



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID
ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO
ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL

GRADO EN INGIENERIA EN SISTEMAS
INDUSTRIALES MENCIÓN: MECANICA MAS
AUTOMOCIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO
MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN DE LA SUSPENSIÓN DEL
FORMULA UEM

Alumno: D. ROGER J. M. M. ALEXANDRE ANGLADE
Director: D. CARLOS ALBERTO TALAYERO

JUNIO 2022

TÍTULO: Método de optimización de la suspensión del formula UEM

AUTOR: Roger J.M.M. Alexandre Anglade

DIRECTOR DEL PROYECTO: Carlos Alberto Talayero

VICEDIRECTOR DEL PROYECTO: Vicente Padilla

FECHA: 18 de junio de 2022

RESUMEN

En este proyecto tratamos de proponer un método para encontrar de forma más eficiente y eficaz la solución óptima de configuración de la suspensión del vehículo del equipo de Fórmula UEM, el FueM 14, para participar en la competición de Fórmula Student.

Tomaremos el modelo de nuestro vehículo de SOLIDWORKS y lo construiremos en ADAMS CAR. Realizaremos unas simulaciones utilizando ADAMS CAR, intentando recrear las condiciones encontradas en la competición de la Formula Student, cambiando varios parámetros del FueM 14 y analizándolos posteriormente. Dividiremos las simulaciones en simulaciones de vehículo completo y simulaciones de medio vehículo, tratando de obtener una mejor comprensión de nuestro vehículo.

Haremos un análisis de costes para determinar la rentabilidad del estudio. Finalmente, propondremos una solución que creemos que es el mejor compromiso para maximizar los puntos disponibles en la competencia.

Palabras clave: Simulación; ADAMS; FSAE; Optimización; Suspensión.

ABSTRACT

In this project, we try to propose a method to more efficiently and effectively find the optimum setup solution for the suspension of the Formula UEM team's vehicle, the FueM 14, to take part in the Formula Student competition.

We will take the model of our vehicle from SOLIDWORKS and build it in ADAMS CAR. We will make some simulations using ADAMS CAR, trying to recreate the conditions found in the Formula Student competition, changing various parameters of the FueM 14 and later analysing them. We will split the simulations into full vehicle simulations and half vehicle simulations, trying to get a better understanding of our vehicle.

We will do a cost analysis to determine the cost effectiveness of the study. Finally, we will propose a solution that we believe to be the best compromise to maximise the points available in the competition.

Key words: Simulation; ADAMS; FSAE; Optimization; Suspension.

Índice

RESUMEN	2
ABSTRACT	2
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas	8
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	9
1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO	10
Capítulo 2. MEMORIA	11
2.1 OBJETO	11
2.2 ALCANCE	11
2.3 DESCRIPCION DE LA FORMULA STUDENT	11
2.3.1 PRUEBAS ESTATICAS	12
2.3.2 PRUEBAS DINAMICAS	12
2.4 DESCRIPCION DE LA SUSPENSION DEL FUEM	14
2.4.1 SUSPENSION DELANTERA	15
2.4.2 SUSPENSION TRASERA	20
2.5 PARAMETRIZACION CON MATRICES ORTOGONALES	22
2.6 PROGRAMAS DE CALCULO	25
2.6.1 SOLIDWORKS	25
2.6.2 ADAMS CAR	26
2.6.3 ACELERACION	29
2.6.4 CURVA DE RADIO CONSTANTE	35
2.6.5 OTROS ESTUDIOS	44
2.7 ANALISIS DE SOLUCIONES	58
2.8 ANALISIS DE COSTES	61
2.8.1 COSTES	61
2.8.2 RENTABILIDAD	61
2.9 RESULTADOS FINALES	62

Capítulo 3. CONCLUSIONES	63
3.1 CONCLUSIONES	63
3.2 FUTURAS LINEAS DE TRABAJO	63
Capítulo 4. BIBLIOGRAFIA	64

Índice de Figuras

Ilustración 1 Distribución del Skidpad.....	13
Ilustración 2 Puntos máximos otorgados.....	14
Ilustración 3 Vista Lateral FueM 14.....	14
Ilustración 4 Vista frontal FueM 14.....	14
Ilustración 5 Vista superior FueM 14.....	15
Ilustración 6 Suspensión delantera FueM 14.....	16
Ilustración 7 Öhlins TTX25.....	16
Ilustración 8 Öhlins TTX25 Medidas 1.....	17
Ilustración 9 Öhlins TTX25 Medidas 2.....	17
Ilustración 10 Brazo Superior Delantero Y Sus Soportes.....	17
Ilustración 11 Brazo Inferior Delantero Y Sus Soportes.....	18
Ilustración 12 Mangueta Y Buje Delantero.....	18
Ilustración 13 Vista Explotada De La Mangueta.....	18
Ilustración 14 Sistema Tirante y Balancín delantero.....	19
Ilustración 15 Balancín Delantero.....	19
Ilustración 16 Sistema De dirección.....	20
Ilustración 17 Suspensión Trasera.....	20
Ilustración 18 Brazo Superior Trasero Y Sus Soportes.....	21
Ilustración 19 Brazo Inferior Trasero Y Sus Soportes.....	21
Ilustración 20 Mangueta Y Buje Trasero.....	21
Ilustración 21 Sistema Tirante y Balancín Trasero.....	22
Ilustración 22 Balancín trasero.....	22
Ilustración 23 Matriz Ortogonal tipo L8(b).....	23
Ilustración 24 Ilustración de los diferentes ángulos de convergencia (8).....	24
Ilustración 25 Ilustración de los diferentes ángulos de caída (h).....	24
Ilustración 26 Sistemas de Coordenadas en Solidworks.....	25
Ilustración 27 Ejemplo de plantilla de vehículo en ADAMS CAR.....	26
Ilustración 28 Geometría de suspensión del FueM 14 en ADAMS CAR 1.....	26
Ilustración 29 Suspensión delantera del FueM 14 en ADAMS CAR.....	27
Ilustración 30 Suspensión delantera izquierda del FueM 14.....	27
Ilustración 31 Suspensión trasera del FueM 14 en ADAMS CAR.....	27
Ilustración 32 Suspensión trasera izquierda del FueM 14.....	28
Ilustración 33 FueM 14 en ADAMS CAR.....	28
Ilustración 34 Prueba Aceleración: Aceleraciones Longitudinales de los 8 casos.....	29
Ilustración 35 Prueba Aceleración: Aceleraciones Longitudinales de los 8 casos (2).....	29
Ilustración 36 Prueba Aceleración: Velocidades de los 8 casos.....	30
Ilustración 37 Prueba Aceleración: Velocidades de los 8 casos (2).....	30
Ilustración 38 Parámetros ensayo aceleración Caso 1.....	31
Ilustración 39 Parámetros ensayo aceleración Caso 2.....	31

Ilustración 40	Parámetros ensayo aceleración Caso 3.....	32
Ilustración 41	Parámetros ensayo aceleración Caso 4.....	32
Ilustración 42	Parámetros ensayo aceleración Caso 5.....	33
Ilustración 43	Parámetros ensayo aceleración Caso 6.....	33
Ilustración 44	Parámetros ensayo aceleración Caso 7.....	34
Ilustración 45	Parámetros ensayo aceleración Caso 8.....	34
Ilustración 46	Ensayo de curva de radio constante	35
Ilustración 47	Prueba Curva radio constante: Aceleraciones Laterales de los 8 casos.....	35
Ilustración 48	Prueba Curva radio constante: Aceleraciones Laterales de los 8 casos (2)	36
Ilustración 49	Prueba Curva radio constante: Velocidades de los 8 casos	36
Ilustración 50	Prueba Curva radio constante: Ángulos de deriva de los 8 casos	37
Ilustración 51	Parámetros ensayo curva radio constante Caso 1	37
Ilustración 52	Parámetros ensayo curva radio constante Caso 2	38
Ilustración 53	Parámetros ensayo curva radio constante Caso 3	39
Ilustración 54	Parámetros ensayo curva radio constante Caso 4	40
Ilustración 55	Parámetros ensayo curva radio constante Caso 5	41
Ilustración 56	Parámetros ensayo curva radio constante Caso 6	42
Ilustración 57	Parámetros ensayo curva radio constante Caso 7	43
Ilustración 58	Parámetros ensayo curva radio constante Caso 8	44
Ilustración 59	Desplazamiento paralelo de las ruedas delanteras	45
Ilustración 60	Parámetros desplazamiento paralelo de las ruedas delanteras	46
Ilustración 61	Parallel travel test, ángulo de caída delantero.....	46
Ilustración 62	Parallel travel test, ángulo de convergencia delantero	47
Ilustración 63	Parallel travel test, vía delantera	47
Ilustración 64	Parallel travel test, Dive braking delantero	48
Ilustración 65	Parallel travel test, posición del centro de balanceo delantero	48
Ilustración 66	Desplazamiento en sentido opuesto de las ruedas delanteras.....	49
Ilustración 67	Parámetros desplazamiento en sentido opuesto de las ruedas delanteras	49
Ilustración 68	Opposite wheel travel, ángulo de caída delantero.....	50
Ilustración 69	Opposite wheel travel, Dive braking delantero	50
Ilustración 70	Opposite wheel travel, posición del centro de balanceo delantero	51
Ilustración 71	Opposite wheel travel, ángulo de balanceo delantero	51
Ilustración 72	Opposite wheel travel, Recorrido vertical de las ruedas delanteras.....	51
Ilustración 73	Desplazamiento paralelo de las ruedas traseras.....	52
Ilustración 74	Parámetros desplazamiento paralelo de las ruedas traseras	52
Ilustración 75	61 Parallel travel test, ángulo de caída trasero.....	53
Ilustración 76	Parallel travel test, ángulo de convergencia trasero	53
Ilustración 77	Parallel travel test, Fuerzas en la mangueta vs desplazamiento trasero	54
Ilustración 78	Parallel travel test, posición del centro de balanceo trasero	54
Ilustración 79	Parallel travel test, vía trasera	55
Ilustración 80	Desplazamiento en sentido opuesto de las ruedas traseras.....	55
Ilustración 81	Parámetros desplazamiento en sentido opuesto de las ruedas traseras	56
Ilustración 82	Opposite wheel travel, ángulo de caída trasero.....	56
Ilustración 83	Opposite wheel travel, dive braking trasero.....	57

Ilustración 84 Opposite wheel travel, jacking trasero.....	57
Ilustración 85 Opposite wheel travel, fuerzas en rueda trasera izquierda.....	57
Ilustración 86 Opposite wheel travel, posición del centro de balanceo trasero	58
Ilustración 87 Comparación entre la aceleración lateral Caso 7 vs Mejora, Prueba curva radio constante	59
Ilustración 88 Comparación entre la aceleración longitudinal Caso 7 vs Mejora, Prueba aceleración	59
Ilustración 89 Comparación entre la Velocidad punta Caso 7 vs Mejora, Prueba aceleración...	60

Índice de Tablas

Tabla 1 Características generales del Fuem 14	15
Tabla 2 Especificaciones técnicas amortiguadores	16
Tabla 3 Factores y Niveles	25
Tabla 4 Matriz Ortogonal L8(b) Con Parámetros	25
Tabla 5 Tabla de resultados Caso 1	31
Tabla 6 Tabla de resultados Caso 2	31
Tabla 7 Tabla de resultados Caso 3	32
Tabla 8 Tabla de resultados Caso 4	32
Tabla 9 Tabla de resultados Caso 5	33
Tabla 10 Tabla de resultados Caso 6	33
Tabla 11 Tabla de resultados Caso 7	34
Tabla 12 Tabla de resultados Caso 8	34
Tabla 13 Tabla de resultados Caso 1	38
Tabla 14 Tabla de resultados Caso 2	38
Tabla 15 Tabla de resultados Caso 3	39
Tabla 16 Tabla de resultados Caso 4	40
Tabla 17 Tabla de resultados Caso 5	41
Tabla 18 Tabla de resultados Caso 6	42
Tabla 19 Tabla de resultados Caso 7	43
Tabla 20 Tabla de resultados Caso 8	44
Tabla 21 Amortiguador en sus diferencias posiciones	44
Tabla 22 Compresión y rebote	45
Tabla 23 Resultados de los estudios	58
Tabla 24 Intento de mejora de los resultados	58
Tabla 25 Comparación entre la aceleración lateral Caso 7 vs Mejora, Prueba curva radio constante	59
Tabla 26 Tabla 25 Comparación entre Caso 7 vs Mejora, Prueba aceleración	59
Tabla 27 Costes	61
Tabla 28 Puntos pruebas dinámicas	61
Tabla 29 Parámetros finales	62

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La suspensión de un coche es una de las partes más complicadas de desarrollar. No hay verdad absoluta. Para cada filosofía de coche y cada configuración de la suspensión, hay una solución adecuada. Para encontrar la configuración ideal de la suspensión, podemos modificar diferentes parámetros del coche, como:

- Altura del centro de gravedad
- Rigidez de muelles
- Amortiguamiento
- Tipo / presión de neumáticos
- Ángulos de convergencia, caída y caster ([5,6](#))

También, hay unos factores independientes que influyen la configuración de la suspensión del coche, como:

- Las condiciones meteorológicas
- Temperatura de la pista
- Condiciones de la pista
- Etc...

Para poder encontrar la configuración óptima de un vehículo, necesitamos muchos conocimientos de dinámica vehicular, bastantes recursos y mucha experiencia. Para una competición como el [Formula Student](#), donde los alumnos tenemos algunos conocimientos y poca experiencia, estaría bien tener un método de optimización, junto con una herramienta que podríamos utilizar sin tener que gastar demasiados recursos, que nos permitiría tener una idea de cual configuración del vehículo sería la adecuada para diferentes situaciones.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo de este proyecto es de utilizar la herramienta ADAMS CAR para poder simular el comportamiento del vehículo del Formula UEM, el FueM 14, en condiciones similares a las diferentes pruebas dinámicas de la competición Formula Student y demostrar la utilidad y la potencia de ADAMS CAR. Para alcanzar nuestro objetivo, vamos a tener que:

- Hacer un modelo del FueM 14 en ADAMS CAR
- Sacar las coordenadas de los puntos de anclaje de la suspensión
- Utilizar ADAMS CAR para estudiar las configuraciones
- Analizar las diferentes configuraciones
- Proponer una solución de configuración de la suspensión

1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Capítulo 2.1 – 2.2: Objeto y alcance del proyecto.

Capítulo 2.3: Descripción de la Formula Student

En esta parte del estudio, explicamos que es la Formula Student y las diferentes pruebas que la compone.

Capítulo 2.4: Descripción de las partes de la suspensión del Fuem 14

En esta parte del estudio, hacemos una breve descripción de los componentes de la suspensión del Fuem 14.

Capítulo 2.5: Parametrización con matrices ortogonales

En esta parte del estudio, el método de Taguchi para diseñar experimentos y identificar los casos críticos para que el proceso sea más eficiente. También, explicamos los parámetros que vamos a cambiar en el vehículo.

Capítulo 2.6: Programas utilizados

En esta parte del estudio, hablamos de los diferentes programas utilizados, como los hemos utilizado y hacemos simulaciones.

Capítulo 2.7: Análisis de soluciones

En esta parte del estudio, analizamos las soluciones de las simulaciones y proponemos una mejora.

Capítulo 2.8: Análisis de costes

En esta parte del estudio, hablamos de los diferentes costes y hacemos un análisis de rentabilidad del proyecto.

Capítulo 2.9: Resultados Finales

En esta parte del estudio, hacemos un pequeño resumen del análisis de soluciones y damos un resultado final del estudio.

Capítulo 3: Conclusiones y futuras líneas de trabajo.

Capítulo 2. MEMORIA

2.1 OBJETO

Ahora mismo, en el equipo de Formula UEM, no existe un método de ajuste de los parámetros de la suspensión del vehículo. A pesar de que tenemos la ayuda de profesores y algunos conocimientos de clases de teoría de dinámica vehicular, no sabemos realmente si al cambiar parámetros, a valores comunes usados en el mundo de las suspensiones, son realmente los valores óptimos para nuestro vehículo. La manera de verificar si son los óptimos, es de cambiar los parámetros del vehículo físicamente, salir con el coche y probar, y después de muchas iteraciones llegamos a las conclusiones necesarias. Esto implica un uso ineficiente de tiempo y de recursos.

Por esta razón, este proyecto se centrará sobre un método de optimización de nuestro vehículo, el FUEM 14, con un programa, en este caso ADAMS CAR, para poder simularlo en diferentes condiciones y diferentes configuraciones para poder encontrar la configuración óptima, dependiendo del evento de la competición en el cual estamos participando. Así, cuando llegamos a la pista, ya tenemos una idea de cual configuración será la adecuada para cada evento, habremos utilizado menos recursos y habremos optimizado el tiempo dedicado a buscar la configuración correcta. Este método también nos permite comparar los resultados de las simulaciones, con los resultados en el mundo real, para estar seguros de que nuestro vehículo está en su configuración óptima.

2.2 ALCANCE

En este proyecto, vamos a construir un modelo del FUEM 14 en ADAMS CAR, simular diferentes configuraciones de la suspensión del vehículo y proponer una solución de configuración de la suspensión adecuada a las diferentes pruebas de la competición de la Formula Student.

2.3 DESCRIPCION DE LA FORMULA STUDENT

La Fórmula Student o Fórmula SAE (Society of Automotive Engineers, en inglés; Sociedad de Ingenieros de la Automoción, en castellano), empezó en la universidad de Texas en los Estados Unidos, en 1981. Es una competición en la cual participan estudiantes de diferentes universidades de todo el mundo. Cada equipo diseña y construye un vehículo para competir en diferentes eventos. (3)

Los eventos de la competición se dividen en pruebas estáticas (Static Events, en inglés) y pruebas dinámicas (Dynamic Events, en inglés). Las pruebas estáticas se hacen con el coche parado, pero un equipo que no tiene un vehículo preparado puede participar en las pruebas estáticas, con el fin de presentar un vehículo que van a fabricar.

2.3.1 PRUEBAS ESTATICAS

- **Presentación del plan de negocio:**

En esta prueba, los equipos tienen que desarrollar y entregar un modelo de negocio que demuestre que su producto puede convertirse en una oportunidad de negocio que crea una ganancia monetaria.

(4)

- **Coste y Fabricación:**

En esta prueba, los equipos tienen que demostrar su comprensión de los procesos de fabricación y los costes asociados a la construcción de un prototipo de un coche de carreras. También, los equipos tienen que justificar sus decisiones de compensación entre contenido y costo, entre fabricar o comprar piezas y comprender las diferencias entre hacer un prototipo y una producción en masa. (4)

- **Diseño:**

En esta prueba, se evalúa el proceso y el esfuerzo de ingeniería de los estudiantes para diseñar un vehículo de competición, cumpliendo con la intención de la competencia. (4)

2.3.2 PRUEBAS DINAMICAS

Antes de las pruebas dinámicas, el vehículo entra en la fase de inspección técnica, la cual se divide en:

- Pre-Inspección
- Inspección mecánica
- Prueba tilt
- Pesaje
- Prueba de frenada

Una vez la parte de inspección terminada, empiezan las pruebas dinámicas. (4)

- **Skidpad:**

La pista del skidpad consta de dos pares de círculos concéntricos en forma de ocho, como podemos ver en la ilustración de abajo. En esta prueba, el vehículo entrará perpendicular a la figura de ocho y hará dos vueltas en cada círculo, empezando por el derecho y después el izquierdo. Después de las cuatro vueltas, el vehículo saldrá perpendicular a la figura de ocho, moviéndose en la misma dirección que entro. Las segundas vueltas en cada círculo, es decir la segunda y la cuarta vuelta, serán las que se cronometrarán y se hará una media. (4)

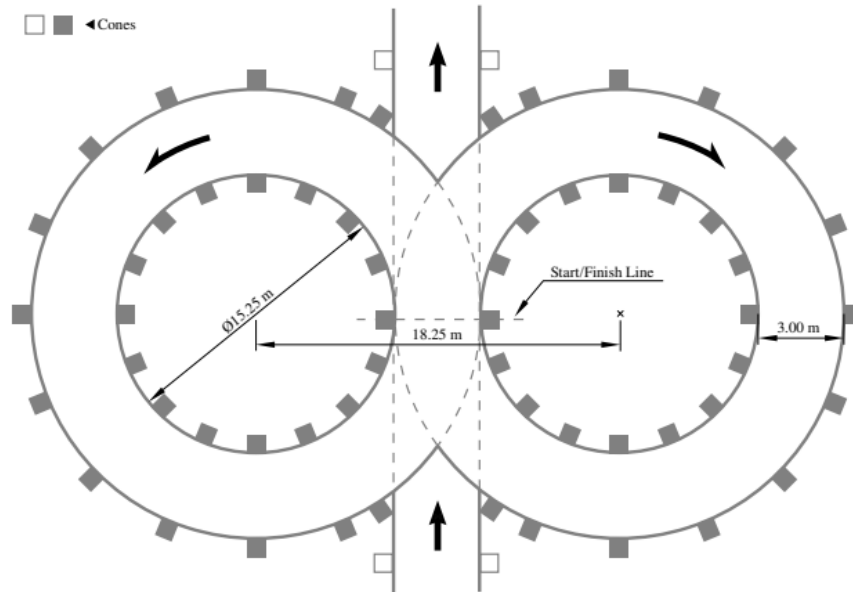


Ilustración 1 Distribución del Skidpad

- **Aceleración:**

La pista de aceleración es una línea recta con una longitud de 75 m desde la línea de salida hasta la línea de llegada. La pista tiene al menos 3 m de ancho. (4)

- **Autocross:**

La pista del autocross está construida según las siguientes pautas:

- Longitud inferior a 1.5 km
- Rectas: Inferiores a 80 m
- Giros constantes: hasta 50 m de diámetro
- Curvas cerradas: Mínimo de 9 m de diámetro exterior
- Slalom: Conos en línea recta con un espacio entre medio de 7.5 m a 12 m
- Otros: Chicanes, giros múltiples, giros de radio decreciente etc. El mínimo ancho de vía es de 3 m

(4)

- **Endurance y Eficiencia:**

En esta prueba, se evalúa la resistencia del vehículo. los equipos deberán correr veintidós km, divididos en dos tandas de once km, entre dos pilotos. Esta prueba es la que puntúa más de toda la competición. La pista del autocross es muy similar al evento de autocross. La eficiencia se mide durante el evento de endurance. (4)

En la figura de abajo, podemos ver los puntos máximos otorgados por evento y para la competencia en general. (4)

	CV & EV
Static Events:	
Business Plan Presentation	75 points
Cost and Manufacturing	100 points
Engineering Design	150 points
Dynamic Events:	
Skid Pad	50 points
DV Skid Pad	75 points
Acceleration	50 points
DV Acceleration	75 points
Autocross	100 points
DV Autocross	-
Endurance	250 points
Efficiency	75 points
Trackdrive	-
Overall	1000 points

Ilustración 2 Puntos máximos otorgados

2.4 DESCRIPCION DE LA SUSPENSION DEL FUEM

La suspensión es una de las partes la más importantes de un coche. El objetivo principal de la suspensión es de mantener las ruedas en contacto con el suelo y absorber los golpes que podría sufrir el coche debido a los baches en la pista. El buen diseño de la suspensión va a determinar el comportamiento y la maniobrabilidad del coche. En esta parte, vamos a explicar en detalle, los elementos de la suspensión del Fuem 14.

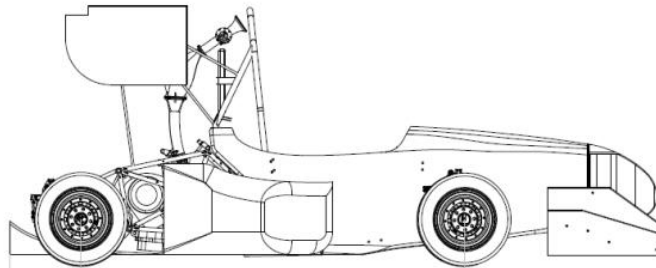


Ilustración 3 Vista Lateral Fuem 14

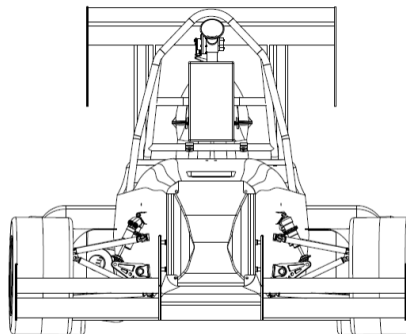


Ilustración 4 Vista frontal Fuem 14

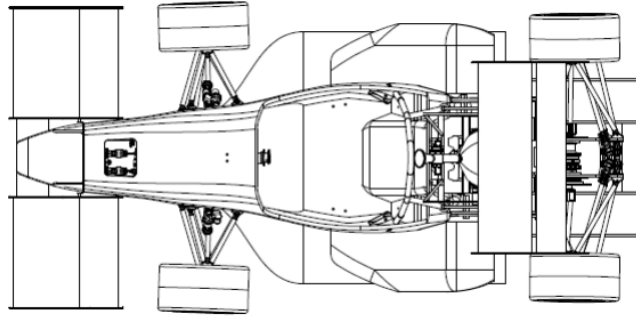


Ilustración 5 Vista superior Fuem 14

Batalla [mm]	1680
Vía delantera [mm]	1225
Vía trasera [mm]	1100
Peso [kg]	210 (Con piloto de 59 kg)
Suspensión delantera	Brazos doble A; Sistema de amortiguación con tirante
Suspensión trasera	Brazos doble A; Sistema de amortiguación con empujador
Chasis	Monocasco de fibra de carbono
Amortiguadores	Öhlins TTX25
Rigidez de muelles	350 lb/in
Llantas	Diam: 10'' – Fibra de carbono y Aluminio
Motor	Honda CBR 600 GP2
Aerodinámica	Alerones delanteros, traseros y fondo plano

Tabla 1 Características generales del Fuem 14

2.4.1 SUSPENSION DELANTERA

La suspensión delantera es un sistema doble A asimétrico, accionada por un tirante (1), con amortiguadores y muelles posicionados verticalmente, como podemos ver en la ilustración de abajo. La razón de elegir un sistema tirante sobre un sistema empujador (1), se relaciona principalmente con la geometría de suspensión que queremos. El Fuem 14 tiene una suspensión delantera tirante porque permite bajar el amortiguador, lo que permite reducir la resistencia aerodinámica del coche y bajar el centro de gravedad del coche.

Debido a la geometría de la suspensión del Fuem 14, no lleva barras anti-balanceo. (1)



Ilustración 6 Suspensión delantera Fuem 14

Amortiguadores y muelles

El Fuem 14 lleva adelante y atrás los mismos amortiguadores y muelles. Son los “Öhlins TTX25”, tienen una rigidez de muelle de 350 lb/in, las especificaciones técnicas son: (2)

Longitud [mm]	200 (centro a centro de cojinetes esféricos, completamente extendido)
Carrera [mm]	57
Peso [g]	394 (sin muelle)

Tabla 2 Especificaciones técnicas amortiguadores



Ilustración 7 Öhlins TTX25

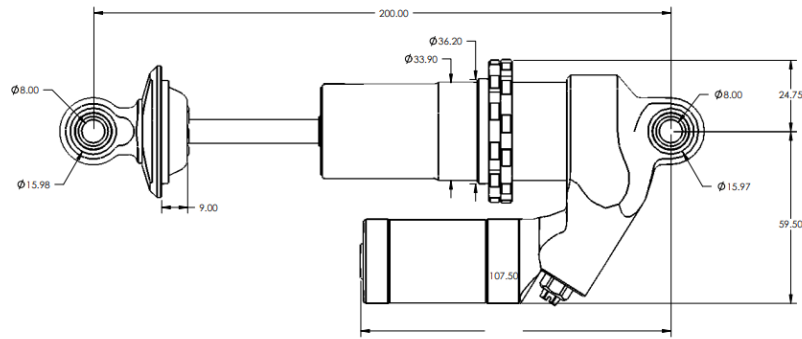


Ilustración 8 Öhlins TTX25 Medidas 1

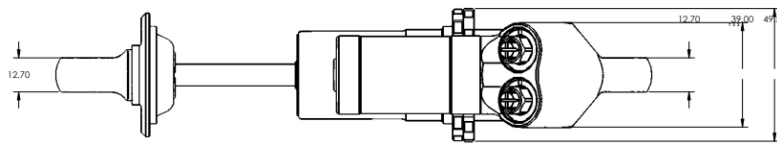


Ilustración 9 Öhlins TTX25 Medidas 2

Brazos de suspensión

Los Brazos de suspensión del Fuem 14, están hechos de tubos de CFRP (Polímero Reforzado con Fibra de Carbono) con inserciones de aluminio 7075. Unen las manguetas al chasis y lo transfieren las cargas. Los brazos de suspensión restringen tres grados de libertad permitiendo la rotación gracias a las juntas esféricas. En el Fuem 14, los brazos tienen forma de A, como podemos ver en las ilustraciones de abajo. La unión brazo-mangueta es el vértice del triángulo que forma esta unión, lo que es importante para que las barras solo sufran tracción y compresión y no flexión.

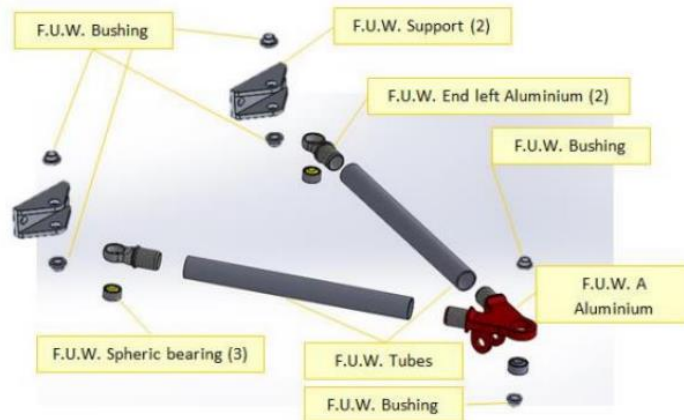


Ilustración 10 Brazo Superior Delantero Y Sus Soportes

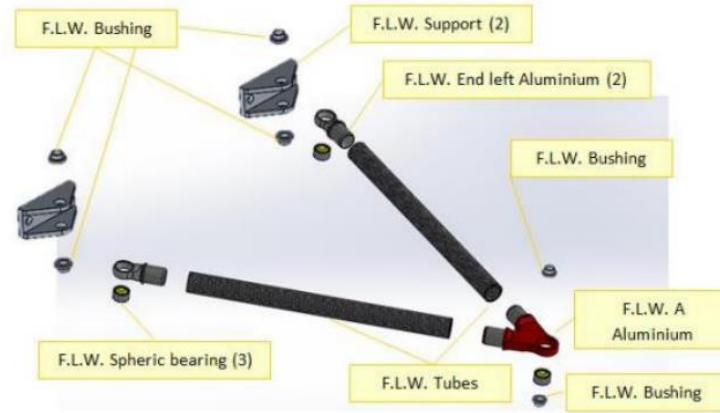


Ilustración 11 Brazo Inferior Delantero Y Sus Soportes

Mangueta y buje

Las manguetas y los bujes del F.U. 14 tienen un diseño rígido y liviano utilizando aluminio 7075. El conjunto mangueta-buje une los brazos de suspensión a la llanta. La mangueta es la parte estática y el buje es la parte giratoria. Los discos de freno están unidos al buje. Se ajusta el ángulo de caída (6) del coche mediante calzos de aluminio de 1 mm.

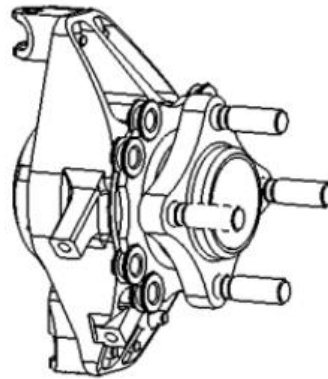


Ilustración 12 Mangueta Y Buje Delantero

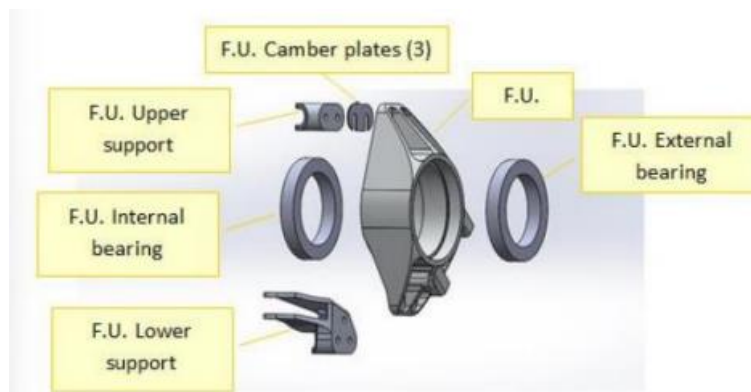


Ilustración 13 Vista Explotada De La Mangueta

Tirante y balancín

La barra tirante une la mangueta al balancín que a su vez se une con el amortiguador y el muelle. Este sistema funciona de tal manera como cuando se mueve la rueda por arriba, la barra tira del balancín para rotarlo y este movimiento comprime el amortiguador y el muelle. Como podemos ver en las ilustraciones de abajo.



Ilustración 14 Sistema Tirante y Balancín delantero

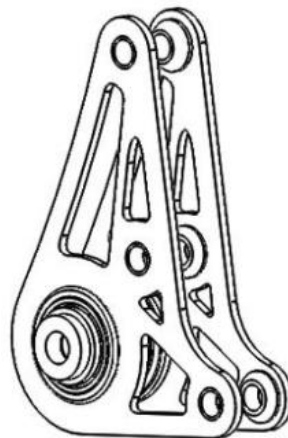


Ilustración 15 Balancín Delantero

(1)

Dirección

El sistema de dirección del F14 está compuesto por:

- El volante
- La columna de dirección
- La cremallera de dirección
- Los tie rods



Ilustración 16 Sistema De dirección

Podemos cambiar el ángulo de convergencia (5) de las ruedas delanteras, ajustando la longitud de los tie rods.

2.4.2 SUSPENSION TRASERA

La suspensión trasera es un sistema doble A asimétrico, accionada por un empujador (1), con amortiguadores y muelles posicionados verticalmente, como podemos ver en la ilustración de abajo. La razón de elegir un sistema empujador sobre un sistema tirante (1), se relaciona principalmente con la geometría de suspensión que queremos. El Fuem 14 tiene una suspensión trasera empujador para tener un diseño más compacto, lo que nos permite ahorrar peso y bajar el centro de gravedad del coche.

Debido a la geometría de la suspensión del Fuem 14, no lleva barras anti-balanceo. (1)



Ilustración 17 Suspensión Trasera

Brazos de suspensión

Los Brazos de suspensión del Fuem 14, están hechos de tubos de CFRP (Polímero Reforzado con Fibra de Carbono) con inserciones de aluminio 7075. Unen las manguetas al chasis y lo transfieren las cargas. Los brazos de suspensión restringen tres grados de libertad permitiendo la rotación gracias a las juntas esféricas. En el Fuem 14, los brazos tienen forma de A, como podemos ver en las ilustraciones de abajo.

La unión brazo-mangueta es el vértice del triángulo que forma esta unión, lo que es importante para que las barras solo sufran tracción y compresión y no flexión.

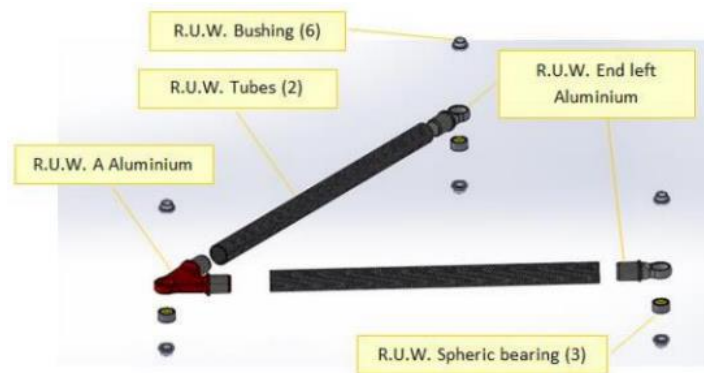


Ilustración 18 Brazo Superior Trasero Y Sus Soportes

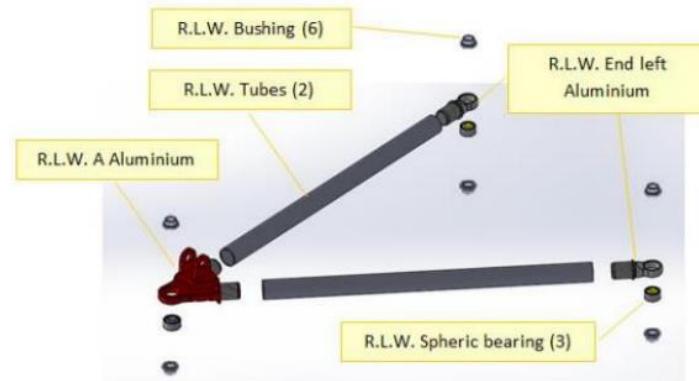


Ilustración 19 Brazo Inferior Trasero Y Sus Soportes

Mangueta y buje

Las manguetas y los bujes del Fiem 14 tienen un diseño rígido y liviano utilizando aluminio 7075. El conjunto mangueta-buje une los brazos de suspensión a la llanta. La mangueta es la parte estática y el buje es la parte giratoria. Los discos de freno están unidos al buje. Se ajusta el ángulo de caída (6) del coche mediante calzos de aluminio de 1 mm..

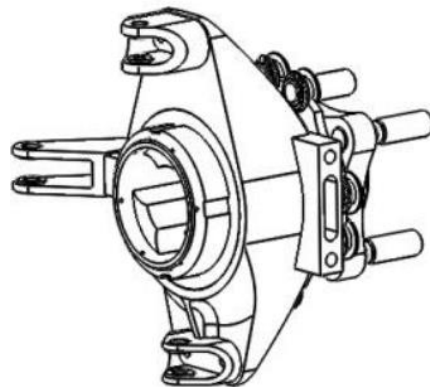


Ilustración 20 Mangueta Y Buje Trasero

Podemos ajustar el ángulo de convergencia (5) de las ruedas traseras, ajustando la longitud de los tie rods que van conectados a la mangueta.

Empujador y balancín

La barra empujadora une la mangueta al balancín que a su vez se une con el amortiguador y el muelle. Este sistema funciona de tal manera como cuando se mueve la rueda por arriba, la barra empuja sobre balancín para rotarlo y este movimiento comprime el amortiguador y el muelle. Como podemos ver en las ilustraciones de abajo.



Ilustración 21 Sistema Tirante y Balancín Trasero

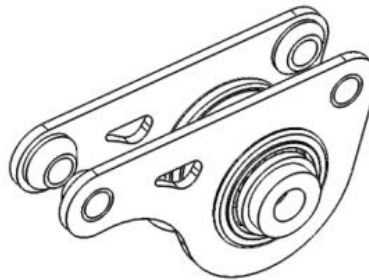


Ilustración 22 Balancín trasero

(1)

2.5 PARAMETRIZACION CON MATRICES ORTOGONALES

Hemos utilizado el método de Taguchi, es decir hemos utilizado las matrices ortogonales para detectar los casos críticos y reducir lo más que podamos el número de ensayos que hay que realizar. Esta matriz nos permite eliminar los casos de menor importancia y nos permite examinar simultáneamente muchos factores, sin utilizar muchos recursos, sin que se repitan casos similares.

Nº	1	2	3	4	5
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	2	1	1	2	2
4	2	2	2	1	1
5	3	1	2	1	2
6	3	2	1	2	1
7	4	1	2	2	1
8	4	2	1	1	2

Ilustración 23 Matriz Ortogonal tipo L8(b)

En nuestro caso, hemos utilizado la matriz de tipo L8(b), como podemos ver en la ilustración de arriba, la cual nos permite elegir cuatro niveles (o cuatro valores) de un parámetro, y dos niveles (o valores) del resto de parámetros. En la primera fila de la matriz, a la derecha de “Nº”, son los parámetros que vamos a comparar, que en nuestro caso son cinco, y en la primera columna, debajo de “Nº”, son las simulaciones que vamos a poder hacer. En nuestro caso, esta matriz nos permite hacer ocho simulaciones.

En la segunda columna de la matriz, debajo del primer parámetro, van los diferentes niveles (o factores) que se han elegido, podemos ver que van de uno a cuatro, según la configuración de la simulación. En las otras columnas, debajo de los otros parámetros, van también los niveles que se han elegido, podemos ver que van alternando entre uno y dos. En nuestro caso, los parámetros representan los elementos que podemos cambiar en el Fuem 14, es decir los ajustes que podemos hacer en pista.

Considerando un veinticinco por ciento de amortiguamiento y una distribución de peso fija de 53% sobre el eje trasero y 50% de cada lado, los parámetros que se pueden modificar son:

- **Angulo de convergencia de los neumáticos delanteros y traseros:** Conocido en inglés como “Toe In / Toe Out / Toe Zero”. Es el ángulo que tiene cada rueda con respecto al eje longitudinal (Eje X) del vehículo. La convergencia (Toe In) es cuando la parte más adelantada de las ruedas apuntan hacia dentro comparado con el eje longitudinal del vehículo. La divergencia o convergencia negativa (Toe Out) es cuando la parte más adelantada de las ruedas apuntan hacia fuera, comparado con el eje longitudinal del vehículo. Cuando las ruedas están paralelas con el eje longitudinal del vehículo, están en posición neutra (Toe Zero). Como podemos ver en la ilustración de abajo. ([5,10](#))

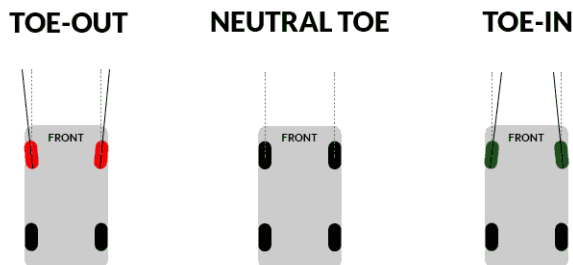


Ilustración 24 Ilustración de los diferentes ángulos de convergencia (8)

La convergencia positiva permite una mejor entrada en curva pero menor estabilidad en el interior de la curva y en recta. La convergencia negativa es lo contrario, permite una mejor estabilidad en recta y aumenta la adherencia en curvas, pero penaliza la estabilidad a la entrada de la curva. (5,10)

- **El ángulo de caída de los neumáticos delanteros y traseros:** Conocido en inglés como “Camber”. Es el ángulo de inclinación de las ruedas comparado con el eje vertical del vehículo (Eje Z). El camber neutro es cuando las ruedas están paralelas con el eje vertical del vehículo. El camber positivo es cuando las ruedas están inclinadas hacia fuera comparado con el eje vertical del vehículo, de tal manera que la parte inferior de la rueda está a dentro. El camber negativo es cuando las ruedas están inclinadas hacia dentro comparado con el eje vertical del vehículo, de tal manera que la parte inferior de la rueda está a fuera. Como podemos ver en la ilustración de abajo. (6)

What is Camber Angle?

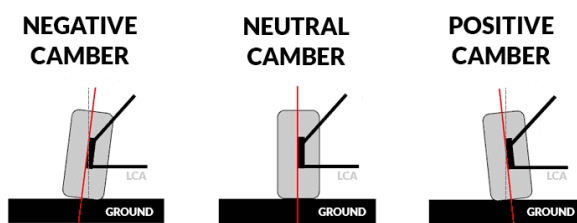


Ilustración 25 Ilustración de los diferentes ángulos de caída (8)

El camber neutro permite una mejor superficie de contacto con el suelo y ofrece buena tracción y frenada y un desgaste regular del neumático. El camber positivo ofrece una superficie de contacto más pequeña comparado con el camber neutro, lo que causa un desgaste regular en el exterior de la rueda; en curva, el ángulo positivo se acentúa y disminuye el agarre. El camber negativo, también ofrece una superficie de contacto más pequeña comparado con el camber neutro, Al contrario del camber positivo, cuando entramos en curva, se compensa el ángulo negativo y tenemos más agarre. Al tener una superficie de contacto más pequeña, reducimos la fricción con el suelo, lo que nos puede servir en aceleración. (6)

- **Las presiones de los neumáticos**

Parámetros	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4
Conv.Del [grados]	0	-1	-2	1
Conv.Tra [grados]	0	1		
Caída Del [grados]	0	-2		
Caída Tra [grados]	0	-2		
Pres. neum. [bar]	0.8	2		

Tabla 3 Factores y Niveles

Casos	Convergencia Delantera	Caída delantera	Caída Trasera	Presiones Neumáticos	Convergencia trasera
1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2
3	2	1	1	2	2
4	2	2	2	1	1
5	3	1	2	1	2
6	3	2	1	2	1
7	4	1	2	2	1
8	4	2	1	1	2

Tabla 4 Matriz Ortogonal L8(b) Con Parámetros

2.6 PROGRAMAS DE CALCULO

2.6.1 SOLIDWORKS

Tenemos el CAD del F1 entero en SolidWorks. Hemos tenido que sacar las coordenadas de los puntos de anclaje de la suspensión, creando nuevos puntos, en cada punto de anclaje de la suspensión, es decir crear un punto donde se fija el amortiguador al chasis, el amortiguador el balancín etc., con respecto a un nuevo sistema de coordenadas, para poder trasladarlos a ADAMS CAR, porque ADAMS CAR utiliza un sistema de referencia diferente a SolidWorks, como podemos ver en la ilustración de abajo.

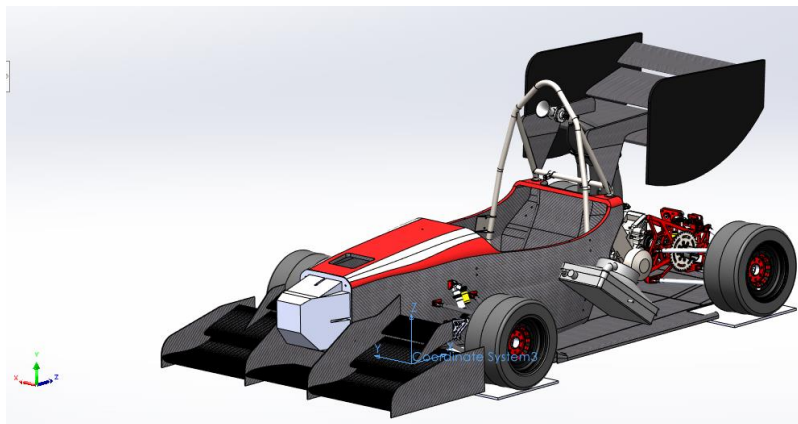


Ilustración 26 Sistemas de Coordenadas en Solidworks

2.6.2 ADAMS CAR

ADAMS Car es un programa que permite diseñar y simular vehículos. Es un programa que se utiliza mucho en el mundo de la automoción. Con este programa, podemos construir y probar vehículos en diferentes condiciones, realizando pruebas que se hacen en un laboratorio de pruebas o en una pista de pruebas. Este programa es muy útil porque nos permite validar conceptos y realizar ensayos en una fracción de tiempo, sin deber tener el prototipo construido en la vida real. Tiene una parte dedicada a la competición de la FSAE, la Formula Student que tiene cargado diferentes plantillas de suspensiones, que podemos adaptar al coche que tenemos o queremos diseñar, como podemos ver en la ilustración de abajo.

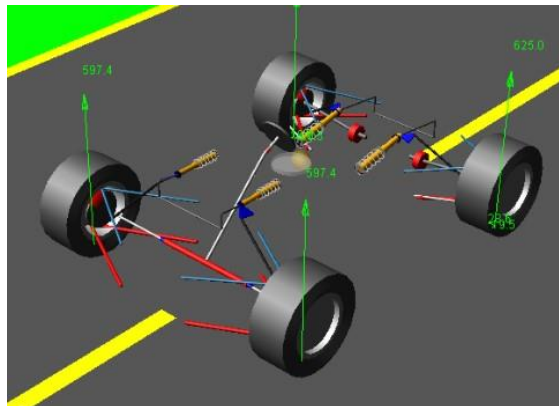


Ilustración 27 Ejemplo de plantilla de vehículo en ADAMS CAR

Cogemos la plantilla de suspensión que viene en ADAMS CAR y con las coordenadas que hemos obtenido de SolidWorks, modificamos los puntos de anclaje de la suspensión, conocidos como “hard points”, así obtenemos la geometría de suspensión que tiene el FueM 14. Como podemos ver en las ilustraciones de abajo del vehículo entero en ADAMS CAR y en la vida real.

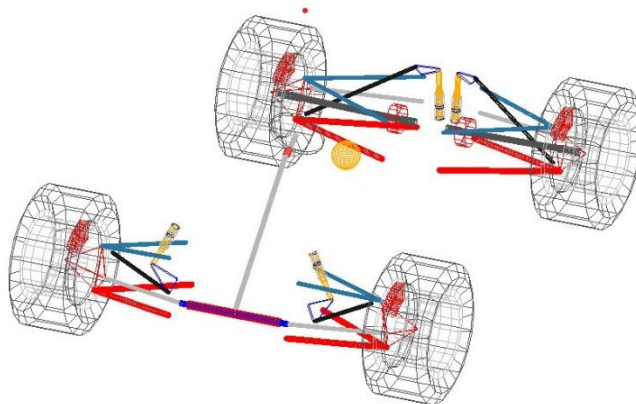


Ilustración 28 Geometría de suspensión del FueM 14 en ADAMS CAR 1



Ilustración 29 Suspensión delantera del Fuem 14 en ADAMS CAR



Ilustración 30 Suspensión delantera izquierda del Fuem 14

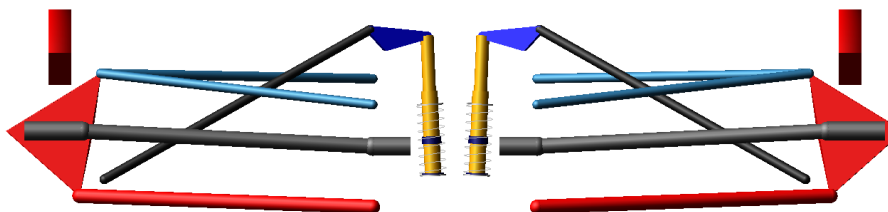


Ilustración 31 Suspensión trasera del Fuem 14 en ADAMS CAR



Ilustración 32 Suspensión trasera izquierda del Fuem 14

Podemos importar también, la geometría del chasis del vehículo, para que se parezca lo más posible a la realidad. Como podemos ver en la ilustración de abajo.

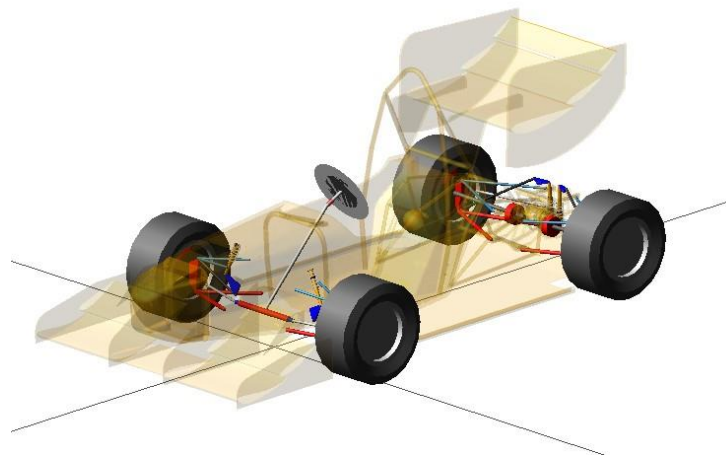


Ilustración 33 Fuem 14 en ADAMS CAR

Una vez que tenemos el vehículo como queremos, podemos empezar a hacer las simulaciones. En nuestro caso, vamos a hacer simulaciones de:

- Aceleración
- Curva constante (Para simular el [skidpad](#))
- Otros estudios, en los cuales vamos a hacer simulaciones de medio coche

2.6.3 ACELERACION

Hemos realizado unas simulaciones de aceleración para cada una de las ocho configuraciones previamente mencionadas. Cada simulación dura 5 segundos y con una aceleración longitudinal de 1 g. Para cada una de las simulaciones hemos sacado la aceleración longitudinal y la velocidad máxima alcanzada por el coche.

En los siguientes gráficos, podemos ver los resultados, mencionados antes, de los ocho casos:

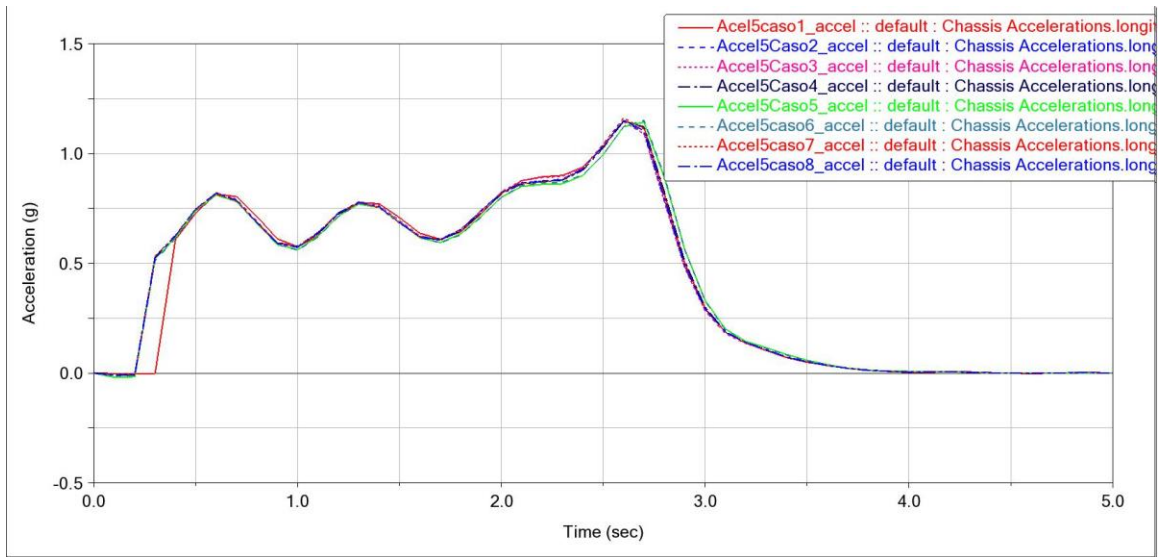


Ilustración 34 Prueba Aceleración: Aceleraciones Longitudinales de los 8 casos

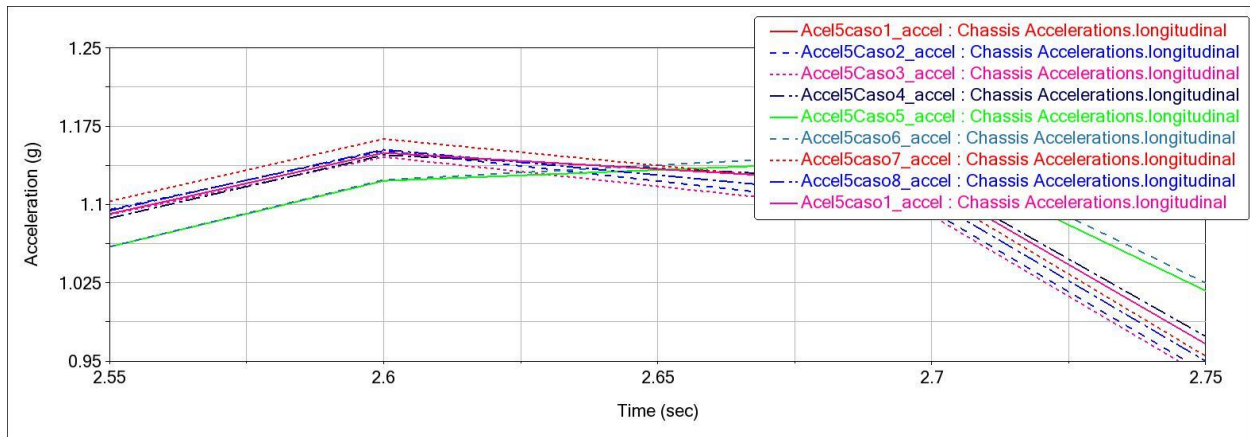


Ilustración 35 Prueba Aceleración: Aceleraciones Longitudinales de los 8 casos (2)

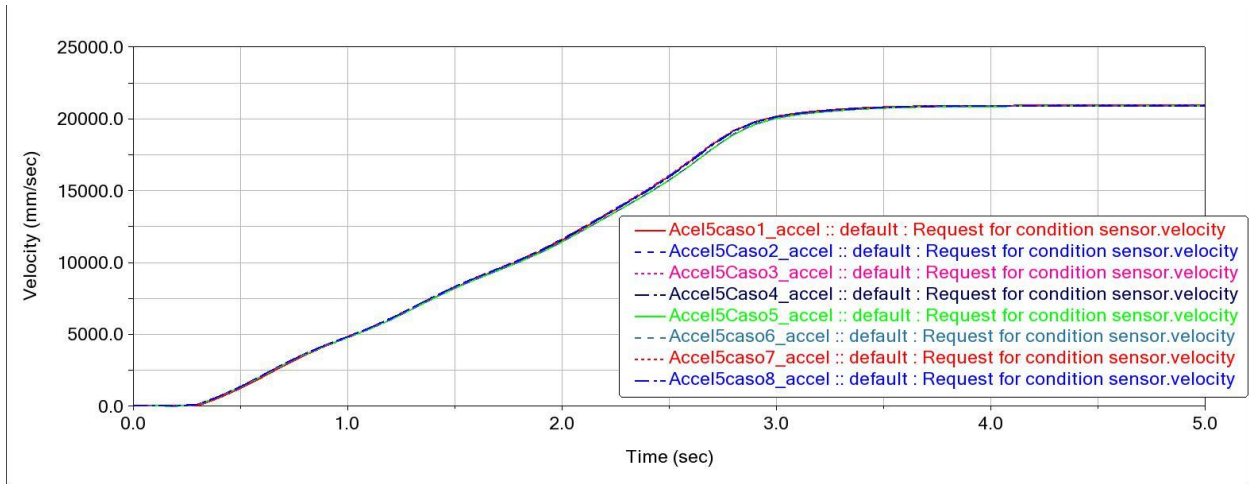


Ilustración 36 Prueba Aceleración: Velocidades de los 8 casos

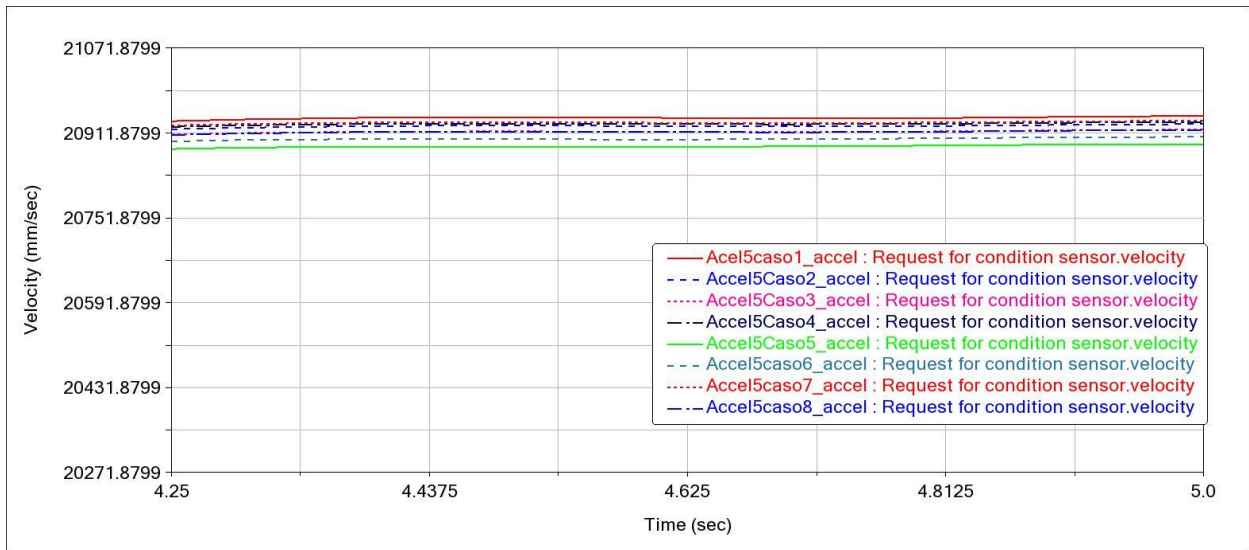


Ilustración 37 Prueba Aceleración: Velocidades de los 8 casos (2)

Caso 1:

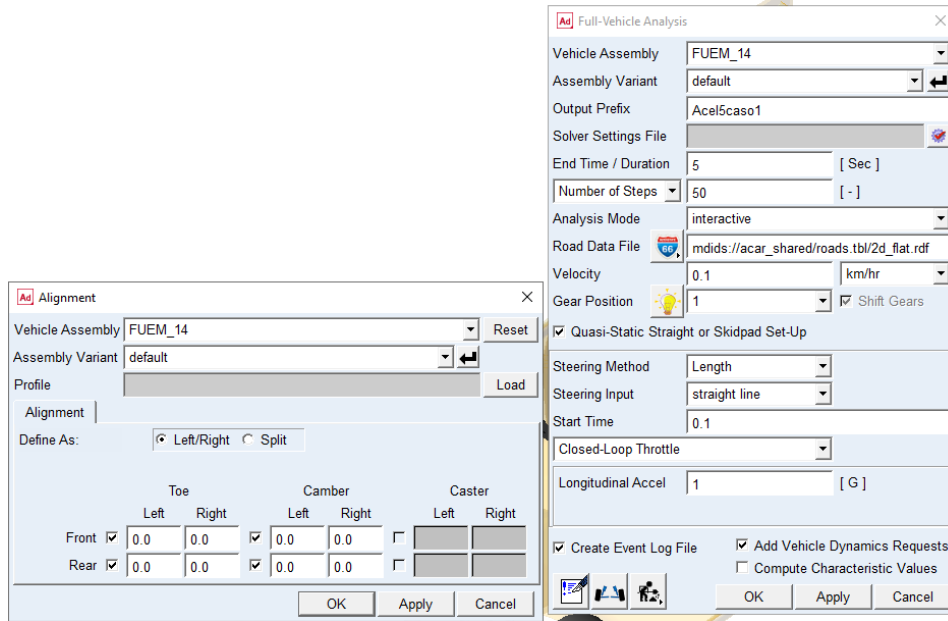


Ilustración 38 Parámetros ensayo aceleración Caso 1

Aceleración Configuración: Caso 1	
Velocidad Máxima [km/h]	75.4
Aceleración longitudinal máxima [g]	1.1496

Tabla 5 Tabla de resultados Caso 1

Caso 2:

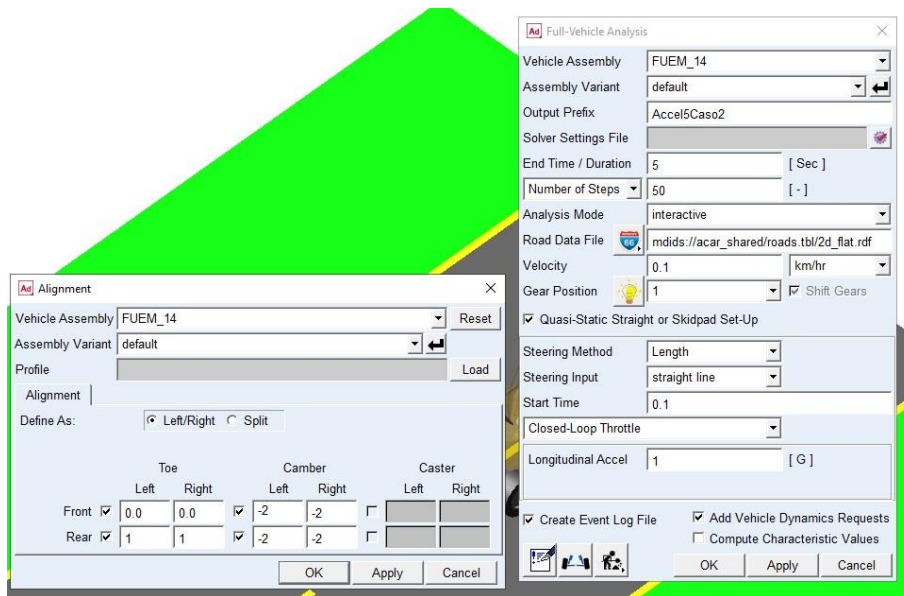


Ilustración 39 Parámetros ensayo aceleración Caso 2

Aceleración Configuración: Caso 2	
Velocidad Máxima [km/h]	75.34
Aceleración longitudinal máxima [g]	1.1515

Tabla 6 Tabla de resultados Caso 2

Caso 3:

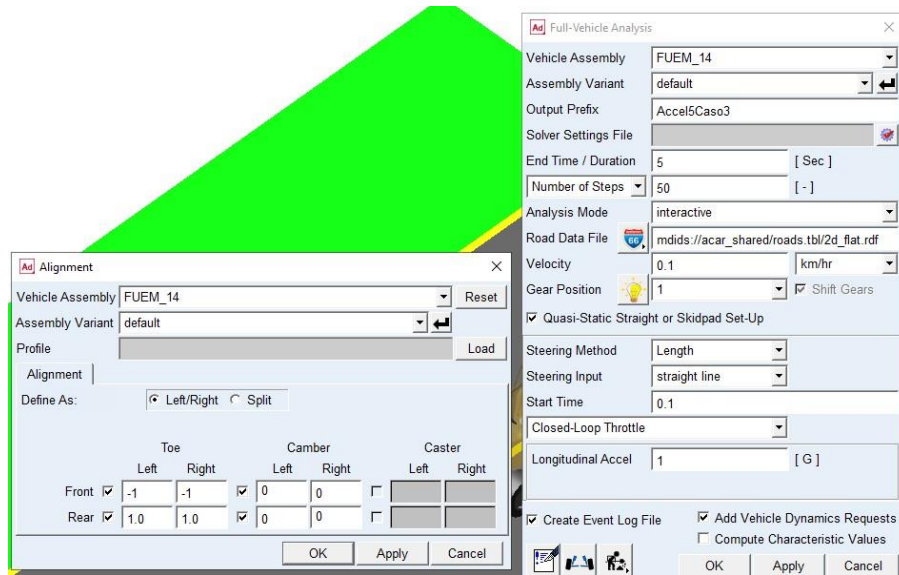


Ilustración 40 Parámetros ensayo aceleración Caso 3

Aceleración Configuración: Caso 3	
Velocidad Máxima [km/h]	75.31
Aceleración longitudinal máxima [g]	1.1456

Tabla 7 Tabla de resultados Caso 3

Caso 4:

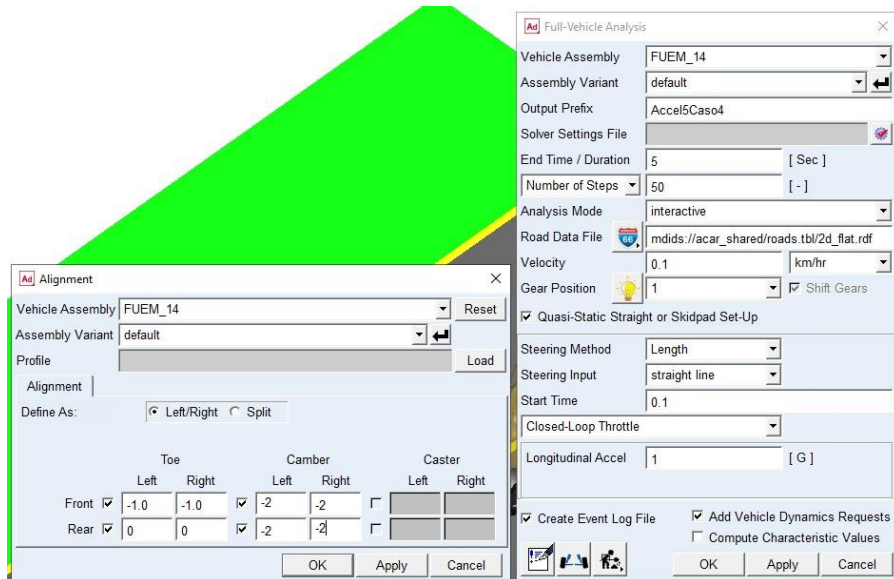


Ilustración 41 Parámetros ensayo aceleración Caso 4

Aceleración Configuración: Caso 4	
Velocidad Máxima [km/h]	75.36
Aceleración longitudinal máxima [g]	1.1475

Tabla 8 Tabla de resultados Caso 4

Caso 5:

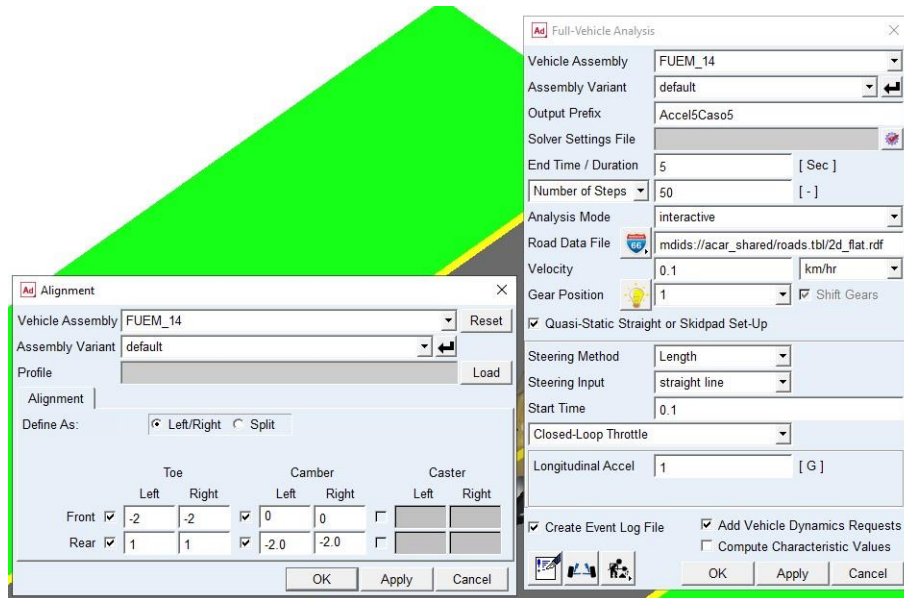


Ilustración 42 Parámetros ensayo aceleración Caso 5

Aceleración Configuración: Caso 5	
Velocidad Máxima [km/h]	75.21
Aceleración longitudinal máxima [g]	1.1436

Tabla 9 Tabla de resultados Caso 5

Caso 6:

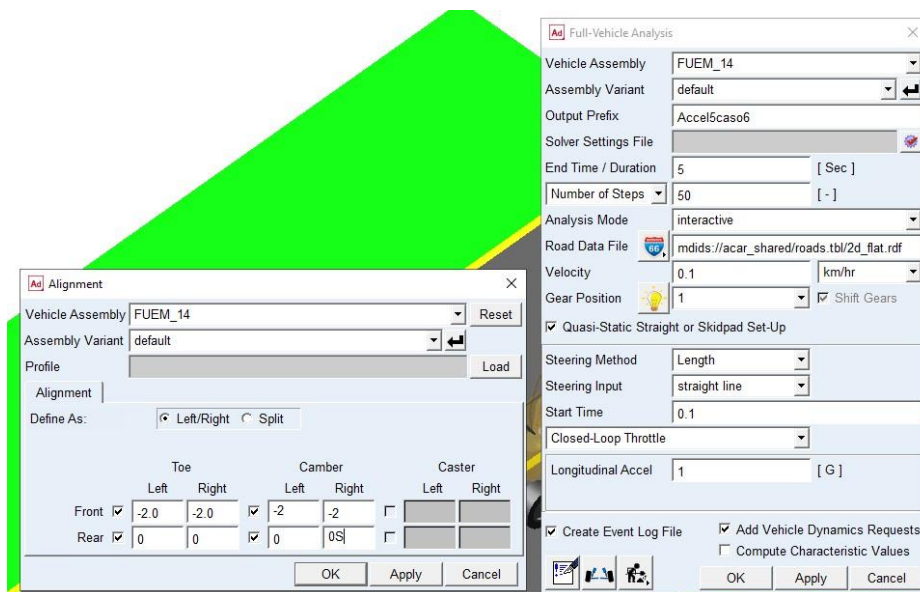


Ilustración 43 Parámetros ensayo aceleración Caso 6

Aceleración Configuración: Caso 6	
Velocidad Máxima [km/h]	75.26
Aceleración longitudinal máxima [g]	1.1518

Tabla 10 Tabla de resultados Caso 6

Caso 7:

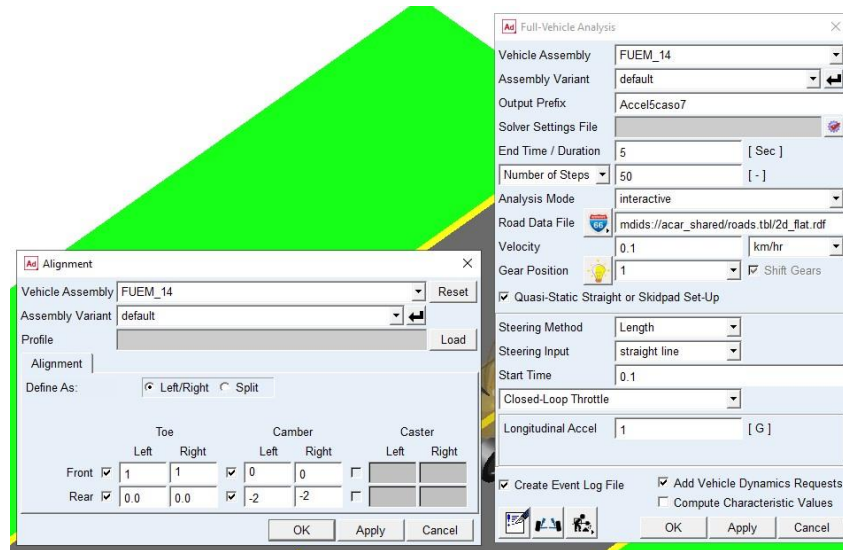


Ilustración 44 Parámetros ensayo aceleración Caso 7

Aceleración Configuración: Caso 7	
Aceleración longitudinal máxima [g]	75.37
Velocidad Máxima [km/h]	1.1629

Tabla 11 Tabla de resultados Caso 7

Caso 8:

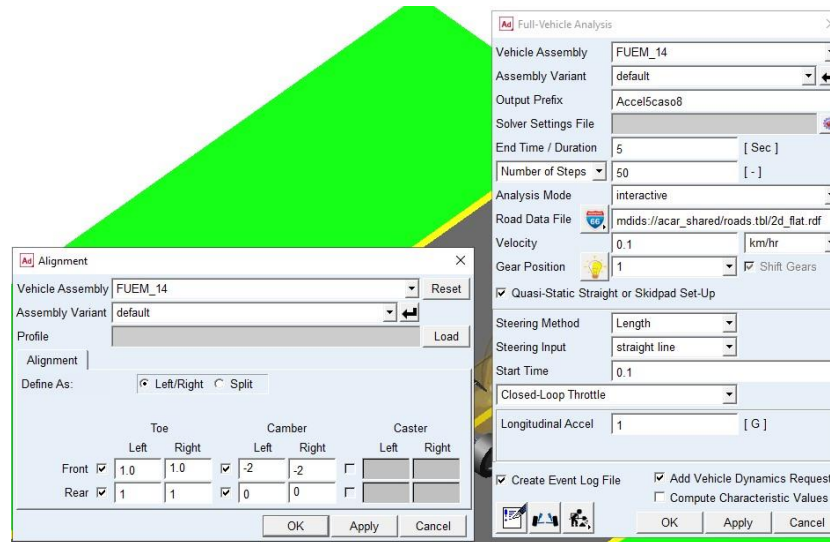


Ilustración 45 Parámetros ensayo aceleración Caso 8

Aceleración Configuración: Caso 8	
Velocidad Máxima [km/h]	75.30
Aceleración longitudinal máxima [g]	1.1526

Tabla 12 Tabla de resultados Caso 8

2.6.4 CURVA DE RADIO CONSTANTE

Hemos realizado unas simulaciones de curva de radio constante para cada una de las ocho configuraciones previamente mencionadas. La curva tiene un radio de ocho metros. Cada simulación dura 10 segundos, con una aceleración lateral inicial de 0.4 g y una aceleración final de 1.5 g. Para cada una de las simulaciones hemos sacado:

- La aceleración lateral
- La velocidad en curva
- El ángulo de deriva ([11](#))

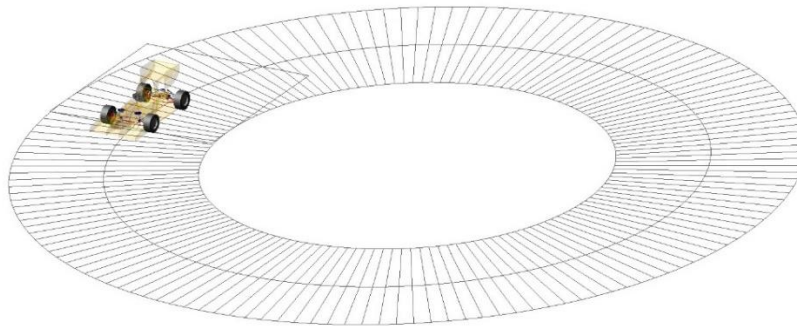


Ilustración 46 Ensayo de curva de radio constante

En los siguientes gráficos, podemos ver los resultados, mencionados antes, de los ocho casos:

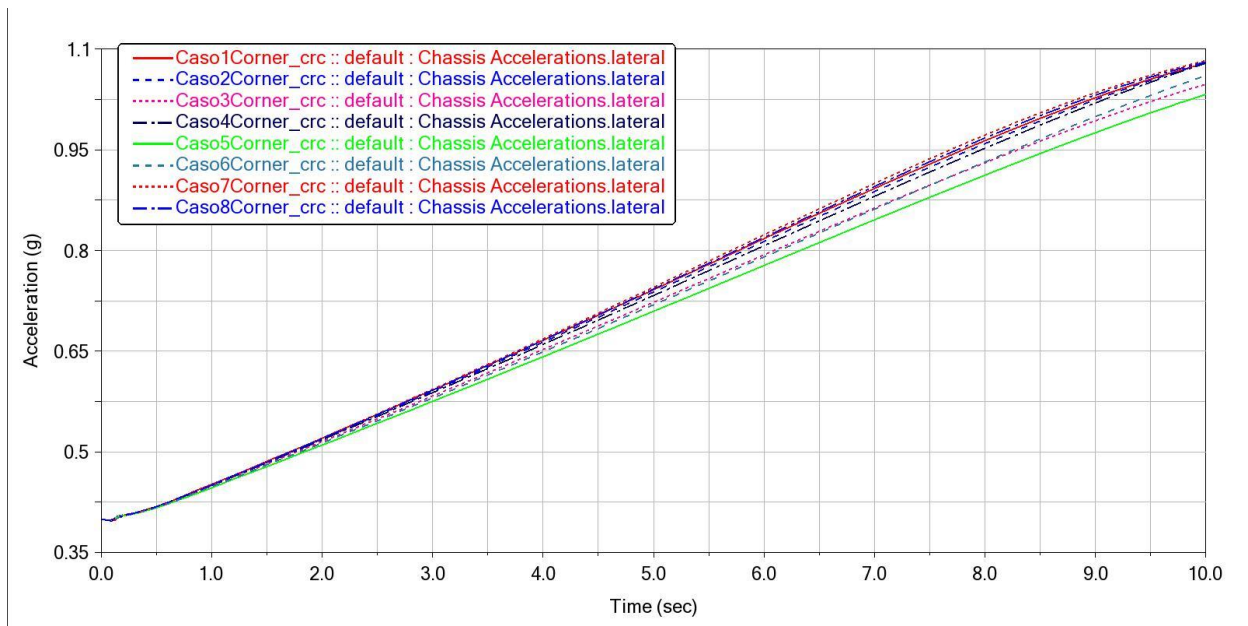


Ilustración 47 Prueba Curva radio constante: Aceleraciones Laterales de los 8 casos

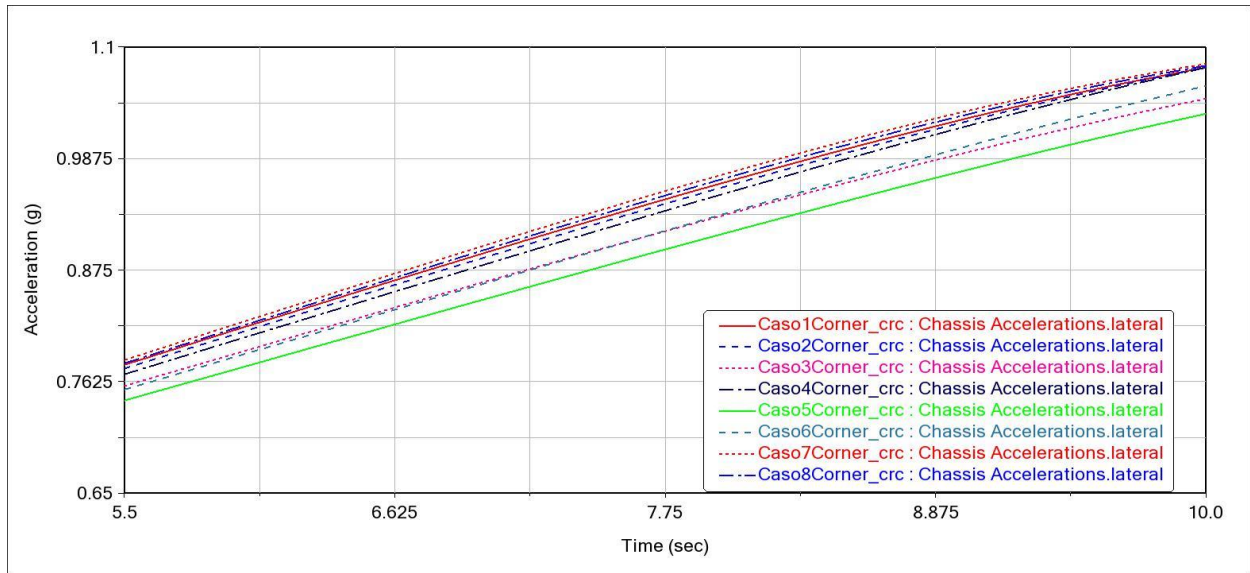


Ilustración 48 Prueba Curva radio constante: Aceleraciones Laterales de los 8 casos (2)

En los ocho casos, las velocidades son iguales, llegan a un máximo de 38.91 km/h. Hemos visto a lo largo de las simulaciones que el vehículo pierde adherencia y se sale de la trazada.

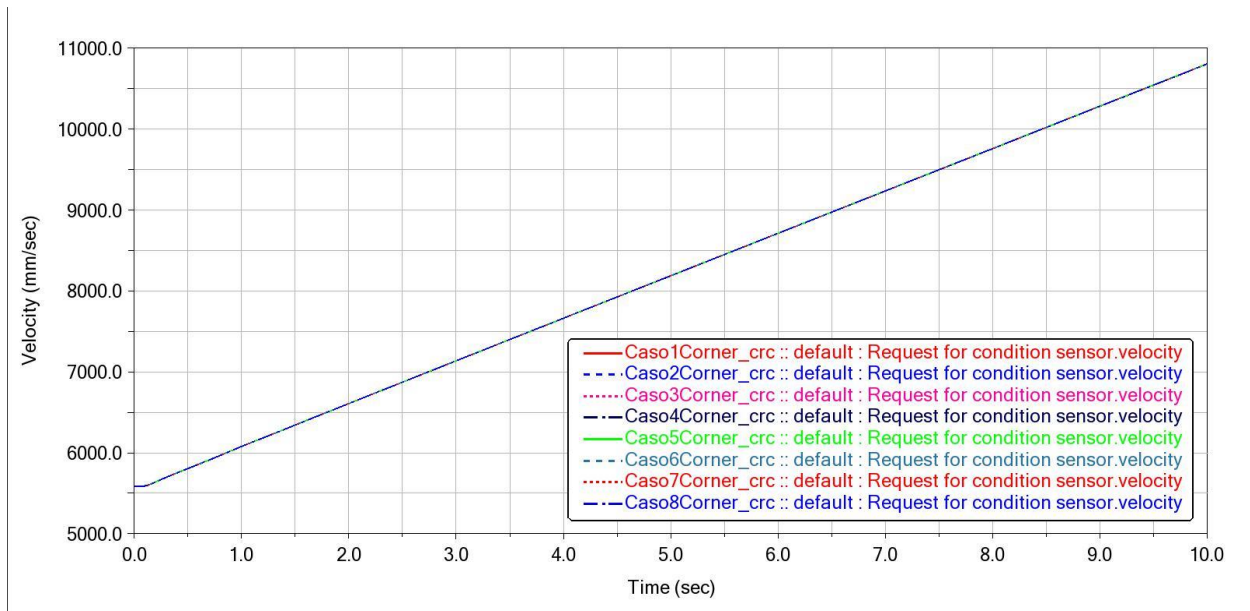


Ilustración 49 Prueba Curva radio constante: Velocidades de los 8 casos

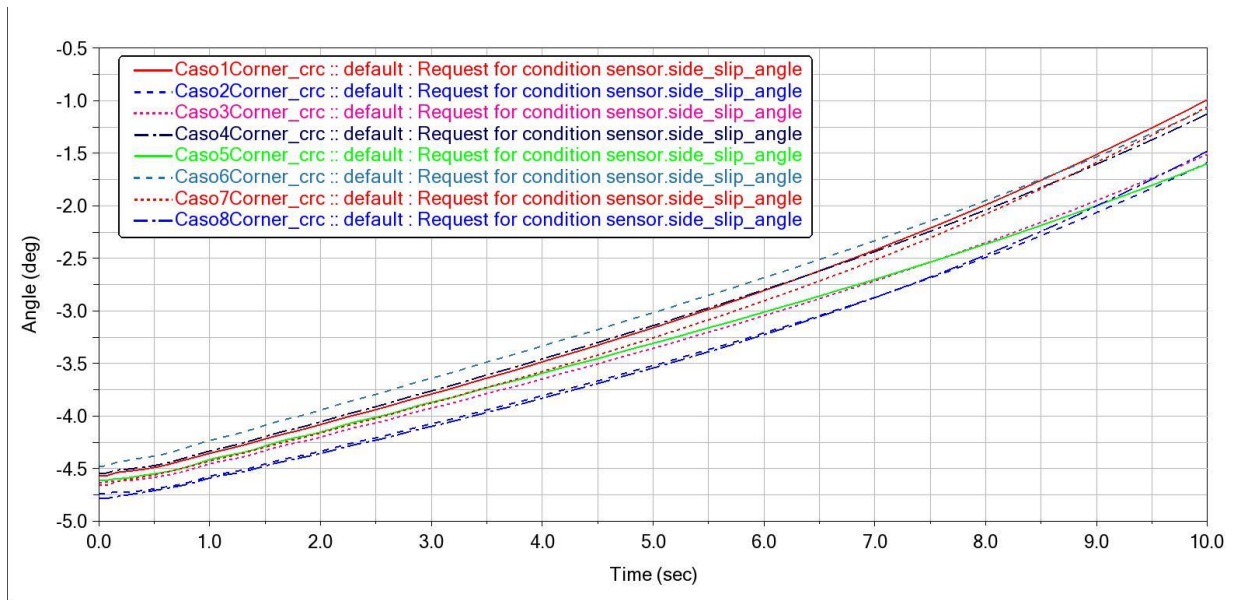


Ilustración 50 Prueba Curva radio constante: Ángulos de deriva de los 8 casos

Caso 1:

Full-Vehicle Analysis Parameters:

- Vehicle Assembly: FUEM_14
- Assembly Variant: default
- Output Prefix: Caso1Corner
- Solver Settings File: [Empty]
- End Time / Duration: 5 [Sec]
- Step Size: 2E-02 [Sec]
- Analysis Mode: interactive
- Road Data File: mdids://acar_shared/roads.tbl/2d_flat.rdf
- Velocity: 0.1 km/hr
- Gear Position: 1
- Shift Gears
- Quasi-Static Straight or Skidpad Set-Up
- Turn Radius: 8
- Length Units: m
- Turn Direction: left right
- Control: velocity lateral acceleration
- Duration of maneuver: 10
- Initial Acceleration: 0.4
- Final Acceleration: 1.5
- Acceleration Units: g
- Entry Distance: [Empty] model units
- Settle Time: [Empty]
- End Condition
- End Condition Type: Steering Wheel Angle
- End Condition Trigger: >> 180
- Create Event Log File
- Add Vehicle Dynamics Requests
- Compute Characteristic Values

Alignment Parameters:

	Toe		Camber		Caster	
	Left	Right	Left	Right	Left	Right
Front	<input checked="" type="checkbox"/> 0.0	<input checked="" type="checkbox"/> 0.0	<input checked="" type="checkbox"/> 0.0	<input checked="" type="checkbox"/> 0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rear	<input checked="" type="checkbox"/> 0.0	<input checked="" type="checkbox"/> 0.0	<input checked="" type="checkbox"/> 0.0	<input checked="" type="checkbox"/> 0.0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ilustración 51 Parámetros ensayo curva radio constante Caso 1

Curva de radio constante: Caso 1	
Aceleración lateral máxima [g]	1.0795
Angulo de deriva [°]	4.5712

Tabla 13 Tabla de resultados Caso 1

Caso 2:

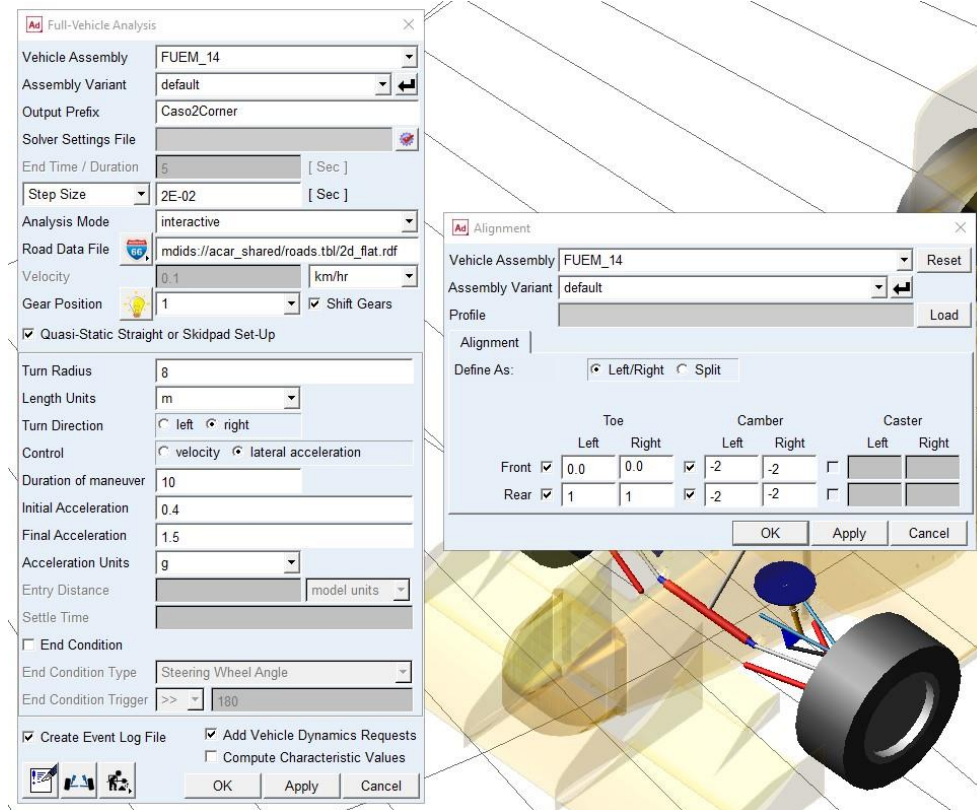


Ilustración 52 Parámetros ensayo curva radio constante Caso 2

Curva de radio constante: Caso 2	
Aceleración lateral máxima [g]	1.0795
Angulo de deriva [°]	4.7391

Tabla 14 Tabla de resultados Caso 2

Caso 3:

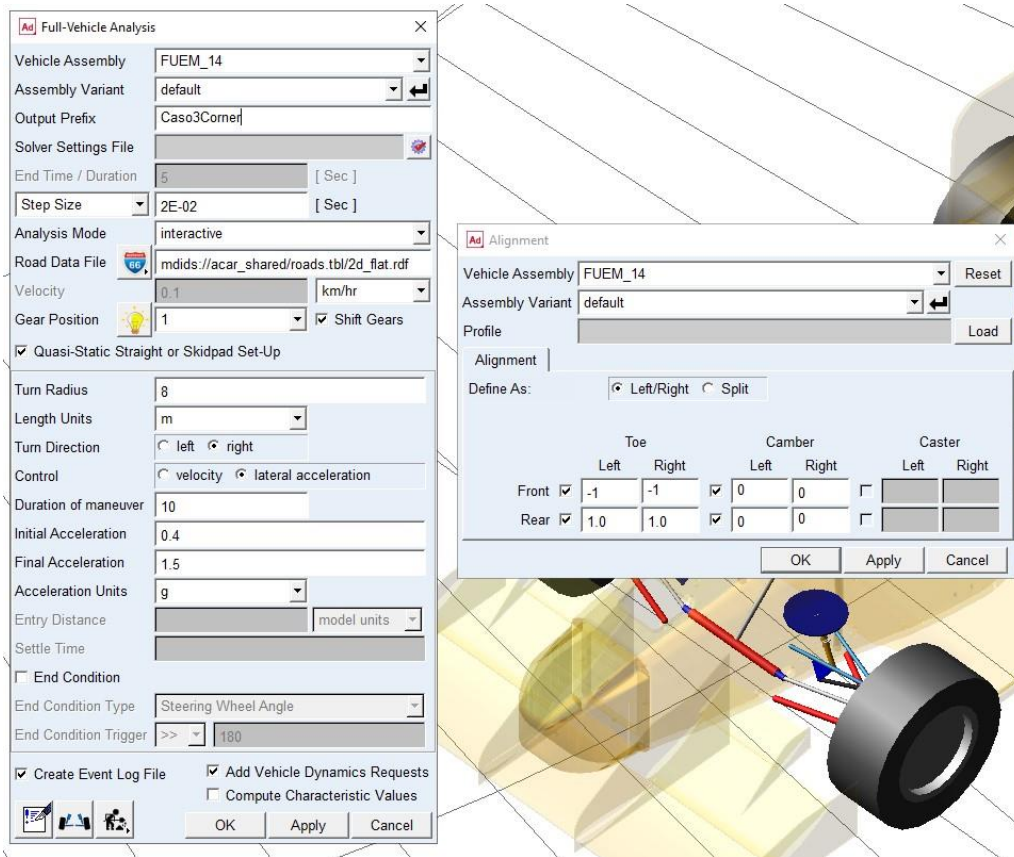


Ilustración 53 Parámetros ensayo curva radio constante Caso 3

Curva de radio constante: Caso 3	
Aceleración lateral máxima [g]	1.0479
Angulo de deriva [°]	4.6325

Tabla 15 Tabla de resultados Caso 3

Caso 4:

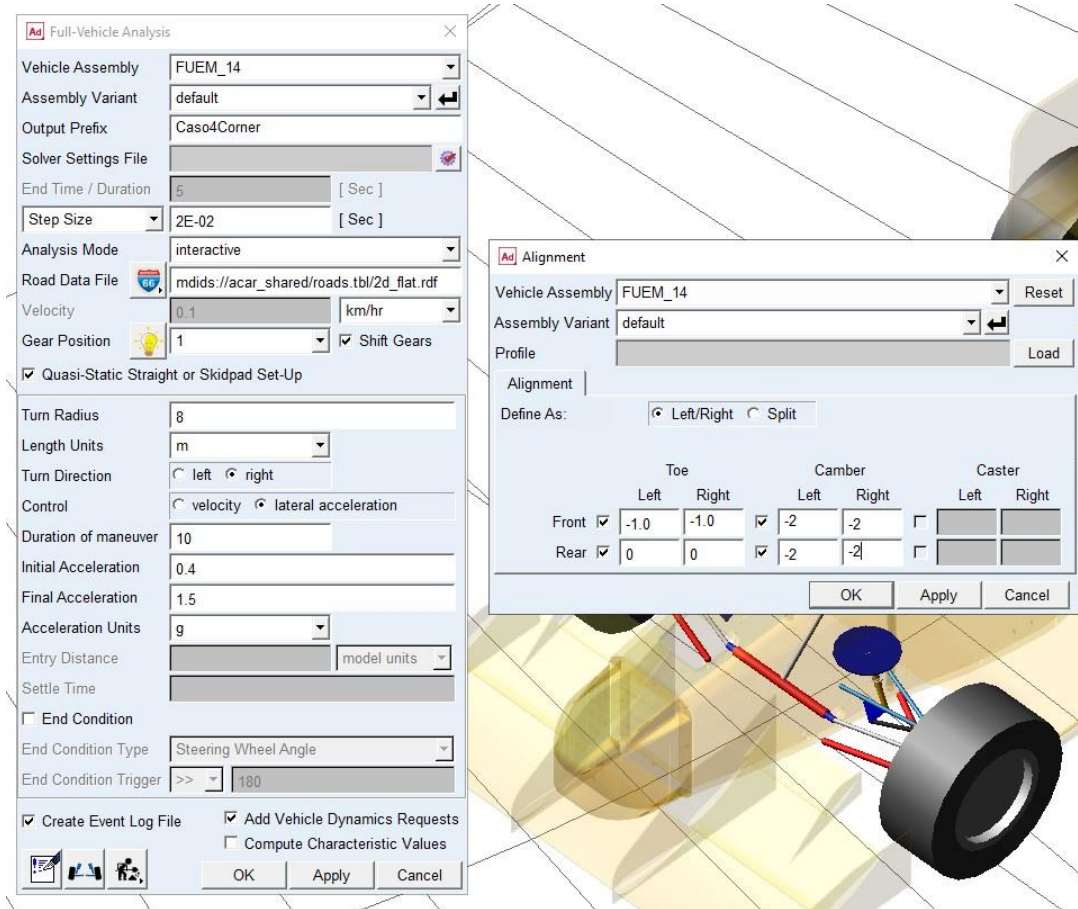


Ilustración 54 Parámetros ensayo curva radio constante Caso 4

Curva de radio constante: Caso 4		
Aceleración lateral máxima [g]		1.0794
Angulo de deriva [°]		4.5459

Tabla 16 Tabla de resultados Caso 4

Caso 5:

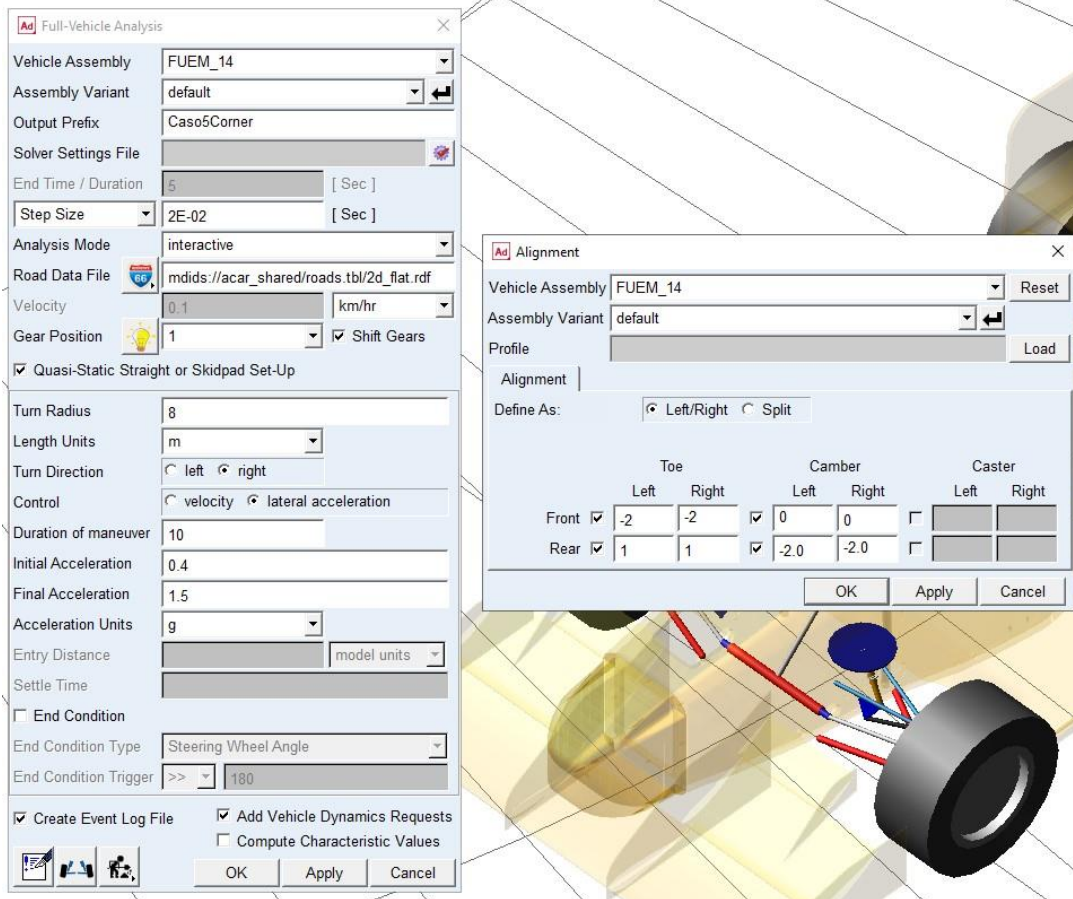


Ilustración 55 Parámetros ensayo curva radio constante Caso 5

Curva de radio constante: Caso 5	
Aceleración lateral máxima [g]	1.0327
Angulo de deriva [°]	4.6159

Tabla 17 Tabla de resultados Caso 5

Caso 6:

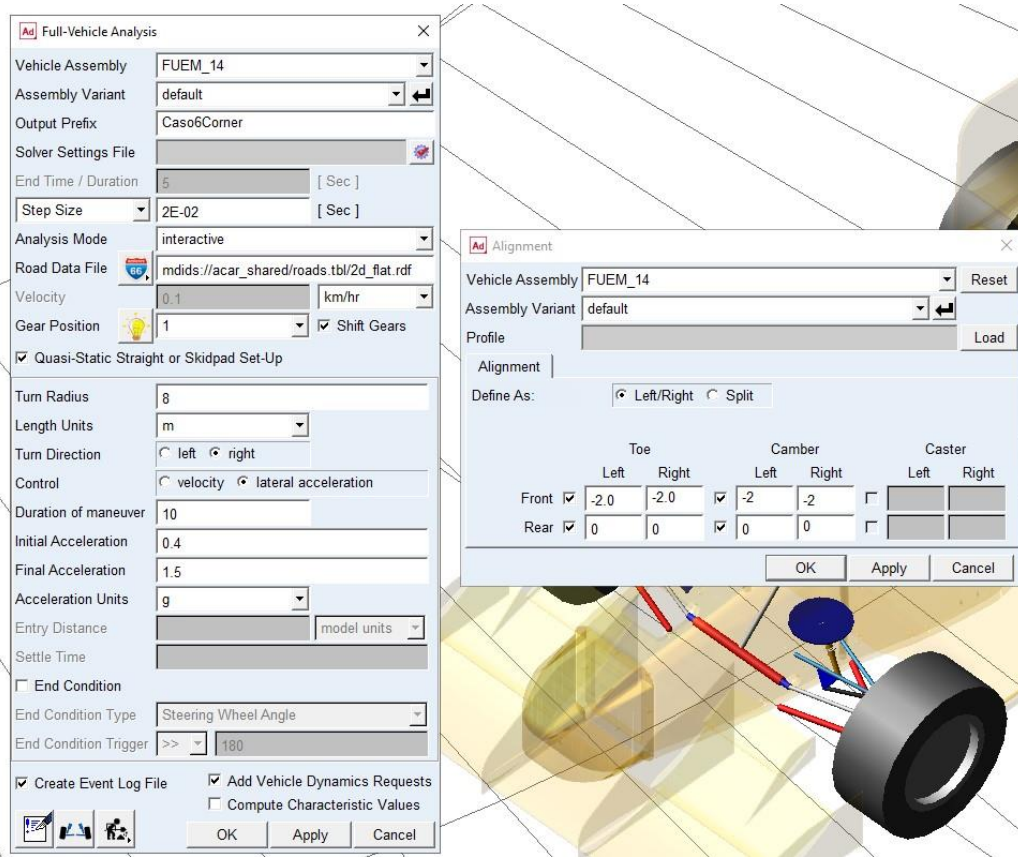


Ilustración 56 Parámetros ensayo curva radio constante Caso 6

Curva de radio constante: Caso 6	
Aceleración lateral máxima [g]	1.0609
Angulo de deriva [°]	4.4767

Tabla 18 Tabla de resultados Caso 6

Caso 7:

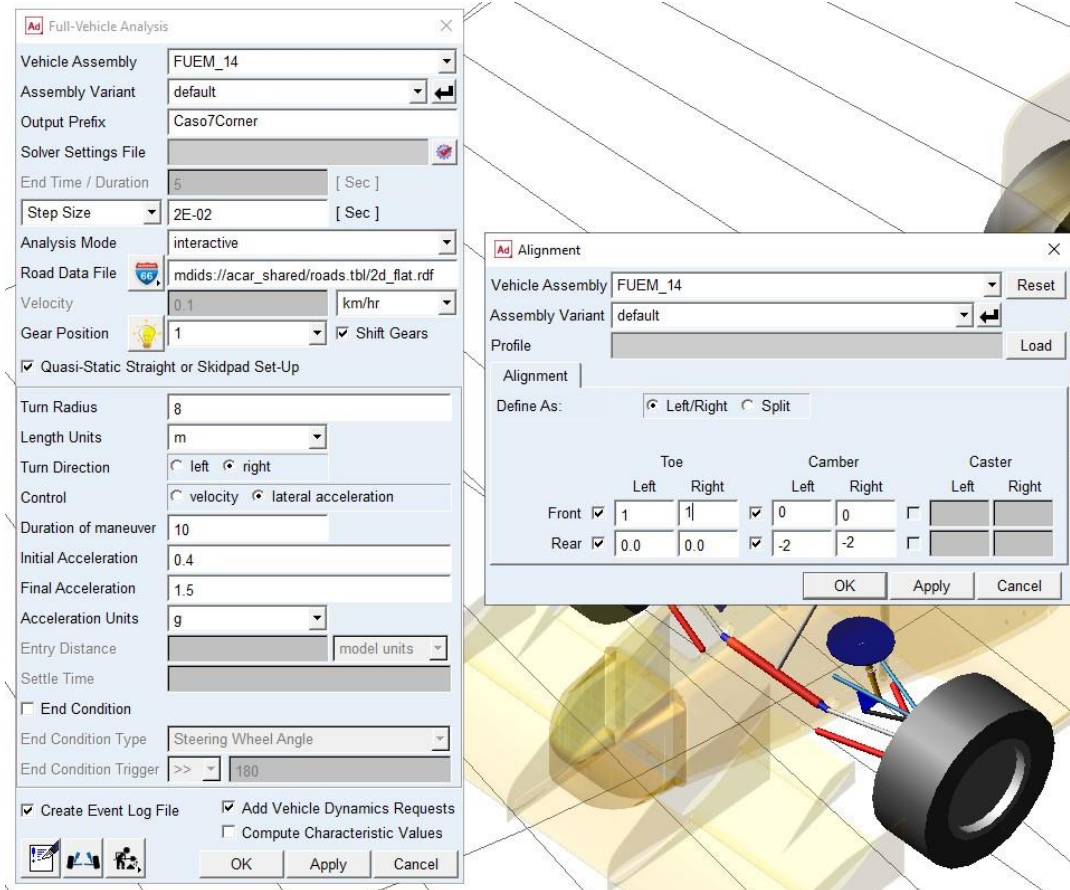


Ilustración 57 Parámetros ensayo curva radio constante Caso 7

Curva de radio constante: Caso 7	
Aceleración lateral máxima [g]	1.083
Angulo de deriva [°]	4.661

Tabla 19 Tabla de resultados Caso 7

Caso 8:

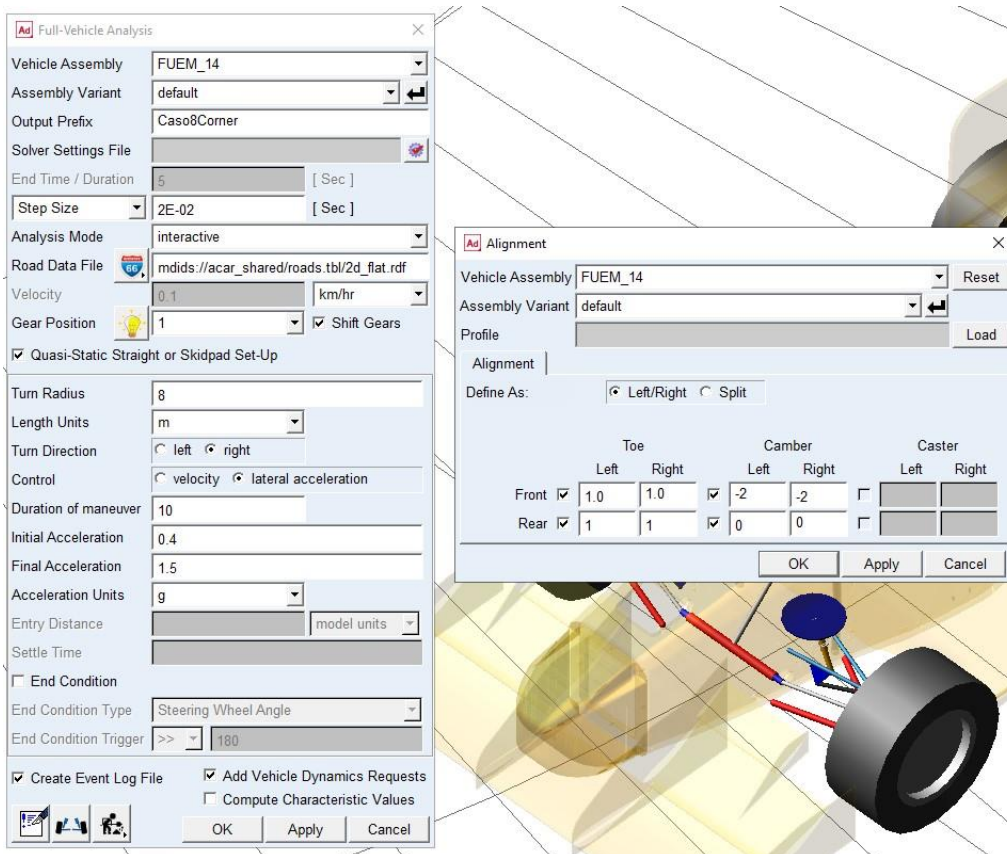


Ilustración 58 Parámetros ensayo curva radio constante Caso 8

Curva de radio constante: Caso 8	
Aceleración lateral máxima [g]	1.0812
Angulo de deriva [°]	4.7866

Tabla 20 Tabla de resultados Caso 8

2.6.5 OTROS ESTUDIOS

Hemos hecho también unos estudios de medio vehículo, donde hacemos ensayos solo sobre la suspensión delantera y después sobre la trasera. Para estos estudios tenemos que entender la compresión y el rebote. La compresión ayuda a que la suspensión absorba los baches a medida que la rueda se mueve hacia arriba y el rebote ayuda a que la suspensión vuelva a su posición correcta (9). Los amortiguadores del FueM 14 miden 200 mm cuando estén totalmente estirados, pero en posición de conducción, miden 185 mm. Cuando la suspensión se comprime, teniendo en cuenta los topes de suspensión que tienen 5 mm de espesor, los amortiguadores miden 155 mm. Es decir, tenemos que hacer la diferencia entre la posición de conducción y los amortiguadores comprimidos para sacar la compresión y hacer lo mismo entre la posición de conducción y los amortiguadores estirados para sacar el rebote.

Amortiguadores estirados	En posición de conducción	Amortiguadores comprimidos
200 [mm]	185 [mm]	155 [mm]

Tabla 21 Amortiguador en sus diferencias posiciones

Compresión [mm]	30
Rebote [mm]	-15

Tabla 22 Compresión y rebote

Los ensayos que hemos hecho son:

- **Parallel Wheel travel** (Desplazamiento paralelo de las ruedas): En este ensayo, podemos analizar el comportamiento de la suspensión cuando los dos amortiguadores están trabajando al mismo tiempo, que puede ser causado por un bache, una aceleración o una frenada en línea recta.

En nuestro caso, como competimos en circuitos bien asfaltados, este estudio nos sirve para simular el comportamiento de la suspensión en aceleraciones o en frenadas bruscas en línea recta, similares a las que podemos encontrar en los diferentes eventos de la competición.

- **Opposite Wheel travel** (Desplazamiento en sentido opuesto de las ruedas): En este ensayo, podemos analizar el comportamiento de la suspensión cuando los dos amortiguadores están trabajando en sentidos opuestos, uno en compresión y el otro en extensión. En este ensayo, podemos analizar la suspensión, cuando está sometida a cargas laterales que generan el efecto de rotación (roll ([13](#)); en inglés).

En nuestro caso, este estudio nos sirve para simular eventos como el [Skidpad](#), [Autocross](#) y [Endurance](#) cuando tomamos curvas.

A continuación, vamos a ver los diferentes estudios que hemos hecho.

En esta parte del estudio, en todas las gráficas se mostrarán los valores frente al desplazamiento del amortiguador izquierdo.

Suspensión Delantera:

- **Parallel Wheel travel:**

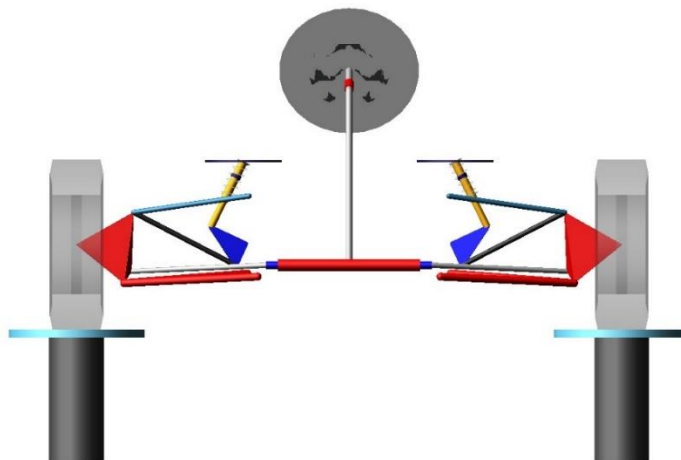


Ilustración 59 Desplazamiento paralelo de las ruedas delanteras

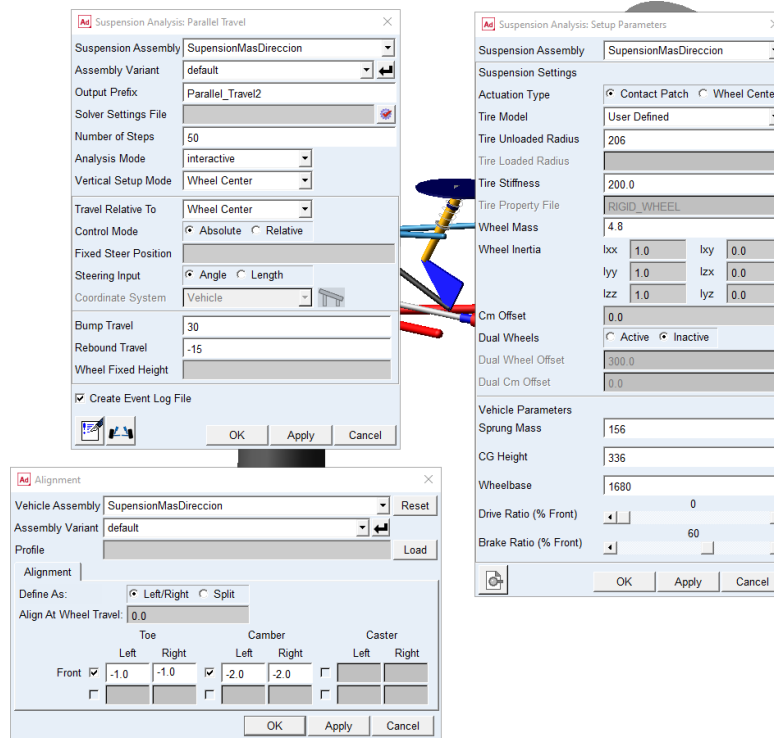


Ilustración 60 Parámetros desplazamiento paralelo de las ruedas delanteras

Caída:

Como podemos ver, cuando el vehículo acelera, es decir los amortiguadores están en fase de extensión, tenemos un ángulo de caída negativa de los neumáticos mayor y cuando el vehículo frena, es decir los amortiguadores están en fase de compresión, el ángulo de caída negativa se reduce. De esta manera, en fase de aceleración, tenemos una superficie de contacto menor con el suelo, es decir menos fricción, lo cual es ventajoso y en fase frenada, tenemos una superficie de contacto mayor con el suelo, lo que significa que podemos tener una mayor fuerza de frenada.

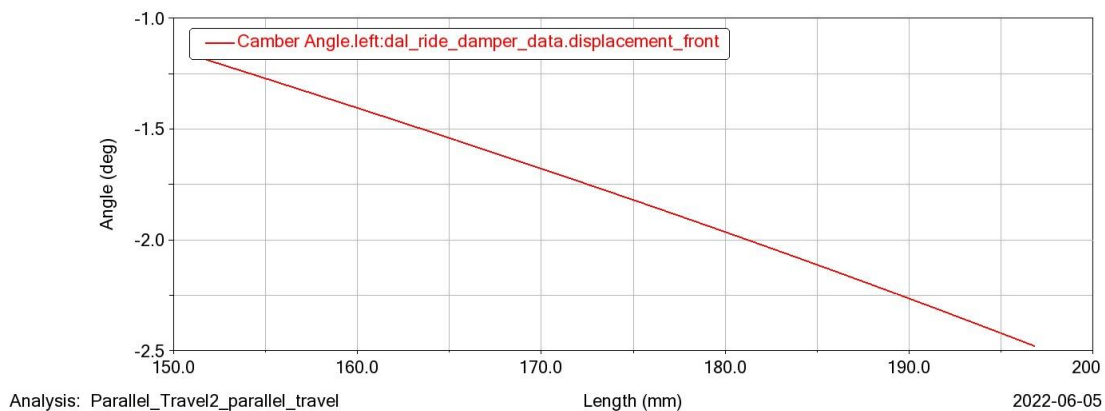


Ilustración 61 Parallel travel test, ángulo de caída delantero

Convergencia:

Como podemos ver, en fase de aceleración la convergencia se mueve hacia una posición más neutra y en fase de frenada, la convergencia aumenta.



Ilustración 62 Parallel travel test, ángulo de convergencia delantero

Vía:

La vía delantera se modifica siguiendo este gráfico.



Ilustración 63 Parallel travel test, vía delantera

Dive Braking:

Como podemos ver, cuando los amortiguadores se comprimen, el porcentaje de anti-dive (14) disminuye. Es decir, en fase de frenada el vehículo cabecea y la suspensión casi hace tope.



Ilustración 64 Parallel travel test, Dive braking delantero

Posición del centro de balanceo:

En este gráfico, podemos ver como se desplaza lateralmente el centro de balanceo en fases de aceleración y frenada.

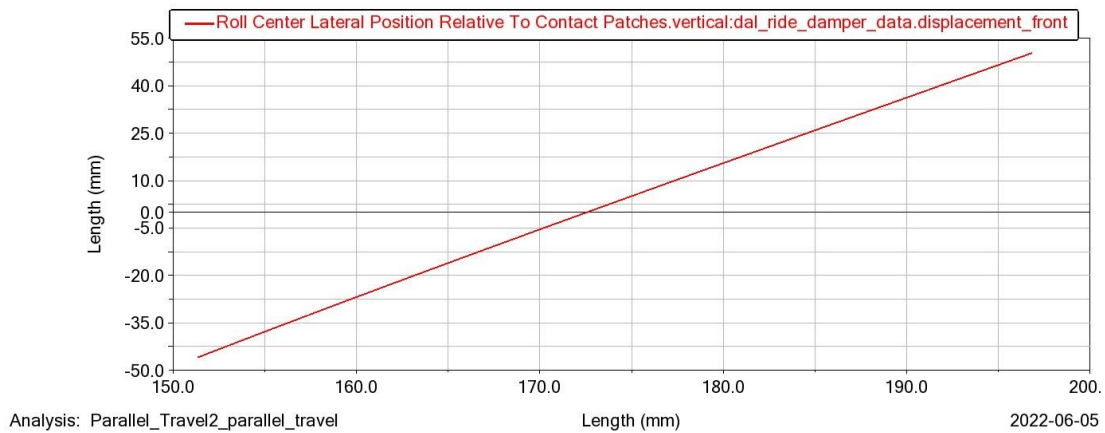


Ilustración 65 Parallel travel test, posición del centro de balanceo delantero

- **Opposite Wheel travel:**

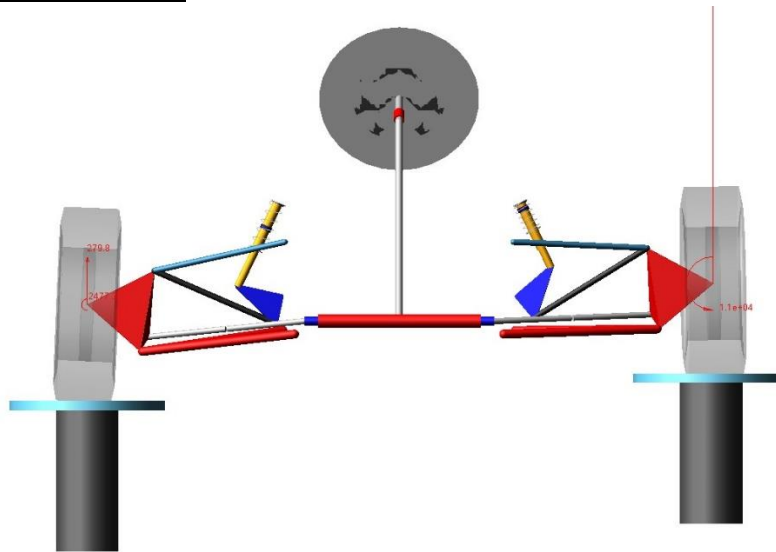


Ilustración 66 Desplazamiento en sentido opuesto de las ruedas delanteras

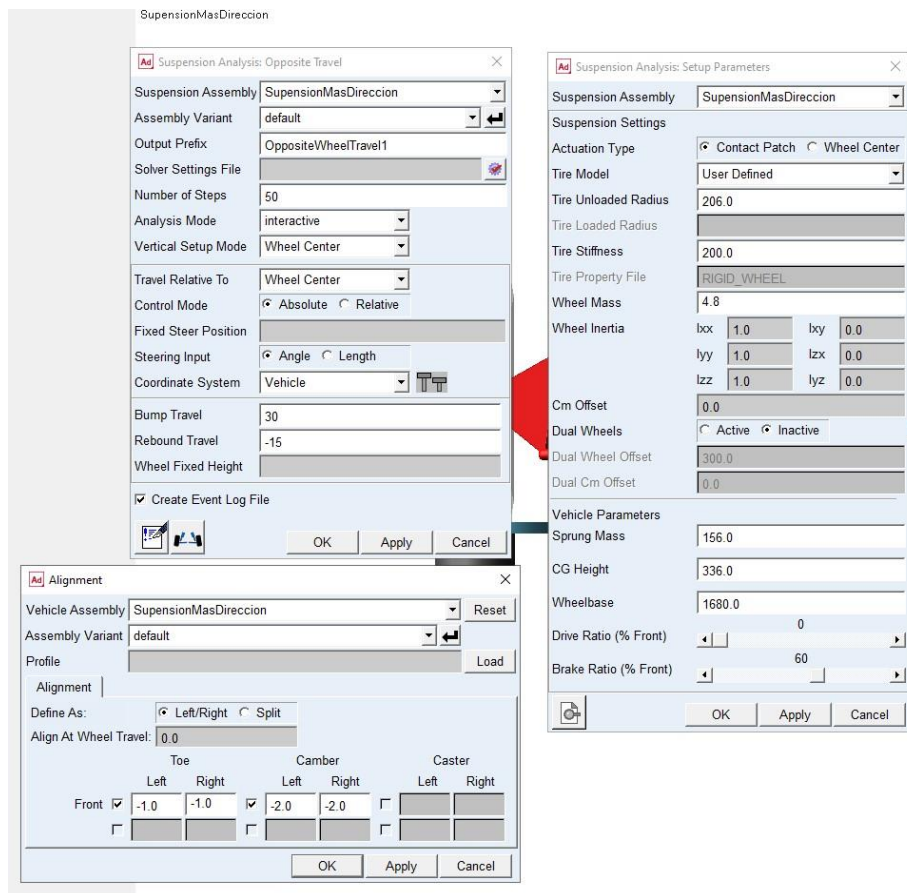


Ilustración 67 Parámetros desplazamiento en sentido opuesto de las ruedas delanteras

Caída:

En este grafico podemos ver como varían los ángulos de caída de ambas ruedas al mismo tiempo, pero en sentidos opuestos.

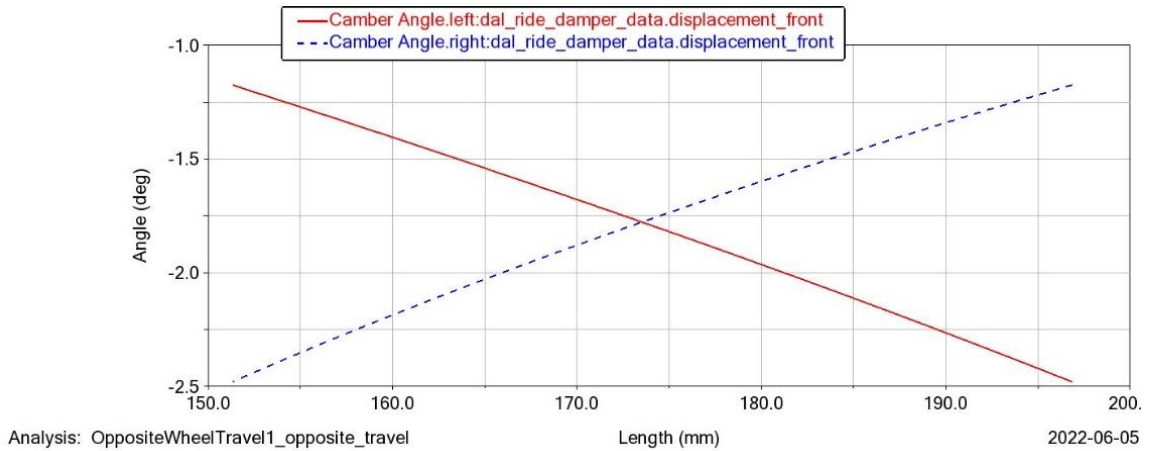


Ilustración 68 Opposite wheel travel, ángulo de caída delantero

Dive braking:

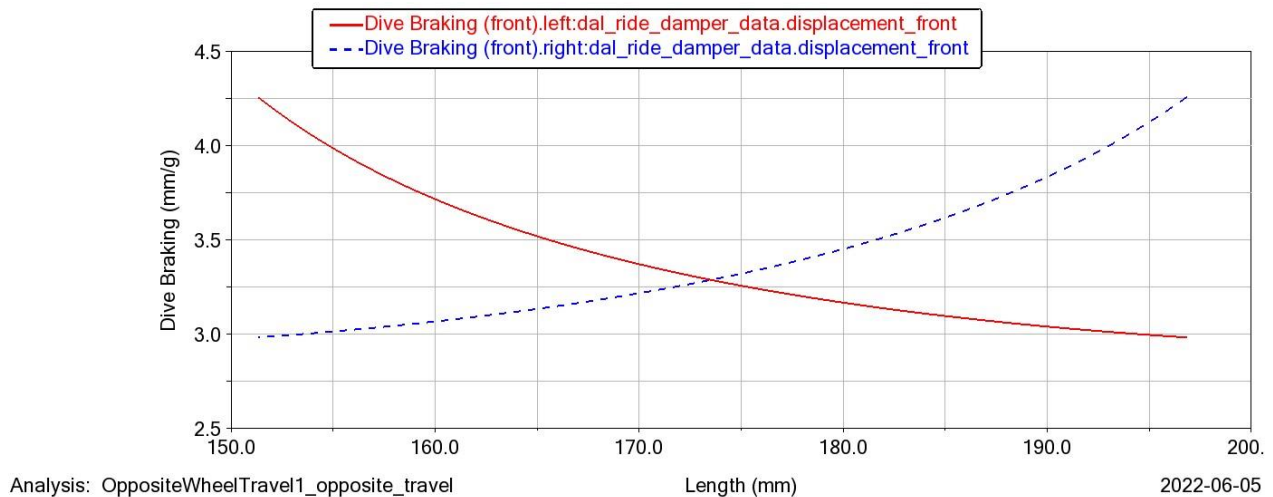


Ilustración 69 Opposite wheel travel, Dive braking delantero

Posición del centro de balanceo:

En este gráfico, podemos ver que la posición vertical del centro de balanceo esta la mayor parte del tiempo debajo del suelo. Llega a un máximo situado justo a la altura del suelo.

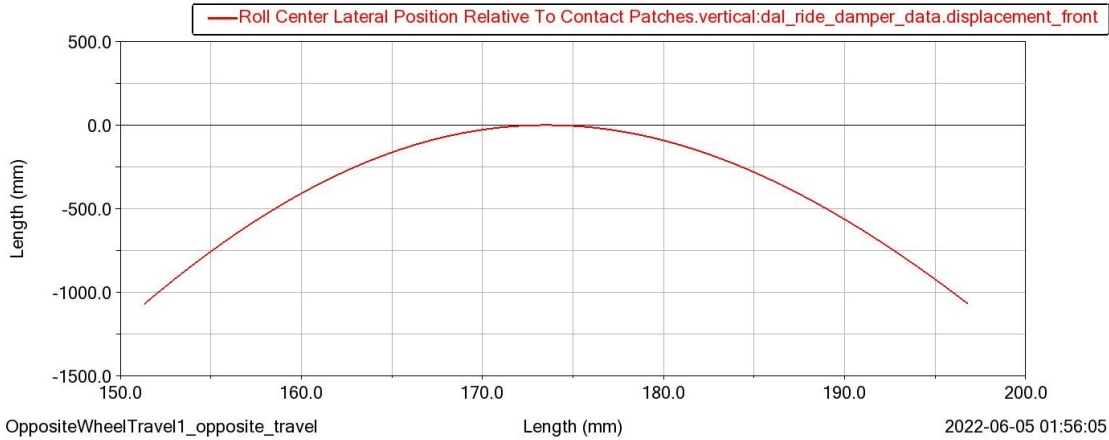


Ilustración 70 Opposite wheel travel, posición del centro de balanceo delantero

Angulo de balanceo:

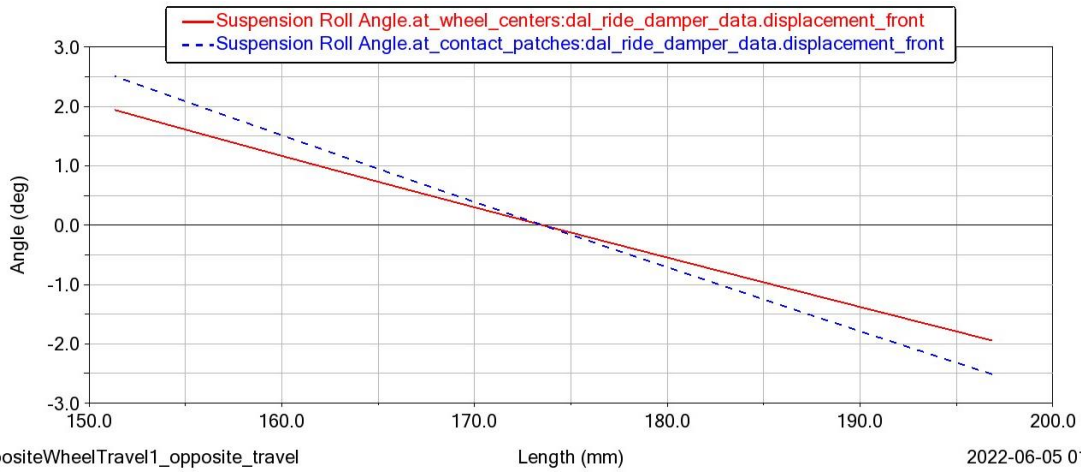


Ilustración 71 Opposite wheel travel, ángulo de balanceo delantero

Recorrido vertical de las ruedas delanteras:

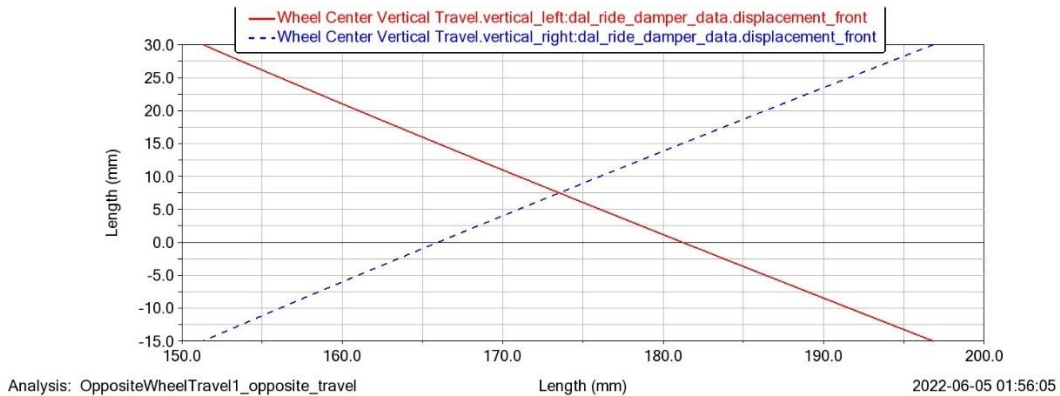


Ilustración 72 Opposite wheel travel, Recorrido vertical de las ruedas delanteras

Suspensión Trasera:

- **Parallel Wheel travel:**

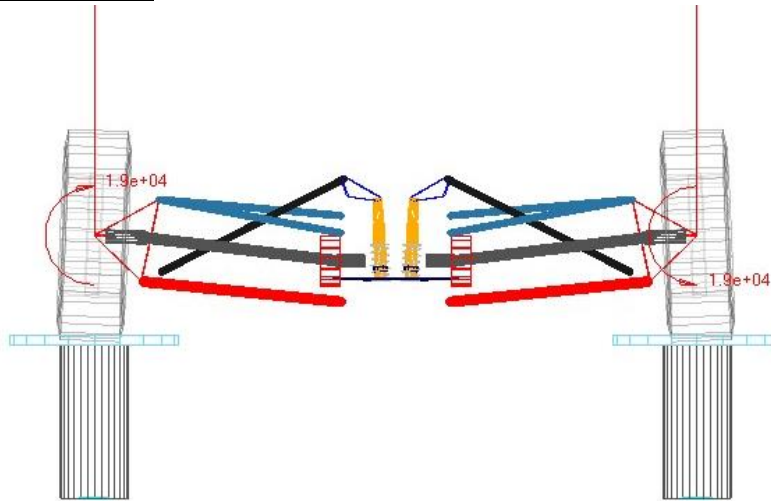


Ilustración 73 Desplazamiento paralelo de las ruedas traseras

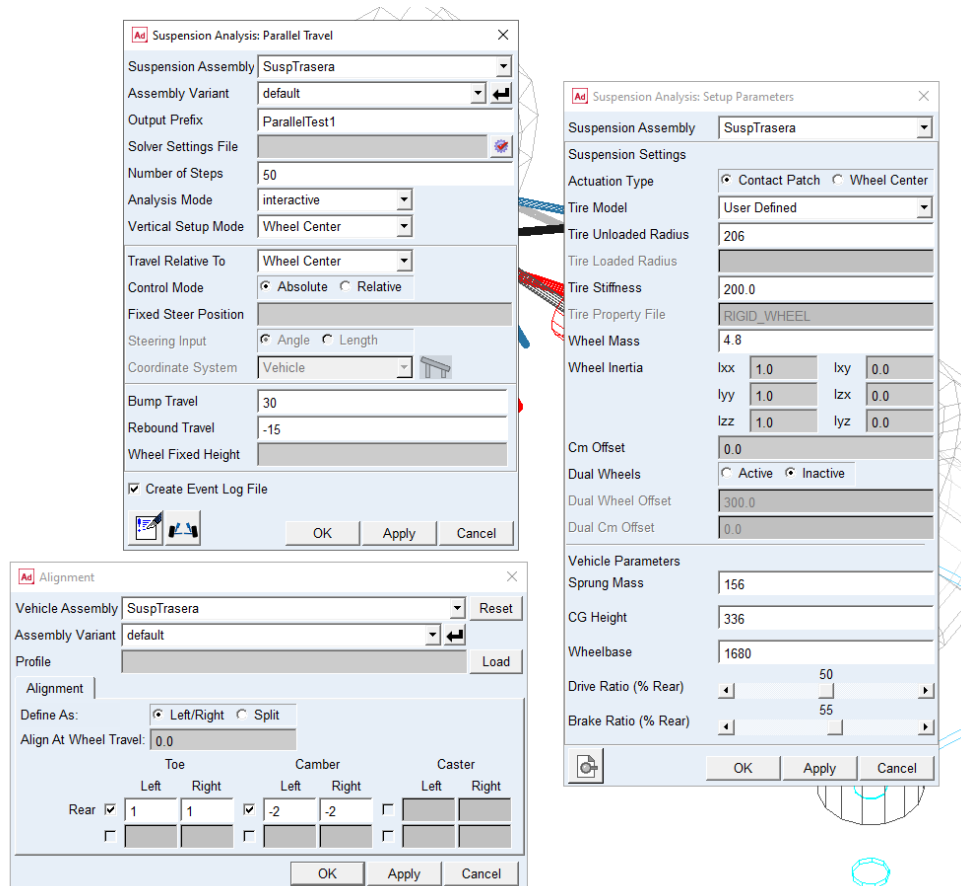


Ilustración 74 Parámetros desplazamiento paralelo de las ruedas traseras

Caída:

Como podemos ver, cuando el vehículo acelera, es decir los amortiguadores están en fase de compresión, tenemos un ángulo de caída negativa de los neumáticos mayor y cuando el vehículo frena, es decir los amortiguadores están en fase de extensión, el ángulo de caída negativa se reduce.



Ilustración 75 61 Parallel travel test, ángulo de caída trasero

Convergencia:

Como podemos ver, en fase de aceleración la convergencia disminuye hacia una posición más neutra y en fase de frenada, la convergencia aumenta.



Ilustración 76 Parallel travel test, ángulo de convergencia trasero

Fuerzas en la mangueta vs desplazamiento trasero:

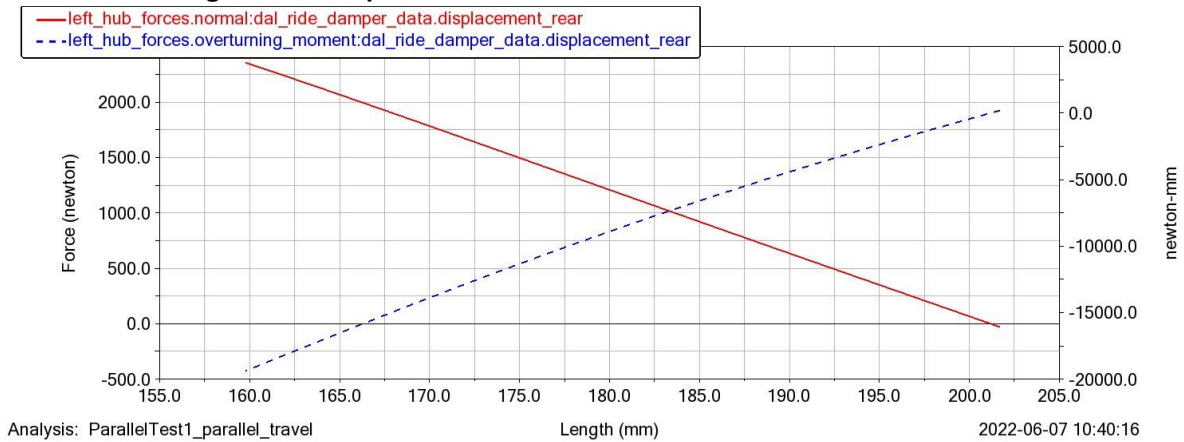


Ilustración 77 Parallel travel test, Fuerzas en la mangueta vs desplazamiento trasero

Posición del centro de balanceo:

En este gráfico, podemos ver como se desplaza lateralmente el centro de balanceo en fases de aceleración y frenada.



Ilustración 78 Parallel travel test, posición del centro de balanceo trasero

Vía:

La vía trasera se modifica siguiendo este gráfico.

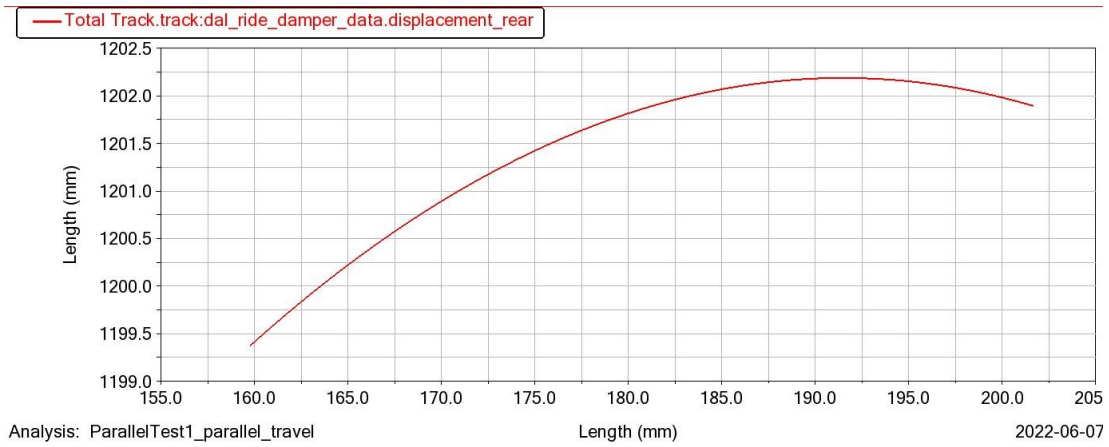


Ilustración 79 Parallel travel test, vía trasera

- Opposite Wheel travel:

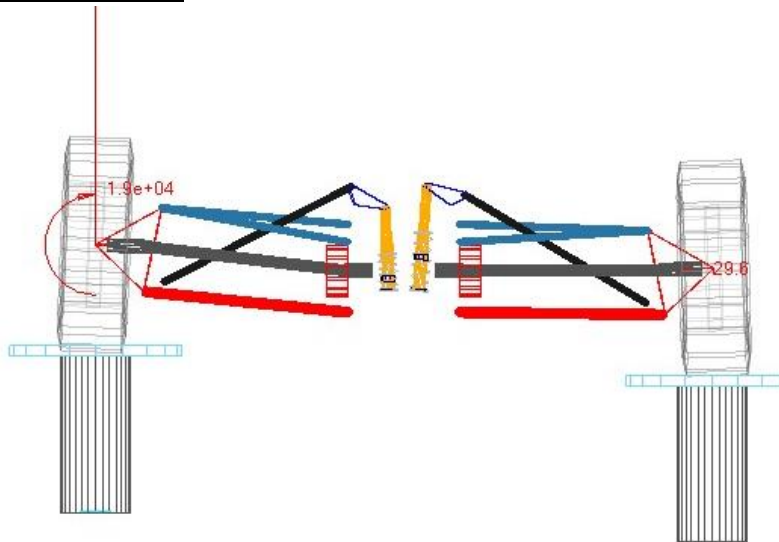


Ilustración 80 Desplazamiento en sentido opuesto de las ruedas traseras

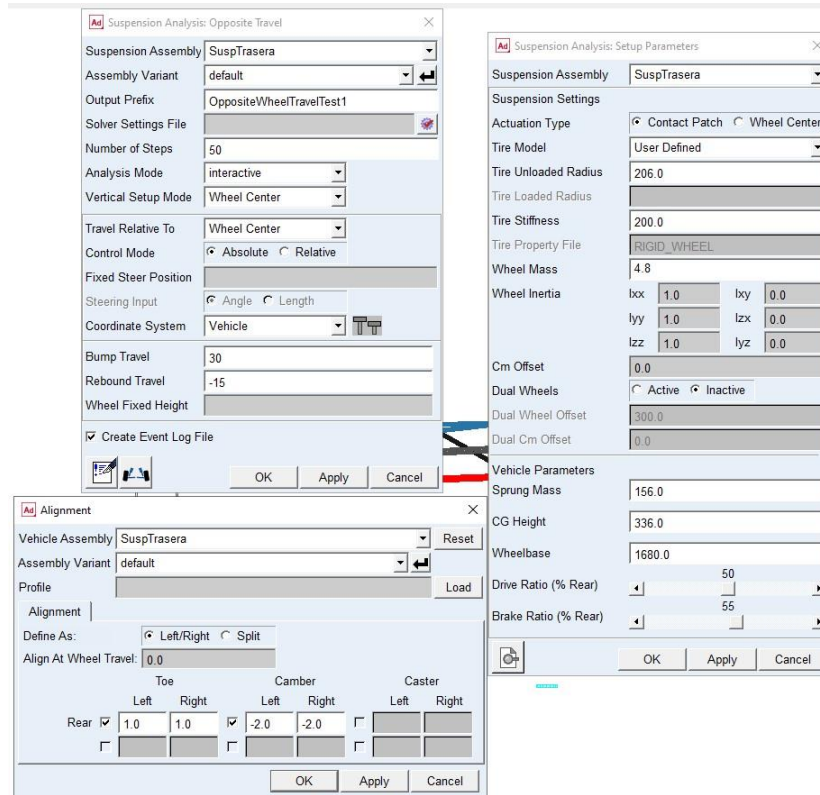


Ilustración 81 Parámetros desplazamiento en sentido opuesto de las ruedas traseras

Caída:

En este grafico podemos ver como varían los ángulos de caída de ambas ruedas al mismo tiempo, pero en sentidos opuestos.

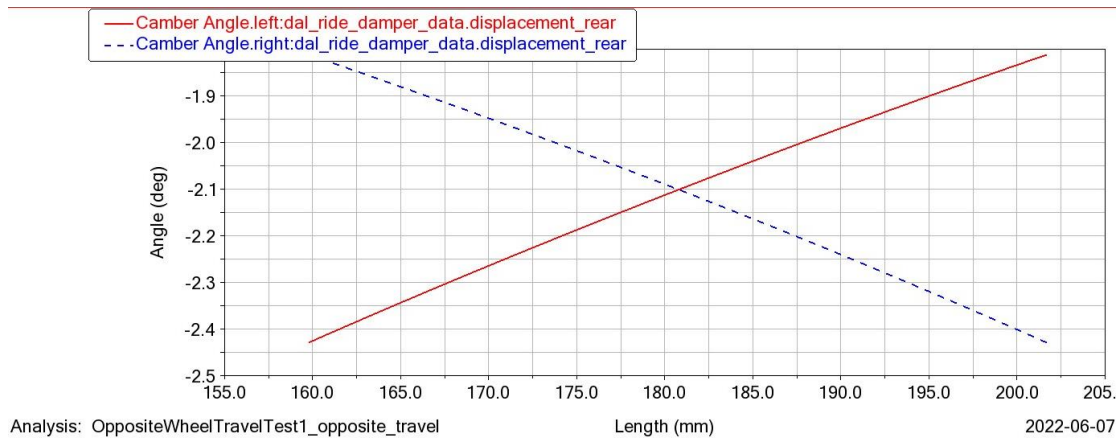


Ilustración 82 Opposite wheel travel, ángulo de caída trasero

Dive braking:

En este gráfico, podemos ver como varia el dive braking en función de la compresión del amortiguador.

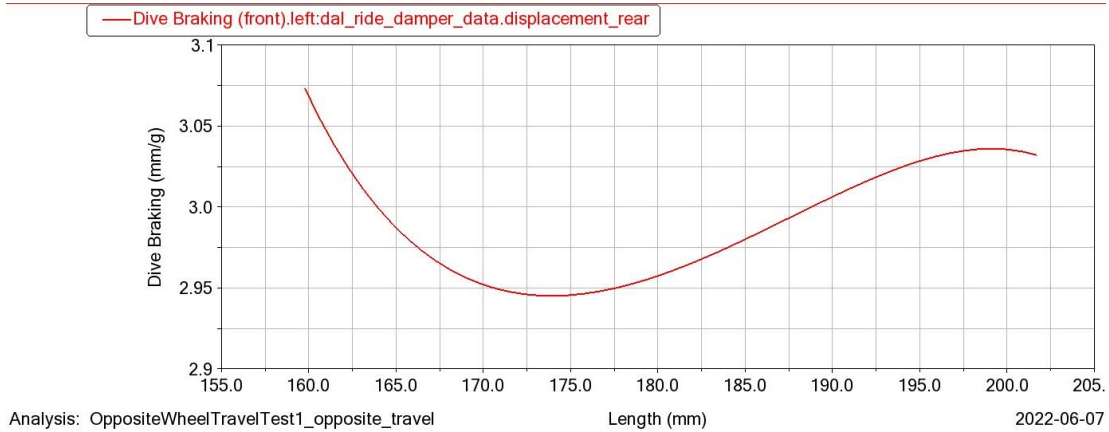


Ilustración 83 Opposite wheel travel, dive braking trasero

Jacking y fuerzas en rueda:

En los gráficos siguientes, podemos ver las cargas normales que sufren el neumático izquierdo y las cargas normales que sufren el balancín izquierdo (Jacking) cuando se comprime la suspensión. Podemos ver que son iguales.



Ilustración 84 Opposite wheel travel, jacking trasero

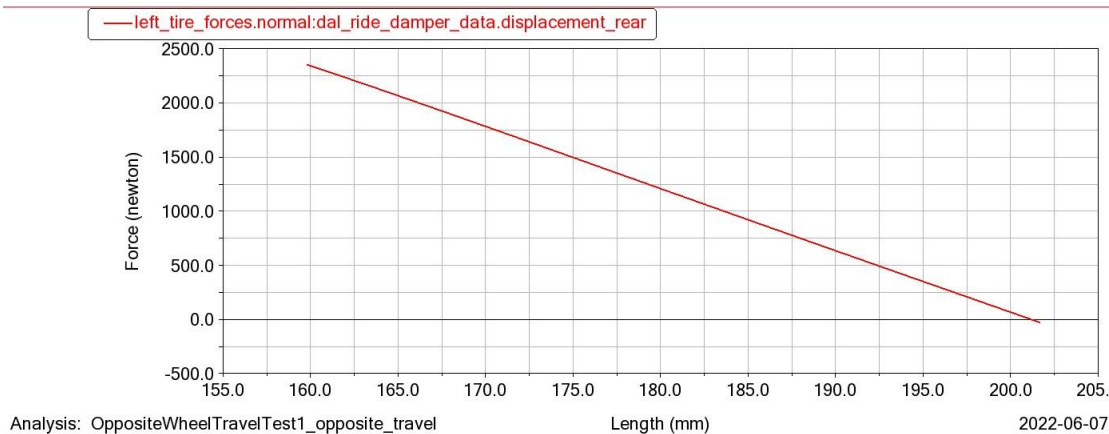


Ilustración 85 Opposite wheel travel, fuerzas en rueda trasera izquierda

Posición del centro de balanceo:

En este gráfico, podemos ver que la posición vertical del centro de balanceo esta la mayor parte del tiempo por encima del suelo. Cuando el amortiguador esta entre 175 mm y 187 mm el centro de balanceo esta debajo de suelo.

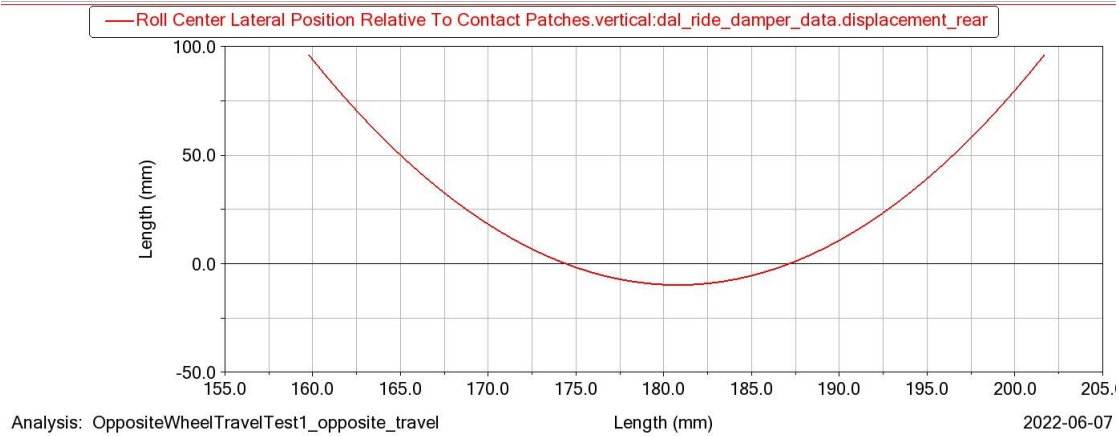


Ilustración 86 Opposite wheel travel, posición del centro de balanceo trasero

2.7 ANALISIS DE SOLUCIONES

Como hemos podido ver en los estudios, en la prueba de aceleración, el caso que tiene la mejor aceleración longitudinal es el caso 7 y el caso que tiene la mejor velocidad punta es el caso 1. En la prueba de curva de radio constate, el caso que tiene la mejor aceleración lateral es el caso 7.

Prueba de aceleración		Prueba de curva de radio constante	
Mejor aceleración long.	Caso 7: 1.1629 g	Mejor aceleración lat.	Caso 7: 1.083 g
Mejor velocidad punta	Caso 1: 75.4 km/h		

Tabla 23 Resultados de los estudios

Teniendo esta información, hemos intentado ver si podíamos hacer unas mejoras sobre la configuración del caso 7. Después de unas iteraciones, hemos visto que cambiando el ángulo de caída delantera:

Caso 7		Intento Mejora	
Caída delantera [°]	0	Caída delantera [°]	-2
Caída trasera [°]	-2	Caída trasera [°]	-2
Convergencia delantera [°]	1	Convergencia delantera [°]	1
Convergencia trasera [°]	0	Convergencia trasera [°]	0

Tabla 24 Intento de mejora de los resultados

Hemos mejorado de 1.38% la aceleración lateral en la prueba de curva de radio constante.

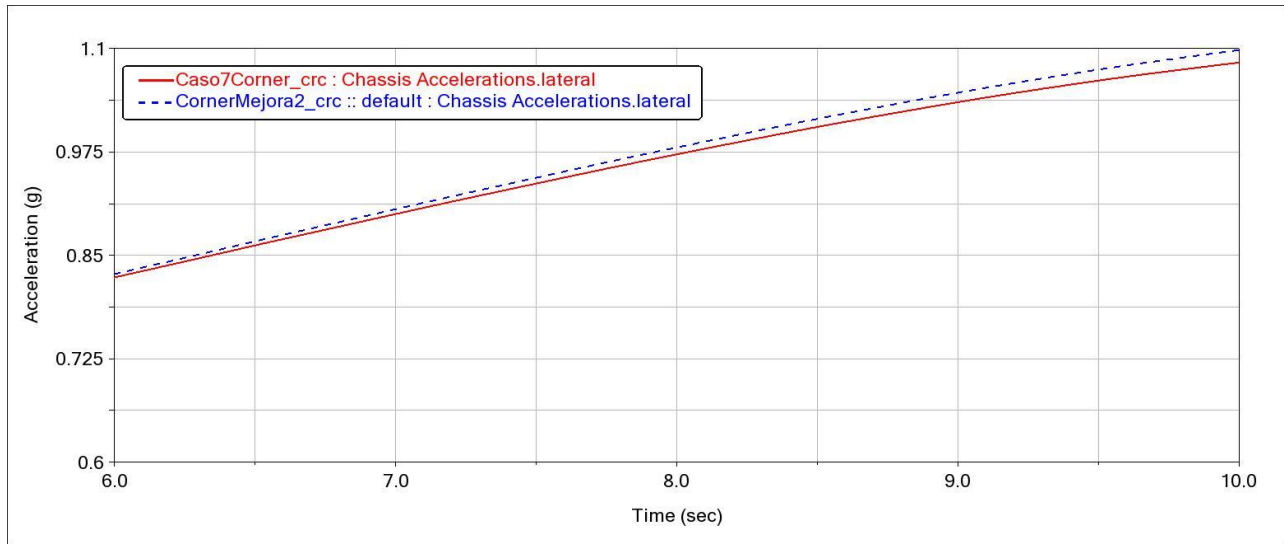


Ilustración 87 Comparación entre la aceleración lateral Caso 7 vs Mejora, Prueba curva radio constante

Caso 7		Intento mejora	
Mejor aceleración lat.	Caso 7: 1.083 g	Mejor aceleración lat.	1.0982 g

Tabla 25 Comparación entre la aceleración lateral Caso 7 vs Mejora, Prueba curva radio constante

Si metemos los parámetros del intento de mejora y hacemos las pruebas de aceleración, vemos que perdemos un poco de aceleración longitudinal 0.4% y apenas perdemos velocidad punta.

Caso 7		Intento mejora	
Mejor aceleración long.	1.1629 g	Mejor aceleración long.	1.1582 g
Mejor velocidad punta	75.37 km/h	Mejor velocidad punta	75.36 km/h

Tabla 26 Tabla 25 Comparación entre Caso 7 vs Mejora, Prueba aceleración

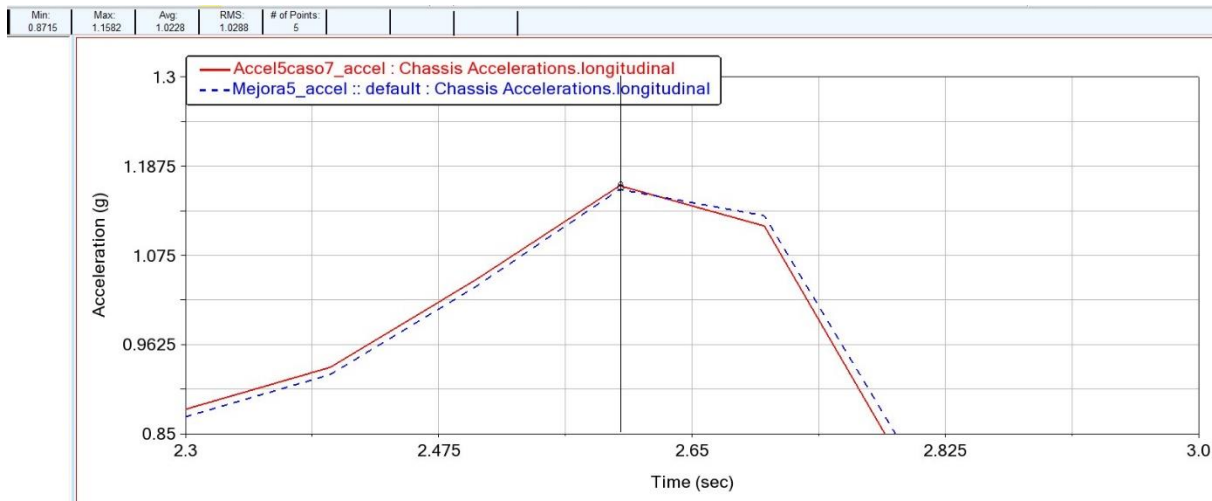


Ilustración 88 Comparación entre la aceleración longitudinal Caso 7 vs Mejora, Prueba aceleración

Max: 20933.3174	Avg: 20907.5401	RMS: 20907.5686	# of Points: 16						
--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--	--	--	--	--	--

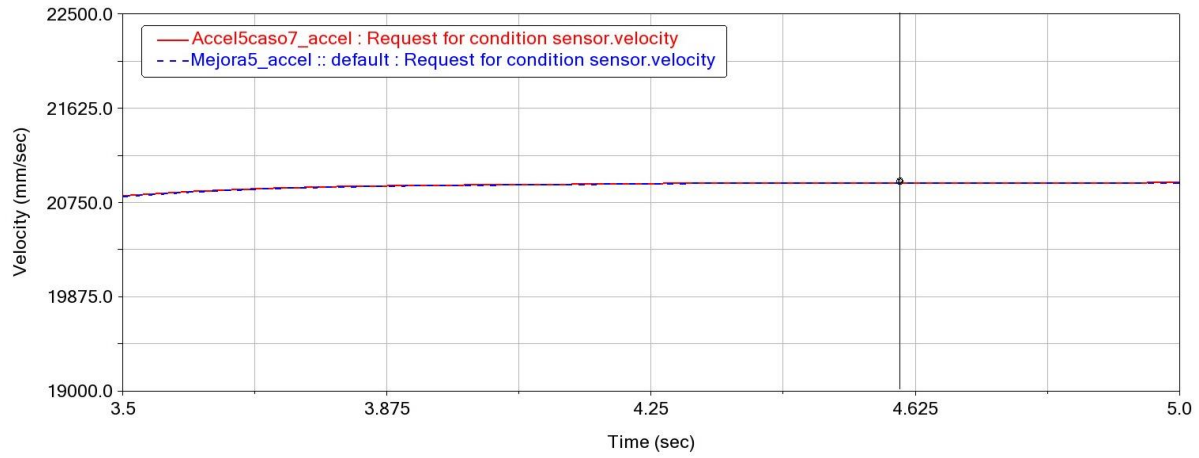


Ilustración 89 Comparación entre la Velocidad punta Caso 7 vs Mejora, Prueba aceleración

2.8 ANALISIS DE COSTES

2.8.1 COSTES

Para los costes, hemos tenido en cuenta las horas de ingeniería, las horas de estudio y el coste del programa. El precio de la licencia de ADAMS CAR es de 10000 euros por año. En nuestro caso, hemos considerado el precio de alquilar el programa durante un periodo de un mes, que es un 10% del precio total de la licencia.

Definición		Unidad
Horas de ingeniería	16	Horas
Horas de estudio	20	Horas
Precio de ingeniería por hora	50	€ por hora
Precio de estudios por hora	60	€ por hora
Precio ingeniería	800	€
Precio estudios	1200	€
Licencia ADAMS CAR	1000	€
Coste total	3000	€

Tabla 27 Costes

2.8.2 RENTABILIDAD

En el caso de este estudio, vamos a tomar en cuenta los eventos en los cuales vamos a participar:

Evento	Puntos
Aceleración	50
Skidpad	50
Autocross	100
Endurance	250
Total	450

Tabla 28 Puntos pruebas dinámicas

Si dividimos el coste total de este estudio, por los puntos de la competición, nos sale a 7€ por punto. El cual es un precio muy asequible, si tenemos en cuenta la potencia y el potencial que tiene esta herramienta y la eficiencia y la estructura que aportara al equipo.

2.9 RESULTADOS FINALES

Con los parámetros finales que podemos ver en la siguiente tabla, sacrificamos la velocidad punta, respecto al “Caso 1”, perdemos muy poco en la aceleración longitudinal respecto al “Caso 7”, pero si aumentamos la aceleración lateral respecto al “Caso 7”. Creemos que estos parámetros nos dan el mejor compromiso para todos los eventos en la competición, para maximizar los puntos disponibles.

Parametros	
Caída delantera [°]	-2
Caída trasera [°]	-2
Convergencia delantera [°]	1
Convergencia trasera [°]	0

Tabla 29 Parámetros finales

Capítulo 3. CONCLUSIONES

3.1 CONCLUSIONES

Hemos visto que ADAMS CAR es una herramienta muy potente y podemos aprovechar sus funciones para mejorar el rendimiento del equipo. Es una herramienta laboral lo cual nos permite sumar habilidades que nos útiles en el futuro. Las simulaciones utilizando este tipo de programa forma una gran parte del mundo de la ingeniera en la automoción. Este método aporta una manera más científica de validar conceptos, probar nuevas configuraciones y poder compararlas entre ellas.

Hemos podido hacer muchas simulaciones en una fracción de tiempo y hemos utilizado una fracción de recursos comparado a si teníamos que hacerlo físicamente. Este proyecto nos ha permitido entender mejor nuestro vehículo y tener una mejor idea de cómo configurarlo cuando llegamos en pista. Hemos visto también unos puntos débiles en el diseño de nuestro vehículo que, con la ayuda de la misma herramienta, podemos mejorar.

Con respeto a la competición, hemos podido encontrar una solución de configuración de la suspensión del Fiem 14 que nos da un compromiso que nos permite maximizar los puntos disponibles en las pruebas dinámicas.

3.2 FUTURAS LINEAS DE TRABAJO

Para las futuras líneas de trabajo, podemos añadir más datos del vehículo como el mapa motor, las relaciones de marcha, datos de los neumáticos, los característicos aerodinámicos etc., para ver cómo se comporta el vehículo con más precisión.

Podemos también crear las diferentes pistas de la competición como el skidpad, el slalom en ADAMS CAR y profundizar el estudio. Hay también la posibilidad de hacer unas pruebas estáticas como por ejemplo el “tilt test” que es una prueba donde volcamos el vehículo para ver cuando las ruedas pierden contacto con el suelo.

Podemos también añadir sensores a vehículo y utilizar el GPS de la centralita del vehículo. Con esto, tendríamos la posibilidad de hacer una trazada con el vehículo y directamente importarla a ADAMS CAR. Pero lo más importante seria, una vez que tenemos el vehículo con todos los sensores, comparar las simulaciones con los resultados obtenidos en la realidad.

Capítulo 4. BIBLIOGRAFIA

1. Emparan, I. (2013, julio 18). *Comprendiendo un F1 (Parte 10)*. Fórmula F1. <https://www.formulaf1.es/41926/comprendiendo-un-f1-parte-10/>
2. Öhlins, D. T. C. (s/f). *Öhlins professional motorsport products TTX 25 MkII FSAE 200/57 mm*. Öhlins DTC. Recuperado el 21 de abril de 2022, de <https://www.ohlins.eu/en/products/automotive/ttx-25-mkii-fsae-200--6682/>
3. Case, D. E. (1996). *Formula SAE - Competition History 1981 - 1996*. SAE Technical Paper Series.
4. (S/f). *Formulastudent.de*. Recuperado el 11 de mayo de 2022, de https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2022/rules/FS-Rules_2022_v1.0.pdf
5. Plaza, D. (2020, noviembre 19). *Convergencia de las ruedas: ¿qué es y cómo influye en la conducción?* Motor.es. <https://www.motor.es/que-es/convergencia-ruedas>
6. Plaza, D. (2020a, noviembre 12). *Ángulo de caída o camber de ruedas, ¿qué es y cómo influye en el coche?* Motor.es. <https://www.motor.es/que-es/camber-angulo-de-caida-rueda>
7. *¿Sabías qué es la precarga de muelles de suspensión?* (2020, mayo 6). Soymotero.net. <https://www.soymotero.net/sabias-que-es-la-precarga-de-muelles-de-suspension>
8. Comeanddriveit.com. 2022. *Learn Camber, Caster, and Toe | Suspension Alignments*. [online] Available at: <https://www.comeanddriveit.com/suspension/camber-caster-toe> [Accessed 23 May 2022]
9. SPRINDEX. (s/f). *Sprindex is not preload / why preload is bad*. SPRINDEX. Recuperado el 23 de mayo de 2022, de <https://sprindex.com/blogs/news/understanding-the-tune-why-preload-is-bad>
10. Suspension Secrets. (2017, junio 3). *Toe - how to adjust and tune*. Suspension Secrets. <https://suspensionsecrets.co.uk/adjust-tune-toe/>

11. Ávila, D. (2020, marzo 31). *¿Qué es la deriva o ángulo de deriva?* Actualidad Motor.
<https://www.actualidadmotor.com/que-es-deriva-angulo-deriva/>
12. Connor, W. (2014, junio 16). *How to: Suspension setup rebound and compression damping.* RideApart.Com. <https://www.rideapart.com/features/257984/how-to-suspension-setup-rebound-and-compression-damping/>
13. Vousden, M. (2015, julio 9). *What is car body roll or lean?* Carwow.Co.Uk.
<https://www.carwow.co.uk/guides/glossary/what-is-car-body-roll-0184>
14. GESTIONMAX. (s/f). *ANTIDIVE - Definición - Significado.* Motorgiga.com. Recuperado el 17 de junio de 2022, de <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/antidive-definicion-significado/gmx-niv15-con223.htm>
15. Suspension Secrets. (2018, agosto 18). *Anti squat, dive and lift geometry.* Suspension Secrets.
<https://suspensionsecrets.co.uk/anti-squat-dive-and-lift-geometry/>