mismo tiempo, se contrarresta la tendencia natural de la moto en los cambios de marcha, ya que se realiza un movimiento descendente al multiplicar, cuando la tendencia de la moto en las aceleraciones es levantarse, ocurriendo lo contrario en las reducciones, en las que la moto tiende a amorrarse, contrarrestándolo con el movimiento ascendente de la palanca al reducir. Esta disposición es empleada hoy en día en competición, dado que resulta poco práctico introducir el pie bajo la palanca cuando se comienza a acelerar en posición inclinada, especialmente si la inclinación es hacia el lado de la palanca.

En cuanto al número de relaciones, oscila entre las cuatro de alguna “custom”, y las siete de alguna deportiva, siendo las más empleadas las de cinco relaciones en motos turísticas y las de seis en motos deportivas, si bien esto no supone ninguna regla.

En cualquier caso, la desmultiplicación de una marcha viene dada por el número de dientes que poseen los engranajes que la componen. Así, se determina la llamada “relación de transmisión”, la cual es el cociente entre el número de dientes del piñón conducido (el situado en el secundario) y el número de dientes del piñón conductor (dispuesto en el primario). Dicho valor, indica el número de vueltas que ha de dar el conductor, para que el conducido dé una vuelta completa, es decir, la disminución de velocidad del secundario respecto al primario. Indica así mismo, el incremento del par de salida (el que sale por el secundario) en relación al par de entrada (el que entra por el primario).

### ***Transmisión secundaria***

La transmisión entre el motor y la rueda recibe el nombre de “transmisión secundaria”, en contraposición a la “primaria”, establecida entre el motor y el cambio de velocidades, y, al contrario que ésta, está influenciada por la suspensión trasera. Al bascular la rueda posterior por efecto de la suspensión, si los ejes del basculante y de la transmisión no se encuentran en el mismo lugar, se produce una variación de la distancia entre el eje salida del cambio y el de la rueda trasera, que normalmente afecta a la transmisión.

En el caso en el que el sistema empleado sea rígido, como ocurre con los árboles, es obligatorio situar el eje de articulación de la rueda trasera coaxialmente con el de la transmisión. En el caso de un sistema elástico, como una cadena o una correa, puede haber un cierto desajuste, que debe ser amortiguado por el elemento de transmisión.

En el segundo caso aparecen reacciones sobre la suspensión con el cambio de velocidad en la transmisión, por el motivo anterior. Actualmente, la gran mayoría de las motos disponen de transmisiones secundarias por cadena. Las razones son variadas, pero influye de manera decisiva la economía, el hecho de que en la mayoría de los propulsores los ejes sean transversales y la disminución de las reacciones frente a otros sistemas.

### ***Solución adoptada***

Como ya se ha comentado con anterioridad, la unidad potenciada que se va a utilizar es el de la Kawasaki Bilever – Tot Racing. A continuación se muestran los datos de esta unidad.

Relación marchas	
Relación primaria	3
Marcha 1	2
Marcha 2	1,444
Marcha 3	1,181
Marcha 4	0,954
Marcha 5	0,791
Dientes piñón	16
Dientes reenvío	18
Dientes plato	42
Radio neumático trasero	350 mm

Tabla 5.3. Relación marchas Bilever – Tot Racing.

Como ya se ha dicho desde un principio, el conjunto formado por la transmisión y la suspensión trasera estará dotado del **sistema Tracklever**. De modo que para mantener las relaciones que ya han demostrado su validez, será necesario disponer de dos platos de **42 dientes**, además del correspondiente **piñón de reenvío de 18 dientes**.

Así, una vez fijada la posición del motor, solo queda calcular el ángulo de inclinación que deberá tener el basculante para poder conocer la ubicación de su eje de rotación.

Además, una consecuencia de manejar el freno trasero desde el manillar es que se puede trasladar con unos reenvíos la palanca de cambio de marchas al lado derecho de la moto, con lo que el pie izquierdo queda completamente libre. En una moto que sólo va a dar curvas hacia la izquierda esto es muy importante, aunque exigirá un periodo de adaptación por parte del piloto.



Figura 5.5. Conducción típica en Dirt Track.

## 5.6. SUSPENSIÓN DELANTERA

Las motocicletas necesitan incorporar en su estructura unos anclajes elásticos entre la estructura principal y el terreno. La razón es bien sencilla; como el piso por el que transitan no es completamente uniforme, se producen constantes elevaciones y hundimientos del conjunto. Esto no plantea excesivos problemas a baja velocidad, pero si ésta aumenta, se llega a un punto en que la moto salta sobre el terreno por efecto de la inercia, perdiendo contacto con el suelo, y, por tanto, capacidad de maniobra. Además, los constantes saltos causan incomodidad al piloto, que se ve continuamente sacudido sobre el vehículo.

Para evitar estos efectos, se intercala algún mecanismo entre las ruedas que deben estar en contacto firme con el suelo y el resto del bastidor. Estos mecanismos forman el conjunto de lo que se denomina “suspensión”, al mantener en ese estado la gran mayoría de la motocicleta.

Inicialmente, las motos no dispusieron de suspensión. Pronto, sin embargo, se dio la necesidad de dotar a la rueda delantera de suspensión para mejorar el control y la direccionalidad de la motocicleta.

Para absorber las irregularidades del suelo, es necesario contar con un sistema que sea capaz de deformarse, de manera que, mientras la estructura general de la moto no se ve afectada por las irregularidades, las ruedas son capaces de sortear el obstáculo. Realizar esto es bastante difícil y la moto siempre sufrirá una pequeña desviación de la trayectoria horizontal, ya que el elemento elástico no es tan perfecto como para que no haya reacción sobre el chasis. Los elementos elásticos empleados normalmente son los muelles helicoidales.

Para reducir la oscilación del resorte, a las suspensiones se les añade un sistema de retención hidráulico, formado por un alojamiento estanco, normalmente un cilindro, en el que hay un fluido. En el interior se encuentra un pistón guiado por un vástago, y dotado de orificios de pequeño tamaño. Al moverse el pistón en el interior del cilindro que contiene el fluido, se establece una oposición a su movimiento, realizada por el líquido, que debe pasar por los orificios, frenando el desplazamiento. Si se incluye un sistema de estas características en el sistema de suspensión, junto al resorte, podremos frenar las oscilaciones de éste, de manera que el funcionamiento sea mucho más preciso, y los desplazamientos de la rueda no vayan acompañados posteriormente de movimientos alternativos del resto de la motocicleta.

El sistema de suspensión más empleado y prácticamente universal es la horquilla telescópica. Está formada por dos brazos que unen la pipa de dirección a la rueda, anclándose respectivamente en las tijas y en el eje de la rueda delantera. Cada brazo está formado por dos tubos, uno de mayor diámetro que el otro, y situados concéntricamente, de manera que uno de ellos puede introducirse en el interior del otro, variando la distancia existente entre el eje y las tijas.

Si la horquilla no dispone de regulación de ningún tipo, la resistencia a la compresión y la capacidad de extensión vienen dadas por el muelle instalado y por su compresión

inicial, mientras que el freno hidráulico depende del tamaño de los orificios y de la densidad del fluido hidráulico.

Puede ser muy interesante regular los parámetros de funcionamiento de la suspensión, que, dependiendo del tipo de terreno, de la velocidad o del peso, los requerimientos sobre la horquilla varían. Por esto se recurre en la actualidad a las horquillas “ajustables”, que disponen de una cierta capacidad de cambio de sus parámetros.

Las regulaciones principales son las del muelle, la regulación del sistema hidráulico y el ajuste del periodo de compresión.

Las horquilla telescópicas se han mostrado a lo largo de los años como la solución más válida, pero no únicamente por su comportamiento en lo que se refiere a la suspensión, sino también por la excelente geometría de dirección que ofrecen, su relativa ligereza frente a otros sistemas, la facilidad para incorporar elementos hidráulicos y el coste moderado.

### ***Solución adoptada***

Para la suspensión delantera se ha creído conveniente utilizar los componentes de una moto de trial. En el trial, uno de los aspectos fundamentales es el peso, por lo que los componentes de estas motos están muy estudiados al respecto. Como la motocicleta no lleva freno delantero, la horquilla no debe soportar grandes esfuerzos, por lo que no necesita ser tan robusta como las horquillas de motocross que se suelen utilizar.

En concreto, se va a colocar toda la **suspensión delantera de la GAS GAS JTR 270**. Y teniendo en cuenta los valores obtenidos de las motos Dirt Track utilizadas actualmente, la horquilla debe tener un **recorrido de 100 mm**, por lo que tendrá que ser adaptada. Dicha horquilla (de la casa Marzocchi) se caracteriza por llevar en una de las botellas el muelle, y en la otra los componentes hidráulicos. **La botella del muelle pesa 3,2 kg, y la del hidráulico 2,8 kg.**



*Figura 5.6. GAS GAS JTR 270.*

La **constante elástica del muelle** de esta horquilla debe ser de **10,1 N/mm**. El coeficiente de amortiguamiento se determinará en la fase de pruebas del prototipo, mediante la regulación directa de los mecanismos de los que dispone la botella del hidráulico. La precarga del muelle también se podrá regular mediante su correspondiente ajuste.

Esto da un tren delantero muy ligero, con lo que se facilitan las correcciones de la trazada. La **masa de la rueda delantera es de 7 kg incluido el neumático**, y la **masa total no suspendida delantera es de 10,5 kg en total**.

## 5.7. CARROCERÍA

Cuando se han colocado los componentes principales, el paso siguiente es colocar al piloto. Su peso elevará el centro de gravedad, y se podrá mover bastante, hacia delante y hacia atrás, lo que tiene consecuencias notables sobre la conducción, la frenada y la adherencia de la rueda delantera. Cuando el piloto está en posición normal su centro de gravedad está varios centímetros por delante de su ombligo; estará más arriba o más abajo en función de lo dobladas que tenga las piernas en la cadera y en la rodilla.

Si se conoce aproximadamente el centro de gravedad de la moto y se conoce también el centro de gravedad deseado del total de la máquina y el piloto, entonces se puede ajustar la posición del piloto en consecuencia. En algunas máquinas es deseable disponer de un centro de gravedad variable, por ejemplo en las de motocross y en las de enduro. Un centro de gravedad retrasado ayuda a dar más tracción sobre suelo resbaladizo. Un centro de gravedad adelantado permite generar mayor fuerza de frenada y reduce los “caballitos” cuando hay buena tracción, por lo que se debe permitir al piloto que se mueva todo lo necesario. Cuanto más elevado esté el piloto, más significativo será su referencia de pesos. Por eso, en las motos de trial, cuanto más alto vaya el piloto mejor.

Varias posibilidades:

- Chapas de acero
- Chapas de aleación
- Fibra de vidrio (plásticos reforzados con vidrio)
- Fibra de carbono
- Hojas de plástico
- Plástico moldeado al vacío

### *Solución adoptada*

Será de **poliéster reforzado con fibra de vidrio.**

## 5.8. MEDICIONES

Debido a las notables diferencias de las características de las motocicletas de Speedway y Dirt Track con el resto de motocicletas comunes, es necesario disponer de un punto de partida fiable a partir del cual tomar decisiones y realizar ajustes.

Para ello, César Díaz de Cerio, tutor de este proyecto, tuvo la oportunidad de realizar diversas mediciones sobre un modelo de ambas modalidades.

La primera moto sobre la que realizó las mediciones fue una Hagon Speedway con motor JAP propiedad del, ahora, expiloto de velocidad, Alberto Puig.

Y la segunda medición se realizó sobre la Dirt Track KR 600 Rotax de Kenny Roberts.

Los datos que se muestran son los tomados con el peso del piloto sobre la moto.

### 5.8.1. Hago Speedway motor JAP



Figura 5.7. Reglajes moto Speedway.

<b>XG</b>	570 mm
<b>YG</b>	650 mm
<b>Batalla</b>	1.350 mm
<b>Ángulo de dirección</b>	22°
<b>Reparto pesos del/tras</b>	42/58

Tabla 5.3. Datos moto Speedway.

### 5.8.2. KR 600 Rotax



*Figura 5.8. Reglajes moto Dirt Track.*

<b>XG</b>	-
<b>YG</b>	-
<b>Batalla</b>	1.425 mm
<b>Ángulo de dirección</b>	24°
<b>Reparto pesos del/tras</b>	48/52

*Tabla 5.4. Datos moto Dirt Track.*

## 6. GEOMETRÍA GENERAL

Antes de comenzar con los parámetros geométricos, se realizará una breve descripción sobre conceptos básicos a considerar en la ingeniería de motocicletas.

### 6.1. INTRODUCCIÓN

#### *Manejabilidad*

La manejabilidad indica la facilidad, el estilo y el tacto con los que la motocicleta responde a las acciones del piloto. Depende fundamentalmente de la geometría, la rigidez del chasis, el peso y su distribución y del tipo de neumáticos y su tamaño. Puede que para algunas personas resulte sorprendente saber que el piloto tiene una gran influencia sobre las características de manejabilidad de una motocicleta. Las respuestas del piloto tienen un gran efecto sobre la interacción global de las fuerzas dinámicas que controlan el movimiento de la moto.

#### *Adherencia o agarre*

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. En la época en que los neumáticos eran relativamente estrechos, los términos adherencia y manejabilidad normalmente iban cogidos de la mano, por lo que su uso era intercambiable. Hoy en día los requerimientos son a veces contradictorios y es necesario encontrar un compromiso que está en función del uso que se le quiera dar a la moto.

#### *Estabilidad*

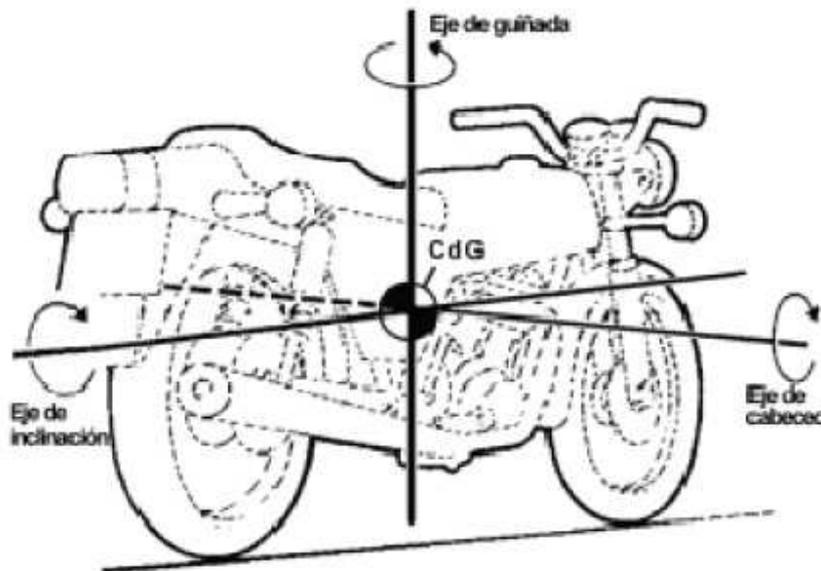
Existen muchos tipos de estabilidad o inestabilidad que pueden influir en una moto. La estabilidad referida a “mantener el equilibrio”, la estabilidad aerodinámica, etc. Pero para los propósitos actuales de este proyecto, la estabilidad es:

- 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.
- La aptitud para volver a la maniobra propuesta cuando alguna fuerza externa produce una perturbación (por ejemplo un bache, viento lateral, etc.).

La manejabilidad, la adherencia y la estabilidad pueden verse afectadas por muchos parámetros y por la interacción entre ellos. El tema es complejo. De todas formas, existen unas cuantas leyes físicas, relativamente simples, que siempre hay que cumplir.

### *Movimientos lineales y angulares*

Si se va a estudiar el comportamiento de cualquier vehículo, primero se necesita considerar cómo se puede mover. Los movimientos lineales se pueden visualizar fácilmente. La moto se puede mover hacia delante y el motor y los frenos son los responsables de controlar el movimiento. Las ondulaciones del terreno y las subidas y bajadas producen un movimiento en dirección vertical, mientras que el viento lateral produce movimientos laterales. Sin embargo, los movimientos angulares ya no son tan familiares. El movimiento angular total puede describirse completamente si se considera el movimiento que tiene lugar alrededor de tres ejes separados. Estos ejes forman ángulos rectos entre ellos y son conocidos como eje de inclinación, eje de cabeceo y eje de guiñada.



*Figura 6.1. Se muestran los tres ejes principales de rotación. La guiñada es el movimiento angular alrededor de un eje vertical. El eje de cabeceo es horizontal y atraviesa la moto de lado a lado. El eje de inclinación también es horizontal y está orientado a lo largo de la moto.*

El movimiento de inclinación es probablemente el más familiar de los tres y es el que ocurre de forma más obvia cuando tumbamos la moto para tomar una curva. La

localización de este eje depende del marco de referencia y por lo tanto puede estar en cualquier lugar en el que se quiera que esté.

La guiñada es el movimiento que tiene lugar alrededor de un eje vertical y ocurre cuando se gira alrededor de una curva. También puede generarse debido a algunas perturbaciones, como por ejemplo un viento lateral.

El cabeceo es el movimiento alrededor de un eje horizontal que pasa de lado a lado de la moto, este movimiento tiene lugar al acelerar o al frenar, y también se produce con las irregularidades de la carretera.

Debido a los grandes ángulos de inclinación que se alcanzan al tomar las curvas, los ejes de cabeceo y guiñada se mueven con respecto a las coordenadas verticales y horizontales globales. Por este motivo es importante tener cuidado al especificar el sistema de ejes que se está utilizando. En análisis de vehículos se utilizan diversos sistemas, pero para los propósitos actuales los dos más importantes serán el de coordenadas de la máquina y el de coordenadas fijo, o de tierra, referidos inicialmente en términos de dirección inicial de viaje, antes de que tenga lugar cualquier maniobra.

## 6.2. CONSIDERACIONES GEOMÉTRICAS

### 6.2.1. Geometría básica de la motocicleta

A continuación se muestran las variables geométricas más características de las motocicletas.

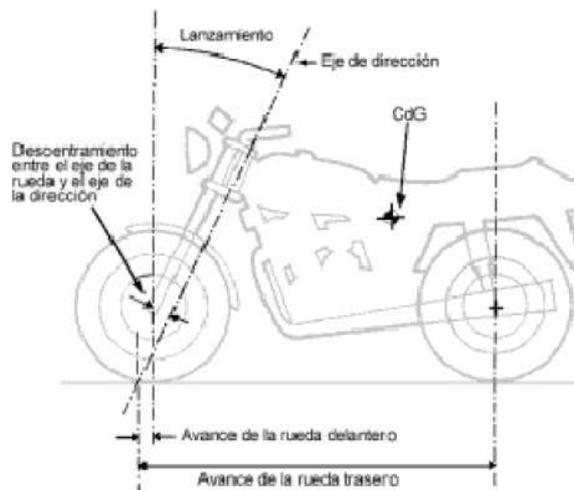


Figura 6.2. Variables geométricas más características.

El eje de dirección es la línea sobre la cual gira el sistema de dirección. El lanzamiento es la inclinación hacia atrás que tiene el eje de dirección. El avance es la distancia que existe al nivel del suelo entre el centro de la huella de contacto del neumático y el punto en el cual el eje de dirección intersecta con el suelo. La rueda delantera y la rueda trasera tienen sus propios valores de avance. El descentramiento existente entre el eje de la rueda el eje de dirección se mide en ángulo recto con respecto a este último. CdG es el centro de gravedad, para casi todos nuestros propósitos nos interesa el centro de gravedad combinado de la moto y el piloto.

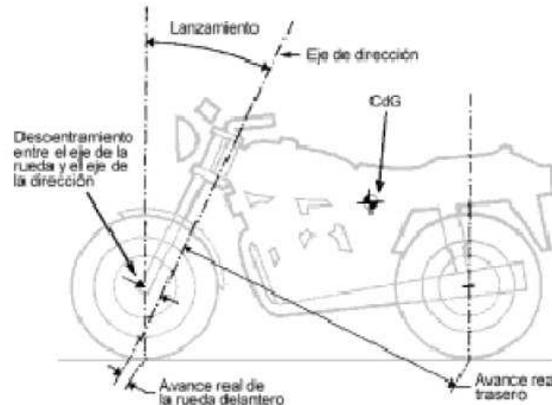


Figura 6.3. Variables geométricas más características.

El avance real se mide en ángulo recto con respecto al eje de dirección. El avance real se reduce con respecto al avance en el suelo multiplicándolo por el coseno del ángulo de lanzamiento. Para un ángulo de lanzamiento típico es aproximadamente el 90%.

### 6.2.2. Avance

La función principal del avance es proporcionar una cierta estabilidad direccional, y también es de gran importancia en el inicio de la fase de inclinación de la moto al tomar una curva. Se puede ver que tanto el neumático delantero como el trasero tocan el suelo por detrás del punto donde el eje de dirección lo hace, y esto provoca un efecto de autocentrado en ambas ruedas. La distancia que existe entre el eje de dirección y el centro de la huella del neumático, medida a ras de suelo, es lo que se conoce habitualmente como avance.

De todas formas, sería más lógico medir la distancia que existe entre la huella de contacto del neumático y el eje de dirección en ángulo recto con respecto a ese eje de dirección. Para cualquier fuerza que se genere en el neumático crea un momento alrededor del eje de dirección. Para distinguir entre estas dos definiciones de avance, cuando sea necesario, se utilizan los términos de avance en el suelo y avance real (la SAE denomina al avance real “Avance Mecánico” para distinguirlo del avance en el suelo). El avance real es aproximadamente el 90 % del avance en el suelo cuando tenemos un lanzamiento de cero grados.

En la siguiente figura se puede comprender como el avance causa un efecto de autocentrado. Se muestra la vista superior de una rueda desplazada de su posición de línea recta.

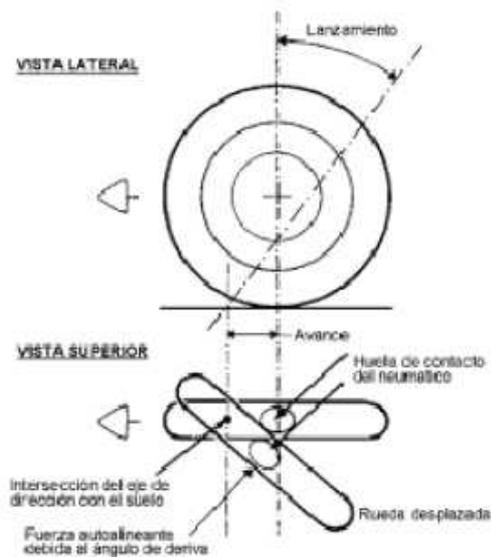


Figura 6.4. El avance positivo y la fuerza lateral debida al ángulo de deriva se combinan para producir un momento alrededor del eje de dirección que tiende a poner la rueda recta otra vez. Esto proporciona un cierto grado de estabilidad en línea recta.

Debido a que existe cierto ángulo entre la rueda y la dirección de viaje (ángulo de deriva es el termino técnico), se genera una fuerza que forma un ángulo recto con respecto al neumático. Como la huella de contacto queda detrás del eje de dirección (avance positivo), esta fuerza actúa a través de un brazo de palanca que genera un momento corrector sobre la rueda girada. Este brazo de palanca es igual al avance real y distinto del avance en el suelo, este es el motivo por el que es más lógico utilizar el avance real. A pesar de la lógica el avance en el suelo es el más especificado comúnmente. Si la dirección se gira debido a alguna causa (por ejemplo mal estado del firme), el avance positivo automáticamente contrarresta el giro proporcionando cierta estabilidad direccional. Esto también interacciona con los efectos estabilizadores de las reacciones giroscópicas. Si la huella de contacto del neumático estuviera por delante del eje de dirección (avance negativo), el momento generado reforzaría la perturbación original y la motocicleta se volvería direccionalmente inestable.

Sería perdonable pensar que, debido a que el avance positivo de la rueda trasera es mucho mayor que el de la delantera (típicamente entre 50 y 100 mm delante y entre 1300 y 1500 mm detrás), la rueda trasera es más importante es este aspecto. Realmente ocurre lo contrario y existen varias razones. Imaginemos que la huella de contacto de cada rueda esta desplazada lateralmente la misma distancia, digamos 12 mm. La rueda delantera estará girada entre 7 y 10 grados alrededor del eje de la dirección; esto hace que el ángulo de la deriva aumente en la misma medida generando una fuerza lateral que tiene en contra únicamente la inercia, relativamente pequeña de la horquilla y la rueda delantera para volver a girar la rueda a su posición en línea recta. De todas maneras, el ángulo de deriva de la rueda trasera será mucho menor (aproximadamente

medio grado) y por lo tanto también será mucho menor la fuerza lateral. No sólo se tiene una fuerza menor, esta fuerza también tiene que actuar sobre una gran parte de la moto y el piloto, que tienen una inercia mucho mayor, de aquí que la respuesta sea mucho menor que en el caso de la rueda delantera.

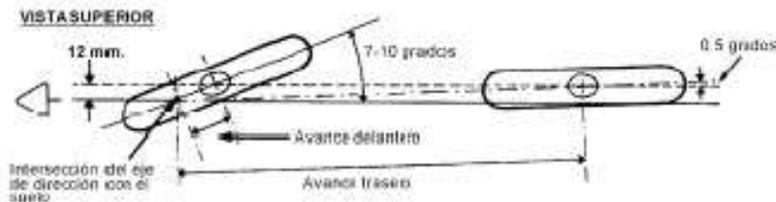


Figura 6.5. A pesar de que la rueda trasera tiene un avance mucho mayor, su ángulo de deriva es mucho menor que el de la rueda delantera para un desplazamiento lateral dado. Por lo tanto el desplazamiento y el efecto autoalineante del avance tiene una significancia mucho menor.

Dicho esto, se puede ver que si se utiliza el avance como medio para incrementar la tendencia a autoalinearse de la ruedas, se encuentra que el beneficio será cada vez menor para un mismo aumento. También se debe subrayar que cualquier perturbación en la dirección de viaje de una moto, debida al desplazamiento lateral de la huella de contacto del neumático, está generada en mucha menor medida por la rueda trasera que por la rueda delantera. Esto es así porque el ángulo con respecto a la dirección de viaje que el deslizamiento produce es mucho más pequeño en la rueda trasera que en la delantera. Resumiendo, podemos decir que aunque el gran lanzamiento de la rueda trasera tiene un efecto de autoalineamiento relativamente pequeño, esto queda compensado porque el efecto del desplazamiento de la rueda en la estabilidad direccional también es pequeño.

Las reacciones giroscópicas también tienen una influencia muy importante sobre la estabilidad direccional, y la cantidad de avance puede tener un gran efecto sobre estas iteraciones.

Es importante darse cuenta de que el avance no tiene un valor fijo para una motocicleta determinada, existen varios factores que hacen que el avance varíe durante la conducción. Algunos son el ángulo de inclinación, el ángulo de giro de la dirección, y también el radio del perfil del neumático. La siguiente figura muestra la variación del avance frente a los ángulos de inclinación y de giro del manillar, para una motocicleta determinada.

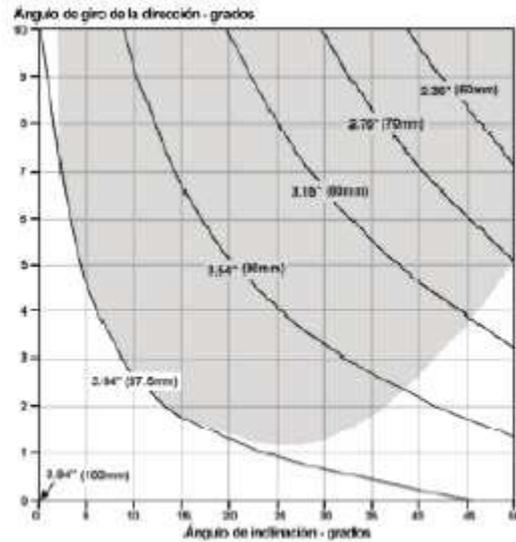


Figura 6.6. Se muestran valores de avance real efectivo para diferentes combinaciones de ángulos de inclinación y de giro de dirección. Hay que hacer notar que no todas las combinaciones de estos ángulos se dan en la práctica, por ejemplo cuando tomamos una curva con 45 grados de inclinación, sería muy improbable querer aplicar un giro de 10 grados a la dirección. El área oscura es una guía aproximada para conocer aquellas combinaciones que serían muy improbables en la realidad. Considerando solo las combinaciones más probables, puede haber hasta un 25 % de reducción en el avance durante la conducción.

Aunque el propósito general del avance de la rueda delantera es proporcionar un cierto grado de estabilidad direccional, se producen también varios efectos secundarios. Se van a considerar dos de ellos.

### 1) Efecto direccional

Si se inclina una moto parada hacia un lado y entonces se gira el manillar, la pipa sube o baja dependiendo de la posición de la dirección. El peso de la moto que actúa en la huella de contacto del neumático produce un par alrededor del eje de la dirección que tiende a girar la dirección a la posición en la que la pipa está más baja (la posición de mínima energía potencial).

Para un avance dado, este ángulo de la dirección se ve afectado por el lanzamiento y por el diámetro de la rueda, como se verá después. Si se tiene un avance positivo, como es normal, entonces el efecto de inclinación es hacia el interior de la curva (sería en el otro sentido para un avance negativo). En movimiento, el peso efectivo de la moto y el piloto que soporta la pipa se transmite al suelo a través de la huella de contacto del neumático. El peso y las fuerzas que se generan en las curvas se compensan en gran parte una con las otras y el par resultante en el manillar debido a este aspecto es bastante pequeño. Los neumáticos anchos y el hecho de que el piloto se descuelgue al tumbar muestran que

existe un momento residual y de aquí que la cantidad de avance de la rueda delantera (aparte de otros parámetros) afecte al valor del momento que el piloto debe aplicar en el manillar (por lo tanto al tacto de la dirección) para mantener un ángulo de la dirección correcto de acuerdo al radio de la curva y la velocidad de la moto.

## 2) Tacto en línea recta

Como ya se sabe, incluso cuando se circula en línea recta la dirección se siente más suelta en firmes húmedos o resbaladizos que en los que están secos. Esto es debido a que nuestra aparente línea recta está formada por una serie de curvas de corrección, con manillar girando levemente de lado a lado todo el tiempo. Como se ha visto antes, un pequeño desplazamiento de la dirección causa un ángulo de deriva en el neumático, que produce un par autoalineante. Para un ángulo de deriva dado este par depende de las propiedades del neumático, de la adherencia superficial y del avance. Así, a través de la dirección, tenemos una indicación (dependiente del avance) de las condiciones de la carretera y de la cantidad de agarre disponible.

### 6.2.3. Lanzamiento (inclinación del ángulo de la dirección)

El motivo de la existencia del lanzamiento es menos fácil de entender. Todas las motocicletas corrientes que se producen tienen una pipa inclinada entre 23 y 30 grados con respecto a la vertical (a menudo 27 grados, que parece ser una cifra mágica). No hay una explicación simple, existen varios factores que son relevantes.

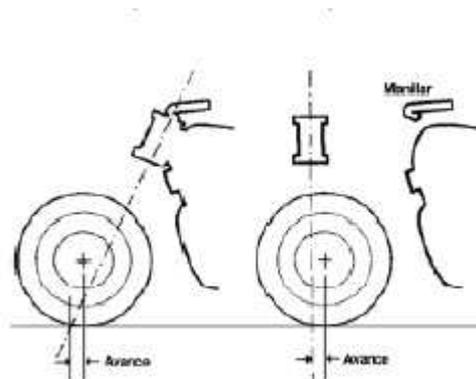


Figura 6.7. Con una pipa de dirección convencional, resulta conveniente tener un lanzamiento normal (izquierda) por facilidad de construcción del chasis y para conseguir un montaje directo del manillar. Para un mismo avance, una pipa de dirección vertical (derecha) da problemas en ambos aspectos.

En muchos diseños de motos con tren delantero alternativo (con el eje de dirección en el buje de la rueda), simplemente por cuestiones de espacio, el eje de la rueda no tiene decalaje con respecto al eje de dirección; o sea que el avance es totalmente dependiente del ángulo de lanzamiento, el cual suele estar normalmente entre 10 y 15 grados para proporcionar el resultado adecuado. Este es un ángulo mucho menor que el habitual, y sin embargo las motos con este tipo de tren delantero son reconocidas por su estabilidad y su buen comportamiento direccional. Esta reputación puede deberse a alguna causa que no sea el ángulo de lanzamiento; pero ciertamente parece que este alejamiento de la norma no es perjudicial y de hecho puede ser beneficioso.

Es interesante hacer notar que ha existido una tendencia gradual hacia el uso de ángulos de lanzamiento pequeños, particularmente en motos deportivas y de competición. Valores de lanzamiento que eran considerados como inestables unas décadas atrás, se emplean ahora de forma habitual, variando entre 20 y 23 grados. De todos modos, parte del motivo de este cambio probablemente viene dado de nuevo por la facilidad de construcción.

Durante las últimas décadas se ha tendido a utilizar distribuciones de peso con el tren delantero más cargado, de forma que el piloto se ha movido más hacia delante. Obviamente, estos cambios son más fáciles de llevar a cabo con una pipa de dirección más adelantada y por lo tanto con un lanzamiento menor. Esta reducción del lanzamiento también ayuda a compensar las mayores fuerzas de dirección que aparecen gracias al aumento de carga sobre la rueda delantera.

En la siguiente figura se muestran tres posibilidades que proporcionan un mismo avance de suelo. El avance real se ve reducido en los dos primeros casos. La reducción es de un 10% para los valores de lanzamiento convencionales, y alrededor de un 3% en el caso de 15 grados de lanzamiento.

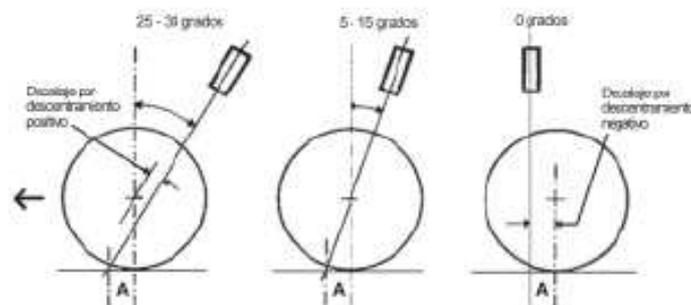


Figura 6.8. Tres posibles ángulos de lanzamiento que proporcionan el mismo avance de suelo. Izquierda: sistema convencional. Centro: ángulo de lanzamiento cuando no existe decalaje (como en muchos tipos de trenes alternativos). Derecha: ángulo de lanzamiento de cero grados (eje de dirección vertical) que proporciona un decalaje negativo.

**1) Reducción del efecto provocado por el lanzamiento**

Para un valor dado de avance en el suelo, el par autoalineante en la rueda delantera y la horquilla depende de la longitud del brazo de palanca desde el centro de la huella de contacto hasta el eje de dirección, medido en ángulo recto con respecto a ese eje.

En la figura se puede ver claramente que este brazo de palanca se acorta conforme el lanzamiento aumenta. En la práctica, esto significa que se necesita más avance en el suelo conforme el ángulo de lanzamiento se hace mayor. Con esta base se puede decir que el ángulo de lanzamiento tiene un efecto anti-avance.

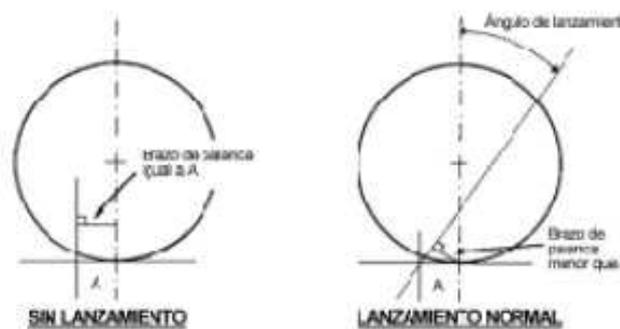


Figura 6.9. Un lanzamiento positivo reduce el par autoalineante para un valor determinado de avance. Avance real = avance en el suelo multiplicado por el coseno del ángulo de lanzamiento.

Esta reducción en el avance real se acentúa aún más cuando se aplica cierto ángulo a la dirección. La siguiente figura muestra la reducción del avance en el suelo para distintos ángulos de lanzamiento y varios ángulos de giro de la dirección hasta un valor máximo de 80 grados.

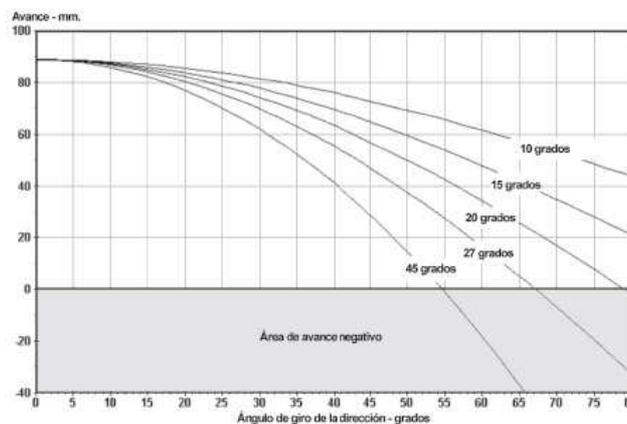


Figura 6.10. Reducción del avance en suelo para diferentes valores de lanzamiento según el ángulo de giro de la dirección.

Las motos de carretera raramente permiten girar la rueda más de 45 grados, pero esta gráfica muestra que con un ángulo de lanzamiento típico de 27 grados el avance en suelo se ve reducido de 89 mm a 46 mm con un giro de la dirección de 45 grados. La siguiente figura muestra los mismos datos en el caso del avance en la rueda trasera. Se puede comparar la diferencia existente entre ambas gráficas con pequeños ángulos de giro. En estos ejemplos se ha utilizado una motocicleta con un neumático de 300 mm de radio y 89 mm de avance en el suelo.

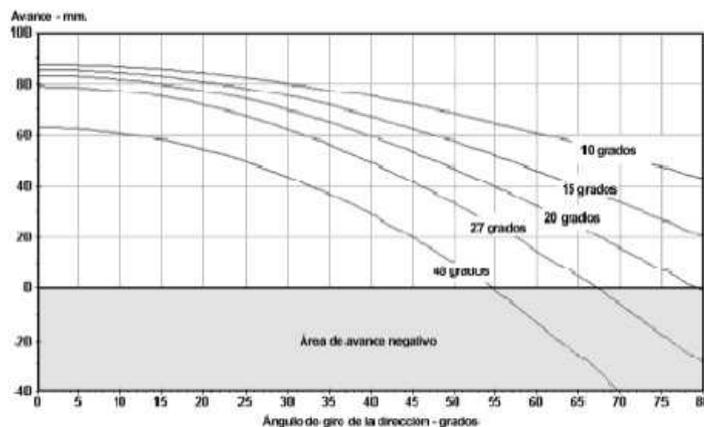


Figura 6.11. Gráficos equivalentes a los de la figura anterior excepto en que las curvas muestran los efectos en el avance trasero.

## 2) Avance negativo

Con grandes ángulos de giro de la rueda, el lanzamiento puede llegar a hacer que el avance sea negativo, si bien los ángulos de giro muy amplios solo pueden conseguirse a muy bajas velocidades. Aunque para obtener un avance negativo hacen falta ángulos de giro de la dirección muy grandes, con ángulos de giro pequeños todavía se produce cierta reducción en el avance. Esto puede provocar la necesidad de utilizar un avance inicial grande. Se puede conseguir una demostración convincente de este efecto levantando la rueda delantera de una bicicleta y girando el manillar lo suficiente para obtener un avance negativo, con lo cual la rueda intentara girar aun más. Ésta es una de las razones por las que las motos de trial suelen utilizar ángulos de lanzamiento muy pequeños, ya que sus maniobras a baja velocidad generalmente implican grandes ángulos de giro del manillar. Con un ángulo de lanzamiento tan pequeño se produce una reducción menor del avance efectivo.

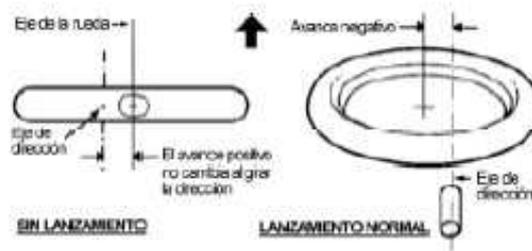


Figura 6.12. En el dibujo la dirección está girada 90 grados hacia la izquierda. Tenemos un avance totalmente positivo con cero grados de lanzamiento y el efecto de avance negativo que puede ocurrir con un ángulo de lanzamiento normal.

### 3) Caída de la pipa de dirección

Con una motocicleta normal (esto es, con avance positivo) en posición vertical, la pipa de dirección bajará conforme se gire el manillar hacia un lado (con un avance negativo, lo cual no es normal, la pipa subiría). Cuanto mayor sea el ángulo de lanzamiento, mayor será la caída. Esto puede apreciarse mejor observando un ángulo de lanzamiento exagerado, como muestra la siguiente figura.

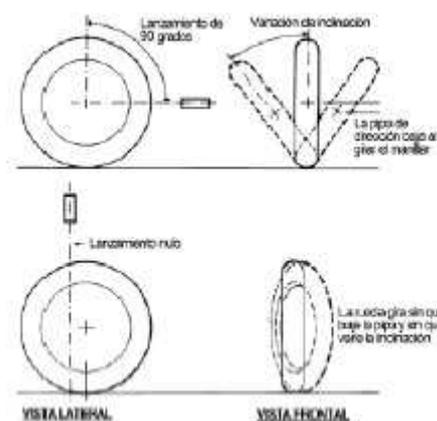


Figura 6.13. Con un ángulo de lanzamiento de 90° (arriba), si giramos el manillar podremos ver fácilmente la caída de la pipa y la variación del ángulo de comba de la rueda. Con cero grados de lanzamiento (abajo) estos efectos no tienen lugar.

Esta caída tiende a trabajar contra el efecto autoalineante del lanzamiento, porque para volver a girar el manillar hasta la posición de línea recta, se debe levantar el considerable peso que soporta la pipa de dirección.

Este efecto es perjudicial para el equilibrio (esta es otra razón para que las motos de trial tengan ángulos de lanzamiento pequeños) y para la estabilidad direccional mientras se

viaja en línea recta, sin embargo, ayuda a girar la rueda cuando se inclina la moto al tomar una curva. De todos modos, es importante no sobrevalorar tales efectos. Las siguientes figuras ponen los valores reales en perspectiva.

La primera muestra la caída de la pipa, y la segunda muestra el par que hay que aplicar en el manillar para volver a levantar la moto. Con un lanzamiento de 27 grados y un ángulo de giro del manillar de 45 grados, la caída de la pipa es de sólo 8,5 mm aproximadamente, y el par necesario está por debajo de 5 Nm por cada 50 kgf en el tren delantero. Con ángulos de giro del manillar menos extremos el efecto es mucho menor. Por ejemplo con un lanzamiento de 27 grados y 10 grados de giro del manillar, la caída es inferior a medio milímetro.

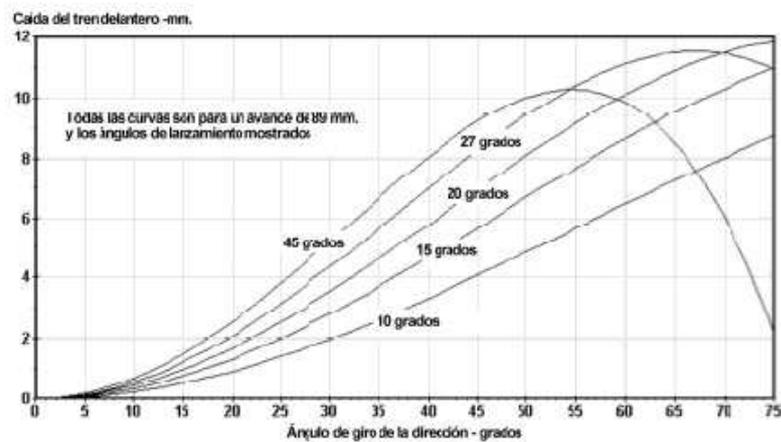


Figura 6.14. Caída de la pipa para una moto en posición vertical, para distintos ángulos de lanzamiento y varios ángulos de giro de la dirección.

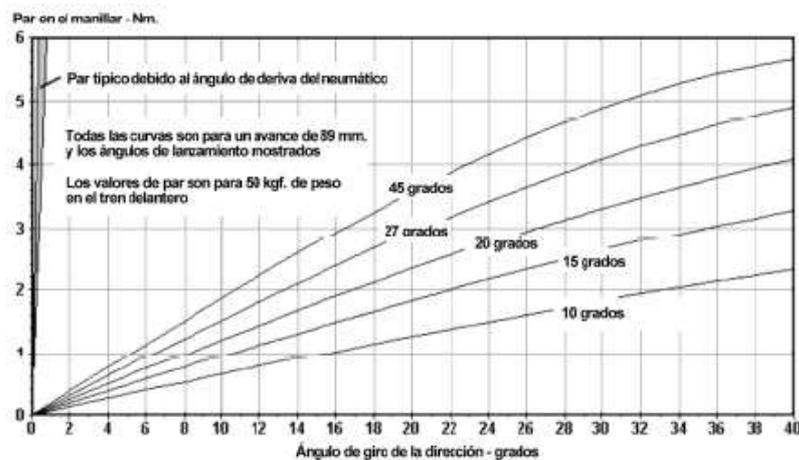


Figura 6.15. Par adicional medio necesario para volver a colocar la dirección en la posición de línea recta, debido a la caída de la pipa. Nótese que este par es aproximadamente un 1% del par debido al ángulo de deriva en el caso de pequeños ángulos de giro de la dirección.

#### 4) Ángulo de comba

A pesar de que este efecto es menos pronunciado con ángulos de lanzamiento convencionales, todavía persiste, y eso significa que, cuando una motocicleta está negociando una curva con la dirección apuntando hacia el interior, la rueda delantera se inclina más que la trasera.

#### 5) Descentramiento del eje de la rueda

Aunque un ángulo de lanzamiento normal tiende a reducir el valor del avance en el suelo, un lanzamiento de cero grados requeriría menos avance y por lo tanto menos descentramiento. En general, siendo el resto de valores iguales, es una ventaja tener un descentramiento mínimo, ya que esto normalmente proporciona una menor inercia alrededor del eje de dirección.

Un comentario habitual suele ser que, debido a que el decalaje desplaza el centro de gravedad de la rueda y la horquilla por delante del eje de giro de la dirección, se produce un par que tiende a girar la rueda hacia el interior de la curva mientras la moto está inclinada. Esto es cierto solo cuando la moto está parada. En la siguiente figura se muestra lo que ocurre al tomar una curva, la fuerza centrífuga intenta girar la rueda hacia el exterior de la curva, pero la fuerza de gravedad a su vez intenta girar hacia el interior, de forma que equilibra casi totalmente este efecto. Con unos hipotéticos neumáticos con anchura cero y el piloto situado en el plano medio de la moto, estos dos efectos estarían perfectamente equilibrados. Así que el efecto resultante del decalaje influye muy poco en las características de autoalineamiento de la máquina, excepto cuando los neumáticos son muy anchos.

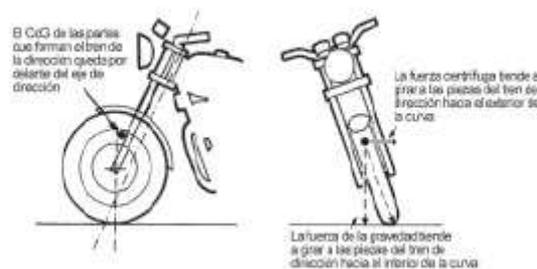


Figura 6.16. Si el centro de gravedad de las piezas que giran alrededor del eje de dirección está adelantado con respecto a este eje, se producen momentos de giro debidos a la fuerza centrífuga y a la fuerza de gravedad. Estos momentos se contrarrestan el uno con el otro siempre que el centro de gravedad del piloto se encuentre en el plano medio de la motocicleta. Si el piloto se descuelga de la moto se reduce el momento gravitacional y se incrementa el momento centrífugo, por lo que la dirección tiende a girar hacia el exterior de la curva.

## 6) Efectos giroscópicos

Cuando se explican los efectos producidos por la precesión giroscópica, el asunto se trata como si el eje de la dirección fuera vertical (esto es, lanzamiento cero). En el caso de un ángulo de lanzamiento normal esta situación se modifica: las componentes de las fuerzas de precesión que actúan en un sentido se reducen y aparecen otras nuevas que actúan en sentido contrario, con lo que se reduce el efecto de las fuerzas giroscópicas.

## 7) Ángulo de giro de la dirección

El lanzamiento reduce el ángulo de giro efectivo que existe entre el neumático y el suelo, comparado con el ángulo que giramos el manillar. Esto se puede ver fácilmente con el habitual truco de visualizar un lanzamiento exagerado de 90 grados. En la figura siguiente no existe un verdadero ángulo de giro de la rueda con respecto al suelo, en cambio el ángulo de comba es mucho mayor, y para un lanzamiento de 27 grados, el ángulo efectivo de giro de la rueda queda reducido aproximadamente a un 90% del ángulo que gira el manillar.

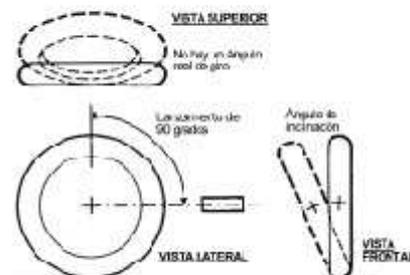


Figura 6.17. Este ejemplo extremo muestra como el lanzamiento reduce el ángulo de giro efectivo al nivel del suelo.

La siguiente figura es un dibujo de contorno que muestra los ángulos de giro efectivos en un rango de ángulos de inclinación, para lanzamientos de 0 y 27 grados. Nótese que el ángulo de giro efectivo aumenta conforme aumenta el ángulo de inclinación.

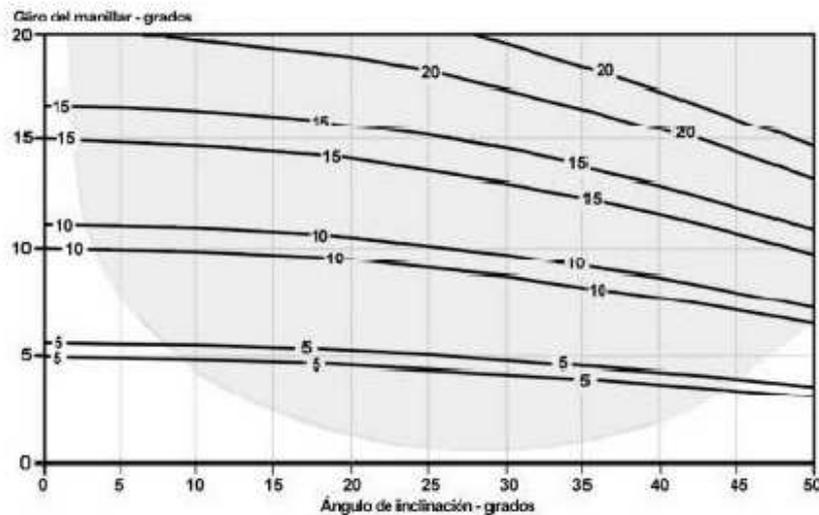


Figura 6.18. Se muestra el ángulo de giro efectivo al nivel del suelo en función del ángulo de giro del manillar en un rango de ángulos de inclinación. La curva superior de cada pareja es para un lanzamiento de 27 grados, mientras que la línea inferior es para un lanzamiento cero. Por ejemplo, para cero grados de inclinación, con 27 grados de lanzamiento, el ángulo de giro del manillar debe aumentar para conseguir el ángulo de giro efectivo deseado. Para conseguir un ángulo de giro de 10 grados de la rueda con respecto al suelo, necesitamos girar el manillar aproximadamente 11 grados.

Por otro lado, el aumento del ángulo de inclinación tiende a aumentar el ángulo de giro efectivo, a pesar de que esto no es muy importante dentro del rango normal de uso. La zona oscura indica el área aproximada de combinaciones de inclinación y giro que tienen un uso muy improbable.

### Resumen de efectos debidos al lanzamiento

Excepto para el caso de mínimo descentramiento, parece que un lanzamiento distinto de cero grados no es una buena cosa. Si esto es así, ¿por qué las motocicletas convencionales se manejan y giran tan bien? La respuesta reside en los pequeños ángulos de giro que se utilizan en una conducción normal. Los efectos perjudiciales del lanzamiento son más pronunciados con grandes ángulos de giro de la dirección. El efecto autoalineante debido al peso puede o no puede ser beneficioso (es posible tener demasiado de una cosa buena). Cuando se toma una curva se necesita una velocidad y un ángulo de inclinación determinados. Si son demasiado grandes el piloto deberá aplicar un esfuerzo contrario en el manillar, si son demasiado pequeños necesitará girar hacia el interior de la curva. El ángulo de giro de la dirección necesario para un determinado ángulo de inclinación depende de muchos parámetros, y por lo tanto no es posible construir un efecto autoalineante que sea perfecto en todas las condiciones (lo cual es otro ejemplo de la inevitable necesidad de llegar a un compromiso). Un cambio del tipo de neumático sería suficiente para alterar las cosas.

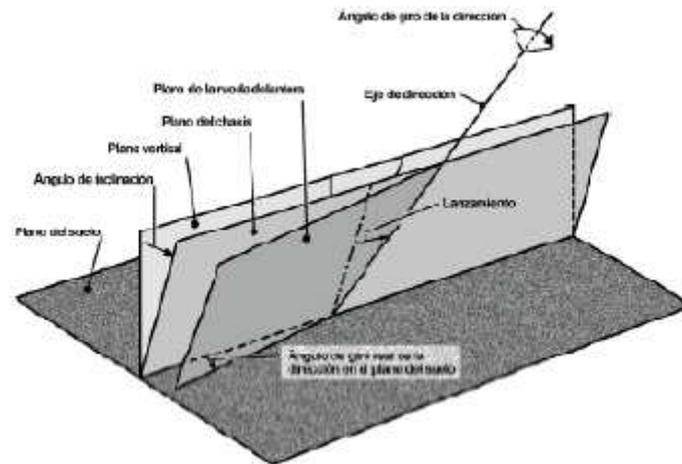


Figura 6.19. Esta representación de una moto, como dos planos que intersectan a lo largo del eje de dirección, puede ayudar a visualizar varios efectos geométricos debidos a la inclinación y el giro. Uno de los planos representa la mayor parte del chasis incluyendo la rueda trasera, el otro es el plano central de la rueda delantera. El plano frontal puede rotar alrededor del eje de dirección contenido en el plano trasero y el plano trasero puede inclinarse respecto a la vertical.

#### 6.2.4. Distancia entre ejes

La distancia entre los ejes de las ruedas tiene diversos efectos, pero en general, cuanto mayor es esta distancia, mayor es la estabilidad direccional y mayor el esfuerzo necesario para negociar las curvas. Existen tres razones principales para esto.

##### 1) Ángulo de giro requerido

La siguiente figura muestra como, para una curva dada, una motocicleta con una gran distancia entre ejes necesita girar más la rueda delantera hacia el interior de la curva.

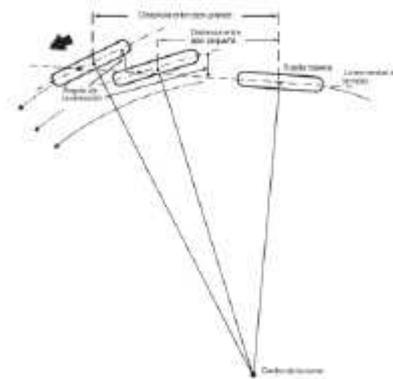


Figura 6.20. Para un radio de curva dado, una distancia entre ejes mayor necesita un ángulo de giro mayor. Este diagrama muestra esto para un sistema de giro basado en Ackerman, pero se pueden aplicar consideraciones similares a casos más reales con ángulos de deriva reales.

Consecuentemente es necesario un mayor esfuerzo para una determinada flexión de la rueda delantera (por ejemplo debido a los baches) tendría un efecto menor en la estabilidad direccional.

Una consideración práctica en el caso de las motos de trial es que, para un nivel máximo de giro del manillar debido a los topes de dirección, el círculo de giro mínimo es menor con una distancia entre ejes corta. Por este motivo, las motos de trial tienen distancias entre ejes tan cortas como 1240-1270 mm.

## 2) Ángulo de la rueda trasera

También está claro en la siguiente figura que, para una determinada flexión lateral, el ángulo formado entre la rueda trasera y la dirección de viaje es menor con una distancia entre ejes grande, lo cual mejora la estabilidad direccional.

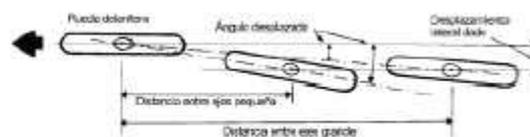


Figura 6.21. Una distancia entre ejes grande mejora la estabilidad direccional al reducirse los desplazamientos laterales de la rueda trasera.

### 3) Efectos de inercia

La distancia entre ejes tiene un efecto sobre la transferencia de peso que tiene lugar durante la frenada y la aceleración. Para una altura dada del centro de gravedad, cuanto mayor sea la distancia entre ejes, menor será la transferencia de peso. También, los momentos de inercia de los planos de cabeceo y guiñada se incrementarán, lo cual hará que la moto sea más estable y perezosa.

#### *Resumen de efectos relacionados con la distancia entre ejes*

Al igual que con otros muchos aspectos de diseño, la distancia entre ejes es un compromiso y varía con el uso que pretendamos darle a la motocicleta. Las motos necesitan una buena manejabilidad, principalmente a baja velocidad, y por lo tanto tienen una distancia entre ejes pequeña. Las grandes motocicletas de turismo necesitan una buena estabilidad direccional para conseguir una conducción relajada, por ello estas motos tienen mayores distancias entre ejes (alrededor de 1470-1520 mm), aunque una distancia entre ejes demasiado larga reduce la manejabilidad entre el tráfico. Algunas motos tipo FF, como por ejemplo la Quasar (fuera de producción), tienen distancias entre ejes de 1950 mm o más. Una deportiva debe llegar a un compromiso entre la necesidad de tener una buena estabilidad a alta velocidad, y ser ágil a la entrada de las curvas. La tendencia actual está entre 1270 mm en las motos más pequeñas y 1400 mm para las motos más grandes y rápidas.

#### 6.2.5. Peso (masa) y su posición

En términos generales, cuanto menos masa tenga una moto, mucho mejor. Bajo la influencia de una fuerza dada, cuanto menor sea la masa más rápido acelerará. Esto no sólo significa una enérgica respuesta para un motor con una potencia dada; también implica obtener una motocicleta mucho más sensible a cualquier fuerza que haga el piloto. Tan importante como la masa que tenga la motocicleta es su distribución y la ubicación del centro de gravedad, tal y como muestran las siguientes consideraciones.

##### 1) Equilibrio

Un peso contenido y un centro de gravedad bajo ayudan a tener un buen equilibrio.

La figura muestra como, para un determinado grado de inclinación, el par desestabilizador es directamente proporcional al peso y a la altura del centro de gravedad.

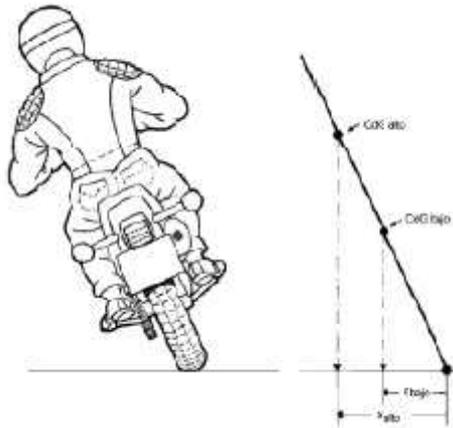


Figura 6.22. El par desestabilizador es igual al peso ( $Wt$ ) multiplicado por el brazo de palanca ( $x$ ). Dado que el brazo de palanca es proporcional a la altura del centro de gravedad, un centro de gravedad alto proporciona un mayor efecto desestabilizador.

## 2) Transferencia de carga

Durante la frenada, la carga vertical se transfiere desde la rueda trasera hacia la delantera. Durante la aceleración la transferencia es en sentido contrario. Aumentando la distancia entre ejes disminuye la transferencia de carga, lo mismo ocurre si se baja el centro de gravedad o se reduce la masa. La transferencia de carga no se ve afectada por la localización longitudinal del centro de gravedad, aunque esto, como es obvio, controla la carga estática que soporta cada rueda.

## 3) Tracción

Dado que la fuerza propulsora que la rueda trasera puede transmitir al suelo es proporcional a la carga que soporta la rueda, una distribución de peso cargada atrás mejora la tracción. De todas formas, se debe tener en cuenta que también es necesario que la rueda delantera se mantenga en contacto con el suelo para poder girar. Una distribución de peso que cargue más el tren delantero ayuda a mejorar la estabilidad direccional, como ocurre por ejemplo con un dardo o una flecha.

## 4) Angulo de inclinación

El ángulo de inclinación necesario para equilibrar la fuerza centrífuga cuando se da una curva se ve afectado por la altura del centro de gravedad.

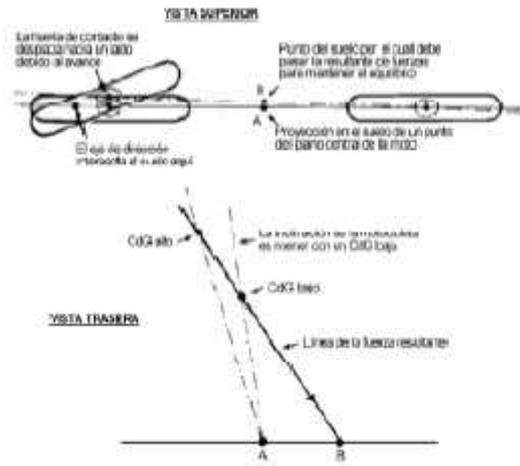


Figura 6.23. Aunque un centro de gravedad bajo requiere un menor grado de inclinación, en la práctica el efecto es menor al verse contrarrestado por un efecto opuesto debido a la anchura de los neumáticos.

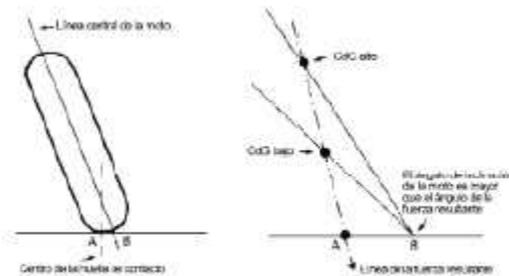


Figura 6.24. Se pueden ver diferentes ángulos de inclinación requeridos con distintas alturas del centro de gravedad, debido a la anchura del neumático. Este efecto es opuesto al mostrado antes.

### 5) Movimientos angulares

En lo que concierne a movimientos lineales; es la cantidad de masa de la motocicleta la que es importante. Pero cuando se originan los movimientos angulares de cabeceo (alrededor de un eje transversal), guiñada (alrededor de un eje vertical) e inclinación (alrededor de un eje longitudinal), la distribución de la masa es importante porque es la que gobierna, lo que se llaman momentos de inercia. Estos son una medida del efecto de inercia alrededor de cada eje en particular y su valor determina la facilidad con que podemos aplicar una aceleración angular a la moto alrededor de cada eje en particular y su valor determina la facilidad con que podemos aplicar una aceleración angular a la moto alrededor de ese eje.

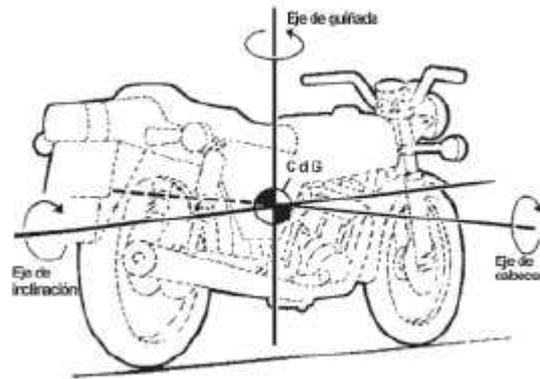


Figura 6.25. Los tres ejes principales alrededor de los cuales una moto puede rotar. El dibujo sólo muestra la dirección de estos ejes, dibujados a través del centro de gravedad. Su ubicación real depende de muchos factores dinámicos.

## 6) Cabeceo

La inercia de cabeceo controla la velocidad con que la motocicleta se hunde hacia adelante o hacia atrás ante diversas situaciones como frenar, acelerar o circular por un firme bacheado. Excepto en trial y motocross, no existe gran necesidad de una respuesta rápida de giro alrededor del eje por lo que una gran inercia de cabeceo no es muy dañina. De hecho, puede contribuir a mejorar el confort al acelerar o al pasar sobre baches. No es fácil definir geoméricamente el eje alrededor del cual una moto cabecea debido a que varía con la configuración de la moto. Por ejemplo, si la motocicleta tiene suspensión delante, y no la tiene detrás, girará alrededor del eje de la rueda trasera, mientras que una moto con la configuración contraria (muelle detrás, rígida delante) rotaría alrededor del eje de la rueda delantera. En el caso de una moto convencional, con muelles en ambos trenes, el eje de cabeceo depende de la geometría de la suspensión y de la dureza de los muelles. De los tres posibles movimientos angulares, el cabeceo es el único que supone fundamentalmente un movimiento de la masa suspendida con respecto a las ruedas, ya que la inclinación y la guiñada son movimientos relativos a las coordenadas de la tierra.

## 7) Guiñada

Cualquier vehículo está sujeto a cierto grado de aceleración de guiñada al entrar en una curva. En este caso, la elección entre un momento de inercia grande o pequeño tiene efectos contrapuestos. Por ejemplo, un valor alto mejora la estabilidad direccional mientras que un valor bajo facilita los cambios rápidos de dirección y minimiza los efectos de un derrapaje. Dentro de los límites prácticos, parece mejor conseguir un bajo momento de la misma. Naturalmente, esto hace que se reduzca el momento de cabeceo también.

## 8) Inclinación

El momento de inercia alrededor del eje de inclinación es la suma de las componentes individuales de todas las masas multiplicada por el cuadrado de la distancia que las separa de un eje de inclinación que pase por el centro de gravedad. Un momento de inercia bajo alrededor del eje de inclinación es deseable para conseguir sin mucho esfuerzo cambios rápidos en el ángulo de inclinación de la moto.

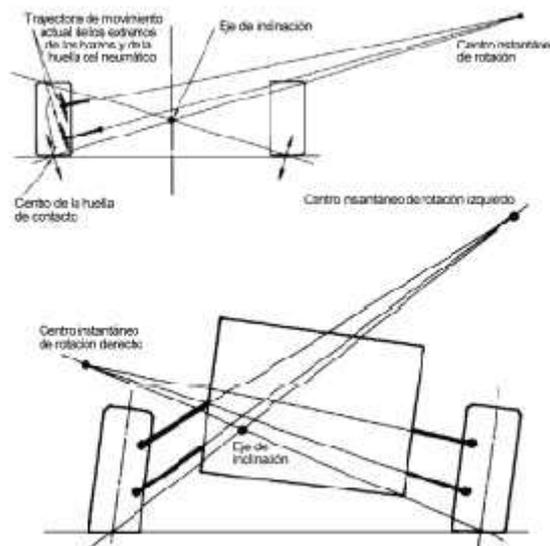


Figura 6.26. El dibujo superior muestra cómo, con un sistema de dos brazos articulados, se define un centro instantáneo de rotación. El movimiento instantáneo de la huella de contacto del neumático forma un ángulo recto con la distancia que lo separa de su centro instantáneo de rotación. El punto donde se encuentran los radios derecho e izquierdo se define como Centro de inclinación. Éste es el único punto que satisface el movimiento del lado derecho y del izquierdo, en cualquier posición de inclinación. El dibujo inferior muestra como se mueve el centro de inclinación conforme el coche rota y los ángulos de los brazos articulados son distintos en ambos lados.

Los términos eje de inclinación y centro de inclinación se han usado desde hace mucho tiempo en el mundo de los automóviles y están geoméricamente definidos. La vista lateral de la suspensión define el eje para cualquier ángulo de inclinación de la moto. La figura anterior muestra el concepto de centro de inclinación de un coche. El eje de inclinación es simplemente el eje que une los centros de inclinación delantero y trasero, los cuales suelen estar normalmente a diferentes alturas. Puede resultar de ayuda visualizar el movimiento del cuerpo con respecto a las ruedas y al CdG. En esta época del diseño mediante ordenador el uso del concepto de centro de inclinación (“roll”) está ya algo anticuado en el mundo de las cuatro ruedas.

Resulta algo irónico y poco afortunado, que estos términos se hayan puesto de moda recientemente en el mundo del motociclismo, cuando no tienen nada que ver. Las motos, al ser vehículos con tracción a una rueda no tienen mecanismos de suspensión

similares a los de los coches, que van de lado a lado y por lo tanto el significado de este término al hablar de motos es a menudo completamente malentendido.

La siguiente figura muestra como la fuerza centrífuga actúa sobre el centro de gravedad, que suele estar siempre por encima del centro de inclinación. La distancia entre el centro de inclinación y el centro de gravedad produce un par (normalmente llamado momento de inclinación) que hace que el coche se incline.

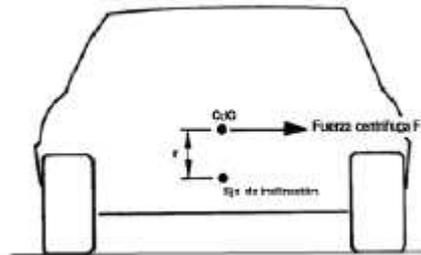


Fig. 6.27. En las curvas la fuerza centrífuga produce un par alrededor del eje de inclinación  $F \cdot r$ , llamado momento de inclinación o par de inclinación.

Si  $r = 0$  entonces no existe giro, lo cual produce otros efectos indeseables como una extensión excesiva de la suspensión.

Al comparar los coches y las motos, se ve claramente que en este tema los conceptos no son equivalentes. Al contrario que en un coche, en una moto el momento de inclinación que crea la fuerza centrífuga se equilibra exactamente con el momento de inclinación opuesto creado por la acción de la fuerza de la gravedad que se genera al inclinar la moto. Sólo durante la fase transitoria de inclinación existe un momento de inclinación que no está equilibrado, y su origen es distinto que en el caso de los coches. Si se tuviese que aplicar el criterio basado en los coches para determinar el eje de inclinación en una motocicleta, tendría que estar al nivel del suelo, a través de las huellas de contacto de los neumáticos, para producir un par de inclinación adecuado.

Quizás lo mejor sería desarrollar un eje de inclinación específico para motocicletas, pero en realidad el eje de inclinación puede estar donde se quiera, todo depende de nuestro punto de referencia. Se puede estar mirando desde el espacio exterior, desde la superficie de la tierra en un punto fijo, desde la superficie de la tierra siguiendo a la moto, o desde distintas posiciones de la propia moto. Cada punto de vista produce un eje de inclinación distinto. Imaginemos que se mira la moto por detrás desde un punto fijo en el suelo, y que la dejamos a medio camino durante la fase de inclinación. En ese punto la moto se estará moviendo lateralmente hacia el centro de la curva, pero también tendrá un movimiento de rotación tal y como se muestra en la siguiente figura.

Estos dos movimientos juntos producen un movimiento combinado en el centro de gravedad. Claramente entonces, el centro de rotación de este gran arco está en algún

sitio por debajo del nivel del suelo. Debido a que las componentes relativas de los movimientos lateral y longitudinal varían a lo largo del proceso de entrada en la curva, el eje de inclinación definido de esta forma variará de posición también. Esta es una forma válida de observar los movimientos de inclinación, pero ciertamente tiene muy poca utilidad para nosotros.

Volviendo a la figura, se van considerar las cosas de otra forma. Vistos desde el suelo, todos los puntos de la moto tienen una combinación de movimiento lateral y el resto de puntos están rotando alrededor de él. Visto así, si se necesita un eje de inclinación teórico, este sería el más lógico.



Fig. 6.28. Se muestran los movimientos lateral y angular.



Figura 6.29. Al añadir los dos movimientos se produce un movimiento combinado con un radio más grande.

Otras opiniones sugieren que la moto rota alrededor del centro de gravedad. No es difícil ver que si esto fuera así, la huella de contacto del neumático perdería el contacto con el suelo conforme la moto fuera rotando. Aunque para estimar el comportamiento

normalmente se calcula el momento de inercia de inclinación alrededor del centro de gravedad, esto no quiere decir que éste tenga que ser considerado el eje de inclinación.

En la práctica parece que no hay ninguna razón útil para desarrollar conceptualmente un eje de inclinación para motocicletas.

### 6.2.6. Centro de gravedad óptimo

La situación del centro de gravedad determina qué transferencia de pesos se produce durante la frenada y durante la aceleración. Por lo tanto, controla la cantidad de tracción disponible en cada rueda.

Si se supone que la situación ideal en la aceleración consiste en que la rueda trasera empezara a patinar precisamente cuando la delantera empezara a despegarse del suelo (y, durante la frenada, que la rueda delantera se bloqueara precisamente cuando la trasera empezara a despegarse del suelo), entonces es posible diseñar la geometría de la moto de tal manera que se llegue a estas situaciones.

Si la moto tiene una masa “m”, su centro de gravedad está a una distancia “x” por detrás de la rueda delantera y a una distancia “y” del suelo y la batalla es “w”, entonces se pueden calcular las fuerzas que actúan sobre la moto. Las reacciones entre el suelo y los neumáticos son “R” (delantero) y “R<sub>1</sub>” (trasero), y el coeficiente de rozamiento entre el neumático y la carretera es “μ”.

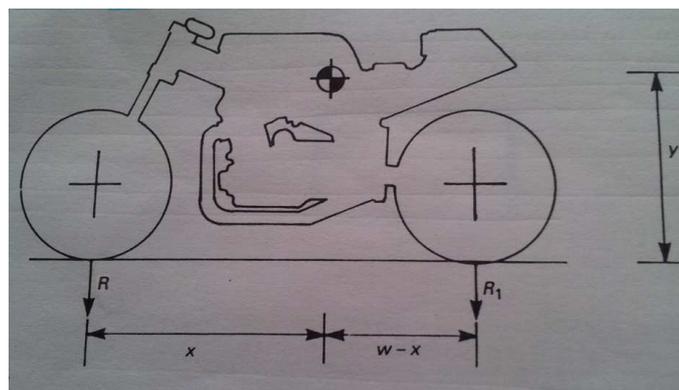


Figura 6.30. Disposición del centro de gravedad.

### Aceleración

La máxima fuerza que puede transmitir la rueda trasera es

$$R_1\mu$$

a partir de dicho valor, el neumático patinaría. Si la rueda delantera se empieza a despegar del suelo en este punto, entonces

$$R_1 = mg$$

es decir, ahora todo el peso se carga sobre la rueda trasera.

El par que actúa en el sentido de hacer volcar la moto es

$$R_1 \mu y = mg \mu y$$

y el efecto del peso de la moto, que se opone a dicho par, es

$$mg(w - x)$$

los dos están en equilibrio, por lo tanto

$$mg(w - x) = mg \mu y$$

$$w - x = \mu y$$

### ***Frenada***

La fuerza máxima que puede transmitir la rueda delantera es

$$R\mu$$

que se iguala con

$$mg\mu$$

en el punto en que la rueda trasera empieza a despegarse del suelo. El par de volcado es

$$mg\mu y$$

como antes (pero en sentido contrario), y el efecto estabilizador del peso de la moto es

$$mgx$$

Por lo tanto

$$mgx = mg\mu y$$

$$x = \mu y$$

A partir de las dos ecuaciones

$$y = w/2\mu$$

y

$$x = w/2$$

Por lo tanto, el centro de gravedad debe estar a mitad de camino de la batalla, y su altura depende de la batalla y de la fricción que den los neumáticos.

Estos valores no son perfectamente aplicables, pero cuando los niveles de fricción son bajos, el piloto puede mejorar la tracción elevando el centro de gravedad (levantando el cuerpo en una moto de carreras en pista, poniéndose de pie en una todo terreno) y echándose hacia atrás en las aceleraciones, hacia delante en las frenadas (así modifica el valor de  $x$ ). Lo más probable es que los factores que marquen el límite sean el patinado de la rueda trasera o que se bloquee la delantera; habrá peso sobre la rueda trasera, por lo que se puede mejorar el esfuerzo de frenada utilizando también el freno de la rueda trasera, además del delantero, cuando estamos en condiciones de poca adherencia.

Por último, estas proporciones  $x$  e  $y$  no tienen en cuenta los desplazamientos de la suspensión debidos a la trasferencia de pesos. Por lo tanto, las dimensiones  $x$  e  $y$  nos

dan la posición del centro de gravedad durante la aceleración o la frenada. Con la frenada, la suspensión delantera se comprime, y el centro de gravedad se baja (también se reducirá la batalla, si la horquilla es telescópica); por ello, los valores de  $x$  e  $y$  con la moto en situación estática serán algo superiores a los que se dependen de las ecuaciones citadas arriba. De la misma manera, la suspensión trasera se comprime durante la aceleración.

Es complicado calcular el recorrido o carrera de la suspensión.

Durante los virajes, es preciso que ambas ruedas tengan la misma adherencia; por ello, es deseable que el centro de gravedad esté cerca del centro de la batalla. La altura del centro de gravedad será una solución de compromiso. Cuanto más alto esté, más transferencia de pesos se producirá, y la transferencia de pesos es necesaria en proporción a la cantidad de aceleración o de frenada que se está transmitiendo, de tal manera que la rueda correspondiente reciba mayor tracción. Cuando el centro de gravedad se eleva, también es preciso que el ángulo de inclinación sea ligeramente menor; esto ha aumentado con los anchos neumáticos modernos.

La ventaja de un centro de gravedad bajo es que la masa de la moto tendrá menor inercia con respecto a su eje de inclinación (que estará a nivel del suelo, o inmediatamente por encima de dicho nivel). Esta inercia menor supondrá que la moto se inclinará más fácilmente, y responderá mejor a la conducción. Además, cuando se está inclinando, será más fácil detener esta inclinación e invertir su sentido; esto también se aplica a los casos de derrapaje, en que la moto alcanza una inercia de desplazamiento lateral.

Durante los virajes, los neumáticos tienen que soportar las fuerzas de viraje además de las de transmisión de potencia; por ello, lo más probable es que el factor limitador sea el derrapaje/patinado más que el volcado o el caballito. Si se descubre en la práctica que la rueda tiende a bloquearse o a patinar con demasiada facilidad, entonces se deberá elevar el centro de gravedad y/o acercarlo a la rueda en cuestión. Si el factor limitador es que una rueda se despega del suelo, entonces habrá que bajar el centro de gravedad y/o acercarlo a la rueda que se eleva (en las motos suele ser posible hacer caballito durante los virajes; durante la frenada esto equivale a levantarse la rueda trasera, pero este efecto normalmente se percibiría como un patinazo de la rueda trasera al frenar con la delantera en una curva).

### 6.3. ELECCIÓN INICIAL DE LOS PARÁMETROS

Tras observar la base teórica, la elección de los parámetros geométricos de la motocicleta debe ser una suma de compromisos, no existe un diseño perfecto. Hay muchas opciones que son válidas y pueden dar un muy buen resultado.

#### *Solución adoptada*

En cuanto a las dimensiones y geometría de la moto, se ha optado por basarse en la geometría de las motos de Speedway. Estas motos son las más rápidas y especializadas sobre pistas ovaladas de tierra.

Al no tener suspensión, estas motos también evitan las sacudidas que elimina el Tracklever, pero deben limitarse a pistas muy bien alisadas especialmente para ellas. Otra ventaja de la falta de suspensión es que se puede retrasar la posición del motor, con lo que se mejora la tracción, y poner más bajo el asiento del piloto para bajar el centro de gravedad del conjunto.

El Tracklever permite conseguir la geometría de una moto de Speedway pero conservando una suspensión efectiva y a la vez logrando la eficacia de éstas sobre pistas ovals de tierra. La razón de esto es que, al no tener las motos de Speedway suspensión, al acelerar, la transferencia de pesos no provoca movimiento de las ruedas respecto al chasis, y por lo tanto, tampoco variaciones tanto de batalla como de posición del centro de gravedad. Que es lo mismo que sucede con el Tracklever si se escogen los parámetros adecuados (como ya se explicó con el apartado del “squat”).

La suspensión trasera se hunde en la aceleración lo mismo que en reposo, porque la fuerza de reacción y la de la cadena tienen la dirección del basculante. El único efecto es una fuerza de compresión en el basculante. No obstante, la suspensión sigue funcionando en los baches de la misma manera que si no estuviera acelerando.

Sí que hay una deformación de los neumáticos, pero ésta también va a estar presente en una moto con suspensión, por lo que no se tendrá en cuenta.

Las medidas obtenidas a partir de las motos de Speedway son las que debe tener la moto cuando está proporcionando la máxima aceleración. Aquí la aceleración provoca que la fuerza de reacción sobre la rueda delantera se haga cero porque todo el peso va a la rueda trasera.

Las dimensiones que deberá tener la moto cuando se acelere al máximo, es decir, cuando todo el peso se coloque sobre la rueda trasera, serán las siguientes:

<b>XG</b>	570 mm
<b>YG</b>	650 mm
<b>Batalla</b>	1.350 mm
<b>Ángulo de dirección</b>	22°
<b>Reparto pesos del/tras</b>	42/58

Tabla 6.1. Datos escogidos.

El ángulo “anti-squat”, definido por la batalla y la altura del centro de gravedad, será

$$\tau = \arctg\left(\frac{Y_G}{w}\right) = \arctg\left(\frac{650}{1350}\right) = 25,7^\circ$$

De modo que el **basculante** de la suspensión tendrá que tener esta inclinación respecto al suelo. Su longitud se establece en **600 mm**.

El **avance**, nuevamente similar a las motos de Speedway, queda en **76mm**. Ciertamente es poco para una moto de calle, pero una dirección muy ágil permite un mayor control de la trayectoria en las pistas ovals.

Se sabe con certeza que una motocicleta con estos valores tendrá un buen comportamiento ya que son valores reales del mundo profesional del motociclismo. Las grandes marcas de motocicletas que compiten, tienen una larga experiencia en el diseño y construcción de vehículos de dos ruedas por lo que su fiabilidad es más que reconocida.

## 7. ANÁLISIS DE ESFUERZOS

En este apartado se estudiarán las fuerzas que actúan sobre la estructura de la motocicleta cuando ésta se encuentra en instantes de máximo esfuerzo. Es de vital importancia este apartado, ya que es esencial tener bien planteadas las fuerzas resultantes para introducirlas posteriormente en el análisis por elementos finitos de manera que éste sea lo más exacto posible.

Con la geometría que se ha definido para el modelo a diseñar se asumirán una serie de condiciones en las que se calcularán las cargas límite que actuarán sobre la motocicleta. Estas fuerzas serán las que actúan en los neumáticos a través del suelo y que luego se transmitirán al vehículo. El principal objetivo de conocer estas cargas es realizar un diseño apropiado del chasis y del basculante para las condiciones que se podrán dar en la máquina durante una carrera y en su propio funcionamiento.

Conocidas las cargas se podrá predimensionar el chasis. Se tratará de que no esté sobredimensionado para no tener más peso del debido, ya que cuanto menor sea el peso del vehículo mejor resultado dará en carrera. Por otro lado, tendrá que diseñarse de manera que aguante todos los esfuerzos que puedan actuar sobre él sin que sufra ningún tipo de rotura. Por lo que este es un apartado esencial en el diseño general de la motocicleta, ya que no solo incumbe al chasis, sino también a otros elementos que tiene el vehículo, como puede ser el basculante.

Lo primero será predefinir el peso total que vaya a tener el vehículo. **Se considera que el peso de la moto en seco será de 80 kg, el peso del piloto de 70kg y el peso de la gasolina, lubricantes y fluidos de refrigeración será de 10kg.**

m (vacío)	80 kg
m (total)	160 kg

Tabla 7.1. Masa vacía y total de la motocicleta.

El coeficiente de adherencia que se puede encontrar en los circuitos en los que se realiza la práctica del Dirt Track, puede variar desde 0,1, en el caso de barro muy blando, hasta, 0,5 en el caso de tierra dura. Aun así, es probable que la motocicleta se llegue a emplear en terreno asfaltado, de modo que **se considerará un coeficiente de adherencia mayor,  $\mu=1$** , ya que será en este caso cuando se produzcan las mayores cargas debido a tracción.

## 7.1. ESTADO ESTACIONARIO

Se ha comentado mucho a lo largo del proyecto la importancia que tiene el CdG sobre el comportamiento de la motocicleta. Este parámetro influye de manera considerable también en las cargas que vaya a sufrir la motocicleta. En este caso las fuerzas verticales de reacción entre las ruedas y el suelo están muy influenciadas.

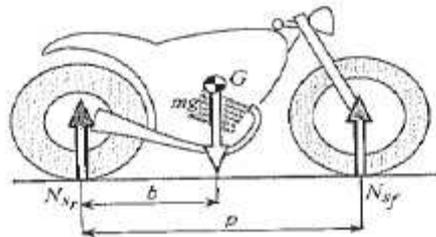


Figura 7.1. Fuerzas verticales estáticas.

Si se consideran las fuerzas verticales estáticas, es decir, como si estuviese el vehículo estacionado, se cumplen las siguientes ecuaciones:

$$mg = Nr + Nf = 1568 \text{ N}$$

$$Nf = mg \cdot \left(\frac{b}{p}\right) = 662 \text{ N}$$

$$Nr = mg \cdot \left[\frac{p - b}{p}\right] = 906 \text{ N}$$

Es evidente que la suma de las dos normales deberá ser igual al peso total de motocicleta, mientras que las normales en cada rueda dependen de la posición del centro de gravedad. En este caso al estar la moto más cargada en la parte trasera la fuerza vertical en la rueda trasera será mayor.

## 7.2. RESISTENCIA AERODINÁMICA

Todas las influencias aerodinámicas que actúan en la motocicleta se pueden representar mediante tres fuerzas, que actúan sobre el centro de presiones. Dicho centro se encuentra ligeramente adelantado y por encima del centro de gravedad. Estas tres fuerzas crean sus respectivos momentos en el centro de gravedad (momentos de inclinación, guiñada y cabeceo), pero debido al pequeño valor que tendrán estos momentos y a la cercanía del centro de presiones y el centro de gravedad, asumiremos que las tres fuerzas actuarán en este último. Estas fuerzas son:

- Resistencia al avance, en oposición al desplazamiento longitudinal.
- Fuerza de elevación que tenderá a elevar la motocicleta.
- Fuerza lateral que tenderá a empujar la motocicleta hacia un lado.

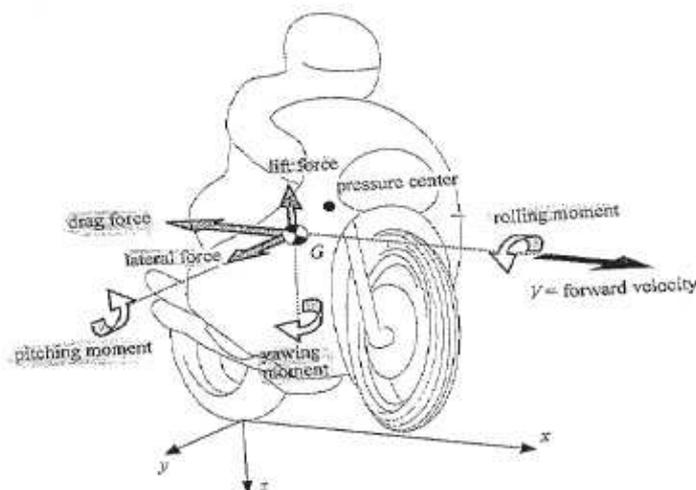


Figura 7.2. Fuerzas aerodinámicas.

Las fuerzas más importantes serán la resistencia al avance y la elevación, que serán las que se van a calcular. La fuerza de resistencia al avance influirá en la máxima velocidad que pueda obtener el vehículo y en el comportamiento de la aceleración. Mientras que la fuerza de elevación reducirá la carga en el neumático delantero y a veces incluso en el trasero.

$$F_D = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot V^2 \text{ (resistencia al avance)}$$

$$F_L = \left(\frac{1}{2}\right) \cdot \rho \cdot C_L \cdot A \cdot V^2 \text{ (elevación)}$$

El valor de  $C_D$  está fuertemente influenciado por la forma de la motocicleta, y en concreto del carenado. El valor del coeficiente no es muy significativo. El valor en el que verdaderamente hay que fijarse es el **área de resistencia aerodinámica ( $C_D \cdot A$ )**. Las motocicletas de motocross, en las cuales el piloto va erguido, suelen tener un valor alrededor de **0,5 m<sup>2</sup>**, valor que se ha escogido para nuestro modelo.

La elevación de la motocicleta es peligrosa porque reduce la carga en las ruedas y por lo tanto la adherencia en el neumático. Este aspecto también está fuertemente influenciado por la motocicleta y su carenado. Al igual que con la resistencia aerodinámica el valor significativo es el producto  $C_L \cdot A$ , que suele estar en un rango de 0,06 hasta 0,12 m<sup>2</sup>. Para este modelo se ha escogido un valor de **0,08 m<sup>2</sup>**, bastante pequeño, ya que este efecto no suele ser muy importante en este tipo de motocicletas.

$\rho$ (aire en condiciones normales, kg/m <sup>3</sup> )	1,167
$C_D \cdot A$ (área de resistencia aerodinámica, m <sup>2</sup> )	0,5
$C_L \cdot A$ (área de elevación, m <sup>2</sup> )	0,08

Tabla 7.2. Datos de resistencia aerodinámica.

La velocidad máxima de nuestra motocicleta se obtendrá en quinta marcha, y al máximo régimen del motor.

$$7500 \cdot \frac{1}{60} \cdot 2\pi \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{0,791} \cdot \frac{16}{42} \cdot 0,325 = 41 \frac{m}{s} = 147,6 \text{ km/h}$$

Para una **velocidad máxima** aproximada que pueda alcanzar la motocicleta de **41 m/s (147,6 km/h)**, se muestran los valores de las fuerzas aerodinámicas:

$$F_D = 490,43 \text{ N}$$

$$F_L = 78,46 \text{ N}$$

### 7.3. RESISTENCIA CAUSADA POR LA PENDIENTE

La fuerza de resistencia causada por la pendiente de la carretera es igual a la componente del peso en la dirección de la motocicleta.

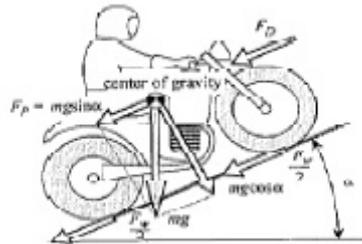


Figura 7.3. Resistencia causada por la pendiente de la carretera.

$$F_p = mg \cdot \text{sen}(\alpha)$$

Donde  $\alpha$  representa la pendiente del plano de la carretera. Si lo calculamos para una pendiente de  $\alpha = 10^\circ$ , entonces

Gravedad (m/s)	9,81
Ángulo $\alpha$ (rad)	0,175

Tabla 7.3. Datos de la resistencia causada por la pendiente de la carretera.

$$F_p = 290,4 \text{ N}$$

En los próximos cálculos no se tendrá en cuenta esta fuerza ya que la pendiente que puede tener el plano del suelo en cualquier circuito de Dirt Track es prácticamente nula.

#### 7.4. MOVIMIENTO LINEAL ESTACIONARIO (EQUILIBRIO)

Se introducirán 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 ( $F_L = 0$ ).
- Debido a que la superficie de la carretera es lisa, la fuerza que se oponga al movimiento de avance será tan solo la fuerza de resistencia aerodinámica  $F_D$ .

Como se ha dicho antes, se considera que el centro de presiones coincide con el centro de gravedad. Además de la fuerza aerodinámica comentada habrá más fuerzas que actúen en la motocicleta:

- El peso ( $mg$ ) que actúa en el centro de gravedad.
- Fuerza de avance  $S$ , que el suelo aplica a la moto en el punto de contacto de la rueda trasera.
- Las fuerzas verticales de reacción  $N_f$  y  $N_r$  entre los neumáticos y el plano de la carretera.

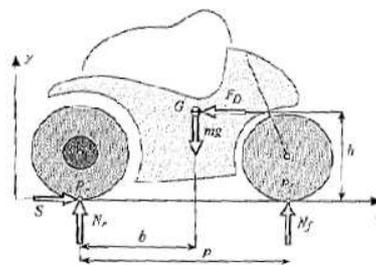


Figura 7.4. Movimiento lineal estacionario.

Las ecuaciones de equilibrio de la motocicleta permitirán conocer valores desconocidos de las fuerzas de reacción  $N_f$  y  $N_r$ , una vez que la fuerza del peso  $mg$ , la fuerza de avance  $S$  y la fuerza aerodinámica  $F_D$ , sean conocidas. Al ser estado estacionario no habrá aceleración y el vehículo se encontrará a velocidad constante.

Equilibrio de fuerzas horizontales:

$$S - F_D = 0$$

Equilibrio de fuerzas verticales:

$$mg - N_r - N_f = 0$$

Equilibrio de momentos respecto al CdG:

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

Las reacciones verticales sobre las ruedas serán:

$$N_f = mg \cdot \left(\frac{b}{p}\right) - S \cdot (h/p)$$

$$N_r = mg \cdot \left(\frac{(p - b)}{p}\right) + S \cdot (h/p)$$

Vemos como estas reacciones están compuestas por un término estático que depende de la distribución de peso y un término dinámico que depende directamente del empuje y la altura del CDG y es inversamente proporcional a la distancia entre ejes. Este segundo término es denominado transferencia de carga.

$$F_D = 490,43 \text{ N}$$

$$S = 490,43 \text{ N}$$

$$N_f = 425,91 \text{ N}$$

$$N_r = 1142,09 \text{ N}$$

Se puede ver ahora como las cargas dinámicas varían de las estáticas calculadas anteriormente. Ahora está más cargada la rueda trasera debido a la transferencia de cargas.

## 7.5. MOVIMIENTO LINEAL TRANSITORIO

Ahora se va a considerar la motocicleta en estado transitorio con un movimiento rectilíneo. Se asumen las hipótesis del apartado anterior, de forma que las ecuaciones de equilibrio de fuerzas verticales y de momentos, seguirán siendo válidas para este caso.

Equilibrio de fuerzas verticales:

$$mg - N_r - N_f = 0$$

Equilibrio de momentos respecto al CdG:

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

La ecuación de equilibrio de fuerzas horizontales dependerá de si se está acelerando o frenando.

### 7.5.1. Aceleración

En el caso de la aceleración, además de las ecuaciones del equilibrio de las fuerzas verticales y equilibrio de momentos respecto del CdG, podemos definir una nueva:

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

Donde  $S$  es la fuerza de aceleración y  $F_D$  la fuerza aerodinámica que se opone al avance.

#### 7.5.1.1. Limitada por el motor

En este caso se obtendrá la aceleración y fuerza de empuje máximo que podrá proporcionar el motor. No se realizarán ningún otro tipo de consideraciones y el único limitante será el motor.

Equilibrio de fuerzas horizontales:

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

Donde

$$S = T \cdot \omega_m / V$$

Siendo  $T$  el par del motor y  $\omega_m \cdot V$  el ratio entre la velocidad angular de motor y la velocidad lineal de la motocicleta.

Para calcular dicho ratio es necesario conocer la relación de marchas del motor.

Relación marchas	
Relación primaria	3
Marcha 1	2
Marcha 2	1,444
Marcha 3	1,181
Marcha 4	0,954
Marcha 5	0,791
Dientes piñón	16
Dientes reenvío	18
Dientes plato	42
Radio neumático trasero	325 mm

Tabla 7.4. Relación de marchas empleadas.

Y sabemos, por la ficha técnica del motor empleado, que el máximo par se entrega a **4.900 r.p.m.** ( $513,13 \frac{rad}{s}$ ), con un valor de **73,58 N · m.**

De modo que el ratio, para la primera marcha lo calculamos como:

$$\frac{\omega_m}{V} = 3 \cdot 2 \cdot \frac{42}{16} \cdot \frac{1}{0,325} = 48,46 m^{-1}$$

Y la velocidad a la que se produce:

$$V = 10,59 \frac{m}{s} = 38 \text{ km/h}$$

A esa velocidad la fuerza aerodinámica que se opone al avance será de:

$$F_D = 32,72 \text{ N}$$

Y el empuje conseguido en la rueda trasera es:

$$S = 3565,69 \text{ N}$$

Por lo tanto en ese régimen de funcionamiento de mayor rendimiento del motor y a esa velocidad la aceleración sería de (despreciando la fuerza de rodadura y las inercias):

$$\ddot{x} = \frac{S - F_D}{m} = 22,08 \text{ m/s}^2$$

### 7.5.1.2. Limitada por la tracción

Asumiendo que el motor proporciona la potencia adecuada, la fuerza de aceleración debe ser menor, o como mucho igual, al producto del coeficiente de adherencia y la carga vertical  $N_r$ .

$$S \leq \mu \cdot N_r$$

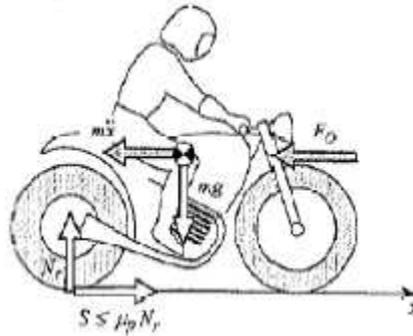


Figura 7.5. Aceleración limitada por la tracción.

Si se recuerda que:

$$N_r = mg \cdot \frac{p-b}{p} + S \cdot \frac{h}{p}$$

Se tiene ahora que:

$$\ddot{x} \leq \frac{\mu \cdot g \cdot \left(\frac{p-b}{p}\right)}{\left(1 - \mu \cdot \frac{h}{p}\right)} - \frac{F_D}{m}$$

La máxima aceleración se obtiene cuando la  $F_D$  es cero. Esto sucederá con velocidad nula. A medida que la velocidad aumenta, la aceleración, bajo la limitación de la condición de fricción, disminuye. Esto ocurre porque parte de la fuerza de aceleración es igualada a la fuerza aerodinámica y no es utilizada para acelerar el vehículo. Por lo tanto la máxima aceleración se dará a velocidad nula.

$$\ddot{x} = 10,92 \text{ m/s}^2$$

$$S = 1747,2 \text{ N}$$

$$N_r = 1747,2 \text{ N}$$

Es curioso ver como la carga vertical en la rueda trasera es mayor que todo el peso de la motocicleta. Esto en realidad es imposible, ya que la suma de las dos fuerzas normales no puede superar dicho peso. Por lo tanto se concluye que la motocicleta, aunque el motor lo permita, no puede alcanzar nunca semejante aceleración, ya que existiría otro condicionante limitador en el que la fuerza de aceleración fuese menor, como es el siguiente.

### 7.5.1.3. Limitada por la rodadura

La condición limitante de rodadura ocurre cuando la carga en la rueda delantera se reduce a cero. Esta situación se expresa de la siguiente manera:

$$N_f = mg \cdot \left(\frac{b}{p}\right) - S \cdot \left(\frac{h}{p}\right) = 0$$

De donde sacamos que

$$\ddot{x} = g \cdot \left(\frac{b}{h}\right) - \frac{F_D}{m}$$

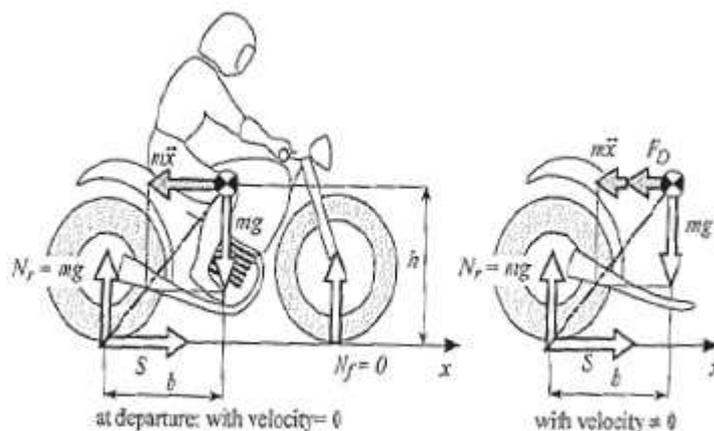


Figura 7.6. Aceleración limitada por condición de rodadura.

La aceleración que impide el levantamiento de la rueda delantera depende del ratio  $b/h$ .

De manera que conforme la velocidad de avance aumenta gradualmente, la aceleración que provoca el levantamiento de la rueda delantera disminuye. Esto ocurre porque el levantamiento de la rueda delantera es favorecido por la fuerza aerodinámica de oposición al avance. Por lo tanto la máxima aceleración bajo este limitante ocurrirá con velocidad nula, y por lo tanto  $F_D$  nula.

$$\ddot{x} = 8,59 \text{ m/s}^2$$

$$S = 1374,40 \text{ N}$$

$$N_r = 1568 \text{ N}$$

$$N_f = 0 \text{ N}$$

## 7.5.2. Frenada

### 7.5.2.1. Limitada por la tracción

Para evaluar el rol del freno trasero bajo la limitación del deslizamiento hay que tener en cuenta una serie de consideraciones. Durante la desaceleración, la carga en la rueda delantera aumenta, mientras la carga de la rueda trasera disminuye, por lo que se deduce que ocurre una transferencia de cargas de la rueda trasera a la rueda delantera.

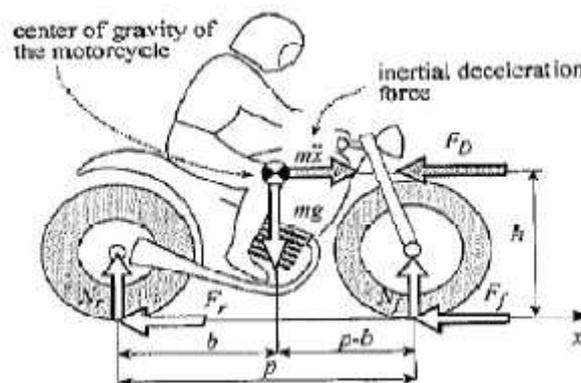


Figura 7.7. Frenada limitada por tracción.

Se tienen tres ecuaciones debidas al equilibrio de las fuerzas horizontales y verticales, y al equilibrio de momentos alrededor del CdG.

$$m \cdot \ddot{x} = -F_r - F_D$$

$$mg - N_r - N_f = 0$$

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

La carga dinámica delantera será la suma de la carga estática y la carga dinámica. La carga trasera, sin embargo, será la diferencia entre la carga estática y la transferencia de carga.

$$N_f = mg \cdot \left(\frac{b}{p}\right) + F_r \cdot (h/p)$$

$$N_r = mg \cdot \left(\frac{p - b}{p}\right) - F_r \cdot (h/p)$$

Se ve claramente como la transferencia de carga  $F_r \cdot \frac{h}{p}$  es proporcional a la fuerza de frenada y a la altura del centro de gravedad, y es inversamente proporcional a la batalla.

Para evitar que el neumático deslice en la frenada, la fuerza que se aplique en la frenada no debe exceder el producto de la carga dinámica que actúa en el neumático multiplicado por el coeficiente de adherencia. Este producto representa la frenada máxima aplicable en el neumático, que será la fuerza de frenada en el límite de empezar a deslizar.

$$F_r \leq \mu \cdot N_r$$

Por lo tanto, sustituyendo

$$\ddot{x} \geq -\frac{\mu \cdot g \cdot \left(\frac{p - b}{p}\right)}{\left(1 + \mu \cdot \frac{h}{p}\right)} - \frac{F_D}{m}$$

La máxima desaceleración se obtiene cuando la  $F_D$  es máxima (ya calculada en apartados anteriores).

$$\ddot{x} = -6,89 \text{ m/s}^2$$

$$F_r = 611,97 \text{ N}$$

$$N_r = 611,97 \text{ N}$$

$$N_f = 956,03 \text{ N}$$

### 7.5.2.2. Limitada por el vuelco

En una motocicleta con frenos en ambos trenes, al aumentar la fuerza de frenada total, la carga vertical de la rueda trasera va disminuyendo hasta que llega a cero. En este caso la condición limitante será el vuelco de la motocicleta, es decir cuando la carga dinámica vertical en el neumático trasero alcanza el valor cero.

Bajo esta condición, la carga dinámica frontal sería igual a todo el peso de la motocicleta y la dirección de la resultante de la carga dinámica y la fuerza de frenada pasaría a través del centro de gravedad de la motocicleta.

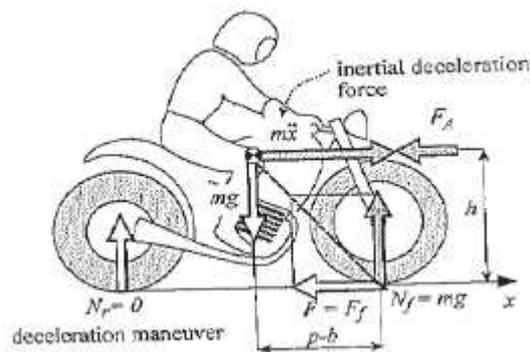


Figura 7.8. Frenada limitada por vuelco.

Como se ha mencionado en apartados anteriores, nuestra motocicleta solo dispone de freno en el tren trasero, por lo que no es posible alcanzar la situación de vuelco (en situaciones normales).

## 7.6. CURVA EN ESTADO ESTACIONARIO

En curva se producirán las mayores fuerzas laterales y una serie de comportamientos a analizar. Durante el movimiento estacionario en curva la motocicleta puede tener un comportamiento subvirador, sobrevirador o neutro. Para mantener el equilibrio el piloto aplica un par en el manillar que puede ser cero, positivo (en la misma dirección que la rotación del manillar) o negativo (en la dirección opuesta a la rotación del manillar). Estas características son importantes y definen la sensación de manejabilidad de la motocicleta.

### 7.6.1. Inclinación de la moto en giro estático

#### *Ángulo ideal de inclinación*

La motocicleta en un giro estático se mantiene por la aplicación de dos momentos. El generado por la fuerza centrífuga que tiende a devolver la moto a su posición vertical y el propio peso que trata de inclinar más la moto.

Se consideran las siguientes hipótesis:

- La motocicleta rueda a velocidad constante en una curva de radio constante (condiciones estado estacionario).
- Los efectos giroscópicos son despreciables.

Considerando el espesor de los neumáticos nulos el equilibrio de momentos nos permite obtener el ángulo de inclinación en términos de velocidad y radio de giro  $R_C$ .

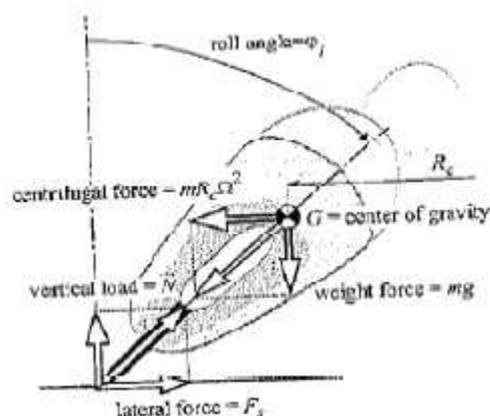


Figura 7.9. Ángulo ideal de inclinación.

$$Fuerza centrífuga = R_C \cdot m \cdot \Omega^2$$

$$V = \Omega \cdot R_C$$

$$\text{Ángulo de inclinación } (\varphi_i) = \arctan \frac{F_c}{m \cdot g} = \arctan \frac{R_C \cdot \Omega^2}{g} = \arctan \frac{V^2}{g \cdot R_C}$$

Y por otro lado, conocemos la masa total de la motocicleta y el coeficiente de rozamiento del terreno, por tanto podemos calcular la fuerza centrífuga máxima que pueden soportar los neumáticos sin entrar en derrapada.

$$Fuerza centrífuga = R_C \cdot m \cdot \Omega^2 = \mu \cdot N = 1600 \text{ N}$$

Por lo tanto, conociendo la fuerza centrífuga máxima que se puede alcanzar en una curva, podemos obtener la velocidad máxima para cualquier radio dado. Para un radio dado, la respuesta más comprometida se obtendrá a alta velocidad. E igualmente, para una velocidad dada, la respuesta será más comprometida cuanto más cerrada sea la curva.

Si despejamos las ecuaciones anteriores:

$$\varphi_i = 0,79 \text{ rad} = 45^\circ$$

En realidad este ángulo es una aproximación, ya que el espesor del neumático no es nulo. Además si el piloto está aplicando sobre el manillar un momento que hace que se produzca un ángulo de giro el punto de contacto del neumático se desplaza y la línea que une los puntos de contacto no está contenida en el plano x.

### Ángulo de inclinación efectivo

Ahora se van a considerar las mismas suposiciones que en el caso anterior, excepto que la anchura de los neumáticos será igual a  $2t$ . Esto hace que el ángulo de inclinación necesario para equilibrar la fuerza centrífuga y el peso sea mayor.

$$\varphi = \varphi_i + \Delta\varphi = \varphi_i + \arcsen \frac{t \cdot \text{sen}\varphi_i}{h - t}$$

Esta ecuación muestra como un aumento de la anchura de los neumáticos obliga a que el ángulo de inclinación sea mayor para equilibrar las fuerzas. Así como una disminución de la altura del CdG provoca que el ángulo de inclinación necesario también sea mayor.

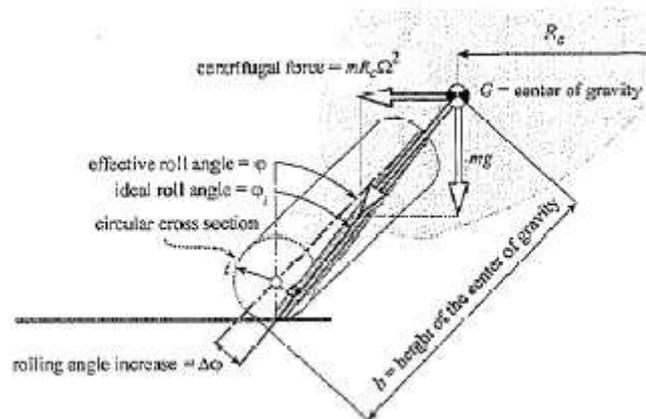


Figura 7.10. Ángulo de inclinación efectivo.

Sabiendo que la anchura de nuestro neumático es de  $2t = 0,080 \text{ m}$ , se puede calcular el ángulo de inclinación efectivo.

$$\varphi = 0,88 \text{ rad} = 50,7^\circ$$

$$\Delta\varphi = 0,10 \text{ rad} = 5,7^\circ$$

Otro factor muy importante en el ángulo de inclinación de la motocicleta es la posición del conductor. La variación de la posición de éste hace que el CdG cambie de posición, haciendo que el ángulo de inclinación de la moto pueda ser igual, mayor o menor.

### 7.6.2. Comportamiento direccional de la moto en el giro

El ángulo de dirección es el ángulo que forma la dirección con el plano longitudinal de la motocicleta, y según el modo de conducción, en Dirt Track podemos diferenciar dos casos. Por un lado, cuando la trazada de la curva se realiza gracias a la inclinación de la motocicleta, que viene acompañada de un pequeño giro de la dirección hacia el interior de la curva. Este es el caso más habitual en cualquier modalidad del motociclismo. Y por otro lado, cuando el giro de la dirección se realiza hacia el exterior de la curva, y la

trazada de la curva se realiza mediante el control de la derrapada. Recurso más escaso en otras modalidades, pero muy utilizado en Dirt Track. Este sentido del giro de la dirección es una gran ayuda para controlar las largas derrapadas a alta velocidad.



Figura 7.11. Estilo de conducción de Dirt Track.

### 7.6.3. Fuerzas en curva

Claro está, las fuerzas no serán las mismas para los dos tipos de conducción en curvas. De modo que se realiza un análisis por separado.

#### *Conducción estándar*

Teniendo en cuenta la fuerza aerodinámica se produciría una transferencia de carga debido a la misma y se obtendrán las siguientes expresiones para las fuerzas verticales:

$$N_f = mg \cdot \frac{b}{p} - F_D \cdot \frac{h}{p} \cdot \cos\varphi$$

$$N_r = mg \cdot \frac{p-b}{p} + F_D \cdot \frac{h}{p} \cdot \cos\varphi$$

Sin embargo, éstas serán despreciadas, debido a que no influyen mucho y se logra simplificar los cálculos. Si se considera una curva con un radio grande con respecto a la

batalla de la motocicleta, que lo es, y se desprecia la fuerza aerodinámica, las fuerzas verticales en cada neumático vendrán representadas por las siguientes expresiones:

$$N_f = mg \cdot \frac{b}{p} = 662 \text{ N}$$

$$N_r = mg \cdot \frac{p-b}{p} = 906 \text{ N}$$

Entonces, las laterales (considerando  $\cos\Delta = 1$ , ya que los ángulos de dirección en este tipo de conducción son prácticamente nulos):

$$F_{sf} = \frac{N_f \cdot V^2}{g \cdot \cos\Delta \cdot R_C} = 662 \text{ N}$$

$$F_{sr} = \frac{N_r \cdot V^2}{g \cdot R_C} = 906 \text{ N}$$

### ***Dirt Track***

Como se ha comentado, en Dirt Track la trazada de la curva se realiza controlando la derrapada gracias a la habilidad del piloto con el manillar.

En este estilo de conducción, es la fuerza motriz del motor la que se emplea tanto para continuar con el avance, como para oponerse a la fuerza centrífuga en la curva. Las fuerzas longitudinales que experimenta la motocicleta ya se han estudiado con detenimiento en el apartado de movimiento lineal y nos ayudaremos de los valores obtenidos para estudiar este caso.

Al producirse la derrapada lateral, el chasis se desalinea de la dirección de avance, y aparecen fuerzas laterales en el neumático trasero. Produciéndose así un momento torsor en la estructura.

En la situación extrema, el eje longitudinal de la motocicleta prácticamente se alinea con el radio de la curva. En ese momento toda la fuerza motriz contrarresta la fuerza centrífuga, y es cuando se produce la mayor fuerza lateral en el neumático trasero, y a su vez el mayor momento torsor.

En el apartado de movimiento transitorio se ha visto que la máxima tracción que puede proporcionar la motocicleta (manteniendo el contacto de la rueda delantera con el suelo) es **1374,40 N**.

Por tanto

$$\text{Fuerza centrífuga} = 1374,40 \text{ N} = R_C \cdot m \cdot \Omega^2$$

Encontrándose así el equilibrio en el eje longitudinal de la motocicleta.

En el eje transversal de la motocicleta, el neumático delantero, además de encontrarse alineado con la dirección de avance, se encuentra en la posición límite de rodadura, por tanto no sufre cargas laterales. Pero el neumático trasero, se traslada perpendicularmente a dicha dirección, por tanto sufre una fuerza de rozamiento que se traduce en un momento torsor.

$$\mathbf{S} = 1374,40 \text{ N}$$

$$\mathbf{N}_r = 1568 \text{ N}$$

$$\mathbf{N}_f = 0 \text{ N}$$

$$\mathbf{F}_{sf} = 0 \text{ N}$$

$$\mathbf{F}_{sr} = N_r \cdot \mu = 1568 \text{ N}$$

Esta situación difícilmente se dará en la realidad, ya que la fuerza motriz siempre deberá contribuir al avance de la motocicleta, y el neumático delantero deberá permanecer en contacto con el suelo para poder controlar la dirección. Aun así se va a estudiar este caso, para asegurarnos de que las fuerzas reales no sean superiores a las calculadas.

## 7.7. CARGAS DEBIDAS A LAS IRREGULARIDADES DEL SUELO

En los cálculos teóricos se ha considerado siempre el suelo plano, pero esto en la realidad nunca es así. En los circuitos en los que se lleva a cabo la práctica de Dirt Track es común la existencia de irregularidades en la pista.

Cuando la motocicleta pase por un tramo con estas irregularidades, sufrirá unas cargas dinámicas mayores. Por lo tanto es conveniente calcular estas cargas que no se han considerado hasta el momento.

Como ya se ha comentado con anterioridad, el valor de la rigidez para la suspensión delantera es **10,1 N/mm**, y para la trasera **20 N/mm** (dos muelles de 10 N/mm; se trata sobre este valor en apartados siguientes).

Y puesto que el recorrido de ambas suspensiones es de 100 mm, tenemos que las fuerzas máximas que ambas provocan son:

$$F_{f_{extra}} = k_f \cdot x = 10,1 \cdot 100 = \mathbf{1010\ N}$$

$$F_{r_{extra}} = k_r \cdot x = 20 \cdot 100 = \mathbf{2000\ N}$$

Por tanto a los valores máximos de cargas calculados anteriormente, habría que sumarles estos valores.

## 7.8. CARGA SOPORTADA POR EL PIÑÓN DE REENVÍO

Como ya se ha comentado con anterioridad, la transmisión cuenta con el piñón de salida del motor, un plato concéntrico con el basculante, otro similar al anterior pero esta vez concéntrico con la rueda trasera (al igual que en cualquier motocicleta estándar) y un último piñón de reenvío, encargado de recircular la cadena desde la rueda trasera hasta el piñón de salida del motor. La interacción entre este último piñón y la cadena consiste en un apoyo de rodillo. Por lo tanto no existe ningún par, pero si una carga que actúa sobre el eje del piñón y que es necesario calcular.

Se pretende emplear una cadena normalizada 525 (paso de 15,9 mm), por lo tanto los diámetros correspondientes a los distintos piñones son:

$$D_p = \frac{Z \cdot P}{\pi}$$

$D_p$  = diámetro primitivo

$Z$  = número de dientes

$P$  = paso

<b>16 dientes</b>	81,02 mm
<b>18 dientes</b>	91,15 mm
<b>42 dientes</b>	212,68 mm

Tabla 7.5. Diámetros correspondientes a los distintos piñones.

Y, datos analizados en puntos anteriores, nos dicen que el par máximo aportado por el motor es **73,58 N · m**. Lo que provoca una tensión en la cadena de transmisión de **10.900 N**.

A continuación se muestra la geometría que se pretende conseguir en la transmisión. Realizando cálculos con los datos mostrados es posible obtener la reacción en el piñón de reenvío y la dirección de dicha fuerza.

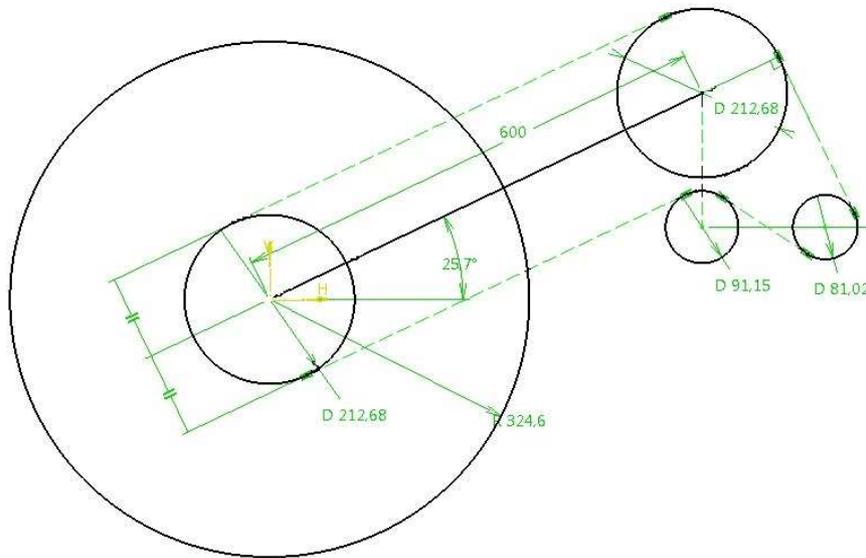


Figura 7.12. Geometría del sistema de transmisión.

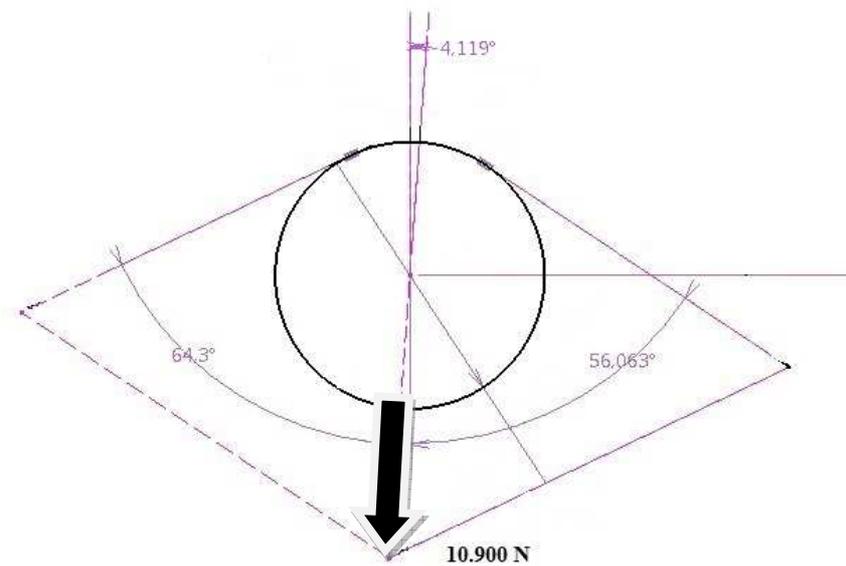


Figura 7.13. Esquema de la dirección de la reacción en el piñón de reenvío.

## 7.9. CARGAS FINALES PARA UTILIZAR EN EL ANÁLISIS FEM

Las fuerzas teóricas máximas que se han calculado se utilizarán para realizar un análisis de FEM y realizar el diseño del chasis y del basculante. Para ello se utilizarán las cargas máximas calculadas. En algunos casos (aceleración y frenada) se obtenían diferentes limitantes, por lo tanto se cogerán los valores más exigentes, porque será imposible que se superen. En la siguiente tabla se muestran las cargas máximas que se pueden dar en la motocicleta según los cálculos.

Valores máximos		Condicionante
<b>Carga longitudinal delantera</b>	-	-
<b>Carga vertical delantera</b>	957 N	Frenada limitada por tracción
<b>Carga lateral delantera</b>	662 N	Curva (conducción estándar)
<b>Carga longitudinal trasera</b>	1375 N	Aceleración limitada por rodadura
	(-) 612 N	Frenada limitada por tracción
<b>Carga vertical trasera</b>	1568 N	Aceleración limitada por rodadura
<b>Carga lateral trasera</b>	1568 N	Curva (conducción Dirt Track)

Tabla 7.6. Cargas máximas.

Por último, en lo que a las cargas finales respecta, se describirán las cargas finales para diferentes casos. Cada caso se ensayará con un software FEM para realizar el diseño del bastidor. En cada uno de los casos tendrán que aparecer las seis fuerzas correspondientes a las dos ruedas y por supuesto que estos casos tienen que representar situaciones límites de la motocicleta sobre el terreno.

Se cogerán los casos más limitantes para evitar que las cargas estén excesivamente sobredimensionadas, porque sería demasiado pesado. Se trata de proporcionar las cargas necesarias para realizar un diseño de acuerdo a los esfuerzos que vaya a sufrir la máquina. Es decir, hay que conseguir que el chasis a diseñar aguante bien los posibles esfuerzos que vaya a sufrir pero que a la vez sea lo más ligero posible. Para conseguir este compromiso a continuación aparecen las cargas a utilizar en los diferentes casos.

Una irregularidad en la carretera puede darse en cualquier momento de la carrera. De modo que a la hora de realizar el análisis se elegirán los peores casos, es decir, aceleración, frenada y paso por curva, y se les añadirá una carga extra debida a las suspensiones.

Se utilizará un coeficiente de mayoración de 1,5 para asegurar el buen funcionamiento de los diferentes elementos a diseñar.

### 7.8.1. Caso 1. Aceleración máxima

La aceleración más limitante viene dada por la condición de rodadura, por lo que se cogerán los valores que corresponden. En este caso se considera movimiento rectilíneo, así que las fuerzas laterales son nulas. Por lo que los valores de las fuerzas en cada rueda son:

Caso 1	Teórica	Mayorada
Fuerza longitudinal trasera	1375 N	2063 N
Fuerza longitudinal delantera	0 N	0 N
Fuerza vertical trasera	1568 N	2352 N
Fuerza vertical delantera	0 N	0 N
Fuerza lateral trasera	0 N	0 N
Fuerza lateral delantera	0 N	0 N

Tabla 7.7. Fuerzas para aceleración máxima.

### 7.8.2. Caso 2. Frenada máxima

La frenada más limitante es la debida a la tracción. Al igual que en la aceleración, se consideró movimiento rectilíneo, por lo que no existirán cargas laterales. También se tuvo en cuenta que solo se dispone de freno trasero, por lo que la carga longitudinal trasera también será nula.

Caso 2	Teórica	Mayorada
Fuerza longitudinal trasera	(-) 612 N	(-) 918 N
Fuerza longitudinal delantera	0 N	0 N
Fuerza vertical trasera	612 N	918 N
Fuerza vertical delantera	957 N	1436 N
Fuerza lateral trasera	0 N	0 N
Fuerza lateral delantera	0 N	0 N

Tabla 7.8. Fuerzas para frenada máxima.

### 7.8.3. Caso 3. Paso por curva (conducción estándar)

En el caso de la curva teórica nos proporciona los siguientes datos.

Caso 3	Teórica	Mayorada
Fuerza longitudinal trasera	0 N	0 N
Fuerza longitudinal delantera	0 N	0 N
Fuerza vertical trasera	906 N	1359 N
Fuerza vertical delantera	662 N	993 N
Fuerza lateral trasera	906 N	1359 N
Fuerza lateral delantera	662 N	993 N

Tabla 7.9. Fuerzas en curva (conducción estándar).

Sin embargo, en la realidad, la trazada de una curva suele venir complementada con aceleraciones y frenadas al mismo tiempo. Para este caso se cogerán las cargas que más hagan sufrir a la parte delantera del chasis, ya que la parte media/trasera (motor, jaula, basculante, etc.) es más rígida y aguantará más que la delantera.

### 7.8.4. Caso 4. Paso por curva (conducción Dirt Track)

La situación estudiada difícilmente se dará en la realidad, ya que la fuerza motriz siempre deberá contribuir al avance de la motocicleta, y el neumático delantero deberá permanecer en contacto con el suelo para poder controlar la dirección. De todos modos, estudiando el caso extremo es la única forma de asegurar que los valores reales no excedan los calculados.

Caso 4	Teórica	Mayorada
Fuerza longitudinal trasera	1375 N	2063 N
Fuerza longitudinal delantera	0 N	0 N
Fuerza vertical trasera	1568 N	2352 N
Fuerza vertical delantera	0 N	0 N
Fuerza lateral trasera	1568 N	2352 N
Fuerza lateral delantera	0 N	0 N

Tabla 7.10. Fuerzas en curva (conducción Dirt Track).

## **8. CHASIS DE LA MOTOCICLETA**

### **8.1. GENERALIDADES**

La motocicleta está formada por un conjunto de mecanismos, cada uno con una función concreta. Se podría simplificar y reducirlos a dos: el motor y el bastidor. Si se engloba de esta manera todo el conjunto, el bastidor estará formado por todo aquello que no es el motor: chasis, suspensiones, carrocería, ruedas, frenos, y elementos accesorios.

A lo largo de los años, estos elementos han ido variando poco a poco, unas veces para adaptarse a nuevas soluciones, y otras simplemente por cuestión de modas o gustos.

Las funciones de un chasis de moto son de dos tipos principalmente: estáticas y dinámicas. En el sentido estático, es obvio que el chasis debe soportar el peso de la moto y del piloto o pilotos, el motor y la transmisión y los accesorios necesarios como por ejemplo los depósitos de gasolina y aceite. Menos obvia quizás, la función dinámica del chasis es de una importancia fundamental. En conjunto con el resto de la parte ciclo, debe proporcionar una dirección precisa, una buena manejabilidad, un buen agarre y un buen confort.

Para que la dirección sea precisa el chasis debe resistir adecuadamente los esfuerzos de torsión y flexión, de forma que las ruedas puedan mantener una relación correcta entre ellas, a pesar de las considerables cargas impuestas por la transmisión, los baches, las curvas y los frenos. “Una relación correcta” quiere decir que el eje de la dirección debe permanecer en el mismo plano que la rueda trasera, de forma que la geometría de dirección no se vea afectada por posibles deformaciones del chasis.

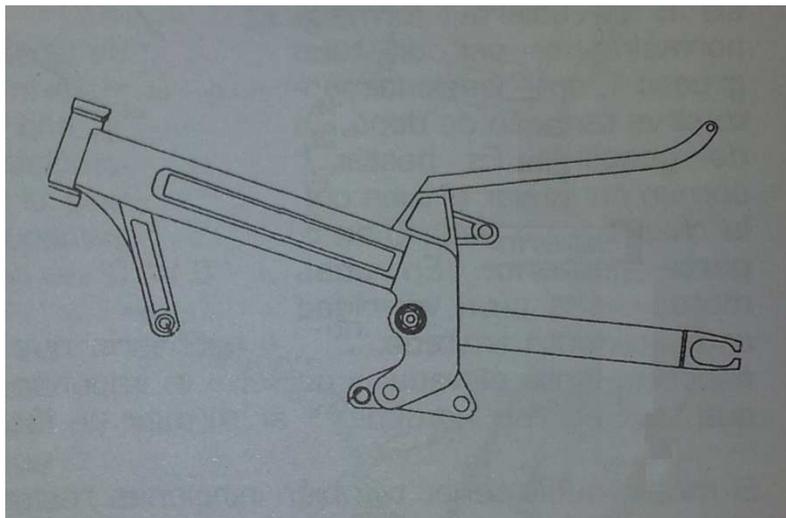
Parece evidente que ningún sistema de dirección puede considerarse como efectivo si las ruedas no se encuentran en contacto con el suelo, especialmente en el caso del tren delantero. Además el chasis debe permitir una buena manejabilidad de la moto, refiriéndonos a manejabilidad como al esfuerzo físico necesario para que la moto responda a nuestras acciones. Este aspecto depende fundamentalmente de la altura del centro de gravedad, el peso, la rigidez, la geometría de dirección, el tamaño de los neumáticos y los momentos de inercia de las ruedas y el conjunto moto/piloto.

Otro aspecto importante a considerar es el confort, para así poder minimizar el cansancio del piloto. Para ello es necesario que la suspensión absorba los baches sin sacudir al piloto ni producir movimientos de cabeceo. El chasis debe ser capaz de soportar todos estos efectos sin que existan deterioros o fallos.

Por último se debe tener siempre en mente a la hora de diseñar un chasis que todo el diseño es un compromiso. Este compromiso vendrá dado por el uso que se le vaya a dar a la moto, los materiales que se tienen al alcance y el precio que el cliente está dispuesto a pagar.

## 8.2. TIPOS Y CARACTERÍSTICAS

La estructura general de un chasis, independientemente de su tipo, es prácticamente invariable en todas. Como se aprecia en la figura, por una parte tenemos la zona de anclaje de la suspensión delantera. Al ser ésta habitualmente una horquilla telescópica, es un eje que se denomina “pipa de dirección”. Por la propia estructura de la horquilla, este punto se sitúa en la parte delantera, en la parte más alta del chasis. El otro punto de anclaje de la suspensión suele ser el eje del basculante, que debe combinarse con un soporte para el o los amortiguadores traseros, e incluso los anclajes de las bieletas de la suspensión trasera, si es que éstas existen. Estas dos zonas están sometidas a unos grandes esfuerzos, de modo que conviene que dispongan de la máxima rigidez posible. Además hay que unir ambos anclajes con una estructura, y aquí es donde la variedad abunda. Los distintos tipos pueden realizarlo con tubos, chapas, vigas gruesas etc..., siendo éstos igualmente los materiales empleados para los anclajes. En el dibujo está representado un bastidor de tipo doble viga actual, pero cualquiera de los tipos que se verán con posterioridad adoptan los mismos principios.



*Figura 8.1. Dibujo característico de un chasis.*

Otros elementos que debe tener el chasis son los anclajes para el motor, lo suficientemente resistentes como para que no les afecte ni el peso ni las vibraciones. El motor es ocasionalmente parte de la estructura del chasis, ya que, debido a su gran resistencia, puede realizar funciones importantes, permitiendo que el chasis sea más ligero. También hay que sujetar al piloto mediante la estructura y los diferentes elementos accesorios como el depósito de gasolina y la carrocería en general, así como los accesorios del piloto. Si se incluye el basculante trasero como un elemento del chasis, hay que señalar que esta pieza está sometida a unos grandes esfuerzos y que debe ser muy resistente. En otros momentos no se realizaban los basculantes siguiendo

esta línea, pero con el tiempo han sido unos de los elementos que más se han dimensionado.

Se distinguirán a continuación los distintos chasis comenzando por los más sencillos, que son los que equipan las motocicletas de menor cilindrada, los ciclomotores.

### 8.2.1. Chasis de ciclomotor

Actualmente la estructura de estos vehículos es bastante general. Siguen unas pautas marcadas, que parecen de momento inamovibles. La pipa de dirección está situada relativamente baja, normalmente a la altura del sillín. La estructura del chasis es abierta, formada normalmente por un tubo grueso, que ocasionalmente sirve también de depósito de gasolina. Es bastante común combinar el tubo con la chapa estampada en la parte posterior. En unas motocicletas cuya velocidad está bastante limitada, no es necesario que la rigidez del chasis sea especialmente elevada, y por ello se imponen las estructuras abiertas, que favorecen la comodidad al permitir un fácil acceso.

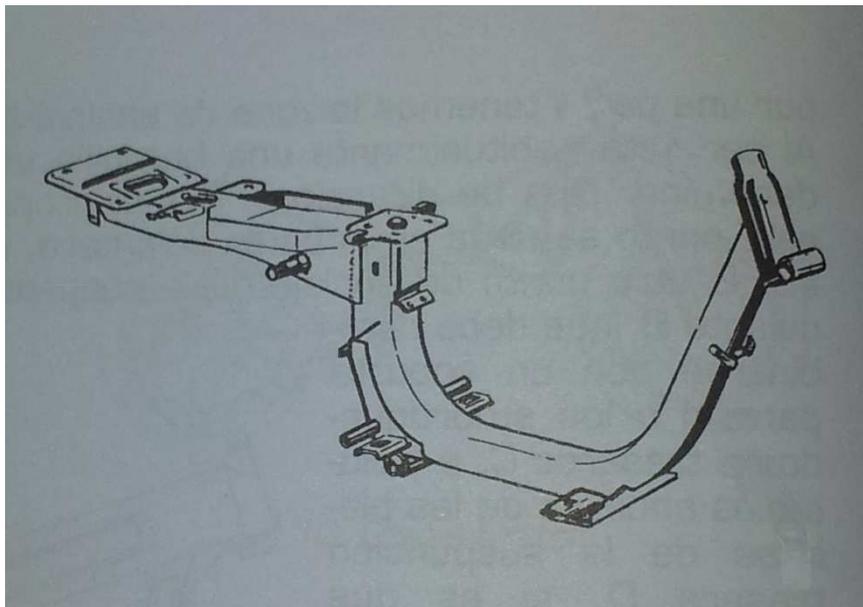


Figura 8.2. Chasis de ciclomotor de tipo abierto.

El motor suele tener también funciones resistentes, ya que la transmisión secundaria y la rueda, o bien están integradas en el propio propulsor, o lo están por medio de un basculante igualmente anclado a él. De este modo, el chasis sólo debe soportar la suspensión delantera y al piloto, quedando el resto de las funciones en manos del motor. El material empleado es casi siempre el acero.

### 8.2.2. Chasis de scooter

Los scooters son el siguiente paso. En este caso, las diferencias entre este tipo de motos y el resto son tan evidentes, que se comprende la necesidad de un chasis con algunas peculiaridades. Durante bastante tiempo, la chapa estampada ha sido el material más común para la realización de los chasis de las scooters, sobre todo porque las más vendidas y conocidas, las Vespa, así lo tenían, pero actualmente la chapa está en franco retroceso frente a los bastidores realizados en tubo de acero. La estructura de chapa tiene la ventaja de englobar en un solo elemento el chasis y la carrocería.

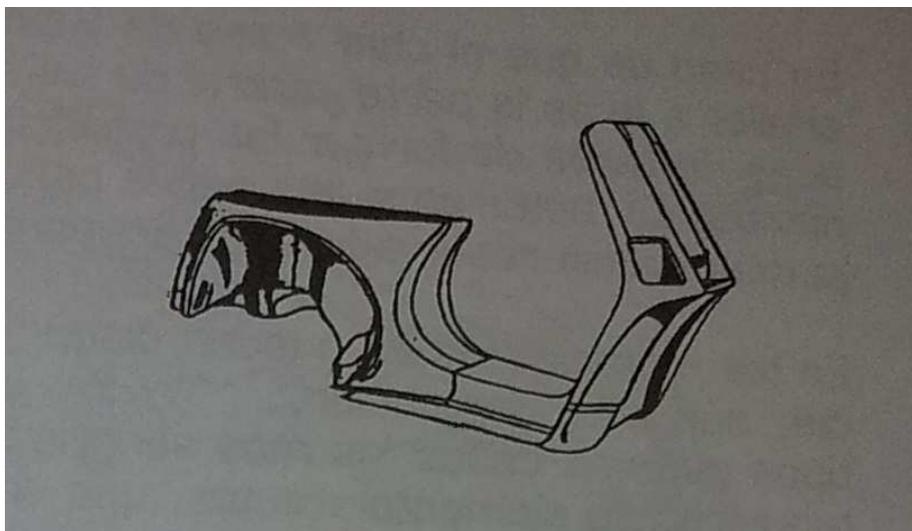


Figura 8.3. Chasis de scooter de chapa.

Las scooters se distinguen entre otras cosas por la existencia de unas amplias superficies de protección de la parte delantera y en la inferior, que en los bastidores de chapa forman parte del chasis, ayudando a aumentar su rigidez

La estructura de las scooters, en las que el motor integra también la rueda trasera, hace que el chasis, al igual que se vio en los ciclomotores, sólo deba soportar la pipa de dirección, y a los ocupantes

Debido a las ruedas de pequeño diámetro, la suspensión delantera suele ser diferente a la horquilla que se instala en la mayoría de las motos, y la pipa de dirección suele sustituirse por un alojamiento más amplio donde se instala una columna de mayor longitud.

En caso de que el chasis sea de tubos, éstos siguen una trayectoria similar a la de la parte central de los de chapa, dejando a paneles plásticos, la tarea de formar las protecciones, que por tanto son independientes. El motor se sujeta por la parte inferior del chasis, justo debajo del espacio reservado a los ocupantes.

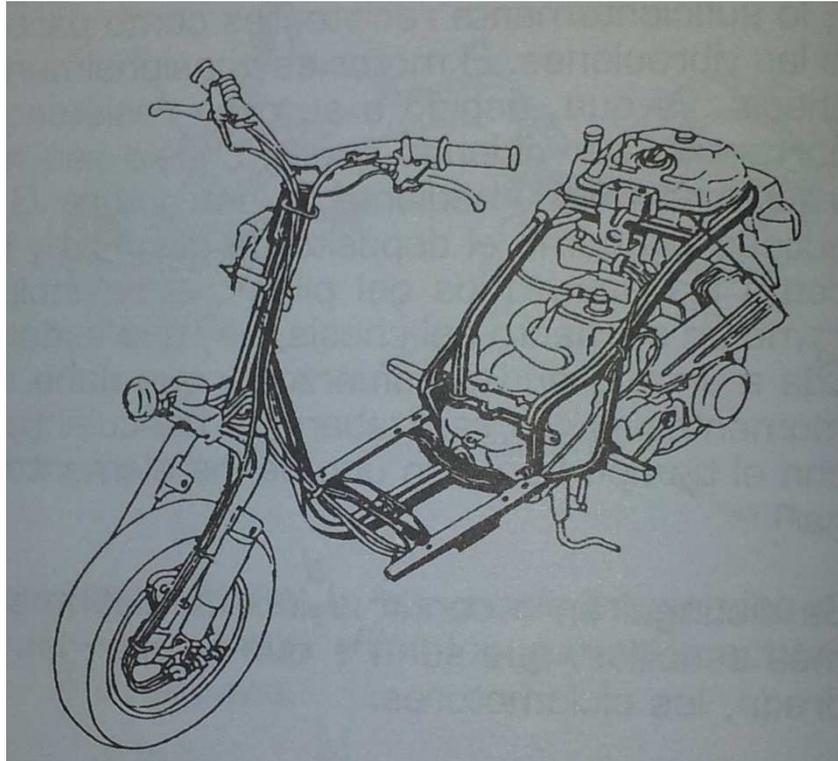


Figura 8.4. Chasis de scooter de tipo tubular.

### 8.2.3. Chasis tubular

En las motocicletas se pueden distinguir varios tipos de chasis. Hoy en día, aún son los tubulares clásicos los más habituales. Hay diversos tipos que van desde los más sencillos de cuna simple, hasta los multitubulares de elementos rectos, que se emplean en las motos de mayores prestaciones.

#### 8.2.3.1. Chasis de simple cuna

Los de simple cuna pueden ser completos o interrumpir su sección inferior utilizando el motor como elemento resistente.

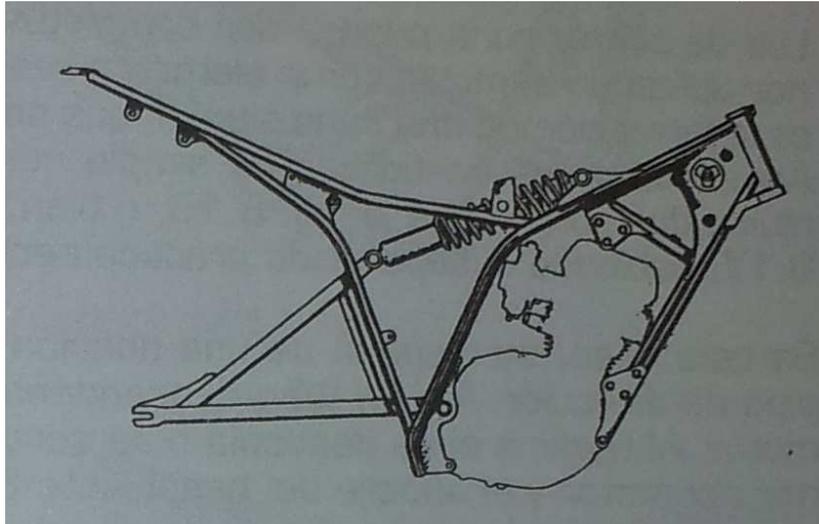


Figura 8.5. Chasis de simple cuna interrumpida.

Una tercera posibilidad es la formación de una cuna simple, que se desdobra a la altura del motor.

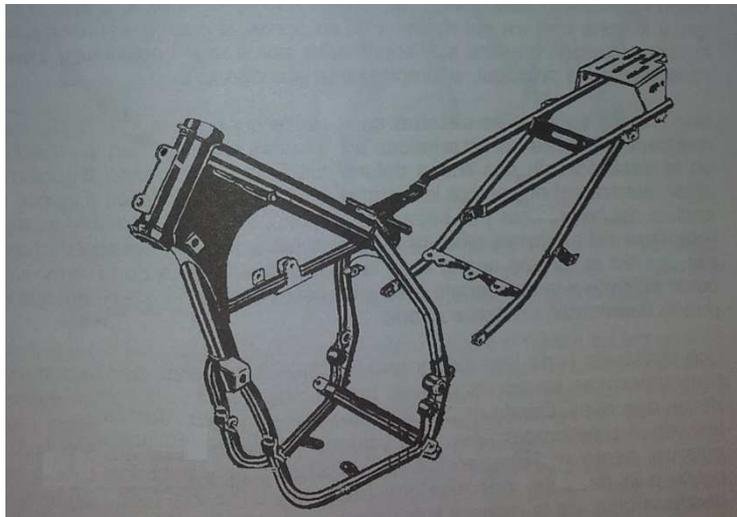


Figura 8.6. Chasis de simple cuna desdoblada.

Actualmente los bastidores de simple cuna habituales son, o bien interrumpidos, o bien desdoblados, habiendo desaparecido prácticamente las cunas simples cerradas.

En este caso, se dispone de una sección normalmente reforzada en la pipa de dirección y un tubo descendente hacia la parte anterior del motor. Al llegar a él se desdobra o se corta. Por otra parte, la zona inferior del motor y el anclaje del basculante se sujetan mediante tubos que partiendo desde la pipa, sortean el otro por su parte superior, y bajan

hacia ellas, desdoblándose, o bien en la propia pipa, o bien al llegar a la zona trasera del motor. Por su parte, el pasaje y el anclaje de la amortiguación trasera son soportados por una subestructura trasera soldada a la principal, o simplemente atornillada.

### 8.2.3.2. Chasis de doble cuna

Una mejora sobre este sistema es la doble cuna, que mantiene idénticas características a las cunas simples, con la salvedad de la existencia de dos tubos delanteros, que, partiendo del mismo lugar, abrazan al motor por los laterales de su parte inferior, llegando al anclaje del basculante por separado. En casos en que el motor es muy valioso y el chasis dificulta su extracción, pueden aparecer chasis desmontables, en los que una de las secciones de la cuna, en vez de estar soldada a la estructura principal, está atornillada, de modo que se puede desmontar en estos casos.

Los chasis de cuna han sido y son los más habituales, por lo que existen numerosas versiones que se pueden diferenciar en pocos detalles de los descritos. Desde materiales diversos que no sean el clásico acero tratado al cromomolibdeno, o secciones tubulares cuadradas o rectangulares, hasta modelos en los que la situación de los tubos varía respecto a la descrita, por ejemplo, haciendo bajar los tubos superiores desde la pipa, de la manera más recta posible hasta el anclaje del basculante.

Los bastidores de doble cuna son más rígidos que los de cuna simple por estar cerrados en la práctica totalidad de las ocasiones, formando una estructura más sólida, y por poder sujetar la moto por sus laterales, mejorando el apoyo y utilizándolo como elemento para aumentar la rigidez.

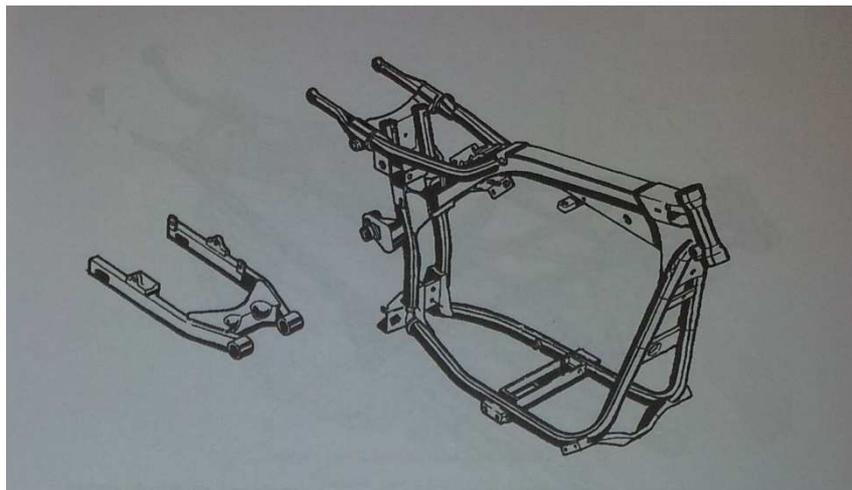


Figura 8.7. Chasis de doble cuna.

### 8.2.3.3. Chasis multitubular

Otra variedad de los bastidores tubulares son aquellos en los cuales el motor se encuentra colgado. En este caso suele adquirir este elemento una importante función resistente, aprovechando su gran rigidez.

Aunque este tipo de chasis es de los más comunes, potencialmente es el peor en términos de eficiencia estructural. Su diseño queda determinado principalmente por la disponibilidad de espacio y por consideraciones de moda o estilo. Fundamentalmente consiste en un conjunto de tubos de medio tamaño, doblados alrededor del motor para conectar la pipa de dirección con el eje del basculante. El diámetro del tubo es demasiado pequeño para conseguir ganar algo de la rigidez a flexión y a torsión que ofrece la propia sección del tubo. Más aún, normalmente estos diseños no consiguen proporcionar una triangulación significativa.



*Figura 8.8. Chasis multitubular.*

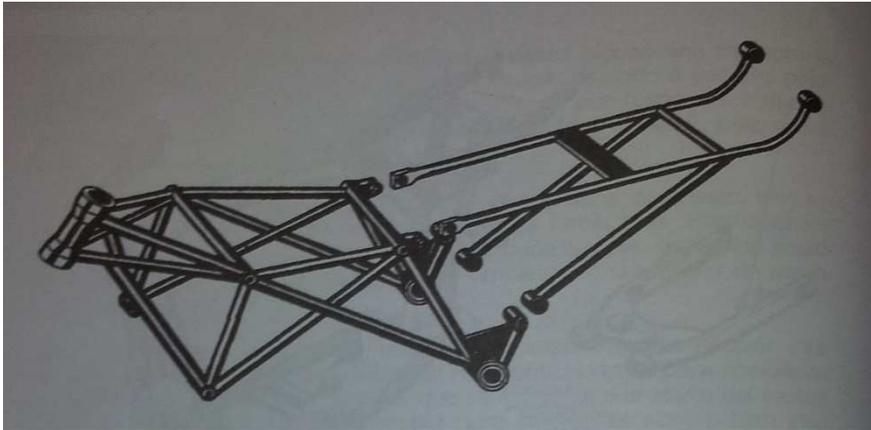
Normalmente los tubos inferiores son eliminados y el motor, en vez de sujetarse por el cárter en su parte delantera, se ancla por la culata, que debe disponer de los refuerzos necesarios para ello.

Hay algunas variedades especiales como los bastidores de espina central en los que hay un único tubo muy grueso en la parte superior, pero lo más habitual es contar con una estructura superior de tubos, que integra la pipa de la dirección y ocasionalmente el anclaje del basculante, que puede estar también unido al motor. Las secciones encargadas de soportar al piloto, se integran en la estructura principal.

### 8.2.3.4. Chasis multitubular de tubos rectos

Otra variedad son los bastidores multitubulares de elementos rectos. En este tipo de chasis, normalmente orientados a la competición, la estructura se forma únicamente con tubos rectos, de modo que éstos sólo trabajen a tracción o a compresión. La disposición

más habitual es un elemento largo que une directamente la pipa de dirección con el eje del basculante, y una serie de tubos, de menor longitud, que refuerzan esta función y sirven también para anclar motor, suspensión trasera y pasaje.



*Figura 8.9. Chasis multitubular de tubos rectos.*

Aunque este tipo de chasis puede conseguir una eficiencia estructural extremadamente elevada, no ha encontrado demasiados seguidores entre los fabricantes más grandes. Probablemente esto se debe a que debido a la forma y al tamaño de los tipos de motores más comunes, hace falta una estructura ancha y complicada. El empleo de tubos largos de pequeño diámetro puede suponer un problema, ya que el motor los puede hacer entrar en resonancia, debido a sus fuerzas de inercia que no se encuentran en equilibrio. La solución es elevar la frecuencia propia de los tubos, bien haciéndolos más cortos, bien aumentando su diámetro.

#### **8.2.4. Chasis de viga**

Este apartado cubre varios tipos diferentes de chasis que usan miembros de gran sección para conseguir una rigidez inherente ante cargas de torsión y flexión. Las vigas se pueden combinar también con triangulación para obtener un diseño práctico.

##### **8.2.4.1. Chasis de espina central**

Existe una gran variedad de posibilidades para fabricar este tipo de chasis. La solución más popular consiste en una estructura con forma de T compuesta por dos chapas de acero estampado unidas mediante soldadura por puntos o por resistencia. Este tipo de construcción consigue una gran rigidez con un coste de producción muy bajo, aunque el elevado desembolso inicial en útiles de fabricación deja a un lado su empleo en prototipos y pequeñas series. También, el producto final es más pesado que un chasis de

la misma rigidez fabricado con tubo, debido al inevitable exceso de metal en zonas de bajas tensiones.



*Figura 8.10. Chasis de espina central.*

#### **8.2.4.2. Chasis monocasco**

Este tipo de chasis ha sido muy poco utilizado debido principalmente a sus dificultades de fabricación y de espacio. Ya que una de las características indispensables de un chasis es su facilidad de acceso para realizar los reglajes necesarios, sobre todo en carrera. Este tipo de chasis consigue su rigidez estructural mediante una “coraza” completamente aerodinámica y unos refuerzos transversales.



*Figura 8.11. Chasis monocasco.*

### 8.2.4.3. Chasis de doble viga

Hoy en día es un diseño prácticamente universal en las motos deportivas más potentes y en casi todas las motos de competición utilizan este tipo de construcción. Consiste en dos vigas, normalmente de aluminio, que están situadas a ambos lados del motor uniendo la pipa de dirección con el alojamiento del eje del basculante.

En prácticamente todos los casos, los alojamientos del eje del basculante y los soportes traseros del motor son de fundición y están soldados a las vigas laterales. Muy a menudo, aunque no siempre, el subchasis va atornillado al chasis principal.

Desde un punto de vista estructural el chasis de doble viga podría considerarse como un chasis de espina central desdoblado. La experiencia dice que si se utiliza una cantidad suficiente de metal, se puede conseguir la rigidez necesaria incluso para un uso en competición, aunque desde el punto de vista de eficiencia estructural este tipo de chasis no es especialmente bueno. Incluso utilizando aluminio, no es un tipo de construcción que dé lugar a un chasis especialmente ligero y si se fabrica en acero resultaría un chasis pesado.

Una de las ventajas claras de este tipo de chasis frente a los multitubulares es la ventaja que ofrece al diseñador en cuanto al uso del espacio al trabajar con grandes motores. Especialmente en competición, este tipo de chasis permite un acceso mucho más fácil para trabajar en el motor y en particular para acceder a los carburadores y las bujías. La eliminación de los tubos que rodeaban al motor por debajo y por delante, proporciona un espacio libre muy útil para los sistemas de escape y refrigeración.

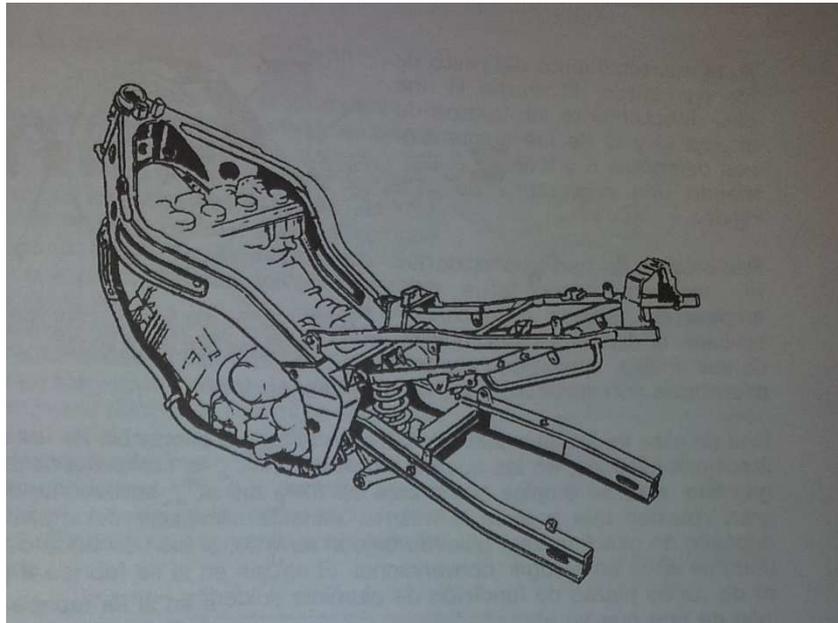


Figura 8.12. Chasis de doble viga.

### 8.2.5. Chasis de motor estructural

Potencialmente esta es la forma más eficiente de construir una moto que tenga un motor grande. El principio se basa en utilizar la rigidez del motor para conseguir conectar la pipa de dirección con el eje del basculante. Si alojamos este eje en la parte trasera de la fundición de la caja de cambios, solamente necesitaremos una pequeña estructura para unir la pipa de dirección a la zona superior del motor.



*Figura 8.13. Chasis de motor estructural.*

## 8.3. ANÁLISIS DE LAS NECESIDADES

### 8.3.1. Primer análisis

Una vez vistos los tipos y características de los principales chasis se realiza un primer análisis de los modelos que mejor se ajustan a nuestras necesidades.

	CARACTERÍSTICAS				
	RIGIDEZ	PESO	MATERIAL	FABRICACIÓN	ESPACIO
ESPIÑA CENTRAL	Alto	Alto	Acero/Aluminio	Coste bajo de producción. Útiles caros	Medio
MONOCASCO	Medio	Medio	Aluminio	Alto coste	Bajo
DOBLE VIGA	Alto/Medio	Medio	Aluminio	Alto coste de mecanización	Alto
TUBULAR CONVENCIONAL	Medio	Medio	Acero/Aluminio	Problemas con tubos curvados	Medio
TUBULAR TRIANGULADO	Alto	Bajo	Acero	Elevado número de soldaduras	Medio

Tabla 8.1. Primer análisis.

Cabe comentar que en la tabla anterior no se ha analizado el chasis que utiliza el motor como parte estructural a pesar que sus propiedades rigidez/peso son muy buenas. Esto se debe a que el motor que vamos a emplear no está diseñado para ser empleado como tal, y por tanto se desestima esta opción.

Vistas las características se realiza una primera selección de los tipos de chasis que mejor se ajustan al propósito.

Tanto los chasis de espina central y como monocasco son de elevado coste de fabricación además de que su relación rigidez/peso no es de las mejores, por lo que los desechamos.

A continuación se realiza un análisis más detallado de las necesidades para realizar una buena selección entre un chasis de doble viga, tubular triangulado o uno tubular convencional.

### 8.3.2. Necesidades funcionales

Para realizar una correcta elección final del tipo y material del chasis a fabricar, primero estudiaremos cuales son todas las necesidades funcionales que debe cumplir. Para ello se realiza una búsqueda intuitiva mediante un “brainstorming”, de forma que se obtienen la gran mayoría de requerimientos funcionales.

#### *Rigidez*

Es una de las características principales de un chasis. La estructura de la moto debe ser capaz de mantener los parámetros geométricos dentro de unos valores adecuados ante todas las condiciones de carga que puedan tener lugar. La rigidez está relacionada con la deformación temporal que sufre la estructura cuando le aplicamos una carga y después la descargamos. Por lo tanto se tratará de diseñar un chasis lo más rígido posible.

#### *Cargas*

El chasis tendrá que ser capaz de soportar todas las cargas sin entrar en la zona plástica del material. Soportará el peso de todos los componentes, del piloto, las reacciones en los neumáticos así como las cargas dinámicas que se generen en el funcionamiento de ésta.

#### *Peso*

Como en todos los vehículos de competición, el peso es una característica importantísima, por ello se tratará de reducirlo al máximo.

#### *Material*

El material seleccionado influirá tanto en el diseño como en el coste del prototipo.

#### *Dificultad de fabricación*

Dificultad de fabricación desde un punto de vista de conseguir los resultados esperados y de no encarecer demasiado el coste.

#### *Coste de fabricación*

Tanto del material a utilizar como la mano de obra necesaria para la fabricación.

### ***Espacio***

Referido a la posibilidad de realizar cambios sobre la moto en el menor tiempo posible, es decir que sean accesibles los elementos modificables. Esta función es necesaria en las motos de competición ya que se encuentran continuamente sometidas a cambios durante las carreras.

### ***Variabilidad***

Al tratarse de un primer prototipo y de no disponer de datos de partida, trataremos de realizar una configuración que nos permita realizar cambios sobre los parámetros geométricos de la motocicleta. Estos cambios se refieren a la posición del anclaje del basculante, la posición relativa del piñón, el anclaje del basculante y al ángulo de lanzamiento.

### ***Montaje***

El chasis tendrá que ser diseñado para que sea fácil el montaje de todos los elementos que componen la motocicleta.

### ***Estética***

Al tratarse de un proyecto de ingeniería donde se valora el diseño, es importante que la estética del chasis sea buena. Además para el piloto y para cualquier usuario de motos es importante que el chasis le transmita seguridad a primera vista.

### ***Resistencia a impactos***

Es importante tener en cuenta que el chasis será utilizado para la competición donde las caídas e impactos que pueda sufrir éste son probables. Por lo tanto el chasis deberá ser capaz de soportar ciertas caídas.

### **8.3.3. Selección del tipo de chasis según necesidades**

Para la designación de la mejor solución se va a elaborar una matriz de decisiones de modo que se evalúen los diferentes tipos de chasis en función de las necesidades. Esta técnica consiste en evaluar los distintos chasis en base a distintos criterios (técnicos, económicos, ergonómicos, etc.) de modo que se pueda decidir cuál es el óptimo, teniendo en cuenta que se tratará de una solución de compromiso entre las ventajas e inconvenientes observadas en todos ellos. Primero se valora cada una de las necesidades

funcionales según su importancia. Se otorga un 3 a aquellas necesidades que sean de alta importancia, 2 a las de media y 1 a las de baja importancia.

IMPORTANCIA	VALOR
ALTA	3
MEDIA	2
BAJA	1

Tabla 8.2. Valoración.

La valoración de las necesidades funcionales según su importancia es:

NECESIDADES FUNCIONALES	VALORACIÓN
Rigidez	3
Cargas	3
Peso	3
Material	2
Dificultad Fabricación	2
Coste Fabricación	2
Espacio	2
Variabilidad	2
Montaje	2
Estética	1
Resistencia a impactos	1

Tabla 8.3. Valoración de las necesidades funcionales.

Ahora se va a valorar como cumple cada chasis los diferentes requerimientos funcionales.

CUMPLIMIENTO	VALORACIÓN
Muy bien	5
Bien	4
Normal	3
Mal	2
Muy Mal	1

Tabla 8.4. Valoración.

		TIPO CHASIS		
		DOBLE VIGA	TUBULAR TRIANGULADO	TUBULAR CONVENCIONAL
<b>NECESIDADES</b>	Rigidez	4	5	4
	Cargas	5	4	4
	Peso	4	3	3
	Material	3	4	4
	Dificultad Fabricación	3	4	4
	Coste Fabricación	2	4	3
	Espacio	4	3	3
	Variabilidad	4	4	5
	Montaje	4	4	4
	Estética	4	3	4
	Resistencia a impactos	3	3	3

Tabla 8.5. Valoración de los distintos tipos de chasis según necesidades.

Una vez realizada la valoración del cumplimiento de las necesidades funcionales por cada tipo de chasis, se va a obtener el producto de la importancia y el cumplimiento. Se sumarán todos los valores de cada chasis de forma que se obtendrá un valor representativo del cumplimiento de las necesidades por cada tipo de chasis, que permitirá seleccionar el que mejor se ajusta.

		TIPO CHASIS		
		DOBLE VIGA	TUBULAR TRIANGULADO	TUBULAR CONVENCIONAL
<b>NECESIDADES</b>	Rigidez	12	15	12
	Cargas	15	12	12
	Peso	12	9	9
	Material	6	8	8
	Dificultad Fabricación	6	8	8
	Coste Fabricación	4	8	6
	Espacio	8	6	6
	Variabilidad	8	8	10
	Montaje	8	8	8
	Estética	4	3	4
	Resistencia a impactos	3	3	3
<b>SUMA</b>		86	88	86

Tabla 8.6. Resultado de la valoración.

Según el análisis realizado, la solución que mejor se ajusta a nuestras necesidades es el chasis de tipo tubular triangulado. Sus principales ventajas son su buena rigidez y su resistencia a las cargas, además de sus buenas características de variabilidad. Y el hecho de disponer de los ejemplos de fabricantes que durante muchos años han diseñado chasis de este tipo, hace que nos decantemos por esta variante.

Este tipo de chasis suelen ser fabricados en acero, y va a ser la solución que se aplicará a nuestro modelo. Pero debido a la gran variedad de tipos de aceros y características que aporta cada uno de ellos, se deberá realizar un estudio para que la elección sea lo más apropiada posible.

## **9. SUSPENSIÓN TRASERA**

### **9.1. GENERALIDADES**

Al igual que en el tren delantero, el trasero, con el paso del tiempo, requirió un anclaje elástico con el chasis. Aunque la importancia de equipar suspensión en esta rueda era menos importante que en la delantera, debido a que la dirección del vehículo se encontraba en esta primera, la comodidad y el aumento de las velocidades lo hicieron necesario. Por ello, a partir del primer cuarto de siglo, los modelos de mayor cilindrada primero, y los demás con posterioridad, empezaron a disponer de distintos sistemas de suspensión trasera.

## 9.2. COMPONENTES

### 9.2.1. Amortiguación

Los elementos elásticos del tren trasero son los conjuntos muelle-amortiguador. Al igual que ocurría en la suspensión delantera, son sistemas que combinan el resorte, formado normalmente por un muelle helicoidal y un freno hidráulico, que puede trabajar tanto en la carrera de extensión como en la de compresión, con especial relevancia en la primera. La ventaja de los amortiguadores respecto de la horquilla, es que no reciben esfuerzos laterales de torsión o flexión, y, además, espacialmente no están tan limitados, de manera que pueden fabricarse con elementos hidráulicos más precisos y elaborados.

Los amortiguadores hidráulicos más sencillos están formados por una estructura cilíndrica cerrada, en la cual se encuentra un pistón dotado de válvulas, bien realizadas con taladros, o bien que incorporen láminas, que es lo más corriente. El pistón está unido a un vástago de manera que el cilindro se ancla a un extremo del amortiguador, y el vástago al otro, formando un mecanismo telescópico. El funcionamiento es muy sencillo. El trabajo elástico lo realiza el muelle helicoidal que se encuentra en el exterior, rodeando el amortiguador. Cuando el muelle se comprime, el pistón se introduce en el cilindro, estando este movimiento frenado por el paso del fluido hidráulico por las válvulas. La retención a compresión suele ser muy baja, si bien es cierto que complementa la resistencia a la deformación que ofrece el elemento elástico (en este caso el muelle), añadiendo por tanto una precarga adicional al mismo. Además, el aire o gas que queda por encima del aceite transvasado, al comprimirse, actúa como un elemento elástico de tipo neumático.

#### 9.2.1.1. Constante efectiva del muelle

La constante efectiva del muelle es una medida de la rigidez del resorte y se determina midiendo la fuerza extra necesaria para comprimir (o extender en algunos casos) el muelle una determinada longitud. Esto se suele expresar en N/mm. Así que un muelle con una constante de 10 N/mm necesitará una fuerza adicional de 100 N para comprimirlo 10 mm. En algunos casos, esta constante no varía en todo el rango de movimiento útil del muelle, y se denomina lineal. Por otra parte, algunos tipos de muelles exhiben una constante diferente a lo largo del movimiento del amortiguador, esto es a menudo conocido como un tipo progresivo, es decir, la constante aumenta con la carga adicional. Es muy importante entender la diferencia entre la constante efectiva y la carga. La carga es la fuerza total soportada por el amortiguador, mientras que la constante es la fuerza adicional necesaria para comprimir el muelle una longitud extra.

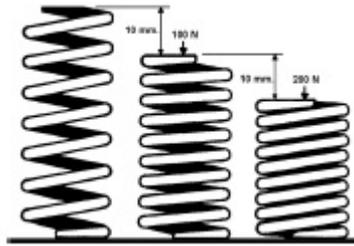


Figura 9.1. Constante efectiva del muelle.

La figura anterior muestra el significado de la constante efectiva del muelle. El muelle tiene una constante efectiva de 10 N/mm, por cada 10mm que queramos comprimir del muelle hacen falta 100 N de fuerza extra. Cuando llega al tope se convierte en un sólido rígido.

Los muelles se pueden hacer de múltiples formas y materiales, pero el rango práctico es más limitado. Los muelles helicoidales de acero son los más comunes por su largo recorrido. Pueden ser uniformes (constante efectiva lineal) o pueden ser variable (progresivos).

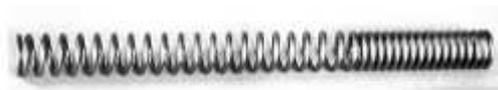


Figura 9.2. Muelle de constante variable.

### 9.2.1.2. Precarga y hundimiento

Cuando se monta un muelle en un amortiguador, se somete a un poco de compresión, incluso cuando está completamente extendido, con lo que se precarga el muelle hasta cierto punto. Esta precarga se puede expresar en términos de la compresión lineal del muelle (mm) o en términos de la carga o fuerza necesaria para dar esa compresión. En términos lineales, la precarga es la diferencia entre la longitud libre del muelle y la longitud cuando está instalado en el amortiguador.

El hundimiento o “sag” es la compresión que se produce en el muelle cuando se aplica el peso estático de moto y el piloto. Pero también usamos esta palabra para describir el hundimiento de la propia moto. Es habitual seleccionar arbitrariamente un punto de medición de referencia en algún lugar de la zona de debajo del asiento y aproximado a la vertical del eje de la rueda (siempre debe ser el mismo punto). La altura de este punto por encima del suelo, al ser sometidos a la carga estática, se conoce como la altura del asiento. La diferencia entre la altura del punto de referencia con la suspensión extendida y la altura del asiento estática es la compresión de la moto.

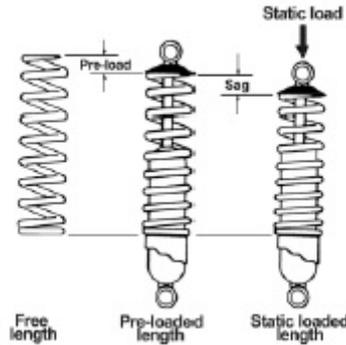


Figura 9.3. Precarga y carga estática.

A no ser que el amortiguador esté montado vertical en el eje de la rueda, la constante en la rueda será diferente de la constante del amortiguador, normalmente será menor. De hecho la relación que existe entre estas dos constantes sigue una ley cuadrática, esto es, si el brazo de palanca tiene un valor que hace que el movimiento de la rueda sea el doble que el del amortiguador, entonces la constante real del muelle será cuatro veces la constante efectiva requerida en la rueda.

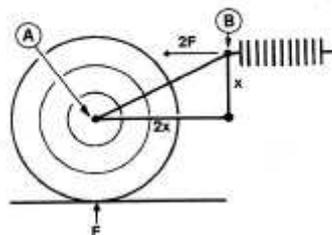


Figura 9.4. Montaje sistema amortiguación.

### 9.2.1.3. Regulación

Los amortiguadores de mejores prestaciones son los regulables, constituidos básicamente por la misma estructura que los descritos anteriormente, pero que permiten variar sus parámetros de funcionamiento. Los más especializados disponen de regulación de todos los elementos: precarga del muelle y ajuste del efecto amortiguante, tanto a extensión como compresión. Los más modernos disponen incluso de diferente regulación hidráulica para baja y alta velocidad.

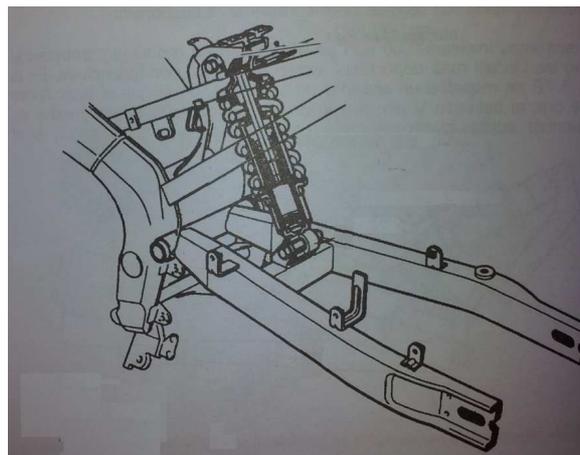
Una de las cuestiones más importantes, sin una solución completa en los sistemas de doble amortiguador, es la progresividad del sistema.

El problema de los recorridos de rueda se solucionó en parte, instalando los amortiguadores en posiciones más adelantadas, que obligaban a menores

desplazamientos de estos elementos, y a inclinaciones pronunciadas con el mismo fin, pero, aun así, en motocicletas de altas prestaciones esta disposición no era la idónea. El elemento tiene una respuesta lineal de la compresión con respecto al recorrido, por lo que la suspensión se comprime igual en el recorrido inicial y en el final. En principio, esto es poco aconsejable, ya que, mientras el recorrido inicial es interesante que sea blando, con el fin de absorber pequeñas irregularidades del terreno, la parte final debe ser dura, de modo que en curvas con una intensa fuerza centrífuga, o en grandes baches, la moto responda de una manera más firme.

Un intento inicial fueron los amortiguadores dotados de dos muelles. Cada uno de ellos disponía de una constante de deformación distinta, normalmente muy diferentes, de manera que el muelle blando funcionaba en los recorridos iniciales, y cuando éste se comprimía lo suficiente, entraba en acción el segundo de mayor dureza. Esto proporcionaba un funcionamiento con escalas, llegándose a emplear elementos con tres muelles diferentes. Sus principales ventajas estriban en la facilidad de colocación, mejor refrigeración, mayor rigidez del basculante, al estar guiado en sus extremos, en su economía y, en general, en la sencillez de diseño y mantenimiento. Sin embargo, en motocicletas de altas prestaciones en las que se requiere, dado su enorme potencial, un funcionamiento progresivo del tren posterior, se han impuesto los sistemas monoamortiguador, que se comenzaron a implantar a principios de la década de los 80.

La disposición más sencilla de este tipo es el anclaje del amortiguador desde el basculante hasta el chasis sin ningún tupo de elemento intermedio. En este caso, la dinámica es similar a la de los amortiguadores paralelos, aunque, al estar situados en una posición muy adelantada, el recorrido del muelle y de los elementos hidráulicos es mucho menor. En la siguiente figura se encuentra una suspensión trasera de este tipo, con el basculante, el amortiguador, y el anclaje al bastidor.



*Figura 9.5. Sistema monoamortiguador instalado directamente en el basculante.*

#### 9.2.1.4. Constante de la rueda

De la misma manera que podemos caracterizar un muelle por su constante, podemos asignar a la rueda un valor. La constante de la rueda (Wheel rate) se define como el cambio en la fuerza vertical necesario para mover una unidad de desplazamiento la rueda verticalmente (N/mm). Este parámetro y la constante del muelle están relacionados mediante el parámetro relación de velocidades, también llamado ventaja mecánica, relación de palanca o movimiento (se utiliza el término VR, velocity ratio, para referirnos a él). Simplificando, es la velocidad vertical de la rueda comparada con la velocidad de compresión del muelle.

Para entender el efecto del muelle en la rueda, se deben estudiar los movimientos relativos o desplazamientos de ambos.

En la siguiente imagen se puede ver el significado de VR y como las constantes de la rueda y el muelle se relacionan entre sí cuando el VR=2:1. La constante requerida en el muelle es cuatro veces la tasa de la rueda (o la de la rueda es ¼ la del muelle). De aquí se sacan las relaciones:

$$\text{Constante de la rueda} = \text{Constante del muelle} / \text{VR}^2$$

$$\text{Cte. muelle} = \text{Cte. Rueda} * \text{VR}^2$$

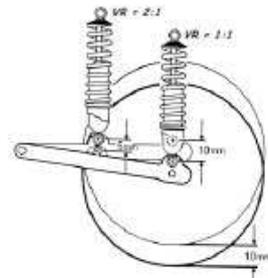


Figura 9.6. Relación de velocidades.

El rango de movimiento vertical de la rueda depende de la posición del muelle, si está más hacia delante, el rango aumenta. Esto se empezó a hacer con las motos de monte para conseguir más rango de movimiento en la rueda trasera.

Para calcular la relación entre la constante de la rueda y la del muelle, en un sistema de bieletas se tiene que calcular la relación de velocidades. Se puede hacer de manera simple si se considera el sistema como dos partes separadas, cada una con su propio VR. La de todo el sistema será simplemente el producto de ambas por separado. La siguiente figura muestra como un sistema de balancín-bieleta simple puede separarse en un sistema balancín-amortiguador-bieleta y en otra rueda-bieleta.

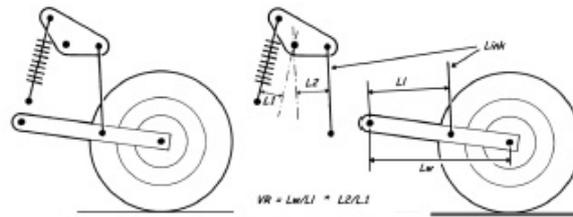


Figura 9.7. Relación de velocidades en un sistema de bieletas.

El VR total será:

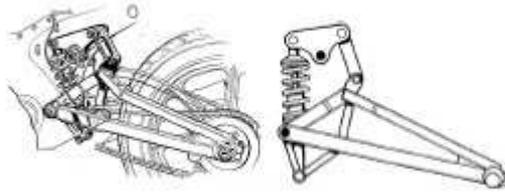
$$VR = L_w / L_1 * L_2 / L_1.$$

Este valor normalmente varía en todo el rango de movimiento dando una característica no lineal.

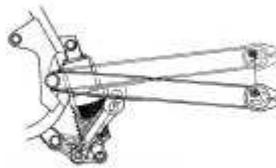
Estos sistemas daban a los fabricantes un nuevo campo donde investigar y hacer mercado, dando lugar a numerosas mejoras que realmente no tienen ninguna base y dan lugar a confusiones. Para comparar unos diseños con otros solo hace falta tener en cuenta unas pocas características:

- Peso del sistema.
- Masa no suspendida.
- Integridad estructural. ¿Es suficientemente rígido y resistente?
- Características de la constante de muelle y de amortiguación. ¿Cómo varía la constante con la compresión de la suspensión?
- Compacidad. Normalmente el espacio es un factor de gran importancia, especialmente en la actualidad, con airbox de gran capacidad, etc. El amortiguador suele necesitar cierto flujo de aire para refrigerarse y sería ridículo montarlo cerca del calor que despiden el sistema de escape. Un requerimiento a menudo conflictivo consiste en montarlo lejos de la suciedad de la carretera, los impactos de la gravilla, etc. Muchos diseños son debidos a cuestiones de espacio, aunque raramente se dice que sea por este motivo, es mucho mejor inventarse algún argumento que suene a avance tecnológico.
- El número de articulaciones. Cada una es una fuente de rozamiento y holguras, ambas cosas van en detrimento del buen comportamiento de la suspensión. Por este motivo es conveniente minimizar el número de articulaciones del sistema.

A continuación se pueden observar distintos sistemas de bieletas:



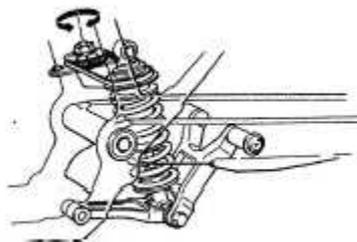
*Figura 9.8. Kawasaki KR 500.*



*Figura 9.9. Sistema Uni-Trak de Kawasaki.*



*Figura 9.10. Yamaha RD500LC.*



*Figura 9.11. Yamaha XJ600.*

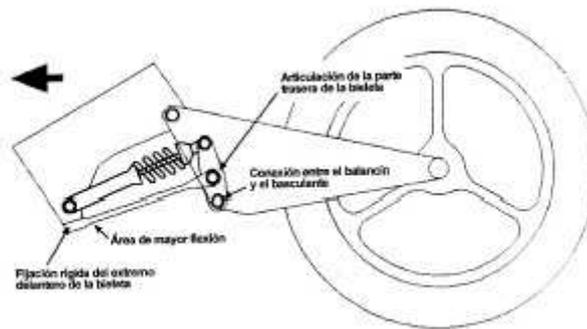


Figura 9.12. Sistema patentado de la Tul-Aris, que aprovecha la flexión controlada.

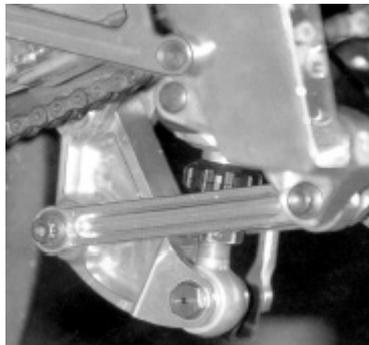


Figura 9.13. Sistema de bieletas de una moto GP moderna.

### 9.2.1.5. Tipos de sistema de suspensión

Se van a ver las distintas formas que existen de colocar la suspensión trasera, y qué puede aportar cada una de ellas.

#### *Conexión directa chasis-basculante*

En primer lugar, se tiene el amortiguador colocado directamente entre el basculante y el chasis, sin ningún tipo de bieleta.

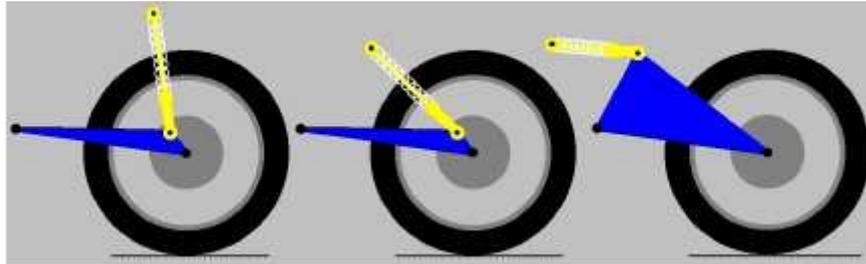


Figura 9.14. En la imagen de la izquierda, se ve el amortiguador situado casi en el eje trasero de la rueda (standard), y de forma muy vertical. En medio se puede observar el amortiguador anclado en la misma zona del basculante, pero esta vez de forma más inclinada (angled) y por último, se tiene el amortiguador prácticamente horizontal, y más elevado que los dos casos anteriores (cantilever).

En la gráfica siguiente se puede ver cuál sería el resultado de estos sistemas tan sencillos:

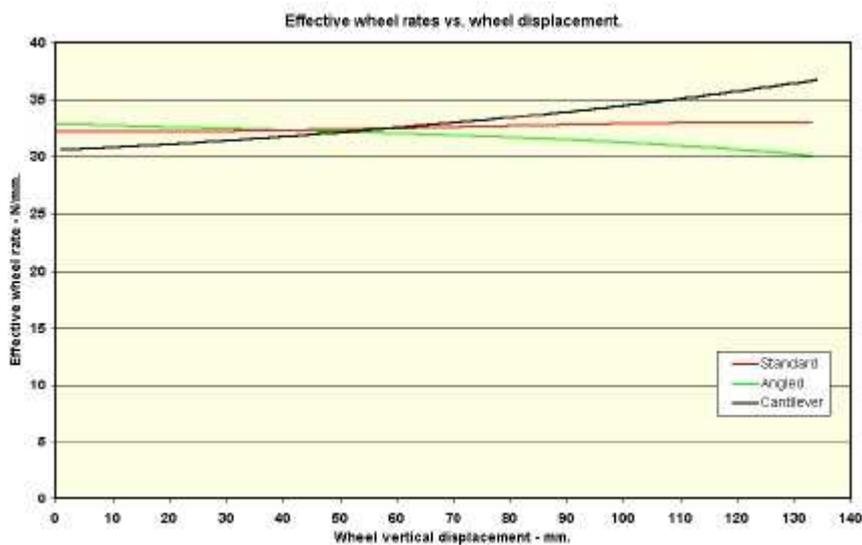


Figura 9.15. Comportamiento de los tres sistemas de conexión.

El punto principal a tener en cuenta en estos ejemplos de montaje directo al basculante es que, pese a ser los de montaje y funcionamiento más sencillo, es difícil conseguir algo más que una pequeña variación de la constante de la rueda en el rango de compresión del muelle.

### Sistema básico de bieletas

Hay muchas formas distintas y muchas veces se trata simplemente de las condiciones de espacio disponible lo que determina la disposición exacta. En general, es posible lograr

características similares con cualquier disposición mediante la selección de las dimensiones adecuadas de los componentes principales.

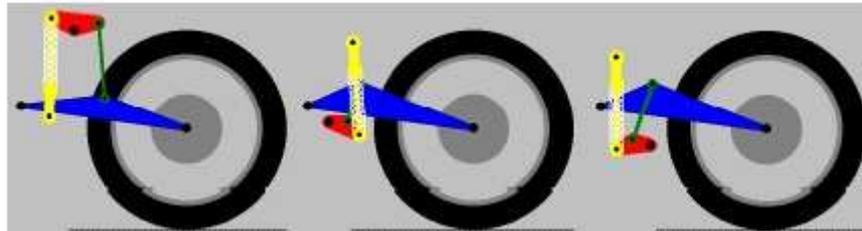


Figura 9.16. Distintas disposiciones en un sistema de bieletas.

Para ver cómo influyen algunos pequeños cambios en la configuración de este tipo de amortiguaciones se estudia el siguiente ejemplo:

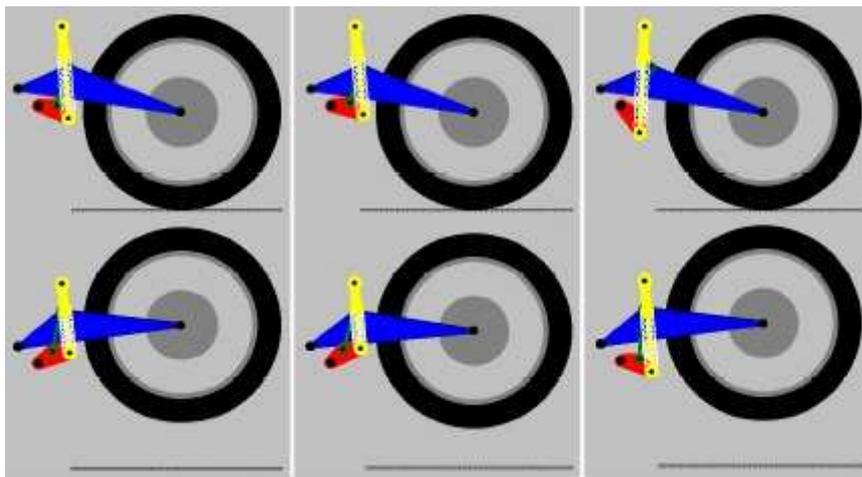


Figura 9.17. En primer lugar, se tiene la posición básica, en medio, el rocker a rotado debido a que se ha acortado la longitud del link y del amortiguador (para mantener la posición del piloto) y a la derecha el rocker ha girado en sentido contrario a la anterior (alargando el link y el amortiguador). Las ilustraciones inferiores muestran las suspensiones en su momento de compresión máxima.

Al igual que en el ejemplo anterior:

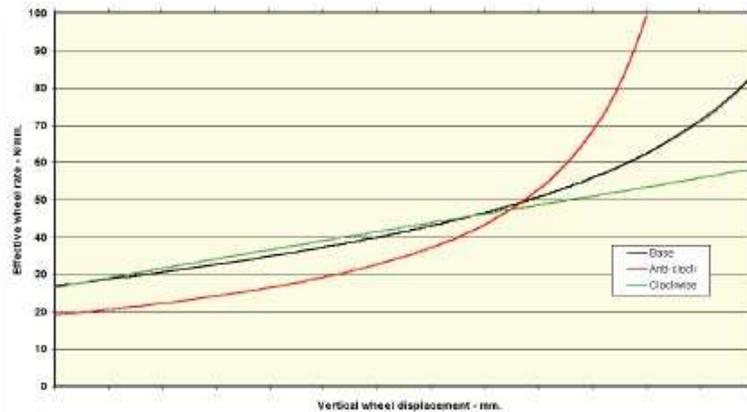


Figura 9.18. Comportamiento de las distintas configuraciones.

Esto pone de manifiesto que el caso con el amortiguador y el enlace más cortos tienen un carácter altamente progresista que realmente surge a partir de unos 90 mm de compresión. Es interesante observar que al modificar alargando el link y el amortiguador se pierden estas características tan progresivas (se suaviza la curva). Para ver por qué las características cambian tanto en el caso de la izquierda hay que mirar más de cerca la posición oscilante hacia el final del movimiento.

También se puede deducir otro concepto de estas gráficas:

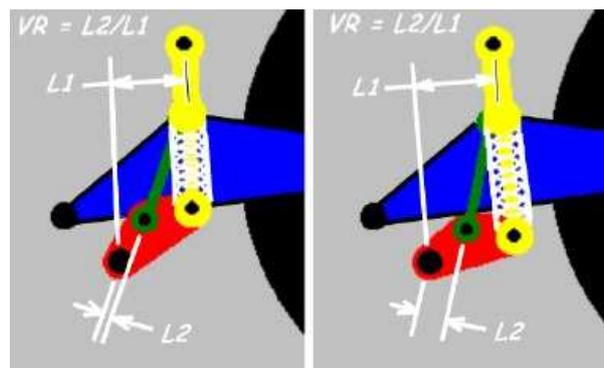


Figura 9.19. Detalle de las distintas disposiciones.

Se puede observar que en este caso la relación de velocidades es igual a  $L2/L1$ . Se tiene la fórmula que relaciona las constantes del muelle y de la rueda:

$$Cte. de la rueda = Cte. del muelle / VR^2$$

En este caso, la relación de velocidades tiende a ser cero, ya que  $L2$  disminuye hasta convertirse prácticamente en cero, lo que explica que la gráfica tienda hacia el infinito. Esto significa que la fuerza necesaria para mover la rueda es infinita, o lo que es lo mismo, es imposible seguir moviendo la rueda. El significado real de esto es que el eje del balancín y los dos extremos del link están en línea, evitando que la rueda se mueva más. Esta es una situación de bloqueo que se debe evitar a toda costa.

### Sistema de bieletas con el balancín situado en el basculante

Por último, se tiene el caso en el que el rocker o balancín está montado directamente sobre el basculante. En la siguiente figura se puede ver una configuración con pequeñas variaciones:

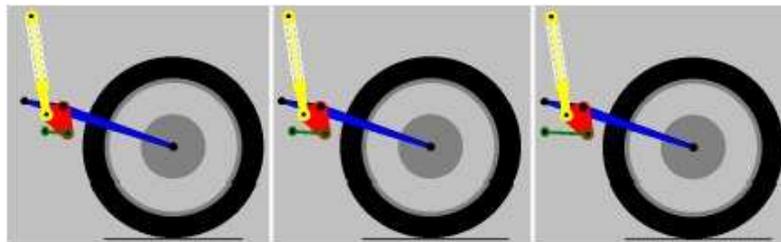


Figura 9.20. Distintas configuraciones con el balancín situado en el basculante.

Como ejemplo de esta clase de suspensión de diseño se va a considerar un diseño especial, similar al utilizado en algunas Hondas. Para tener una idea de cómo las características se pueden ajustar en un rango amplio, la única diferencia entre los tres casos es la longitud del enlace y su lugar de montaje.

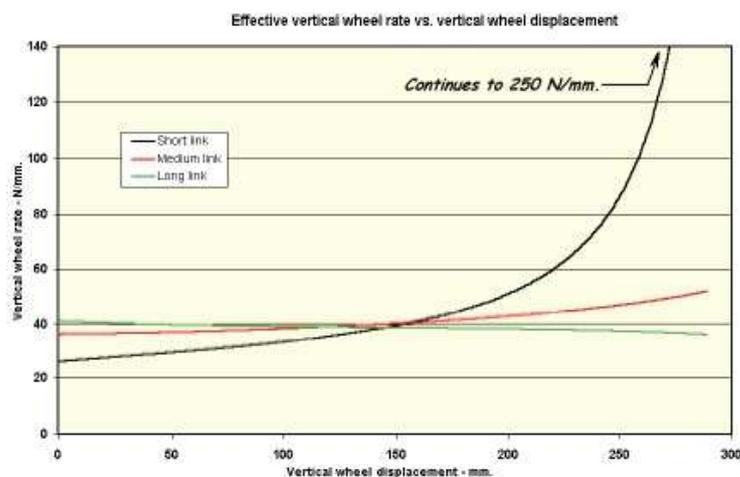


Figura 9.21. Comportamiento de las distintas configuraciones.

Se puede observar que la bieleta corta brinda un efecto altamente progresivo y la de tamaño medio produce un efecto ligeramente progresivo. En el caso de la más larga en cambio, se aprecia un carácter regresivo, en otras palabras, la tasa efectiva disminuye con la compresión del muelle (se vuelve más blanda). Así se puede observar que se puede lograr casi cualquier fuerza y propiedades de desplazamiento deseadas con este diseño básico con sólo hacer pequeños cambios en los componentes.

### **9.2.2. Basculante**

Aunque algunos de los primeros diseños de suspensiones con basculante estaban triangulados para tener una mayor rigidez estructural, parece que este aspecto fue largamente ignorado durante los años 50 y 60, cuando los basculantes comenzaron a ser universales.

La Norton Featherbed lidero un tipo de diseño, que utilizaba un tubo transversal para el giro junto con dos brazos laterales de un diámetro relativamente pequeño. La falta de rigidez torsional llegaba a tal nivel que Girling vendía amortiguadores ajustados por parejas como opción extra, para reducir la torsión adicional debida al desequilibrio de la suspensión. Hasta que Yamaha resucito el basculante triangulado, a finales de los 60 y durante los primeros 70, no se comenzó a prestar atención a las Consideraciones estructurales. Desde entonces hasta hoy en día, la rigidez de los basculantes se ha ido incrementando de forma gradual.

La flexibilidad del basculante permite que la rueda se mueva hacia los lados creándose ángulos de comba y de deriva y por lo tanto fuerzas de dirección. Como estas acciones sobre la dirección no están bajo el control directo del piloto, podemos pensar que van en detrimento del comportamiento dinámico y de la estabilidad, pero en cierto modo actúan de forma parecida al avance de la rueda delantera. Tanto la variación del ángulo de comba como el ángulo de deriva actúan oponiéndose a la fuerza perturbadora, y por lo tanto en algunos casos realmente pueden producir una distorsión menor en la dirección. En general la rigidez estructural de los componentes de un chasis hoy en día ya ha alcanzado un nivel que puede causar problemas para absorber los baches en las curvas, y algunos fabricantes están introduciendo de forma deliberada cierta flexión controlada.

#### **9.2.2.1. Monobrazo**

Los basculantes monobrazo se han usado desde hace mucho tiempo en pequeños ciclomotores y scooters, pero no empezaron a considerarse como una opción seria para motocicletas deportivas grandes y para motos de competición hasta que no aparecieron las Elf de resistencia diseñadas por Andre de Cortanze. Desde entonces ha existido diversidad de opiniones con respecto a esta solución. Honda lo ha empleado en una gran variedad de motos deportivas y de carreras, tanto con transmisión por cadena como por cardan. Ducati ha tenido mucho éxito en los circuitos. Mientras, BMW ha pasado a

emplear el monobrazo de forma exclusiva en todos sus modelos con transmisión por cardan, primero con un brazo rígido muy simple y más tarde con un sistema articulado llamado “paralever” que controla el levantamiento y el “squat”. MV ha decidido utilizar un monobrazo de fundición en su nueva superbike F4, De hecho los basculantes monobrazo tienen un uso mucho más amplio de lo que normalmente se piensa.



Figura 9.22. Basculante monobrazo de la Ducati 1098.

### 9.2.2.2. Doble brazo

Sin embargo, la mayoría de los fabricantes todavía utiliza el diseño estándar de los últimos 50 años, el basculante de doble brazo, de una forma u otra. ¿Cuál es el motivo? ¿Quizás se debe a la tradición, consideraciones de fiabilidad del producto, estética o es que el diseño simétrico del basculante de dos brazos tiene algunas ventajas técnicas? Lo que nos interesa es el aspecto técnico de esta pregunta y para encontrar la respuesta se tendrá que estudiar qué características hacen que un basculante sea bueno y cómo ambos planteamientos (monobrazo y doble brazo) llegan a encontrar esos requerimientos.



Figura 9.23. Ejemplo de basculante con doble brazo.

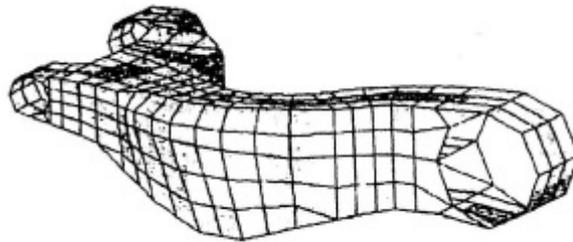
### 9.2.2.3. Comparación estructural

Asumiendo que ambas variantes tienen la misma geometría (misma longitud y los mismos puntos de anclaje al chasis), y que tanto el muelle como el amortiguamiento son iguales, existen tres criterios principales para compararlos:

- Rigidez estructural.
- Peso total.
- Masa no suspendida.

Dado que el diseño real de un basculante monobrazo y de uno de dos brazos varía tanto, resulta difícil poder compararlos.

Los basculantes monobrazo para transmisión por cadena al estilo de los que han diseñado Honda, Ducati y otros, utilizan formas muy complejas, debido a que montan la corona de la cadena por el lado de fuera. Las propiedades estructurales de estos brazos se pueden evaluar utilizando técnicas de análisis por elementos finitos. Es un método de cálculo por ordenador que considera que la estructura está compuesta por muchos elementos pequeños unidos juntos, de acuerdo a unas reglas determinadas, para formar la pieza completa. La imagen siguiente muestra un ejemplo de cómo se dividió un basculante Ducati de fundición de magnesio para este tipo de análisis. Normalmente los basculantes monobrazo para motos con transmisión por cardán tienen una construcción más sencilla.



*Figura 9.24. Análisis por elementos finitos de un basculante monobrazo Ducati.*

Las características de la deformación de un basculante de dos brazos dependen en gran medida de la naturaleza y la rigidez del eje de la rueda y de su método de anclaje. El peor caso lo encontramos en aquellos basculantes que tienen una fina chapa en su extremo con una ranura para el ajuste de la cadena, este caso se acerca mucho al de un eje con articulaciones en ambos extremos. El mejor caso probablemente lo podremos encontrar en máquinas con transmisión final por cardán, que suelen tener un eje con un anclaje muy rígido. La siguiente figura muestra el patrón de deformación de dos casos extremos. En el primero el eje no aporta ningún efecto rigidizador y en el segundo el eje tiene una unión completamente sólida con el basculante. En el mundo real, un basculante estaría en algún lugar entre estos dos extremos y los resultados que se verán más adelante son un promedio de estos dos valores extremos.

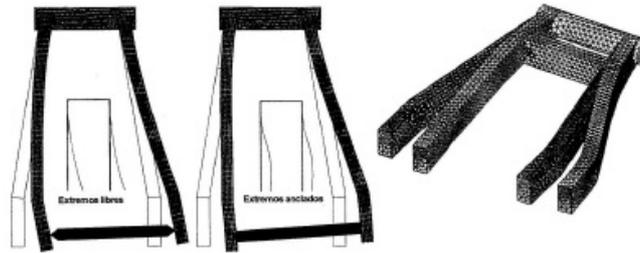


Figura 9.25. Patrón de dos casos extremos.

La deformación torsional del basculante de dos brazos tiene 3 fuentes principales de flexibilidad que debemos considerar:

- Torsión en el eje de pivotamiento del basculante.
- Flexión vertical de los brazos.
- Torsión de los brazos laterales, que depende fundamentalmente del tipo de anclaje del eje de la rueda, al igual que en el caso de la flexión lateral.

Para hacernos una idea acerca de si alguno de los dos tipos de construcción, monobrazo o doble brazo, tiene una ventaja estructural importante sobre el otro se van a considerar unos análisis por elementos finitos de ejemplos simples de cada tipo, en acero, y después se compararan los resultados. Cada tipo se ha analizado de dos formas, tal y como se muestra en la siguiente imagen.

El ejemplo de dos brazos se analiza tanto con un segundo tubo transversal de refuerzo, como sin él. El monobrazo con y sin un refuerzo de chapa por detrás del tubo de pivotamiento. En ambos casos se utilizan brazos de 457 mm de longitud, y ambos tienen tubos de pivotamiento idénticos, de 203 mm de ancho, 44,4 mm de diámetro y 3,17 mm de espesor de pared.

Para el diseño tradicional de dos brazos, estos están contruidos con chapa de 51 x 25 x 1,59 mm. Ésta es una configuración típica utilizada por muchos fabricantes de piezas especiales.

El basculante monobrazo que se va a analizar emplea un tubo de 76 mm de diámetro con una pared de 1,59 mm. Así que ambos casos corresponden a ejemplos prácticos.

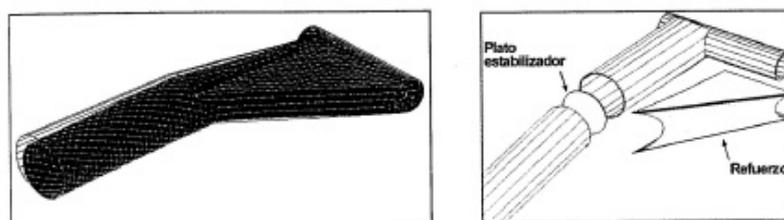


Figura 9.26. Detalle del basculante monobrazo analizado.

La siguiente figura muestra las deformaciones de la rueda que se han considerado y los resultados de los análisis. Se muestran como un porcentaje del resultado más rígido en cada caso. Se puede ver que de los dos ejemplos que se analizan ninguno tiene una ventaja clara sobre el otro. El monobrazo reforzado y el basculante de dos brazos reforzado con un segundo tubo transversal tienen prácticamente la misma rigidez en lo que se refiere a la variación del ángulo de comba.

En cuanto al desplazamiento lateral, el monobrazo es casi el doble de rígido, pero la situación es la contraria en el ángulo que gira la rueda (ángulo de guiñada). En el ejemplo de dos brazos la resistencia de la rueda a girar con un movimiento de guiñada depende mucho de la disposición del diseño. Por ejemplo si los dos brazos son paralelos, se tendrá un ángulo de giro muy pequeño a pesar de la flexibilidad lateral de los brazos. Por el contrario, si los brazos se abren hacia la parte trasera, como suele ocurrir casi siempre en la práctica, entonces la rueda girará cierto ángulo, tal y como se puede apreciar.

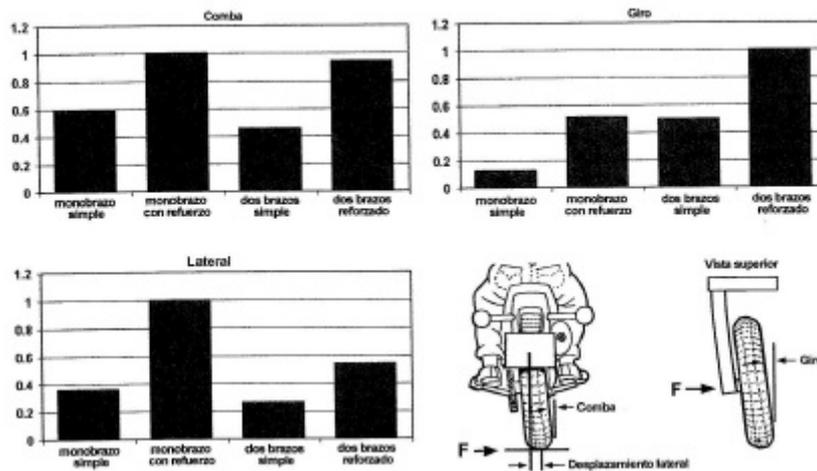


Fig. 9.27. Resultados de la comparación por elementos finitos. Los valores de rigidez se muestran en función del mejor de cada caso. El dibujo de abajo a la derecha muestra los 3 tipos de desplazamiento que se consideran en el análisis, cuando sometemos al conjunto a una fuerza lateral (F) en el punto de contacto del neumático con la carretera.

Así pues, resulta complicado generalizar sobre las características del diseño de doble brazo. Para ello hay que estudiar los detalles de ejemplos específicos.

Está claro que la adición del refuerzo del basculante monobrazo y del segundo tubo transversal en el basculante de doble brazo es muy eficiente a nivel estructural. En cada caso la rigidez global se multiplica aproximadamente por dos a cambio de un pequeño aumento de peso. Así pues, parece que ambos tipos de basculante se pueden construir para que tengan un comportamiento estructural satisfactorio. Las diferencias en los valores de rigidez que se han obtenido con estos ejemplos son menores que las que se podrían obtener con cualquier otro diseño dependiendo del diseño de detalle, por lo que

la decisión sobre qué tipo elegir normalmente estaría basada en otra clase de consideraciones. La facilidad para el cambio de rueda podría ser un punto definitivo a favor del monobrazo, especialmente en carreras de resistencia, pero existen otras consideraciones como el coste, la facilidad de ajuste de la cadena, la facilidad para conseguir las tolerancias de fabricación necesarias, la estética, la tradición y otras.

Como regla general, resulta necesario equilibrar la rigidez relativa de los componentes del chasis. Por ejemplo no tiene sentido aumentar el peso para rigidizar un buen basculante que se usa en un chasis muy flexible, sería mejor utilizar ese aumento de peso para rigidizar primero el chasis.

## 9.3. ANÁLISIS DE LA NECESIDADES (AMORTIGUACIÓN)

### 9.3.1. Primer análisis

Cabe destacar que no hay una respuesta correcta para cada tipo de moto, es decir, no hay una fórmula que indique qué tipo de suspensión es la que mejor funciona, si no que hay varios factores que influyen en la elección, como pueden ser el confort ante pequeños baches, o el almacenamiento de energía en el bache (importante para que no haya rebotes). Además, el piloto es un factor muy importante, ya que cada persona no responde igual a las reacciones de la moto.

A la hora de elegir el sistema de suspensión adecuado se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- Peso del sistema: se valora que el sistema pese lo menos posible.
- Masa no suspendida: interesa que sea la mínima posible.
- Integridad estructural.
- Características de la constante de muelle y de amortiguación.
- Compacidad: normalmente el espacio es un factor de gran importancia, especialmente en este proyecto, que emplea el espacio que generalmente se emplea en la amortiguación para disponer el sistema Tracklever.
- El número de articulaciones: cada una es una fuente de rozamiento y holguras, y ambas cosas van en detrimento del buen comportamiento de la suspensión. Por este motivo es conveniente minimizar el número de articulaciones del sistema.

No hay una fórmula que nos diga cuál es la mejor solución para nuestro caso.

La amortiguación de la moto no tiene la única función de aislar la moto y el piloto de los baches, sino que plantea otras muchas demandas. Incluso en una pista perfectamente lisa, también existen efectos de transferencia de carga tanto en frenada como en aceleración.

A la hora del diseño, el factor más importante a tener en cuenta va a ser la constante efectiva de la rueda, que es lo que refleja el comportamiento de la suspensión, y de la moto en definitiva, a la hora de tomar un bache o recibir simplemente una fuerza en la rueda.

No es fácil saber cuál es la constante efectiva buscada, ya que esto se basa en la experiencia, en hacer algo, probarlo y ver cómo funciona. Viene a ser el clásico prueba-error.

### **9.3.2. Necesidades funcionales**

Para realizar una correcta elección final del tipo de amortiguación, primero se estudiarán cuáles son todas las necesidades funcionales que debe cumplir.

#### ***Cargas***

La amortiguación tendrá que ser capaz de absorber en la mayor medida posible todas las irregularidades del terreno, facilitando así la conducción y mejorando el confort del piloto.

#### ***Peso***

Como en todos los vehículos de competición el peso es una característica importantísima, por ello se tratará de reducir bastante, pero no hay porqué obsesionarse con aligerarlo al máximo.

#### ***Sencillez***

Cada articulación es una fuente de rozamiento y holguras, y ambas cosas van en detrimento del buen comportamiento de la suspensión. Por este motivo es conveniente minimizar el número de articulaciones y piezas del sistema.

#### ***Fácil fabricación***

Dificultad de fabricación desde el punto de vista de conseguir los resultados esperados y de no encarecer demasiado el coste.

#### ***Coste de fabricación***

Tanto del material a utilizar como la mano de obra necesaria para la fabricación.

#### ***Espacio***

Referido a la posibilidad de realizar cambios sobre la moto en el menor tiempo posible, es decir que sean accesibles los elementos modificables. Esta función es necesaria en las motos de competición ya que se encuentran continuamente sometidas a cambios durante las carreras.

### ***Variabilidad***

Al tratarse de un primer prototipo y de no disponer de datos de partida, se tratará de realizar una configuración que permita realizar cambios sobre los parámetros geométricos de la motocicleta.

### ***Montaje***

La amortiguación tendrá que ser diseñada para que sea fácil el montaje de todos los elementos que componen la suspensión trasera.

### ***Estética***

Al tratarse de un proyecto de ingeniería donde se valora el diseño, es importante que la estética de la amortiguación sea buena. Además para el piloto y para cualquier usuario de motos es importante que ésta le transmita seguridad a primera vista.

### **9.3.3. Selección del tipo de amortiguación según necesidades**

Los dos grandes tipos de amortiguación que ya hemos analizado son los de conexión directa entre chasis y basculante y los que utilizan sistema de bieletas. El primero de ellos se divide en dos subgrupos, los que emplean un único amortiguador y los que emplean dos.

Al igual que con el chasis, se evalúan los distintos sistema de amortiguación en base a distintos criterios (técnicos, económicos, ergonómicos, etc.) de modo que se pueda decidir cuál es el óptimo, teniendo en cuenta que se tratará de una solución de compromiso entre las ventajas e inconvenientes observadas en todos ellos. Primero se valora cada una de las necesidades funcionales según su importancia.

<b>IMPORTANCIA</b>	<b>VALOR</b>
<b>ALTA</b>	3
<b>MEDIA</b>	2
<b>BAJA</b>	1

*Tabla 9.1. Valoración.*

La valoración de las necesidades funcionales según su importancia es:

NECESIDADES FUNCIONALES	VALORACIÓN
Cargas	3
Peso	2
Sencillez	2
Dificultad Fabricación	2
Coste Fabricación	2
Espacio	2
Variabilidad	2
Montaje	2
Estética	1

9.2. Valoración de las necesidades.

Ahora se va a valorar cómo cumple cada chasis los diferentes requerimientos funcionales.

CUMPLIMIENTO	VALORACIÓN
Muy bien	5
Bien	4
Normal	3
Mal	2
Muy Mal	1

Tabla 9.3. Valoración.

		TIPO AMORTIGUACIÓN		
		CONEXIÓN DIRECTA 1	CONEXIÓN DIRECTA 2	SISTEMA BIELETAS
<b>NECESIDADES</b>	Cargas	4	4	5
	Peso	5	4	4
	Sencillez	4	5	2
	Dificultad Fabricación	4	4	3
	Coste Fabricación	5	4	3
	Espacio	3	5	2
	Variabilidad	4	4	5
	Montaje	4	5	3
	Estética	4	3	4

Tabla 9.4. Resultado de los distintos tipos de amortiguación según las necesidades.

Una vez realizada la valoración del cumplimiento de las necesidades funcionales por cada tipo de amortiguación se va a obtener el producto de la importancia y el cumplimiento. Se sumarán todos los valores de cada amortiguación de forma que se obtendrá un valor representativo del cumplimiento de las necesidades por cada tipo de sistema. Cosa que permitirá seleccionar el que mejor se ajusta.

		TIPO AMORTIGUACIÓN		
		CONEXIÓN DIRECTA 1	CONEXIÓN DIRECTA 2	SISTEMA BIELETAS
<b>NECESIDADES</b>	Cargas	12	12	15
	Peso	10	8	8
	Sencillez	8	10	4
	Dificultad Fabricación	8	8	6
	Coste Fabricación	10	8	6
	Espacio	6	10	4
	Variabilidad	8	8	10
	Montaje	8	10	6
	Estética	4	3	4
	<b>SUMA</b>		74	77

Tabla 9.5. Resultado de la valoración.

Según el análisis realizado la solución que mejor se ajusta a nuestras necesidades es la conexión directa entre el chasis y el basculante mediante dos amortiguadores. Sus principales ventajas son su sencillez, su facilidad de montaje y su peculiar ubicación, compatible con la utilización del tracklever.

El recorrido de la suspensión trasera será, al igual que la delantera, de **100 mm**. Ambas suspensiones deben tener una rigidez tal que se hundan lo mismo bajo el peso del chasis y del piloto cuando la moto está en reposo, para un mejor equilibrio del conjunto.

Los amortiguadores se pueden encargar con los recorridos, longitudes y tarados a la medida de las necesidades que se requieran. Las referencias tomadas en otras motos de la modalidad nos dicen que la constante elástica del muelle de cada amortiguador debe ser de **10 N/mm**. La regulación de la precarga se efectuará por tuerca y contratuerca, con una longitud de rosca de **30 mm**. La masa no suspendida del tren trasero se estima inicialmente en **13,5 kg**. La rueda es de **10,5 kg**.

Otra ventaja de poner dos amortiguadores laterales en vez de uno central, es que el hueco que deja este puede aprovecharse para que el tubo de escape pase por él a través del basculante. El tubo de escape de un motor de dos tiempos es muy voluminoso, aumenta la anchura de la moto y está muy expuesto a golpes y a causar quemaduras al piloto. De esta manera queda totalmente oculto dentro de la moto.

## 9.4. ANÁLISIS DE LAS NECESIDADES (BASCULANTE)

### 9.4.1. Primer análisis

Primeramente, se va a elegir qué tipo de basculante se va a diseñar, monobrazo o de doble brazo. Aunque la idea inicial es utilizar dos amortiguadores (uno a cada lado), y la única solución para esto es el basculante de doble brazo, se van a comparar los dos modelos, teniendo en cuenta rigidez, peso total, espacio y facilidad de diseño y fabricación, para verificar que es la mejor opción para nuestro prototipo.

#### *Rigidez*

Se ha visto que en ambos casos se pueden conseguir altas rigideces reforzando el modelo. Existen pocas diferencias entre uno o dos brazos. Este concepto no va a ser muy indicativo a la hora de elegir entre uno y otro.

#### *Peso*

En este caso tampoco hay mucha diferencia, aunque el basculante de un solo brazo necesita más masa para llegar a los mismos valores de rigidez que el de dos brazos.

#### *Espacio*

Va a ser un factor importante de diseño, ya que en la zona media de la moto hay un gran número de elementos y articulaciones. El basculante monobrazo ocupa sólo el lado de la cadena (lo que complica el diseño), y además nos dificultaría el anclaje del sistema Trac Lever. Mientras que en el de doble brazo reforzado el paso de la cadena se hace más sencillo ya que liberas el espacio de dicha zona.

#### *Facilidad de diseño y fabricación*

En cuanto al diseño, el monobrazo requiere prestar mucha atención al paso de la cadena, y dimensionarlo se antoja más complicado, mientras que un basculante de dos brazos es algo más sencillo debido a que es casi simétrico y el volumen está más distribuido alrededor de la rueda.

Por todo esto, y siendo apoyada la decisión por la idea de usar doble amortiguación trasera, se opta por el **basculante de dos brazos**.

#### **9.4.2. Necesidades funcionales**

Para realizar una correcta elección final del tipo y material del basculante a fabricar, primero se estudiarán cuáles son todas las necesidades funcionales que debe cumplir. Para ello se realiza una búsqueda intuitiva mediante un “brainstorming”, de forma que se obtienen la gran mayoría de requerimientos funcionales.

##### ***Rigidez***

Como ya se ha visto, es una de las características principales de un basculante. La estructura de la moto debe ser capaz de mantener los parámetros geométricos dentro de unos valores adecuados ante todas las condiciones de carga que se prevean que pueden tener lugar. La rigidez está relacionada con la deformación temporal que sufre la estructura cuando se le aplica una carga y después se descarga. Por lo tanto se tratará de diseñar un basculante lo más rígido posible.

##### ***Cargas***

El basculante tendrá que ser capaz de soportar todas las cargas sin entrar en la zona plástica del material. Habrá situaciones en las que soportará el peso de todos los componentes y del piloto, debido a la transferencia de cargas. También hay que tener en cuenta las reacciones en los neumáticos así como las cargas dinámicas que se generen en el funcionamiento de la moto.

##### ***Peso***

Como en todos los vehículos de competición el peso es una característica importantísima, por ello se tratará de reducirlo bastante, pero no hay que obsesionarse con aligerarlo al máximo.

##### ***Material***

El material seleccionado influirá tanto en el diseño como en el coste del prototipo.

##### ***Dificultad de fabricación***

Dificultad de fabricación desde un punto de vista de conseguir los resultados esperados y de no encarecer demasiado el coste.

### ***Coste de fabricación***

Tanto del material a utilizar como la mano de obra necesaria para la fabricación.

### ***Espacio***

Referido a la posibilidad de realizar cambios sobre la moto en el menor tiempo posible, es decir que sean accesibles los elementos modificables. Esta función es necesaria en las motos de competición ya que se encuentran continuamente sometidas a cambios durante las carreras.

### ***Variabilidad***

Al tratarse de un primer prototipo y de no disponer de datos de partida, se tratará de realizar una configuración que permita realizar cambios sobre los parámetros geométricos de la motocicleta. Estos cambios se refieren a la posición de la rueda trasera y a la posición del anclaje del amortiguador.

### ***Montaje***

El basculante tendrá que ser diseñado para que sea fácil el montaje de todos los elementos que componen la suspensión trasera.

### ***Estética***

Al tratarse de un proyecto de ingeniería donde se valora el diseño, es importante que la estética del basculante sea buena. Además para el piloto y para cualquier usuario de motos es importante que el basculante le transmita seguridad a primera vista.

### ***Resistencia a impactos***

Es importante tener en cuenta que el chasis será utilizado para la competición donde las caídas e impactos que pueda sufrir éste son probables. Por lo tanto deberá ser capaz de soportar ciertas caídas.

### 9.4.3. Selección del tipo de basculante según necesidades

Ahora toca plantear los distintos tipos de basculante de doble brazo, vistos desde el punto de vista de la fabricación. Las dos grandes familias de basculantes son los fabricados en aluminio y los hechos con acero, ya sea mediante perfiles o tubos. Se añade a estas dos opciones una tercera, poco utilizada, pero que puede aportar cosas interesantes, como mayor rigidez y reducción de peso, la fibra de carbono.

Al igual que con el chasis y la amortiguación, se evalúan los distintos basculantes en base a distintos criterios (técnicos, económicos, ergonómicos, etc.) de modo que se pueda decidir cuál es el óptimo, teniendo en cuenta que se tratará de una solución de compromiso entre las ventajas e inconvenientes observadas en todos ellos. Primero se valora cada una de las necesidades funcionales según su importancia.

IMPORTANCIA	VALOR
ALTA	3
MEDIA	2
BAJA	1

Tabla 9.6. Valoración.

La valoración de las necesidades funcionales según su importancia es:

NECESIDADES FUNCIONALES	VALORACIÓN
Rigidez	3
Cargas	3
Peso	2
Material	2
Dificultad Fabricación	2
Coste Fabricación	2
Espacio	2
Variabilidad	2
Montaje	2
Estética	1
Resistencia a impactos	1

Tabla 9.7. Valoración de las necesidades.

Ahora se va a valorar cómo cumple cada chasis los diferentes requerimientos funcionales.

CUMPLIMIENTO	VALORACIÓN
Muy bien	5
Bien	4
Normal	3
Mal	2
Muy Mal	1

Tabla 9.8. Valoración.

		TIPO BASCULANTE		
		ALUMINIO	ACERO	FIBRA DE CARBONO
<b>NECESIDADES</b>	Rigidez	4	5	4
	Cargas	5	5	5
	Peso	4	3	5
	Material	3	4	3
	Dificultad Fabricación	3	4	2
	Coste Fabricación	2	4	2
	Espacio	3	3	3
	Variabilidad	4	4	3
	Montaje	4	4	4
	Estética	4	3	5
	Resistencia a impactos	3	3	1

Tabla 9.9. Resultado de los distintos tipos de basculante según las necesidades.

Una vez realizada la valoración del cumplimiento de las necesidades funcionales por cada tipo de basculante, se va a obtener el producto de la importancia y el cumplimiento. Se sumarán todos los valores de cada basculante de forma que se obtendrá un valor representativo del cumplimiento de las necesidades por cada tipo de basculante. Cosa que permitirá seleccionar el que mejor se ajusta.

		TIPO BASCULANTE		
		ALUMINIO	ACERO	FIBRA DE CARBONO
<b>NECESIDADES</b>	Rigidez	12	15	12
	Cargas	15	15	15
	Peso	8	6	10
	Material	6	8	6
	Dificultad Fabricación	6	8	4
	Coste Fabricación	4	8	4
	Espacio	6	6	6
	Variabilidad	8	8	6
	Montaje	8	8	8
	Estética	4	3	5
	Resistencia a impactos	3	3	1
<b>SUMA</b>		80	88	77

Tabla 9.10. Resultado de la valoración.

Según el análisis realizado la solución que mejor se ajusta a nuestras necesidades es el basculante de tubos o perfiles de acero. Sus principales ventajas son su buena rigidez y su resistencia a las cargas, además de sus buenas características de fabricación. Y el hecho de disponer de los ejemplos de fabricantes que durante muchos años han diseñado basculantes de este tipo, hace que nos decantemos por este tipo de basculante.

## **10. DISEÑO PRELIMINAR**

### **10.1. INTRODUCCIÓN**

Las funciones principales de un bastidor de motocicleta son principalmente de dos tipos: estáticas y dinámicas.

Desde el punto de vista estático el chasis y el basculante deben ser capaces de soportar el peso del piloto, del motor, la transmisión y todos los accesorios necesarios para el correcto funcionamiento, como pueden ser los depósitos de aceite y gasolina.

La otra función es la que se refiere a la dinámica de la moto. El chasis y el basculante, junto a otros elementos como horquilla y ruedas, son los encargados de proporcionar una buena adherencia, manejabilidad y confort.

Para que la motocicleta sea capaz de seguir la dirección deseada, ambos elementos deben ser capaces de proporcionar una buena resistencia a la flexión y a la torsión. Además deben conseguir mantener las ruedas en el mismo plano y que no se modifiquen los parámetros geométricos impuestos ante las fuerzas a las que será sometido debido a los baches, la propia transmisión, las frenadas y las curvas.

Otra de las características que debe cumplir una motocicleta es la manejabilidad y el mantener el contacto de los neumáticos con la carretera. Para estos dos aspectos la rigidez del chasis toma un papel importante, siendo muchas veces las necesidades contradictorias entre sí. Por lo tanto, para realizar un buen diseño habrá que buscar la mejor relación entre ambas.

## **10.2. DISEÑO CONCEPTUAL**

Una vez desarrollados los requerimientos funcionales que nuestro producto debe cumplir se comienza el diseño conceptual de los distintos componentes y los mecanismos de funcionamiento del producto. Para ello se realizan bocetos y dibujos con el fin de explicar mejor las ideas que nos abordan.

Para un correcto diseño, se divide el diseño en dos partes principales. La primera consiste en la configuración geométrica tanto de las barras que unirán la pipa de dirección con el eje del basculante, como el propio basculante. La función principal de ambos elementos es unir estos puntos de forma que permanezcan invariables. Por lo tanto se tratará de realizar un chasis y un basculante lo más rígidos posible, sin descuidar el peso.

La segunda parte del diseño se centrará en el diseño de todos los anclajes y uniones, debido a que el chasis y el basculante son los encargados de soportar todas las fuerzas estos deberán ser estudiados en detalle. Además, la necesidad de permitir la variabilidad de ciertas cotas hará que cada uno de los anclajes deba ser estudiado de forma individual.

### **10.2.1. Configuración geométrica**

Este término se refiere a la disposición de las barras que unen, por un lado, la pipa de dirección con el anclaje del basculante, y por otro, el eje del basculante, situado en el chasis, con el eje de la rueda trasera. Hay que tratar de optimizar la geometría que proporcione mayor rigidez en ciertos ensayos. Sin entrar con demasiada profundidad en cómo se producen los anclajes del subchasis, jaula, depósito, amortiguador trasero, etc.

Cuanto mayor sea el número de barras y mayor sea el espesor de éstas se conseguirá una mayor rigidez. El problema es que un aumento excesivo del peso penaliza en carrera por lo que es necesario buscar una relación rigidez/peso adecuada.

### 10.2.2. Parámetros geométricos

Estos son los parámetros geométricos de la moto:

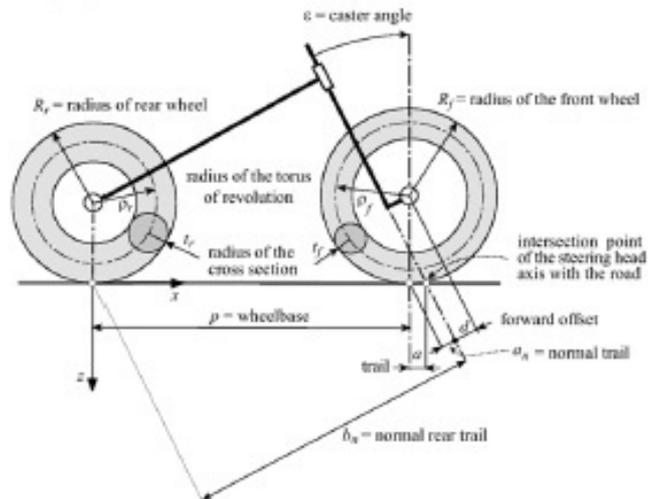


Figura 10.1. Parámetros geométricos de la motocicleta.

#### *Distancia entre ejes*

Se trata de la distancia entre los puntos de contacto de los neumáticos con la carretera. En el dibujo es “p” (wheelbase).

$$p = 1350 \text{ mm}$$

#### *Ángulo de lanzamiento*

Es el ángulo que forma la pipa de dirección con el eje vertical. En el dibujo es “ε” (caster angle).

$$\varepsilon = 0,3840 \text{ rad}$$

#### *Avance normal*

Es la mínima distancia entre el punto de contacto del neumático delantero con la carretera y el eje de dirección. En el dibujo es “an” (normal trail).

$$an = 70,47 \text{ mm}$$

***Distancia longitudinal del Centro de gravedad***

Es la distancia longitudinal del centro de gravedad respecto a la rueda trasera.

$$b = 570 \text{ mm}$$

***Distancia vertical del Centro de gravedad***

Es la distancia vertical del centro de gravedad respecto al suelo.

$$h = 650 \text{ mm}$$

***Radio del neumático delantero***

$$Rf = 346,7 \text{ mm}$$

***Radio del neumático trasero***

$$Rr = 324,6 \text{ mm}$$

***Longitud del basculante***

$$\text{Long. basculante} = 650 \text{ mm}$$

***Ángulo del basculante***

$$\tau = 25,7^\circ$$

***Altura del eje del basculante***

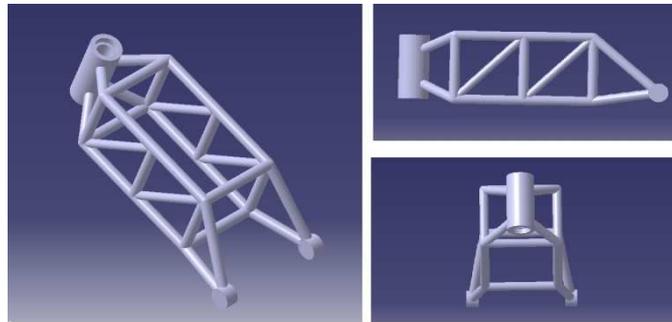
$$h = 647 \text{ mm}$$

### 10.2.3. Bocetos

Teniendo en cuenta los diferentes parámetros geométricos se realizan varios bocetos, tanto para el chasis, como para el basculante. Los distintos bocetos varían geoméricamente entre ellos, de forma que podamos optar a distintas alternativas en el caso de que en los próximos análisis surjan problemas de rigidez.

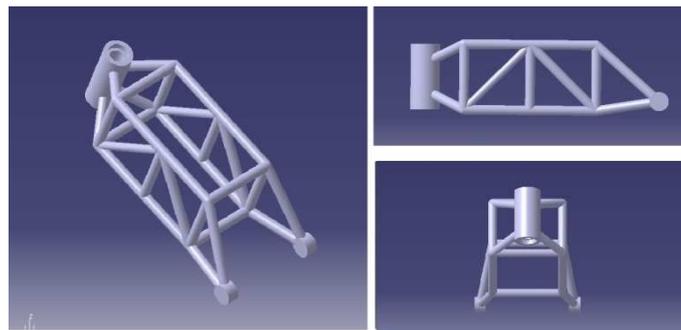
#### 10.2.3.1. Chasis

##### *Boceto 1*



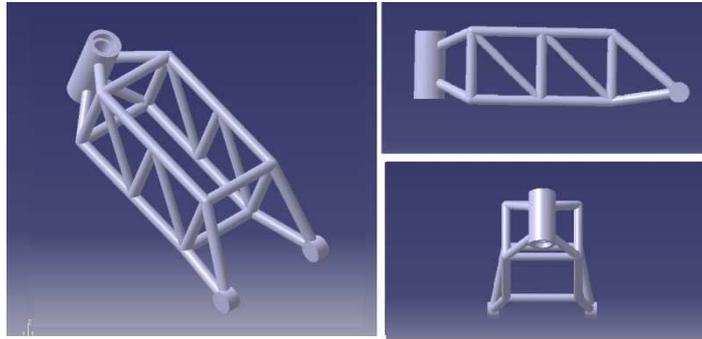
*Figura 10.2. Boceto 1 del chasis.*

##### *Boceto 2*



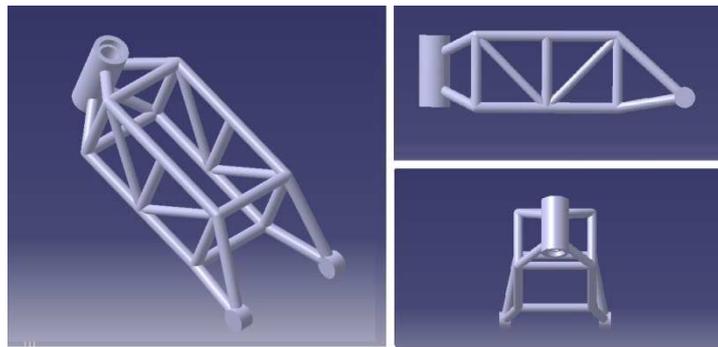
*Figura 10.3. Boceto 2 del chasis.*

***Boceto 3***



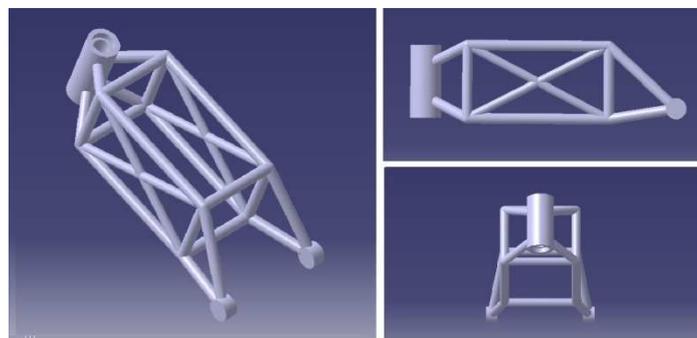
*Figura 10.4. Boceto 3 del chasis.*

***Boceto 4***



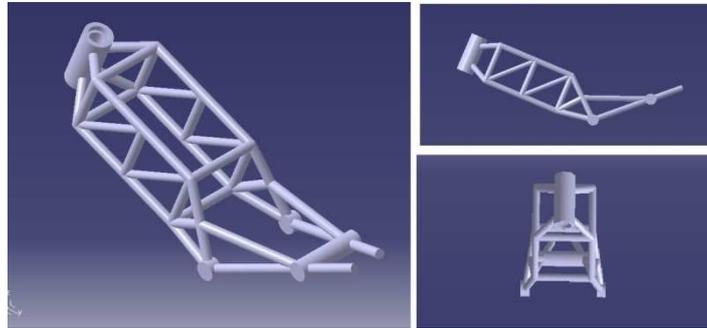
*Figura 10.5. Boceto 4 del chasis.*

***Boceto 5***



*Figura 10.6. Boceto 5 del chasis.*

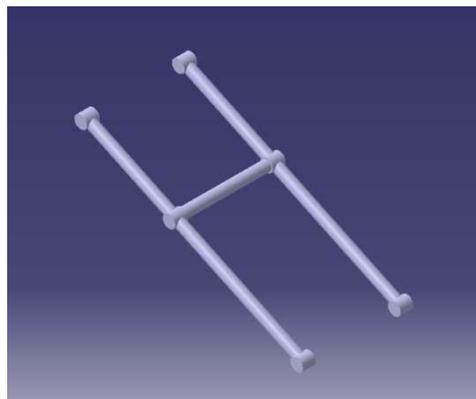
**Boceto 6**



*Figura 10.7. Boceto 6 del chasis.*

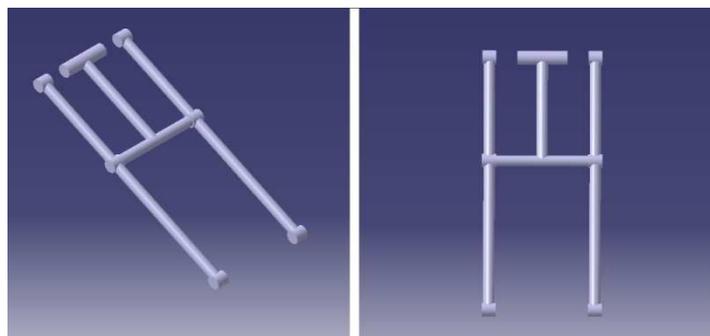
**10.2.3.2. Basculante**

**Boceto 1**



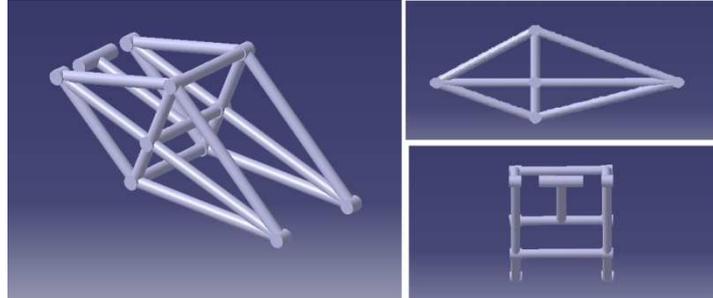
*Figura 10.8. Boceto 1 del basculante.*

**Boceto 2**



*Figura 10.9. Boceto 2 del basculante.*

### **Boceto 3**



*Figura 10.10. Boceto 3 del chasis.*

#### **10.2.4. Selección de la geometría**

En lo que respecta al chasis, el modelo que mejor puede resolver nuestras necesidades parece ser el boceto número 6. Como ya se ha comentado, la suspensión trasera va a constar de dos amortiguadores dispuestos en los dos brazos del basculante, y la extensión trasera que presenta el boceto número 6 parece facilitar el anclaje de estos amortiguadores al chasis. Claro es también que si en el análisis por elementos finitos surge algún problema de rigidez, se podrá combinar esta geometría con la de los otros modelos para intentar solucionarlo. Además, será necesario disponer del apoyo para el piñón de reenvío, por lo que habrá que realizar modificaciones respecto a los primeros bocetos.

A la hora de seleccionar un basculante hay que tener en cuenta que, debido al sistema Tracklever, una de las zonas que más esfuerzos van a sufrir va a ser el eje de unión con el chasis. Que a su vez aporta cierta complejidad a la estructura, debido a la necesidad de instalar un plato concéntrico a dicho eje. Por ese motivo el modelo elegido es el boceto número 3, que dispone de mucha variabilidad, en caso de necesitar cambios.

De forma que el análisis inicial se realizará sobre estos modelos, y se irán modificando según los requerimientos que señalen los datos del análisis.

### 10.3. DISEÑO DE ANCLAJES Y UNIONES

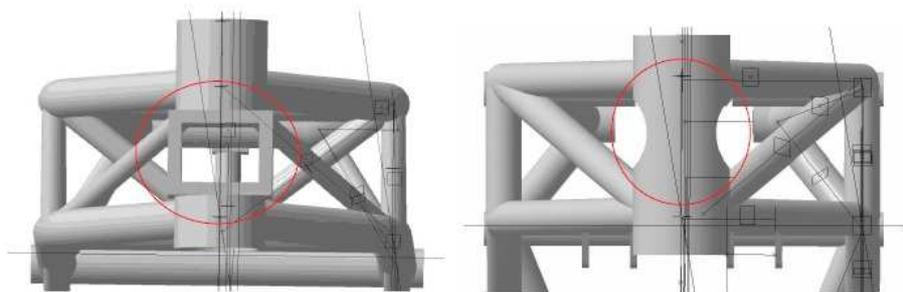
En este apartado se va a realizar un análisis más detallado de todos los anclajes y uniones presentes tanto en el chasis como en el basculante.

Debido a la gran variedad en la longitud de las pistas y condiciones del terreno que existen en Dirt Track, se va a tratar de que algunos elementos que tienen importancia en el comportamiento dinámico sean variables, como puede ser la posición de la rueda trasera, modificando de esta manera la batalla de la motocicleta.

#### 10.3.1. Pipa de dirección

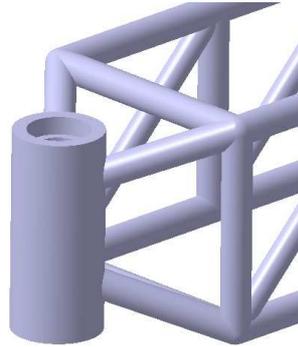
La pipa de dirección es uno de los elementos estructurales del chasis que está sometido a mayores tensiones, por lo que hay que prestar especial atención a su diseño. Por norma general su diseño suele ser el de un cilindro a través del cual pasa un eje que une las tijas.

Sin embargo, en las motos de carretera, generalmente la entrada del aire del “airbox” se encuentra en la parte frontal del carenado (ya que éste es el punto de mayor presión), por lo que existen diseños alternativos que tratan de interferir lo menos posible en este flujo de aire. Existen dos posibilidades, hacer una bifurcación para evitar la pipa de dirección, con la consiguiente pérdida de velocidad del aire o tratar de realizar un diseño de pipa que interfiera lo menos posible en la circulación del aire. En la siguiente figura se muestran las dos alternativas.



*Figura 10.11. Posibles alternativas para la mejora del flujo de aire.*

En nuestro caso, debido a la colocación especial del motor, y a que aproximadamente la mitad del recorrido de un circuito ovalado se realiza derrapando y, por lo tanto, el morro de la motocicleta no es el punto de mayor presión del aire, el prototipo que se va a realizar, es el diseño cilíndrico convencional.



*Figura 10.12. Modelo de tija que se va a emplear.*

### **10.3.2. Anclaje del basculante en el chasis**

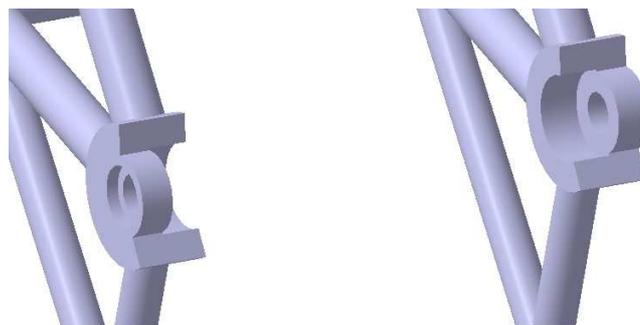
El eje del basculante es otro de los elementos críticos del chasis, ya que además de soportar cargas elevadas provenientes de la rueda trasera, influye en el comportamiento dinámico de la moto.

Su posición ya se ha analizado en puntos anteriores.

La importancia de la situación de dicho eje y la incertidumbre de su posición óptima provoca que en muchos diseños se plantee la posibilidad de diseñar un chasis que permita realizar modificaciones en su posición relativa, de manera que se puedan hacer ajustes amplios a la hora de hacer la puesta a punto.

Sin embargo, el sistema Tracklever busca optimizar el comportamiento de la suspensión trasera con otros métodos (ya explicados en apartados anteriores), por lo que no permite realizar estas variaciones.

El principal problema surgido al idear este punto del chasis es la excesiva anchura que se obtiene, ya que, hay que recordar, que además de ensamblar chasis y basculante, como es lo habitual, en este caso también hay que disponer de dos platos dentados. En la imagen siguiente se muestra la solución escogida.

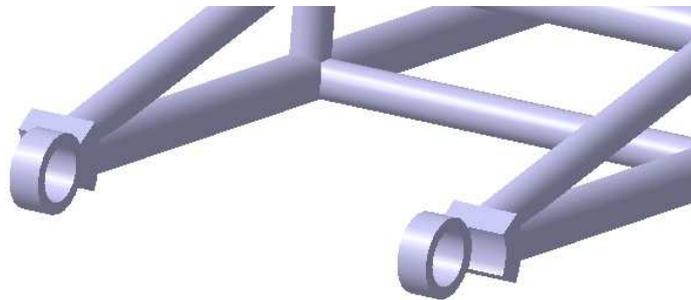


*Figura 10.13. Anclaje del basculante en el chasis que se va a emplear.*

### 10.3.3. Eje del basculante

En este caso son dos los principales puntos a tener en cuenta. El primero se corresponde con el tratado en el punto anterior y consiste en la excesiva anchura que se obtiene. La solución sigue la línea del anclaje en el chasis, y basta con que ambas se solapen.

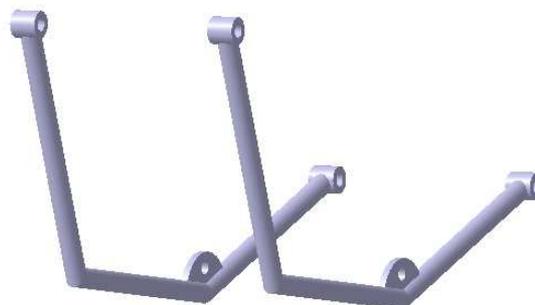
El segundo factor a tener en cuenta es la ocupación del espacio intermedio por los dos platos coaxiales. De modo que el eje del basculante será interrumpido en su zona central para facilitar esta disposición.



*Figura 10.14. Eje del basculante que se desea emplear.*

### 10.3.4. Jaula

La jaula básicamente se compone de dos barras de acero que, envolviendo al motor, permiten anclar éste al chasis. Su facilidad de fabricación y de montaje son unas de sus características principales.



*Figura 10.15. Ejemplo de jaula.*

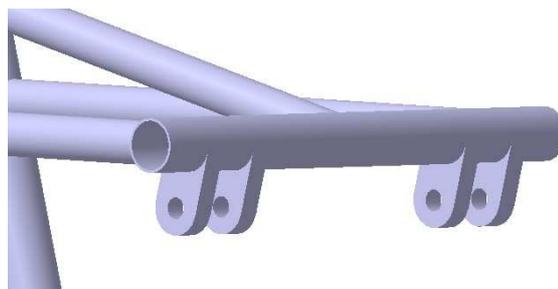
El anclaje de dichas barras al chasis se realizará de la manera más sencilla posible para permitir su montaje y desmontaje. Estos anclajes deberán ser, además, lo suficientemente rígidos para soportar el peso y las cargas que se transmiten a través del motor.



*Figura 10.16. Elementos dispuestos para el anclaje de la jaula.*

### **10.3.5. Anclajes de los amortiguadores**

Estos anclajes deberán soportar las cargas que les transmiten los amortiguadores traseros. Su posición afecta al comportamiento dinámico de la motocicleta además de a la geometría de esta. Esto hace que la simplicidad sea un factor importante en el diseño de estos anclajes, por lo que se recurre a los que han sido empleados para la jaula.



*Figura 10.17. Anclajes para los amortiguadores traseros (similares a los empleados en la jaula).*

### **10.3.6. Anclaje para el eje de la rueda**

La posición de la rueda trasera conviene que se pueda modificar por varios motivos. En primer lugar, nos interesa poder variar la distancia entre ejes, que afecta al comportamiento de la moto. Al aumentarlo, la moto se vuelve más estable en recta, pero menos manejable en curva, y viceversa.

Una de las soluciones es colocar en el eje unas excéntricas, que con tan solo girarlas y variar su posición, también lo haga la del eje de la rueda y así variamos la batalla. Es una opción algo complicada que requiere soltar el eje de la rueda por completo para hacer variaciones.



*Figura 10.18. Ejemplo de excéntricas utilizadas en el eje trasero.*

Otra opción más común es la de fabricar el eje con un agujero rasgado, que nos permita desplazar el eje de la rueda fácilmente, ya que con tan solo aflojar el eje trasero podríamos desplazar la pieza sobre la que va alojado. Nos vamos a decantar por esta opción, ya que permite un manejo mucho más sencillo a la hora de realizar cambios.

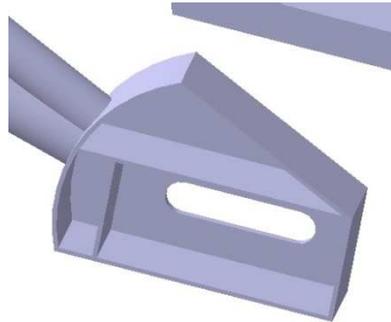


*Figura 10.19. Ejemplo de agujero rasgado.*

Para nuestro modelo, el basculante lleva en su extremo final un agujero rasgado de 50mm de longitud a cada lado, con una cierta inclinación respecto al eje longitudinal del mismo. La función es la de que el ángulo del basculante sea igual que el ángulo “anti-squat” para cada posición de la rueda. De esta manera se puede ajustar la batalla según las condiciones de agarre de la pista. Una pista resbaladiza requiere una batalla más corta para cargar más peso sobre la rueda trasera para aumentar la tracción, y una con

más agarre requerirá una batalla más larga evitar que la rueda delantera se levante al acelerar.

El ángulo adecuado para este propósito es  $17,25^\circ$  (formado entre el eje longitudinal del basculante y el agujero rasgado), que se puede calcular fácilmente aplicando reglas geométricas.



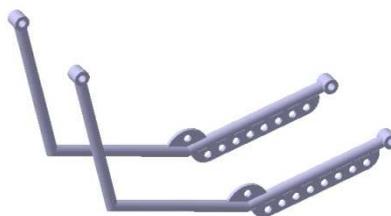
*Figura 10.20. Soporte para el eje de la rueda trasera.*

Con un tornillo y dos tuercas haciendo contratuerca llevaremos la rueda a la posición deseada en el agujero rasgado.

### **10.3.7. Anclajes auxiliares**

Nos referimos al anclaje de las estriberas, tubo de escape, depósito de gasolina y carenado.

En cuanto a las estriberas, dos elementos que soportan carga, se habilitarán dos anclajes, similares a los empleados para los amortiguadores y para la jaula, sobre la propia jaula. Aunque el uso de la jaula se suele limitar al anclaje del motor, en este caso uno de los anclajes de dicho motor, debido a su especial colocación, se realiza sobre el propio chasis. Por lo que se aprovecha la capacidad portante de la jaula anclando las estriberas a ambos lados de la misma.



*Figura 10.21. Posición de los anclajes de las estriberas en la jaula.*

Como se aprecia en la imagen, el sistema de anclaje dispone de varias posiciones, de forma que las estriberas pueden ser calibradas al gusto del piloto.

Al depósito de gasolina y el carenado, al tratarse de elementos que no soportan elevadas cargas, se les habilitará, mediante soldadura, unos anclajes una vez el chasis se encuentre fabricado.

#### **10.4. SELECCIÓN DE DIÁMETROS Y ESPESORES**

Existen dos maneras básicas de conseguir una buena eficiencia estructural. Una consiste en utilizar barras de gran sección y longitud, las cuales presentan una rigidez inherente. La segunda forma, que es la que nosotros utilizaremos, consiste en utilizar barras de pequeño diámetro creando una estructura triangulada.

Dependiendo de la utilidad de la motocicleta y de la zona dentro de la misma, se pueden encontrar una gran variedad de diámetros y espesores en el mercado actual. En nuestro caso, para realizar los primeros cálculos mediante elementos finitos se van a emplear geometrías de **25 y 20 mm** de diámetro. Son unas medidas muy comunes que facilitarán la búsqueda del material a la hora de llevar el diseño a la realidad. El grosor de los tubos ensamblados será de **1,2 mm**. Por encima de este valor tanto el chasis como el basculante adquirirían un peso excesivo, que afectaría en contra de la potencia de la motocicleta. Pero un valor inferior a éste, complicaría el proceso de montaje y soldadura.

Los valores especificados en este apartado son los propuestos inicialmente para el análisis, pero podrán ser modificados durante el proceso de análisis si se considera oportuno.

## 11. ANÁLISIS EN ELEMENTOS FINITOS

En este apartado se estudiarán las tensiones que sufrirán las diferentes partes del chasis y del basculante en distintas situaciones. Todas las cargas que se aplicarán serán cargas estáticas mayoradas por un coeficiente de 1,5. Esto permitirá observar aquellas zonas que soportarán las mayores tensiones, de forma que seremos capaces de realizar pequeñas modificaciones sobre el diseño para tratar de evitar la aparición de tensiones excesivamente elevadas.

### 11.1. CHASIS

El modelo que finalmente se ha diseñado y ha sido escogido para estudiarlo mediante elementos finitos es el que se muestra en la siguiente figura.

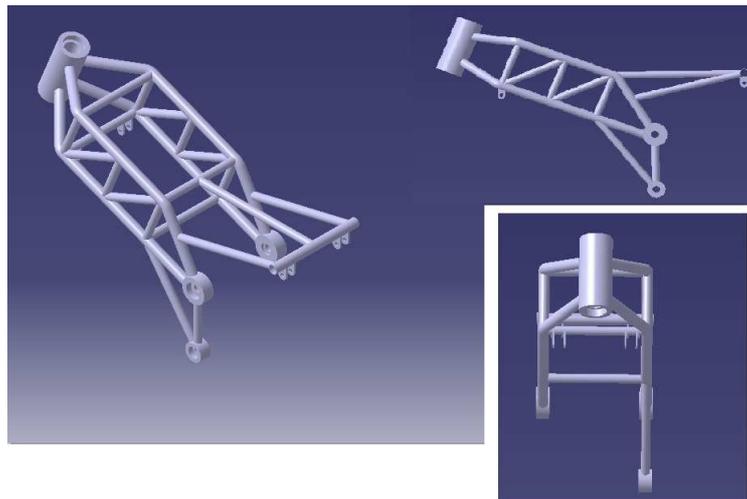


Figura 11.1. Imagen del chasis sobre el que se van a realizar los primeros análisis FEM.

#### 11.1.1. Primeros ensayos

##### *Frenada máxima*

Habitualmente, se produce una gran transferencia de cargas cuando se realiza la frenada, sobre todo cuando se realiza con el freno delantero. La frenada máxima se produce al final de rectas largas donde se ve que la rueda trasera comienza a levantarse y es bastante común en circuito.

Sin embargo, nuestra motocicleta no dispone de freno en la rueda delantera, por lo que dicha transferencia será menor de lo habitual. Aun así, es necesario estudiar este caso.

Las cargas que aplicaremos son las que vimos en el cálculo de esfuerzos. Estas cargas se obtuvieron de manera teórica para la situación límite de rodadura y fueron mayoradas por 1,5.

	Teórica	Mayorada
<b>Fuerza longitudinal trasera</b>	(-) 612 N	(-) 918 N
<b>Fuerza longitudinal delantera</b>	0 N	0 N
<b>Fuerza vertical trasera</b>	612 N	918 N
<b>Fuerza vertical delantera</b>	957 N	1436 N
<b>Fuerza lateral trasera</b>	0 N	0 N
<b>Fuerza lateral delantera</b>	0 N	0 N

Tabla 11.1. Fuerzas para frenada máxima.

Se va a realizar el análisis en el módulo FEM de CATIA. El modelo a utilizar es simplemente un modelo del chasis mallado mediante tetraedros parabólicos. Fijaremos el eje del basculante y aplicaremos la carga correspondiente en un punto ficticio que simulará el contacto del neumático con la carretera.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

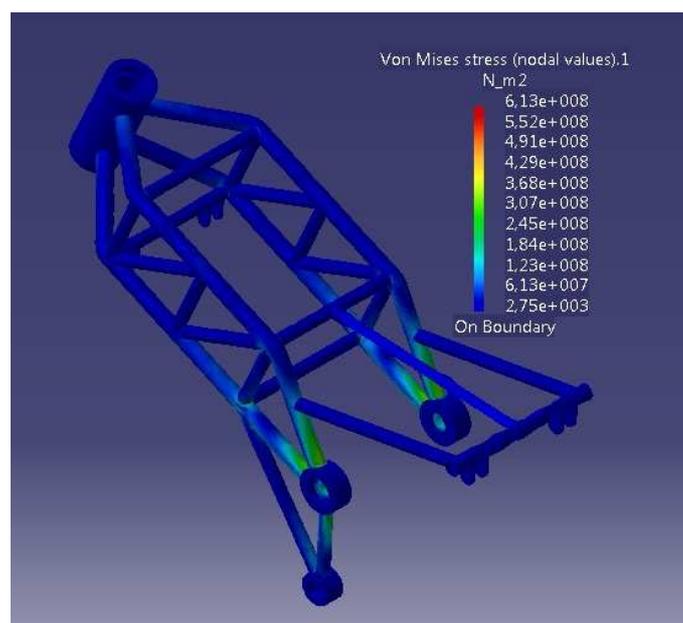


Figura 11.2. Ensayo en frenada.

Las tensiones obtenidas llegan hasta el límite de 613 MPa, lo cual es un valor elevado de tensión para un acero convencional. Estas tensiones nos aparecen en la zona de anclaje del basculante. Parece que esta zona será la sometida a mayores tensiones y será donde habrá que prestar mayor atención.

Como se puede observar en la imagen, las demás barras que forman el chasis estarán soportando tensiones bastante inferiores. El modulo de CATIA de FEM nos proporciona un valor del error global estimado. Éste debe rondar el 10 % para poder considerar un valor realista de los resultados obtenidos. En nuestro caso este valor es del 7%, lo cual nos da una aproximación de por donde se puede encontrar el valor real de tensiones.

Como conclusión de este análisis podemos decir que las tensiones que aparecerán en los puntos destacados superarían el límite elástico de un acero convencional de construcción, así que la elección de este tipo de aceros no parece correcta. Es cierto que la presencia del motor disminuirá esos valores, pero aun así seguirán siendo elevados.

A continuación se muestran los ensayos realizados en la condición de máxima frenada, pero esta vez teniendo en cuenta la aportación de los amortiguadores en casos de irregularidades en el suelo.

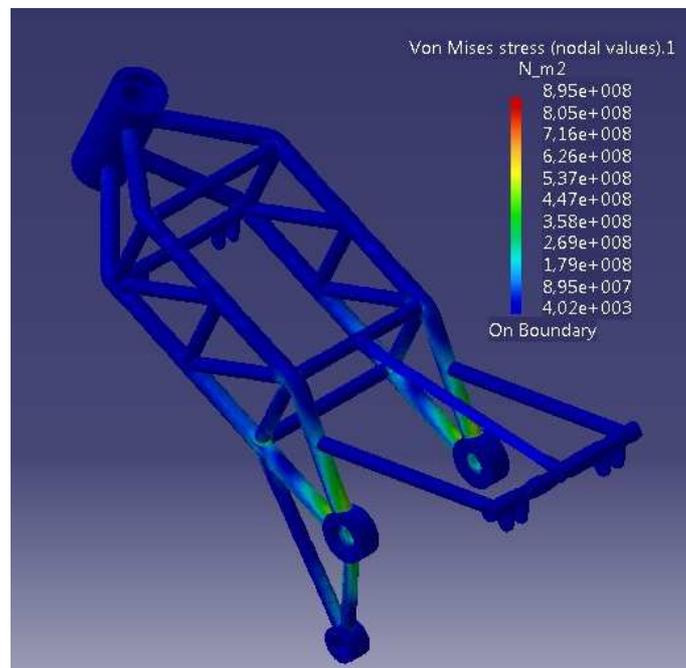


Figura 11.3. Ensayo de máxima frenada con máxima compresión en la amortiguación delantera.

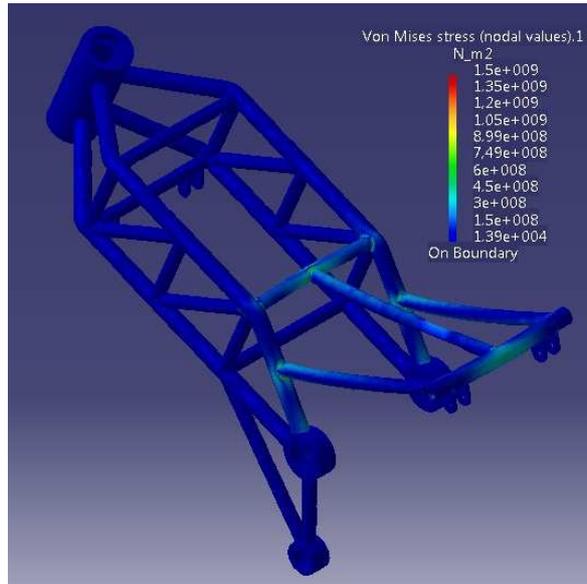


Figura 11.4. Ensayo de máxima frenada con máxima compresión en la amortiguación trasera.

Vemos como se produce un gran aumento de la tensión máxima. Además, los puntos que sufren estas nuevas tensiones máximas no son los mismos que en los casos anteriores. Por tanto nos veremos obligados a realizar un rediseño para fortalecer dichas zonas.

Para terminar el análisis de la frenada máxima únicamente queda aplicar la fuerza soportada por el piñón de reenvío. En los análisis finales será necesario aplicar dicha fuerza conjuntamente con las referidas a irregularidades en el piso, pero en este primer análisis se ha preferido realizar por separado para visualizar las tensiones que pertenecen a cada fenómeno.

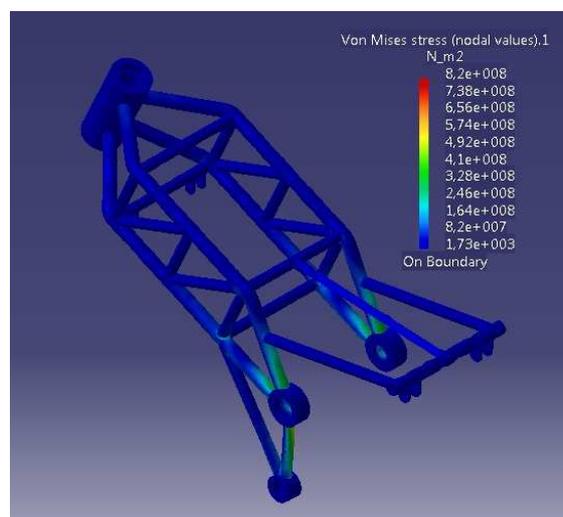


Figura 11.5. Ensayo de máxima frenada teniendo en cuenta la fuerza soportada por el piñón de reenvío.

Se aprecia cómo, al igual que en análisis anteriores, el eje del basculante sigue siendo el punto de mayor tensión.

### *Curva (conducción estándar)*

Otro de los momentos en los que se producen tensiones elevadas en la motocicleta es una curva. En ese momento se producen reacciones elevadas en el contacto entre el neumático y la carretera, provocando en el chasis un esfuerzo de torsión.

Al igual que en el caso anterior, las cargas que aplicaremos son las que vimos en el cálculo de esfuerzos.

	Teórica	Mayorada
<b>Fuerza longitudinal trasera</b>	0 N	0 N
<b>Fuerza longitudinal delantera</b>	0 N	0 N
<b>Fuerza vertical trasera</b>	906 N	1359 N
<b>Fuerza vertical delantera</b>	662 N	993 N
<b>Fuerza lateral trasera</b>	906 N	1359 N
<b>Fuerza lateral delantera</b>	662 N	993 N

*Tabla 11.2. Fuerzas para trazada de curva.*

Hay que tener en cuenta que estas cargas serán las reacciones en el punto de contacto según el sistema de referencia global de la motocicleta. Este sistema no considera la inclinación de la motocicleta, que en este caso son  $50,7^\circ$ . Por lo tanto habrá que trasladar estas fuerzas al sistema de referencia que acompaña a la motocicleta. Al realizar la rotación del sistema vemos como la componente lateral pasa de 993 N a 139 N. Mientras que la fuerza normal pasa de 993 N a 1397 N.

Al igual que en el modelo anterior, volveremos a situar un punto virtual sobre nuestro modelo que será el contacto de la rueda con la carretera y aplicaremos las cargas. Volveremos a suponer una horquilla extremadamente rígida que provocará que sea el chasis el que soporta todas las cargas.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

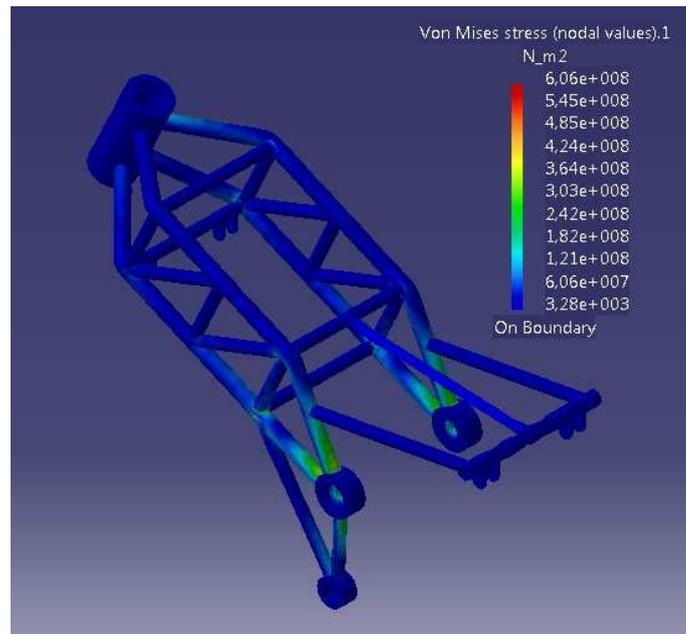


Figura 11.6. Ensayo de trazada de curva.

Como en el caso anterior, las tensiones máximas se producen en el anclaje del basculante. Las tensiones en esas zonas llegan a alcanzar valores de 600 MPa. La presencia de la horquilla y el motor harán que estas tensiones se vean disminuidas. Aun así su valor es elevado.

Al igual que el caso anterior, las demás barras estarán sometidas a tensiones cercanas a los 300 MPa. Valores que un acero de alto límite elástico no tendrá ningún problema en soportar.

Para este caso se ha conseguido obtener un error global estimado de un 7,65 %.

Como conclusión de este análisis podemos decir que la zona más crítica es la misma que en el caso anterior. Habrá que tener en cuenta que la presencia del motor y las suspensiones harán que las tensiones se vean reducidas, pero aun así parece que esa zona podría ser rediseñada para tratar de reducir la tensión.

A continuación, igual que en el caso de máxima frenada, se muestran los ensayos realizados en la condición de trazada de curva, pero esta vez teniendo en cuenta la aportación de los amortiguadores en casos de irregularidades en el suelo.

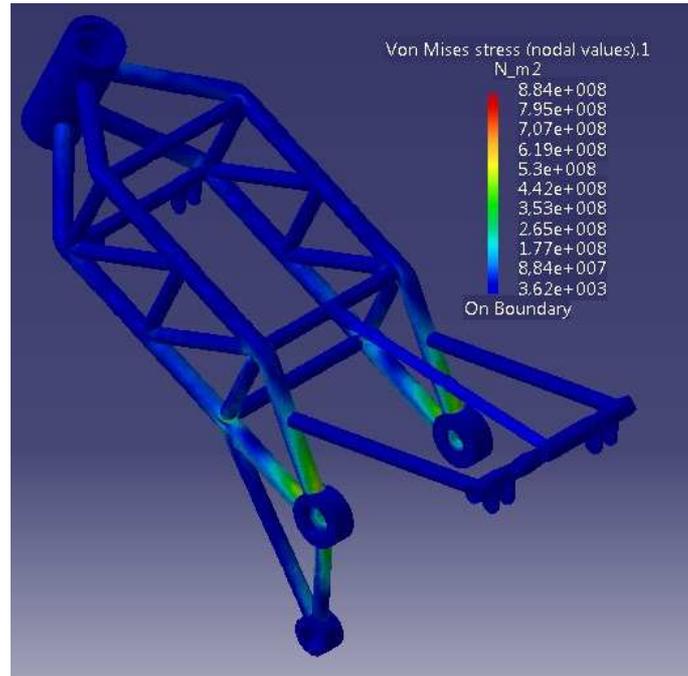


Figura 11.7. Ensayo de trazada de curva con máxima compresión en la amortiguación delantera.

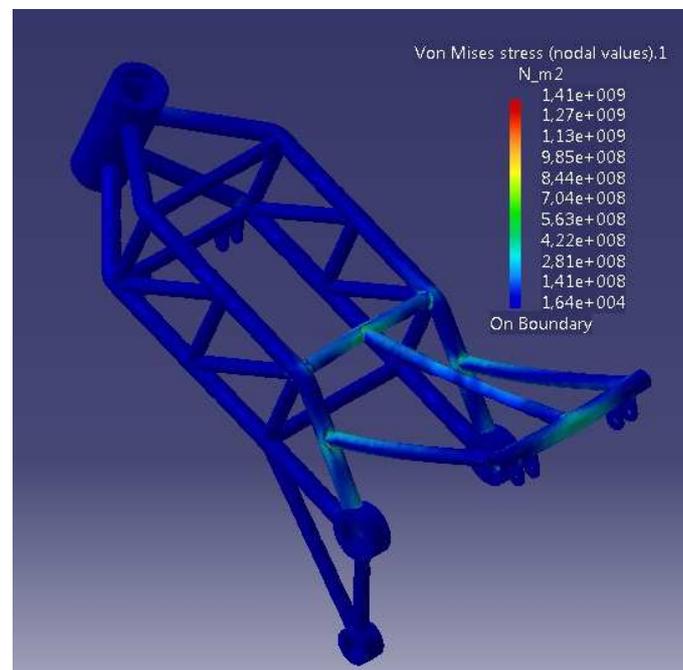


Figura 11.8. Ensayo de trazada de curva con máxima compresión en la amortiguación trasera.

E igual que en los primeros ensayos, no se produce un gran aumento de la tensión máxima. De hecho, una irregularidad en el terreno absorbida por la amortiguación

trasera, provocará una disminución de la tensión máxima soportada por el chasis. Eso sí, ahora soportan cierta carga elementos del chasis que antes no se veían afectados.

### **Conclusión**

Una vez realizados estos ensayos, podemos llegar a una serie de conclusiones. Se ha visto claramente qué zonas están sometidas a las tensiones más altas, llegando en algunos casos a picos de tensión de alrededor de 800 MPa, sin efecto de los amortiguadores, y hasta 1.400 MPa teniendo en cuenta dicho efecto.

Esto nos obliga a realizar algunos ajustes sobre el diseño para tratar de reducir esas tensiones. Como ya hemos comentado varias veces la presencia del motor dentro de la estructura hará que esos valores se vean reducidos. Sin embargo, al no saber el valor de esa disminución, vamos a realizar pequeños ajustes sobre el diseño para mejorar las zonas de riesgo.

Además de estas zonas de riesgo, existen otras que prácticamente no soportan carga alguna, con lo que solo aportan peso al diseño. Eliminar determinadas barras de estas zonas serán los otros objetivos del rediseño.

#### **11.1.2. Rediseño**

La presencia de tensiones tan elevadas en los ensayos realizados nos obliga a realizar pequeñas modificaciones de diseño para tratar de reducirlas. Lo que buscamos es que en ningún caso podamos sobrepasar la zona elástica del material, ya que esto nos generaría deformaciones permanentes que afectarían a la geometría de la motocicleta.

Como vimos en el apartado anterior la zona que más está sufriendo es la zona de anclaje del basculante, produciéndose las mayores tensiones en los cantos y esquinas más pronunciados. De forma que se ha recurrido a suavizar dichas brusquedades con curvas y redondeos.



*Figura 11.9. Detalle de la nueva zona de anclaje.*

Otro de los problemas a solucionar, era la exagerada tensión que se producía en las barras posteriores cuando se tenía en cuenta la acción de la amortiguación trasera. Así que se ha fortalecido la zona trasera del chasis ampliando el número de barras.

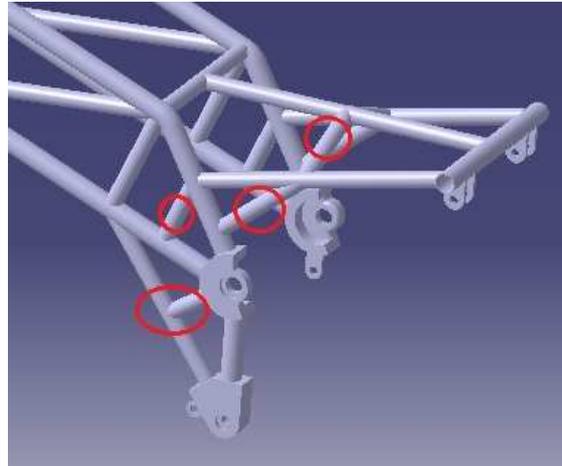


Figura 11.10. Detalles de la zona trasera del chasis.

Y por último, se ha intentado, al contrario que con los cambios anteriores, disminuir el peso del chasis. Para ello se ha prescindido de determinadas barras que no aportaban nada a la estructura como tal.

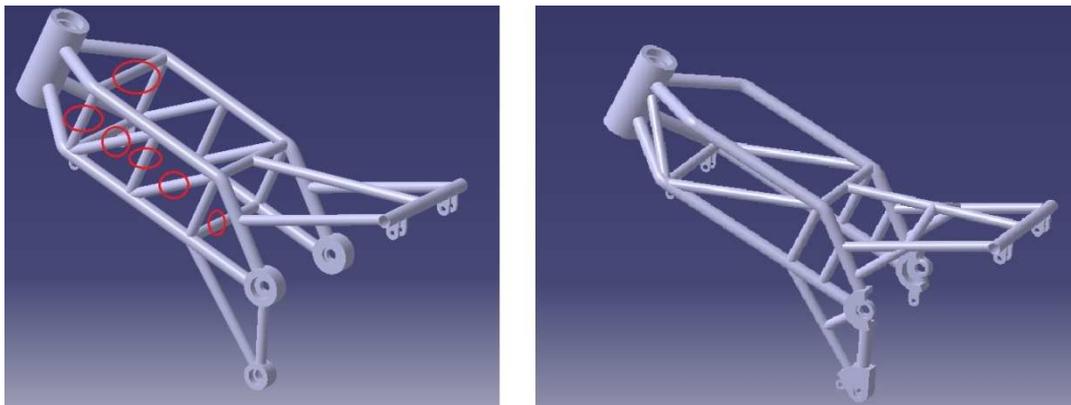


Figura 11.11. Eliminación de una serie de barras del chasis inicial.

### 11.1.3. Ensayos finales

Ahora vamos a realizar los mismos ensayos que realizamos al modelo anterior sobre este modelo. En estos ensayos anclaremos y aplicaremos las cargas sobre el chasis igual

que lo hacíamos en los ensayos anteriores. La idea es buscar cuales son las diferencias en los resultados debidas a los cambios realizados.

### *Frenada máxima*

En este caso, los resultados obtenidos para el ensayo de frenada máxima son los siguientes. Hay que tener en cuenta que todos los ensayos realizados a continuación cuentan con la fuerza soportada por el piñón de reenvío.

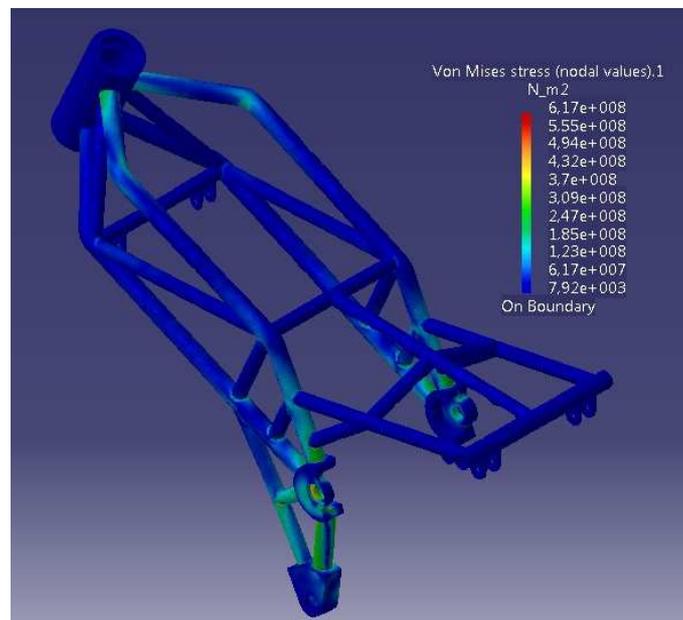


Figura 11.12. Ensayo en frenada.

Las tensiones máximas ya no se producen en la misma zona, sino en la soldadura de una las barras cercanas. Además se disminuye el valor máximo de tensión, pasando a tener una tensión puntual máxima de 6,17 MPa.

Si se estudia el caso de la máxima frenada, pero esta vez teniendo en cuenta la aportación de los amortiguadores en casos de irregularidades en el suelo, al igual que se hizo con el modelo inicial, también es clara la disminución del valor máximo. Además la distribución también es notablemente mejor.

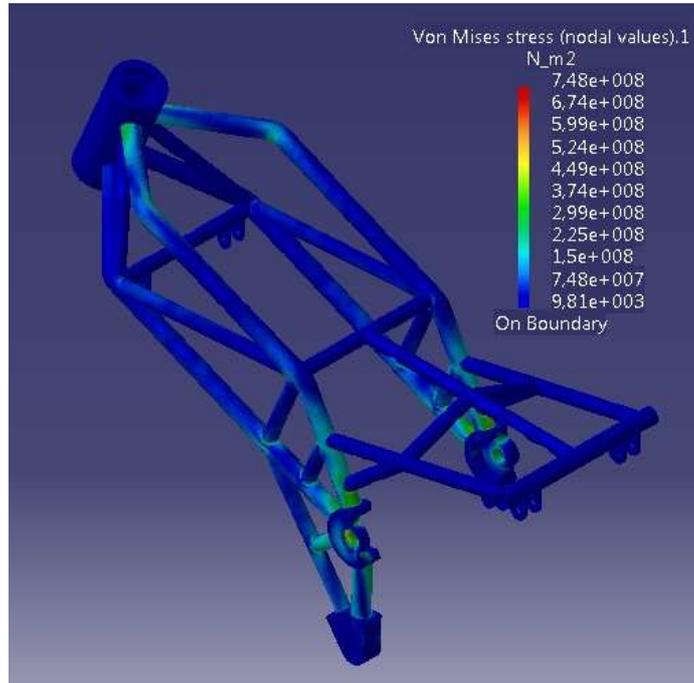


Figura 11.13. Ensayo de máxima frenada con máxima compresión en la amortiguación delantera.

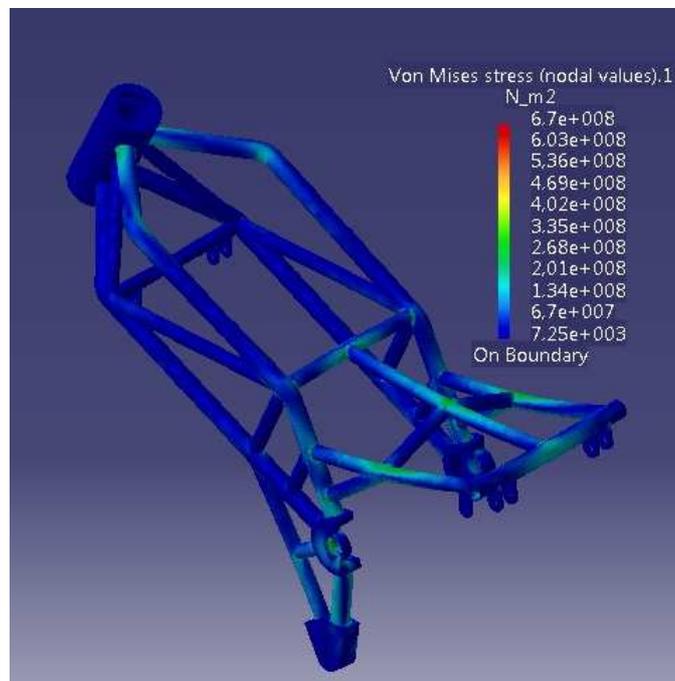


Figura 11.14. Ensayo de máxima frenada con máxima compresión en la amortiguación trasera.

**Curva (conducción estándar)**

Al igual que hemos hecho para el caso de máxima frenada, vamos a repetir los cálculos de paso por curva para el nuevo modelo.

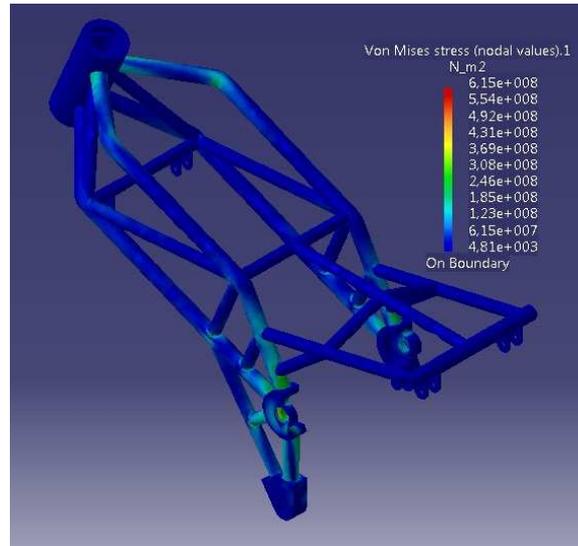


Figura 11.15. Ensayo de trazada de curva.

Efectivamente, la disminución de las tensiones máximas es muy importante, pasando a 615 MPa en el nuevo, además de conseguir una mejorada distribución de tensiones.

Y lo mismo sucede si analizamos el paso por curva, pero esta vez perturbado por irregularidades en el suelo.

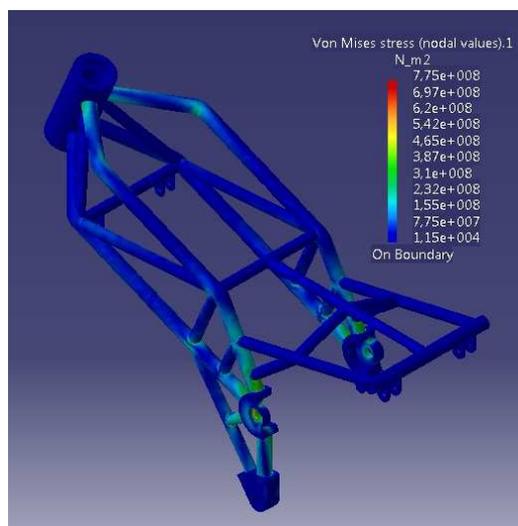
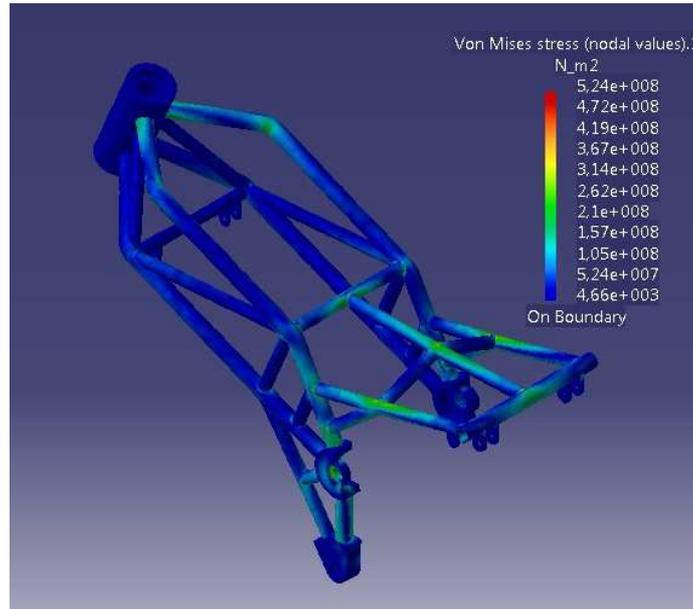


Figura 11.16. Ensayo de trazada de curva con máxima compresión en la amortiguación delantera.



*Figura 11.17. Ensayo de trazada de curva con máxima compresión en la amortiguación trasera.*

### **Conclusión**

Puesto que los ensayos demuestran que las modificaciones realizadas sobre el modelo reducen las tensiones máximas producidas y mejoran las zonas donde estas se producían, y todos ellos se han realizado con un error global menor a un 10 %, tomaremos como buenas las modificaciones y las aplicaremos sobre el diseño final.

## 11.2. BASCULANTE

Tras darle muchas vueltas al diseño y teniendo en cuenta sobre todo el espacio del que se dispone, se ha llegado a un modelo de basculante que posee refuerzos transversales en el plano medio en la parte superior. Estos refuerzos estarán unidos entre sí para aumentar la rigidez, y a su vez habrá unas barras que los unan, tanto al eje del basculante, como al eje de la rueda trasera. El modelo diseñado y que se va a estudiar mediante elementos finitos se muestra en la siguiente figura.

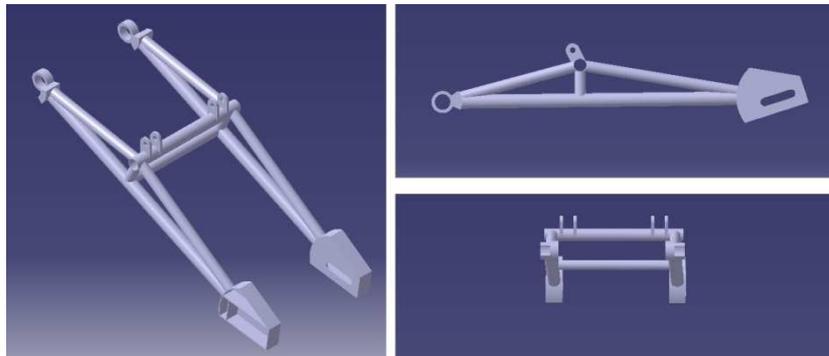


Figura 11.18. Imagen del basculante sobre el que se van a realizar los primeros análisis FEM.

### 11.2.1. Primeros ensayos

En el caso del chasis, no se veía claramente cuál de los dos ensayos iba a resultar más exigente, por lo que se analizó el modelo inicial en cada uno de ellos.

Con el basculante, sin embargo, la situación es otra. Se ve claramente como la situación más exigente será la trazada de curva con pilotaje Dirt Track, ya que introduce fuerzas longitudinales, verticales y laterales al máximo nivel.

De modo que en estos primeros ensayos solo se va a estudiar dicha situación, y una vez que el basculante haya sido rediseñado y optimizado, se estudiarán los demás.

Para realizar los ensayos, al igual que se hizo en el caso del basculante, se empotra el eje del basculante y se ejercen las fuerzas en los puntos correspondientes.

#### *Curva (conducción Dirt Track)*

Esta situación, muy poco habitual en las motocicletas estándar, es casi continua durante las competiciones Dirt Track, así que es muy importante su estudio. Tanto la fuerza longitudinal, como la vertical, son similares a las que se producen durante la aceleración. Es lógico, ya que este tipo de conducción se basa en aprovechar la fuerza

motriz del motor para contrarrestar la fuerza centrífuga. Pero además hay que añadir la fuerza lateral, que se produce debido a la derrapada a lo largo de la curva.

	Teórica	Mayorada
Fuerza longitudinal trasera	1375 N	2063 N
Fuerza longitudinal delantera	0 N	0 N
Fuerza vertical trasera	1568 N	2352 N
Fuerza vertical delantera	0 N	0 N
Fuerza lateral trasera	1568 N	2352 N
Fuerza lateral delantera	0 N	0 N

Tabla 11.3. Fuerzas para trazada de curva con pilotaje Dirt Track.

Al igual que en el caso del chasis, hay que tener en cuenta que la moto se encuentra inclinada durante la derrapada. De modo que las fuerzas resultantes en un sistema de referencia que se desplaza solidario a la motocicleta son 1375 N longitudinales, 3310 N verticales y 330 N laterales.

Si aplicamos estas cargas al modelo inicial, los resultados son los siguientes.

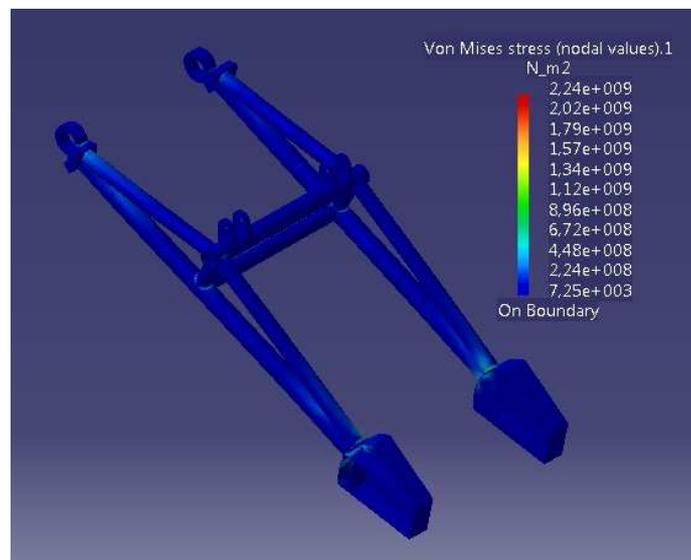


Figura 11.19. Ensayo de trazada de curva con pilotaje Dirt Track.

Y si tenemos en cuenta la fuerza ejercida por la amortiguación trasera en compresión máxima:

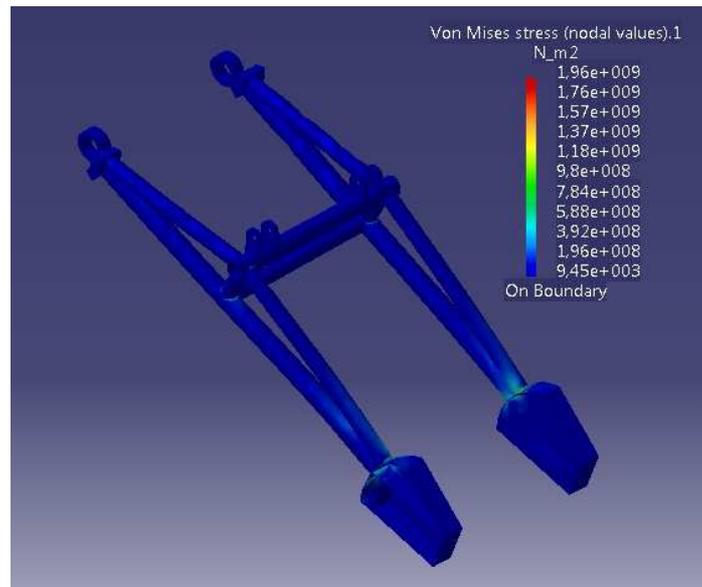


Figura 11.20. Ensayo de trazada de curva con pilotaje Dirt Track y máxima compresión en la amortiguación trasera.

### Conclusión

Una vez realizados estos ensayos, podemos llegar a una serie de conclusiones. Se ha visto claramente qué zonas están sometidas a las tensiones más altas, llegando en algunos casos a picos de tensión de alrededor de 2300 MPa, un valor altísimo.

Esto nos obliga a realizar serios ajustes sobre el diseño para tratar de reducir esas tensiones.

### 11.2.2. Rediseño

La presencia de tensiones tan elevadas en los ensayos realizados nos obliga a realizar drásticas modificaciones de diseño para tratar de reducirlas. Lo que buscamos es que en ningún caso podamos sobrepasar la zona elástica del material, ya que esto nos generaría deformaciones permanentes que afectarían a la geometría de la motocicleta.

Como vimos en el apartado anterior la zonas que más están sufriendo son el anclaje del basculante y el anclaje de la rueda trasera, produciéndose las mayores tensiones en los cantos y esquinas más pronunciados.

La nueva configuración de dichos puntos es la siguiente:

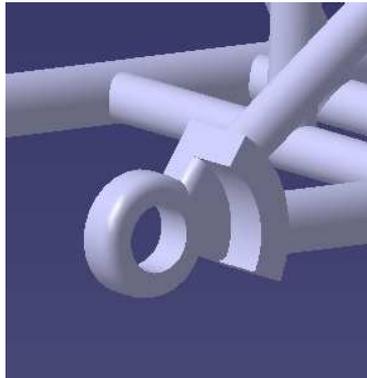


Figura 11.21. Detalle de la nueva zona de anclaje.

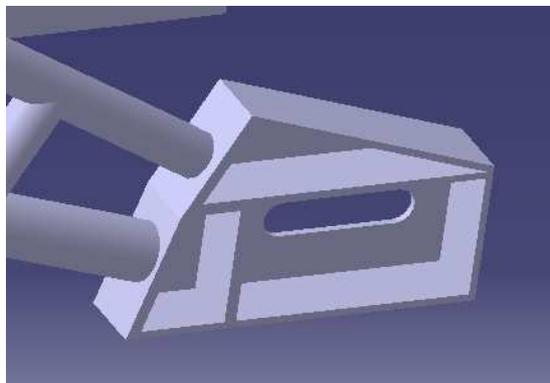


Figura 11.22. Detalle del nuevo anclaje de la rueda trasera.

Y por último se ha dado más separación vertical a las barras longitudinales, y se ha aumentado su resistencia mediante la aplicación de barras en la zona central y trasera.

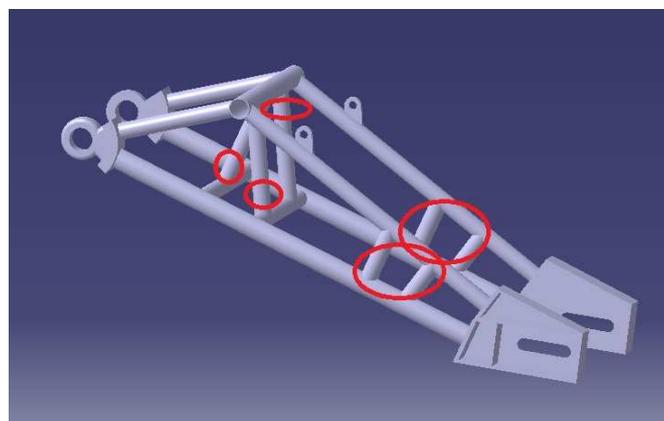


Figura 11.23. Nuevas barras añadidas.

### 11.2.3. Ensayos finales

#### *Frenada máxima*

Como ya se comenta en el ensayo del chasis, la transferencia de cargas durante la frenada en nuestra motocicleta es menor de lo habitual, ya que no disponemos de freno delantero. De hecho, durante la aceleración se produce una distribución de cargas mucho más exigente. Aun así se ha querido estudiar la frenada debido a que las fuerzas longitudinales son de sentido contrario respecto a la aceleración. Las cargas aplicadas son las siguientes:

	Teórica	Mayorada
<b>Fuerza longitudinal trasera</b>	(-) 612 N	(-) 918 N
<b>Fuerza longitudinal delantera</b>	0 N	0 N
<b>Fuerza vertical trasera</b>	612 N	918 N
<b>Fuerza vertical delantera</b>	957 N	1436 N
<b>Fuerza lateral trasera</b>	0 N	0 N
<b>Fuerza lateral delantera</b>	0 N	0 N

Tabla 11.5. Fuerzas para frenada máxima.

El resultado que obtenemos al aplicar estas cargas es el siguiente:

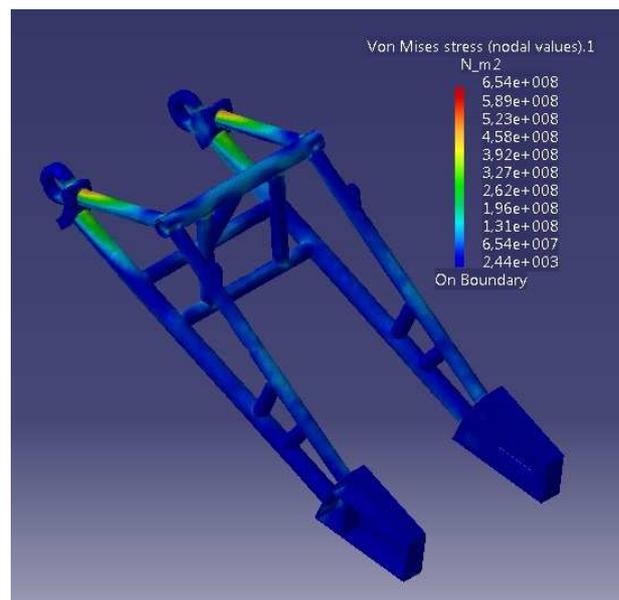


Figura 11.24. Ensayo en frenada.

Y si además tenemos en cuenta las posibles irregularidades del terreno absorbidas por la suspensión trasera:

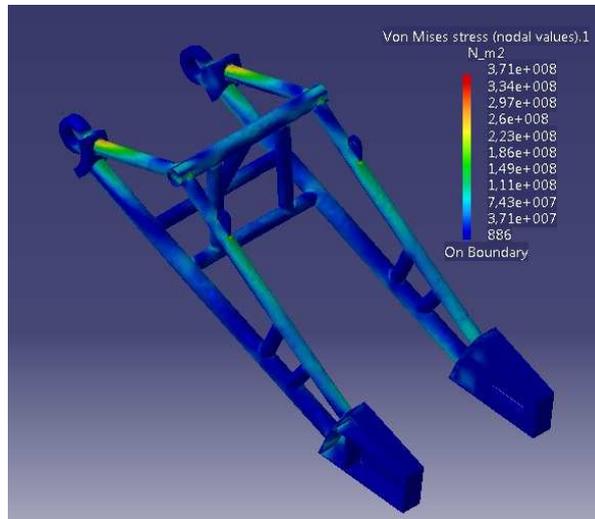


Figura 11.25. Ensayo de máxima frenada con máxima compresión en la amortiguación trasera.

### Curva (conducción Dirt Track)

Al aplicar las cargas correspondientes a la trazada de una curva mediante derrapada, hemos obtenido unas tensiones altísimas. De modo que tras efectuar los cambios oportunos, se deberían observar unos cambios notables. A continuación se muestra los dos ensayos, primero son efecto de la amortiguación, y después teniendo en cuenta dichas cargas.

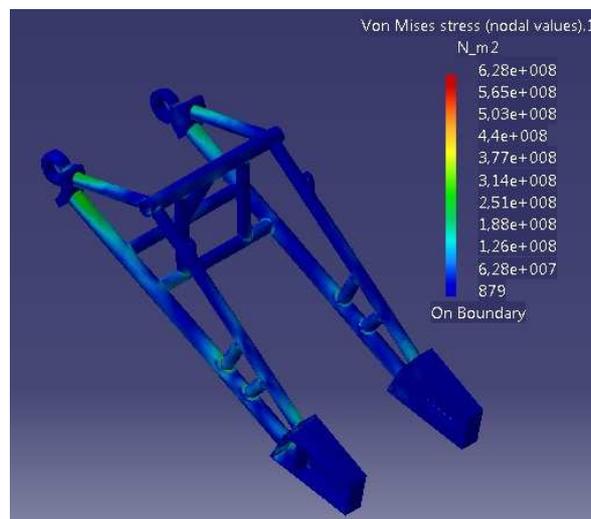
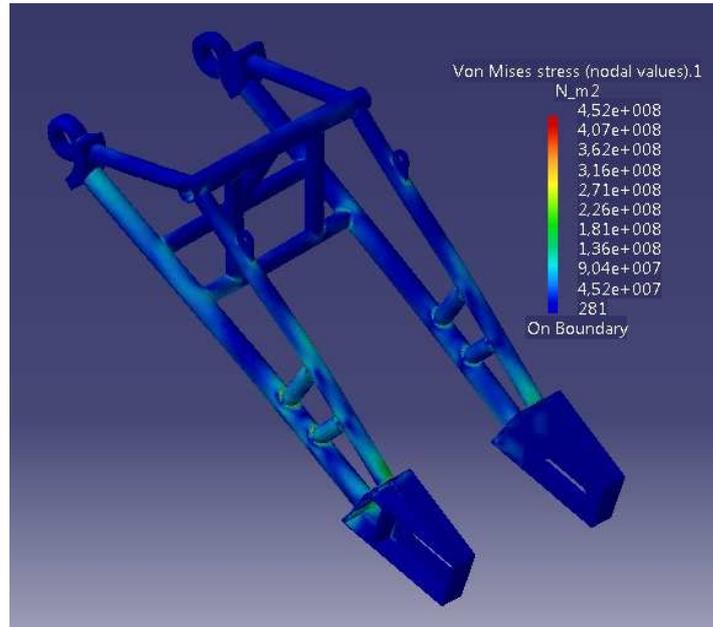


Figura 11.26. Ensayo de trazada de curva.



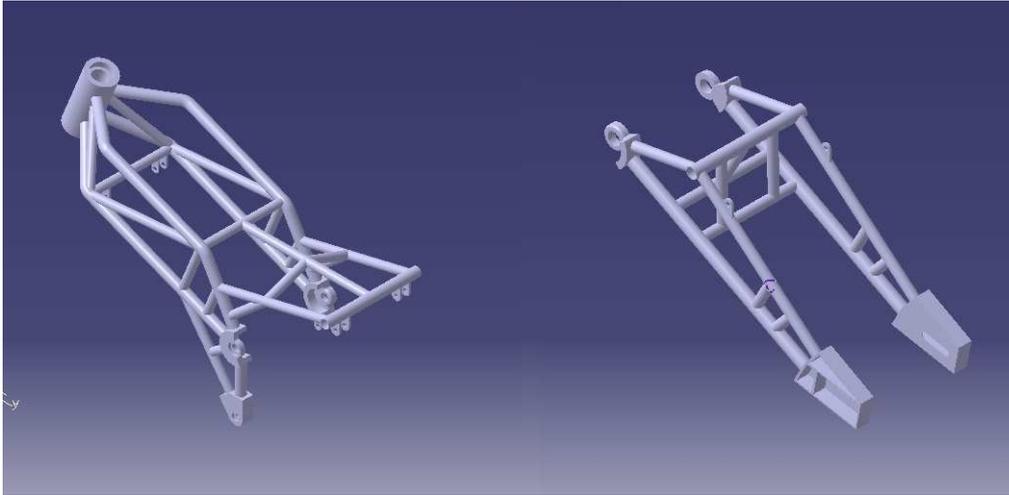
*Figura 11.27. Ensayo de trazada de curva con pilotaje Dirt Track y máxima compresión en la amortiguación trasera.*

### **Conclusión**

Puesto que los ensayos demuestran que las modificaciones realizadas sobre el modelo reducen las tensiones máximas producidas y mejoran las zonas donde estas se producían, y todos ellos se han realizado con un error global menor a un 10 %, tomaremos como buenas las modificaciones y las aplicaremos sobre el diseño final.

### 11.3. ELECCIÓN DEL MODELO FINAL

Después de todas las modificaciones realizadas y los ensayos finalizados, los modelos de chasis y basculante quedan del siguiente modo:



*Figura 11.28. Modelos finales.*

## 11.4. ELECCIÓN DEL ACERO

Una vez conocido el diseño y las cargas a las que se verá sometido el chasis vamos a seleccionar aquel material que mejor se ajuste a nuestras necesidades. Para ello vamos a realizar unos estudios comparativos entre las diferentes posibilidades a fin de encontrar aquel que nos aporte mejores resultados.

El tubo de sección circular siempre ha sido el más común en la producción de chasis, y no sólo porque es más barato que otros tipos de tubo, también es la mejor sección para resistir cargas de torsión y de compresión y es también capaz de resistir cargas de flexión en cualquier dirección por igual.

Los términos que habitualmente se emplean para diferenciar a los distintos tipos de acero, son referencias industriales que se refieren a aceros que tienen algunos elementos en sus aleaciones que acentúan su resistencia, especialmente después de soldar. Su Módulo de Young, o lo que es lo mismo, su rigidez, no difiere de la del resto de aleaciones de acero, y tampoco varía su densidad (tal y como ya hemos comentado anteriormente). Si los sustituyéramos por otros tubos de acero de menor resistencia, del mismo tamaño, tanto el peso como la rigidez del chasis seguirían siendo los mismos.

Su ventaja radica en la máxima carga que el chasis puede llegar a soportar antes de llegar a romperse. Si la rigidez no supone un problema con una estructura o un miembro en particular, el empleo de tubos de alta resistencia permitirá que las paredes puedan ser más finas, por lo que podrá reducir el peso del bastidor. En cambio, si la rigidez resulta vital, entonces, la mejor manera de utilizar este tipo de tubos consiste en reducir el espesor de la pared y aumentar el diámetro, pero en una proporción pequeña.

En las siguientes líneas se realiza una descripción de los aceros más comunes para poder compararlos.

### ***Aceros de construcción 275 y 355 (límite elástico 355 MPa, tensión de rotura 470 MPa)***

Son los típicos aceros de construcción utilizados en arquitectura en general ( UNE EN 10027-1). Se trata de un material extremadamente barato pero con unas propiedades un tanto limitadas. Su rigidez es alta (como la de cualquier tipo de acero) pero la resistencia a tensión que aguantan dista mucho de ser la adecuada para soportar las enormes cargas que se dan en una motocicleta de competición.

Si bien es verdad, en un chasis perfectamente triangulado y diseñado concienzudamente para tener las menores cargas posibles, una estructura de este acero podría resistir.

### ***T45 (límite elástico 620 MPa, tensión de rotura 700 MPa)***

Se trata de un acero al carbono-manganeso con una composición típica de 0,2% de carbono y 1,5% de manganeso. Se ha usado habitualmente desde hace tiempo en

aviación para trabajos de reparación por su ligereza y del mismo modo es una opción adecuada para nuestros requerimientos.

Cientos de motocicletas se han fabricado con este material, que ha sido usado con éxito tanto para aplicaciones en carretera como para competición. El T45 fue formulado especialmente para estructuras soldadas y es mucho más resistente que el acero templado, aproximadamente un 50% más. Los tubos de T45 tienen al menos un 20% de elongación por lo que se comporta extremadamente bien a la hora de doblarse. Esto no quiere decir que sea fácil de doblar, ya que estamos hablando de tubos muy resistentes.

Este material es realmente caro, debido a que sufre trabajos en frío continuados, además de tratamientos térmicos.

El T45 es, por tanto un muy buen acero para usarse en todo tipo de estructuras soldadas, no habiendo problemas de soldadura ni de fusión ni en bronce. La mayor limitación que tiene es una caída de alrededor del 30% de las tensiones admisibles tras la soldadura. De todas formas, y pese a esta limitación, las estructuras soldadas de este tipo de material siguen siendo más resistentes que la mayoría de aceros templados sin soldar.

### ***Reynolds 531 (límite elástico 694 MPa, tensión de rotura 772 MPa)***

Reynolds 531 es el nombre comercial de una aleación de acero al manganeso-molibdeno.

Tras la Segunda Guerra Mundial, adquirió una gran importancia en la construcción de chasis de motocicletas de competición (mientras que para chasis de carretera se usaba acero templado convencional).

Lo más importante del 531, comparado con el T45, es su capacidad para mantener la resistencia después de la soldadura, aunque se trate de una soldadura dura con plata o bronce. Hasta el punto de que se pueden conseguir caídas del límite elástico de tan sólo el 15% una vez soldada la estructura respecto al material original.

Este rasgo significa que la gente pasa por alto su capacidad para soldar. De hecho Reynolds creó esta situación especificando que el tubo 531 debería ser soldado con una soldadura dura. La razón era que los soldadores con una moderada habilidad eran propensos a recalentar el material cambiando su estructura de forma que el material se hace más endeble.

En realidad, la fusión del 531 suelda muy bien, pero por ejemplo la soldadura de arco sólo es aceptable cuando el tubo tiene el suficiente espesor para negociar las concentraciones de tensiones que produce. En términos de producción es más eficiente que la soldadura de bronce pero no sirve para los casos de chasis ligeros que estamos discutiendo. Pruebas posteriores mostraron que los tubos de 531 soldados en bronce se comportaban especialmente bien en estructuras sujetas a fluctuación de cargas.

### ***Reynolds 753 (límite elástico 900 MPa, tensión de rotura 1080-1280 MPa)***

Este tipo de aleación es el Reynolds 531 tratado térmicamente, de forma que su resistencia a tensión aumenta hasta valores enormes de entre 1080-1280 N/mm<sup>2</sup> (MPa) y su elongación cae hasta valores sobre el 8%. Esto hace que el material no sea adecuado para trabajos en frío de doblado. Las uniones deben ser por soldadura de baja temperatura en plata con un punto de fusión máximo de 650° C si no el material pierde una alta proporción de su resistencia. Reynolds es la única fuente de este tipo de material, y lo hace con una restricción muy grande tanto en tamaños como en longitudes. Reynolds ha tratado de asegurarse de que únicamente es usado por compañías que pueden ser de confianza para no recalentar el tubo a la hora de la soldadura.

### ***4130 Cromo-Molibdeno (límite elástico 517 MPa, tensión de rotura 655 MPa)***

El objetivo de este tipo de aleaciones cromo-molibdeno no es más que proveer al material de una fuerza suplementaria mientras se mantiene su soldabilidad, así como la capacidad de deformación en frío, no siendo tampoco demasiado sensible al corte y a formarse muescas. Son aleaciones con poco porcentaje de carbono para precisamente facilitar la soldadura.

4130 es la aleación de acero de media resistencia más usada en motociclismo. Su bajo precio refleja la relativa simplicidad de fabricación que puede llevarse a cabo en menos pasos que en el caso del T45.

La mayor parte de este material se fabrica en Estados Unidos. El problema del 4130 es que hay que asegurarse de que tenga suficiente ductilidad ya que en las antiguas especificaciones se daba un valor mínimo de 10% de elongación, lo cual no lo hace muy apropiado para trabajos en frío.

### ***25CrMo4 (límite elástico 520 MPa, tensión de rotura 650 MPa)***

Se trata de una aleación con una composición muy parecida al 4130, salvo en que utiliza un porcentaje menor de carbono, por lo que ayuda a la hora de la soldadura. Es un material moderadamente caro utilizado específicamente en aviación y que se proporciona endurecido y templado.

### ***15 CDV 6 (límite elástico 790 MPa, tensión de rotura 980 MPa)***

Es una aleación de acero al cromo-molibdeno-vanadio originaria de Francia. En Europa es específico de componentes de aviación como por ejemplo en elementos de montaje del motor. Los equipos europeos de coches de competición lo han usado extensamente para fabricación de chasis. Los tubos disponibles para trabajo en frío tienen típicamente un 22% de elongación y un mínimo de resistencia a tensión de 700 N/mm<sup>2</sup>. Sus

características mecánicas son muy similares a las del T45, 531 y 4130. Si no necesita ser doblado, se pueden conseguir valores de 15% de elongación y 1000 N/mm<sup>2</sup>.

El problema del 15 CVD 6 es que cuando se suelda con T.I.G se produce una pequeña caída en el esfuerzo que es capaz de soportar debido a su contenido en Vanadio.

### ***Reynolds 953 (límite elástico 1450 MPa, tensión de rotura 1650 MPa)***

Se trata de una aleación de acero martensítico desarrollado por Reynolds en asociación con una compañía estadounidense. Requiere un gran cuidado en la fabricación y es muy complicado para el trabajo en frío. Ofrece una altísima resistencia debido principalmente a su alto contenido en Titanio.

A pesar de su bajo contenido en carbono este tipo de aleación es complicada de soldar y en nuestro caso es totalmente inviable ya que los espesores de pared que proporcionan ni siquiera se acercan al milímetro por lo que inhabilitan completamente su utilización para la fabricación de nuestro chasis.

### ***Reynolds 631 (límite elástico 650 MPa, tensión de rotura 800 MPa)***

Se trata de un material que tiene muy buena disposición para ser trabajado en frío, especialmente indicado para estructuras soldadas debido a su óptima soldabilidad mediante soldadura T.I.G. Apenas se produce distorsión y las tensiones internas que se dan por la soldadura son bastante escasas. Además la resistencia que se pierde debido al proceso de soldadura es casi insignificante.

### ***Reynolds 725 (límite elástico 800 MPa, tensión de rotura 1050 MPa)***

Consiste en un acero al cromo-molibdeno que recurre a los tratamientos térmicos para poder emplear espesores menores en comparación con aceros no tratados. Responde muy bien a la soldadura TIG y se puede trabajar en frío.

Se realiza mediante una base de aleación de acero de carbono 0,3%, a la que se trata térmicamente y se finaliza con un templeado para aumentar la ductilidad.

El contenido de cromo promueve la templeabilidad y resistencia a la oxidación. El molibdeno trabaja en conjunto con el cromo para estabilizar la aleación y mantener la fuerza después del tratamiento térmico y en uso.

## **CONCLUSIÓN**

Finalmente nos hemos decantado por el acero **Reynolds 725**.

Este material puede trabajarse en frío (doblarse) con facilidad además de que el proceso de soldadura es relativamente sencillo y eficaz. Otro acero que a primera vista podía parecer adecuado es el Reynolds 631. Sin embargo, los diámetros que nos podían ofrecer desde fábrica no se ajustaban a nuestros diseños.

Por último y no menos importante, el límite elástico que se consigue con este material hace que las fuertes acciones que se producen sobre nuestros diseños puedan ser correctamente absorbidas por la estructura sin necesidad de utilizar tubos de gran diámetro y espesor.

## 12. CONCLUSIÓN

El objetivo para el que se ha elaborado este proyecto se encuentra centrado en el diseño del chasis y del basculante que proporcionen las óptimas prestaciones a una motocicleta de Dirt Track, dotada del sistema Tracklever. Así, a lo largo del proyecto se han desarrollado los distintos pasos para ir definiendo la geometría de ambas estructuras, hasta llegar a los diseños definitivos.

Para la realización de estos diseños han sido necesarios estudios preliminares, especialmente importantes los realizados acerca del cálculo de fuerzas. Además de la búsqueda de la solución que mejor se adaptaba a nuestras necesidades.

Otra de las tareas imprescindibles para el desarrollo del proyecto ha sido el estudio del programa de desarrollo, CATIA, sin el cual no hubiera sido posible la realización del proyecto. Con ello, se ha conseguido su dominio, que probablemente, será de gran utilidad en el futuro.

Por último, el estudio más interesante y que más conocimientos nuevos ha aportado ha sido el estudio mediante elementos finitos de las diferentes estructuras. Para llegar a optimizar tanto el chasis como el basculante, se han realizado diferentes ensayos comparativos buscando siempre maximizar aquellas propiedades que se consideraban importantes.

La valoración de la validez de los elementos diseñados se podrá realizar en un futuro si su fabricación se lleva a la realidad. Es una labor de prueba-error, en la que se analizará qué fallos tiene y qué posibles mejoras se le pueden aplicar. Es muy importante la opinión del piloto sobre la rigidez del conjunto, ya que no existe la geometría óptima para una moto, sino para un piloto. Toda esta información permitirá ir optimizando los diferentes parámetros de forma que el conjunto irá evolucionando hasta llegar al recomendable.

Con todo ello se puede concluir que se trata de un proyecto tremendamente enriquecedor, que me ha despertado un interés especial por el mundo del motociclismo y de la mecánica, y gracias al que he conseguido una gran variedad de conocimientos.

## BIBLIOGRAFÍA

- *Motocicletas*. Arias-Paz
- *Motocicletas: Chasis*. John Robinson
- *Motocicletas, comportamiento dinámico y diseño de chasis*. Tony Foale
- *Motorcycle dynamics*. Vittore Cossalter
- *The racing motorcycle: A technical guide for constructors*. John Bradley
- *Motorcycle design and technology handbook*. Gaetano Cocco
- *Motorcycle Road&Racing Chassis*. Keith Noakes
- *Ingeniería de motocicletas*. Apuntes formativos. César Díaz de Cerio y José Sancho
- *Diseño de chasis para motocicleta equipada con suspensión Tracklever*. César Díaz de Cerio
- *Diseño de máquinas*. Robert L. Norton
- *Mecánica de materiales*. Fitzgerald
- *Mecánica de materiales*. Hibbeler
- [www.tracklever.com](http://www.tracklever.com)
- [www.supermotardclub.com](http://www.supermotardclub.com)
- [www.speedwaygp.com](http://www.speedwaygp.com)
- [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
- [www.noyescamp.com](http://www.noyescamp.com)
- [www.dinamoto.it](http://www.dinamoto.it)

## **ANEXO I. HISTORIA DEL CHASIS**

### ***Principios evolutivos***

Inicialmente los chasis derivaron de los de las bicicletas. Se formaron a base de tubos metálicos en los que la moto se instalaba entre las dos ruedas, con el piloto sobre él.

La importancia de la rigidez del bastidor ha sido fundamental para el desarrollo de la moto, pero también el conseguir armonizar esta rigidez con un peso contenido que permitiera unas mínimas prestaciones y un buen comportamiento dinámico.

Históricamente, los bastidores se desarrollaron como construcciones tubulares, y existen muchos ejemplos de bastidores ligeros, de “hueco” triangular, que proporcionan una unión directa y firme entre la rueda delantera y el pivote de la dirección. La forma triangulada mejora enormemente la rigidez en el plano del triángulo. Si se unen más de tres componentes, para formar una estructura de cuadrilátero, por ejemplo de cuadrado, rectángulo u otro polígono de más de tres lados, resulta fácil deformar esta forma para convertirla en un rombo o un paralelogramo, porque sólo hay que deformar las juntas. Puede tomar la forma nueva sin que se deforme ninguno de los lados. La rigidez depende exclusivamente de las juntas. No siempre es lo mismo rigidez que resistencia. Llamamos resistencia a la capacidad de soportar la carga sin que se produzca una fractura, y depende, del material. La rigidez es la capacidad de no deformarse bajo la carga, y depende del material y de su forma.

Cuando se fueron desarrollando las suspensiones por basculante y las motos se hicieron bastante estrechas, los bastidores se convirtieron en cunas que rodeaban el motor y que eran bastante débiles para su peso. Se llegó a intentar conectar directamente el pivote del basculante con el pivote de la dirección, generalmente por medio de un tubo de bastante diámetro, pero también se utilizó chapa, acero embutido o perfilados de fundición (la que se llamó construcción monocasco). Algunas veces se intentaba producir bastidores con espacios triangulados pero su resistencia de potencia no compensaba la complicación que tenía el acceso al interior de la moto. Los bastidores de forma redondeada bastaban perfectamente para las potencias que tenían las antiguas motos de uno o dos cilindros.

Cuando aumentaron las potencias de los motores, y los demás componentes (neumáticos, suspensiones) también empezaron a tener grandes avances, que permitían utilizar todavía más potencia, el bastidor se convirtió pronto en el punto flaco.

Poco a poco fueron cambiando los diseños, que primero rodeaban la parte superior del motor, y más adelante rodeaban sus lados (bastidor perimetral) Aparecieron los basculantes reforzados, para aplicarlos en las articulaciones de suspensión, con vigas de sección rectangular. Cuando resultaba imposible la triangulación, las secciones grandes en viga rectangular daban mayor resistencia a la flexión. La aleación de aluminio resulta muy interesante en este terreno. Su peso es la tercera parte del acero, y su resistencia también es la tercera parte, por lo que la aleación de aluminio no aporta una ventaja directa sobre el acero a igualdad de peso, y tiene la desventaja de que su resistencia a la fatiga es menor. Pero la rigidez depende de la superficie total del material y de la distancia al eje de torsión (por eso los tubos de diámetro grande son más rígidos que los que tienen un diámetro menor pero el mismo peso). La aleación de aluminio, menos densa que el acero, ocupa más espacio a igualdad de peso. Por lo tanto, un tubo de

sección rectangular similar, con la misma resistencia a la tensión y mismo peso, tendrá mayor sección cuando está hecho de aluminio, y por lo tanto puede ser más rígido. Por otra parte, se puede conseguir una rigidez igual con menor peso.

La labor de desarrollo de bastidores tiene un enorme potencial. Lo que más nos debe preocupar en un bastidor es la posición del centro de gravedad y la longitud aproximada de la batalla, aparte de conseguir una relación óptima de rigidez y peso y optimizar también la superficie frontal de la moto. Se pueden modificar detalles de la geometría de la dirección alterando la altura o alturas de marcha, aplicando diferentes descentramientos de tija o instalando tijas ajustables, además de variando la longitud del basculante.

Los requisitos variarán notablemente en función del uso a que se destine la moto, pero el bastidor se puede diseñar, en primer lugar, en función de los neumáticos, y luego en función de la batalla y centro de gravedad aproximados. Para unas prestaciones de potencia dadas, se puede calcular la disposición óptima para la tracción y para la frenada. Debemos basarnos en pruebas anteriores para estimar unos valores de adherencia de las ruedas, o bien en la observación de máquinas similares o en los datos que nos proporcionen los fabricantes de neumáticos.

Si aumenta la batalla, se obtendrá una mayor estabilidad, pero la dirección será más lenta, y habrá menor transferencia de cargas en la frenada o en la aceleración para un centro de gravedad dado. La herramienta ideal para estudiar las muchas combinaciones posibles es un programa informático de hojas de cálculo. Cuando hayamos podido colocar en el dibujo las ruedas y el centro de gravedad, el bastidor tendrá que acomodar también al motor sin que varíe la posición deseada del centro de gravedad, además de cumplir los requisitos de:

1. Superficie frontal
2. Distancia vertical al suelo
3. Distancia al suelo en los virajes
4. Carrera de la suspensión

Estos factores tienen un orden de prioridad diferente, según el tipo de moto. Al haber añadido el motor y el piloto, la forma general del bastidor quedará marcada por estos requisitos, además de por la necesidad de una rigidez máxima con un peso mínimo.

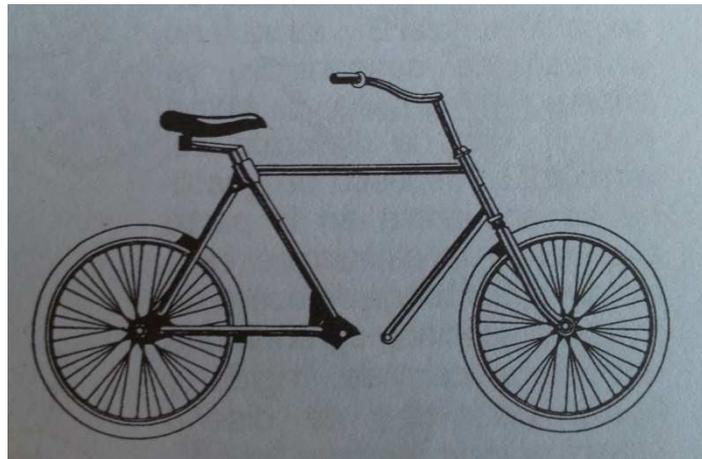
La carrera de la suspensión, con los cambios que provoca, decidirán el esquema y el tipo de suspensión, y ya se tendrán los datos suficientes para llegar a un dibujo de trabajo, a partir del cual se pueden diseñar otros detalles (cambios de la transmisión secundaria, de la geometría de dirección, de ángulo de giro de la dirección, de radio de curva, posiciones del depósito y de otros accesorios, etc.).

Si se hace un breve repaso histórico de los bastidores se puede observar los distintos pasos evolutivos que han sufrido a lo largo de los años.

### *Pasos evolutivos*

A lo largo de los años, los diseñadores han sido repetidamente criticados por su aparente insistencia en tomar como base de partida para sus diseños una estructura con forma de diamante, derivada de los chasis de bicicleta. No obstante hay que tener en cuenta que las primeras motos eran prácticamente bicicletas dotadas de un pequeño motor que se anclaba en diversas ubicaciones, por lo que es lógico que este fuera el tipo de chasis que se adoptara, especialmente en la época en que los pedales también se empleaban como ayuda ocasional al motor.

La figura muestra la motocicleta de los hermanos Werner de 1901, probablemente la primera moto con una estructura pionera de las actuales. Básicamente se trata de un bastidor de bicicleta reforzado que ya instala el motor en su parte central y, aunque no dispone de suspensión, ya adopta la horquilla como método para la dirección del vehículo. El depósito de gasolina se encuentra en la parte superior, y la estructura está formada por tubos de acero de pequeña sección, logrando una estructura cerrada, rígida y ligera. Este tipo de diseño pasará a denominarse “cuna”, pudiendo construirse de varias formas, según sea simple o doble, y cerrada completamente o abierta en la zona del motor.



*Figura I.1. Chasis Werner.*

Hasta que la suspensión trasera comenzó a usarse de forma generalizada décadas más tarde, la gran mayoría de chasis eran de tipo diamante. Esto no es de extrañar ya que este tipo de chasis era muy largo en sentido vertical, y esto resultaba ideal para alojar los motores monocilíndricos, populares en aquella época. En estas motocicletas el empleo de una pipa de dirección inclinada resultaba lo correcto para proporcionar el avance necesario a la rueda delantera para que la moto fuera autoestable en línea recta.



Figura I.2. Chasis tipo diamante, Harley Davidson (1.903).

Una vez que los pedales fueros descartados, se siguió utilizando el chasis de tipo bicicleta, y el eje de los pedales fue reemplazado por el cárter, que estaba abrazado por los extremos inferiores del tubo frontal y del tubo del sillín. Durante muchos años, los anteriores y posteriores a la primera guerra mundial, los fabricantes se decantaron de forma abrumadora por este tipo de chasis. Una variante temprana fue el chasis tipo “single-loop”, en el que el tubo frontal y el tubo del sillín estaban formados por un único tubo doblado que continuaba pasando por debajo del motor.

Ambos chasis fueron mejorados con el chasis de simple cuna. En este chasis, los extremos inferiores del tubo frontal y del tubo del sillín estaban separados y conectados de forma rígida por una cuna que abrazaba el motor. Los tubos que formaban la cuna se extendían hacia atrás hasta llegar a las orejetas que soportaban el eje de la rueda trasera.

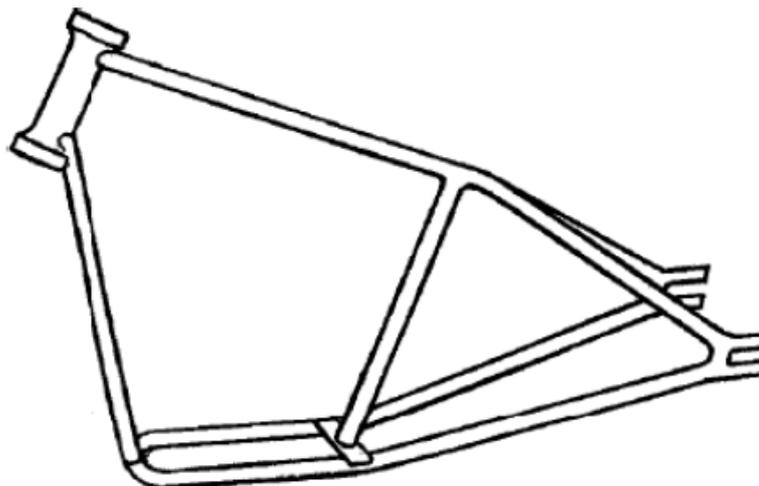
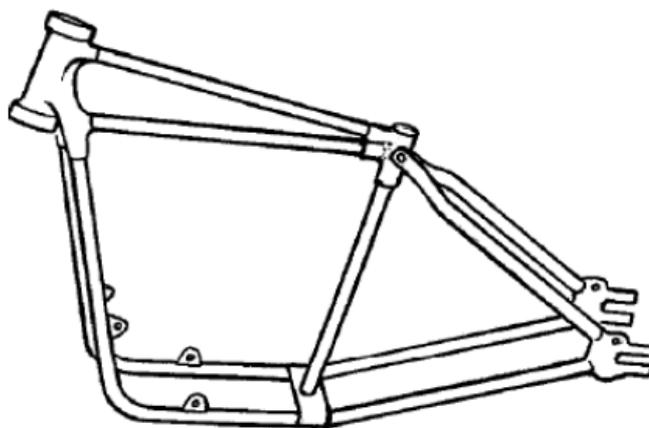


Figura I.3. Chasis de simple cuna, sucesor del chasis tipo diamante.

El siguiente paso fue el chasis de doble cuna, en el que los tubos de la cuna continuaban hacia arriba, hasta llegar a la pipa de dirección, mientras que por detrás también continuaban hasta las orejetas del eje de la rueda trasera.

Ambos tipos de chasis de cuna alojaban motores monocilíndricos con el cilindro montado en posición vertical, la cuna abrazaba un cárter que solía ser muy estrecho y se situaba muy bajo. Los motores que tenían un cárter más ancho tenían que montarse más elevados, lo que lógicamente elevaba también el centro de gravedad.



*Figura I.4. Chasis de doble cuna.*

No parece que la rigidez a torsión y flexión fuera un parámetro primordial en el diseño de estos primeros bastidores. Sin embargo, en el periodo de entre guerras hubo algunos esfuerzos importantes por mejorar la rigidez a torsión y flexión de los chasis, a base de triangular la estructura. De modo que con el tiempo la rigidez debe aumentar y los tubos van agrandando su sección, al tiempo que los diseñadores más originales comienzan a innovar formas y diseños.

El chasis de la Cotton fue un claro ejemplo de triangulación, consiguiendo una excelente estabilidad.

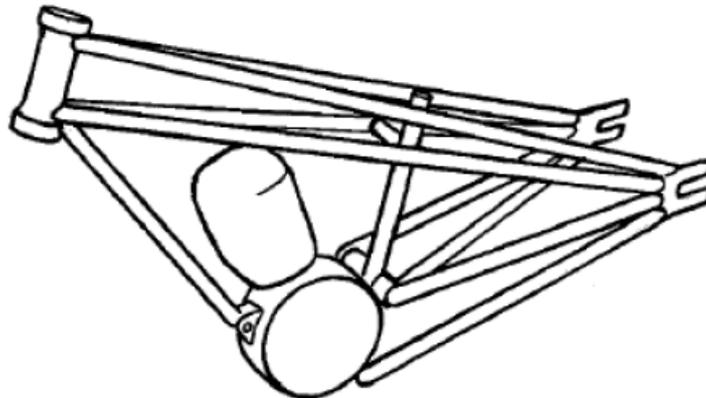


Figura I.5. Chasis Cotton, triangulado tanto si se mira de lado como desde arriba.

Se llevaron a cabo algunos intentos para dar mayor rigidez al soporte de la pipa de dirección, incorporándolo en una pieza de fundición de sección en forma de H, que reemplazaba el tubo frontal que bajaba hacia abajo en la Greeves y el tubo superior en algunas BSA.

El chasis de la Francis-Barnett utilizaba el motor como parte estructural y estaba triangulado completamente, aunque la parte trasera solo estaba triangulada en sentido vertical, por medio de unos tubos rectos que se montaban atornillados en sus extremos para facilitar las reparaciones.

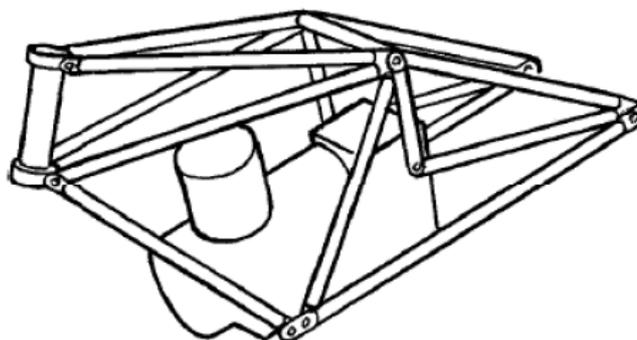


Figura I.6. Chasis Francis-Barnett.

La utilización del motor como parte estructural da lugar a una nueva generación de chasis. Teniendo esto en cuenta cabría la posibilidad de realizar una división acorde a las distintas variantes de la evolución del chasis de las motocicletas. Pero ya que estas

variantes se desarrollan paralelamente (no son excluyentes), e incluso comparten muchos factores comunes, se ha preferido realizar un desarrollo puramente cronológico.

La Scott de 1909 también tenía un chasis al que el motor proporcionaba parte de su rigidez. La parte trasera estaba triangulada totalmente, pero la pipa de dirección solo estaba triangulada lateralmente. El freno delantero de aquella época tenía la suficiente capacidad de frenada como para inclinar significativamente la pipa en el plano longitudinal de la moto; aunque esto ocurriera, no habría afectado demasiado a la estabilidad. Es mucho peor que la pipa se incline lateralmente. La Scott también alcanzó en aquella época una excelente reputación gracias a su buena estabilidad.

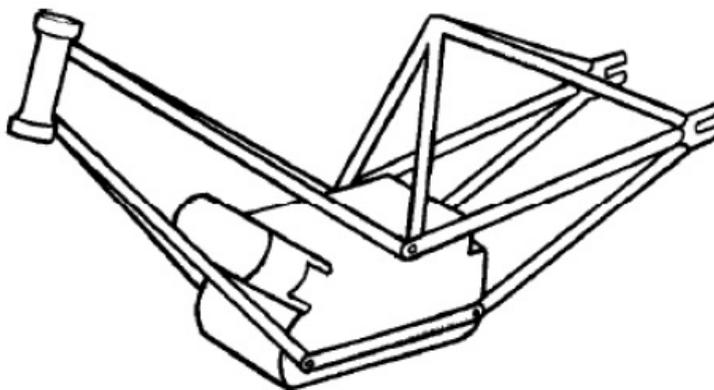


Figura I.7. Chasis Scott.

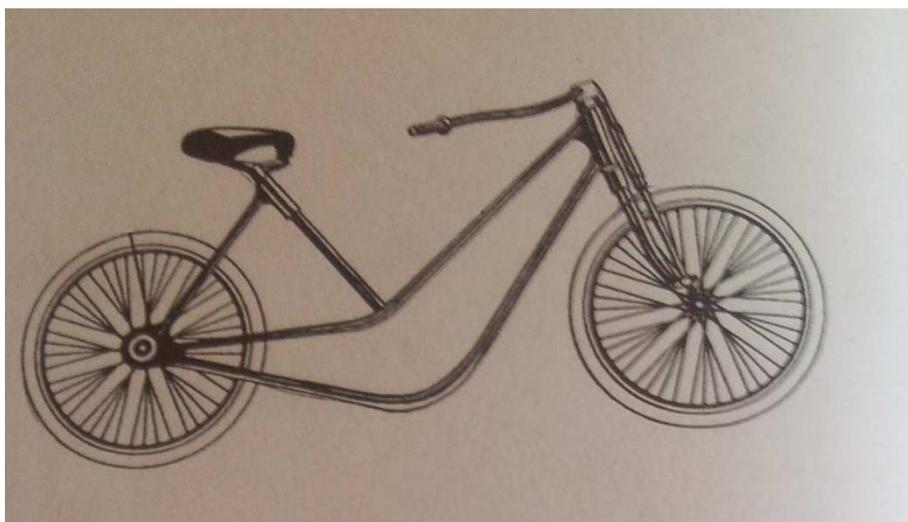


Figura I.8. Chasis Scott.

La Mars de 1920 arroja nuevos conceptos, aunque no sea la primera que los adopta. Los tubos de sección cerrada se cambian por la chapa estampada, que no plantea tantos problemas de uniones soldadas y dispone de una gran rigidez. Su principal inconveniente es el peso, habitualmente mayor, pero su resistencia, en unos momentos en los que el estado de las carreteras es bastante precario, suele compensar sus defectos. En este chasis, la unión de la rueda trasera con el anclaje de la suspensión delantera es prácticamente directo, algo que sólo 60 años más tarde volvería a adquirir una gran importancia. La viga de sección cuadrada forma prácticamente la estructura, de modo que el resto de los elementos se sujetan a ella mediante tirantes.

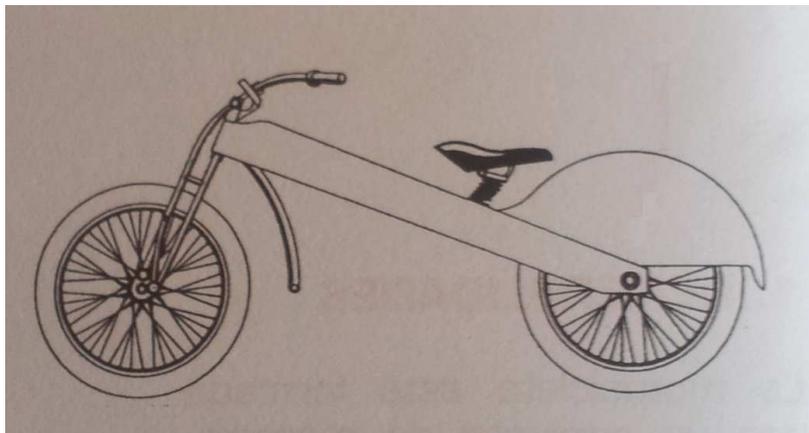


Figura I.9. Chasis Mars.

La BMW R-32 de 1923 no presenta grandes novedades respecto a lo conocido en ese momento, pero aprovecha el sistema de transmisión, como elemento resistente, jugando con una gran ligereza y de nuevo utilizando el tubo de acero, aunque intentando emplear las mínimas cantidades, estudiando los puntos más adecuados. De nuevo el motor tiene una gran importancia en la función resistente del chasis.

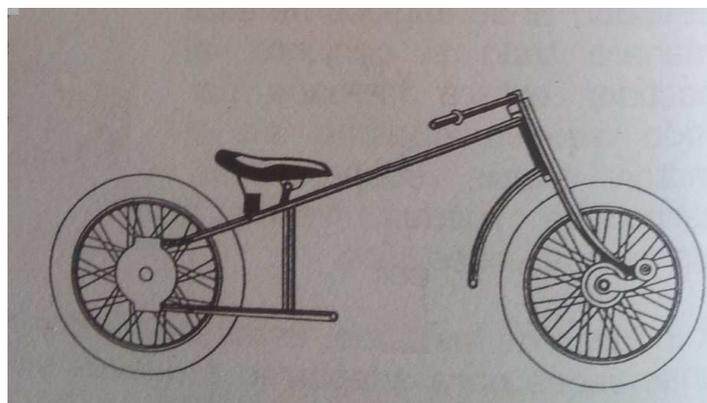
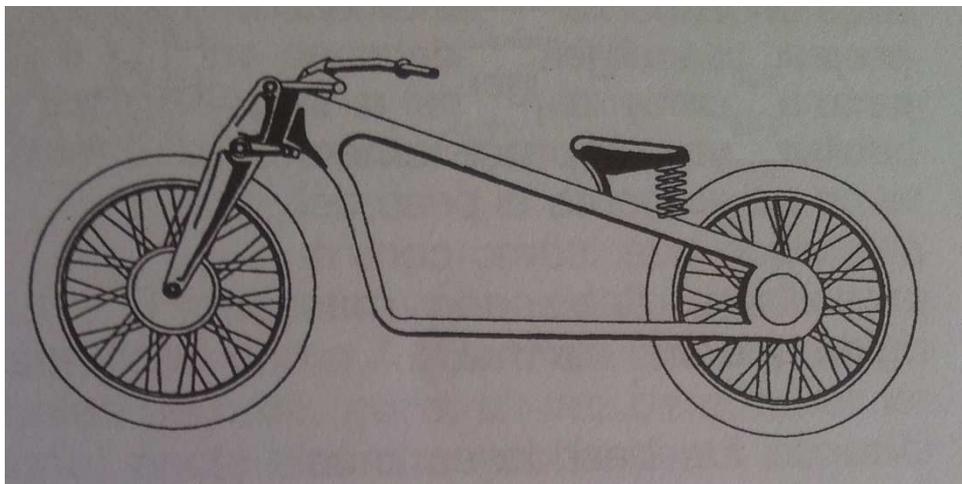


Figura I.10. Chasis BMW.

De nuevo nos encontramos ante un chasis de chapa de acero, pero con catorce años de evolución con respecto al anterior. En este caso, es el de la Zundapp K 800 de 1934, en los prolegómenos de la segunda guerra mundial. La chapa ya no se emplea de manera tan masiva, con el fin de reducir el peso del conjunto. La chapa se corta y se dobla mediante nuevos procedimientos, y su estructura es aun más dura y rígida. Se siguen las líneas maestras de los bastidores tubulares, rodeando el motor, y, aunque las primeras suspensiones traseras han aparecido hace tiempo, aún no están plenamente implantadas, de modo que el bastidor llega hasta el anclaje del tren posterior. Las suspensiones delanteras van variando, pero todavía no han llegado a la horquilla telescópica que se impondrá después de la segunda guerra mundial.



*Figura I.11. Chasis Zundapp.*

Cuando comenzaron a aparecer las primeras suspensiones traseras, muchos fabricantes simplemente abrieron la parte trasera de sus chasis de cuna para poder alojar los amortiguadores. En muchos casos lo único que había era un eje de rueda muy fino sujeto a dos amortiguadores que estaban juntos y por lo tanto en muchos diseños existía una gran diferencia de movimiento entre ambos lados, de forma que la rueda trasera se inclinaba desalineándose respecto al resto de la moto. A menudo, a pesar del aumento del confort y a veces la adherencia, tanto la manejabilidad como la estabilidad empeoraban en comparación con los modelos que no tenían suspensión.

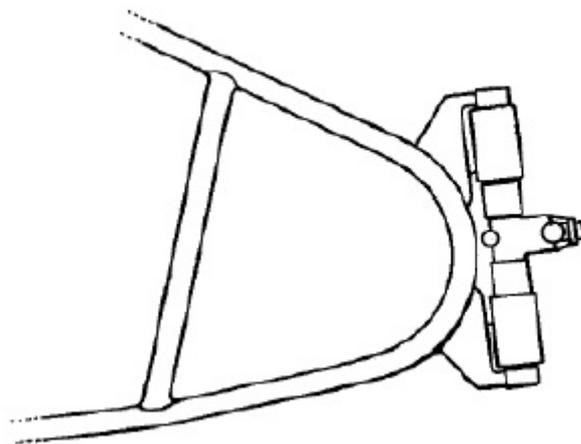


Figura I.12. Forma en que se incorporaba la suspensión trasera.

De hecho el modelo de Norton que incorporaba suspensión, consiguió rápidamente el apelativo de “garden gate”.



Figura I.13. Chasis Norton “Garden gate”.

A finales de la década de los treinta aparece una motocicleta exclusiva. Está dotada de un nuevo bastidor tan exclusivo como ella, la Vincent HRD Rapid de 1939. El motor tiene una función portante muy importante, hasta el punto de que la suspensión trasera está directamente anclada a él por su parte trasera mediante el tirante. La suspensión delantera también se ancla al motor mediante un pequeño elemento intermedio que se

aloja en la parte superior del propulsor. La ligereza del conjunto es muy superior a la habitual, ya que prácticamente no se aumenta el peso del propulsor, que, como contraprestación, debe ser más rígido que uno normal.

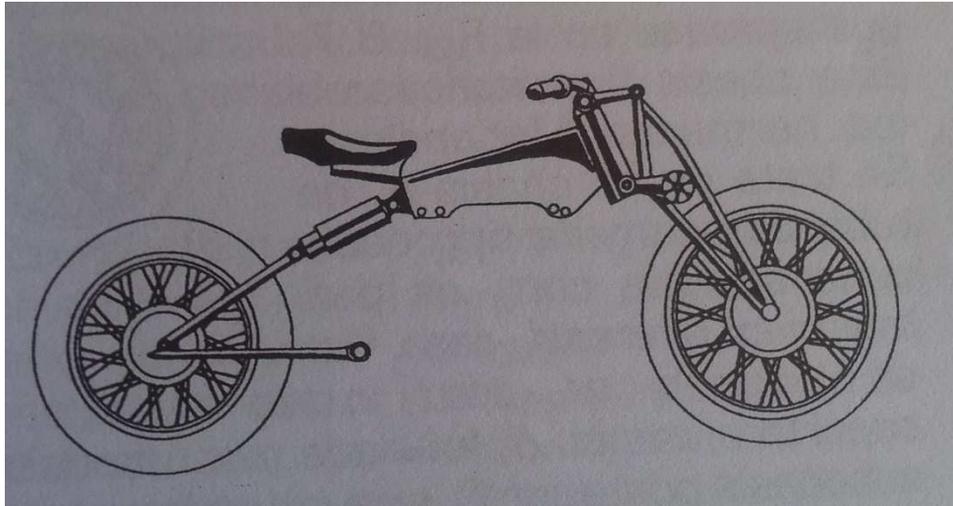


Figura I.14. Chasis H.R.D.

Después de la segunda guerra mundial, todavía alcanzaron mayor celebridad y éxitos las Vincent, dotados de motores bicilíndricos en V, y un chasis de espina central de sección rectangular hecha de chapa soldada, que servía a la vez como depósito de aceite.

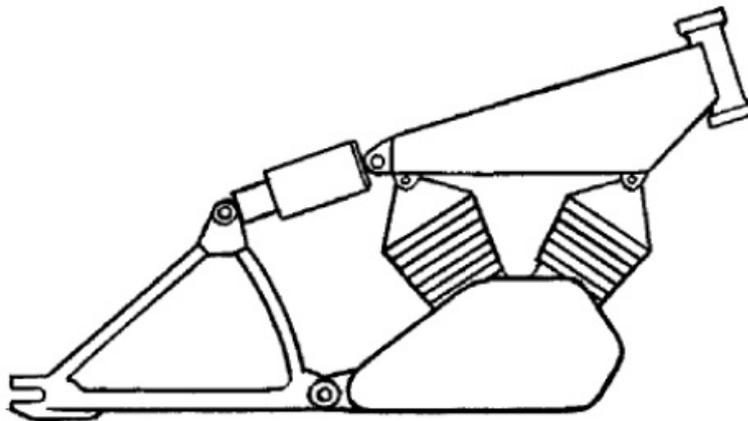


Figura I.15. Chasis Vincent-HRD.

Uno de los bastidores más famosos de la historia es sin duda el que equipaba la Norton Manx del año 1950. Este chasis hizo famosos a los hermanos McCandless y resulta difícil sobreestimar la influencia que este diseño tuvo en el posterior desarrollo de los

chasis Se trata de un chasis de tubo de acero de tipo doble cuna cerrada con dos partes bien diferenciadas. Por un lado, la estructura que soporta el motor, formada por una doble cuna cerrada, y por otro, un subchasis posterior, que sirve de soporte para el piloto y para la amortiguación posterior, que se realiza por medio de un sistema de basculante articulado y amortiguadores.

Las virtudes del chasis de esta moto, que llegó a tener hasta nombre, denominándose “Featherbed”-que vendría a ser “lecho de plumas” en castellano- hicieron famosa a esta moto, que se convirtió en una de las mejores armas para la competición, a pesar de su menor potencia.

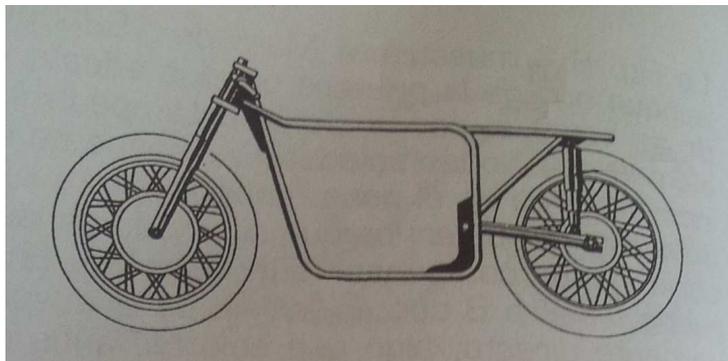


Figura I.16. Chasis Norton.



Figura I.17. Chasis Norton Featherbed.

Incluso hoy, medio siglo después, muchos diseños actuales todavía muestran una descendencia directa de este diseño. Su doble lazo tenía una eficiencia estructural mediocre pero proporcionaba una rigidez adecuada. El diseño general consiguió un reparto de pesos bastante bueno y un centro de gravedad relativamente bajo teniendo en

cuenta la posición vertical del cilindro. La horquilla telescópica fue una de las más robustas de la época, y la geometría de dirección proporcionaba un tacto suave y preciso. Como ocurre con muchos diseños destacados, el éxito de la Featherbed probablemente se debió más a que fue un producto adecuado que a tener una superioridad técnica abrumadora.



*Figura I.18. Norton Manx.*

Una forma completamente distinta de abordar el problema que supone conseguir una resistencia adecuada a la torsión y a la flexión consiste en usar un tubo de gran diámetro como pieza principal del chasis, de esta forma se puede obtener un diseño con un alto grado de rigidez, simple y ligero. Suponiendo que el tubo tenga la sección necesaria, no tiene por qué ser circular, aunque esta sea la mejor forma para conseguir una buena rigidez torsional. De hecho, cuando NSU popularizó rápidamente este tipo de diseño al comienzo del boom de los ciclomotores en los primeros años 50, el tubo -o viga, por usar otro nombre- estaba hecho con dos mitades estampadas y unidas posteriormente mediante soldadura, de forma que el conjunto final tenía una sección aproximadamente ovalada.

De todas formas, estaba claro que una viga plana no podía conectar directamente la pipa con el eje de la rueda trasera, tal y como hacían los cuatro tubos de la Cotton. Por este motivo la viga se bifurcaba en la parte trasera, dejando espacio a la rueda, y la sección abierta que quedaba en la cara interior de ambos brazos se cerraba soldando una chapa doblada con forma de U que restauraba la rigidez. Al soldar la viga partiendo de dos mitades, se hacía posible incorporar cierta curvatura en el plano vertical.



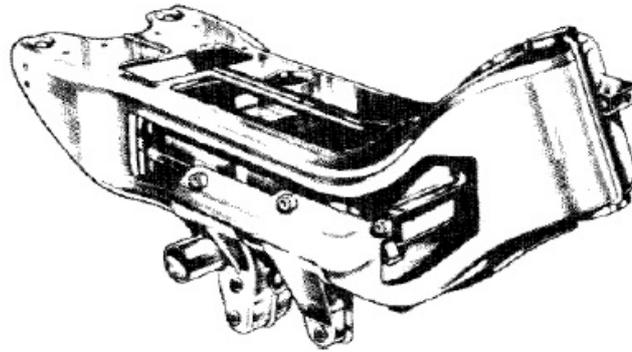
Figura I.19. Chasis no suspendido para un ciclomotor.

El empleo de un basculante trasero eliminó la necesidad de tener que bifurcar la parte trasera de la viga que hacía las veces de chasis, porque con este tipo de suspensión, es el eje del basculante y no el de la rueda el que debe estar conectado de forma rígida con la pipa de la dirección. Naturalmente, el propio basculante debe continuar manteniendo la rigidez torsional y lateral hasta llegar al eje de la rueda. En la NSU Max y en las de competición, la viga estampada de chapa de acero se curvaba hacia abajo en la parte trasera para conseguir una conexión directa entre la pipa y el eje del basculante trasero.



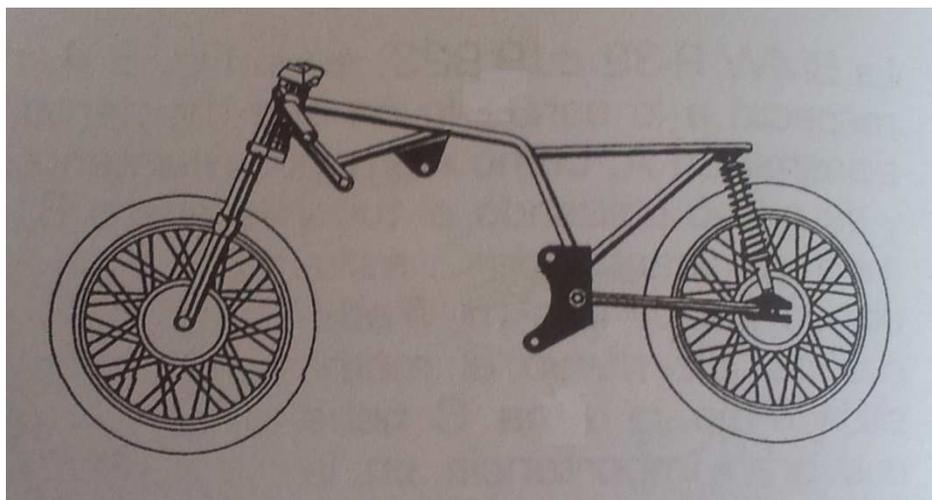
Figura I.20. NSU Max.

Debido a su sección transversal extremadamente grande, el chasis Ariel Leader fue probablemente el más rígido y sobresaliente de los chasis de tipo viga, mostrándose muy predecible cuando se usaba en las carreras.



*Figura I.21. Chasis Ariel Leader.*

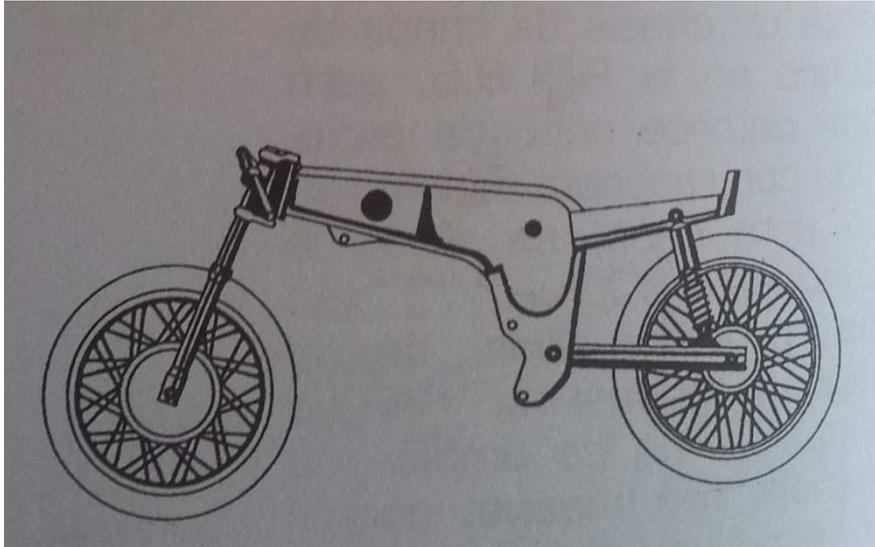
La competición siempre ha sido uno de los grandes motores de la evolución de las motocicletas, sobre todo desde finales de la segunda guerra mundial, cuando alcanza una gran repercusión publicitaria. El siguiente chasis que se muestra vuelve a emplear el motor como un elemento estructural importante. Se trata de una Honda CR 72 de 1963 de competición, en la que el chasis sorte a por la parte superior al motor, pero mantiene su estructura, tanto el anclaje de la suspensión delantera, como el de la trasera, adoptando ya las suspensiones que se han mantenido durante los últimos años invariables en la mayoría de las motos, la horquilla delantera y el basculante trasero.



*Figura I.22. Chasis Honda.*

Hasta ahora se han estudiado chasis realizados de chapa, pero no como el de la Ossa de competición de finales de los años 60, que integra además el depósito de gasolina en la zona media. En este caso, el material deja de ser por primera vez el acero, para ser una

aleación de magnesio, un material mucho más ligero que el hierro habitual. El chasis es muy rígido, al estar formado por una estructura cerrada en su mayor parte, ya que, salvo la zona de anclaje del basculante trasero, lo está por completo. Esto permite a la vez de unas mínimas dimensiones, un peso muy liviano. Esta estructura se denomina monocasco.



*Figura I.23. Chasis Ossa.*

La Norton Challenge muestra un chasis del tipo que se ha denominado “multitubular”. Se trata de una derivación de los bastidores tradicionales de tubo, pero, en vez de adoptar las clásicas estructuras de tipo cuna, ancla el motor por la parte superior con numerosos tubos de sección recta, de modo que los tubos no trabajen con esfuerzos de flexión. De esta manera, se aumenta de manera considerable la rigidez de la estructura, sin que ello represente un mayor peso. Esta estructura es complicada y cara. Pero, hasta la llegada de los siguientes bastidores, se consideraba como la mejor para motocicletas de altas prestaciones.

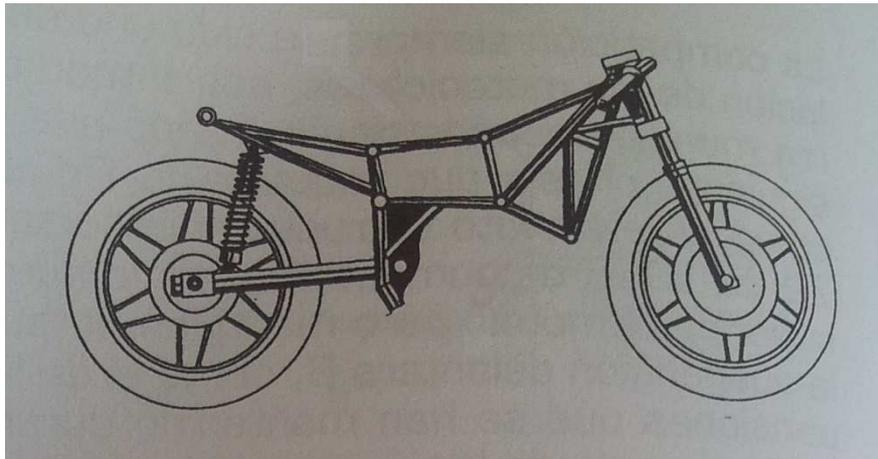


Figura I.24. Chasis Norton.

La gran revolución de la estructura y forma del chasis llegó a principio de los años 80, cuando prácticamente a la vez Yamaha y un pequeño constructor de motos de carreras, Antonio Cobas, presentan la estructura que con el tiempo pasaría a llamarse de “doble viga”. En este caso, con una aleación ligera, se forma una estructura, que une directamente la pipa de sujeción de la suspensión delantera con el eje del basculante trasero. Se consigue una estructura muy rígida y a la vez ligera y sencilla de fabricar.

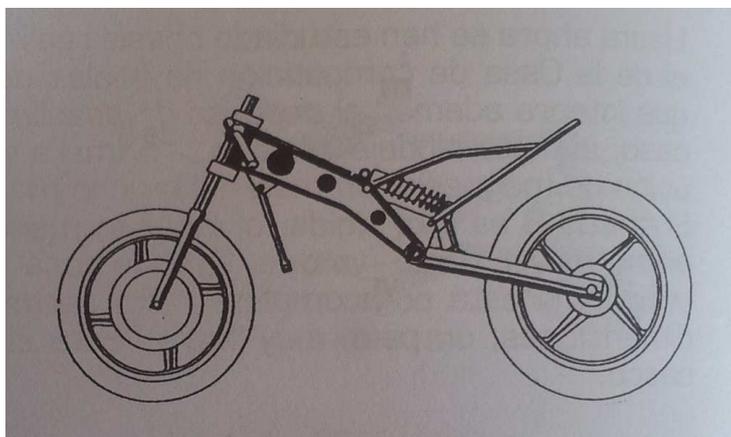


Figura I.25. Chasis Kobas.

Desde entonces los bastidores han evolucionado hacia esta estructura, primero engordando las secciones superiores de sus cunas, y, finalmente, eliminando las secciones inferiores o manteniéndolas como soportes del motor únicamente.



Figura I.26. Chasis doble viga.

Por último, se muestra un bastidor que obvia la clásica suspensión delantera por horquilla a favor de un nuevo sistema, de modo que el bastidor no necesita comenzar en la parte superior y forma una estructura que abraza al motor, uniendo los puntos de anclaje de las dos suspensiones delantera y trasera, también mediante gruesas vigas de aleación ligera.

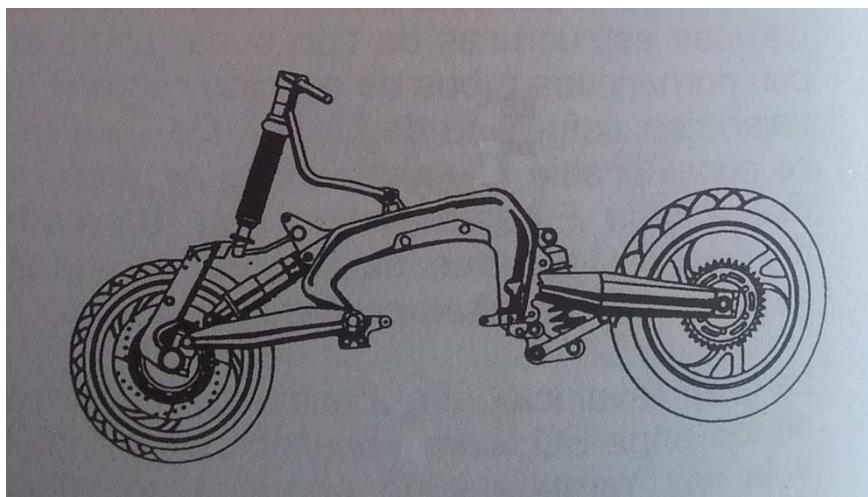


Figura I.27. Chasis Yamaha.

La utilización de grandes motores con valores de rigidez alto ha dado lugar a la aparición de diferentes tipos de chasis. En este caso se utiliza un chasis multitubular y el anclaje del basculante se produce a través del cárter.



Figura I.28. Bott 1000 morlaco.

Otro ejemplo de la utilización de este tipo de chasis utilizando el motor como elemento estructural es la Ducati de moto GP. Este chasis está fabricado en fibra de carbono, conectando la pipa con el motor y el eje del basculante esta directamente en el cárter.



Figura I.29. Ducati desmosediciini.

A lo largo de la historia, se han empleado otros tipos de bastidor, pero éstos pueden ser los más significativos. La mayoría han sido-y son- de tipo cuna, realizados en tubos de acero de distintas secciones. El acero y el aluminio son los materiales empleados, aunque es el primero el más utilizado por su menor coste.

## **ANEXO II. HISTORIA DE LA SUSPENSIÓN TRASERA**

El gran obstáculo en los primeros momentos fue la transmisión secundaria. Los sistemas iniciales, tanto por correa como por cadenas de eslabones, funcionaban muy mal si se les sometía a tensiones, y la solución inicial consistió en dotar al asiento de unos sencillos muelles que amortiguasen los choques de la rueda trasera. Algo más tarde se impusieron los sistemas en los cuales la rueda disponía de un mínimo desplazamiento vertical.

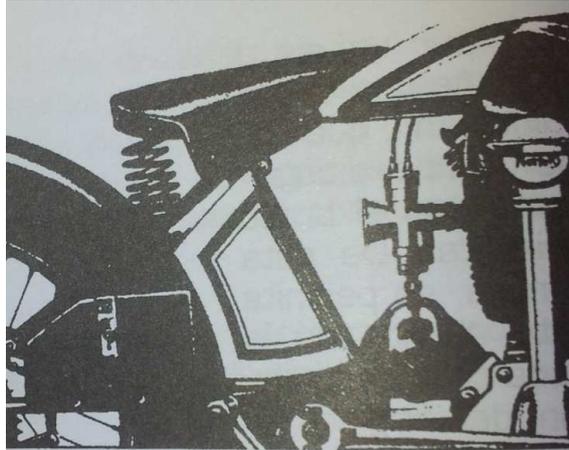


Figura II.1. Sillín de una motocicleta Norton dotado de muelles.

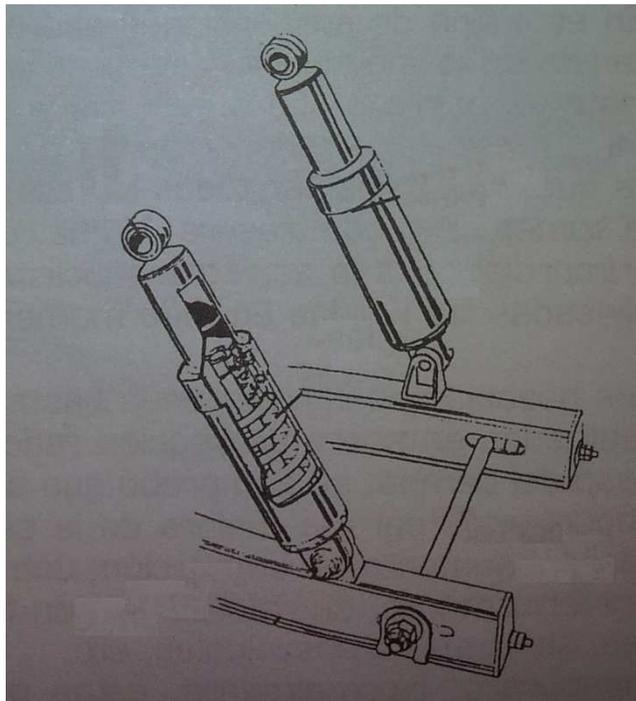
De los diferentes sistemas, el que más éxito tuvo fue la suspensión trasera por émbolo. En este caso, se mantenía el chasis rígido, pero la rueda trasera se anclaba sobre un soporte deslizante que permitía un pequeño desplazamiento vertical, al estar fijado su eje sobre un raíl en el que se intercalaba un muelle o un amortiguador hidráulico. Estos sistemas aún no eran lo suficientemente equilibrados, ya que, por una parte, el recorrido de la rueda era muy pequeño, y por otra, su desplazamiento provocaba variaciones de tensión en la transmisión secundaria bastante importantes, ya que era completamente recto.



Figura II.2. Sistema "Plunger".

Este diseño tan básico tenía una carencia clara de rigidez torsional y era necesario utilizar dos amortiguadores para evitar el par que producían las fuerzas de la suspensión. Para eliminar estos defectos, la relación más eficaz entre rigidez y peso se obtiene triangulando el basculante y conectando el vértice al amortiguador, tal y como lo patentó Vincent en 1928.

Algo antes de la segunda guerra mundial, se desarrolló el sistema que más tarde se impondría definitivamente, el brazo basculante. Previamente ya había sido ensayado por algunos fabricantes, pero, a partir de entonces, se extendió de manera definitiva. Este sistema ha permanecido hasta nuestros días. Está formado por un basculante anclado al chasis en la parte trasera, lo más cerca posible del origen de la transmisión secundaria o coincidente con ella. Normalmente por sencillez de diseño y de instalación del motor en caso de transmisión por cadena, hay una pequeña distancia entre el eje del piñón de ataque y el del basculante. Si son coincidentes, el sistema se denomina “coaxial”. El extremo libre de este basculante está ocupado por el anclaje de la rueda, que de este modo tiene un desplazamiento circular, tomando como centro el anclaje del basculante al chasis. Las funciones elásticas están encomendadas a uno o varios amortiguadores intercalados entre el basculante y el chasis.



*Figura II.3. Basculante de suspensión trasera con basculante y doble amortiguador en una motocicleta Yamaha.*

Este sistema de suspensión presenta una serie de ventajas. En primer lugar, es bastante ligero, permite un gran recorrido de la rueda, ya que ésta no está limitada por nada, y además el movimiento que sigue es perfectamente compatible con cualquier transmisión secundaria.

Con la llegada de este tipo de suspensión, la práctica totalidad de las motocicletas pudieron disponer de un sistema que evitara todos los problemas causados por la falta de tracción al despegarse la rueda del suelo en los baches, las derrapadas por causa de una deficiente adherencia, y facilitara un importante aumento de la comodidad, lo que posibilitó el aumento de la potencia, y, sobre todo, de las posibilidades de aplicarla al asfalto.

En este tipo de suspensiones aparecen dos elementos de gran importancia en la motocicleta, el basculante y los amortiguadores. El basculante es el brazo que une la rueda con el chasis y la dota de un movimiento circular alrededor de su eje. Esta pieza debe ser muy robusta, ya que debe soportar todos los esfuerzos de torsión y flexión a los que se somete la rueda trasera. No hay que olvidar que una de las funciones primordiales de la estructura ciclista de la moto es mantener siempre alineadas las ruedas en todo momento.

Los basculantes iniciales eran bastante poco resistentes, normalmente realizados en acero de sección redonda con escasos refuerzos. Con el paso del tiempo, se comprobó que su rigidez era uno de los puntos más importantes para la mejora de la estabilidad a alta velocidad y comenzaron a aumentarse de sección, con perfiles cuadrados y rectangulares. Posteriormente, se reforzaron con triangulaciones superiores e inferiores, secciones trapezoidales, etc. Un tipo especial de basculante es el monobrazo. Normalmente, estas piezas disponen de dos brazos, de manera que, junto con el eje de la rueda, forman una estructura cerrada. Con el fin de facilitar la extracción de la rueda, se han realizado también modelos con una sola viga lateral muy reforzada. En la figura se pueden ver algunos tipos de basculantes empleados en los trenes posteriores de las motocicletas.



Figura II.4. Tipos más usuales de bastidores empleados en motocicletas. Se pueden apreciar modelos dobles, con refuerzos superiores, de tipo monobrazo y de sección variable.

A lo largo de los años, la colocación del elemento elástico ha ido variando. La posición más clásica ha sido instalar dos amortiguadores, uno sobre cada brazo del basculante, en la zona cercana al anclaje de la rueda, sujetos por su parte superior al bastidor, sin embargo en la actualidad esta disposición ha variado.

En los primeros años 70 se comenzó a poner mucha atención en la mejora de los sistemas de suspensión, especialmente en motocross y enduro, donde hubo una rápida tendencia a aumentar muchísimo el recorrido de las suspensiones, que pasó de una media de 100 mm a unos 305 mm en un corto espacio de tiempo. Resultaba complicado conseguir unos movimientos tan grandes con la ubicación tradicional de los amortiguadores, situados verticales cerca del extremo del basculante, así que no resulta extraño que fuera en el sector de la moto de campo donde se comenzara a poner más atención en aquellos diseños que aplicaban algún tipo de palanca al amortiguador para reducir su movimiento longitudinal. Aparte de permitir utilizar un único amortiguador con un movimiento reducido, estos sistemas permitían un tremendo control geométrico de las propiedades de la constante del muelle. Se podía conseguir fácilmente progresividad, regresividad y combinaciones de ambas. La imagen siguiente muestra cómo los brazos de palanca pueden cambiar drásticamente cuando una bieleta corta gira un ángulo relativamente grande, dando lugar a una gran progresividad de la constante.

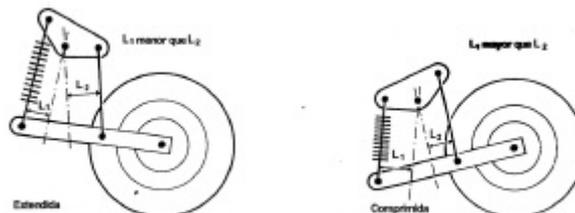


Figura II.5. Ejemplo de sistema de bieletas. Debido a que la relación  $L_1:L_2$  varía con el movimiento de la rueda, este sistema de suspensión trasera da lugar a una constante progresiva tanto para el muelle como para el amortiguador. La constante elástica efectiva en la rueda varía según el cuadrado de la relación anterior. En la posición extendida el lado conectado al basculante tiene mayor ventaja mecánica y por tanto la constante será más blanda que cuando el sistema está comprimido.

Carlos Espiga Goñi,

Pamplona, 02 de Noviembre de 2.013