

Trabajo Fin de Máster Ingeniería Industrial

Análisis dinámico de una motocicleta

Autor: José Cabrera Munuera

Tutor: Carmen Madrigal Sánchez

**Dpto. Ingeniería Mecánica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster
Ingeniería Industrial

Análisis dinámico de una motocicleta en ADAMS

Autor:

José Cabrera Munuera

Tutora:

Carmen Madrigal Sánchez
Profesora Contratada Doctora

Dpto. de Ingeniería Mecánica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Máster: Análisis dinámico de una motocicleta en ADAMS

Autor: José Cabrera Munuera

Tutora: Carmen Madrigal Sánchez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

A mi tutora

A mis profesores

Agradecimientos

Este trabajo ha sido motivado por mi pasión por el motociclismo y por la ingeniería mecánica. Agradezco por tanto a todos los que han ayudado a que estas pasiones hayan sido realizables por mí y los que, con su esfuerzo, dedicación y motivación, me han hecho apasionarme más aun por ellas. Primero mi familia que ha soportado económicamente y emocionalmente ambas pasiones, y a mi padre por iniciarme en el mundo del motociclismo.

Después agradezco a todos mis amigos moteros que me hacen disfrutar de la pasión en compañía y todos los que me han acompañado durante el grado y máster, que han hecho muy llevadera mi pasión por la ingeniería, con las dificultades que tiene.

Quiero agradecer muchísimo también a los profesores que me han dado conocimientos, motivación e incluso han participado en actividades extrauniversitarias como la competición MotoStudent. Estos últimos son Daniel García Vallejo y Carmen Madrigal Sánchez, tutora de este trabajo, que han participado o participan como tutores en el equipo US Racing que representa a la Universidad de Sevilla en la competición Motostudent.

Otro profesor que merece un gran agradecimiento es Juan Manuel Ayllón Guerola por la motivación, el trato excelente y lo que nos enseñó durante la asignatura optativa “Dinámica de Sistemas Multicuerpo”.

Por último, el equipo US Racing del que formé parte durante dos temporadas y con el que he colaborado para realizar este trabajo con el objetivo de que les sirva de ayuda para seguir mejorando.

José Cabrera Munuera
Graduado en Ingeniería Industrial
Sevilla, 2019

El equipo US Racing lleva desde 2009 participando en la competición de MotoStudent representando a la Universidad de Sevilla. Esta competición es similar a la categoría del mundial Moto3, pero en la que luchan estudiantes de universidades de todo el mundo por diseñar y fabricar la mejor motocicleta.

Un aspecto esencial para una motocicleta de competición de este tipo es la búsqueda de ligereza máxima y la rigidez correcta de los distintos elementos estructurales del conjunto de la motocicleta.

Este trabajo pretende mostrar de una forma didáctica como obtener los distintos esfuerzos que sufren distintos componentes estructurales de la motocicleta en los escenarios de carga más frecuentes durante la competición, para que el diseño de estos elementos sea el óptimo, y así cumplir los requisitos de rigidez del conjunto y conseguir una gran ligereza para conseguir mayores prestaciones en carrera.

El objetivo del trabajo es servir de tutorial al equipo US- Racing para siguientes ediciones de la competición Motostudent, basando este trabajo en la motocicleta desarrollada por el equipo para la carrera de Octubre de 2018.

Abstract

The team US Racing has been taking part of the MotoStudent competition since 2009 as the team representing the University of Seville. This competition is similar to the Moto3 category at the Grand Prix motorcycle racing but, in this case, students from universities from all around the world are who try to design and manufacture the best motorcycle of the competition.

Racing motorcycles have to be light and maintain a stiffness in all their structural components to a certain level.

This Master's Thesis will show in an illustrative form how to obtain the reaction forces that structural elements of the motorcycle suffer during the most common load scenarios during a race, so the design of the motorcycle is as near to the optimum as possible regarding the stiffness requirements, while keeping the mass of the motorcycle to the lowest, so the best performance is achieved.

The main purpose of this Thesis is to serve as a tutorial for the US Racing team for next editions of the competition, since every simulation in this document will be performed with the last competition's motorcycle.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvii
Tabla de ilustraciones	xviii
Notación	xxi
1 Introducción	11
1.1 <i>Antecedentes</i>	11
1.1.1 Pasión por la ingeniería mecánica y el motociclismo	11
1.1.2 MotoStudent y US Racing	12
1.2 <i>Objeto</i>	14
2 Estructuración del modelo	17
2.1 <i>Modelo completo</i>	17
2.1.1 Instrucciones directas: Estructura del “modelo completo”	17
2.1.2 Detalles: ¿Cómo crear una copia exacta de un modelo de Catia a otro directorio?	18
2.1.3 Detalles: ¿Por qué dividimos el primer nivel jerárquico así?	19
2.2 <i>Modelo simplificado</i>	19
2.2.1 Instrucciones directas: Simplificación del modelo para ADAMS	20
2.2.2 Detalles: duplicación del modelo en simplificado y completo	20
2.2.3 Detalles: Simplificación exhaustiva del modelo	22
2.2.4 Detalles: Posibles alteraciones	23
3 Introducción de puntos para los pares cinemáticos	25
3.1 <i>Instrucciones directas: Creación de puntos para definir los pares cinemáticos</i>	25
3.2 <i>Detalles: Creación de puntos dentro de un GS</i>	28
3.3 <i>Detalles: Nombrado de puntos y GS's</i>	29
3.4 <i>Detalles: Influencia de la elección de los CATParts que contendrán los puntos</i>	30
3.5 <i>Detalles: Influencia de la localización de los puntos</i>	32
3.6 <i>Detalles: ¿Por qué esos pares cinemáticos?</i>	34

4	Obtención de datos inerciales para Adams	35
4.1	<i>Aplicación de materiales</i>	35
4.1.1	Instrucciones directas	35
4.1.2	Detalles: Aplicación de densidades personalizadas	36
4.1.3	Detalles: Obtención de sólidos a partir de elementos cáscara	36
4.2	<i>Obtención de los centros de masas e inercias.</i>	41
4.2.1	Instrucciones directas: Centros de masas	41
4.2.2	Instrucciones directas: Creación de puntos para el sistema de ejes de referencia para las inercias	42
4.2.3	Instrucciones directas: Obtención de masas e inercias	44
4.2.4	Detalles: Obtención de datos para elementos que no han podido convertirse en sólidos	45
5	Exportación a Adams	46
5.1	<i>Exportación del modelo de Catia a Adams</i>	46
5.1.1	Instrucciones directas: Creación del modelo de Adams	46
5.1.2	Instrucciones directas: Importación del modelo a Adams	47
5.1.3	Detalle: Abrir un modelo ya guardado	48
5.1.4	Detalles: Configuración previa de Adams	48
5.2	<i>Reorganización del árbol de elementos</i>	49
5.2.1	Instrucciones directas	49
5.2.2	Detalles: Manejo y ajustes de la visualización del modelo, y otros consejos para empezar con Adams	52
6	Modelado de restricciones	55
6.1	<i>Instrucciones directas: Introducción de pares cinemáticos básicos</i>	55
6.2	<i>Instrucciones directas: Elementos Muelle – Amortiguador</i>	57
6.3	<i>Instrucciones directas: Elementos fijados entre sí</i>	57
6.4	<i>Instrucciones directas: Contacto con el suelo</i>	58
6.5	<i>Detalles: Que hacer en caso de que un punto falte o sea incorrecto</i>	59
6.6	<i>Detalles: Spline para las constantes del amortiguador</i>	59
6.7	<i>Detalles: Crear un suelo</i>	60
7	Importación de datos másicos a Adams	63
7.1	<i>Instrucciones directas: Crear sistemas de ejes para el CM y los ejes de inercia</i>	63
7.2	<i>Introducir datos de masas e inercias a cada conjunto</i>	64
7.2.1	Instrucciones directas	64
8	Escenarios a simular	65
8.1	<i>Escenario 1: Frenada extrema</i>	65
8.1.1	Instrucciones directas: Introducción de condiciones de contorno	66
8.1.2	Instrucciones directas: Simulación	69
8.1.3	Detalles: Condiciones de contorno establecidas	70
8.1.4	Detalles: Aceleración media	70
8.2	<i>Escenario 2: Paso por curva</i>	71
8.2.1	Instrucciones directas: Imponer giro del manillar	74
8.2.2	Instrucciones directas: Aceleración angular en la rueda trasera	74
8.2.3	Instrucciones directas: General Constraint para establecer un ángulo con respecto a la vertical del chasis	75
8.2.4	Detalles: Función progresiva acotada	76
9	Postprocesado de resultados	77
9.1	<i>Escenario 1: Frenada extrema</i>	77
9.1.1	Instrucciones directas: Obtención de resultados determinados	77
9.2	<i>Escenario 2: Paso por curva</i>	80
9.2.1	Lista de posibles datos interesantes	80
9.2.2	Consejos	81

10	Conclusiones y Propuestas de Mejora	82
10.1	<i>Conclusiones</i>	82
10.2	<i>Propuestas de mejora</i>	82
	Referencias	84

ÍNDICE DE TABLAS

No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 - Pasión de Valentino Rossi, realizando su ritual de conversar con su moto antes de cada carrera [1]	11
Ilustración 2 - Parte del equipo animando al piloto minutos antes de la carrera de octubre de 2016 [3]	13
Ilustración 3 - Logo del equipo [3]	14
Ilustración 4 - Modelo simplificado de la suspensión de una motocicleta [4]	15
Ilustración 5 - Árbol de Catia con la organización ideal para los análisis dinámicos, con una expansión en el subconjunto fijo al chasis a modo ilustrativo	18
Ilustración 6 - Send to directory	19
Ilustración 7 - Modelo simplificado	20
Ilustración 8 - Send to directory mostrando los archivos que se duplicaran	21
Ilustración 9 - Esquema de enlaces entre el modelo completo, el simplificado y sus "hijos"	22
Ilustración 10 - Elementos involucrados en el ejemplo. Elementos no necesarios en transparente.	23
Ilustración 11 - Esquema de fuerzas en el ejemplo explicado	24
Ilustración 12 - Chasis con los puntos del par cinemático en la pipa y el punto para la suspensión trasera	25
Ilustración 13 – A la izquierda, las botellas de la suspensión delantera con el punto combinado para modelar sus dos pares cilíndricos y su muelle-amortiguador A la derecha, las barras de la suspensión delantera con el punto combinado para modelar sus dos pares cilíndricos y su muelle-amortiguador.	26
Ilustración 14 - Rueda delantera con los puntos en su eje de rotación	26
Ilustración 15 – Uno de los triángulos, con los pares de puntos que definen los ejes de sus pares de revolución y el punto azul del amortiguador	27
Ilustración 16 - Basculante con las parejas de puntos correspondientes a los pares de revolución a los que se conecta.	27
Ilustración 17 - Introducción de un GS en un CATPart	28
Ilustración 18 - Define in Work Object del PartBody	29
Ilustración 19 - Nomenclatura de puntos y GS's en el neumático delantero, con el GS de Inertia y el del par de revolución de la rueda y el conjunto inferior de la suspensión delantera.	30
Ilustración 20 - Creación de puntos simétricos respecto al centro de la rueda	31
Ilustración 21 - Línea que une los puntos creados	31
Ilustración 22 - Punto medio de la línea creada	32
Ilustración 23 - Esquema de condiciones de contorno del escenario ejemplo y sus dos posibles aproximaciones	33
Ilustración 24 - Dos modelos de suspensión distintos que transmiten los mismos esfuerzos a la pipa de la dirección	34
Ilustración 25 - Modificación de la densidad del material goma "Rubber"	36
Ilustración 26 - Operación "Heal"	37
Ilustración 27 - Operación "Wrapping" en el conjunto del piloto en su postura con su casco	38
Ilustración 28 - Copiado del modelo de triángulos	38
Ilustración 29 - Pegado especial como resultado	39
Ilustración 30 - Operación "Thick surface"	39

Ilustración 31 - Operación "Close Surface"	40
Ilustración 32 - Introducción del CM de la Rueda delantera en el CATPart "Llanta delantera"	41
Ilustración 33 - Creación del CM y cómo queda en el CATPart guardado	42
Ilustración 34 - Posición de un elemento que no se ha fijado en el (0, 0, 0) de su CATProduct	42
Ilustración 35 - Insertar sistema de ejes con centro el CM	43
Ilustración 36 - Creación de los puntos X e Y en el sistema de ejes creado	43
Ilustración 37 - Cambio a modo diseño ("Design mode")	44
Ilustración 38 - Proceso para obtener la inercia respecto a un sistema de ejes determinado por el usuario	45
Ilustración 39 - Copiado de los puntos del sistema de ejes de referencia para las inercias en el nuevo GS	45
Ilustración 40 - Configuración de la gravedad	46
Ilustración 41 – Ventana de importación del modelo de Catia	47
Ilustración 42 - Ajustes de importación	47
Ilustración 43 - Ventana inicial al abrir Adams y la ventana que se muestra al elegir "Existing Model"	48
Ilustración 44 - Configuración para un ordenador con procesador multinúcleo	49
Ilustración 45 – Operación "Merge two bodies"	49
Ilustración 46 – Ordenar Bodies por nombre	50
Ilustración 47 - Eliminación de geometría no necesaria	51
Ilustración 48 – Ejemplo de elemento ya renombrado en azul y otro de uno por renombrar debajo (PT100 → R_TRAS_INERTIA_Y)	51
Ilustración 49 - Ocultar varios elementos a la vez	52
Ilustración 50 - Conjuntos finales renombrados	52
Ilustración 51 - Lista de comandos de teclado de Adams [6]	53
Ilustración 52 - En la operación "Crear un sistema de coordenadas" se pide el "Body" donde queremos introducirlo	54
Ilustración 53- Creación de un par de revolución	56
Ilustración 54 - Añadir fricción a un par de revolución	56
Ilustración 55 - Introducción del elemento muelle – amortiguador de la suspensión delantera	57
Ilustración 56 - Fijación de elementos entre si	58
Ilustración 57 - Creación del contacto de la rueda delantera con el suelo	58
Ilustración 58 - Copiado y pegado en el product vacío del CATPart modificada	59
Ilustración 59 - Insertar puntos del Spline que define el comportamiento del amortiguador con respecto a su velocidad	60
Ilustración 60 - Creación de un suelo	61
Ilustración 61 - Cómo identificar el marker que define la posición de un sólido y su modificación	62
Ilustración 62 - Creación del marker para el sistema de coordenadas para las inercias – Último paso en el que se elige la dirección del eje Y	63
Ilustración 63 - Modificación de las propiedades del conjunto basculante	64
Ilustración 64 - Frenada extrema de Chris Vermeulen [7]:	66
Ilustración 65 - Restricción de perpendicularidad para mantener la moto vertical	67
Ilustración 67 - Cambio del tipo de restricción a fija	67

Ilustración 66 - Restricción de paralelismo	68
Ilustración 68 - Aplicación del momento de frenada	68
Ilustración 69 - Aplicación de velocidad inicial al Main Body	69
Ilustración 70 - Lanzamiento de la simulación	69
Ilustración 71 - Física de una motocicleta en curva [8]	72
Ilustración 72 - Evolución de la postura en curva en MotoGP [9]	73
Ilustración 73 - Imposición de un ángulo de 15° ($\pi/12$ rad)	74
Ilustración 74 - Imposición de una aceleración angular decreciente con el tiempo	75
Ilustración 75 - Creación de la restricción matemática de ángulo con respecto a la vertical	76
Ilustración 76 - Grafica ejemplo de la función definida para $\alpha = 1$ y $K=10$	76
Ilustración 77 - Menú que abre el postprocesador de Adams	77
Ilustración 78 - Ventana de Postprocesado: Encuadrado las magnitudes automáticamente calculadas	78
Ilustración 79 - Creación del "Measure" del momento en la pipa	79
Ilustración 80 - Filtrado de resultados por "measures" y ploteado del momento calculado	79
Ilustración 81 - Esquema simplificado de la dinámica del giro [10]	80

ADAMS	MSC ADAMS, software de simulación de dinámica en sistemas multicuerpo
CAD	Computer aided design: Diseño asistido por ordenador
CAE	Computer aided Engineering: Ingeniería asistida por ordenador
Software	Programa informático
CdG	Centro de gravedad
GS	Geometrical Set
Product	CATIA CATProduct
Part	CATIA CATPart

1 INTRODUCCIÓN

Para introducir el proyecto, en el primer capítulo se hablará del entorno en el que se encuentra el proyecto y las motivaciones para realizarlo. Después de esto, se presentará el objetivo de este proyecto como tutorial para el equipo US Racing para mejorar el diseño de sus motocicletas para la competición de MotoStudent en ediciones futuras. Además, se introducirá el alcance del proyecto.

En los capítulos siguientes se entrará en profundidad en el contenido técnico del proyecto: el análisis dinámico de una motocicleta como sistema multicuerpo. Esto se verá, como se ha dicho, con un punto de vista didáctico para servir de tutorial al equipo US Racing.

El último capítulo recopilará las conclusiones y posibles mejoras del proyecto.

1.1 Antecedentes

El presente trabajo nace de varias motivaciones y entornos que han llevado al autor a realizarlo. Las principales se describen en los subapartados siguientes.

1.1.1 Pasión por la ingeniería mecánica y el motociclismo



Ilustración 1 - Pasión de Valentino Rossi, realizando su ritual de conversar con su moto antes de cada carrera [1]

El autor del proyecto empezó su pasión por el motociclismo prácticamente desde que tiene memoria, por influencia inicial de su padre. Junto con su pasión por la ingeniería mecánica, también desarrollada desde muy pequeño, hace que el motociclismo no se quede en una afición simple. Esta pasión iba más allá de solo disfrutar del motociclismo como algo que seguir en televisión y/o disfrutar de la conducción de motocicletas, si no que siempre ha buscado también la gran conexión que existe entre la ingeniería mecánica y el motociclismo.

Fue así que tal como se enteró de su existencia, solicitó entrar en el equipo US Racing, cuando aún solo estaba en el 3er curso del Grado de Ingeniería Industrial, con la suerte de conseguir formar parte de él.

En este equipo estuvo una edición como aprendiz, en el departamento de chasis y del sistema de escape, y una segunda edición como miembro oficial del equipo, principalmente, como diseñador del sistema de escape de la motocicleta desarrollada por el equipo en la edición 2015-2016.

Tras una edición sin participar (2017-2018) y cursar como optativa la asignatura “Dinámica de sistemas multicuerpo” del Máster en Diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica, surge la motivación de retomar la participación en el equipo a través del presente tutorial para la mejora de los prototipos diseñados por US Racing en las futuras ediciones.

La motivación surge tras el problema que ocurre en cada edición: cuando se diseñan los elementos estructurales basados en escenarios de cargas obtenidos de bibliografías y/o suposiciones que, por desconocimiento e inseguridad, venían cargadas de coeficientes de seguridad, estos terminaban siendo más pesados y más rígidos de lo óptimo. Es por esto que surge la motivación a simular la motocicleta en los escenarios principales a los que se verá expuesta y obtener, por tanto, unos elementos estructurales acordes a ellos y optimizar al máximo el diseño del conjunto de la motocicleta.

1.1.2 MotoStudent y US Racing

MotoStudent [2] es una competición internacional promovida por Moto Engineering Foundation y TechnoPark MotorLand, que reúne a equipos de estudiantes de muchas universidades de todo el mundo con el objetivo de diseñar y fabricar una motocicleta con la que competir contra las demás universidades.

MotoStudent es una competición que se celebra cada dos años en el Circuito de Motorland, en Aragón, España. Durante el tiempo entre competición y competición, los equipos deben trabajar para obtener los recursos económicos necesarios, los diseños óptimos para carrera y la fabricación y montaje de la motocicleta, además de resolver la logística necesaria para llevar la motocicleta desde la universidad de origen hasta Aragón, más fáciles para los equipos españoles, pero bastante complicado para equipos, por ejemplo, del continente americano.

Desde la 4ª edición, MotoStudent ha añadido otra competición diferente, paralela a la anterior. MotoStudent Electric, renombrando la ya existente a MotoStudent Petrol, siendo la principal diferencia que el prototipo a diseñar tiene que ser puramente propulsado por un motor eléctrico, común para todos los equipos, al igual que en MotoStudent Petrol, en la que también se comparte motor obligatoriamente. Como este proyecto no considerará nada de la parte motora del prototipo y a pesar de que las simulaciones se hacen en el prototipo último de combustión de US Racing, ya que aún no ha participado en ninguna edición de MotoStudent Electric, este proyecto podrá ser útil para ambas categorías. Como ya se volverá a mencionar posteriormente, las inercias de los elementos internos del motor que rotan no se van a tener en cuenta por simplificar el modelo, porque el reglamento de MotoStudent no permite abrir los motores para obtener sus datos, y porque se consideran no importantes en las simulaciones que se van a hacer.

Además de esa restricción mencionada en el reglamento de MotoStudent, los estudiantes deben cumplir con más condiciones para mantener la igualdad entre los equipos. Se restringen también materiales usados en los distintos elementos de la motocicleta, geometrías límites, valores límites de algunas mediciones y algunos elementos prohibidos para intentar, como se ha dicho, mantener la igualdad entre los equipos y hacer una competición más justa entre equipos con mayores y menores recursos. El contenido de este reglamento no se discutirá en este trabajo porque cambia cada edición y el proyecto tiene carácter didáctico, de forma que los que hagan uso del mismo tendrán que asegurar cumplir las condiciones para competir.

En cuanto a las pruebas de la competición, esta consta de dos partes, llamadas MS1 y MS2:

- En la fase MS1 los participantes simulan la producción en serie del prototipo diseñado. Esta fase pretende ser una oportunidad para que los estudiantes apliquen los conocimientos adquiridos durante sus estudios en un proyecto "real", demostrando los aspectos y las dificultades que ocurren durante un proceso de fabricación industrial y el lanzamiento de un producto al mercado.

- La fase MS2 consiste en una serie de pruebas diseñadas para evaluar el comportamiento dinámico y el rendimiento de la motocicleta que compite, así como las habilidades de los equipos en la mecánica y la organización. Esta fase concluye con la carrera, en la que todos los equipos prueban el trabajo que han realizado frente a otros.

Como se ha comentado en el anterior subapartado, el equipo US Racing otorgó la oportunidad al autor de este proyecto de participar en MotoStudent con ellos, y es por eso el equipo merece su mención en el proyecto:

Desde 2009, US Racing ha participado en la competición MotoStudent representando a la Universidad de Sevilla como primer equipo de esta universidad, con estudiantes de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y la Escuela Politécnica Superior, junto con otros estudiantes de ramas no técnicas como Publicidad y Marketing que se ocupan de tareas económicas, publicitarias y de otro tipo que también son necesarias para que el equipo alcance sus objetivos. Como dato extra, US Racing ha participado en las cinco ediciones de MotoStudent, siempre haciéndolo en las ediciones de motores de combustión.



Ilustración 2 - Parte del equipo animando al piloto minutos antes de la carrera de octubre de 2016 [3]

Como se ha introducido previamente, este es el primer equipo de la Universidad de Sevilla (US) que participa en MotoStudent. El logotipo del equipo se puede ver en la Ilustración 3.

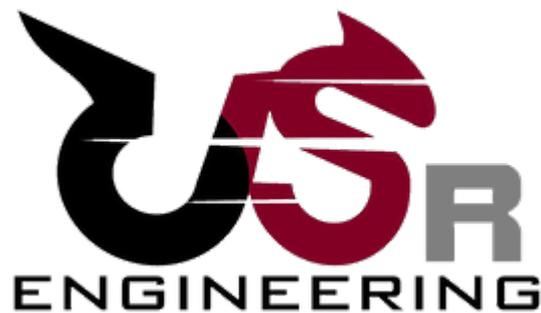


Ilustración 3 - Logo del equipo [3]

1.2 Objeto

El presente trabajo tiene de meta principal, como ya se ha dicho, servir de tutorial para el equipo US Racing para futuras ediciones. El contenido, que va a ser didáctico, será el análisis dinámico de la motocicleta diseñada para la carrera de 2018, como sistema multicuerpo, de modo que el aprendizaje por parte del lector de la metodología de simulación sea más rápido, por ser más directos que aprender a usar las herramientas en general y aplicar lo necesario de ellas. El proyecto se va a centrar en lo más necesario.

Es importante aclarar que ningún resultado del análisis de la motocicleta usada en este proyecto es el objetivo del mismo, si no enseñar cómo obtenerlo por parte de US-Racing en futuras ediciones.

Por tener esta meta didáctica, este documento presentará en la mayor parte del mismo un desdoble de instrucciones a seguir (llamadas “instrucciones directas”) y posteriores explicación (llamada “detalles”) a modo de ampliación de las “instrucciones directas”. El propósito de esto es que un nuevo lector pueda seguir el proceso y entender por qué realiza cada paso, pero si el lector ya está familiarizado con el procedimiento, se limite a seguir las “instrucciones directas” a modo de manual.

El proyecto usa principalmente los programas informáticos de ingeniería asistida por ordenador (CAE) MSC ADAMS, como software de simulación dinámica de sistemas multicuerpo, y CATIA, como software de diseño asistido por ordenador (CAD).

Por esto, el objeto del trabajo es explicar el procedimiento seguido con estos programas, considerados óptimos para realizar los análisis relevantes para el estudio dinámico de la motocicleta diseñada por el equipo US Racing.

Como ya se ha dicho, la motivación surge tras el problema que ocurre en cada edición cuando se diseñan los elementos estructurales basados en escenarios de cargas obtenidos de bibliografías y/o suposiciones que, por desconocimiento e inseguridad, vienen cargadas de coeficientes de seguridad que hacen la motocicleta más pesada y con rigideces no óptimas. Es por eso que surge la motivación de simular la motocicleta en los escenarios principales a los que se verá expuesta y obtener, por tanto, unos elementos estructurales acordes a ellos y optimizar al máximo el diseño del conjunto de la motocicleta.

En una motocicleta de competición se busca la ligereza máxima por varias razones:

1. Una moto más ligera acelerará más rápido que otra más pesada con el mismo motor.
2. Para un mismo rendimiento del motor, necesitaría menos combustible, por tanto menos peso aún. Esto es lo que se busca, por ejemplo, en carreras a máximo recorrido con una cantidad de combustible restringido.

- Una moto más ligera frenará más rápido, o si la tracción es limitante, los frenos recibirán menos sobrecarga porque tendrán que disipar menos energía cinética en forma de calor. Esto es importante porque en competición, la refrigeración de frenos es un gran reto.
- Unas inercias rotacionales mayores en las ruedas harán que se necesite más trabajo para acelerarlas y frenarlas por parte del motor y los frenos, respectivamente. De la misma forma, unas inercias rotacionales mayores del conjunto de la moto exigirán un trabajo extra por parte del piloto durante los giros de vuelco. Además, el aumento de la masa de los elementos “no suspendidos” empeora el rendimiento de la suspensión. En la ilustración 4 se puede ver un esquema simplificado de lo último.

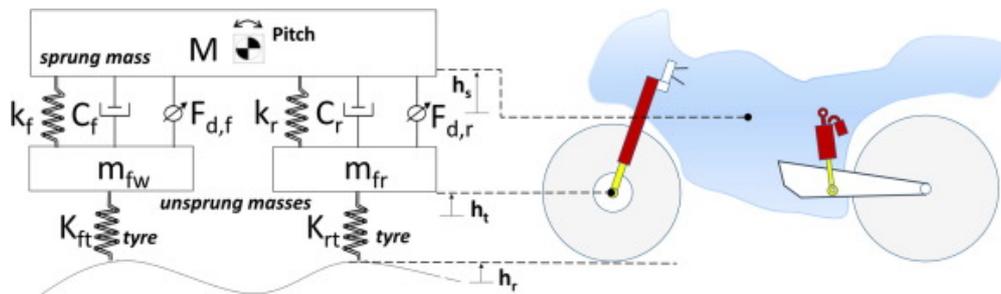


Ilustración 4 - Modelo simplificado de la suspensión de una motocicleta [4]

- Una motocicleta más ligera en comparación con el piloto hace que el peso del piloto sea cada vez más importante en el conjunto moto-piloto. Esto hace que las maniobras que el piloto haga sean trasladadas al conjunto con menor esfuerzo y con mayor rapidez. El piloto será capaz de cambiar más drásticamente el centro de gravedad del conjunto. Esto último es muy importante, ya que la capacidad de modificarlo permite mejores aceleraciones, frenadas y giros. El piloto podrá ajustar con más poder de actuación, por ejemplo, si mueve su peso adelante o hacia atrás para prevenir el levantamiento de la rueda trasera en frenadas o delantera en aceleraciones.
- Una menor masa hace que el neumático trabaje menos. Esto se traduce en menor desgaste para mismo compuesto de neumático o mejor agarre para misma duración del neumático.
- Si la masa del conjunto decrece, los esfuerzos por peso e inercias que generan las masas de los elementos serán menores, por tanto pueden ser más ligeros aun al tener que resistir esfuerzos menores.
- En caso de peso mínimo obligatorio y ser inferior a él, se puede lastrar “al gusto”. Por ejemplo, la inercia a traslación crecería tal como crecería su masa, pero las inercias rotacionales pueden sufrir cambios mayores o menores en función de donde se sitúen los lastres.

La anterior lista de beneficios por aligerar el conjunto de la motocicleta podrá parecer exagerada, pero en competición lo mínimo marca la diferencia, de hecho es posible que no se hayan incluido otros beneficios también importantes de reducir la masa de la motocicleta.

*Aumentar la potencia te hace rápido en las rectas.
Si disminuyes el peso serás más rápido siempre.*

- Colin Chapman -

Por otro lado, la rigidez ante distintos esfuerzos en la motocicleta también es un factor importantísimo. Como cualquier elemento mecánico sometido a esfuerzos, los elementos estructurales de la motocicleta sufren

deformaciones. Lo que se deforma un robusto chasis de una motocicleta puede parecer insignificante pero la realidad es que no. Las fuerzas involucradas en cualquier escenario de la motocicleta son tan grandes que provocan deformaciones más o menos perceptibles por el piloto.

En concreto, la deformación del chasis en curva es de las más importantes, ya que, por el vuelco que adopta la motocicleta, la suspensión no puede hacer su trabajo correctamente. Los elementos estructurales se deforman y hacen también de amortiguadores en curva.

El diseño de los elementos estructurales busca un balance óptimo entre flexibilidad y rigidez:

1. Una mayor rigidez transmite más información de lo que ocurre en la motocicleta porque las fuerzas son transmitidas más fielmente al piloto. Esto es bueno ya que el piloto sabe, por ejemplo, lo cerca que está del límite de agarre de los neumáticos, “lee” el suelo, y en general aporta mucha información al piloto. Obviamente esta información no es utilizable por cualquier piloto, son los mejores pilotos los que son capaces de ir al límite gracias a que pueden “leer” estos datos.
2. Una flexibilidad mayor da más comodidad al piloto, ya que las vibraciones son “amortiguadas” por la capacidad de deformación. Esto es una cosa que destaca de las motos no deportivas, enfocadas a viajar, que buscan el confort del piloto. El problema de estas motos “flexibles” y pesadas, si fueran llevadas a competición, es que dan sensación de falsa estabilidad por el “aplomo” de su peso y por lo poco que percibe el piloto sobre lo que ocurre en la carretera, en comparación con una ligera y rígida moto de competición, que responde mucho más fielmente a las perturbaciones.

Ejemplos de variaciones de estos aspectos que han destacado durante la historia del motociclismo son los tipos de chasis usados, tanto en geometría, como el material empleado. Esto ha hecho a muchos fabricantes tomar ventaja frente a otros. En muchos otros casos, cambios a peor o a algo diferente a lo que el piloto estaba acostumbrado, ha originado la pérdida de puestos.

Como ejemplo, el caso de los chasis monocasco de fibra de carbono de Ducati en MotoGP que introdujeron en 2009. Valentino Rossi se quejaba que este chasis no transmitía la suficiente información de la rueda delantera en carrera, cosa que hizo que no pudiera mantener su historial de victorias con su anterior escudería, donde tenía chasis de doble viga de aluminio como la gran mayoría de equipos. Muchas sospechas apuntaban a que la fibra de carbono hacía más rígido el chasis, transmitiendo tanta vibración/información que cansaba/saturaba al piloto. Pero éstas eran sospechas que no parecían del todo reales, ya que la fibra de carbono es un material muy flexible en cuanto al diseño, puesto que se puede jugar con el tipo de resina y direcciones de las distintas capas de fibra para ajustar las rigideces a lo deseado. Resulta que el problema era que el amortiguamiento de la fibra de carbono era mayor que el del chasis de aluminio y filtraba parte de la “lectura” que el piloto deseaba obtener del asfalto. [5]

Con esta introducción se cierra el primer capítulo de este trabajo, dejando explicados las motivaciones, el objetivo y la explicación de por qué este proyecto es importante para una mejora de la parte estructural de una motocicleta: las correctas rigideces de los elementos estructurales de la motocicleta junto con la ligereza del conjunto ayudan a la motocicleta a ser más ágil y al piloto a dominarla mejor.

2 ESTRUCTURACIÓN DEL MODELO

Para empezar se va a explicar la estructura ideal que debe tener el modelo completo del diseño de la motocicleta, de forma que sea fácil y eficiente sacar datos del modelo para la exportación de los mismos a Adams, y después se va a duplicar el modelo con el fin de tener un modelo para simular (simplificado).

Se hablara de tres modelos:

- Modelo base – Modelo principal del equipo, en el que cada departamento añade su componente para formar la motocicleta
- Modelo completo – Modelo base alterado solamente en la estructura del árbol de Catia. Seria óptimo que modelo base y modelo completo fueran el mismo.
- Modelo simplificado – Modelo basado en el completo pero con mucha parte de elementos no necesarios para la simulación eliminados.

2.1 Modelo completo

Este modelo completo, en este caso, es una copia del modelo original suministrado por US-Racing, alterado solo en la jerarquía de su árbol de componentes. Se sugiere al equipo seguir la estructura de árbol de Catia que se propone aquí como la estructura por defecto, ya que la división de conjuntos propuesta parece bastante lógica y ayudará al departamento que simule la dinámica de la motocicleta a ahorrarse tiempo en cada simulación que necesiten hacer, y no tengan que rehacer el aquí llamado “modelo completo” cada vez que se modifique el diseño.

El hecho de tener el modelo así estructurado agilizará enormemente el procedimiento de obtener masas e inercias de los distintos cuerpos.

2.1.1 Instrucciones directas: Estructura del “modelo completo”

Como se ha dicho, la primera división que va a tener el árbol de Catia va a ser en elementos que se muevan solidariamente. El resto de subdivisiones no es relevante para el proceso de este proyecto y por tanto será el que el equipo decida. En otras palabras, del CATProduct “padre” solo “colgará” directamente los CATParts y/o CATProducts que tengan movilidad entre ellos. Para el modelo analizado, el árbol de Catia a primer nivel quedaría:

1. Rueda delantera: Llanta y neumático delanteros, con el disco de freno y todo lo que se mueva solidario con la rueda.
2. Suspensión delantera inferior: Barras de la suspensión delantera y todo lo que se mueva solidario con ellas: pinza de freno, eje delantero y casquillos
3. Suspensión delantera superior: Botellas de la suspensión delantera junto con las tijas, el eje de la pipa, semimanillares y todo lo que está anclado a ellos.
4. Main Body: Chasis y absolutamente todo lo que esta fijo al mismo: carenado, motor, subchasis, etc. Como no se disponía de un modelo por partes del amortiguador trasero, se ha introducido en este conjunto para aportar masa al conjunto completo. El amortiguador debería introducirse como dos subconjuntos que se mueven entre sí como la suspensión delantera si se dispusiera de los modelos por partes.
5. Basculante junto lo que se mueva solidario a él, como la pinza trasera de freno, tensores de cadena y el eje trasero.

6. Triángulos del Sistema de bieletas de la suspensión trasera.
7. Barras del Sistema de bieletas de la suspensión trasera.
8. Rueda trasera: Llanta y neumático traseros con la corona trasera, el disco de freno y cualquier otro elemento que se una solidario a ellos.

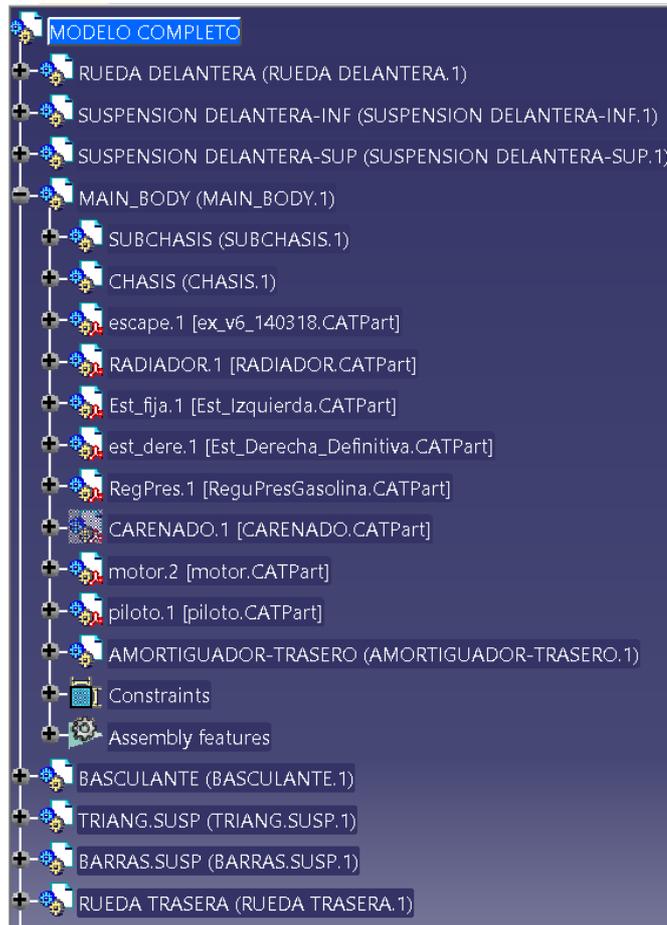


Ilustración 5 - Árbol de Catia con la organización ideal para los análisis dinámicos, con una expansión en el subconjunto fijo al chasis a modo ilustrativo

2.1.2 Detalles: ¿Cómo crear una copia exacta de un modelo de Catia a otro directorio?

Si el modelo de la motocicleta no ha sido estructurado de la manera sugerida en el anterior apartado por alguna razón, habrá que hacer una copia del mismo para modificarlo sin que las modificaciones en uno afecten al otro. Para esto, se recomienda usar la operación “Send to directory” (File → Send to → Directory) que tiene Catia, mostrado en la Ilustración 6. Esto creará una copia en el directorio especificado, duplicando los archivos que queramos modificar (los que quedan en el cuadro inferior llamado “will be copied”) y dejando el link al archivo original en los que no queramos duplicar (cuadro superior, “can be copied”).

Esto último puede ser útil si se quiere dejar el link a los CATParts originales, ya que, en el caso que la estructura del modelo base no sea la deseada para el “modelo completo”, solo se necesitará modificar la estructura del árbol, y eso es controlado por los CATProducts. Los CATParts (e incluso algunos CATProducts que contengan conjuntos como, por ejemplo, el de las pinzas de freno y todos sus componentes (pastillas, tornillos, etc...) que no necesiten una modificación de su estructura por no intervenir como mecanismo) quedarán en el cuadro “Can be copied” y la copia que estemos creando no duplicará esos archivos, manteniendo el link a ellos. En el apartado 2.2.2 se muestra un ejemplo de la aplicabilidad de esta operación para el modelo simplificado.

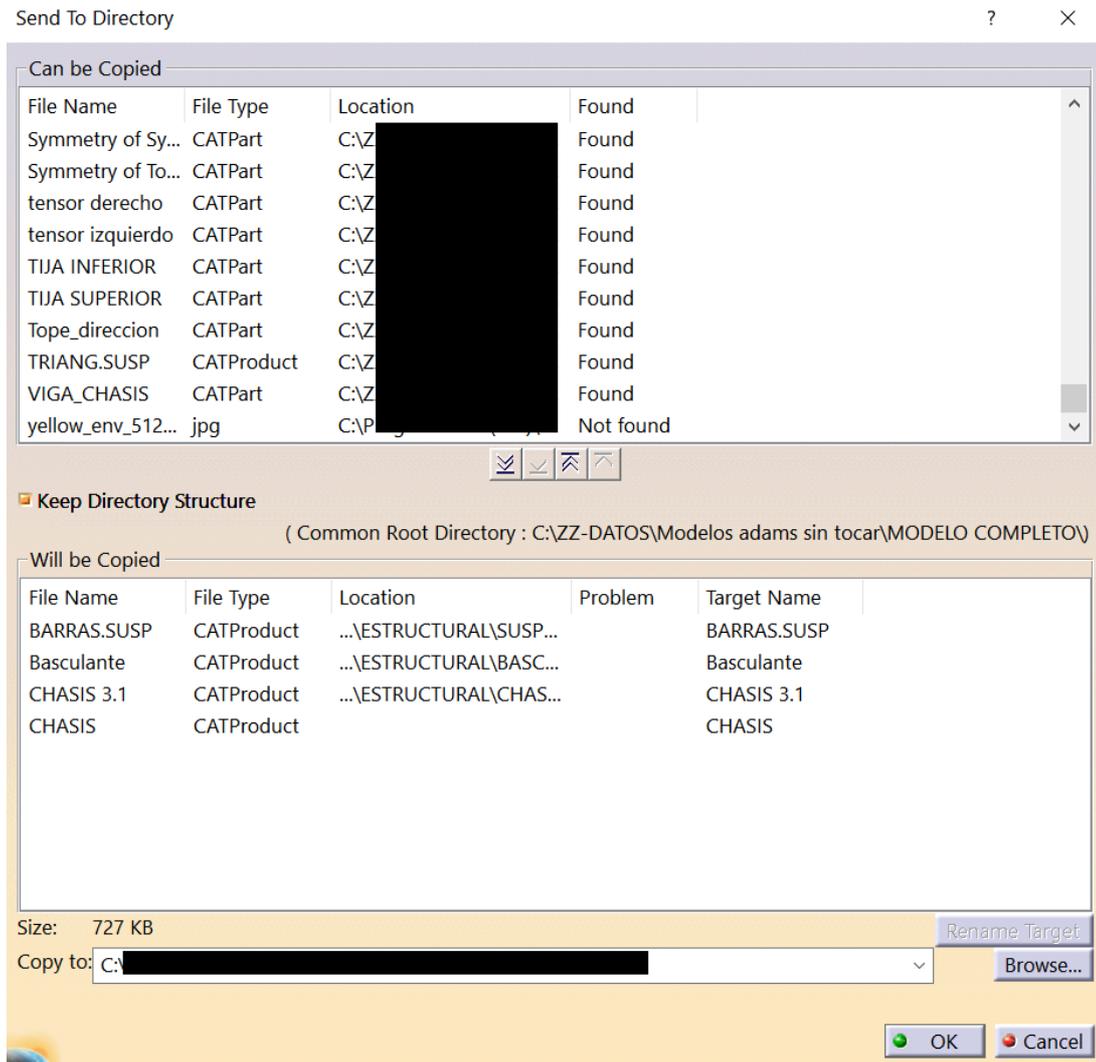


Ilustración 6 - Send to directory

Al duplicar, cualquier modificación de los componentes duplicados no afecta al modelo “base” y viceversa. La desventaja es que, para mantener el modelo completo actualizado, habrá que rehacer este paso cada vez que se cambie el diseño de la motocicleta y este afecte a los archivos duplicados. Esta es la razón por la cual se recomienda tener la estructura sugerida en el apartado anterior para el modelo principal de la motocicleta, ya que ahorrará mucho trabajo repetitivo.

2.1.3 Detalles: ¿Por qué dividimos el primer nivel jerárquico así?

ADAMS va a resolver ecuaciones de restricción de los pares cinemáticos, por tanto cualquier elemento que vaya totalmente fijo a otro debe ser considerado el mismo cuerpo para no añadir restricciones y aumentar la complejidad del sistema innecesariamente. Solo en el caso en el que se quiera investigar los esfuerzos que sufren unas uniones fijas, interesará hacer una división con más subelementos (ver apartado 2.2.4).

2.2 Modelo simplificado

El modelo simplificado va ser lo que exportemos a ADAMS. Este modelo debe tener el mínimo contenido de datos 3D. Se partirá de una duplicación del modelo completo. Para la duplicación se recomienda seguir lo explicado en el apartado 2.1.2 y tener en cuenta el 2.2.2 para eliminar al máximo el trabajo repetitivo a la hora de rehacer análisis con modificaciones que pueda tener la motocicleta durante el desarrollo de su diseño.

2.2.1 Instrucciones directas: Simplificación del modelo para ADAMS

En este paso se va a simplificar al máximo la duplicación creada del modelo completo, eliminando todo lo innecesario. A continuación, se numeran los distintos conjuntos (CATProducts) de primer nivel según la Ilustración 7. Estos grupos contendrán ahora exactamente lo mencionado aquí, habiendo sido el resto eliminados de esta duplicación del “Modelo Completo”:

1. Rueda delantera: Llanta y neumático delanteros
2. Suspensión delantera- Inferior: Barras de la suspensión delantera
3. Suspensión delantera- Superior: Botellas de la suspensión delantera junto con las tijas
4. Main Body: Chasis
5. Basculante
6. Par de triángulos del Sistema de suspensión
7. Par de barras del Sistema de suspensión
8. Rueda trasera: Llanta y neumático traseros

Para más detalles o alternativas a esto, ver los siguientes apartados subapartados.

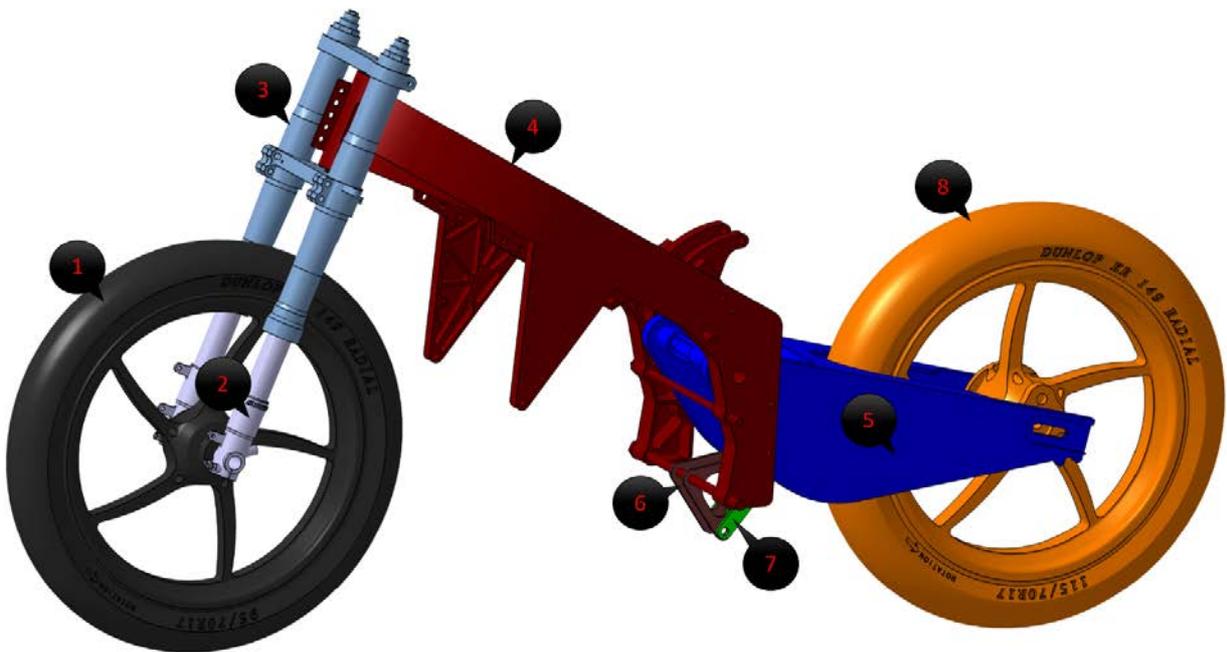


Ilustración 7 - Modelo simplificado

2.2.2 Detalles: duplicación del modelo en simplificado y completo

Realmente no es necesario duplicar el modelo, se podría trasladar toda la geometría a ADAMS, pero esto va aumentando el tiempo que necesita ADAMS para importar la geometría innecesariamente y dificulta la selección de elementos en el momento de creación de pares cinemáticos y demás. Además, es muy posible que las simulaciones tarden más en realizarse y/o afecten a la fluidez de sus visualizaciones. Estos componentes innecesarios se podrían borrar de los cuerpos importados a ADAMS para eliminar el impacto de los mismos, a excepción del tiempo de importación, pero la interfaz de Catia hace esto mucho más fácil.

También se puede usar el mismo “modelo completo” y desactivar en Catia los elementos del modelo completo que no se quieran trasladar a ADAMS, pero se ha considerado mucho más sencillo hacer una copia del modelo completo y eliminar todo lo innecesario. Este modelo tendrá los mismos subconjuntos a primer nivel que el modelo completo, pero estará en ellos solo lo necesario para importar a Adams.

Es necesario mencionar, aunque pueda ser una información básica, que un CATProduct contiene esencialmente la siguiente información:

- Directorio de los CATParts y/o “sub” CATProduct que contiene: por tanto, si los CATProducts X e Y contienen al elemento Z en su árbol, si se modifica Z, la modificación se verá en X e Y porque lo único que hacen es “llamar” a Z.
- Posiciones en el espacio de los elementos que contienen, de tres maneras:
 - Con restricciones entre los elementos del mismo CATProduct: las más típicas son las de coincidencia (p.ej. coincidencia de ejes o caras) y distancia o ángulo entre elementos. En este caso se reajustará automáticamente ante modificaciones del modelo, porque mantendrá las restricciones verdaderas siempre que existan las caras, ejes, etc. que definen la restricción, y si estas desaparecen CATIA pedirá al usuario asistir esta falta mostrando un aviso.
 - Sin restricción o con anclado ( : fijación de todos los grados de libertad): CATIA solo guardará las posiciones y orientaciones de los sistemas de ejes de cada uno de los “hijos” del CATProduct, de forma que si la pieza cambia, no se moverá acorde a ello, su sistema de ejes se mantendrá en su sitio.
 - Si algunos elementos están restringidos pero no por completo (p.ej. un eje y su agujero con coincidencia de eje pero sin restringir posición o giro en ese eje), la actualización de la posición no está asegurada ya que existen grados de libertad. CATIA mantendrá las coordenadas libres de su sistema de ejes tal como estaban antes de la modificación, ya que no hay restricción que fuerce a moverse acorde a ello. Esta es la razón por la que se deben crear restricciones que dejen la posición y orientación totalmente definida.

Con esta explicación se entenderá mejor por qué se recomienda duplicar el modelo completo para el simplificado de la siguiente manera:

Se recomienda realizar la operación “Send to- Directory” explicada en el apartado 2.1.2 sin duplicar ningún CATPart, y solo duplicando los CATProduct que van a ser “limpiados”. A continuación se expone como ejemplo cuáles se han duplicado (y renombrado) en el caso del modelo usado en este proyecto:

Will be Copied				
File Name	File Type	Location	Problem	Target Name
BARRAS.SUSP	CATProduct	...\ESTRUCTURAL\SUSP...		BARRAS.SUSP
Basculante	CATProduct	...\ESTRUCTURAL\BASC...		Basculante
MAIN_BODY	CATProduct	...\ESTRUCTURAL\CHAS...		MAIN_BODY
MODELO COMPLETO	CATProduct			MODELO COM...
RUEDA DELANTERA	CATProduct	...\ESTRUCTURAL\RUED...		RUEDA DELAN...
RUEDA TRASERA	CATProduct	...\ESTRUCTURAL\RUED...		RUEDA TRASERA
SUBCHASIS	CATProduct	...\ESTRUCTURAL\SUBC...		SUBCHASIS
SUSPENSION DELANTERA-INF	CATProduct			SUSPENSION ...
SUSPENSION DELANTERA	CATProduct	...\ESTRUCTURAL\SUSP...		SUSPENSION ...
TRIANG.SUSP	CATProduct	...\ESTRUCTURAL\SUSP...		TRIANG.SUSP

Ilustración 8 - Send to directory mostrando los archivos que se duplicaran

La razón de por qué se han duplicado CATProducts como “RUEDA TRASERA” y los demás, es porque se aligerarán mediante la eliminación de los elementos que no veamos necesario visualizar en los análisis en Adams. Por ejemplo, en la rueda trasera eliminaremos la corona trasera y el disco de freno, por tanto, si no duplicamos el product, está eliminación afectará al modelo completo. Sin embargo, si la llanta, por ejemplo,

cambia en el modelo completo, el modelo simplificado verá esos cambios porque el CATPart de la llanta no ha sido duplicado, y, por tanto, ambos products lo llaman.

Otro ejemplo, esta vez a nivel de subproduct, es el subchasis, un subproduct del “Main Body” que contiene elementos útiles en la simulación (soporte del amortiguador trasero), y elementos pesados e innecesarios que se han eliminado, como el colín.

Por otro lado, no es necesario duplicar CATProducts como el conjunto de pinzas de freno porque, o bien van a ser borrados del modelo simplificado, como es el caso de las pinzas, o bien van a ser mantenidos tal cual están en el modelo completo, como es el caso del Chasis.

Profundizar en la eliminación al nivel de quitar elementos como soportes del carenado en el CATProduct del chasis afectan poco al tiempo de importación a Adams, mientras que elementos del product “Main Body” como el Carenado sí impactan mucho al ser superficies complejas. Lo exhaustiva o liviana que sea la limpieza del modelo para el modelo simplificado es decisión del departamento que se dedique a realizar los análisis dinámicos, en función de la potencia de sus ordenadores y el tiempo del que dispongan.

De esta forma no será necesario volver a hacer esta duplicación si, durante la evolución del diseño de la motocicleta, solo hay cambios en elementos no duplicados, o se añaden elementos no necesarios para el modelo simplificado. A modo de ejemplo, se muestra en la Ilustración 9 como el chasis y sus componentes, al no ser duplicados en la operación “Send to directory”, es llamado por los dos modelos y por tanto cualquier modificación va a ser vista por ambos.

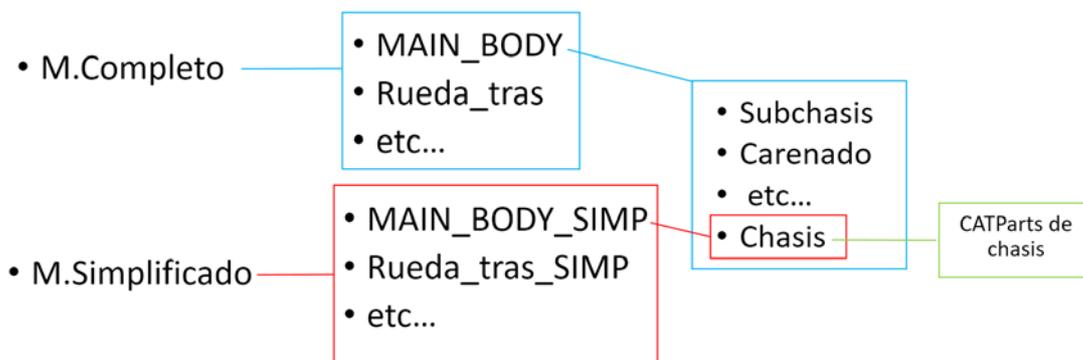


Ilustración 9 - Esquema de enlaces entre el modelo completo, el simplificado y sus "hijos"

2.2.3 Detalles: Simplificación exhaustiva del modelo

El modelo simplificado se puede simplificar aún más de lo mostrado aquí. Se pueden simplificar los modelos existentes para reducir la carga gráfica del modelo, por ejemplo, eliminando los vaciados del chasis y haciéndolo más simple.

El modelo se puede simplificar tanto que podríamos solo poner centros de masas de cada elemento, incluir los puntos que definen los pares cinemáticos y la superficie de los neumáticos para modelar el contacto con el suelo. Adams no necesita sólidos siempre que tenga masas e inercias y los puntos/superficies donde se modelan las restricciones.

A menos que se disponga de un equipo con prestaciones muy bajas y esto sea necesario, las razones por las que no merece la pena hacer esto son las siguientes:

- El linkado entre un modelo y otro no sería posible o no sería tan fácil, ya que los CATParts sí serían distintos en estos casos.
- La visualización en Adams de los elementos ayuda mucho a la hora de crear los pares cinemáticos.

- Observar cómo se mueve la motocicleta es vital para verificar que las restricciones se han configurado correctamente. Esto es más difícil si no se representa un mínimo de elementos del modelo real.

2.2.4 Detalles: Posibles alteraciones

Si se quisiera analizar los esfuerzos que una unión fija tiene que soportar en algún escenario, de forma mantenga su restricción de movimientos relativos nulos, estos cuerpos tendrán que ser añadidos al modelo simplificado como elementos de primer nivel aparte, para tomarlo como un sólido independiente, y crear una restricción de fijación entre ellos. Para entender esto mejor, se propone el siguiente ejemplo sencillo:

Obtención de esfuerzos en el soporte del depósito de líquido de frenos por fuerzas inerciales del mismo durante una gran frenada:

En la realidad, el depósito va fijo porque existen las siguientes uniones atornilladas: depósito – soporte, soporte – semimanillar, semimanillar – tija. Para que Adams calcule los esfuerzos que esas uniones atornilladas sufren hay que incluirlos como cuerpos separados con una restricción de fijación completa entre ellos. Si, por el contrario, se incluyen todos en un mismo cuerpo, Adams no calculará estos esfuerzos. En este ejemplo, solo queremos evaluar las reacciones que afectan al soporte. Por esto, solo habría que incluir en el modelo el soporte y el depósito por separado del conjunto “Botellas de la suspensión”, fijándolo a este último. No sería necesario incluir nada más (por ejemplo el semimanillar), ya que con modelar el punto donde se va a aplicar la restricción es suficiente. En la siguiente ilustración se muestra en transparente todo lo que no sería necesario introducir en el modelo. Aunque el depósito y su soporte quedaran “en el aire”, Adams no interpreta el modelo que se visualiza, si no las restricciones que él crea: Si se fija en esa posición el conjunto depósito-soporte al conjunto superior de la suspensión delantera (las botellas) es suficiente.

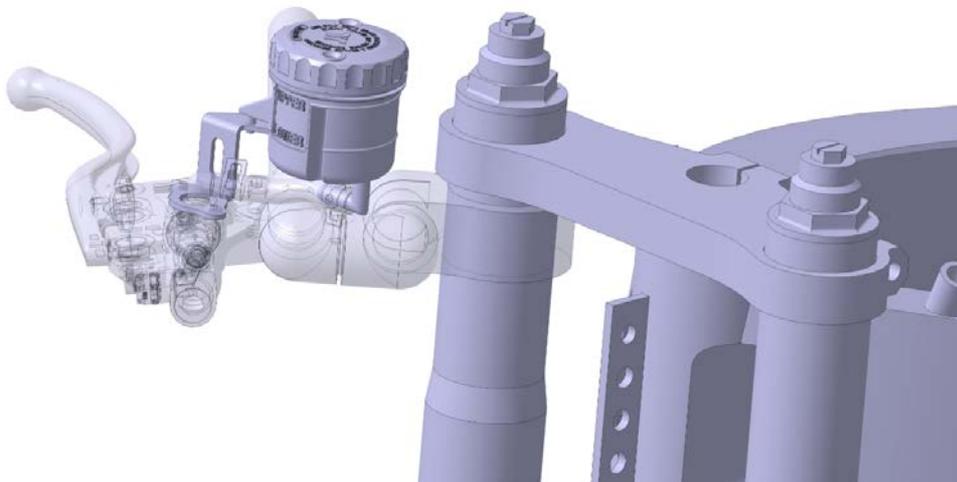


Ilustración 10 - Elementos involucrados en el ejemplo. Elementos no necesarios en transparente.

Para crear la restricción “Fijación” Adams necesitará un punto correspondiente a la posición de la restricción (por ejemplo el punto medio entre los dos tornillos que fijan la unión). Para más detalles, en el apartado 3.1 se explica cómo se introducen estos puntos necesarios para Adams y en el capítulo 6 cómo se aplican restricciones en el modelo exportado a Adams.

Para analizar si el soporte resistirá el escenario de cargas, se podría introducir solamente el soporte en el programa de análisis estructural, empotrando el extremo que va al depósito y aplicando las reacciones obtenidas en la unión fija con el conjunto “Botellas”. En otras palabras, crear el escenario desde el punto de vista del sistema de referencia del depósito. Esto se hace porque las fuerzas obtenidas ahí serán la suma de las fuerzas

inerciales del mismo soporte más las del depósito. Sin embargo, si empotramos donde se une el soporte con el semimanillar, y aplicamos la reacción en el extremo donde se conecta al depósito, obviaremos las fuerzas inerciales del soporte. Esto se puede ver en la siguiente ilustración:

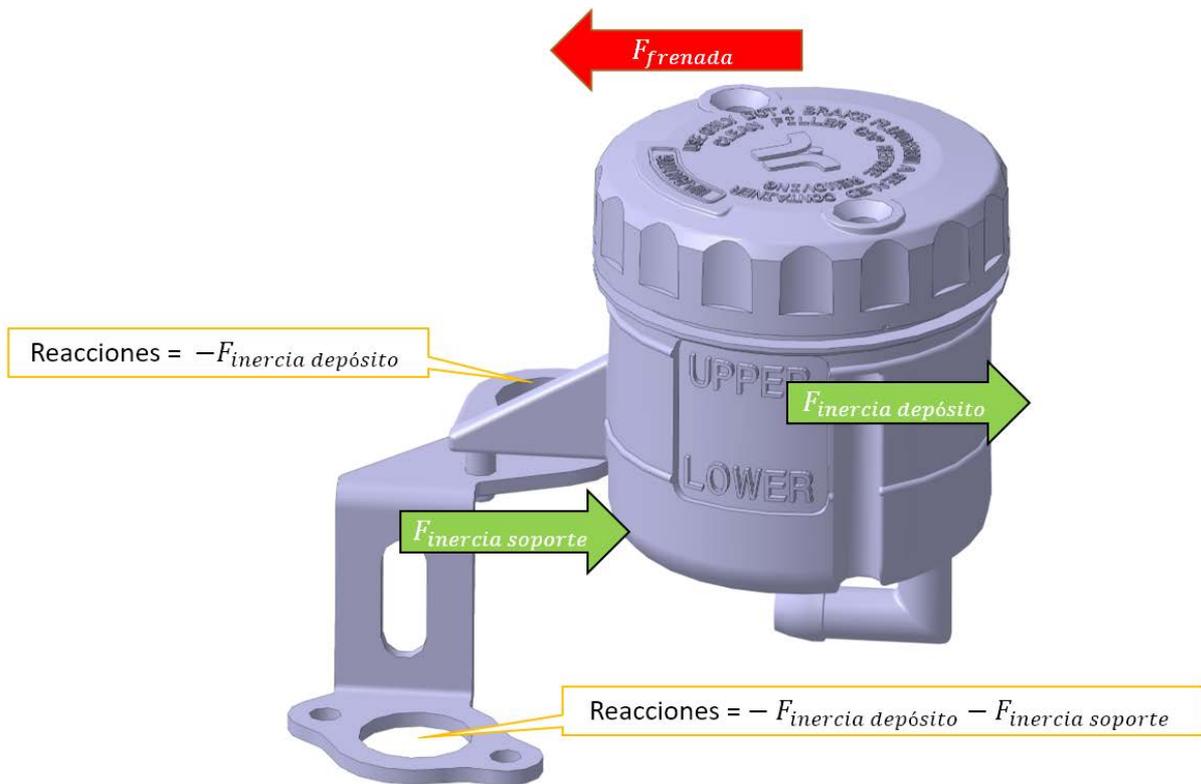


Ilustración 11 - Esquema de fuerzas en el ejemplo explicado

3 INTRODUCCIÓN DE PUNTOS PARA LOS PARES CINEMÁTICOS

Una vez estructurados y creados los modelos, en el modelo simplificado se van a introducir pares de puntos cuyo vector que los une, definirá los ejes de los pares cinemáticos en Adams. Como estos puntos son necesarios para Adams, trabajaremos en el modelo simplificado por ser el modelo a exportar. En la mayoría de los casos, y si se han seguido los consejos del apartado 2.2.2, estos puntos se crearán en CATParts que son compartidos entre Modelo Completo y Simplificado. Por esto, será posible trabajar en cualquiera de ellos, aunque será más sencillo hacerlo a través del modelo simplificado por tener menos elementos.

Se necesitarán, por cada par cinemático, dos puntos que definan sus ejes, representados en las ilustraciones en naranja. Además, necesitaremos dos puntos para los elementos muelle-amortiguador en cada una de las suspensiones, trasera y delantera, representados en las ilustraciones en azul. La explicación del apartado 3.5 expone la influencia de la localización de estos puntos en los resultados. El apartado 3.6 incluye detalles para entender por qué se ha definido ese número de pares cinemáticos y puntos.

3.1 Instrucciones directas: Creación de puntos para definir los pares cinemáticos

Antes de explicar este apartado, es importante mencionar que interesará añadirlos dentro de Geometrical Sets (GS), ya que Adams no siempre importará los puntos fuera de éstos. En el apartado 3.2 se explica cómo crear puntos dentro de un GS.

Como otra nota anterior a la explicación del apartado, se presentarán imágenes con varios CATParts (por ejemplo el chasis de esta edición está formado por varios CATParts dentro de un CATProduct). En estos casos, los puntos se introducirán en el CATPart más representativo del par cinemático (por ejemplo, en el CATPart de la pipa de la dirección se incluirán los puntos de ese par cinemático). En el apartado 3.2 se explica la importancia de en qué CATPart incluir los puntos con más detalle. Para ayudar a reconocer los puntos en Adams se recomienda dar nombre a puntos y GS tal como lo explica el apartado 3.2.

Partiendo de la base de la explicación previa hecha, se describe a continuación la geometría a crear para cada par cinemático:

1. Desde el chasis a la rueda delantera:
 - Par de revolución en la pipa de la dirección, entre chasis y tijas: un punto en el punto medio del eje de la pipa y otro punto cualquiera en el mismo eje. Ver Ilustración 12.

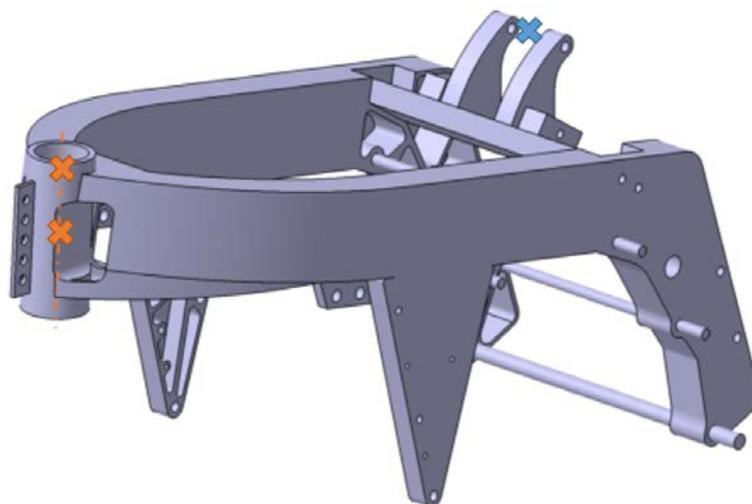


Ilustración 12 - Chasis con los puntos del par cinemático en la pipa y el punto para la suspensión trasera

- Pares cilíndricos en la suspensión delantera (barra-botella): representado como un solo par prismático en el centro, con dos puntos en un eje imaginario, paralelo a los ejes de las botellas, justo en el medio de los dos. Ver Ilustración 13. Ir al apartado 3.6 para más detalles sobre estos pares cinemáticos.
- Elemento muelle-amortiguador de la suspensión delantera: los puntos anteriores podrán ser usados también para este elemento, por tanto, conviene ponerlos en puntos que representen lo mejor posible el recorrido del amortiguador: el punto superior en el centro del círculo donde entran las barras en las botellas y el punto inferior en el fin de las barras, ya que será el punto inferior límite, tal como se ve en la Ilustración 13.

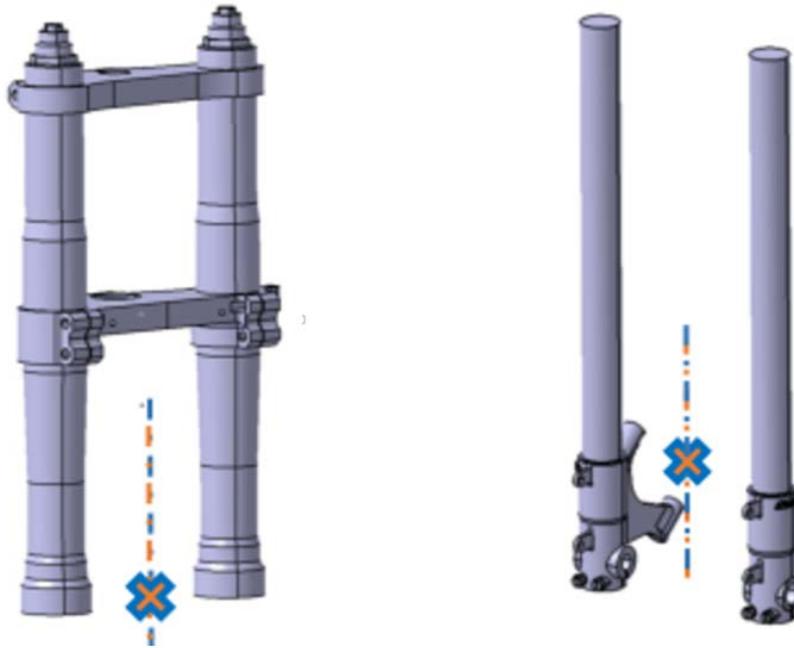


Ilustración 13 – A la izquierda, las botellas de la suspensión delantera con el punto combinado para modelar sus dos pares cilíndricos y su muelle-amortiguador A la derecha, las barras de la suspensión delantera con el punto combinado para modelar sus dos pares cilíndricos y su muelle-amortiguador.

- Par de revolución de la Rueda delantera con las barras de la suspensión delantera: dos puntos en el eje de la rueda, uno de ellos en el punto medio del eje (ver Ilustración 14).



Ilustración 14 - Rueda delantera con los puntos en su eje de rotación

2. Del chasis a la rueda trasera:

- Amortiguador trasero: un punto en el centro del eje de la cogida del amortiguador en el chasis (ver punto azul en la Ilustración 12), y otro punto, también en el centro del eje, entre los triángulos (ver punto azul de la Ilustración 15).

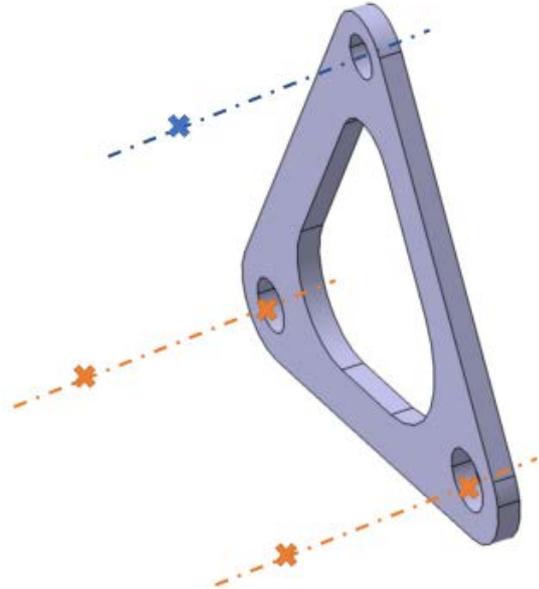


Ilustración 15 – Uno de los triángulos, con los pares de puntos que definen los ejes de sus pares de revolución y el punto azul del amortiguador

- Pares de revolución chasis – triángulos: dos puntos en su eje, uno de ellos en el punto medio (ver Ilustración 15).
- Pares de revolución barras – triángulos: dos puntos en el eje de rotación, uno en su punto medio (ver Ilustración 15).
- Pares de revolución chasis – basculante: dos puntos en este eje, uno de ellos en el punto medio (ver Ilustración 16).

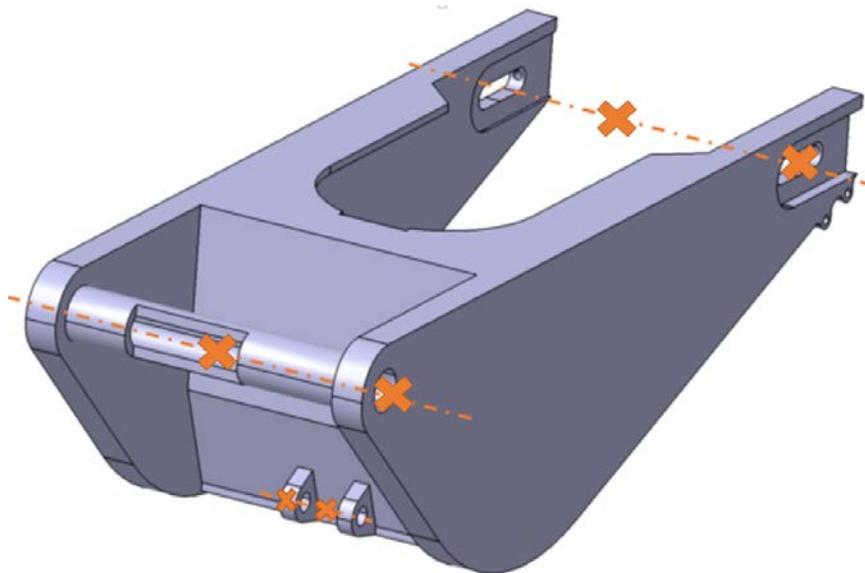


Ilustración 16 - Basculante con las parejas de puntos correspondientes a los pares de revolución a los que se conecta.

- Pares de revolución basculante – rueda trasera: dos puntos en el eje de revolución, uno de ellos en su punto medio (ver Ilustración 16).
- Pares de revolución barras – basculante: dos puntos en el eje, uno de ellos en el punto medio del eje (ver Ilustración 16).

3.2 Detalles: Creación de puntos dentro de un GS

Un Geometrical Set (GS) no es más que un elemento que agrupa geometría auxiliar de un CATPart (puntos, líneas, superficies, etc...) para mejorar la organización del mismo, pudiendo, por ejemplo, dejar el PartBody solo con operaciones sólidas (extrusión, vaciado, etc...).

Para introducir un GS en un CATPart solo habrá que desplegar el menú “Insert” y seleccionar la opción “Geometrical Set...”.

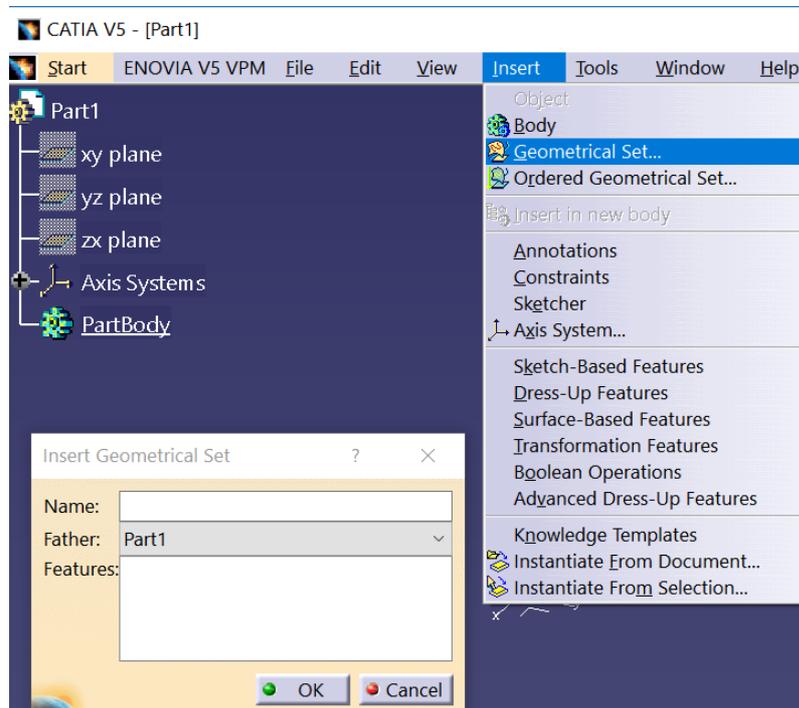


Ilustración 17 - Introducción de un GS en un CATPart

Tras esto solamente se necesitará:

- Un nombre – Para el nombrado de los GS's se recomienda seguir lo explicado en el apartado 3.3.
- Elegir dónde se introducirá: Father. Puede introducirse en el CATPart (elegiríamos el nombre del CATPart en cuestión, Part1 en la imagen), en el PartBody o dentro de otro GS previamente creado.

Después de esta operación, Catia pondrá por defecto el GS creado como “In work object” o como elemento de trabajo, apareciendo subrayado, tal como aparece “PartBody” en la Ilustración 17. Esto hará que cualquier elemento que creemos se introduzca en él.

Si queremos cambiar esto, solamente tenemos que hacer click derecho en el que queramos definir como nuevo “elemento de trabajo” y seleccionar “Define in work object”:

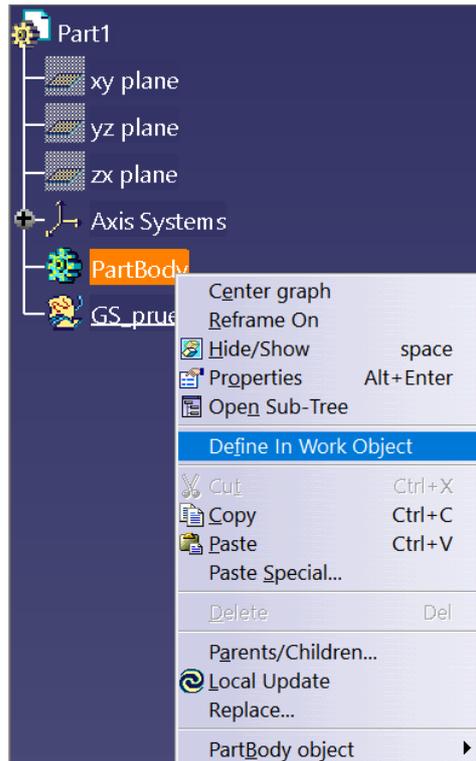


Ilustración 18 - Define in Work Object del PartBody

Es conveniente notar que los GS solo admiten elementos geométricos, no operaciones sólidas. Por esto, si tenemos un GS como elemento de trabajo e intentamos hacer una operación sólida nos mostrará un aviso que va a cambiar al PartBody como elemento de trabajo.

3.3 Detalles: Nombrado de puntos y GS's

Adams va a exportar todo los elementos por separado y habrá que unirlos una vez en él. El nombre que Adams va a dar a los elementos dentro de GS's será: "Nombre del GS" _ "Nombre del elemento". Por esta razón, la mejor forma de llamar a los GS's es:

3. Si los elementos serán usados en Adams:
 - "Componente al que pertenece" - "Tipo de elemento", con "Tipo de elemento" siendo:
 - PAR-"Componente con el que forma el par": para el GS que tiene exclusivamente los elementos para definir un par cinemático.
 - INERTIA: para el GS que tiene exclusivamente los elementos que se incluirán en el apartado 4.2 sobre centros de masas y sistemas de ejes para las inercias.
4. Si los elementos no van a ser usados en Adams (Geometría auxiliar), se podrán dejar con el nombre por defecto, así cuando los veamos en Adams, sabremos que podemos borrar todo lo importado que se llame de una manera distinta a la establecida anteriormente.

Para los puntos exportados, el nombrado recomendado es el siguiente:

- "1" para el primer punto creado para los pares.
- "2" para el segundo punto creado para los pares.
- "CM" para el centro de masas.
- "X" o "Y" para los puntos en el eje X/ eje Y del sistema de ejes de referencia que se creará.

A continuación se muestra un ejemplo de esta nomenclatura:



Ilustración 19 - Nomenclatura de puntos y GS's en el neumático delantero, con el GS de Inertia y el del par de revolución de la rueda y el conjunto inferior de la suspensión delantera.

3.4 Detalles: Influencia de la elección de los CATParts que contendrán los puntos

El hecho de colocar puntos en un CATPart u otro no hace diferencia en Adams, ya que importará todos los sólidos y geometrías auxiliares como elementos separados entre sí. Sin embargo, es muy importante que se incluyan en alguno de los CATParts mostrados en las ilustraciones del apartado 3.1, porque otros componentes serán eliminados en la creación del modelo simplificado, y por tanto no quedarían importados.

Además, los puntos deben ser añadidos permanentemente a los CATParts, de forma que mantengan un vínculo con el mismo (por ejemplo: el vínculo “punto medio” con una línea), y cambien de posición si el diseño es alterado. Por esta razón se recomienda añadir los puntos a los CATParts que sean menos propensos a ser sustituidos/eliminados durante el desarrollo del prototipo, ya que ahorrarán crear los puntos de nuevo.

A continuación se muestra un ejemplo de cómo se podría crear los puntos del par de revolución rueda- barras de suspensión delantera:

Se insertan dos puntos definidos como el centro del principio de la banda de rodadura del neumático en ambos lados:

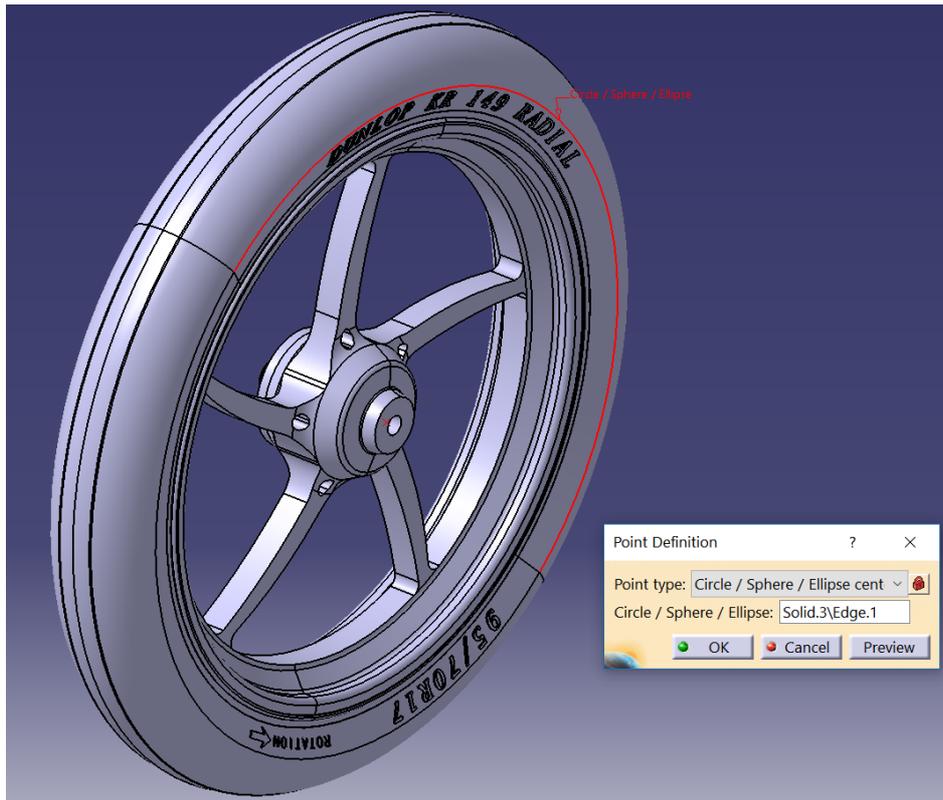


Ilustración 20 - Creación de puntos simétricos respecto al centro de la rueda

A continuación se crea una línea que pase por ellos:

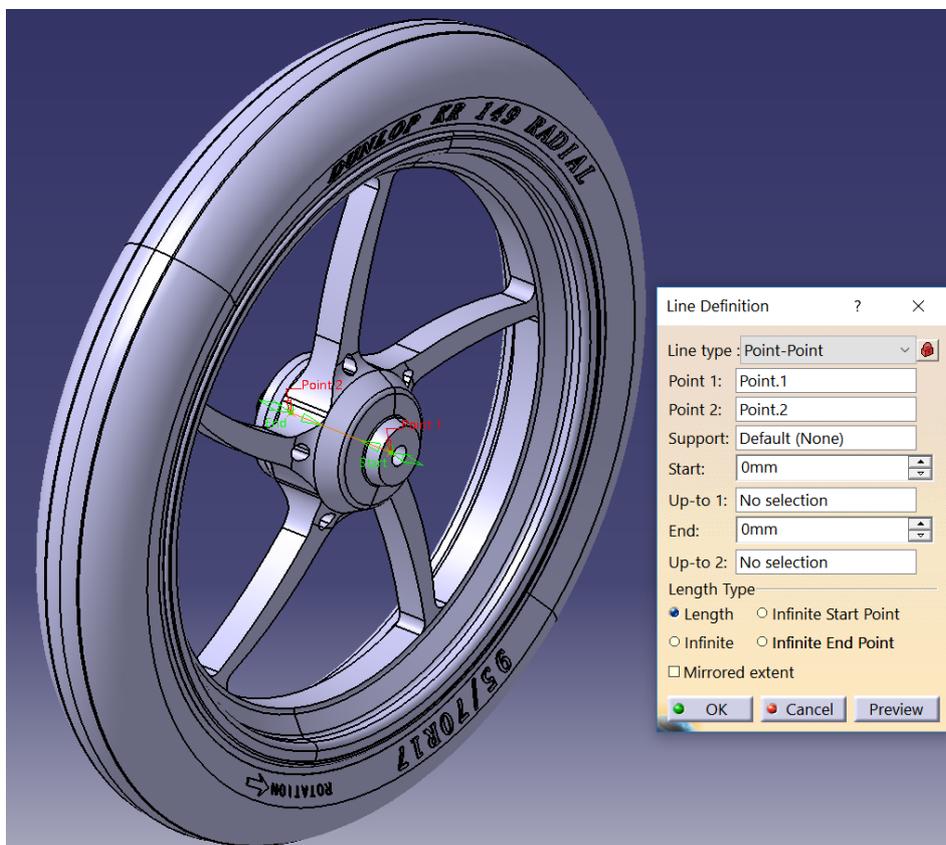


Ilustración 21 - Línea que une los puntos creados

Por último se crea un punto en el centro de la línea creada:

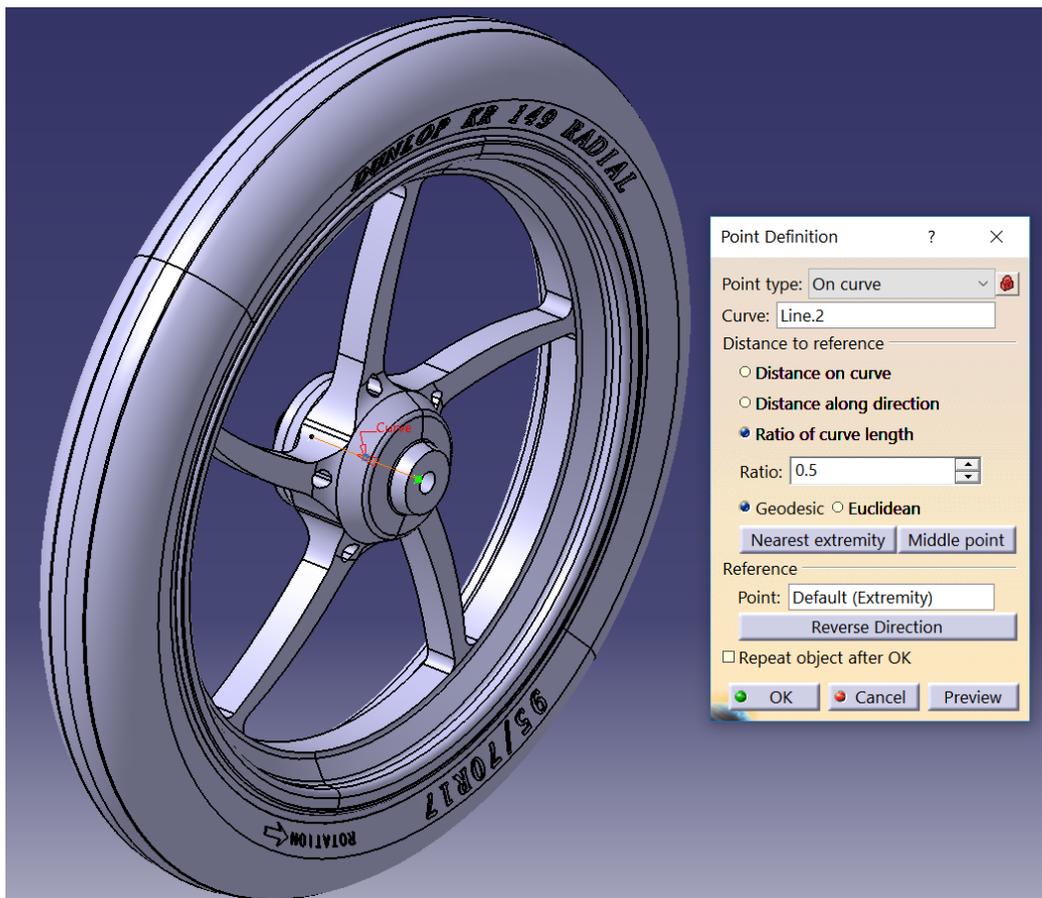


Ilustración 22 - Punto medio de la línea creada

De esta forma, mientras que la rueda sea simétrica (que sería extraño que no lo fuera), el punto estará en el centro de la rueda ante cualquier modificación de la misma, y para cualquier análisis dinámico que se haga, no se tendrá que crear estos puntos de nuevo.

En el caso del punto de la rueda trasera, se ha hecho en el basculante porque coincide que el punto medio de ambos brazos del basculante es también el punto medio de la rueda. En el caso que no fuera o que puedan existir modificaciones del basculante a lo largo del desarrollo del diseño, podría interesar vincular el punto a la rueda para que siempre se mantenga en su lugar.

Estos puntos se pueden quedar en un “Geometrical set” ocultos para que no estorben durante el diseño, pero estén siempre asociados a los CATParts del modelo.

3.5 Detalles: Influencia de la localización de los puntos

Para los pares cinemáticos hemos elegido dos puntos que definen el eje, y para las suspensiones los puntos de anclaje.

En los pares, la elección del segundo punto es indiferente, siempre que este esté en el eje infinito que define el par cinemático en cuestión. Es el primer punto el que es importante. Este punto es donde Adams va a crear la restricción y es donde las fuerzas/momentos de restricción van a ser calculadas.

Esto es importante mencionarlo, ya que el objetivo de estos análisis es obtener los esfuerzos que sufren los elementos estructurales durante distintos escenarios típicos en carrera, de forma que se puedan evaluar tensiones, deformaciones, efectos de fatiga y demás. Por ello, las reacciones obtenidas en Adams tendrán que ser introducidas en el modelo en esas mismas localizaciones en los análisis estructurales, o trasladadas convenientemente manteniendo la física del problema.

A continuación, se describe un ejemplo simple del posible traslado de estas reacciones a un modelo de análisis estructural. Este ejemplo no incluye instrucciones en ningún programa de Análisis estructural concreto, por tanto las instrucciones siguientes solo explican la física que habría que modelar en el programa pertinente:

Partiendo de las reacciones del par basculante-rueda trasera, resultado de un escenario con la moto vertical, apoyada sobre sus ruedas en parado, se procede a analizar los efectos que al basculante provocan:

1. El basculante se fija en su eje de unión al chasis, a excepción del grado de libertad “rotación” a través de ese eje. De la misma manera, se fija el eje que se conecta al sistema de suspensión.
2. A) Se empotra el modelo del eje de la rueda trasera al basculante en su posición, y se le aplica exactamente los esfuerzos obtenidos en Adams en el punto exacto que se ha elegido (el punto medio de ese eje en este proyecto). En la siguiente ilustración se puede ver cómo se aplica la fuerza (en rojo) al eje (mostrado solo como una línea discontinua).

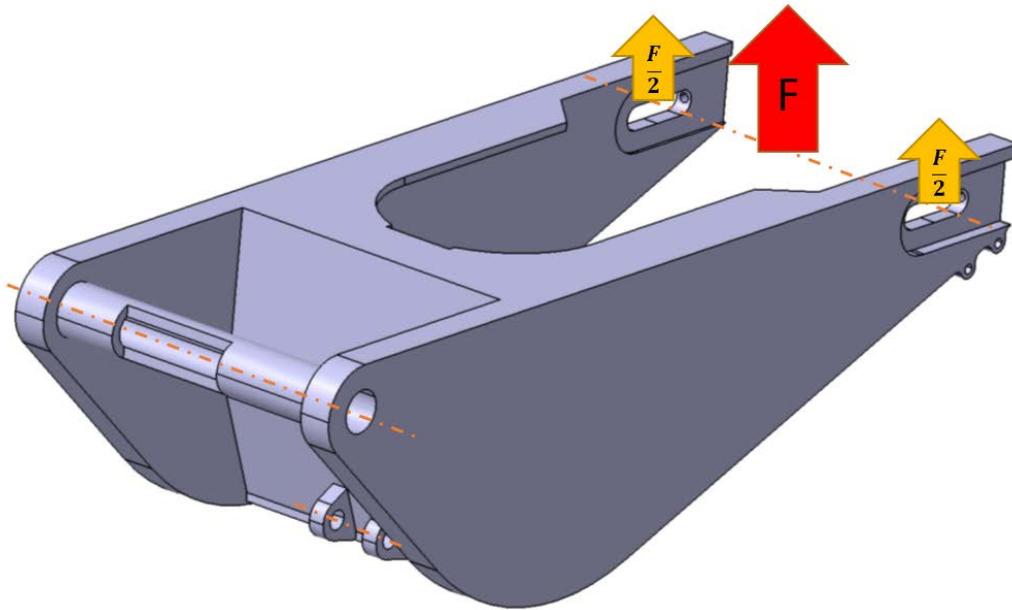


Ilustración 23 - Esquema de condiciones de contorno del escenario ejemplo y sus dos posibles aproximaciones

2. B) Simplemente extrapolar y repartir los esfuerzos a cada brazo. En el caso de colocar el par cinemático justo en el centro, hace fácil su reparto si se asume que los esfuerzos son repartidos equitativamente (suposición que tiene bastante sentido para basculantes simétricos y este escenario). En la ilustración previa se muestran estas fuerzas en amarillo.

Es posible que la opción 2A sea más real en la mayoría de los casos, ya que en la opción B puede ocurrir que ambos brazos se deformen independientemente sin mantener la restricción que el eje aporta, cosa que en la realidad no ocurre.

Se podría incluso modelar el eje como un sólido rígido, si se quisiera simplificar el modelo y obviarlo del estudio, ya que el eje se encuentra apoyado en su mayoría (en rodamientos dentro de la rueda, casquillos, etc.), por lo que su flexión se puede considerar nula para este efecto.

Todas estas consideraciones serán competencia de los miembros que se dediquen al cálculo estructural de la moto, y es por esto que los que realicen el estudio de la dinámica de la motocicleta deben acordar donde conviene situar estos puntos.

Habrán otros puntos, como los de elementos que la organización MotoStudent proporciona y no permite su modificación, o elementos comprados, cuyo par cinemático no es de interés, por lo que la localización de estos puntos, mientras definan el eje que describe el par cinemático, es indiferente.

Esto es porque, realmente, la transmisión de esfuerzos es la que importa, y que los esfuerzos estén transmitidos correctamente lo asegura simplemente que los ejes estén bien situados, sin importar donde este su punto. Por eso, en elementos que no interese analizar, como pueden ser las barras de suspensión, el modelo se puede simplificar para facilitar el modelado y la resolución del mismo.

Por ejemplo, el eje del par prismático de la suspensión delantera podría ser cualquiera, mientras tenga la dirección del eje real de la suspensión y esté contenido en el plano que definen ambos ejes de los conjuntos botella-barra si los esfuerzos de ese par cinemático no nos son de interés.

Un ejemplo de esto se muestra en el dibujo de la Ilustración 24, en la que dos modelos distintos de suspensión van a transmitir a la pipa de la dirección los mismos esfuerzos, a pesar de que sean distintos y sus pares sufran esfuerzos distintos. El ejemplo absurdo y exagerado de la izquierda sufriría unos momentos flectores en todos sus elementos, que hace “sin sentido” diseñar una suspensión así, pero, en ambos casos, la pipa vería los mismos esfuerzos en ella para un mismo escenario de cargas en la rueda delantera.

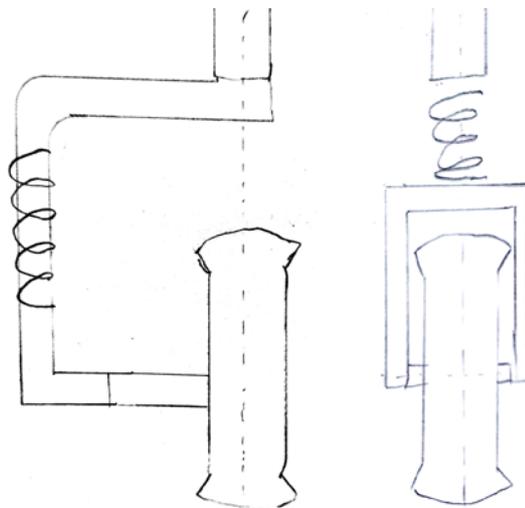


Ilustración 24 - Dos modelos de suspensión distintos que transmiten los mismos esfuerzos a la pipa de la dirección

3.6 Detalles: ¿Por qué esos pares cinemáticos?

El análisis que se va a desarrollar en este trabajo es de sólido rígido. Esto significa que dos restricciones redundantes van a hacer que la cinemática del modelo no se vea afectada (mientras que sean compatibles y describan un mecanismo posible), pero hará que los esfuerzos de las restricciones se repartan de forma no real. Las pruebas realizadas muestran que Adams asigna todos los esfuerzos a la primera restricción creada, y deja la segunda “descargada”, cosa que no representa la realidad.

Por esta razón, en pares como los de las barras de la suspensión delantera, se modela como un solo par prismático con un solo amortiguador, a pesar de que la realidad se acerca más a un par cilíndrico con un amortiguador en cada uno de los conjuntos barra-botella.

Esto es porque, desde el punto de vista del sólido rígido, en el conjunto de la suspensión delantera una barra solo le añade la restricción a la contraria del giro alrededor de su eje, ya que el desplazamiento en su eje, al ser ambos paralelos, es una restricción redundante.

Por tanto, el conjunto se comporta como un solo par prismático.

4 OBTENCIÓN DE DATOS INERCIALES PARA ADAMS

En el siguiente paso se explicará cómo obtener los datos de masas e inercias de los elementos para la simulación. Para ello, se harán distintas modificaciones en el modelo completo para que sea más sencillo esta exportación de datos y, así, pueda actualizarse fácilmente durante la evolución de la motocicleta.

4.1 Aplicación de materiales

Para que Catia calcule inercias, masas y centros de masa (CM) necesita tener un sólido que tenga aplicado una densidad. Para asignar densidades, se aplicará material a los distintos elementos.

4.1.1 Instrucciones directas

Durante este paso nos encontraremos con varias dificultades. A continuación se muestran las principales, con su solución propuesta o la forma sugerida de tratarlos:

1. CATParts "multi-material" :
 - Subdividirlo en un CATProduct con varios CATParts de un solo material cada uno.
 - Crear varios PartBodies dentro del CATPart y aplicarle el material correspondiente a cada uno.
 - Como última opción, aplicar una densidad media, obtenida por su masa real (medida) y el volumen que calcula Catia. Para más detalles de aplicación de densidades "personalizadas" ir a la sección 4.1.2.
2. CATParts "cáscara", en los que solo conocemos su geometría exterior y/o existen elementos o líquidos en su interior que se mueven/rotan (como suele pasar con el motor y las suspensiones). En estos casos, lo que se ha considerado óptimo en precisión/complejidad es:
 - Pesar esos componentes y aplicar un material aleatorio modificado cuya densidad haga que la masa coincida con la medida. Esta densidad se puede calcular fácilmente, ya que CATIA proporciona el volumen calculado de la pieza. En elementos de importancia relevante (pesadas), se podría, si se viera necesario y posible, hacer medidas para aproximar el centro de masas y las inercias.
 - En el caso de geometrías no sólidas (elementos cáscara escaneados en 3D como el carenado o el motor, por ejemplo) es muy recomendable simplificar el modelo de cáscara, si fuera posible, y hacerlo sólido/macizo. Esto conseguirá más precisión y evitará que superficies dobladas sobre sí mismas falseen los resultados o creen problemas. Esto se explica en el apartado 4.1.3.
3. Elementos no modelados:
 - Modelar elementos que aproximen la forma de los mismos, y obtener sus propiedades como en el punto anterior.
4. Piloto: el piloto se ha modelado mediante los maniqués de Catia, en la postura típica del piloto. Una vez definida la postura, se aplicará el proceso segundo del apartado 4.1.3 para hacerlo sólido y aplicarle una densidad media, que resulte en el peso que el piloto real tiene, estando equipado con todas las protecciones para competir.

4.1.2 Detalles: Aplicación de densidades personalizadas

Si necesitáramos añadir una densidad distinta a las de la librería de Catia, es tan sencillo como modificar las propiedades del material aplicado en el componente en cuestión. En la Ilustración 25 se muestra cómo se ha modificado la densidad del material Goma (“Rubber”) para los neumáticos para que su masa coincida con la realidad:



Ilustración 25 - Modificación de la densidad del material goma "Rubber"

Importante mencionar, que si se aplica el material A los elemento X e Y se modifican las propiedades del material en el elemento X, los cambios solo afectarán a ese elemento, a pesar de que ambos van a mostrar que tienen aplicados el materia A, por lo que no debemos preocuparnos de que estas modificaciones estén afectando a otros elementos con el mismo material aplicado. El material, una vez aplicado a un elemento, es personalizable e independiente.

4.1.3 Detalles: Obtención de sólidos a partir de elementos cáscara

A continuación, se muestran dos formas que cierran la superficie. Después, se describe una operación común a ellas para “rellenar” de sólido las superficies cerradas previamente. Por último se menciona una solución para cuando ambos métodos fallan, como fue el caso del carenado.

La experiencia durante este proyecto ha llevado a las siguientes preferencias para escoger un método u otro, en función de la pieza a tratar:

- El maniquí solamente se puede tratar con el segundo método, porque este no tiene superficies que Catia pueda unir, por tanto hay que crearlas previamente con este método.
- Piezas que realmente son tipo lámina con una forma, como el carenado escaneado, dan malos resultados (o incluso no llega a darlo) con el segundo método, por lo tanto es más adecuado el primero.
- Sólidos como el motor, que no son elementos delgados como el carenado, y tienen muchas irregularidades (el motor tiene muchos detalles y, sin embargo, el carenado es una superficie relativamente suave) merece la pena hacer le procedimiento segundo (más largo), ya que se puede elegir el nivel de detalle que se quiere conservar. Esto es beneficioso porque el coste gráfico de representar el modelo, tal como lo proporcionaron esta edición, era muy grande, y era enormemente reducido tras este proceso, no existiendo diferencia notable de rendimiento entre tenerlo mostrado o no, cosa que sí pasaba antes de la simplificación.
- Ante la posibilidad de hacer cualquiera de los métodos, o que no exista preferencia aparente según lo previamente comentado, el segundo método permite aligerar el modelo muy considerablemente a costa de una pérdida de detalle seleccionable. Esto puede ser útil en partes complejas, de las cuales se

necesitan pocos o ningún detalle, pudiendo ser sustituidos por la geometría simplificada por este método, más ejes y/o puntos que definan los detalles necesarios (por ejemplo, los ejes de las cogidas del motor).

Si ambas opciones fallan, acudir al apartado 4.2.4.

4.1.3.1 Detalles: Cerrar superficies directamente con el módulo de superficies

En el módulo Wireframe and Surface Design hay dos operaciones, Unir (Join ) y Reparar (Heal ), que permiten cerrar un conjunto de superficies que forman una cáscara. La primera simplemente las une, y la segunda trata de rellenar los huecos que pueda haber entre ellas, por lo que se recomienda usar directamente Heal. Hay parámetros de ajuste, pero ante errores principalmente hay que jugar con “Merging distance” o “distancia de unión”, que especifica lo cerca que Catia va a considerar que dos superficies separadas por una discontinuidad de tamaño determinado tienen que ser unidas, y ser consideradas una continuación una de otra.

A continuación se muestra cómo se hizo para unir la superficie escaneada del colín:

- Se seleccionó todo el Geometrical Set de las superficies.
- Se aplicó una operación “Heal” para cerrar las superficies. con los parámetros mostrados.

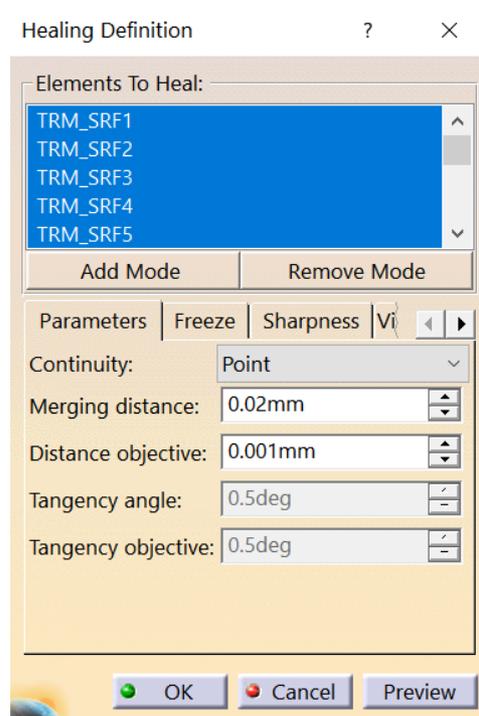


Ilustración 26 - Operación "Heal"

Es necesario mencionar que Catia permite aplicar densidad superficial a un elemento no sólido como este, y obtener su peso basado en el área y su densidad superficial. El problema es que Catia obvia las superficies cuando hay sólidos y superficies a la vez en la medida. Por esto, en un CATProduct en el que estuvieran mezclados elementos sólidos y superficies, solamente nos mostraría la masa e inercias de los sólidos, sin avisar que está obviando las superficies.

4.1.3.2 Detalles: Envoltura (Wrap) del modelo

En el módulo Digital Mockup/DMU Optimizer existen una operación llamada “Wrapping” () o envoltura, que extrae toda la cáscara exterior como si se envolviera la pieza en papel, por medio de un mallado de triángulos.

A continuación se muestra cómo ejemplo la operación que se realizó al product del piloto con el casco:

- Se seleccionó el conjunto piloto y el casco.

- Se eligió, probando con varias, el tamaño de grano (Grain) para, así, escoger la calidad que se consideró óptima, según los detalles de visualización que se querían mantener, el peso del resultado y demás.

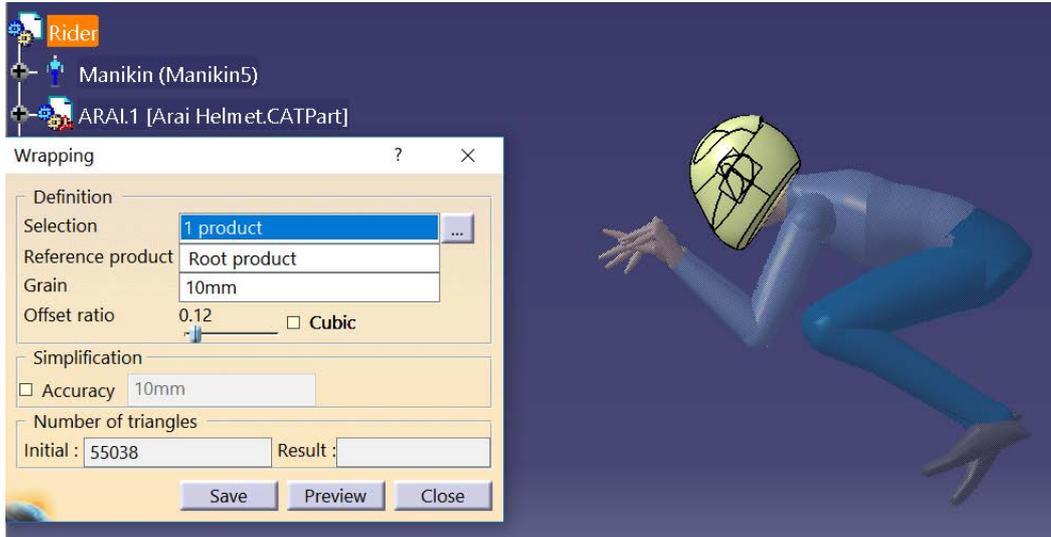


Ilustración 27 - Operación "Wrapping" en el conjunto del piloto en su postura con su casco

- Una vez termina de procesar el "Wrapping", se guardará el resultado como archivo MODEL.
- Abriremos este archivo, hacemos doble click en "*MASTER" y copiamos "*SET1".

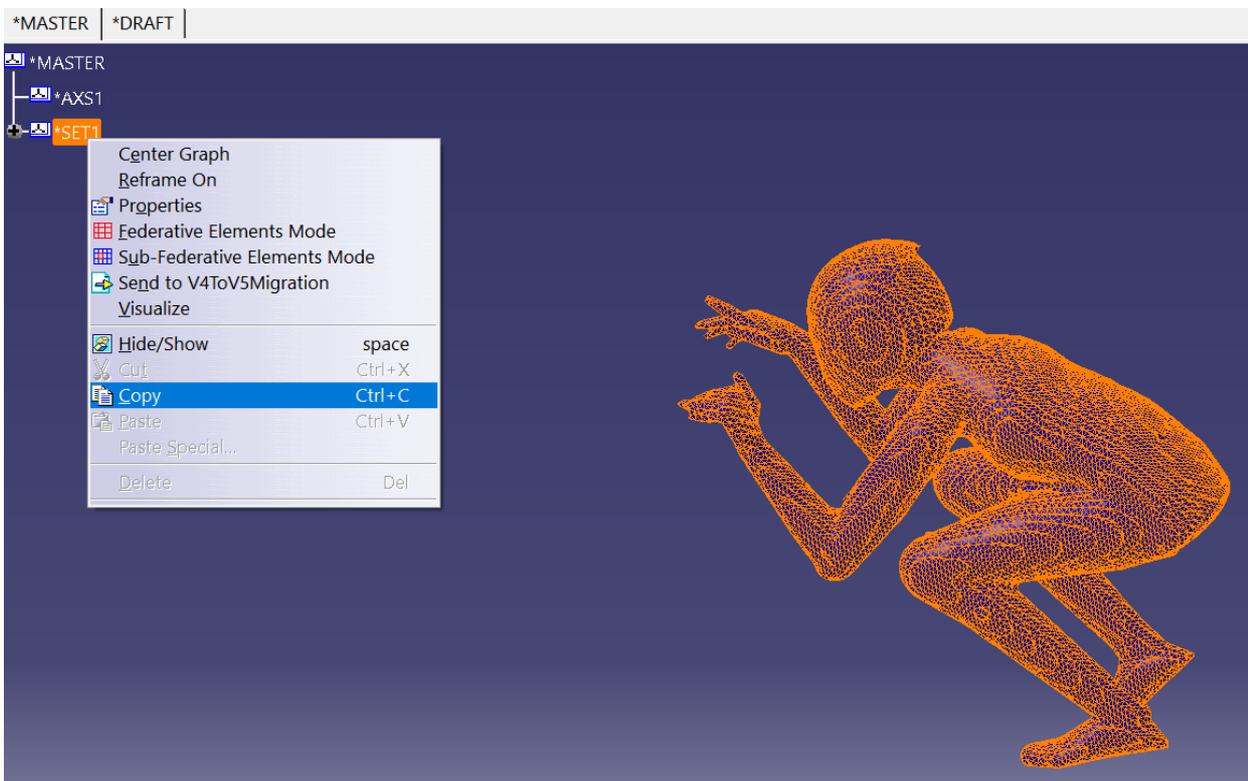


Ilustración 28 - Copiado del modelo de triángulos

- En un CATPart nuevo, pegamos con "Paste Special..." como "CATIA_RESULT" para copiar todos los triángulos creados.

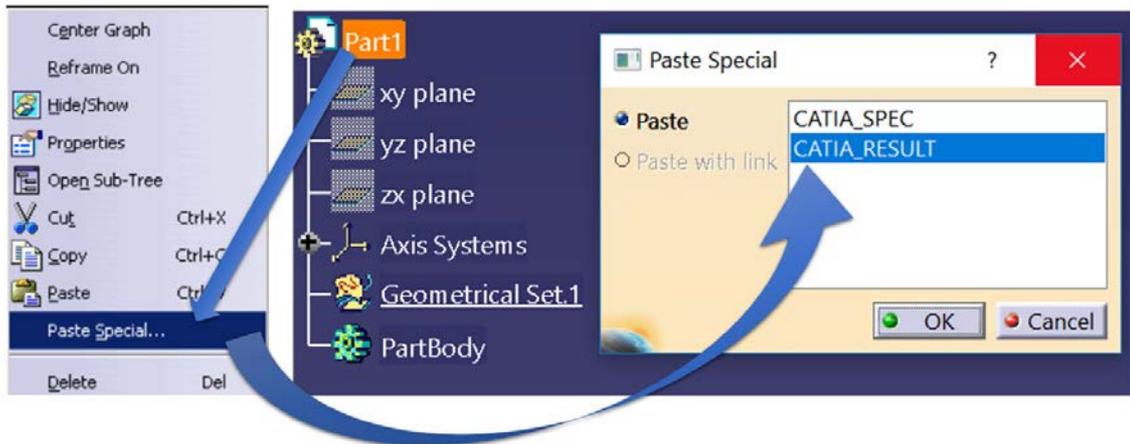


Ilustración 29 - Pegado especial como resultado

- Proceder a unirlos con Heal como se ha explicado en el método anterior.

4.1.3.3 Rellenar CATPart “cáscara” para hacerla sólida

Una vez tenemos una cáscara cuyas superficies forman una sola, ya se puede convertir en un sólido. Para esto usaremos la operación “Close Surface” o “Thick Surface” (Dentro del Part Design Workbench) aplicada en nuestra superficie unida en los pasos anteriores, en función de lo siguiente:

- Si como resultado de los pasos anteriores tenemos un conjunto de superficies que forman nuestro elemento pero no cierran entre sí, como por ejemplo el carenado, que es una lámina siguiendo una forma, lo que queremos hacer es aplicar un espesor a esta superficie con “Thick Surface”. Catia te ofrece dar espesor en ambas direcciones normales a la superficie con “First offset” y “Second offset”:

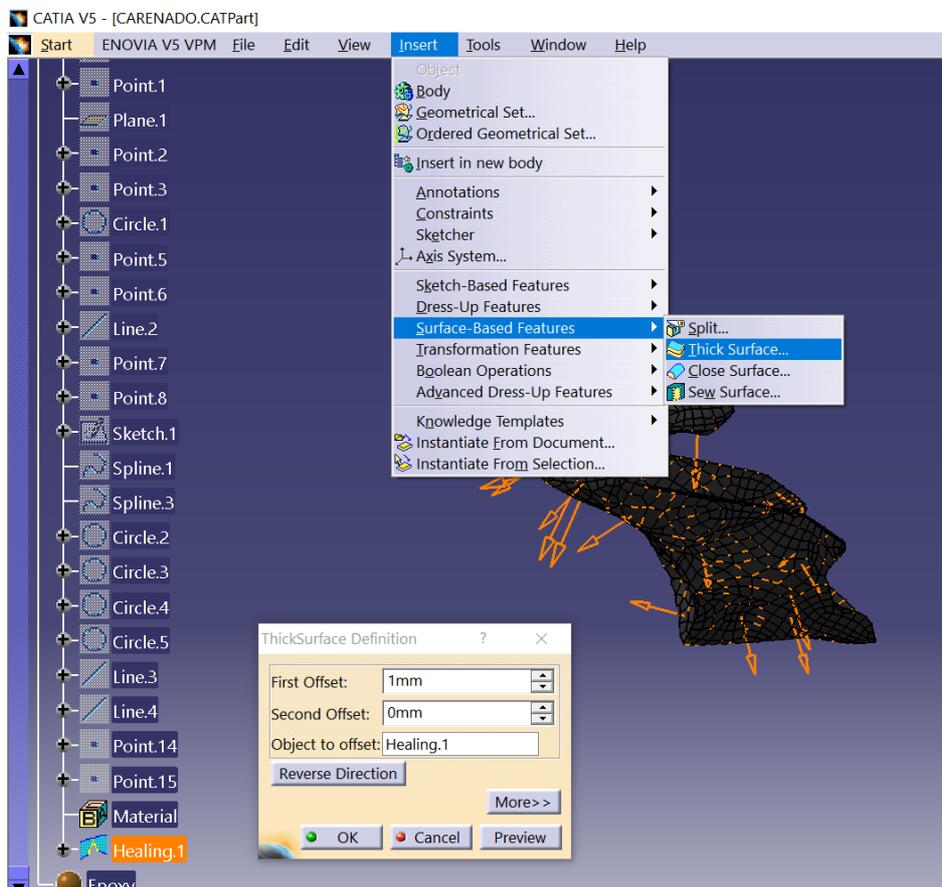


Ilustración 30 - Operación "Thick surface"

- Sin embargo, si nuestras superficies cierran entre sí para formar un elemento sólido, por ejemplo las superficies externas del motor o el piloto, lo que queremos es rellenar el espacio vacío entre las superficies. Esto se hará con la operación “Close Surface”.

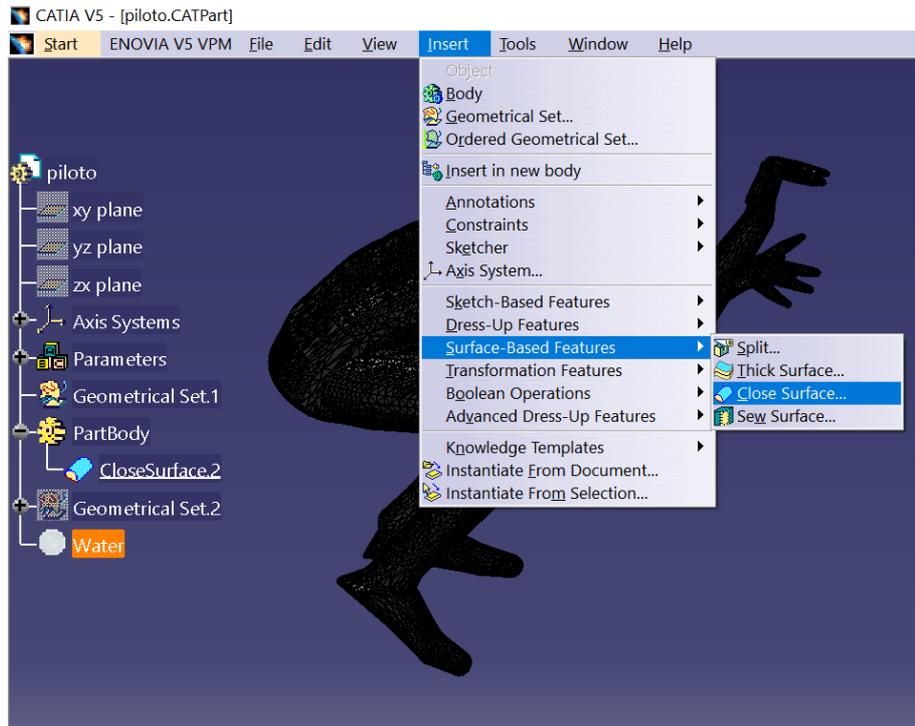


Ilustración 31 - Operación "Close Surface"

- En el caso que tengamos errores que no podamos arreglar durante esta operación, una opción es dejar las superficies como tal, y aplicar una densidad tal que, la densidad multiplicada por la superficie, equivalga a la masa medida de la pieza en cuestión. Catia usa el mismo valor de densidad volumétrica que superficial, es decir, si aplicamos acero, por ejemplo, la superficie pesara 7850kg/m^2 . Simplemente, con ajustar ese valor, el elemento superficie tendrá la masa del componente real. A modo orientativo, el carenado tiene una masa de 5kg para una densidad de 1.5kg/m^2 .

4.2 Obtención de los centros de masas e inercias.

Como último paso antes de pasar a Adams, se necesita obtener los datos inerciales de los sólidos. Para esto, se van a extraer los centros de masas de cada subconjunto de primer nivel (los que se definieron en el apartado 2.1.1 con movimiento solidario entre sí), y se va a crear puntos para definir el sistema de ejes donde se van a medir las inercias.

4.2.1 Instrucciones directas: Centros de masas

Una vez tengamos las densidades aplicadas, se creará un punto en el centro de masas (CM) y tres puntos para crear un sistema de ejes en Adams, donde expresar las inercias calculadas por Catia. Se hará en el CATPart más representativo de cada CATProduct de primer nivel (los definidos en el apto. 2.1.1), porque será el menos propenso a ser reemplazado. Pueden usarse los mismos donde se crearon los puntos en el apartado 3.1, así esos CATParts contienen todos los puntos. Cabe repetir que crear puntos y GS's con nombres es muy importante, ya que la cantidad de puntos que se exportará a Adams será tan grande, que será difícil identificarlos si no están correctamente nombrados. En el capítulo 3.2 se dieron recomendaciones de cómo hacer este nombrado.

El siguiente ejemplo muestra cómo crear un punto en el CATPart “Llanta_delantera”, en el CM del CATProduct “RUEDA DELANTERA”:

- Mediremos masa e inercias del CATProduct con la herramienta “Measure Inertia” (junto a las otras herramientas de medida).

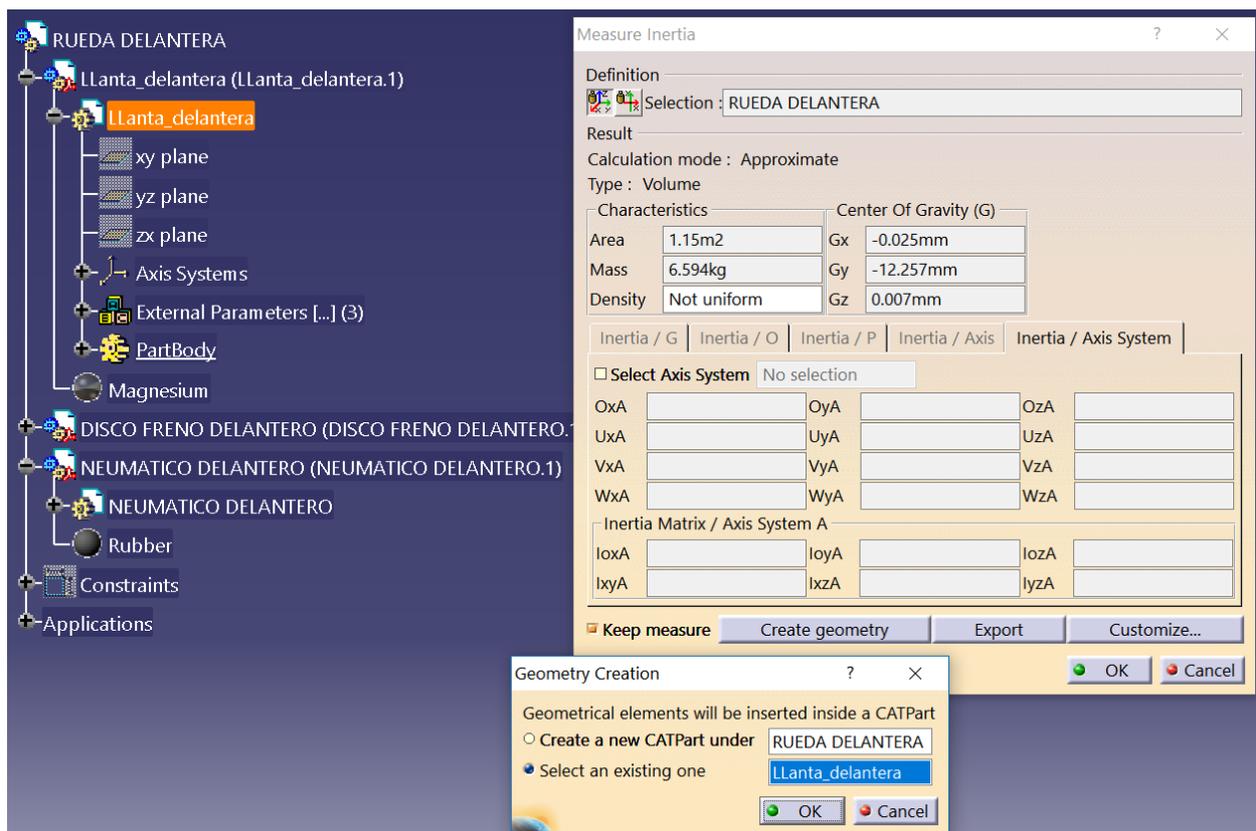


Ilustración 32 - Introducción del CM de la Rueda delantera en el CATPart “Llanta delantera”

- A continuación haremos click en “Create Geometry”
- Seleccionaremos la opción “Select an existing one” y seleccionaremos el CATPart donde queremos grabar el CM.
- Por último, elegiremos la opción “Associative geometry” para que el CM se mantenga actualizado y haremos click en “Center of gravity” y “OK”.

Después de esto, repetiremos el proceso pero con la opción “Non-associative geometry”, y comprobaremos si ambos puntos coinciden. Si coinciden, podremos borrar este último y pasar al apartado 4.2.2.

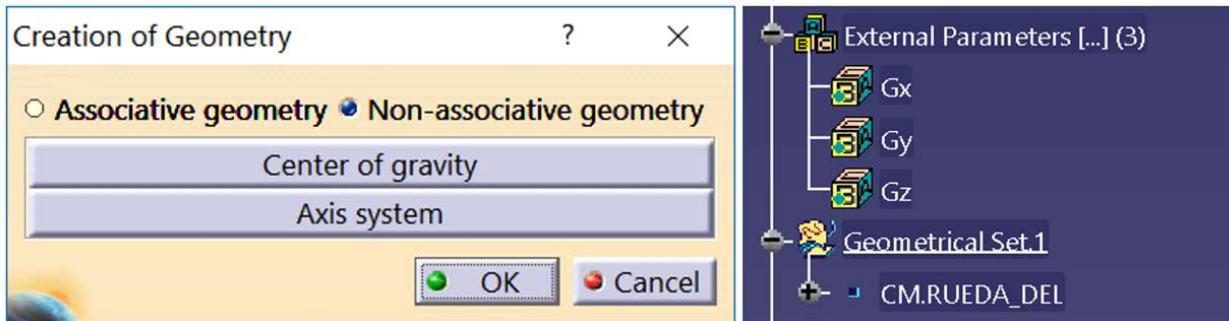


Ilustración 33 - Creación del CM y cómo queda en el CATPart guardado

Si no coinciden, podremos:

- Simplemente quedarnos con el no asociado y actualizarlo (borrarlo y crearlo de nuevo) cada vez que el diseño evolucione.
- En el caso de querer dejarlo asociado (recomendable), borramos ambos puntos, hacemos el proceso descrito a continuación, y una vez se resuelva el problema, volver al inicio de este apartado.

Este problema se debe a la estructura y la posición en el CATProduct. Una buena práctica es que en cada CATProduct exista un elemento fijado en el (0, 0, 0) y sin ninguna rotación. Este elemento conviene que sea el mismo que hemos elegido para poner los puntos de los pares, y donde vamos a poner el CM porque lo hemos considerado importante. Esto se consigue fijando (restricción Fix) el elemento que consideremos de referencia. Una vez fijado, en la configuración de la restricción, cambiaremos todos los valores a cero si no lo estuviera. Haciendo doble click en la restricción, se nos abre el siguiente menú al presionar en “More”:

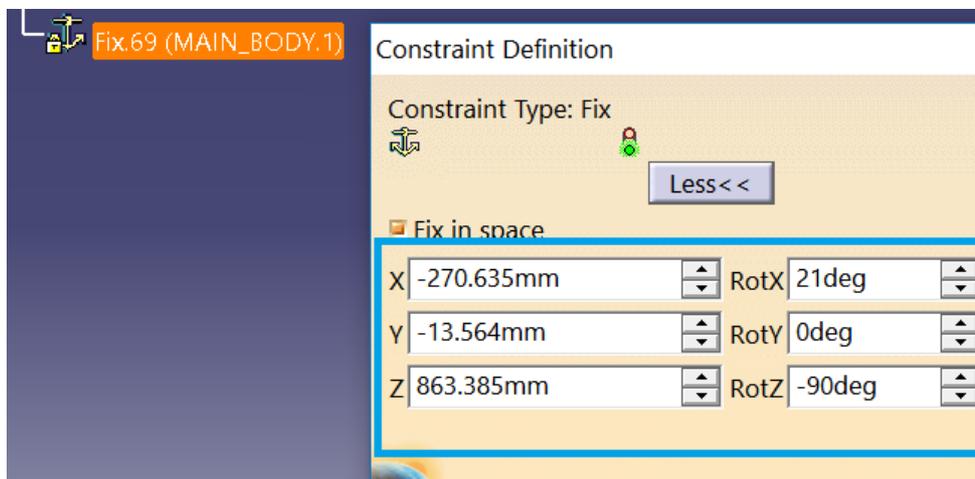


Ilustración 34 - Posición de un elemento que no se ha fijado en el (0, 0, 0) de su CATProduct

4.2.2 Instrucciones directas: Creación de puntos para el sistema de ejes de referencia para las inercias

Para crear un sistema de ejes en Adams, necesitamos un punto para el origen y dos puntos que formen con el origen los vectores 0X y 0Y. El origen será en este caso el CM creado en el paso anterior. Para los otros dos:

- Creamos, en el mismo CATPart, un sistema de ejes en el CM. Los campos correspondientes a las direcciones los dejaremos como están. Catia mantendrá las direcciones de los ejes principales de la pieza si no se le especifica lo contrario. Convendrá renombrar el sistema de ejes si existen varios.

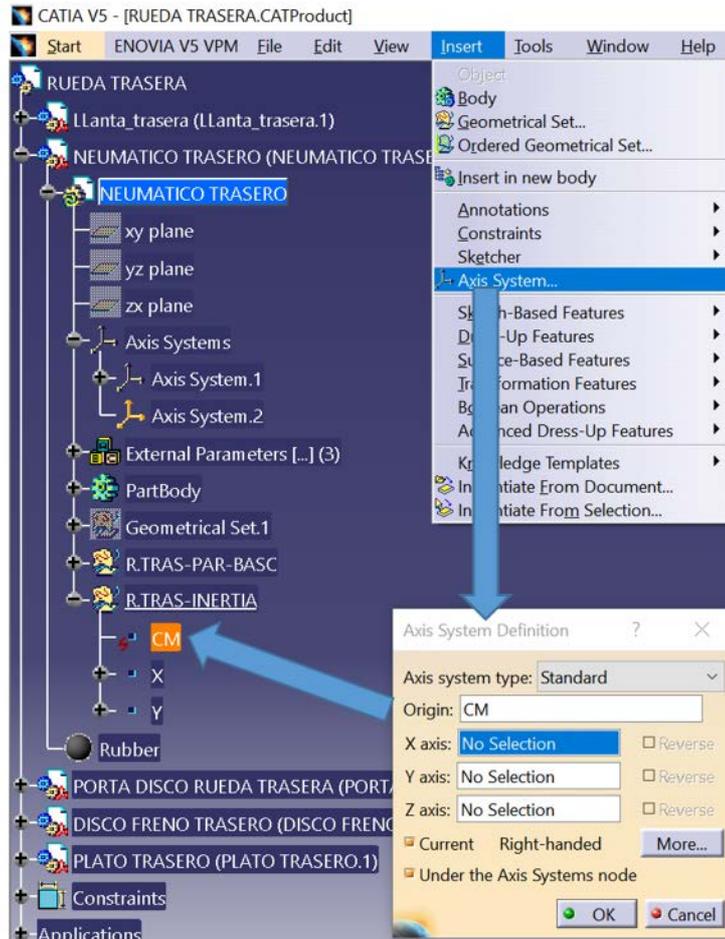


Ilustración 35 - Insertar sistema de ejes con centro el CM

- Dentro del GS del CM, crearemos un punto en su eje X y otro en el Y, con separación suficiente para que sean fáciles de distinguir (se ha usado 100-200mm con respecto al origen). No es necesario crear uno en el eje Z, ya que Adams asume usar un sistema de ejes regido por la regla de la mano derecha, por lo que con dos ejes ya está definido.

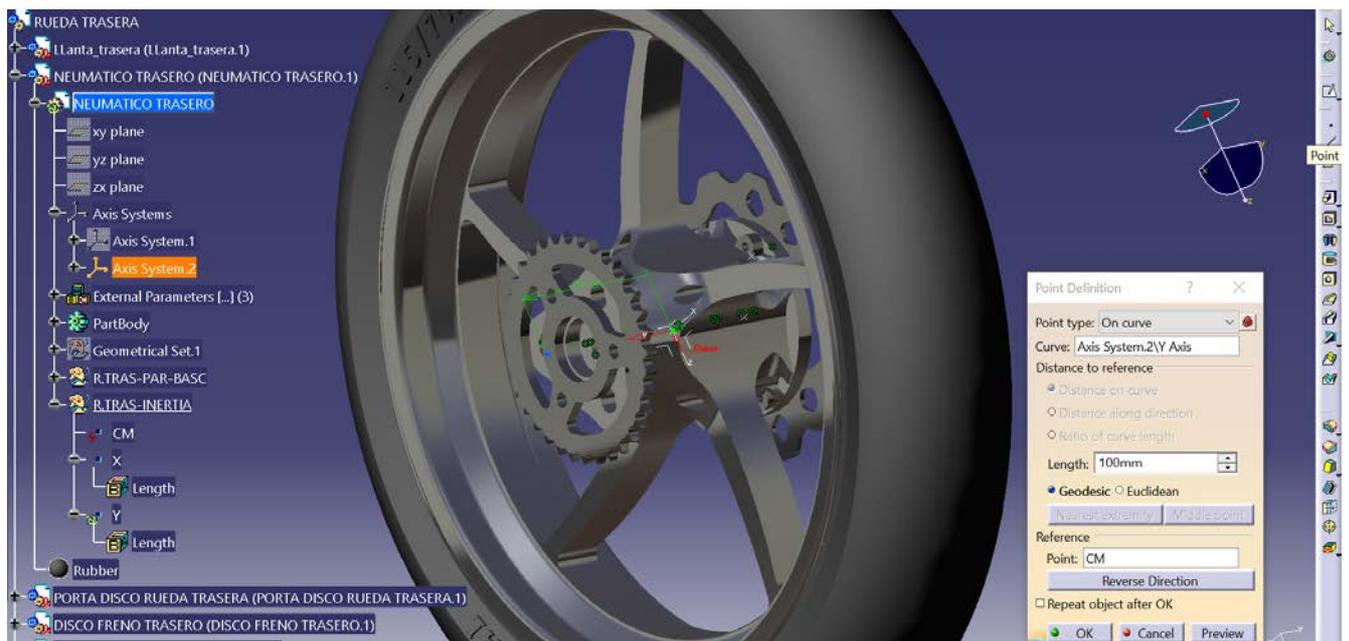


Ilustración 36 - Creación de los puntos X e Y en el sistema de ejes creado

4.2.3 Instrucciones directas: Obtención de masas e inercias

Con la geometría auxiliar, solo quedaría tomar los datos de las inercias. Para ello hay que seguir los siguientes pasos (ver Ilustración 38 como guía):

- 0- Hay que tener activado (enmarcada en azul →  RUEDA DELANTERA (RUEDA DELANTERA.1)) el CATProduct del cual queremos obtener las inercias. Usar la herramienta “Measure Inertia” y seleccionar el CATProduct a medir. En el caso de tener activado “Work with cache system” en Options/Infrastructure/Product Structure/Cache Management, se deberá representar todo el product en “Design mode”, para que las medidas sean reales. Para comprobar esto fácilmente, simplemente se puede intentar hacer lo mostrado en la Ilustración 37, y si no está la disponible ese menú es que no se está usando esta opción y no es necesario hacer nada.

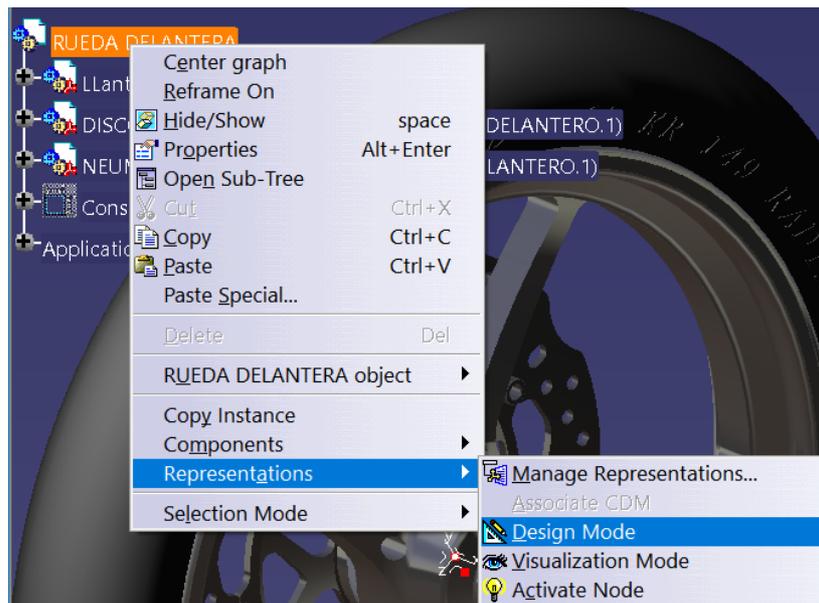


Ilustración 37 - Cambio a modo diseño ("Design mode")

- 1- Hacer click en “Customize” del menú de “Measure Inertia”.
- 2- Activar la opción “Inertia matrix / axis system” para poder elegir el sistema de ejes donde se miden las inercias.
- 3- Abrir la pestaña que se ha activado en el paso anterior.
- 4- Habilitar la selección de un sistema de ejes.
- 5- Seleccionar el sistema de ejes del CATPart que hemos tomado de referencia, donde se creó el CM en este apartado. En este caso, como el CATPart no tenía otro sistema de ejes, el sistema de ejes se mantuvo con el nombre por defecto “Axis System.1”. En otro caso, podría interesar renombrarlo, aunque, como se verá, estos no serán exportados a Adams.
- 6- Copiar los datos de inercia (en la parte inferior de la ventana de “Measure Inertia” de la Ilustración 38) y la masa, por ejemplo, en una hoja Excel donde guardemos todos. Sería adecuado guardar también la fecha de toma de datos, para estimar en un futuro análisis si fuera necesario actualizar la medida.

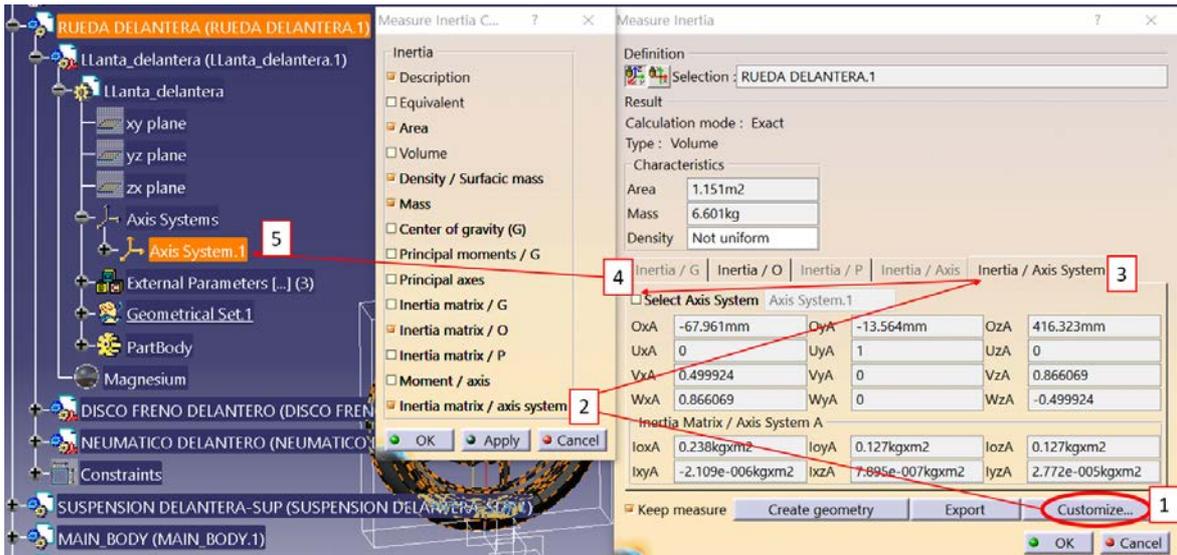


Ilustración 38 - Proceso para obtener la inercia respecto a un sistema de ejes determinado por el usuario

4.2.4 Detalles: Obtención de datos para elementos que no han podido convertirse en sólidos

En concreto se ha enfocado este apartado para el carenado, ya que fue el único que tuvo problemas con métodos para conseguir un sólido, pero el procedimiento vale para cualquier otro. En este caso:

- Se crea el CM del Carenado en el CATPart de la pipa de la dirección* como se ha explicado previamente, en un GS que haga referencia al carenado.
- Copiaremos, en el mismo GS, los puntos creados previamente en el CATPart “pipa” para el sistema de ejes de referencia para las inercias. El GS “Carenado-Inercia” quedaría como:

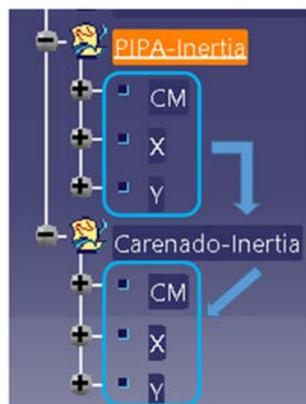


Ilustración 39 - Copiado de los puntos del sistema de ejes de referencia para las inercias en el nuevo GS

- Por último se tomarían los datos de masa e inercias como se recomendó en el apartado 4.2.3.
- En Adams se introducirá un elemento con esa masa, CM e inercias, que será fijado al chasis.

* Se eligió el CATPart de la pipa porque era el CATPart que contenía ya tanto los puntos del par cinemático en la pipa, como los puntos creados para inercias y el CM del Main Body. Es por esto, que los puntos del sistema de ejes de referencia para las inercias son copiado para usar el mismo sistema de ejes de referencia, para evitar crear otro innecesariamente.

5 EXPORTACIÓN A ADAMS

Tras toda la preparación del modelo 3D, ya estaremos preparados para trabajar en Adams. En este capítulo se mostrará cómo exportar los modelos y los datos extraídos a Adams. En el apartado 5.1.4 se comentan unos ajustes previos que pueden conseguir un mejor funcionamiento de Adams, aprovechando todas las capacidades del ordenador usado.

5.1 Exportación del modelo de Catia a Adams

5.1.1 Instrucciones directas: Creación del modelo de Adams

Al abrir Adams View (en adelante abreviado como Adams) y crear un nuevo modelo (“New model”), se requieren varios campos:

- Un nombre del modelo (“Model Name”)
- La dirección de la gravedad (“Gravity”):
 - La dirección de la gravedad será por defecto la dirección Y negativa, pero se permite eliminar la gravedad (“No gravity”) o elegir otra (“other”). La última opción es la que ha sido utilizada en este caso, por la motocicleta estaba diseñada con la gravedad en el eje Z. Al continuar a la siguiente ventana, se mostrará la ventana de la ilustración inferior, donde hemos hecho click en “-Z*” para poner la gravedad en el eje Z negativo:

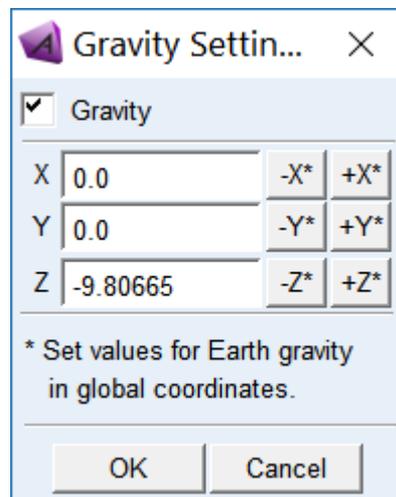


Ilustración 40 - Configuración de la gravedad

En el caso de que se necesite modificar este valor a posteriori, podremos abrir esta ventana de nuevo en el menú “Settings/Gravity”.

- El sistema de unidades (“Units”):
 - En este caso se han elegido las unidades del S.I., la opción MKS. Esto es decisión del que ejerza las simulaciones. Se han elegido éstas por estar claro siempre qué unidades se muestran en los resultados, y porque los datos de inercias que obtuvimos están en el S.I.
- Un directorio donde será guardado (“Working directory”).

5.1.2 Instrucciones directas: Importación del modelo a Adams

A continuación se procederá a importar el modelo simplificado de Catia. Para ello abriremos el menú de importación en “File/Import” y configuraremos los ajustes siguientes:

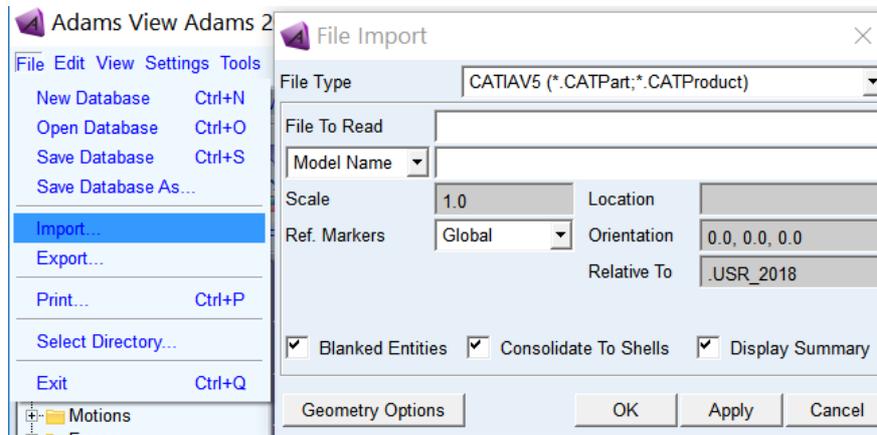


Ilustración 41 – Ventana de importación del modelo de Catia

- Seleccionaremos “CATIAV5” como tipo de archivo a importar en el menú “File Type”.
- Haremos doble click en la celda blanca de “File To Read” para elegir el CATProduct del modelo simplificado.
- En el siguiente menú elegiremos “Model Name”, porque queremos que el modelo simplificado se añada al modelo que estamos creando en Adams. La opción “Part Name” añadiría el modelo simplificado a un componente ya creado de Adams.
- Haciendo doble click en la celda blanca a la derecha del menú anterior nos permite elegir el modelo al que queremos importar datos: Elegimos el modelo con el nombre que le dimos en el apartado anterior, que será el único disponible.
- Para terminar con los ajustes, se hará click en el botón “Geometry Options” en la esquina inferior izquierda, y se sobrescribirán los campos de acuerdo a la siguiente ilustración. Al terminar aceptaremos los cambios en todas las ventanas:

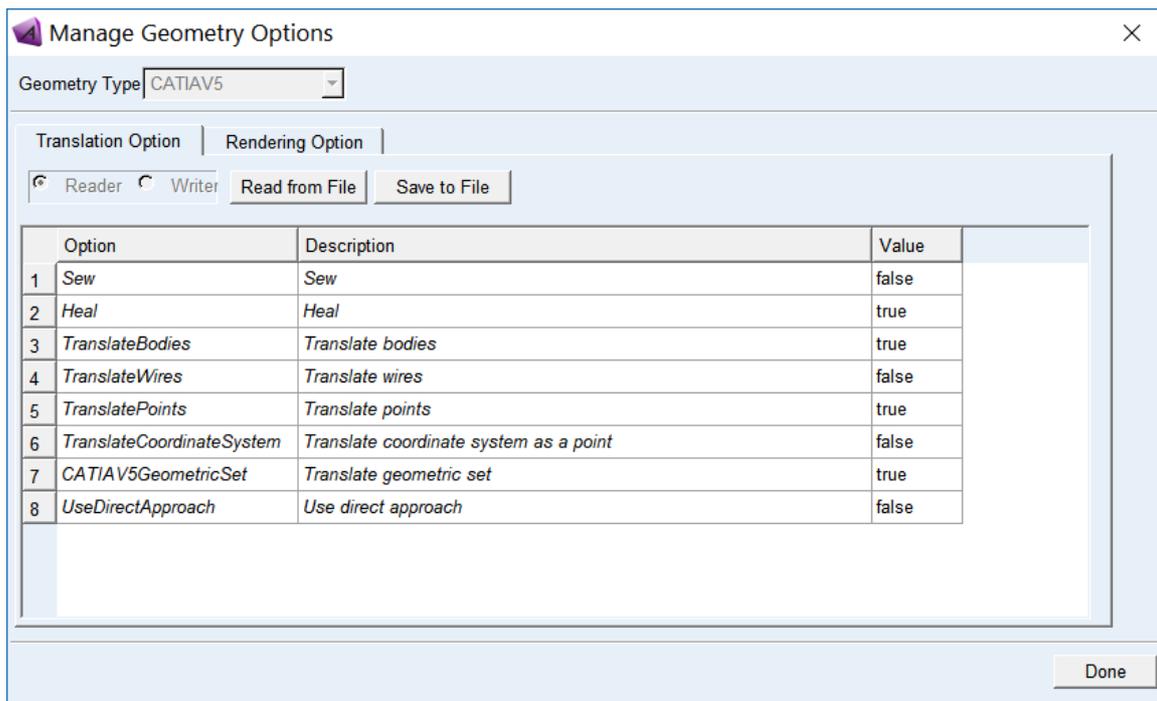


Ilustración 42 - Ajustes de importación

Una vez se importe todo el modelo, es recomendable guardar, por si tuviéramos algún problema, poder volver a este punto. Como en cualquier programa, el menú “File” contiene la acción guardar (“Save Database”) que guardará los datos. La opción “Guardar como...” está como “Save Database As...”.

5.1.3 Detalle: Abrir un modelo ya guardado

Para abrir este modelo guardado, tendríamos que hacer click en “Existing Model” en la ventana que aparece al abrir Adams, en vez de “New Model” cuando creamos este modelo. Después, haremos click en el icono marcado en la siguiente ilustración para elegir el archivo con extensión “.BIN” que creamos:

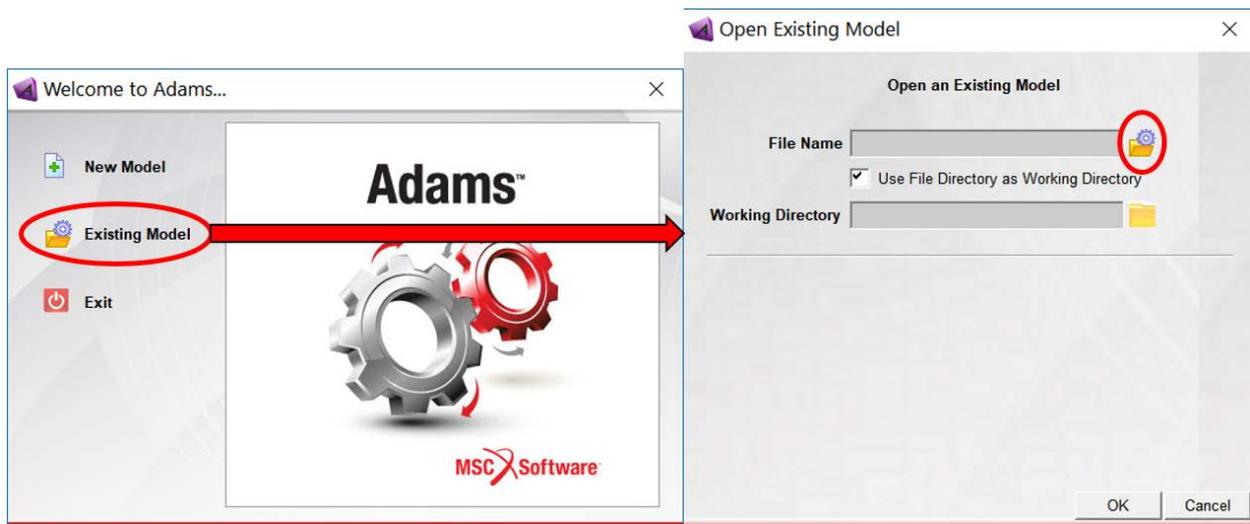


Ilustración 43 - Ventana inicial al abrir Adams y la ventana que se muestra al elegir "Existing Model"

5.1.4 Detalles: Configuración previa de Adams

En la configuración de Adams, es posible permitirle usar más de un núcleo del procesador de nuestro ordenador. Esto reducirá el tiempo de las simulaciones considerablemente si tenemos un ordenador con varios núcleos, configuración prácticamente estándar hoy en día en los ordenadores.

Para ello solo tendremos que hacer lo siguiente:

- Abrir la herramienta “Configuración y licencia” (“Settings & License”), que se encuentra en la carpeta de Adams del menú inicio de nuestro PC.
- Entrar en el apartado “ASolver/Preferences” y modificar el valor “numThreads” por el valor que se desee. El número óptimo para mayor velocidad será el número de núcleos que nuestro ordenador tenga. En caso de desconocimiento, se puede introducir cualquier número alto, p.ej. 100, y Adams automáticamente usará todos los disponibles. En este caso, mostrará un aviso cada vez que se haga una simulación advirtiéndole que se van a usar los núcleos disponibles, ya que el número especificado es superior al existente.

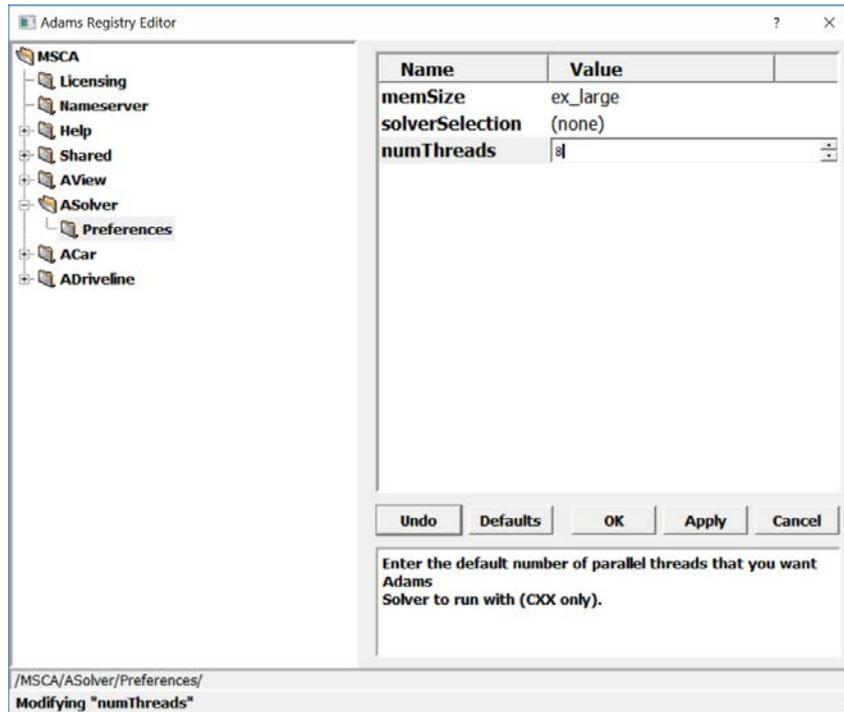


Ilustración 44 - Configuración para un ordenador con procesador multinúcleo

5.2 Reorganización del árbol de elementos

5.2.1 Instrucciones directas

En este paso se va a reorganizar y limpiar el árbol de “Bodies”. Uniremos todos los elementos que deben formar un solo Body, para usarlos con facilidad y se limpiará el árbol de elementos innecesarios. Antes de empezar, se recomienda leer el apartado 5.2.2 para aprender a manejar la visualización del modelo y ajustarla al gusto del usuario.

El árbol de Adams obtenido de la importación tendrá muchísimos elementos, ya que Adams importa cada elemento básico de Catia (puntos, líneas, sólidos y superficies) por separado. Es por esto que es tan importante haberle dado nombres autoexplicativos a cada elemento como ya se explicó.

El proceso de reorganización recomendado es el siguiente:

1. Unir sólidos que se mueven solidariamente (los que están bajo el mismo CATProduct de primer nivel en el modelo simplificado) con la operación “Merge two Bodies”: Simplemente habrá que seleccionar en la interfaz gráfica los dos elementos que queramos unir. El primer elemento será introducido en el segundo. Donde existan varios elementos y la elección en la interfaz gráfica sea confusa, haremos click derecho sobre el elemento en pantalla y se mostrará una lista para elegir de ella.

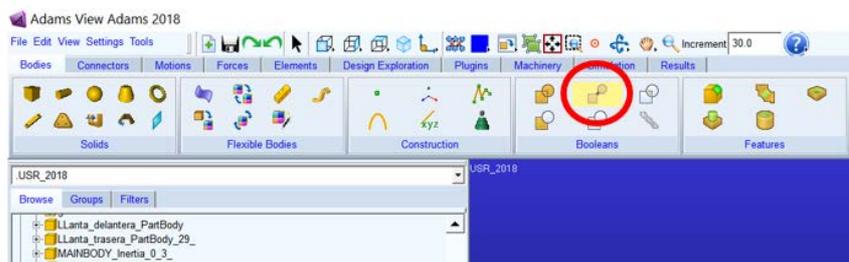


Ilustración 45 – Operación "Merge two bodies"

Se aconseja:

- Eliminar todos los elementos sólidos que se encuentren durante este paso cuya visualización no se considere necesaria, p. ej. Soportes de carenado, ejes de motor, etc... ya que hay que, o bien unirlos al conjunto que corresponda, o bien eliminarlos, y esto último es más fácil y limpiará aún más el modelo de elementos no necesarios.
 - Unir con un orden de conjuntos con menos elementos, a conjuntos más complejos. Una vez que terminemos de unir un conjunto por completo, esconderlo (click derecho + Hide), por ejemplo: unir primero todos los elementos de la rueda delantera (solo tiene llanta y neumático) y esconderlo. Esto nos permitirá comprobar si hemos dejado algún sólido perteneciente a ese conjunto sin unir, y nos permitirá continuar con las siguientes uniones más fácilmente al limpiar poco a poco la visualización.
- * Durante esta unión es posible que nos encontremos mensajes referidos a problemas con densidades, CM y similares. Estos errores se pueden ignorar, ya que se deben a mezclar elementos que Adams ha asignado valores distintos de densidad, masa y demás. Esto va a ser una entrada del usuario posteriormente, por lo que se puede ignorar.
2. Hacer una limpieza rápida de lo que estamos seguros que no necesitaremos. Se recomienda ordenar los bodies por nombre ya que, en general, los elementos geométricos innecesarios se llamarán parecidos.

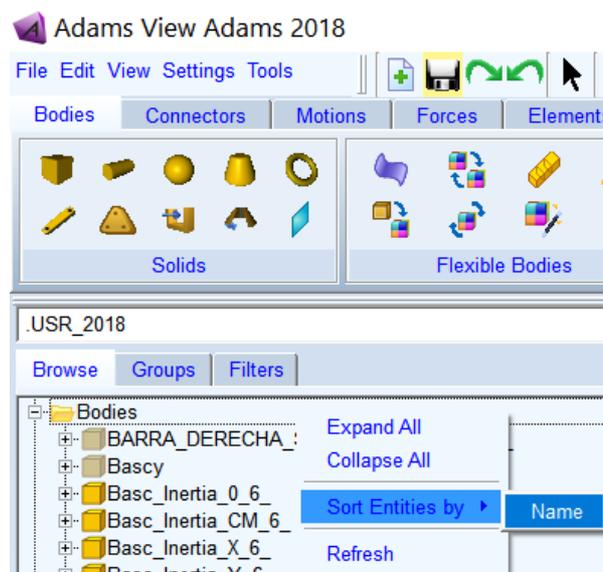


Ilustración 46 – Ordenar Bodies por nombre

Los más usuales empiezan por:

- Geometrical_Set: son los GS's que no se les ha nombrado de acuerdo al apartado 3.3. Los que necesitamos se llamarán de acuerdo a esa nomenclatura, por tanto cualquier otro lo desechamos.
- External references, Imported elements, Isolated external references: son GS's que crea Catia automáticamente durante ciertas operaciones de diseño.
- Plane o Surface: son planos y superficies que serán innecesarios, ya que solo usaremos los puntos creados.

O contienen:

- Sketch: también será geometría que no habremos creado para Adams.

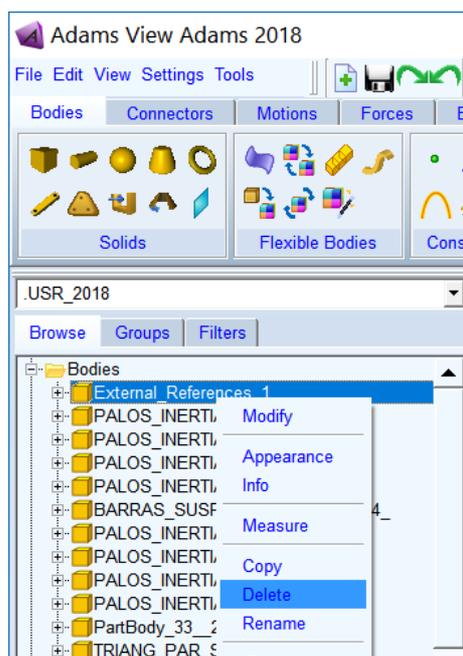


Ilustración 47 - Eliminación de geometría no necesaria

3. Renombrar puntos de acuerdo a los “Bodies” a los que pertenecen, que siguen la nomenclatura establecida en el capítulo 3.3 *. El renombrado se hace tal como se haría cualquier renombrado en Windows: click derecho y renombrar (rename) o hacer doble click con una pausa entre ellos.

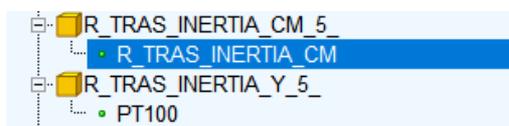


Ilustración 48 – Ejemplo de elemento ya renombrado en azul y otro de uno por renombrar debajo (PT100 → R_TRAS_INERTIA_Y)

Esta acción cobrará sentido cuando, en el siguiente paso, unamos todos los puntos pertenecientes a un conjunto, por ejemplo “Main Body”, dentro de un mismo cuerpo (■). Sin nombre su identificación sería prácticamente imposible.

* Es posible que Adams incluya números después del “Nombre del elemento” cuyo origen se desconoce. Este número no tiene importancia alguna para este paso y será eliminado posteriormente.

4. Unir los puntos de los GS's que creamos para Adams a los conjuntos que corresponden. El método que se aconseja aquí es el siguiente:
 - o Esconder todos lo que haya en el árbol excepto los elementos del conjunto que queramos unir. Para ello seleccionar los elementos a esconder, hacer click derecho sobre uno de los elegidos, y en “Appearance” marcar “Visibility” en “Off”. Por ejemplo, si queremos unir la rueda delantera esconderíamos todo excepto el sólido “Rueda delantera” y los puntos cuyo nombre nos sugiera que corresponden a este conjunto.

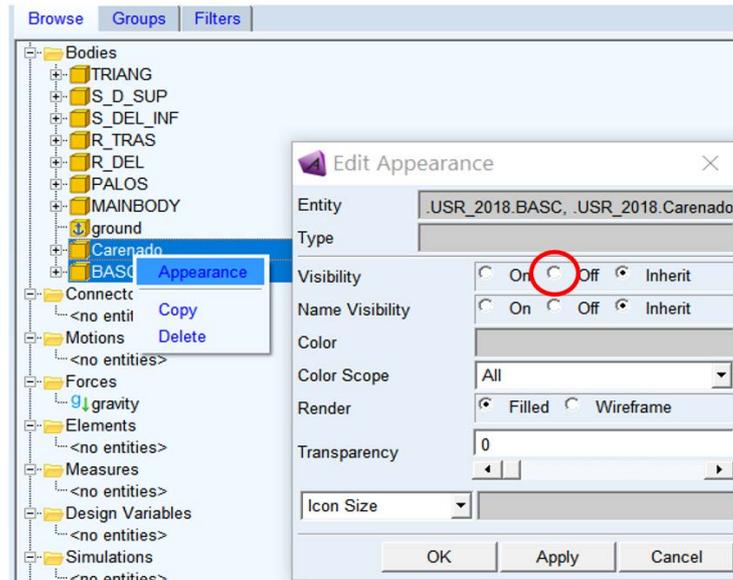


Ilustración 49 - Ocultar varios elementos a la vez

- Unirlos todos los elementos visibles entre si – No existirán errores posibles porque solo se podrán seleccionar elementos que pertenezcan al conjunto en cuestión, ya que los demás están ocultos. Si nos apareciera el error “Failed to create boolean” probablemente sea que hemos intentado unir dos elementos ya unidos. En este caso, se recomienda usar la selección con click derecho y, así, elegir elemento de forma precisa desde la lista que se nos muestra.

5. Renombrar los conjuntos finales:

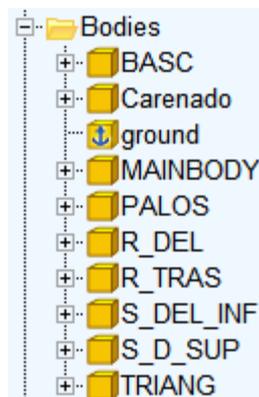


Ilustración 50 - Conjuntos finales renombrados

5.2.2 Detalles: Manejo y ajustes de la visualización del modelo, y otros consejos para empezar con Adams

5.2.2.1 Manejo de la visualización del modelo

Adams tiene varios botones en su interfaz para activar las operaciones de rotación, zoom, traslación y elección del centro de rotación. A pesar de ello, su uso es muy inconveniente y existen accesos directos en el teclado que las activan para agilizar los movimientos.

Las siguientes letras activarán las operaciones, que combinadas con el gesto necesario, harán la acción deseada de forma fácil y rápida:

- Z: Zoom – Sirve para acercar o alejar el modelo.
- Ctrl+F – Fit all – Muestra el modelo completo relleno la pantalla, sin tener en cuenta el suelo (ground). Si solo se pulsa F, lo hará teniendo en cuenta el suelo.

- C: Centro de rotación: Permite hacer click en un punto que será establecido como centro de rotación.
- R: Rotación – Rota el modelo alrededor del centro de rotación establecido.
- T: Traslación – Mueve la visualización desde el plano que se está viendo.
- V: Visualización de iconos – Oculta o muestra los iconos y nombres de iconos en la pantalla.

Hay dos opciones en cuanto a la activación de estas operaciones:

6. Pulsamos la tecla atajo: la operación dejará hacer un solo gesto y el ratón volverá a hacer sus funciones de selección.
7. Pulsamos y mantenemos la tecla atajo: la operación estará activa mientras que este pulsada la tecla atajo.

A pesar de que se ha intentado explicar en qué consiste cada gesto, se recomienda probarlos para entender su funcionamiento de forma práctica. Las previamente explicadas son las más útiles. La ilustración siguiente muestra todas las existentes en la ayuda de Adams:

To:	Select:
Rotate view in the XY directions	r
Rotate view in the Z direction (s pin)	s (lowercase)
Translate view	t
Change perspective depth	d
Dynamically zoom view	z
Use dynamic increment	Shift
Define a zoom area	w
Center view	c
Orient view to object (element)	e
Fit view	f
Fit view - no ground	Ctrl + F
Orient view to front	F
Orient view to right	R
Orient view to top	T
Orient view to isometric	I
Toggle render mode between wireframe and shaded	S (Uppercase)
Toggle screen icons on and off	v

Ilustración 51 - Lista de comandos de teclado de Adams [6]

Otra operación que cabe explicar es el resaltado de un elemento al seleccionarlo desde el árbol, para saber dónde se encuentra en el modelo. Esto es útil cuando se quieren encontrar cosas en una zona cargada de mucha geometría.

5.2.2.2 Visualización del modelo

Por otra parte, la forma en la que Adams muestra el modelo se puede cambiar al gusto del usuario. Adams muestra por defecto el modelo en un formato de líneas, que tiene la ventaja de que permite ver puntos que hay

dentro de elementos. Este estilo se llama “Wireframe”. Sin embargo, si para alguna presentación se le prefiere dar un aspecto más real al modelo, en el menú superior “View” y su submenú “Render Style” se puede cambiar entre varios estilos de renderizado, siendo “Smooth shaded” probablemente el más parecido a como lo vemos en Catia. Se anima al lector a probar los distintos estilos de renderizado para elegir el más conveniente en cada situación.

5.2.2.3 Proporcionar a Adams con lo que necesita en una operación

Adams, como Catia, da al Usuario pistas de que necesita en cada paso. En concreto en Adams se encuentran en la esquina inferior izquierda. Es muy importante leer esto, ya que nos guiará cuando no estemos familiarizados con las operaciones y lo que ellas requieren.



Ilustración 52 - En la operación "Crear un sistema de coordenadas" se pide el "Body" donde queremos introducirlo

6 MODELADO DE RESTRICCIONES

En este capítulo se va a explicar cómo introducir los distintos tipos de restricciones al modelo. Teniendo los puntos que definen los ejes de estos pares, el proceso general será elegir los cuerpos implicados y los puntos que describen estos ejes.

Para el proceso descrito en este capítulo es importante tener mostrados los puntos correspondientes a pares y amortiguadores. También es recomendable ocultar todos los puntos que usamos en el capítulo anterior para aliviar la interfaz gráfica de los elementos no necesarios.

Durante este paso, es posible que nos demos cuenta que hay puntos que se nos ha olvidado añadir o son incorrectos. Si esto pasara, recurrir a las instrucciones del apartado 6.5.

6.1 Instrucciones directas: Introducción de pares cinemáticos básicos

Tendremos 3 tipos de pares cinemáticos básicos: revolución, cilíndrico y prismático.

El primer tipo de par aplica para todos los pares, a excepción de las suspensiones. En concreto, aplica a las siguientes uniones:

- Rueda delantera con el conjunto inferior de la suspensión delantera
- Pipa de la dirección (Main Body) con el conjunto superior de la suspensión delantera
- Basculante con Main Body
- Barras con el basculante
- Triángulos con las barras
- Triángulos con Main Body
- Rueda trasera con el basculante

El par cilíndrico aplicará a la suspensión trasera, y, como ya se explicó, la suspensión delantera será modelada con un solo par prismático.

A continuación, se muestra como modelar el par de revolución, siendo el proceso para el resto de pares equivalente:

- Haremos click en el botón “Create a Revolute Joint” y configurarlo como se muestra en pantalla para que se puedan definir a través de los puntos creados.
- A continuación, Adams necesitará que hagamos click en ambos conjuntos a unir mediante este par y los dos puntos que lo definen.

Como ya se explicó, es muy importante elegir el punto que nombramos “1” primero y después el “2”. Esto es porque en el primer punto se harán los balances de fuerzas y momentos, y el segundo punto solo definirá la dirección del eje.

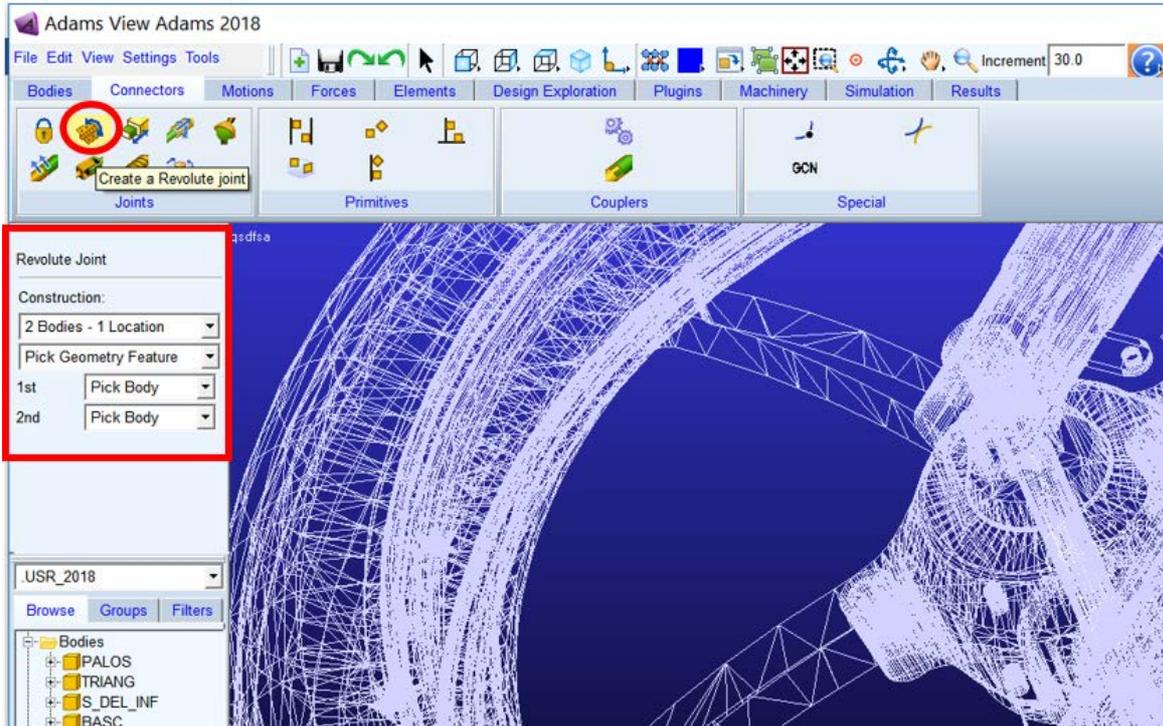


Ilustración 53- Creación de un par de revolución

Con esto ya tendríamos definido cualquier par de revolución. Es conveniente nombrar cada par (en amarillo en la siguiente ilustración). Adams permite, si lo necesitáramos, modelar el rozamiento de los pares de revolución si fuera interesante obtenerlo. En la siguiente imagen se ve cómo se accede a este menú:

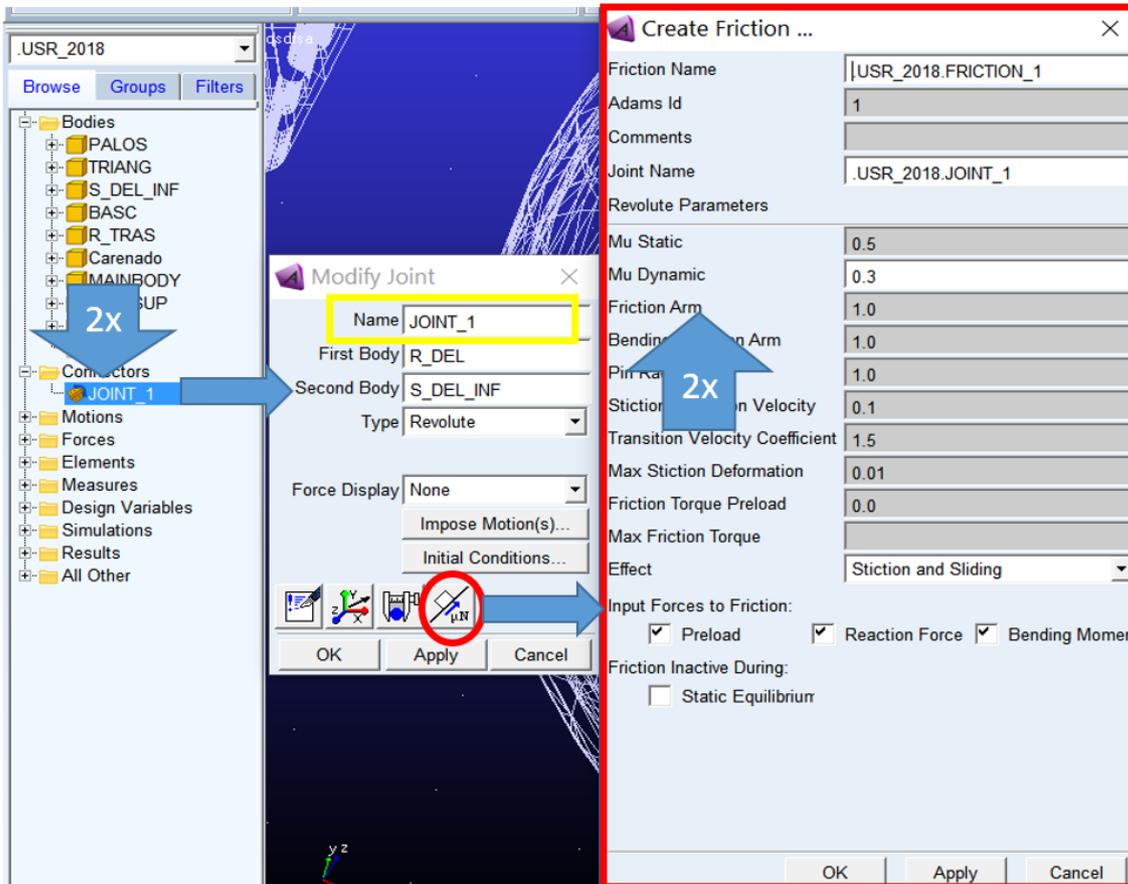


Ilustración 54 - Añadir fricción a un par de revolución

6.2 Instrucciones directas: Elementos Muelle – Amortiguador

Para estos elementos Adams necesita solamente un punto de cada uno de los conjuntos que unen, donde aplicará las fuerzas de amortiguamiento:

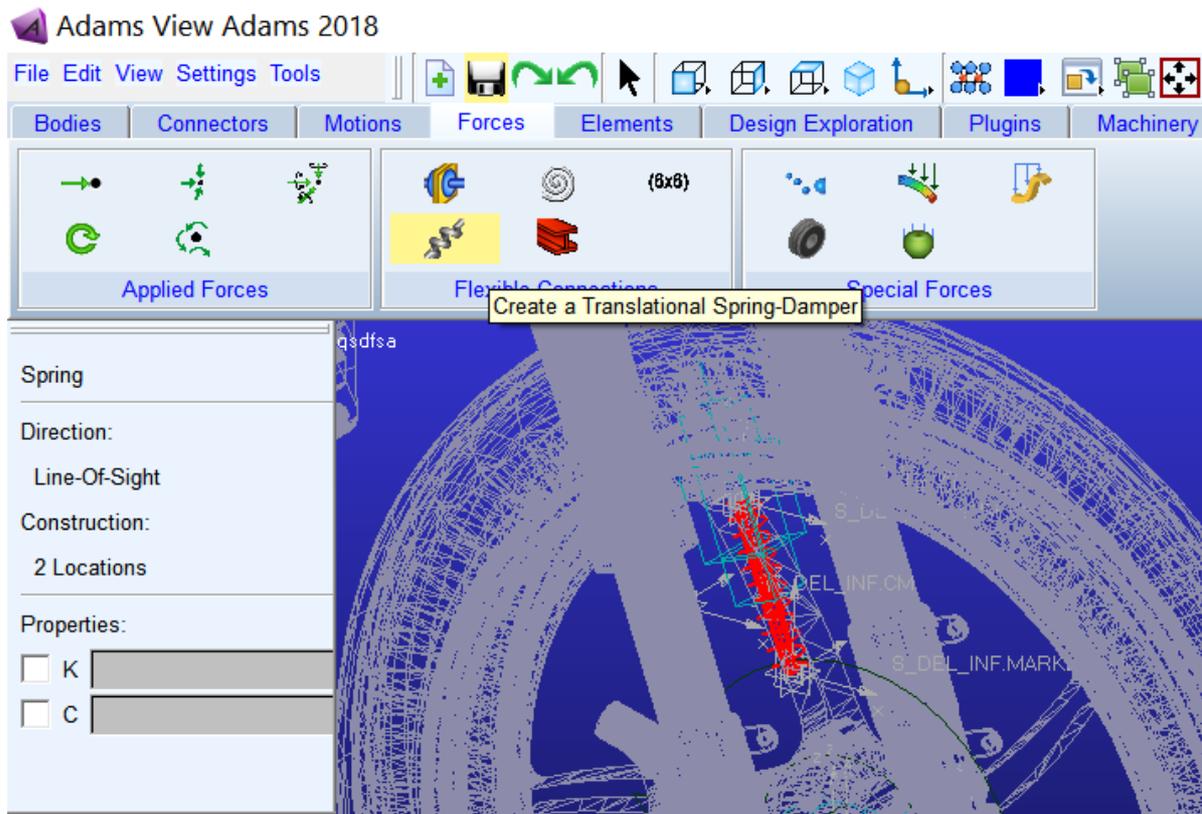


Ilustración 55 - Introducción del elemento muelle – amortiguador de la suspensión delantera

Siguiendo los valores facilitados por los miembros del equipo, las constantes de rigidez y amortiguamiento usadas fueron:

- $K=7000$ N/m y $C^*=1500$ Ns/m por botella de la suspensión delantera
- $K=110000$ N/m y $C^*=4500$ Ns/m en la suspensión trasera

*Estos valores provienen de una idealización para el presente tutorial. Adams permite introducir, entre otros, Splines del comportamiento del amortiguador, ver el apartado 6.3 para más detalles.

La introducción de los parámetros K y C puede hacerse durante la creación del elemento amortiguador (extremo izquierdo inferior de la Ilustración 55) o posteriormente, haciendo doble click en el elemento en el árbol y modificando las propiedades. Para más detalles, acudir al apartado 6.3.

6.3 Instrucciones directas: Elementos fijados entre sí

Para fijar elementos, solo hará falta elegir los elementos a fijar y un punto donde se va a hacer el balance de fuerzas y momentos para que ambos sólidos sigan solidarios. Es importante decir que si se quieren aplicar estos esfuerzos en un ensayo estructural, las cargas en este análisis tendrán que ser situadas en ese lugar o hacer un correcto traslado de ellas.

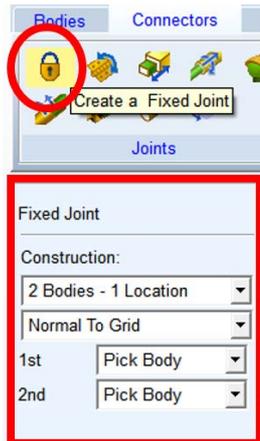


Ilustración 56 - Fijación de elementos entre si

6.4 Instrucciones directas: Contacto con el suelo

Para modelar el contacto entre dos sólidos Adams solo necesita la selección de los mismos. En el caso que queramos modelar el contacto rueda – suelo, tendremos que crear este último. En el apartado 6.7 se explica cómo hacerlo. Una vez tengamos los dos sólidos:

- Abriremos el menú de contacto
- Haremos doble click en los espacios blancos correspondientes a la selección de los sólidos “i” y “j”, y los seleccionaremos. Importante mencionar que el contacto que Adams tiene en cuenta es entre sólidos, y no Bodies, es decir, si los Bodies son multi-sólido tendremos que elegir el correcto: En este caso el neumático, no la llanta, por ejemplo.

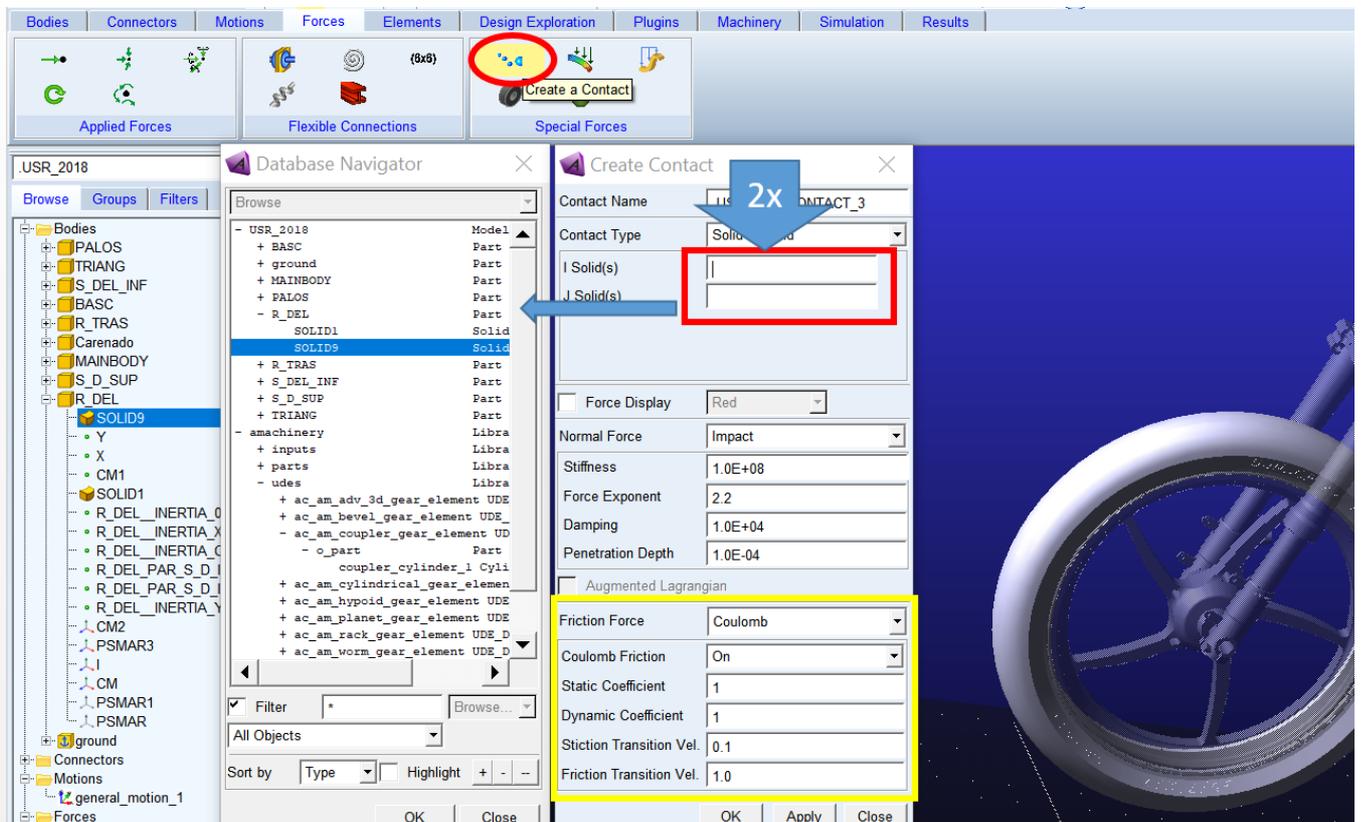


Ilustración 57 - Creación del contacto de la rueda delantera con el suelo

- Elegiremos, si aplica, algún tipo de fricción. Como este era el caso de los neumáticos, se ha aplicado fricción. Más adelante en las simulaciones se hablará de estos valores.

6.5 Detalles: Que hacer en caso de que un punto falte o sea incorrecto

En este caso existe una forma fácil para no tener que hacer la importación completa de nuevo:

1. Modificaremos/añadiremos puntos en las Parts oportunas en el modelo simplificado (por facilidad frente al completo).
2. En Catia abriremos un nuevo product vacío.
3. Copiamos del modelo simplificado las Parts modificadas y las pegamos en el product vacío.

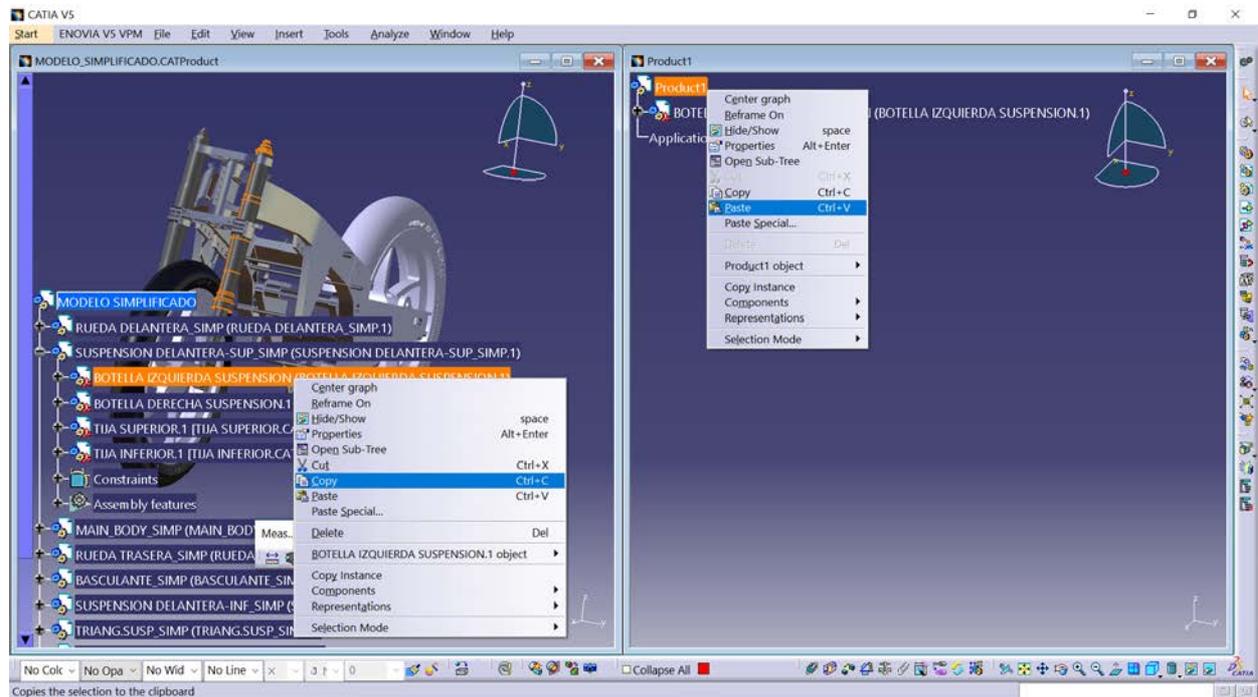


Ilustración 58 - Copiado y pegado en el product vacío del CATPart modificada

4. Guardamos este product.
5. Importamos el product a Adams y aplicaremos todo el proceso de limpieza, renombrado y unión que se ha explicado en el apartado 5.2.1. Se puede desactivar la importación de sólidos (Translate Bodies) con respecto a la Ilustración 42 del apartado 5.1.1 para ahorrarnos algunas operaciones en la limpieza.

6.6 Detalles: Spline para las constantes del amortiguador

Si se dispusiera de datos de la relación entre las fuerzas ejercidas por las suspensiones frente a los desplazamientos y las velocidades, Adams permite definir Splines que representen esos comportamientos de una forma más fiable que simplemente atribuyendo un valor de K y C. Para ello:

- Hacemos doble click en el elemento muelle amortiguador

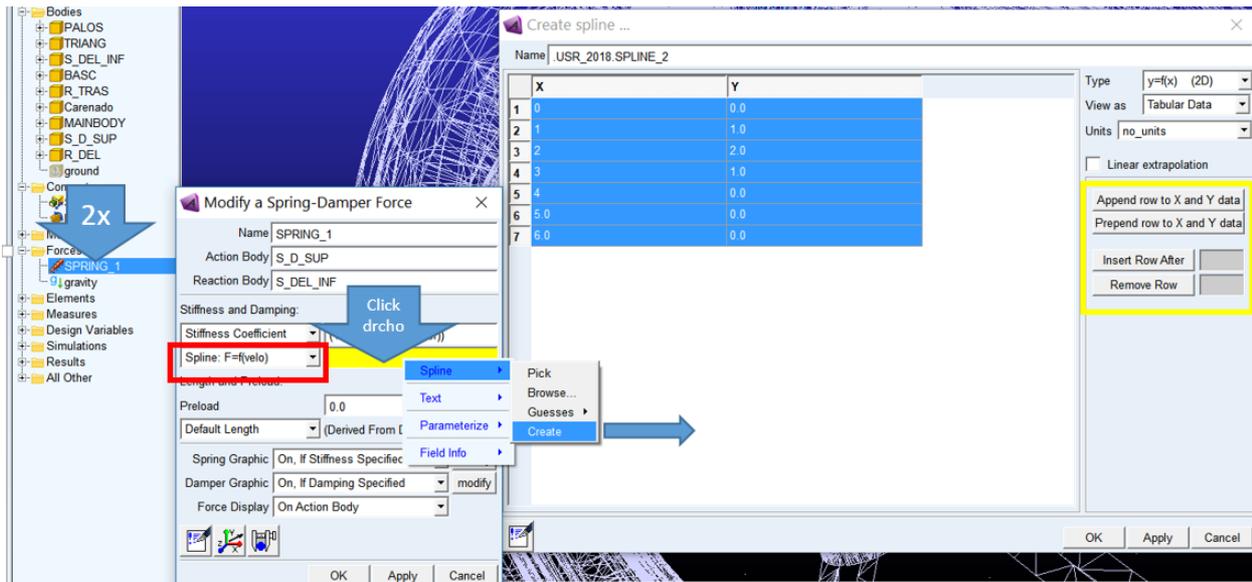


Ilustración 59 - Insertar puntos del Spline que define el comportamiento del amortiguador con respecto a su velocidad

- Elegimos “Spline” como la opción de definir el comportamiento
- Hacemos click derecho en su cuadro y seleccionamos Spline/Create
- Rellenamos una tabla con los datos que tengamos, pudiendo añadir y eliminar filas con los comandos señalados en amarillo en la ilustración anterior

Es importante mencionar que los datos que tenemos que introducir en Adams deben ser los correspondientes a estos elementos amortiguadores y no los del mecanismo final. Si se han obtenido las fuerzas de amortiguamiento en la rueda trasera, el mecanismo de suspensión puede estar multiplicando/desmultiplicando las fuerzas que recibe e incluso hacer que esta relación no sea lineal.

Este caso es muy común en los mecanismos de suspensión traseros por la búsqueda de progresividad en su comportamiento, entre otros. Por el contrario, la mayoría de las suspensiones delanteras en motocicletas son del tipo horquillas telescópicas, y estas no tienen un mecanismo de suspensión que haga que las fuerzas a la rueda y en los elementos amortiguadores sean distintas.

El método explicado es probablemente el más útil en la mayoría de los casos. Sin embargo, Adams permite otras formas de introducir el comportamiento del amortiguador. Se anima al lector a explorar los demás métodos si este no fuera el más adecuado.

6.7 Detalles: Crear un suelo

Para crear un suelo, o cualquier elemento, Adams permite distintas operaciones básicas de creación de sólidos. Se recomienda acudir a ellas para sólidos simples por simplicidad, pero si se quisiera hacer una superficie ondulada, por ejemplo, será mejor (o incluso necesario) acudir a Catia para modelarlo e importarlo posteriormente.

En el caso que se diseñe en Catia, se recomienda diseñarlo junto al modelo simplificado, para que no estorbe al resto del equipo en el modelo completo, y para que esté posicionado donde queramos. Una vez creado, se puede pegar en un product vacío para que, manteniendo la posición, no tengamos que importar todo de nuevo. Esto se explicó con detalles para importar puntos en el apartado 6.5, pero aplica a cualquier elemento que queramos añadir con posicionamiento a posteriori, en este caso un sólido.

Si, sin embargo, es una geometría simple y se decide crear en Adams, se muestra un ejemplo de cómo crear un suelo plano a continuación:

1. Seleccionar la operación “Box”

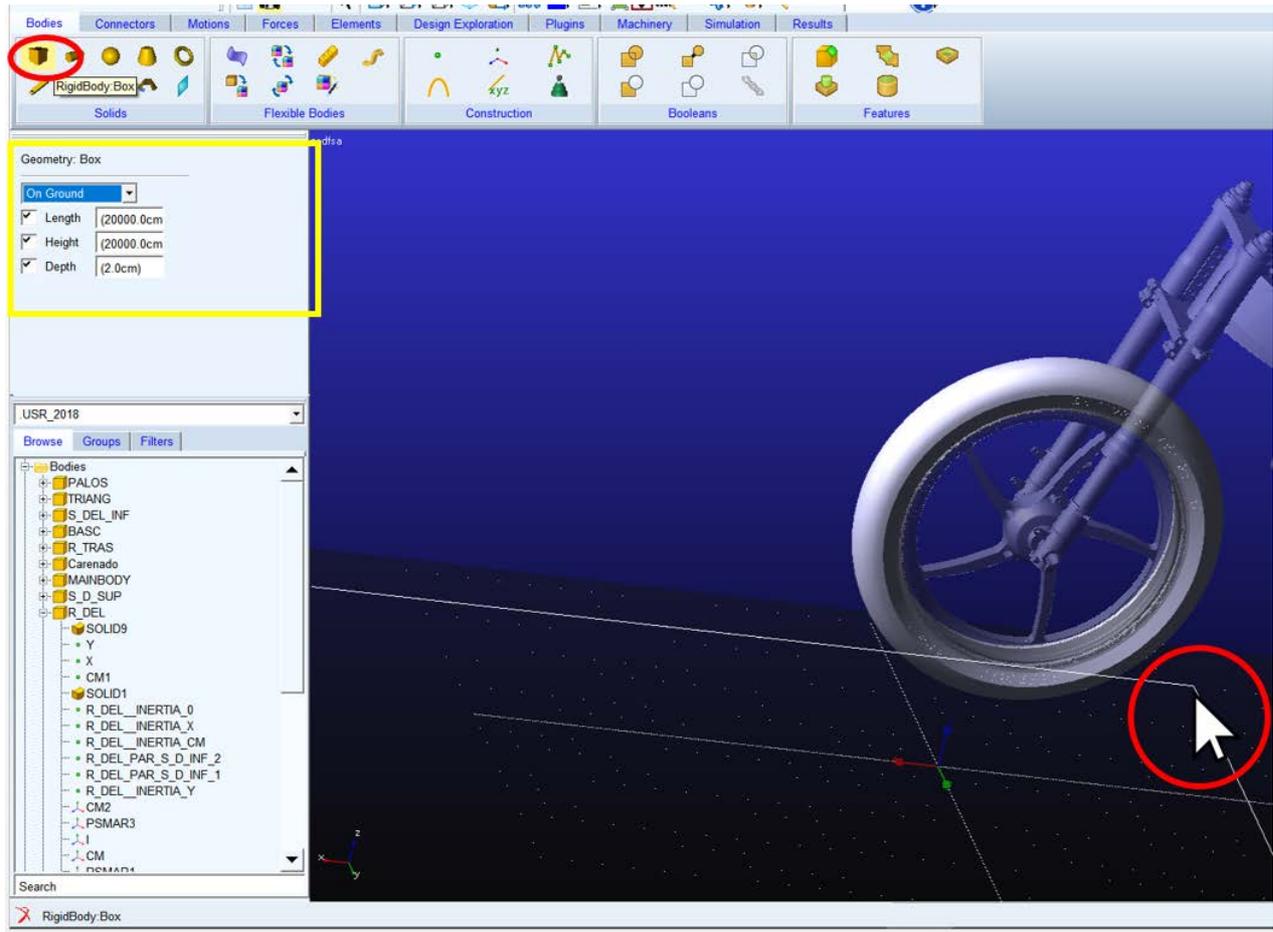


Ilustración 60 - Creación de un suelo

2. Seleccionar donde lo queremos añadir. En este caso se ha añadido al Body “Ground” que es el elemento de referencia que esta fijo.
3. Podemos elegir el tamaño previamente y hacer click en el modelo donde queramos situar la caja de tamaño ya definido, o haciendo click en las 3 esquinas que forman la caja. En el caso que se introduzcan solo algunas de las dimensiones, se definirá el resto con clicks en el modelo que definirán las esquinas que faltan.

Adams creará, en el Body al que le añadimos este sólido, un marker para definir el origen del sólido que estamos creando. Podemos identificarlo haciendo doble click en el sólido. Si se quiere modificar la posición de este sólido de forma precisa, haciendo doble click en este marker podemos introducir explícitamente su posición:

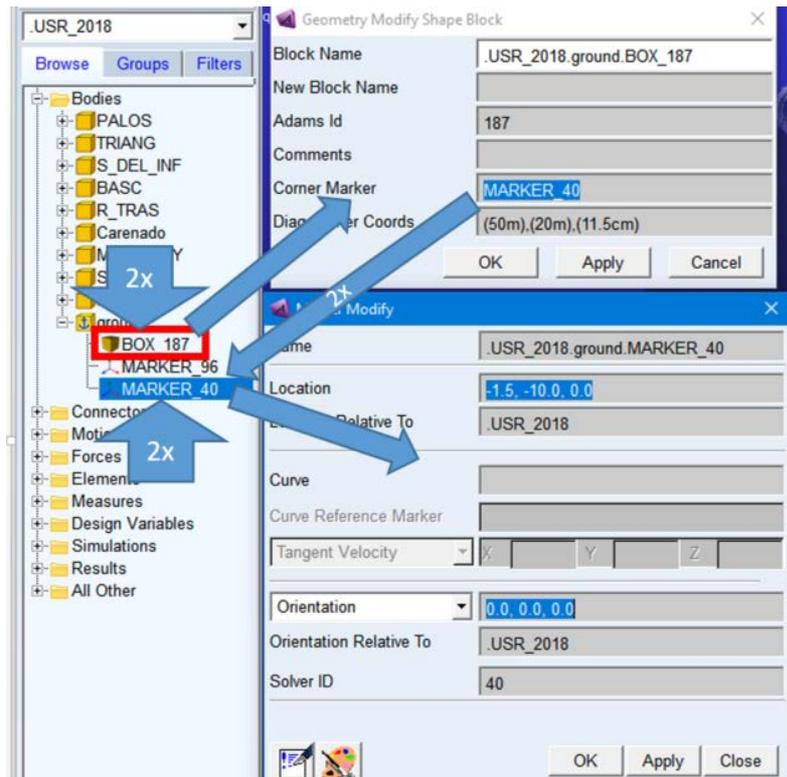


Ilustración 61 - Cómo identificar el marker que define la posición de un sólido y su modificación

Se motiva al lector a explorar otras geometrías que Adams permite crear, siguiendo las instrucciones que Adams va dando en el extremo inferior izquierdo.

7 IMPORTACIÓN DE DATOS MÁSICOS A ADAMS

En este paso añadiremos las masas, CM's e inercias a Adams. Primero crearemos los sistemas de ejes que definimos en el apartado 4.2.2. Después añadiremos los datos que obtuvimos en el apartado 4.2.3.

Es importante mantener ese orden, porque si, durante estos pasos, falta algún punto, es posible que los datos de masas e inercias cambien involuntariamente. Si hubiera que añadir puntos, ver el apartado 6.5.

7.1 Instrucciones directas: Crear sistemas de ejes para el CM y los ejes de inercia

En este apartado puede interesar, una vez más, ocultar todos los conjuntos, a excepción de con el que se está trabajando.

Se recomienda seguir las instrucciones que Adams da durante las operaciones para saber que seleccionar en cada momento (ver 5.2.2.3):

- Activaremos la construcción de markers y, en la configuración, elegiremos que la orientación sea según:
 - CM – Elegiremos orientación según unos ejes globales cualquiera (la opción por defecto es “Global XY plane). Ya que el centro de masas no necesita orientación, elegiremos esta opción para no tener que definir una orientación.
 - Ejes de inercia – Elegiremos unos ejes X e Y específicos, como se puede ver en la Ilustración 62. Serán los que creamos en Catia con los puntos 0, X e Y que, respectivamente, definen origen y los vectores 0X y 0Y que definirán estos ejes. La dirección Z se obtiene automáticamente por la regla de la mano derecha.

Es recomendable renombrar los markers para poder elegirlos fácilmente más tarde.

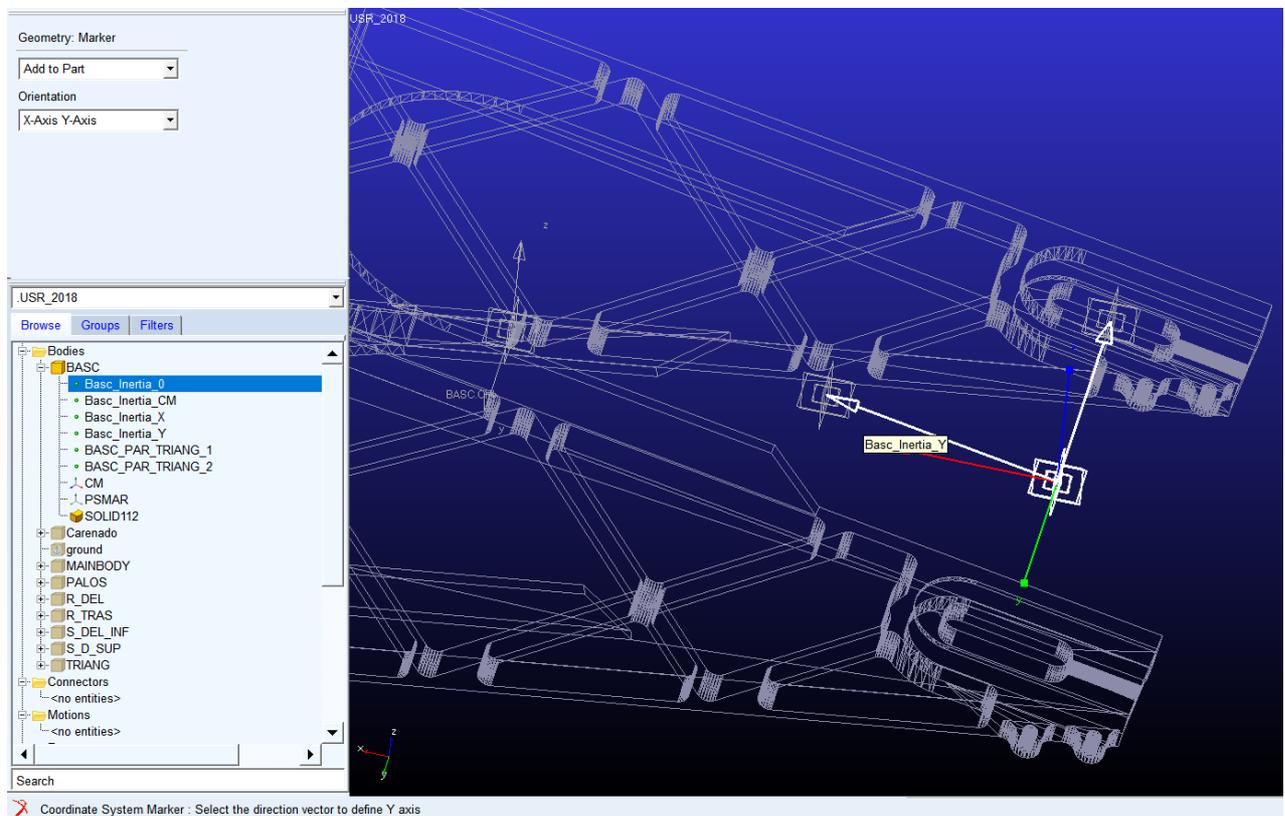


Ilustración 62 - Creación del marker para el sistema de coordenadas para las inercias – Último paso en el que se elige la dirección del eje Y

7.2 Introducir datos de masas e inercias a cada conjunto

Para la introducción de datos se asignarán los markers creados en el apartado anterior a cada sólido y se les atribuirán las inercias y masas.

7.2.1 Instrucciones directas

Para cada conjunto, seguiremos los siguientes pasos:

1. Abriremos sus propiedades haciendo doble click en el icono de su Body.
2. Para asignar propiedades másicas elegiremos:
 - “Mass Properties” en el menú desplegable “Category”
 - “User Input” en el menú desplegable “Define Mass By”
 - Activaremos “Off-Diagonal Terms” para poder introducir los productos de inercia (I_{xy} , I_{zx} e I_{yz})
 - Copiaremos los valores que obtuvimos en el apartado 4.2.
3. Haciendo doble click en los campos “Center of Mass Marker” y “Inertia Reference Marker” se nos abre una ventana donde seleccionaremos el marker que creamos para el CM y las inercias. En la siguiente ilustración se muestra cómo se selecciona el marker de las inercias, ya habiendo seleccionado el marker del CM.

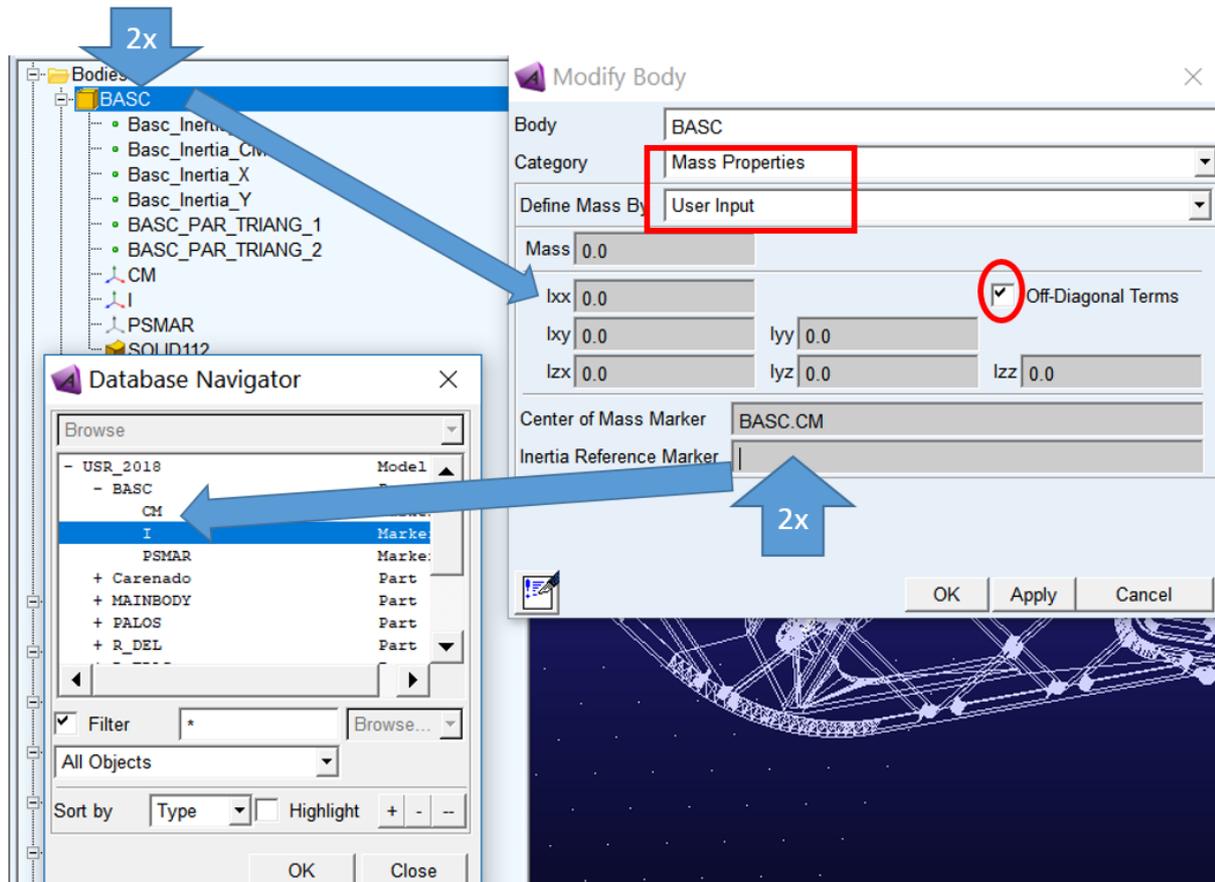


Ilustración 63 - Modificación de las propiedades del conjunto basculante

8 ESCENARIOS A SIMULAR

En este capítulo serán propuestos distintos escenarios que podrían ser de interés. El objetivo de este capítulo es dar una combinación que dará las herramientas suficientes al lector para crear otros escenarios derivados:

8.1 Escenario 1: Frenada extrema

El primer escenario propuesto es el de una frenada extrema. En este escenario, el tren delantero es el que ejerce la gran mayoría, si no toda, la fuerza de frenada. No solo es así, si no que la rueda trasera puede perder por completo el contacto con el suelo, siendo el tren delantero el que, además de las fuerzas de frenada, soporta todo el peso de la motocicleta.

Por esta razón, este escenario es uno muy importante a tener en cuenta. Las condiciones de contorno en este ejemplo son:

- Moto vertical
- Velocidad inicial de la moto
- Coeficiente de rozamiento ilimitado* en la rueda delantera
- Momento de frenada en la rueda delantera

* Ver apartado 8.1.3 para más detalles.

Para ilustrar todo este escenario, y asumiendo lo previamente explicado, el momento medio* de frenada se obtendría para las condiciones siguientes según:

- a. Distancia total de frenado 60m de 100 km/h a 0 → Aceleración media** $a \approx 8.8 \text{ m/s}^2$
- b. Masa total del conjunto moto y piloto $m \approx 170 \text{ kg}$ ***
- c. Radio de la rueda delantera $R = 291.5 \text{ mm}$ ***

En valores medios:

$$F = m * a = 170 * 8.8 \approx 1495N$$
$$M = F * R = 435.8 Nm$$



Ilustración 64 - Frenada extrema de Chris Vermeulen [7]:

Se muestra un esquema simple del balance de fuerzas explicado

* Se usan valores medios por ser mucho más sencillo que obtener la evolución con el tiempo. Realmente, esto es asumible, ya que la frenada no es apenas dependiente de la velocidad. No es así en el caso de la aceleración, donde hay gran diferencia en la fuerza de aceleración a medida que se sube a marchas más altas.

** La aceleración media se obtiene siguiendo las leyes del movimiento uniformemente acelerado, para más detalles ir al apartado 8.1.4

*** Los datos fueron obtenidos de Catia. Es importante obtenerlos de Catia y no de la realidad si se quiere mantener la física de los cálculos. Si los radios y masas se obtienen en la realidad pero Adams tiene la geometría y masas de Catia, el momento calculado no tiene por qué obtener en Adams la deceleración definida en las condiciones de contorno.

8.1.1 Instrucciones directas: Introducción de condiciones de contorno

El modelado en Adams de las condiciones establecidas se hace según:

- Moto vertical: Restricción de perpendicularidad entre el eje de la rueda trasera y la normal del suelo:
 - Elegir los cuerpos entre los que se establece la restricción: suelo y rueda
 - Seleccionar los vectores que tienen que mantenerse perpendiculares:
 - Al hacer click en el suelo, Adams toma su normal automáticamente.
 - Podemos coger cualquier vector perpendicular de la moto, p. ej. el formado por los dos puntos definidos para el par de la rueda trasera con el basculante.

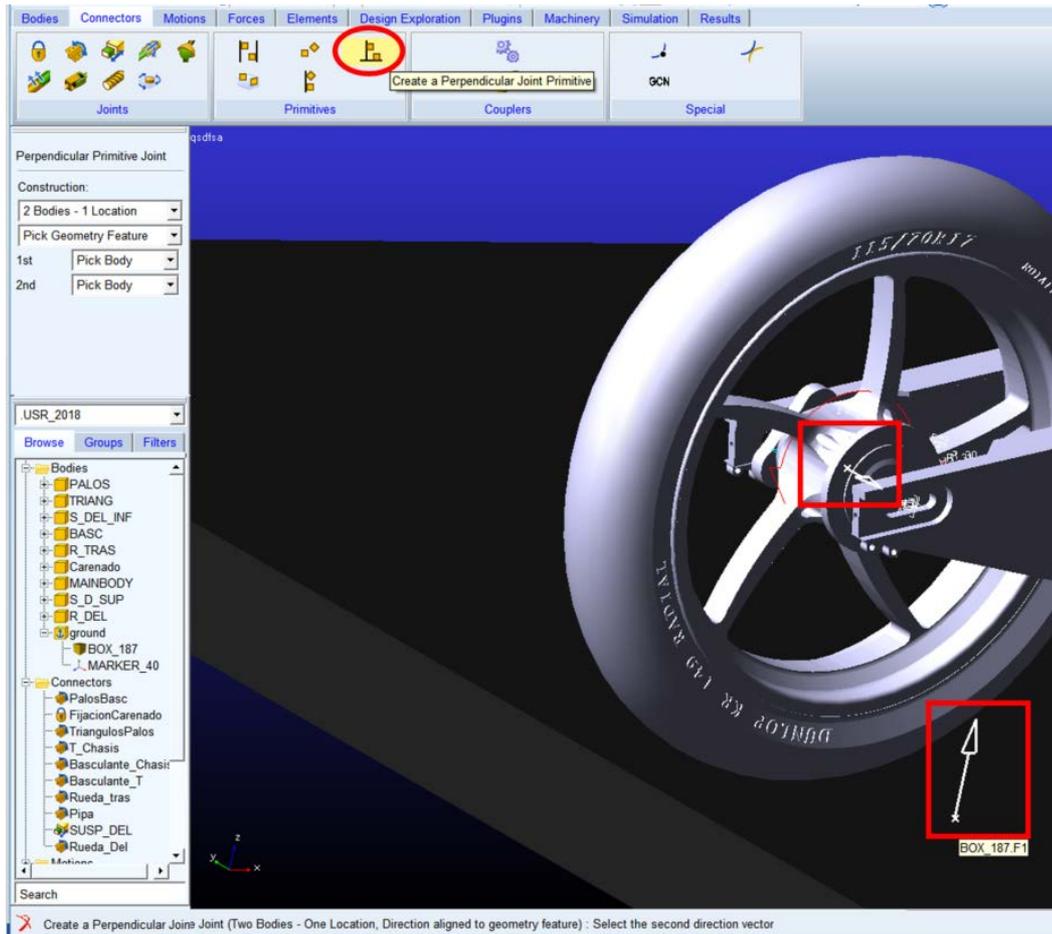


Ilustración 65 - Restricción de perpendicularidad para mantener la moto vertical

- Trayectoria rectilínea – Restricción de paralelismo entre el suelo y cualquier rueda:
 - Se seleccionan los bodies implicados (una rueda y el suelo) y el vector del eje de la rueda, a través de los puntos que definen su par de revolución.
- Rotación nula del tren delantero: En las propiedades de la restricción de revolución, cambiaremos ésta a unión fija:

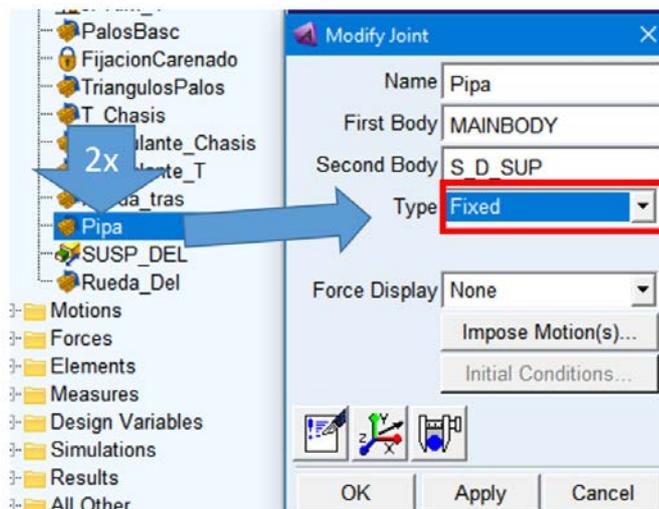


Ilustración 66 - Cambio del tipo de restricción a fija

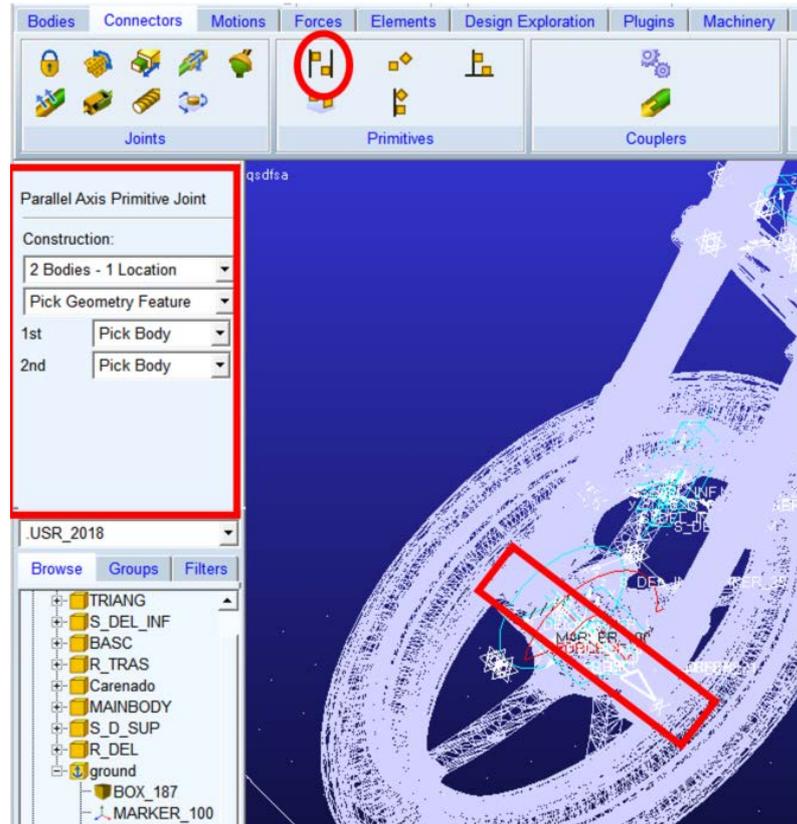


Ilustración 67 - Restricción de paralelismo

- Momento de frenada en la rueda delantera: elegimos el Body donde se aplica y el vector (el del par de la rueda)

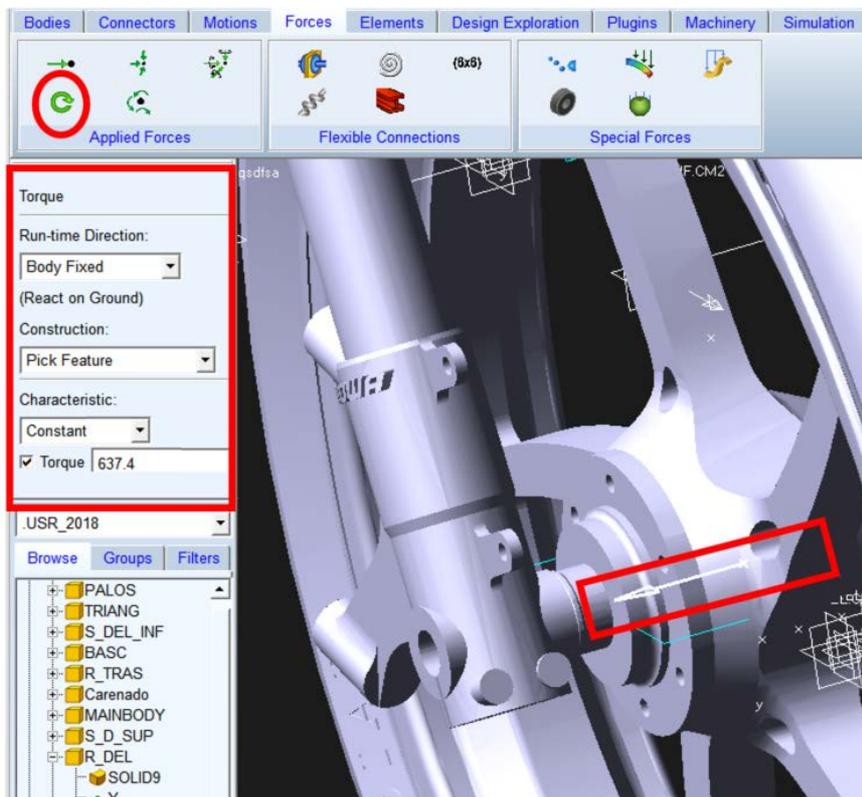


Ilustración 68 - Aplicación del momento de frenada

- Velocidad inicial de la motocicleta – En este caso se puede aplicar una velocidad cualquiera, ya que las reacciones en los pares serán prácticamente constantes durante la frenada. Simplemente es necesario que sea suficiente para que la frenada pase por el equilibrio en el que las suspensiones delanteras se encuentran comprimidas por la transferencia de peso durante la frenada.

Aplicaremos una velocidad inicial a cualquier Body, ya que moverá todo el conjunto:

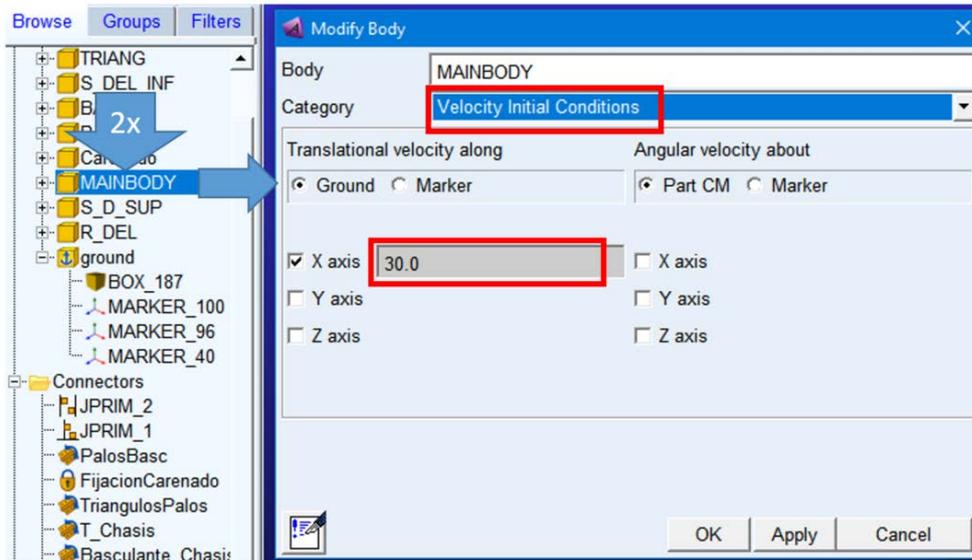


Ilustración 69 - Aplicación de velocidad inicial al Main Body

8.1.2 Instrucciones directas: Simulación

Una vez tenemos el escenario modelado, se procederá a simularlo. Para ello:

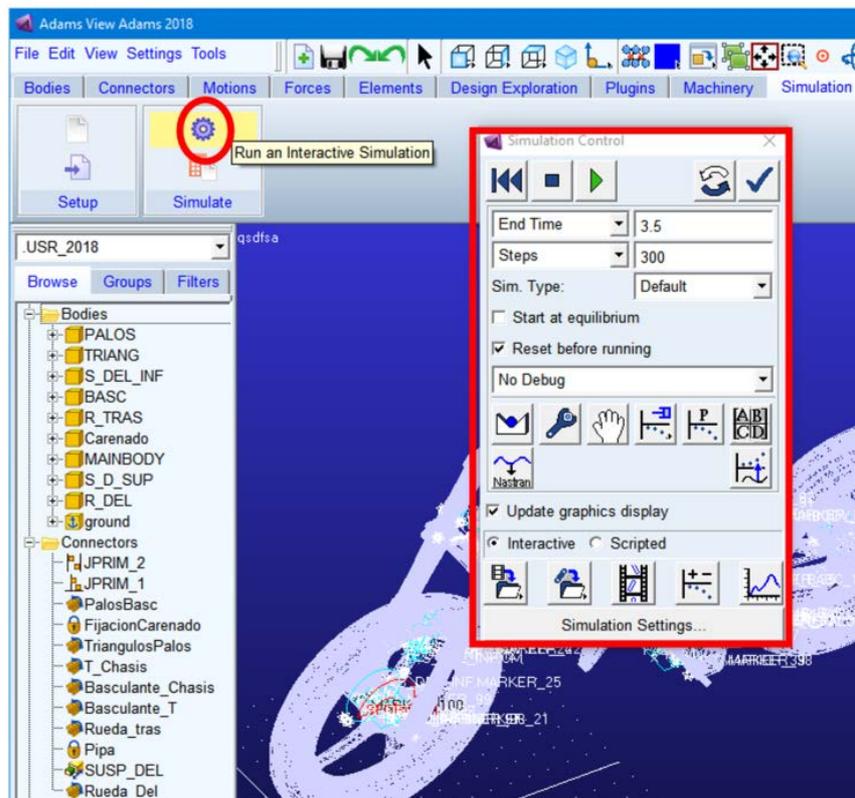


Ilustración 70 - Lanzamiento de la simulación

- Abrir el menú de simulación
- Elegir el tiempo final adecuado – Para este caso de deceleración se ha usado una aproximación del tiempo completo de detención por $t = v/a$. Como se ha mencionado, lo que realmente es importante es que el ensayo dure suficiente para llegar al “régimen permanente” de la frenada.
- Número de pasos o tamaño de pasos: si se eligen pocos pasos (o pasos grandes) el problema puede no converger. La experiencia durante este proyecto ha mostrado que menos de 100 pasos por segundo provoca problemas de convergencia para los escenarios aquí simulados. Esto también dependerá de la velocidad del problema: unas velocidades altas hacen que en un paso ocurran movimientos mayores. Por tanto será más difícil la convergencia para un mismo tamaño de paso de un problema con altas velocidades, en comparación con un problema con velocidades menores.
- “Reset before running” hará que cada vez que simulemos vuelva a la posición de diseño. Esto no es aplicable a todos los problemas, pero si en este, ya que queremos simular desde las condiciones iniciales establecidas.

Con esto habremos terminado con el modelado y la simulación. El post-procesado se explicará en el capítulo 9.

8.1.3 Detalles: Condiciones de contorno establecidas

La razón por la cual el agarre se considerará ilimitado* es porque es muy difícil obtener este valor en la realidad. Una forma experimental muy sencilla de evitar la necesidad de obtener un valor fiable del mismo es:

- Realizar una prueba de frenada extrema con alguna de las motocicletas desarrolladas por el equipo anteriormente, y medir la deceleración máxima realizable.
- Hacer un balance de fuerzas y obtener el momento de frenada en la rueda delantera. Para este momento tendremos certeza experimental que el agarre es suficiente o mayor que el mínimo para que ese momento de frenada sea ejercido sin deslizamiento.

La diferencia de una moto a otra en cuanto a capacidad de frenada antes del despegue de la rueda trasera vienen dadas principalmente por la masa total y la altura del centro de gravedad. Siendo motos de similares características, las diferencias deben ser mínimas entre la moto usada en el ensayo y el prototipo que se quiere analizar.

*El deslizamiento juega un papel de relajación en las restricciones que ayuda a la convergencia. Por esto, un coeficiente de rozamiento exageradamente alto dará, en muchos escenarios, problemas para llegar a la solución. El coeficiente usado en los ensayos aquí mostrados, a modo de referencia, ha sido de 10, ya suficientemente superior a la realidad.

8.1.4 Detalles: Aceleración media

En este caso, es más sencillo obtenerlo para el caso invertido, el 7de aceleración desde parado, en vez de deceleración:

$$X = X_0 + V_0 * t + \frac{1}{2} * a * t^2$$

$$V = V_0 + a * t$$

$$\text{Con: } X_0 = 0; \quad V_0 = 0;$$

Sustituyendo para el instante final:

$$X_f = \frac{1}{2} * a * t^2 \quad (\text{I})$$

$$V_f = a * t \quad (\text{II})$$

Introduciendo la ecuación (II) en la (I) y despejando el tiempo tenemos:

$$\frac{X_f}{\frac{V_f}{2}} = t \quad (\text{III})$$

De la cual solo desconocemos el tiempo. Una vez calculado, obtenemos la aceleración despejando en (II):

$$a = V_f/t \quad (\text{IV})$$

O, directamente con los datos de entrada, al combinar (III) y (IV):

$$a = \frac{V_f^2}{2 * X_f}$$

8.2 Escenario 2: Paso por curva

Este escenario se va a plantear también de forma que la obtención de los datos experimentales necesarios sea sencilla. Se propone:

- Realizar un ensayo de giro de la motocicleta alrededor de un cono, manteniendo un radio de giro estable, dentro de lo posible.
- Se buscará el límite de la tracción y se tomara la velocidad, ángulo de vuelco y ángulo de giro del manillar.

Antes de entrar en profundidad en el modelado, es conveniente mencionar brevemente la física del giro en el régimen permanente del mismo:

- El conjunto motocicleta y piloto sufren una fuerza centrífuga en el sentido contrario al giro al mantener una trayectoria curva.
- Esta fuerza provoca un momento, alrededor del pivotamiento que existe en el contacto entre la rueda y el asfalto, que intenta inclinar la moto hacia el exterior de la curva.
- La inclinación que hace el piloto del conjunto moto-piloto, saca el centro de gravedad fuera de la línea vertical del pivotamiento anteriormente mencionado creando un momento que compensa el anterior. Por esto, el conjunto se mantiene en equilibrio a un ángulo que, sin la fuerza centrífuga, provocaría la caída de la motocicleta.

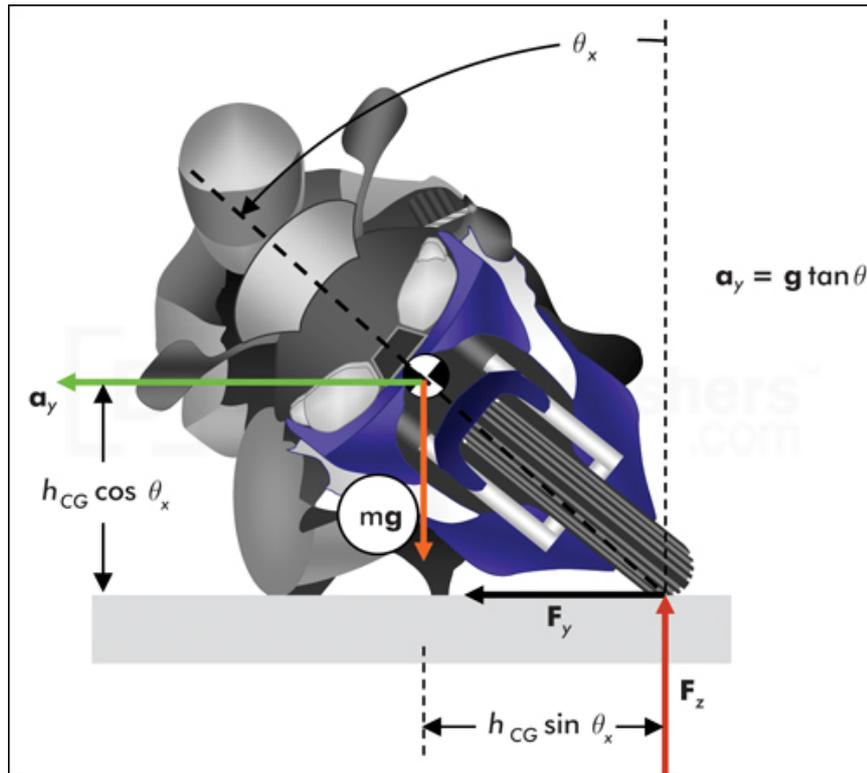


Ilustración 71 - Física de una motocicleta en curva [8]

Para una velocidad y una curva determinada, el centro de gravedad del conjunto motocicleta-piloto tiene que separarse de la línea vertical una cantidad determinada para conseguir el equilibrio. El piloto puede elegir entre inclinar más la motocicleta y mantenerse él en una posición más vertical, o inclinarse él un ángulo mayor y dejar la motocicleta más vertical. Como nota extra, mencionar que esta segunda opción es la preferida en los pilotos actuales de MotoGP por varias razones, entre la que destaca que la motocicleta mantiene una posición más vertical y, por tanto, las suspensiones pueden absorber las alteraciones del pavimento con mayor facilidad, mejorando la tracción.

Por esta razón, en las simulaciones, se podría variar el ángulo de vuelco en torno a los datos obtenidos experimentalmente para evaluar las posibles posiciones de la motocicleta en curva.

Es importante mencionar que se ha estimado fuera del alcance del proyecto evaluar la posición del piloto durante el giro, pero se podría introducir como un punto concentrado de masa con un movimiento controlado.



Ilustración 72 - Evolución de la postura en curva en MotoGP [9]

Ayudándonos del hecho de que lo que controla este escenario son:

- Momento que se crea al sacar el centro de gravedad de la línea vertical mencionada anteriormente
- Radio de la curva, controlado por el giro del manillar
- Velocidad de paso por la curva

Vamos a proceder según:

- Crear una restricción que mantenga la motocicleta a un ángulo determinado. Esta restricción aportará el momento estabilizador necesario para sostener la moto a ese ángulo.
- Aplicar un giro al manillar.
- Establecer una velocidad.

Ya que no se ha dispuesto de datos experimentales se ha enfocado este escenario desde un punto de vista totalmente didáctico, cubriendo más formas de restringir el modelo. En concreto, se ha fijado dos de las tres variables anteriores (ángulo de inclinación y ángulo de giro del manillar) y se ha hecho un barrido de la tercera (velocidad).

Esto no tiene sentido como análisis, ya que ocurrirán situaciones físicamente imposibles, como es el inicio desde reposo, en el que la moto se sostiene al ángulo impuesto, meramente por la restricción impuesta. En este escenario se mostrará cómo:

- Imponer un GDL en una restricción: Se va a imponer el giro del manillar
- Crear una restricción general (General constraint) vía una función o datos de entrada: Se va a especificar una función de la inclinación de la motocicleta. Estas restricciones generales permiten hacer restricciones fuera de los pares incluidos en la librería de Adams.
- Imponer una aceleración angular en la rueda trasera: Este caso quizás no es el caso más real, ya que mientras la motocicleta pasa por la parte más extrema de la curva, se tiende a evitar la frenada o aceleración de la motocicleta para, así, evitar “gastar” parte del agarre disponible, reservando todo el agarre para el giro. Esta condición se ha establecido para exponer otro tipo de condición con la que jugar para definir más escenarios deseados. Una velocidad constante podría establecerse.

8.2.1 Instrucciones directas: Imponer giro del manillar

Esta acción solo requiere los siguientes pasos (Ilustración 73 de apoyo):

- Hacemos doble click en el par cinemático de la pipa
- Hacemos click en “Impose Motion(s) para imponer un movimiento
- Como este par cinemático solo tiene el giro sobre el eje como GDL, este es el único que aparece disponible para modificar: Elegiremos “disp (time)=” para imponer una función o constante para la posición.
- Introducimos el ángulo deseado en el campo que se muestra al seleccionar la opción anterior.

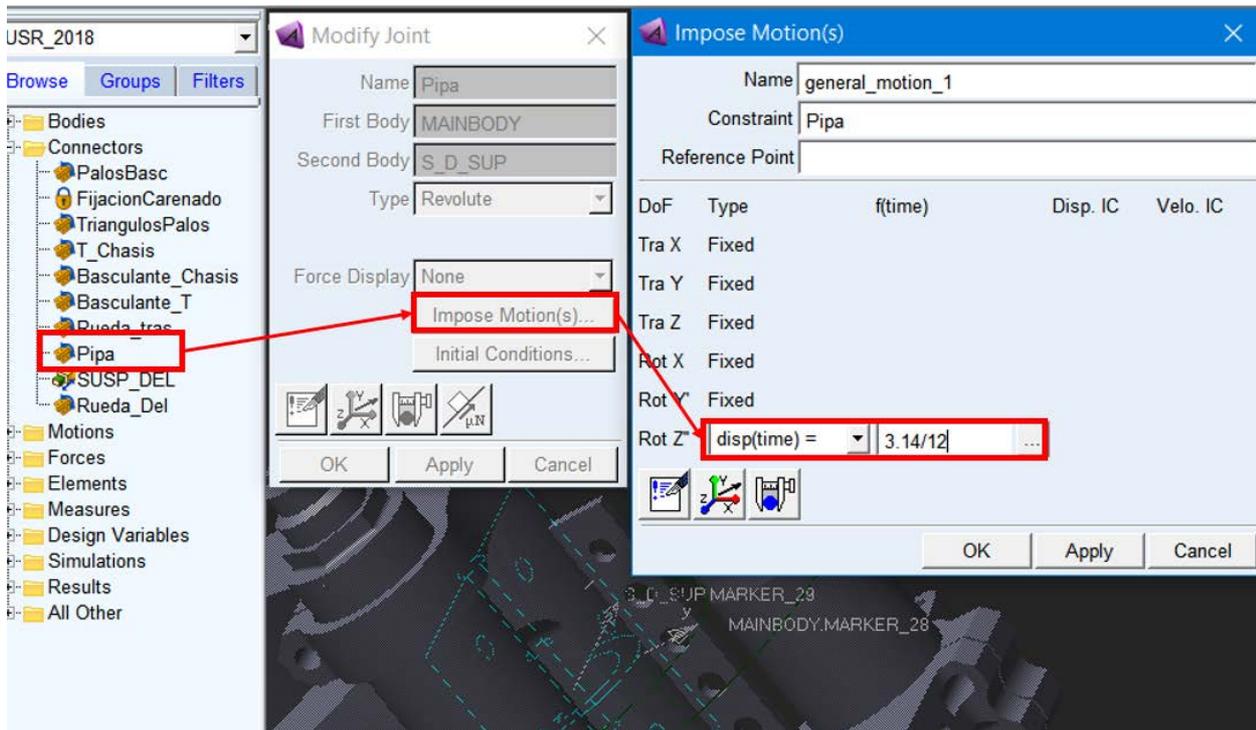


Ilustración 73 - Imposición de un ángulo de 15° ($\pi/12$ rad)

8.2.2 Instrucciones directas: Aceleración angular en la rueda trasera

Para imponer esta condición, el proceso es prácticamente igual al anterior, pero esta vez elegiremos “acce (time)=” para imponer la aceleración angular. La Ilustración 74 muestra cómo se puede imponer una función que contenga parámetros, p. ej. el tiempo. Los campos extra que tenemos disponibles son para:

- “...”: una ayuda que tiene Adams para crear funciones.
- Los campos numéricos a la derecha corresponden a la velocidad y posición inicial, en el caso que se quiera imponer.

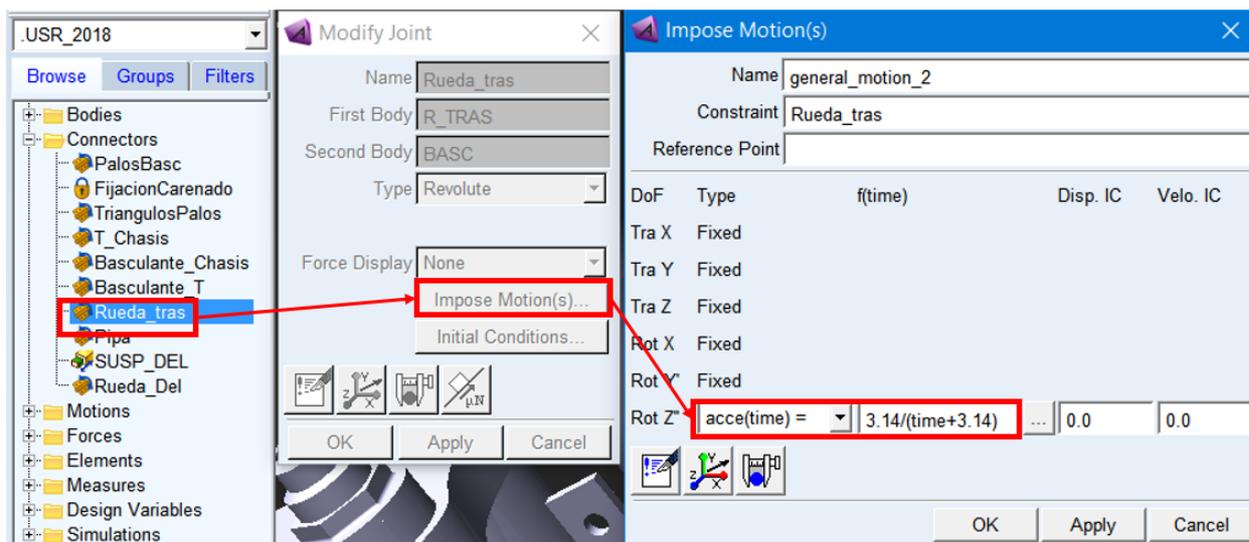


Ilustración 74 - Imposición de una aceleración angular decreciente con el tiempo

8.2.3 Instrucciones directas: General Constraint para establecer un ángulo con respecto a la vertical del chasis

Cuando no encontremos la restricción que deseamos en las predeterminadas en Adams, tenemos la posibilidad de crear restricciones matemáticas personalizadas. En este caso vamos a imponer el ángulo con la vertical del chasis. Procederemos según:

- Hacemos click en “GCN” para abrir el menú de General Constraint.
- Podremos definir la función que necesitamos en el segundo campo de la forma “ $f(q)=0$ ”.
- Abrimos el compositor de funciones (Function builder) haciendo click en los puntos suspensivos a la derecha de este campo.
- Elegiremos, del menú desplegable, el tipo de comando que queremos introducir para filtrar por categoría. En este caso seleccionaremos “Displacement” que incluye traslaciones y rotaciones.
- Elegiremos “B321 Sequence: 3rd Rotation” que corresponde al ángulo “Roll” o vuelco, y haremos click en “Assist” para abrir el asistente de funciones.
- Haciendo doble click en los campos vacíos, abriremos la lista de argumentos seleccionables para esta función, que en este caso serán markers (sistemas de ejes).
- Buscaremos los markers correspondientes al chasis y al ground (sistema de referencia fijo). Es muy posible que durante la importación se hayan creado muchos markers, además de los que se crearon a propósito para definir pares cinemáticos y sistemas inerciales. Se debe elegir uno que tenga el eje X, correspondiente al giro de vuelco, en la dirección de la marcha de la motocicleta. Muchos de los que ya hemos creado cumplirán este requisito. En el extraño caso que no tengamos ningún marker con estas características, habrá que crearlo.
- Hacemos OK en todas las ventanas hasta quedarnos en la principal de la GCN.
- Por último, añadiremos el ángulo que queramos que mantengan los markers que hemos seleccionado a la expresión de la restricción, mediante una función que llegue al valor deseado progresivamente desde la posición de diseño. Para más detalles sobre esto, acudir al apartado 8.2.4.

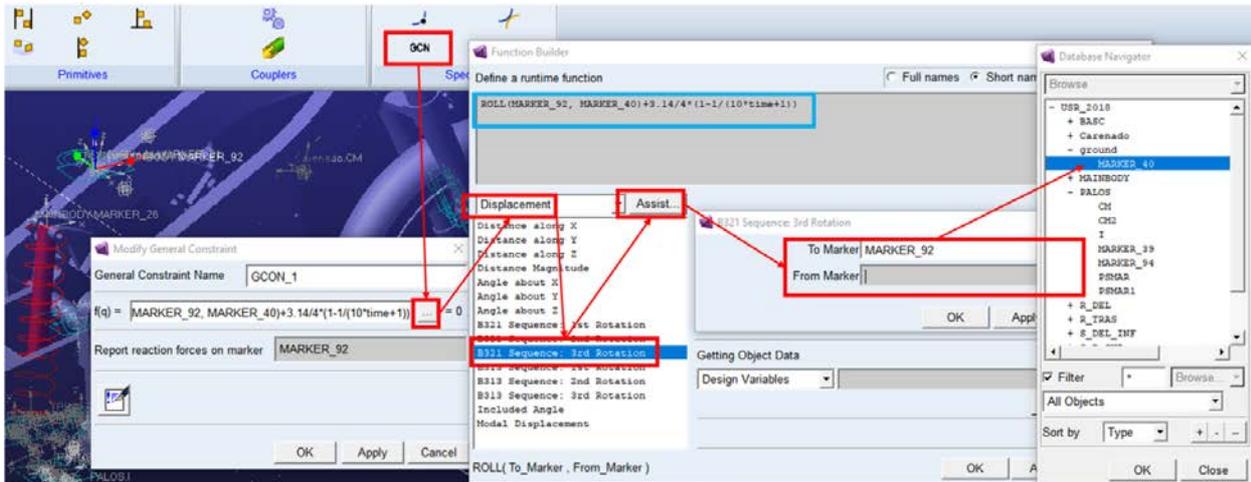


Ilustración 75 - Creación de la restricción matemática de ángulo con respecto a la vertical

El uso del Function Builder y Assist no es necesario, pero serán muy útiles cuando no conozcamos las funciones disponibles.

Con esta restricción se concluye el establecimiento de las condiciones necesarias para modelar el escenario del paso por curva de la motocicleta. Para ejecutar la simulación, seguiremos los pasos explicados para el otro escenario en el apartado 8.1.2

8.2.4 Detalles: Función progresiva acotada

Adams, a veces, muestra problemas para adoptar unas posiciones del sistema multicuerpo si estas son muy distintas de la posición de diseño (la posición que tiene el modelo importado en este caso). Esto es más problemático aún si el elemento que tiene el cambio de posición y/o orientación es un elemento principal, como el chasis. Para esto, lo más fácil es establecer una función con las siguientes propiedades:

- Posición/orientación igual a la de diseño para el instante inicial
- Acotada superiormente en el valor final deseado
- Progresiva

De esta forma, la restricción empieza en la posición de diseño, y llega progresivamente a la posición final. A continuación, se muestra el tipo de función usada para el caso del ángulo de vuelco, y se muestra este comportamiento en la gráfica de la Ilustración 76:

$$f(t) = \alpha * \left(1 - \frac{1}{K * time + 1}\right)$$

α : ángulo final y K : constante que influye en la rapidez que la función llega a α

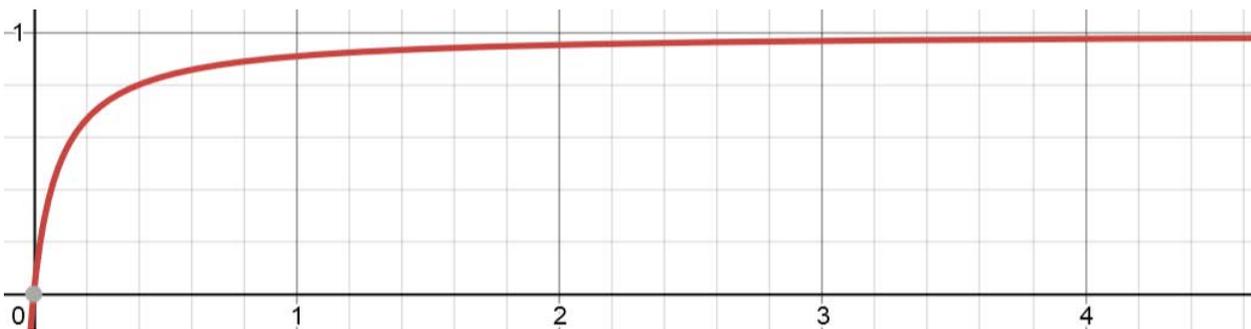


Ilustración 76 - Grafica ejemplo de la función definida para $\alpha =1$ y $K=10$

9 POSTPROCESADO DE RESULTADOS

Una vez se ha completado la simulación, vamos a analizar los resultados de la misma. Para ello, abriremos el menú de Postprocesado:

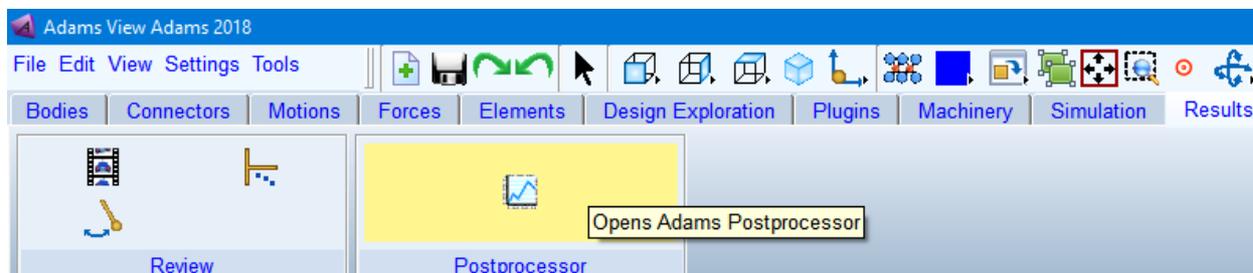


Ilustración 77 - Menú que abre el postprocesador de Adams

Una vez abierto, los datos a analizar dependerán del problema que se ha resuelto y los datos objetivos del problema. Por eso, se va a explicar cómo se han obtenido datos relevantes de los escenarios explicados en el capítulo anterior, y ejemplos de posibles datos interesantes a obtener.

9.1 Escenario 1: Frenada extrema

En este apartado estaremos buscando principalmente esfuerzos en el tren delantero, ya que es el que tendrá los mayores esfuerzos del conjunto.

Como en cualquier simulación, conviene hacer cálculos aproximados en los escenarios más simples para evaluar la calidad de nuestro modelo. En este caso esperamos ver, por ejemplo, un momento en la pipa parecido al momento de frenada. Esto ocurre ya que la transferencia de momento es prácticamente plena al conjunto porque no hay deslizamiento y el momento invertido en decelerar la rueda es insignificante en comparación con el momento dedicado a frenar el conjunto.

9.1.1 Instrucciones directas: Obtención de resultados determinados

Por defecto, el Postprocesado nos proporcionará cualquier magnitud que Adams haya calculado para llegar a la solución: fuerzas, pares, posiciones, velocidades.... El problema es que están calculadas en coordenadas globales y, cuando varíen la posición y orientación del conjunto con respecto al sistema global de ejes, será complicado tratarlas.

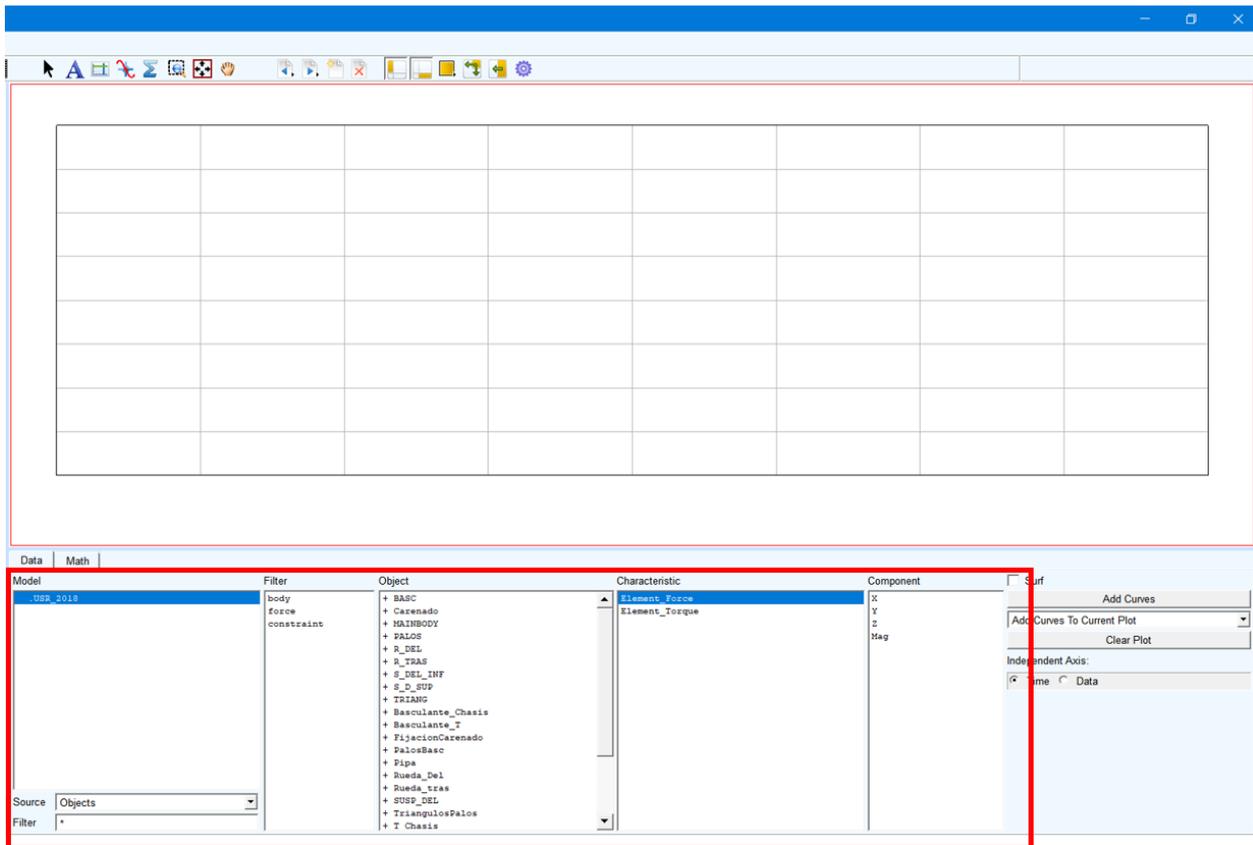


Ilustración 78 - Ventana de Postprocesado: Encuadrado las magnitudes automáticamente calculadas

Para obtener magnitudes de interés en sistemas de referencia más convenientes se pueden crear “measures”. Para ello, simplemente tendremos que hacer click derecho en el elemento del que queremos obtener un dato y seleccionar “Measure” del menú que se nos despliega. Como ejemplo, se muestra cómo obtener los momentos en la pipa en el eje perpendicular al plano de la moto, con la Ilustración 79 como apoyo de la explicación:

- Hacemos click derecho en el par definido para la pipa y seleccionamos “Measure”
- Elegimos “Torque” en “Characteristic”
- Seleccionamos la componente que queramos obtener en el sistema de ejes respecto del cual queramos obtener datos (elegido en un paso posterior). En este caso es la componente X, como se puede ver en el sistema señalado (Rojo).
- Escogemos el elemento desde el que queremos obtener el momento: el momento que “ve” la pipa o el que “ve” la suspensión delantera o al revés – El valor es el mismo pero de signo contrario.
- Elegimos el sistema de referencia (marker) respecto del cual queramos obtener los datos: En este caso se ha elegido el sistema local de referencia que se creó para definir este par cinemático.

En la mayoría de los casos, estos “measures” podrán ser obtenidos después de hacer la simulación, apareciendo automáticamente en la ventana de Postprocesado. En el caso que no lo veamos, necesitarán la repetición de la simulación.

Podremos filtrar los resultados en el postprocesador por “measures” y veremos solo los datos de interés. En la Ilustración 80 se muestra cómo filtrarlo y cómo, seleccionando el valor que queramos plotear, podemos añadir curvas a la gráfica (“Add curves”).

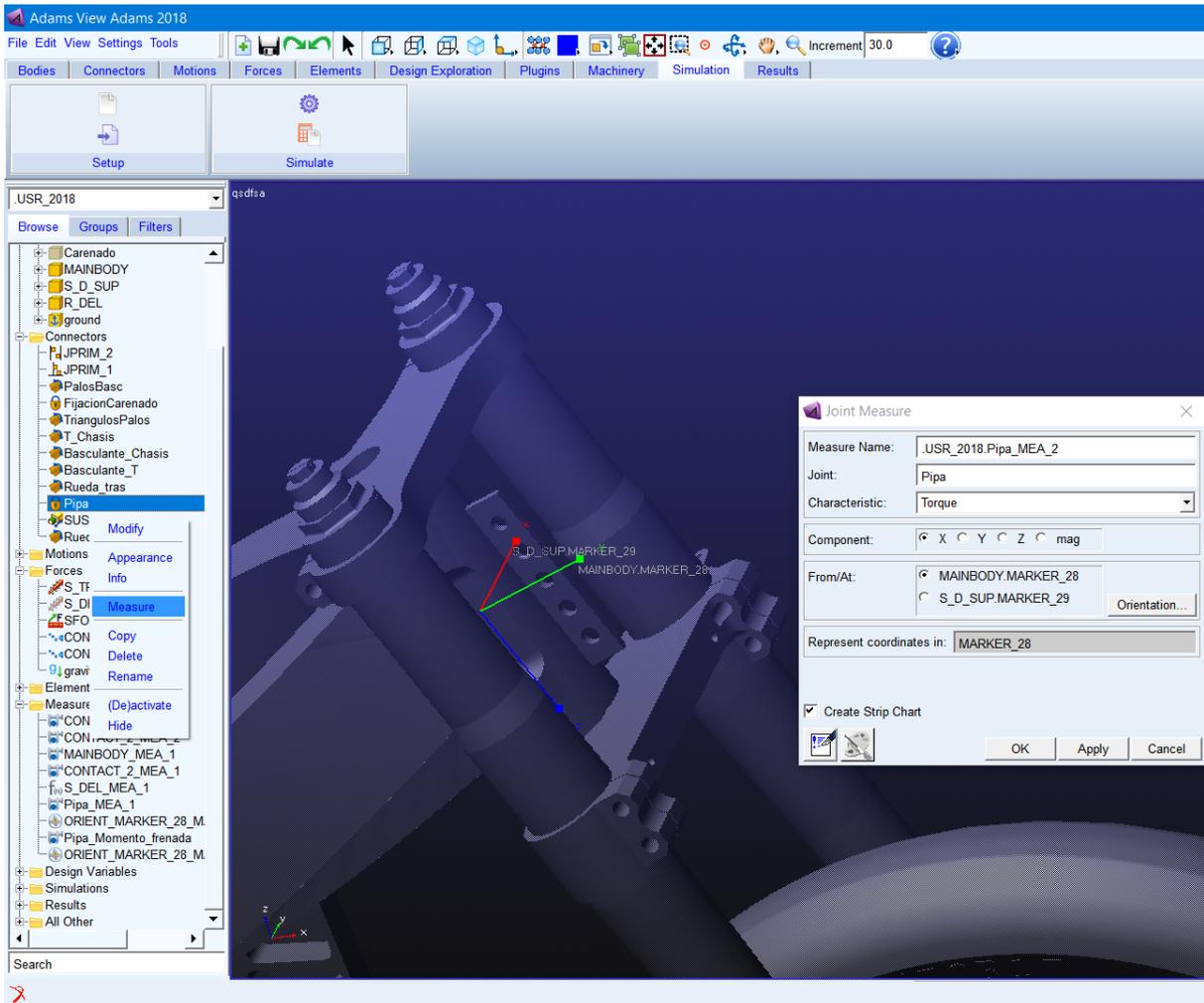


Ilustración 79 - Creación del "Measure" del momento en la pipa

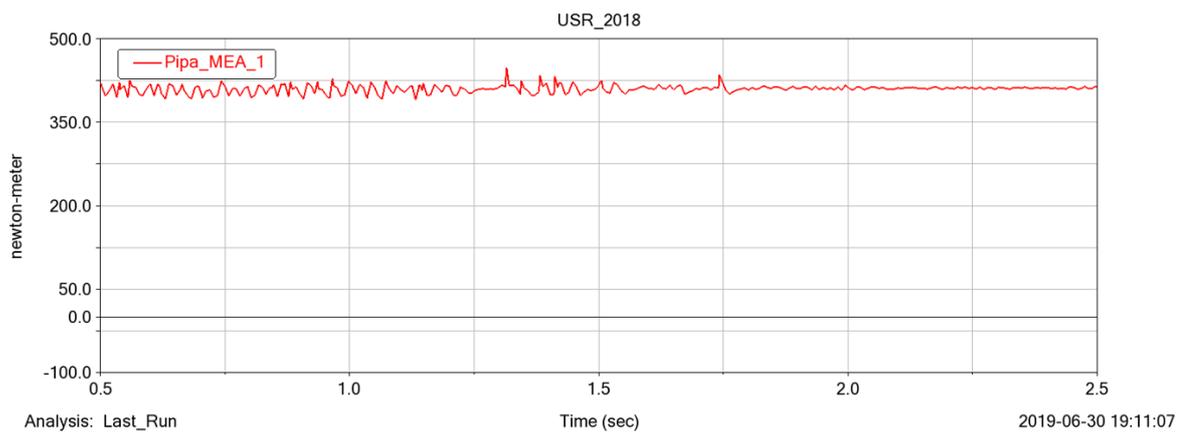


Ilustración 80 - Filtrado de resultados por "measures" y plotado del momento calculado

Como se puede observar, el momento obtenido en la pipa esta en torno al valor esperado: el momento de frenada.

La obtención de datos de interés es prácticamente ilimitada. Otros valores que pueden ser de interés son deformaciones de las suspensiones. Para esto o cualquier otro dato de interés, simplemente tendremos que buscar en el árbol el elemento involucrado y crear un Measure.

9.2 Escenario 2: Paso por curva

Dado que ya se ha explicado cómo obtener Measures, se va a limitar el contenido de este apartado al listado de ciertos datos considerados importantes sobre este escenario, al igual que ciertas conclusiones y consejos que el autor ha aprendido durante la ejecución del proyecto.

9.2.1 Lista de posibles datos interesantes

El escenario del paso por curva incluye esfuerzos muy distintos en muchos componentes de la motocicleta, al contrario del de frenada, escenario en el que encontramos los esfuerzos más importantes concentrados en el tren delantero.

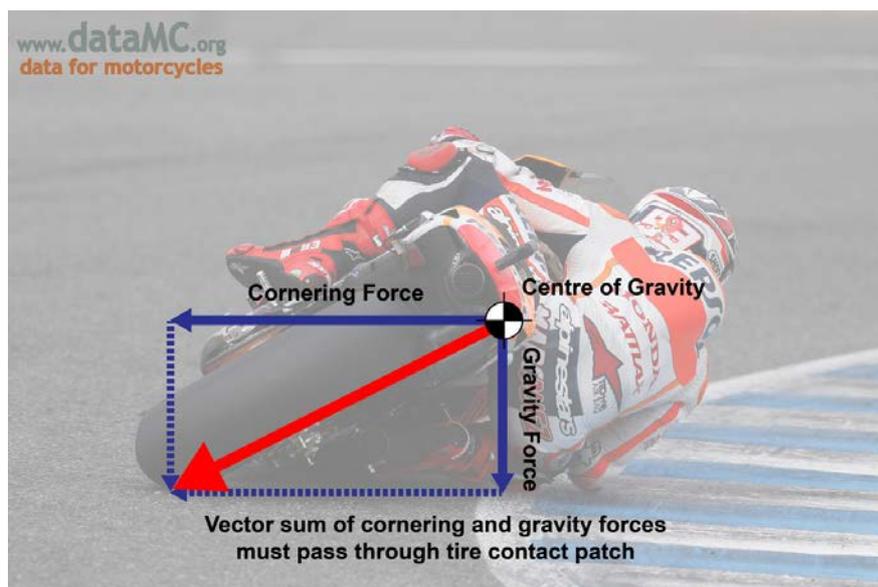


Ilustración 81 - Esquema simplificado de la dinámica del giro [10]

En este escenario, las cargas soportadas serán las gravitatorias más las provocadas por las fuerzas inerciales por el cambio de trayectoria. Todas estas cargas son transmitidas al suelo por los neumáticos, que tienen que transmitir la misma fuerza resultante en el sentido contrario para evitar el deslizamiento:

- Las fuerzas perpendiculares al plano de la motocicleta provocan importantes momentos alrededor del eje longitudinal de la motocicleta.
- Por otro lado, esfuerzos de compresión como si de un aumento de la gravedad se tratase, por la componente de las fuerzas paralela al plano de la motocicleta.

Por estas razones, algunos de los resultados de este escenario que pueden ser de interés son:

- Momentos en la pipa, ambos:
 - o El alineado con el eje de dirección de marcha de la moto

- Perpendicular al plano de la motocicleta. Originados por el ángulo de lanzamiento, en este caso serán contrarios en sentido a los del escenario de la frenada.
- Esfuerzos provocados por el aumento de gravedad aparente mencionado:
 - Sobreesfuerzo de los ejes de las ruedas y otros ejes de rotación, con respecto al esfuerzo provocado por el peso propio. Cualquier otro componente de la motocicleta puede ser objeto de estudio frente a estos esfuerzos.
 - Recorridos de las suspensiones.

9.2.2 Consejos

La velocidad en curva se puede imponer de varias formas. En este escenario se ha impuesto una aceleración angular en la rueda trasera. Si se hace de esta forma, tenemos que controlar que el momento establecido no sea excesivo, puesto que puede provocar:

- Deslizamientos: ya que, como se mencionó, el agarre establecido no es ilimitado si no bastante superior a lo real.
- Esfuerzos en la motocicleta que no queremos evaluar y que van a falsear los resultados.
- Deformaciones en las suspensiones excesivas con respecto a un escenario real en curva.

Si se quisiera establecer una velocidad constante en curva, se recomienda:

- Imponer una velocidad de giro constante con el tiempo a una de las ruedas, igual a la obtenida en los ensayos experimentales.
- Imponer una velocidad inicial al Main Body igual a la velocidad de traslación de la moto en curva. Es recomendable también imponerle una velocidad inicial a la rueda que no hemos impuesto velocidad constante en el paso anterior. Estas dos imposiciones son porque la rueda con velocidad impuesta tendrá que impulsar el conjunto desde el reposo, mientras rueda a la velocidad impuesta. Esto puede provocar deslizamiento, o, en el peor de los casos, el despegue descontrolado de la rueda delantera. Sin embargo, si la rueda motora solo mantiene la velocidad que ya tiene el conjunto, no ocurrirá nada de lo anteriormente mencionado.
- Aplicar progresivamente el giro del manillar y de vuelco con funciones como la explicada en el apartado 8.2.4. No es necesario sincronizar estos de ninguna manera, ya que la restricción del vuelco creará el momento necesario para mantener la moto a ese ángulo. Una vez que ambos lleguen a su valor final se considerará el régimen permanente y los datos de las simulaciones serán relevantes.

10

CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE MEJORA

Aunque de un “tutorial” puedan no esperarse conclusiones, como proyecto se han sacado las siguientes, junto con unas propuestas de mejora. A continuación, para terminar con la presente memoria se exponen las anteriores:

10.1 Conclusiones

De este proyecto se ha obtenido las siguientes conclusiones:

- La importancia de crear un modelo en Catia con la estructura propuesta desde el inicio. Es crucial para ejecutar estos análisis con mayor facilidad a lo largo de la evolución del diseño del prototipo.
- El potencial que tiene el uso de programas de simulación de sistemas multicuerpo, como es Adams. El equipo US – Racing podría beneficiarse de esto para mejorar su motocicleta edición a edición, y conseguir estar cada vez más alto en el ranking de MotoStudent.
- También se han concluido simplificaciones de los escenarios que, si no fuera por ellas, habría que obtener multitud de sensores, tratar su información e implementarla en Adams de forma que las entradas sean compatibles entre ellas. Los escenarios aquí definidos necesitan solo sensores tan básicos como:
 - o Cronómetro
 - o Velocímetro – El hecho adicional de poder obtener la evolución velocidad-tiempo permitiría evaluar posibles escenarios intermedios interesantes, ya que con velocidades iniciales y finales solo se pueden obtener los valores medios.
 - o Sensor de vuelco de la motocicleta
 - o Sensor de giro del manillar
- Por último, se ha concluido también el hecho de no ser necesario obtener datos ultra precisos y modelar el conjunto de piloto y moto por separado, ya que hay forma de compensarlos con cierta facilidad. Por ejemplo:
 - o Conseguir que el modelo del conjunto motocicleta-piloto y la realidad sea suficientemente parecidos es tan difícil que, hacer que la motocicleta en Adams se mantenga en equilibrio al ángulo de giro y la velocidad igual a las medidas experimentalmente, es prácticamente imposible. Sin embargo tenemos la restricción de ángulo, que crea el momento necesario para compensar esa diferencia, como si del piloto moviéndose se tratase.

Obviamente, cuanto más nos acerquemos a la realidad en cada paso, más reales serán los resultados, pero habrá que llegar a un compromiso entre dificultad de obtención de datos y precisión.

10.2 Propuestas de mejora

Ya se han mencionado algunas propuestas de mejora en el cuerpo del proyecto, pero ellas, junto a otras, se agrupan a continuación:

- Modelar el movimiento del piloto con respecto a la motocicleta, tanto el típico de curva, como ya se ha mencionado, como la postura que suelen adoptar los pilotos en la frenada y otras. De esta forma, se podría incluso estudiar mejoras de las posturas del piloto.

- Obtener valores más reales de inercias, masas y demás de todos los componentes de la motocicleta. En este tutorial se ha obviado la precisión en estos casos, porque no tenía sentido invertir tiempo en obtener datos de una moto que ya se ha creado. Como ejemplos son las masas e inercias, o las constantes de comportamiento de los amortiguadores.
- No era objetivo del proyecto, pero modelar más escenarios de interés es vital para controlar que la motocicleta está lo más cerca del óptimo posible. Incluso el modelado de una vuelta completa a un circuito podría hacerse, o los tramos en los que se estime que ocurran escenarios relevantes.
- Investigar el uso de sólidos flexibles en Adams, en vez del análisis de sólido rígido desarrollado aquí.

REFERENCIAS

- [1] RiderWear, «RiderWear,» [En línea]. Available: <http://riderwear.blogspot.com/2014/05/rossis-long-series-of-race-day-rituals.html>.
- [2] MotoStudent, «MotoStudent,» [En línea]. Available: <http://www.motostudent.com/>. [Último acceso: 23 Enero 2019].
- [3] US-Racing, «US-Racing,» [En línea]. Available: <https://www.usengineering.com/>. [Último acceso: 25 Enero 2019].
- [4] M. C. V. P. D.Capriglionea, «sciencedirect,» [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224117302245>.
- [5] D. Emmett, «<https://motomatters.com>,» 08 Agosto 2011. [En línea]. Available: https://motomatters.com/analysis/2011/08/08/the_trouble_with_the_ducati_desmosedici.html.
- [6] MSC Adams, *Adams View Help*.
- [7] S. Bradley y R. Handley, «MotorbikesToday,» 2006. [En línea]. Available: http://www.motorbikes.today/news/Articles/motogp_06_china.htm. [Último acceso: 2 Mayo 2019].
- [8] C. Fitzgerald, «bestride.com,» [En línea]. Available: <http://bestride.com/news/books-physics-for-gearheads-answers-all-the-auto-physics-questions-you-were-too-dumb-to-ask>. [Último acceso: 1 Julio 2019].
- [9] «www.therideadvice.com,» [En línea]. Available: <https://www.therideadvice.com/the-evolution-of-motorcycle-body-position/2/>. [Último acceso: 1 Julio 2019].
- [10] datamc.org, «www.datamc.org,» [En línea]. Available: <https://www.datamc.org/data-acquisition/gps-data-analysis/total-weight/>. [Último acceso: 06 Julio 2019].