



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche  
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

**PROGETTAZIONE DEL PROCESSO DI VALIDAZIONE  
DI UN MODELLO MULTIBODY DI UNA VETTURA  
DI FORMULA SAE**

**DESIGN OF THE VALIDATION PROCESS OF A  
MULTIBODY MODEL OF A FORMULA SAE CAR**

*Relatore:*

**Prof. Ing. Matteo Palpacelli**

*Tesi di Laurea:*

**Pulzella Pierluigi**

Anno Accademico 2020 / 2021

*A me medesimo*

## Sommario

|  |    |
|--|----|
| Introduzione .....                                   | 5  |
| 1.1 Polimarche Racing Team .....                     | 7  |
| 1.1.1 Formula SAE .....                              | 7  |
| 1.1.2 Prove statiche .....                           | 9  |
| 1.1.3 Prove dinamiche .....                          | 10 |
| 1.2 Software multibody .....                         | 12 |
| 1.2.1 Utilizzo .....                                 | 13 |
| 1.2.2 Adams .....                                    | 13 |
| 2. Capitolo 2: Modellazione .....                    | 14 |
| Introduzione .....                                   | 14 |
| 2.1 Modellazione in Adams/Car .....                  | 14 |
| 2.2 Modellazione template .....                      | 15 |
| 2.3 Modellazione pneumatici .....                    | 19 |
| 2.3.1 Pneumatici .....                               | 19 |
| 2.3.2 Dati e modellazione .....                      | 22 |
| 3. Capitolo 3: Simulazione .....                     | 29 |
| Introduzione .....                                   | 29 |
| 3.1 Simulazioni sospensioni .....                    | 30 |
| 3.2 Simulazioni intero veicolo .....                 | 32 |
| 4. Capitolo 4: Progettazione della validazione ..... | 34 |
| Introduzione .....                                   | 34 |

|   |    |
|---|----|
| 4.1 Controllo preliminare .....           | 35 |
| 4.2 Simulazioni .....                     | 35 |
| 4.3 Scelta parametri di validazione ..... | 36 |
| 4.4 Test, strumenti e analisi dati.....   | 36 |
| 4.5 Validazione .....                     | 42 |
| 5. Capitolo 5: Conclusioni .....          | 45 |

# ***1. Capitolo 1: Premesse alla progettazione di validazione***

## **Introduzione**

L'utilizzo dei Software di simulazione rappresenta un enorme vantaggio sia in fase di progettazione che in fase di ottimizzazione di un veicolo da corsa. Tramite la simulazione si riesce a valutare, in modo preliminare, se una modifica al design del veicolo apporta o meno un miglioramento alle prestazioni dello stesso, come anche se un assetto delle sospensioni è più adeguato rispetto ad un altro.

È chiaro, dunque, come l'adozione della fase di simulazione come parte integrante della spirale di progetto rappresenti un valore aggiunto in termini di tempo, possibilità di valutare diverse scelte di design contemporaneamente, in termini di costo e possibilità di escludere scelte di design che tramite la simulazione si sono rivelate essere sbagliate o non soddisfacenti.

In questo scenario è di fondamentale importanza sottoporre il modello dinamico realizzato tramite un software di simulazione multibody a un processo di validazione. Questa, è una procedura con la quale si vanno a confrontare il comportamento del modello con quello reale della vettura, che è stato ottenuto raccogliendo dati sperimentali durante i test in pista.

Il processo di validazione di un simulatore multibody si basa sulla comparazione e la convergenza a livello statistico. Il primo passo è quello di confrontare i risultati ottenuti dal software con i dati campionati ottenuti da rilievi sperimentali. Questo processo permette di valutare le variabili che maggiormente necessitano di una ri-modellazione e quelle che invece sono state modellate correttamente. Sulla base delle variabili da migliorare, si decidono i parametri statistici di controllo durante il processo iterativo di convergenza e i valori degli errori massimi ammissibili. Definite le funzioni statistiche di controllo e i valori

di errore massimo ammissibili si passa al processo iterativo di convergenza. Questo processo vede mettere in atto continue implementazioni al modello matematico fino a quando i risultati ottenuti dal software non rientrano nei valori prestabiliti degli errori massimi ammissibili.

Il seguente elaborato si pone come obiettivo quello di analizzare le fasi richieste per arrivare alla validazione di un modello dinamico, in modo tale da creare delle linee guida. Ogni fase sarà analizzata singolarmente, partendo dal controllo preliminare eseguito sul modello, passando per i test in pista eseguiti con la vettura, per arrivare alla fase di validazione vera e propria.

## 1.1 Polimarche Racing Team

### 1.1.1 Formula SAE

Il Polimarche Racing Team è il team di Formula SAE dell'Università Politecnica delle Marche. Fin dal suo esordio, la squadra di studenti dell'ateneo ha partecipato agli eventi di Formula SAE con veicoli a combustione interna, arrivando a sviluppare l'ultimo prototipo, chiamato P4, con cui il team ha vinto la "Classe 3" all'evento



*Figura 1: Logo del Polimarche Racing Team*

'Italy2018'. Con la sua evoluzione, la P4M ha partecipato agli eventi 'Italy2019' e 'Germany2019' in "Classe 1C". Dato il crescente sviluppo dell'elettrico nel settore Automotive, quest'anno il team ha deciso di dedicarsi ad un progetto completamente nuovo, che prevede lo sviluppo di una monoposto elettrica con cui partecipare in futuro alla "Classe 1E".

La Formula SAE è una competizione universitaria organizzata dal "Society of Automotive Engineers" (SAE), dove le squadre partecipanti sono costituite interamente da studenti. L'oggetto della competizione è quello di progettare e realizzare una vettura da corsa (dalle dimensioni ridotte) che viene sottoposta all'occhio critico dei giudici, i quali devono esaminare sia la qualità di progettazione che l'efficienza ingegneristica.

L'idea con cui nasce la Formula SAE è che un'azienda fittizia ingaggi il team affinché realizzi un prototipo di auto da corsa con determinate caratteristiche, che occupi il segmento di mercato dedicato a piloti non professionisti. L'obiettivo della SAE è quello di creare competizioni nelle quali gli studenti riescono ad interfacciarsi con la reale vita lavorativa ed a formare una fitta rete di contatti tra aziende del settore ed i team che vi partecipano.

La competizione si divide in 4 categorie: "Classe 1C" (Combustion), per veicoli a combustione interna, "Classe 1E" (Electric), per monoposto elettriche, e infine "Classe 1D" (Driverless), per vetture a guida autonoma. A queste se ne aggiunge

una quarta, la “Classe 3”, a cui partecipano le squadre che presentano solo il progetto ingegneristico su carta della vettura, senza prendere parte ai test su pista. Le monoposto, ad ogni evento organizzato dalla SAE, vengono sottoposte a 2 tipologie di prove (statiche e dinamiche); le squadre, per poter accedere alle prove devono necessariamente superare la “Technical Inspection”. Durante questa ispezione, i giudici effettuano verifiche ed ispezioni tecniche con lo scopo di appurare le conformità della vettura con il regolamento, particolare attenzione viene data alla sicurezza e all’incolumità del pilota. La “Technical Inspection” si compone di:

- ispezione generale;
- “Tilt Test”, in cui l’auto viene inclinata su entrambi i lati fino a 60 gradi per certificare che non ci siano perdite di liquidi;
- “Noise Test” per i veicoli termici, così da verificare che il motore non superi i 110 dB di rumore, o “Rain Test” per i veicoli elettrici, per appurare che non ci siano malfunzionamenti in caso di pioggia;
- “Brake Test”, in cui la vettura deve essere in grado, dopo una lunga accelerazione, di bloccare contemporaneamente tutte e quattro le ruote senza arrivare allo spegnimento del motore.





*Figura 2: Polimarche Racing Team durante la fase di ispezione tecnica*

### **1.1.2 Prove statiche**

Una volta superata la “Technical Inspection” i team possono accedere alle prove statiche. Come il nome lascia intendere, durante le prove statiche la vettura sarà testata da ferma. Le prove statiche prevedono la valutazione delle monoposto da parte di una commissione di giudici (professionisti del settore), in termini di strategia di marketing, gestione dei costi e scelte progettuali.

Le prove statiche si costituiscono di:

- Business Plan Presentation Event: questa presentazione è finalizzata a valutare l'abilità del team nello sviluppare e consegnare un ampio ed esaustivo business case. L'evento è giudicato da persone provenienti dal mondo dell'automobile, pertanto il team deve ipotizzare di confrontarsi non soltanto con ingegneri, ma con esecutivi provenienti da varie aree di competenza una società, inclusi manager di produzione, marketing e

finanza. La valutazione è focalizzata al contenuto, all'organizzazione e all'illustrazione del progetto, nonché all'abilità nel rispondere alle domande dei giudici. Il team che produrrà la miglior presentazione, associata alla qualità del veicolo, vincerà la prova;

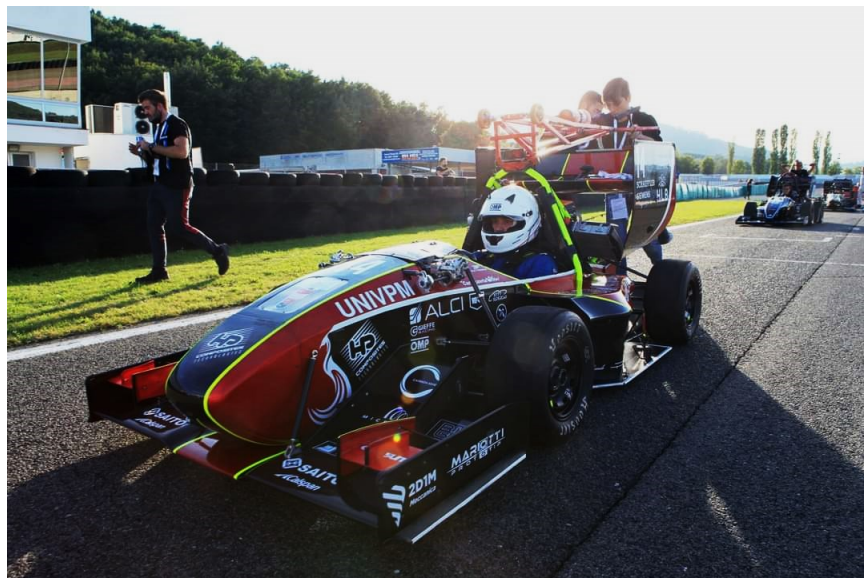
- **Cost and Manufacturing Event:** l'obiettivo di questa prova è quello di insegnare ai partecipanti quanto il costo in relazione al budget disponibile sia fattore imprescindibile, cui è fondamentale tenere conto in una progettazione ingegneristica. È così possibile imparare quali siano le tecniche e i processi da attuare durante la produzione dei componenti scelti in fase progettuale. La prova è suddivisa in due parti: la compilazione di un report scritto (che deve essere inviato ai giudici prima della competizione) e la discussione durante l'evento stesso. Questo consente di valutare non soltanto il costo del prototipo, ma anche l'abilità del team di produrre una stima accurata dei costi di produzione e progettazione;
- **Engineering Design Event:** Il concetto alla base dell'evento è quello di valutare le scelte e gli sforzi progettuali e come essi incontrino le esigenze di mercato. Questi aspetti vengono valutati dai giudici in unione alla capacità del team di rispondere ai quesiti posti e all'ispezione della macchina, la quale deve essere presentata totalmente assemblata e pronta a gareggiare.

### **1.1.3 Prove dinamiche**

A seguire ci sono le prove a vettura in movimento, ossia quelle dinamiche, che mirano a valutare le potenzialità e l'efficienza delle monoposto in pista.

Le prove dinamiche sono suddivise a seconda delle prestazioni da valutare e si presentano come:

- Skidpad Event: in questa prova si va a valutare la capacità della monoposto in curva, infatti, la vettura deve percorrere un tracciato a forma di “8” nel minor tempo possibile;
- Acceleration Event: la monoposto deve coprire un rettilineo di 75 metri nel minor tempo possibile partendo da ferma;
- Autocross Event: la prova prevede una sorta di “giro di qualifica” attorno ad un tracciato lungo circa un chilometro e composto da rettilinei, curve con diverso raggio, slalom e chicane;
- Endurance & Efficiency Event: è l'evento che chiude il week end di gare, e mira a valutare le performance complessive del prototipo. In questo caso, infatti, la vettura deve coprire nel minor tempo possibile una distanza di circa 22 km all'interno dello stesso tracciato dell'autocross, considerando anche la sostituzione del pilota a metà prova. Viene valutato anche il consumo di carburante, nel caso di veicolo a combustione, o di energia elettrica, nel caso di veicolo elettrico.



*Figura 3: Polimarche Racing Team prima di un evento dinamico*

## 1.2 Software multibody

Tra i software di simulazione disponibili sul mercato, quello maggiormente affermato nel settore dell'ingegneria (meccanica, industriale, dell'automazione, aerospaziale, astronautica, dei materiali ecc.), ed in particolare nel settore del automotive, è il Software multibody. Il software di simulazione multibody consente di svolgere simulazioni su sistemi di parti meccaniche rigide e/o flessibili, collegate da giunti rigidi e/o elastici, soggette a qualsiasi sistema di forze, che compiono o meno spostamenti (traslazione e/o rotazione), con la possibilità di integrare i sistemi di controllo.

Per poter lavorare con il software è necessario definire un "sistema multibody", ossia un sistema meccanico costituito da un insieme di corpi rigidi o flessibili. All'interno del sistema i corpi sono collegati tra di loro da coppie cinematiche o giunti, che, consentono il moto relativo tra due elementi in determinate direzioni e lo impediscono in altre.

Gli elementi che costituiscono il sistema sono pertanto: corpi (in genere rigidi), vincoli o coppie cinematiche e forze esterne. Sappiamo che definendo un sistema di  $n$  corpi con  $m$  gradi di libertà, possiamo associargli un numero di equazioni  $e$  (dove  $e = n \cdot m$ ), dette "equazioni del moto", con cui è possibile studiarne la cinematica e la dinamica. Si può dunque immaginare come il numero di equazioni, per un sistema con così tanti corpi come una vettura da corsa, sia elevato e come di conseguenza lo studio sia complesso. La complessità non è rappresentata soltanto dall'elevato numero di equazioni, quanto dalla natura delle stesse; infatti, le relazioni tra le componenti di un corpo vengono descritte tramite funzioni non lineari quindi non invertibili per via algebrica. Grazie ai software multibody, è possibile effettuare questo studio senza troppe difficoltà, in quanto è direttamente il software a gestire e risolvere le equazioni per via numerica sia nel caso di moto che nel caso di equilibrio.

### **1.2.1 Utilizzo**

L'utilizzo che i Software multibody offrono per la Formula SAE rispecchiano in generale quelli del settore automobilistico, in quanto grazie ad essi è possibile realizzare e testare un prototipo virtuale prima di affrontare la produzione; inoltre offrono la possibilità di ottenere misurazioni che sulla vettura reale sarebbero difficilmente ottenibili.

### **1.2.2 Adams**

Per la modellazione precedentemente svolta e come simulatore attuale è stato utilizzato il software Adams in particolare la sua versione "car", programma di cui il nostro ateneo fa uso già da tempo nella sua versione "View". La differenza principale tra i due programmi è l'interfaccia che in Adams/Car risulta ottimizzata per il settore automotive e in più sono già impostati vari tipi di simulazioni e sensori.

# 2. Capitolo 2: Modellazione

## Introduzione

Lo studio esposto in questa tesi si basa su un modello già disponibile e precedentemente modellato dal team della Formula SAE. Il team di modellazione ha provveduto ad aggiornare il modello sulla base delle modifiche apportate alla vettura.

### 2.1 Modellazione in Adams/Car

Come primo passo della modellazione vengono scelti i subsystem in cui suddividere il veicolo, a ognuno dei quali viene assegnato il corrispondente Template. All'interno di un sistema multibody definito in Adam/Car è possibile distinguere tre livelli:

1. Template: un modello parametrico che ne definisce la tipologia, mentre lo si costruisce è possibile modificare o eliminare qualsiasi parametro;
2. Subsystem: si basa sul template e consente di cambiare i dati parametrici del template così come la definizione di alcuni componenti;
3. Assembly: rappresenta un gruppo di sottosistemi, insieme a un test rig opzionale (ossia un banco di prova che serve ad azionare l'assieme), che quando assemblato forma un sistema che è possibile analizzare con Adams.

Il software durante la costruzione di un template permette all'utente di inserire, modificare o eliminare qualsiasi parametro; diversamente, quando si realizza un subsystem o un assembly si fa riferimento ad uno o più template esistenti ed il

programma consente di creare, modificare o eliminare solo determinati parametri. Dunque, è importante studiare con attenzione il problema e impostare tutti i parametri necessari allo studio nella fase di costruzione dei templates, mancanze o errori nella programmazione potrebbero portare a dover iniziare nuovamente la modellazione dal primo passo. Per la creazione del modello la vettura è stata suddivisa in otto template:

1. Sospensione anteriore;
2. Antirollio anteriore;
3. Antibeccheggio anteriore;
4. Sospensione posteriore;
5. Antirollio posteriore;
6. Sterzo;
7. Telaio;
8. Motore.

È stato deciso di modellare le varie barre in maniera indipendente dalle sospensioni per poter permettere la realizzazione di simulazioni anche senza di esse.

L'aerodinamica è stata modellata all'interno del telaio, tenendo conto dei pesi, delle inerzie e delle forze (portanti e resistenti); mentre la trasmissione è stata inclusa modellata nel template del motore.

## **2.2 Modellazione template**

Il Template consente di definire dei componenti, come possono essere molle e pneumatici; vengono definiti parametricamente, in modo tale che con un singolo template è possibile definire più sottoinsiemi. Ad ogni template è possibile associare un "major role", ossia una proprietà che il template eredita direttamente dal subsystem a cui viene associato. I "major role" disponibili in Adams sono:

1. Suspension;

2. Steering;
3. Antirollbar;
4. Wheel;
5. Body;
6. Powertrain;
7. Driveline;
8. Brake system;
9. Leaf spring;
10. Analysis;
11. Environment;
12. Loading.

Associando un determinato “major role” è possibile implementare nel template alcuni parametri e/o caratteristiche di quel determinato “major role”.

Per la creazione di un template è necessario definire alcuni elementi di base:

1. Hardpoint: non influiscono direttamente sulle simulazioni, ma grazie ad essi si vanno a definire le posizioni a cui verranno in seguito associate masse e vincoli. Sono indicati come riferimento di coordinate e non hanno orientamento; tutti gli hardpoints, come anche le masse, i centri di massa e le inerzie sono state calcolate tramite CAD (facendo attenzione alla corrispondenza dei sistemi di riferimento tra CAD e multibody).
2. Construction Frame: anche questi non influenzano direttamente la simulazione e sono indicati come riferimento di coordinate, vengono utilizzati per definire posizioni ed orientamenti;
3. Property file: fanno riferimento ad alcuni componenti e contengono le proprietà caratteristiche.



4. Parti: all'interno del software è possibile definire diverse tipologie di parti, ma nella modellazione sono state utilizzate esclusivamente:
  - "general part", per definirle sarà necessario inserire informazioni sulla massa, sulla posizione del centro di massa, sull'inerzia e sull'orientamento che la parte ha sulla terna di assi rispetto alla quale viene definita la matrice di inerzia;
  - "mount part", parti prive di massa che rappresentano parti presenti in un altro template; può essere usata per creare collegamenti, molle, contatti, ed altro.
  
5. Geometrie: Adams dà la possibilità di introdurre all'interno del modello delle geometrie che hanno un ruolo puramente visivo, in quanto queste non vengono considerate durante la simulazione; infatti, è possibile avere un modello funzionante e coerente alla realtà senza l'utilizzo delle geometrie. Nel caso in cui si voglia è possibile importare direttamente dal software CAD, tramite il formato .step i due software sono in grado di comunicare;
  
6. Collegamenti: parte fondamentale della modellazione, ne possiamo trovare di tre tipi:
  - Vincoli (o "joints"), i quali possono essere pattino, cerniera, cilindrico, sferico ecc., a seconda del vincolo utilizzato bisogna definire diversi parametri;
  - "Bushings", una relazione di forza a sei gradi di libertà per collegare due parti;
  - "connectors".
  
7. Forze: è possibile introdurle in diverse tipologie:
  - "Springs": definisce una relazione forza-spostamento tra due parti, grazie a questo comando è possibile generare delle molle e per farlo c'è bisogno

di definire le parti su cui andrà ad agire, le coordinate per la geometria e il corrispettivo property file;

- “Dampers”: definisce una relazione forza-velocità tra due parti, grazie ad essa è possibile creare degli ammortizzatori e per farlo bisogna definire le parti su cui andrà ad agire, le coordinate per la geometria e il corrispettivo property file;

- “Actuators”: gli attuatori sono degli elementi in grado di applicare una forza e nel nostro modello vengono utilizzati per applicare le forze sui vincoli; in particolare vengono utilizzati i “Point Force/Torque” (in particolare i “Point Torque” per le barre che lavorano a torsione nell’antipitch) e i “Joint Force” (per le barre antirollio).

**8. Comunicatori:** Sono gli elementi chiave dei template che permettono lo scambio di informazioni tra template, subsystem e test rig nell’assieme. Un assieme richiede due direzioni di trasferimento dei dati tra i subsystem, fornite grazie a:

- Input communicator, richiede informazioni dagli altri sottosistemi o dal banco prova;

- Output communicator, fornisce informazioni agli altri sottosistemi o al banco prova.

Questi sono i principali comandi utilizzati per la realizzazione di tutti e 8 i template che compongono il modello; una volta costruiti attentamente tutti i template si possono creare i subsystem e quindi gli assembly, ottenendo un modello pronto alla simulazione.

## **2.3 Modellazione pneumatici**

### **2.3.1 Pneumatici**

Lo pneumatico gioca un ruolo fondamentale per un veicolo, in quanto è l'elemento che ne permette l'aderenza con la strada e gli fornisce la potenzialità di muoversi nello spazio. La maggior parte delle operazioni che si fanno su una vettura da corsa hanno lo scopo di avere in tutte le condizioni un comportamento corretto degli pneumatici e il massimo grip tra la gomma e la pista.

Uno dei problemi principali è quello di mantenere costanti i valori degli angoli caratteristici delle sospensioni, dato che una minima variazione di essi significa perdita di aderenza, quindi meno capacità di trasmettere la potenza al suolo. Bisogna quindi avere un occhio di riguardo durante lo studio effettuato con il multibody, siccome una volta che si ha un modello affidabile è possibile conoscere come variano le forze scambiate tra lo pneumatico e il suolo e di conseguenza come variano i parametri delle sospensioni.

Una volta scelto lo pneumatico che monterà sulla vettura, ci sarebbe il bisogno di effettuare, con un'attrezzatura specifica, dei test che mirano alla raccolta di dati sulle forze e sui momenti. Questa pratica però, risulta essere molto onerosa e non alla portata di tutte le università, di conseguenza molti team non avrebbero la possibilità di usufruirne. Per far fronte a questa problematica è stata istituita la FSAE TTC (Formula SAE Test Tire Consortium), un'organizzazione gestita da volontari di università affiliate alla FSAE che uniscono le proprie risorse finanziarie per ottenere dati di alta qualità su forze e momenti degli pneumatici destinati alle competizioni Formula SAE e Formula Student. Il ruolo dell'FSAE TTC è quello di raccogliere fondi dalle università, organizzare e condurre test di forza e momento degli pneumatici e rendere disponibili i dati agli individui delle scuole associate.

I test sono eseguiti utilizzando un nastro in movimento che simula l'asfalto, su cui viene fatta rotolare la ruota opportunamente sensorizzata: facendo variare lo

Slip Angle<sup>1</sup> o lo Slip Ratio<sup>2</sup> o entrambi e misurando le forze e i momenti in gioco, è possibile caratterizzare il comportamento laterale, il comportamento longitudinale e quello in condizioni miste dello pneumatico. In particolare, si possono ricavare la curva della forza laterale ( $F_y$ )<sup>3</sup> in funzione dello Slip Angle ( $\alpha$ ) e la curva della forza longitudinale ( $F_x$ )<sup>4</sup> in funzione dello Slip Ratio al variare del carico verticale ( $F_z$ ).

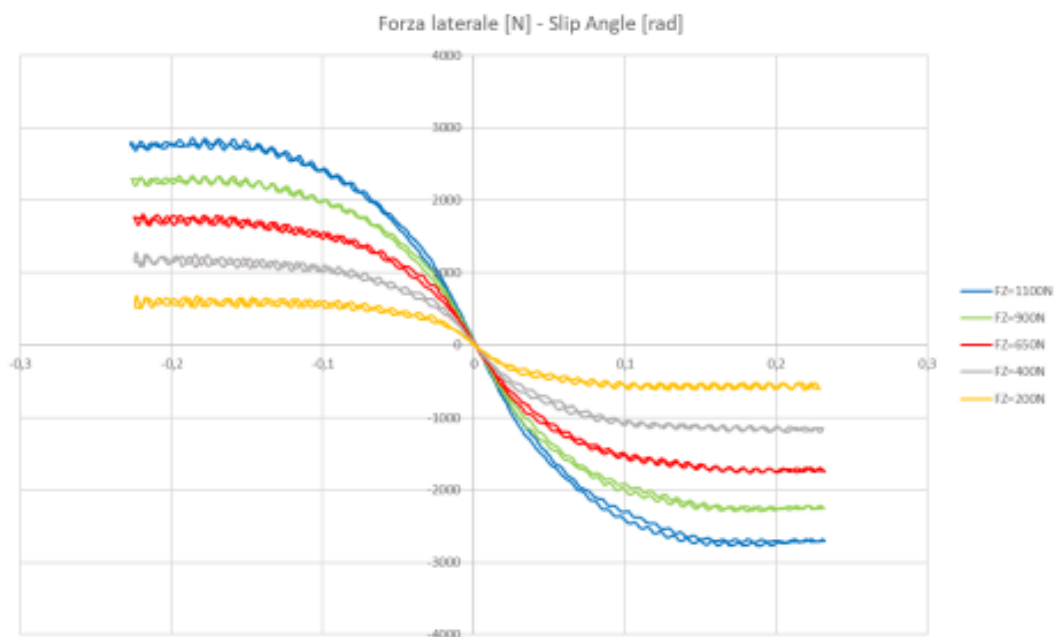


Figura 4: Forza Laterale vs Slip Angle per diversi carichi verticali Fz

<sup>1</sup> Uno pneumatico in rotolamento soggetto a carico verticale e a forza verticale, si muove con una direzione inclinata rispetto all'asse longitudinale, l'angolo di inclinazione è detto Slip Angle.

<sup>2</sup> Lo slip ratio è definito come  $\sigma = \frac{\Omega - \Omega_0}{\Omega_0}$  dove  $\Omega$  è la velocità angolare nel puro rotolamento e  $\Omega_0$  quella in trazione o frenata.

<sup>3</sup> La Forza Laterale è una forza che viene generata dallo pneumatico nel centro di contatto tra la strada e lo pneumatico stesso. È la forza che permette ad una vettura di girare in quanto costituisce l'effetto centripeto necessario per effettuare una curva.

<sup>4</sup> La Forza Longitudinale è la forza grazie alla quale un veicolo riesce ad effettuare un cambio di velocità. Dunque, accelerare o frenare un veicolo significa sviluppare una forza longitudinale.

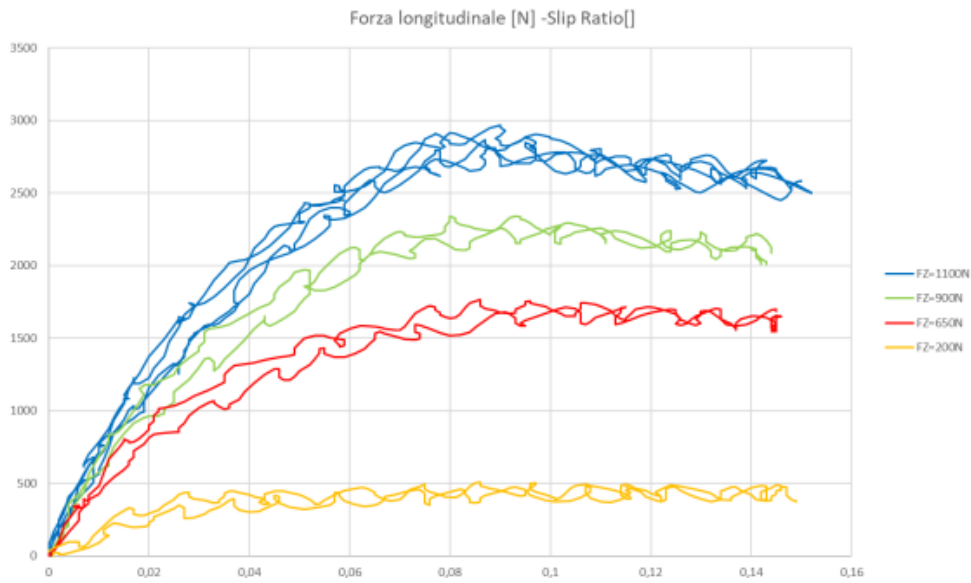


Figura 5: Forza Longitudinale vs Slip Ratio per diversi carichi verticali Fz

Inoltre, possiamo ricavare le curve della forza laterale in funzione dello slip angle con uno stesso carico verticale ma per angoli di inclinazione<sup>5</sup> diversi, e questo è possibile farlo anche per la curva della forza longitudinale in funzione dello slip ratio.

<sup>5</sup> L'angolo di inclinazione è l'angolo di inclinazione del piano longitudinale della ruota rispetto alla verticale, corrisponde all'angolo di campanatura in modulo, ma la convenzione dei segni è opposta.

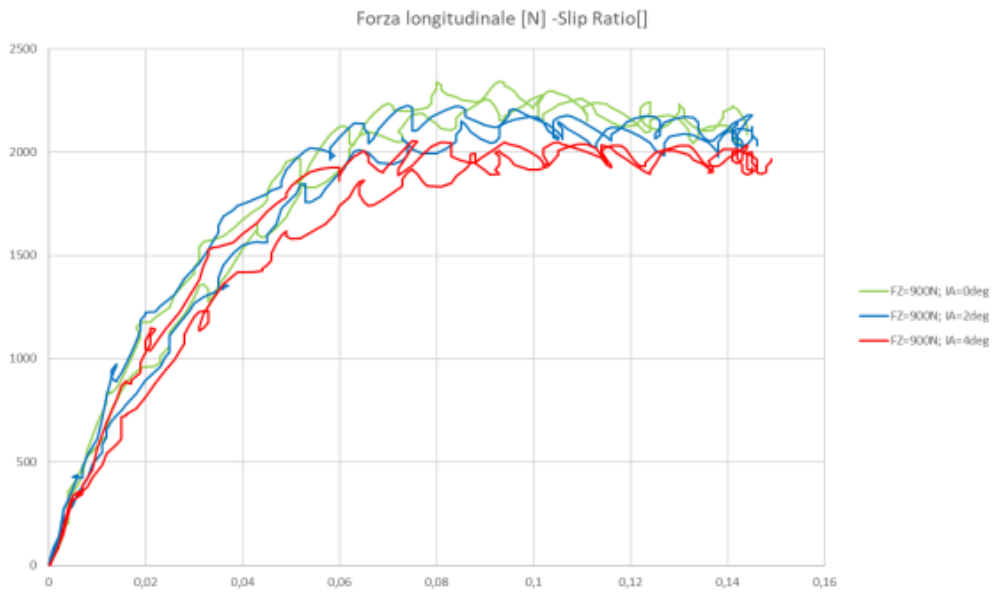


Figura 6: Forza Longitudinale vs Slip Ratio per vari angoli di inclinazione

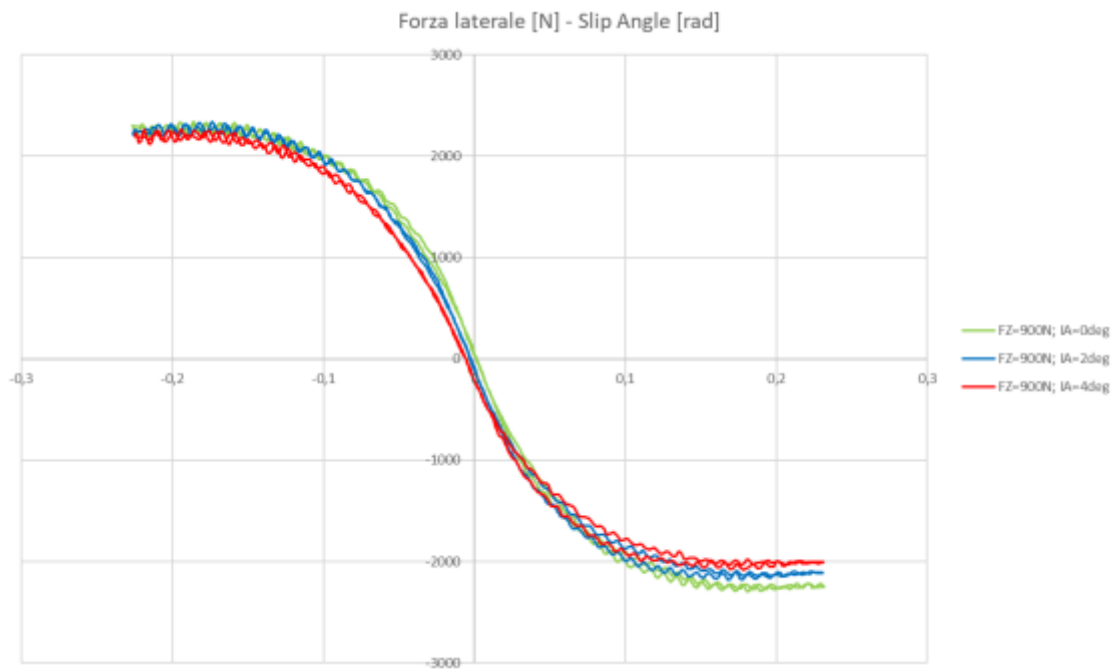


Figura 7: Forza Laterale vs Slip Angle con diversi angoli di inclinazione

### 2.3.2 Dati e modellazione

All'interno del modello multibody è necessario inserire un property file per gli pneumatici, in cui sono contenuti tutti i parametri relativi alle gomme utilizzate.

Per ottenere tali parametri c'è bisogno di lavorare i dati sperimentali forniti dalla FSAE TTC.

I dati acquistati, si presentano come dati grezzi, quindi soggetti al fenomeno di isteresi e agli errori di vibrazioni presenti durante i test. Inoltre, si presentano come una nuvola di punti nei piani Forza laterale-Slip Angle e Forza longitudinale Slip Ratio; perciò, debbono essere opportunamente interpolati per ottenere dei dati numerici usufruibili. Per eseguire quest'interpolazione vi sono diversi metodi, ad ognuno dei quali corrisponde una determinata compatibilità con il Software Adams.

| MD<br>Adams     | Event / Maneuver                         | ADAMS/ Handling Tire |                       |                    |                    |                    |
|-----------------|--|----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                 |  | PAC2002 <sup>1</sup> | PAC-TIME <sup>1</sup> | PAC89 <sup>1</sup> | PAC94 <sup>1</sup> | FIALA <sup>1</sup> |
| Handling        | Stand still and start                    | +                    | o/+                   | o/+                | o/+                | o/+                |
|                 | Parking (standing steering effort)       | +                    | -                     | -                  | -                  | -                  |
|                 | Standing on tilt table                   | +                    | +                     | +                  | +                  | +                  |
|                 | Steady state cornering                   | +                    | +                     | o/+                | +                  | o                  |
|                 | Lane change                              | +                    | +                     | o/+                | +                  | o                  |
|                 | ABS braking distance                     | +                    | o/+                   | o/+                | o/+                | o                  |
|                 | Braking/power-off in a turn              | +                    | +                     | o                  | o                  | o                  |
|                 | Vehicle Roll-over                        | +                    | o                     | o                  | o                  | o                  |
|                 | On-line scaling tire properties          | +                    | -                     | -                  | -                  | -                  |
| Ride            | Cornering over uneven roads <sup>*</sup> | o/+                  | o                     | o                  | o                  | o                  |
|                 | Braking on uneven road <sup>^</sup>      | o/+                  | o                     | o                  | o                  | o                  |
|                 | Crossing cleats / obstacles              | -                    | -                     | -                  | -                  | -                  |
|                 | Driving over uneven road                 | -                    | -                     | -                  | -                  | -                  |
|                 | 4 post rig (A/Ride)                      | +                    | o/+                   | o/+                | o/+                | o/+                |
| Chassis Control | ABS braking control                      | o/+                  | o                     | o                  | o                  | o                  |
|                 | Shimmy <sup>2</sup>                      | o/+                  | o                     | o                  | o                  | o                  |
|                 | Steering system vibrations               | o/+                  | o                     | o                  | o                  | o                  |
|                 | Real-time                                | +                    | -                     | -                  | -                  | -                  |
|                 | Chassis control systems > 8 Hz           | o/+                  | -                     | -                  | -                  | -                  |
|                 | Chassis control with ride                | -                    | -                     | -                  | -                  | -                  |
| Durability      | Driving over curb                        | -                    | -                     | -                  | -                  | -                  |
|                 | Driving over curb with rim impact        | o                    | -                     | -                  | -                  | -                  |
|                 | Passing pothole                          | -                    | -                     | -                  | -                  | -                  |
|                 | Load cases                               | -                    | -                     | -                  | -                  | -                  |

|     |                            |
|-----|----------------------------|
| -   | Not possible/Not realistic |
| o   | Possible                   |
| o/+ | Better                     |
| +   | Best to use                |

Figura 8: compatibilità Adams-metodi di interpolazione

Quello più compatibile e più versatile è il metodo che utilizza la PAC2002, una versione della Magic Formula di Pacejka che è stata aggiornata rispetto a quella

originariamente formulata da Hans B. Pacejka; è un metodo basato su una formula analitica<sup>6</sup> che, tramite vari parametri, viene comparata con i dati sperimentali degli pneumatici cercando di ricalcarne gli andamenti.

Per la modellazione degli pneumatici, Adams propone al suo interno “Adams Tire Data and Fitting Tool”, uno strumento grazie al quale è possibile ottenere i dati nel formato PAC2002 grazie ad un’operazione di fitting. Per utilizzare questo strumento viene richiesto un file .tdx, con determinate caratteristiche:

1. Parametri Pneumatici: bisogna indicare alcune caratteristiche sugli pneumatici utilizzati (ad esempio modello, raggio non deformato e deformato, pressione);
2. Costanti: devono essere indicati dei valori di alcune costanti, che corrispondono ai parametri impostati durante i test sugli pneumatici (ad esempio il valore della larghezza nominale della sezione dello pneumatico, dello slip angle, la tipologia e le condizioni della superficie);
3. Matrice dei dati: questa deve presentare nove colonne, ognuna corrispondente a diversi parametri misurati durante i test (slip angle, slip ratio, inclination angle, vertical load, longitudinal force, lateral force, overturning moment, aligning torque e inflation pressure).

---

<sup>6</sup> La formula analitica si presenta nella forma  $y(x) = D \cdot \sin\{C \cdot \tan^{-1}[B(1 - E)x + E \cdot \tan^{-1}(Bx)]\}$  dove x e y sono rispettivamente lo Slip Angle e la forza laterale oppure lo Slip Ratio e la forza longitudinale, mentre gli altri parametri danno forma alla curva in modo tale che corrisponda alla nuvola di punti relativa ad un determinato valore di carico verticale



```

fm_data_example_tdft_3 - Blocco note di Windows
File Modifica Formato Visualizza ?

**COMMENTS
! : TIRE_VERSION : PAC2002
! : COMMENT : Tire 18.0x6 10 R25B
! : COMMENT : Manufacturer Hoosier
! : COMMENT : Nom. section width (m) 0.20574
! : COMMENT : Nom. aspect ratio (-) 39.47
! : COMMENT : Infl. pressure (Pa) 82737
! : COMMENT : Rim radius (m) 0.254
! : COMMENT : Measurement ID
! : COMMENT : Test speed (m/s) 12
! : COMMENT : Road surface
! : COMMENT : Road condition
! : FILE_FORMAT : ASCII
! : Copyright (C) 2009-2011 MSC Software Corporation
!
! NOTE:
! THIS IS NOT REAL MEASUREMENT DATA, SO THE PROPERTIES DERIVED FROM
! THIS DATA MAY NOT BE REALISTIC!

**CONSTANTS
IDENTITY Identity 18.0x6 10 R25B
NOMWIDTH nominal section width of tire mm 205.74
ASPRATIO nominal aspect ratio % 39.47
RIMDIAME nominal rim diameter inch 10
RIMWIDTH rim width inch 7
INFLPRES inflation pressure bar 0.82737
TYREMSS Tyre mass kg 4.5
MANUFACT Manufacturer - Hoosier
TRCKSURF Surface of track - asphalt
TRCKCOND Condition of track surface - dry
TRAJVELW Trajectory velocity m/s 12
SLIPANGL slip angle rad 0.053
INCLANGL nominal inclination angle rad 0.0
FZW nominal wheel load N 890

fm_data_example_tdft_3 - Blocco note di Windows
File Modifica Formato Visualizza ?

**MEASURCHANNELS
SLIPANGL slip angle rad
LONGSLIP longitudinal slip -
INCLANGL inclination angle rad
FZW vertical load N
FX longitudinal N
FYW lateral force N
MXW overturning moment Nm
MZW aligning torque Nm
INFLPRES inflation pressure Pa 1.0 0.0 0.0

**MEASURDATA
0.052932 0.144 -0.000698 856.03 2024.05 -558.33 54.73 -67.98 82680
0.052967 0.143 -0.000524 836.23 2018.99 -551.79 42.31 -59.8 83080
0.052862 0.142 -0.00103 831.2 1999.97 -546.71 40.42 -44.7 83330
0.052775 0.142 -0.000349 837.64 1977.17 -546.42 48.3 -28.82 83380
0.053089 0.141 -0.000524 856.37 1947.39 -548.33 64.38 -15.05 83380
0.052862 0.141 -0.000489 879.44 1919.02 -552.9 84.62 -8.32 83180
0.052967 0.142 -0.000698 898.11 1903.22 -556.1 100.45 -11.05 83030
0.052984 0.141 -0.000576 910 1909.33 -560.2 106.99 -22.93 83080
0.052705 0.141 -0.000576 908.17 1936.66 -564.18 102.79 -40.24 82580
0.052984 0.141 -0.000646 895.34 1968.25 -565.92 88.44 -55.92 82830
0.053106 0.141 -0.000541 872.26 1993.98 -561.93 68.02 -65.41 83230
0.053019 0.141 -0.000698 850.36 2004.04 -554.79 50.64 -65.92 83490
0.052967 0.14 -0.000419 833.41 1995.16 -545.38 38.49 -56.48 83740
0.052705 0.14 -0.000576 832.46 1977.34 -541.43 38.8 -42.28 83790
0.053159 0.14 -0.000524 844.11 1949.1 -542.39 49.55 -25.81 83440
0.053072 0.139 -0.000681 863.6 1915.91 -547.77 67.2 -12.37 83180
0.052914 0.139 -0.000524 885.85 1890.06 -555.02 87.57 -7.27 83230
0.052914 0.14 -0.000698 904.77 1877.62 -558.88 103.18 -11.67 83640
0.052984 0.14 -0.000471 910.16 1886.31 -563.57 106.95 -24.33 84090
0.052984 0.14 -0.000593 906.76 1916.72 -562.71 99.96 -42.01 84400
0.052932 0.141 -0.000628 895.96 1954.86 -560.26 85.74 -58.89 84400
0.053089 0.141 -0.000489 874.66 1981.7 -553.48 65.96 -67.44 84240
0.053072 0.142 -0.000698 853.75 1995.73 -549.19 49.99 -67.5 83890
0.053019 0.141 -0.000489 840.87 1990.81 -542.67 40.67 -58.05 83740

```

Figura 9: esempio di file .tdx da introdurre in Adams Tire Fitting Tool

I dati acquisiti dalla FSAE TTC entrano in gioco all'interno della matrice ma non sono dati pronti per essere sottoposti all'operazione di fitting. Con uno script Matlab realizzato da un membro interno al reparto di dinamica si ottiene la matrice da utilizzare nel file .tdx, tramite questo script si vanno ad applicare alcune accortezze che rendono utilizzabili i dati; ad esempio viene convertito il sistema di riferimento da ISO a SAE (l'asse z nell'ISO è rivolto verso l'alto mentre nel SAE è rivolto verso il basso, con conseguente differenza anche per l'asse y), e vengono fatte alcune conversioni dimensionali (ad esempio da gradi a radianti).

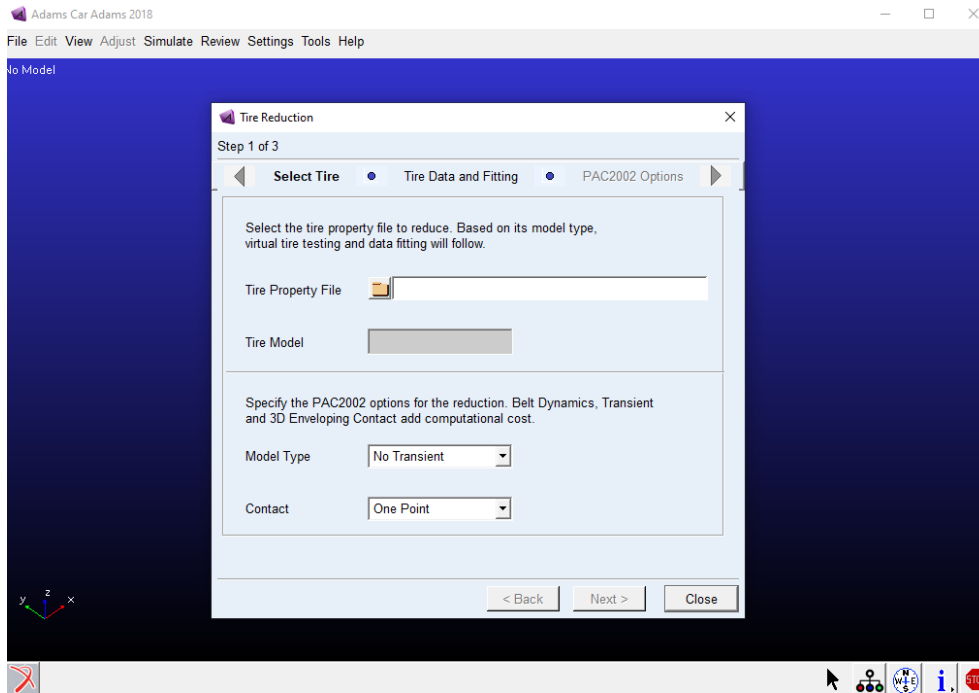


Figura 10: pannello di controllo Adams Tire Fitting Tool

Una volta ottenuto il file .tdx nel formato voluto da Adams basterà inserirlo nel Fitting Tool e seguire i tre passaggi richiesti per ottenere un modello degli pneumatici fedele a quello reale utilizzando i dati sperimentali sul modello di pneumatico scelto per la vettura.

## 2.4 Subsystem

Per la realizzazione di un subsystem bisogna definirne il nome, il “minor role”<sup>7</sup> (rear, front, o any) e cosa più importante si deve indicare a quale template fa riferimento. Organizzano i componenti basilari che permettono di costruire assiemi o sottoassiemi. I subsystems contengono le descrizioni dei componenti che modellano, ovvero:

1. Design data, come I raggi delle ruote, angoli di convergenza e camber, coordinate degli hardpoints, e così via;

<sup>7</sup> i primi due hanno la funzione di indicare con quali sottosistemi specifici devono comunicare, mentre il terzo indica una comunicazione con tutti i sottosistemi presenti nell’assembly.

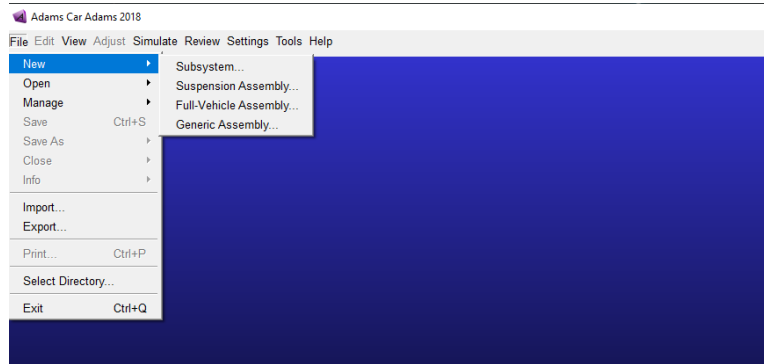
2. Riferimenti ai property file che contengono i dati per bushing, bumpstop, ammortizzatori, motore, molle e ruote;
3. Riferimenti ai file CAD, importati e collegati a parti individuali del subsystem;
4. Riferimenti ai template che definiscono la costruzione del subsystem, inclusi i tipi di parti e come queste sono vincolate ed interagiscono tra loro.

All'interno del nostro modello sono stati realizzati 11 subsystem:

1. Antipitch;
2. Brakes;
3. Chassis (telaio, barra antirollio e barra antibeccheggio);
4. Front Antiroll Bar;
5. Front Suspension (sospensioni anteriori, barra antirollio e barra antibeccheggio);
6. Front Tyres;
7. Powertrain;
8. Rear Antiroll Bar;
9. Rear Suspension (sospensioni posteriori e barra antirollio);
10. Rear Tyres;
11. Steering.

## **2.5 Assembly**

Gli assiemi rappresentano un gruppo di sottosistemi, che, insieme ad uno specifico test rig, possono essere analizzati usando Adams Solver. È possibile definire tre tipologie di assembly e sono: Suspension Assembly, Full-Vehicle e Generic Assembly.



*Figura 11: pannello di controllo generale Adams*

# 3. Capitolo 3: Simulazione

## Introduzione

Adams ci offre la possibilità di eseguire una vasta gamma di simulazioni, che possono riguardare un subsystem in particolare (costruendo un assembly in cui è presente solo quel subsystem che si vuole analizzare), un'assembly di alcuni subsystem o un assembly del veicolo intero. Grazie a queste simulazioni è possibile studiare il comportamento della dinamica del veicolo, in particolare come ogni subsystem influisce su di essa.

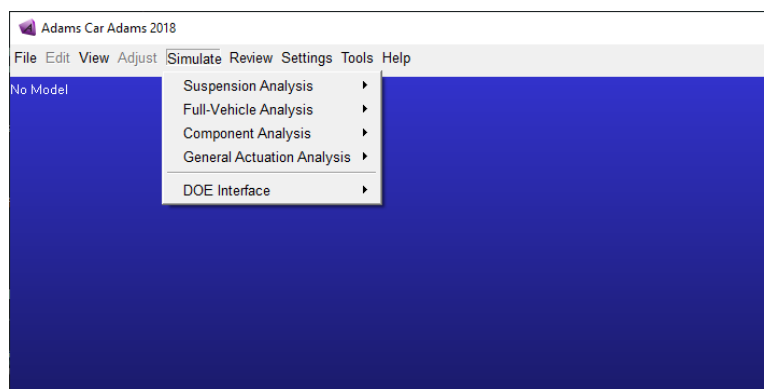


Figura 12: pannello di controllo generale delle simulazioni in Adams

Una volta costruito l'assieme, che sia un assieme di sospensioni o della vettura completa, si può procedere all'analisi lanciando simulazioni per studiarne il comportamento. In questo caso, oltre ai subsystem che compongono l'assieme, è necessario inserire anche l'assieme del test rig corrispondente.

Quando si lancia una simulazione, al suo termine è possibile analizzarla con due strumenti: Animate Controls (con cui è possibile vedere cosa succede a livello visivo all'assemblies simulato) e Postprocessing Window (una finestra in cui è possibile eseguire un'analisi completa della simulazione).

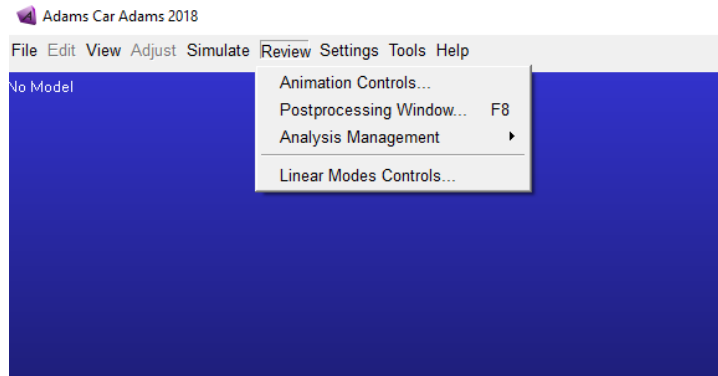


Figura 13: pannello di controllo generale dell'analisi simulativa in Adams

### 3.1 Simulazioni sospensioni

L'analisi della sospensione permette di studiare la cinematica delle sospensioni e i carichi trasmessi dalle ruote al telaio, per poi graficare tutti i risultati di rilievo con Adams Postprocessor. In particolare, è possibile:

- Spostare le ruote attraverso bump e rebound travel, simulando scuotimento e rollio, per poi studiare la variazione di tutte le caratteristiche di rilievo;
- Applicare carichi laterali e coppie sull'orma di contatto della ruota;
- Studiare la sterzata completa e misurare gli angoli di sterzo alle ruote.

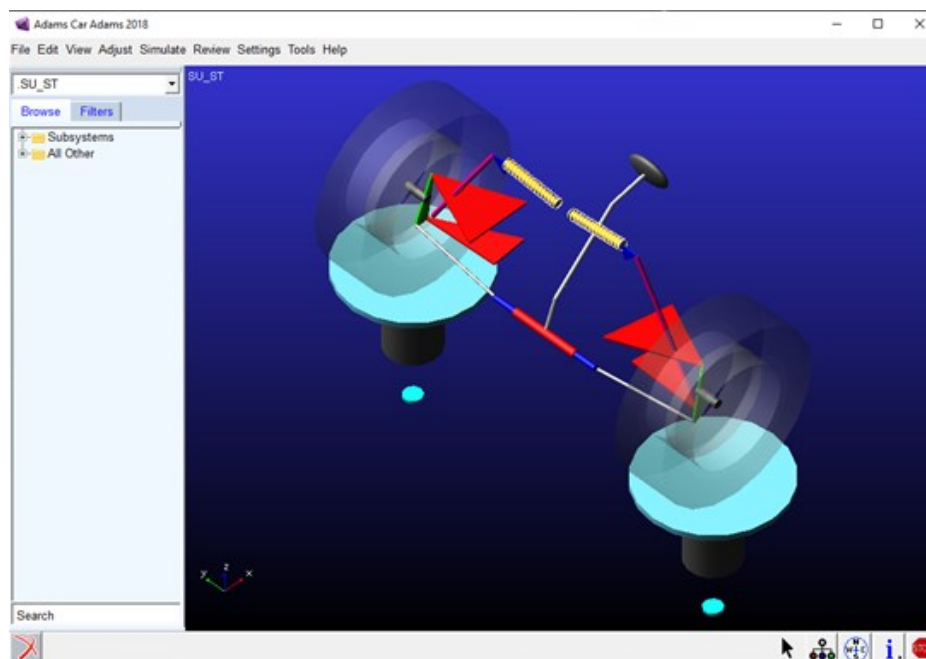


Figura 14: assieme sospensivo costruito in Adams

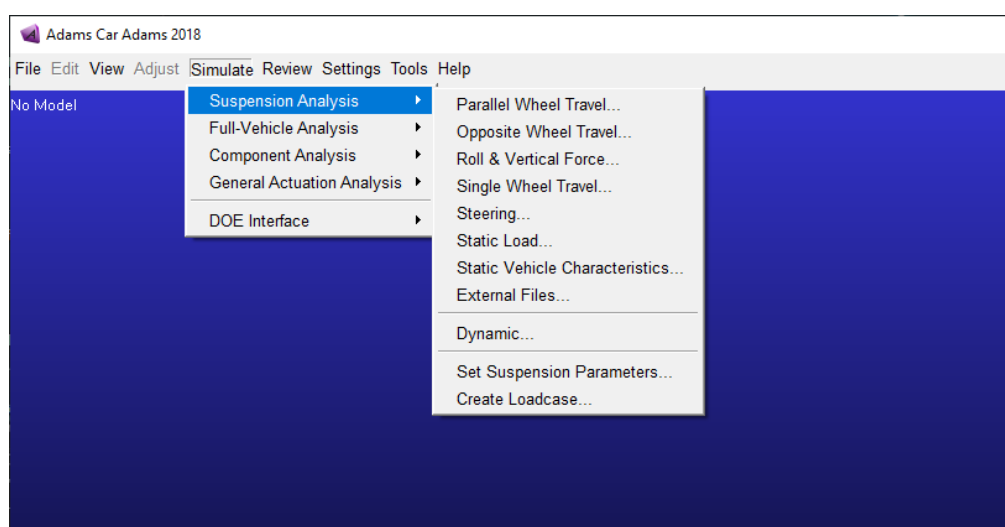


Figura 15: tipologie di simulazioni sul sistema sospensivo di Adams

Le analisi disponibili sono:

1. Compliance Analysis, per valutare la cedevolezza della sospensione sotto vari carichi;
2. Roll & Vertical Force Analysis, dove mantenendo costante la forza verticale viene spostato l'angolo di rollio;
3. Static Load Analysis, dove viene applicato un carico statico al mozzo e all'orma di contatto dello pneumatico;

4. Steering Analysis, analisi di sterzata;
5. Wheel-Travel Analysis, dove viene studiata la variazione delle caratteristiche della sospensione per tutto il movimento verticale della sospensione. È possibile spostare le ruote di una stessa quantità in maniera parallela (scuotimento) o opposta (rollio), oppure è possibile spostare una ruota singola.

### 3.2 Simulazioni intero veicolo

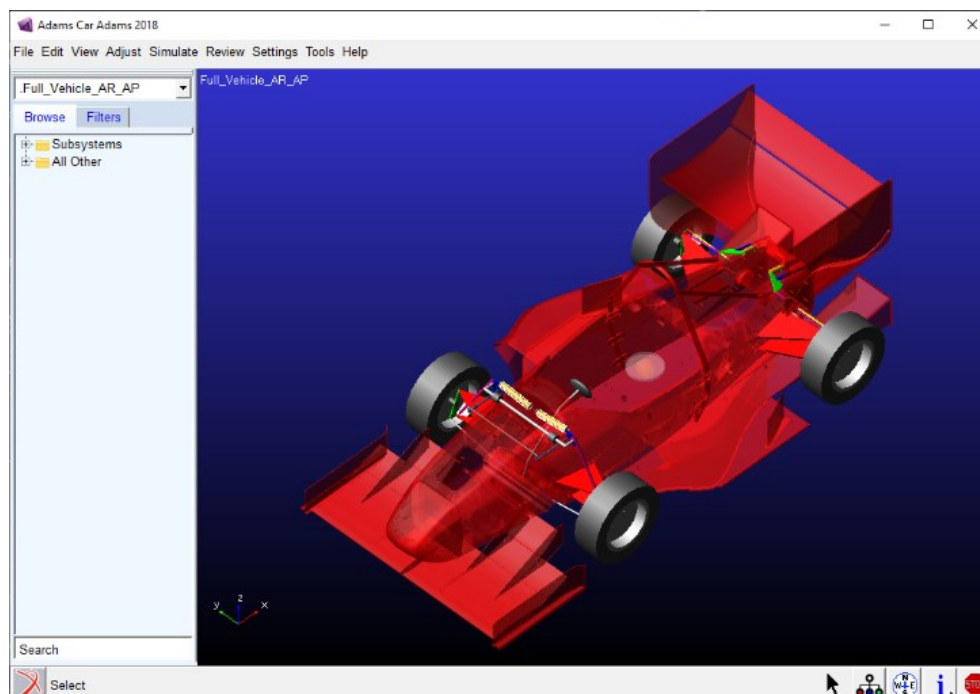


Figura 16: assieme del veicolo intero costruito in Adams

L'analisi della vettura completa permette di testare la progettazione dei sottosistemi differenti per vedere la loro influenza sulla dinamica del veicolo. Una volta assemblata la vettura completa, è possibile lanciare varie simulazioni, divise nelle seguenti macrocategorie:

1. Open-Loop Steering Events, dove lo sterzo della vettura è un input funzione del tempo, come Ramp-Steer, Step Steer, Turn Diameter;



2. Cornering Events, per valutare la tenuta della vettura e la risposta dinamica durante delle manovre in curva, come il Constant-Radius Cornering, BrakingIn-Turn;
3. Straight-Line Events, per studiare la dinamica longitudinale del veicolo, come Acceleration, Braking;
4. Course Events, dove viene guidata la vettura lungo un tracciato;
5. Roll Stability Events, per analizzare la stabilità al rollio;
6. File-Driven Events;
7. Static and Quasi-Static Analyses, dove vengono eseguite simulazioni presenti negli eventi precedenti, come il Constant-Radius Cornering o la Straight-Line Acceleration, ma non viene considerato l'effetto del transitorio;
8. Adams Smart Driver;
9. Static Vehicle Set-Up Analysis, dove è possibile impostare un allineamento delle sospensioni, un aggiustamento del peso e dell'altezza della vettura.

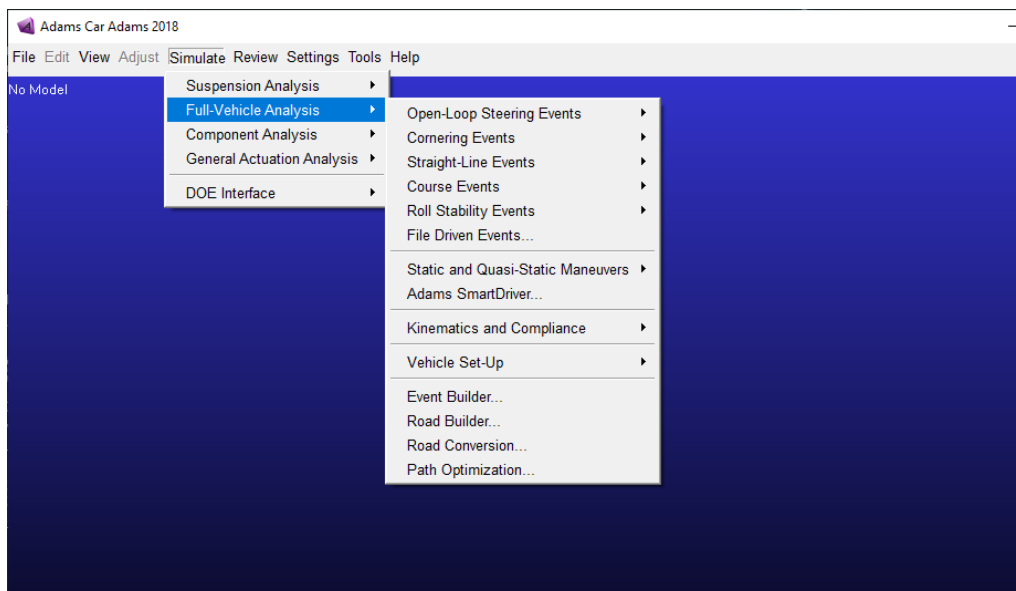


Figura 17: simulazioni sul veicolo intero disponibili in Adams

# 4. Capitolo 4: Progettazione della validazione

## Introduzione

Sottoporre un modello a validazione significa confrontare il comportamento del modello dinamico e quello della vettura reale, così facendo è possibile capire se è possibile utilizzarlo e con quanta accortezza bisogna trattare i dati di output che si hanno a fine simulazione. Dal confronto è possibile evincere diverse situazioni, che portano a diverse conclusioni sul modello dinamico, ad esempio: il comportamento del modello e quello della vettura reale coincidono in tutto e per tutto, questo ci porta a concludere che il modello dinamico sviluppato è totalmente affidabile e non ha bisogno di accortezze per l'utilizzo. Un'altra situazione potrebbe essere quella in cui il modello si comporta quasi come la vettura reale, presentando piccoli scostamenti negli andamenti delle curve; in questo caso possiamo andare a valutare lo scostamento del modello dalla realtà tramite l'errore percentuale<sup>8</sup>.

In questo capitolo la validazione verrà trattata come un insieme di fasi, ognuna necessaria per poter arrivare a validare il modello. Per problemi tecnici non è stato possibile effettuare la validazione con valori sperimentali, non potendo disporre di una parte della strumentazione necessaria a effettuare le misurazioni in pista e dunque non è stato possibile raccogliere i dati sperimentali necessari al confronto.

---

<sup>8</sup> *errore percentuale* =  $\frac{|\text{valore}_{\text{adams}} - \text{valore}_{\text{misurato/design}}|}{\text{valore}_{\text{adams}}}$

## **4.1 Controllo preliminare**

Il nostro modello è stato sviluppato due anni fa da un ex membro di dinamica del veicolo del Polimarche Racing Team, in questi due anni è stato aggiornato quando la vettura subiva delle modifiche, ma a causa dello stop dovuto al Corona Virus, la maggior parte della vettura non ha subito grandi cambiamenti, quindi, non è stato richiesto una modifica dei template creati. Il primo passo svolto è stato quello di controllare il modello, partendo dai template e arrivando agli assemblies, verificando che tutti i dati inseriti fossero corretti (con particolare attenzione alle inerzie, ma in generale sono stati controllati tutti i valori come le masse sospese, le masse non sospese, coordinate del centro di massa ecc.). Anche gli pneumatici sono stati ricontrollati: è stato effettuato nuovamente da zero il lavoro sui dati acquistati dalla FSAE TTC ed è stato ripetuto il fitting ottenendo i coefficienti di Pacejka. Oltre a un controllo dati è stato svolto anche un controllo a livello simulativo; sono state lanciate alcune simulazioni (in particolare la Constant-Radius Cornering e alcune simulazioni sul sistema sospensivo) al termine delle quali è stato svolto un controllo qualitativo sul comportamento mostrato dalle curve prese in considerazione per capire se il comportamento del modello fosse coerente con la manovra che si stava eseguendo.

## **4.2 Simulazioni**

Come secondo passo bisogna guardare al modello multibody: possiamo avere un modello multibody funzionante per tutte le simulazioni di Adams, ma è anche possibile trovarsi in presenza di un modello funzionante solo per alcune manovre, come il nostro. Abbiamo detto che la validazione consiste in un confronto tra il comportamento del modello e quello della vettura; dunque, per prima cosa bisogna decidere quali simulazioni prendere in considerazione per estrapolare le curve da mettere a confronto.

La scelta delle simulazioni da portare a validazione deve essere coerente con la fase di test svolti sulla vettura e viceversa, in quanto per svolgere correttamente

la validazione si deve avere che le condizioni a cui è sottoposto il modello siano più vicini possibili a quelle a cui è sottoposta la vettura durante i test.

Se si ha un modello funzionante con cui è possibile lanciare simulazioni su un tracciato specifico costruito da noi, si è nella condizione migliore; questo perché è possibile, in fase di test, costruire un tracciato che più si adatta alle necessità di sperimentazione del team (che possono essere, ad esempio, il replicare il tracciato della prova Endurance per capire le potenzialità della vettura in quella prova), replicarlo su Adams e testare il modello sullo stesso tracciato dei test.

È anche possibile però, che il modello non presenti questa possibilità, ma che abbia un corretto funzionamento solo su alcune manovre “più semplici”; allora, è a questo punto la cosa più conveniente da fare è scegliere tra le simulazioni quelle che riescono a caratterizzare meglio il comportamento in curva e su rettilineo, come possono essere i Cornering Events (per valutare la tenuta della vettura e la risposta dinamica in curva) e gli Straight-Line Events (per studiare la dinamica longitudinale del veicolo).

### **4.3 Scelta parametri di validazione**

Possiamo ben capire come, per poter confrontare il comportamento del modello con quello della vettura, bisogna scegliere i parametri che devono essere sottoposti alla validazione. In questa parte bisogna considerare vari aspetti, primo di tutti quello riguardate i sensori, in quanto a ogni parametro che viene scelto corrisponde una raccolta di dati sperimentali dello stesso durante la fase di test.

### **4.4 Test, strumenti e analisi dati**

Per caratterizzare il comportamento della vettura reale bisogna eseguire campagne di test che mirano alla raccolta dei dati sperimentali, che in un secondo momento verranno puliti e organizzati in modo da creare grafici per la comparazione con i valori ottenuti dal modello.

Prima di scendere in pista c'è bisogno di effettuare l'assetto dinamico della vettura; la procedura seguita dal nostro team, comprende due fasi:

- Bilanciamento pesi: in questa fase la vettura viene posta su 4 bilance (una per ruota) e viene controllato che la distribuzione delle masse sia coerente con quella di design (49.2 front e 50.8 rear), modificandola nel caso tramite la variazione di alcuni parametri sospensivi che permettono una ridistribuzione delle masse (viene svolta in officina);
- Assetto: su ogni ruota vengono montati dei dispositivi muniti di inclinometro e di un sistema di comunicazione ottica tra di essi, grazie al quale viene prima di tutto eseguito un allineamento delle ruote e in seguito vengono impostati i valori di campanatura e di convergenza con cui si eseguiranno i test (questa fase, invece, viene eseguita più volte, sia in officina che in pista durante le prove per testare vari setup sospensivi).

Una volta effettuato l'assetto vengono controllati tutti i sensori che dovranno raccogliere i dati durante i test, tramite la telemetria è possibile verificare se questi sono funzionanti in qualsiasi momento collegandosi con un pc alla centralina. Per quanto riguarda i sensori da utilizzare il discorso è abbastanza ampio; le soluzioni che si possono adottare sono varie, dai comuni sensori (accelerometro, potenziometro lineare ecc.) a soluzioni più innovative che prevedono l'utilizzo di uno smartphone come sensore.

Generalmente i sensori più usati in ambito automobilistico sono:

- Potenzimetro lineare: è un dispositivo elettrico equivalente ad un partitore di tensione resistivo variabile (cioè a due resistori collegati in serie, aventi la somma dei due valori di resistenza costante, ma di cui può variare il valore relativo), infatti una sua parte viene disposta in parallelo al carico utilizzatore. Il potenziometro è costituito da un cilindro isolante su cui è fittamente avvolto un filo metallico con resistività opportuna, mentre le due estremità sono connesse a due morsetti. Longitudinalmente

al cilindro e da un'estremità all'altra, scorre un cursore recante un contatto strisciante sul filo, a sua volta collegato ad un morsetto. In particolare, i potenziometri lineari sono caratterizzati da una tensione di uscita legata linearmente a quella di ingresso attraverso un rapporto. Quest'ipotesi fa sì che si consideri la resistenza totale un resistore rettilineo di sezione  $S$ , lunghezza totale  $L_t$  e resistività  $\rho$ , come  $R_t = \rho \cdot \frac{L_t}{S}$ , dunque una resistenza variabile a seconda della lunghezza; infatti, il potenziometro lineare registra la variazione di lunghezza come una variazione di resistenza. Vengono utilizzati sulle sospensioni (in particolare sulla nostra vettura sono posti sui damper, tramite la variazione di essi possiamo conoscere come variano alcuni angoli caratteristici come campanatura e convergenza), sui pedali dell'acceleratore e del freno e infine sullo sterzo;



*Figura 18: estensimetri lineari più comuni nell'automobilismo*

- Pressostato lineare: introdurre un pressostato lineare all'interno dell'impianto frenante consente di rilevare la pressione all'interno dei tubi del sistema;
- Accelerometro: ci sono diverse tipologie di accelerometri, ma nella maggior parte degli accelerometri, il principio di funzionamento è il medesimo: si basa sulla rilevazione dell'inerzia di una massa quando viene sottoposta ad un'accelerazione. La massa viene sospesa ad un elemento elastico, mentre un qualche tipo di sensore ne rileva lo spostamento rispetto alla struttura fissa del dispositivo. In presenza di un'accelerazione, la massa (che è dotata di una propria inerzia) si sposta dalla propria posizione di riposo in modo proporzionale all'accelerazione rilevata. Il sensore trasforma questo spostamento in un segnale elettrico registrabile dai moderni sistemi di misura. Tra le varie tipologie (estensimetrico, piezoresistivo, LVDT, capacitivo, piezoelettrico e laser), i più usati in ambito automobilistico sono i piezoresistivi e i capacitivi, che raggiungono un'incertezza inferiore all'1%. Sul nostro veicolo è presente un accelerometro a due assi, in grado di rilevare l'accelerazione laterale e quella longitudinale;

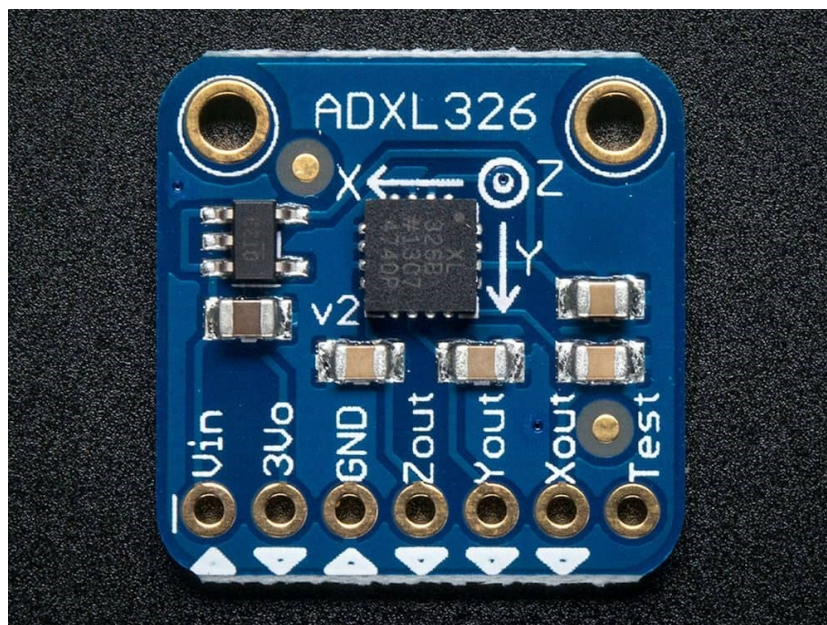
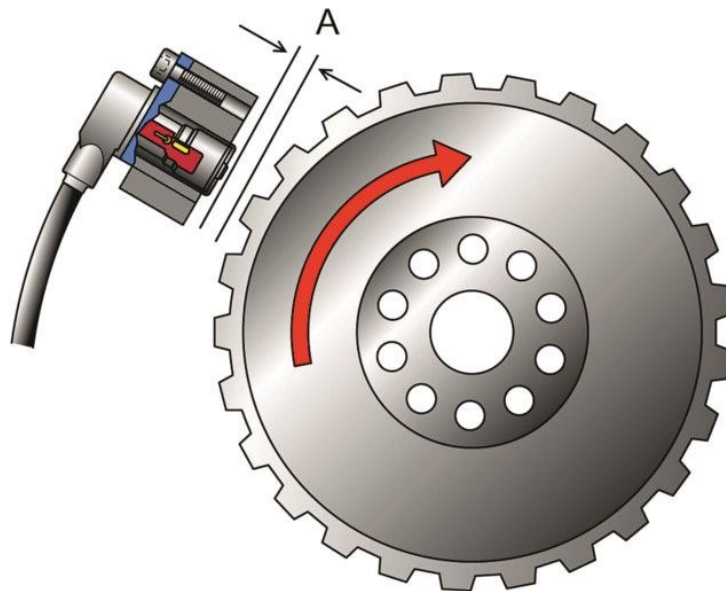


Figura 19: accelerometro a tre assi

- TPMS (tire-pressure monitoring system): quattro sensori messi direttamente sulle valvole degli pneumatici, che rilevano la pressione e la temperatura interna;
- Ruote Foniche: Una ruota fonica magnetica è un encoder che fornisce a un sensore un segnale che viene quindi inviato a un'unità di controllo centrale. L'uso delle ruote foniche magnetiche si è esteso anche oltre i sistemi di frenatura avanzati (ABS), ad esempio nei sistemi di trasmissione. Fornendo informazioni accurate su velocità e posizione angolare. Sulla nostra vettura è utilizzato come sensore di velocità;



*Figura 20: rappresentazione grafica di una ruota fonica (encoder)*

- Sensori motore: il motore è dotato di sensori che raccolgono moltissime informazioni, dalle temperature alle pressioni, ma anche sensori come il TPS (Throttle position sensor) che mandano tutte le informazioni alla centralina;
- GPS: grazie alla rilevazione della posizione è possibile ricostruire il tracciato percorso e inoltre è possibile andare ad esaminare con accuratezza ogni situazione in cui si è trovata la vettura conoscendo anche le condizioni a cui era sottoposta (curva, rettilineo, chicane ecc.).



Sono varie anche le soluzioni di raccolta dei dati, è possibile farlo tramite centraline in grado di comunicare a distanza e durante il moto del veicolo, oppure tramite telemetrie che leggono e trascrivono dati che possono essere visionati solo collegandosi fisicamente ad esse (con costi maggiori per il primo caso). Tra queste due alternative il nostro team utilizza la seconda per quanto riguarda tutti i dati inerenti al motore. Per la raccolta dati di tutti gli altri parametri come ad esempio quelli sospensivi, sono stati realizzati dei “microcontrollori”, ossia delle piccole schede in grado di raccogliere i dati letti dai sensori; questa scelta è stata presa per due motivi: in primo luogo la raccolta dei dati del sistema sospensivo, per sua natura, non si presta bene verso la centralina, infatti queste sono più adatte per raccogliere i dati rilevati dai sensori del motore, mentre queste schede sono molto più adatte; in secondo luogo la centralina utilizzata nella vettura aveva esaurito gli slot disponibili, per tanto è risultato molto più conveniente progettare e realizzare da sé questi microcontrollori invece che acquistare un’ulteriore centralina.

Il problema sorto durante la validazione riguarda proprio questi microcontrollori, in quanto non è stato possibile realizzarli nelle tempistiche stabilite; quindi, non è stato possibile raccogliere i dati durante i test.

Una volta raccolti i dati sperimentali, bisogna svolgere un lavoro su di essi in quanto si presentano grezzi e non possono essere utilizzati. In primo luogo, bisogna estrapolare solo i dati di interesse, questo è collegato alla scelta dei parametri di validazione; ad esempio, a mio avviso si potrebbe decidere che per una validazione si prendano in considerazione: tempo, accelerazione longitudinale, laterale e verticale, posizione tramite GPS, angolo di sterzo, le variazioni dei damper ecc. Con i dati relativi a questi parametri riusciamo ad estendere la validazione a tutti i subsystem e al veicolo intero. È buona regola di progettazione, studiare ed individuare il minimo numero di parametri di controllo in modo da poter validare tutto il modello.

Individuati i dati di interesse, possiamo lavorarli con Matlab, con lo scopo di:

- Organizzare i dati in variabili di più facile gestione;
- Utilizzare un filtro passa-basso per tagliare ad una specifica banda (decida da noi a seconda del filtro utilizzato);
- Eliminare gli errori dovuti alla presenza di rumori durante la misurazione, può essere eseguito con la funzione “Smoothdata” grazie alla quale si ha come output una media mobile degli elementi del vettore su una finestra scelta in maniera euristica dal software per ridurre le tendenze periodiche caratteristiche dei dati in cui sono presenti rumori.
- selezionare solo i dati di interesse, ovvero i valori relativi esclusivamente alla prova;
- creare grafici per la comparazione con i valori ottenuti dal modello.

#### **4.5 Validazione**

Dopo aver ottenuto i grafici sul comportamento al vero della vettura che devono essere comparati con i valori ottenuti dal modello, si entra nella fase finale della validazione. Per ottenere una validazione completa è consigliato eseguirla prima singolarmente su ogni subsystem e in seguito validare i vari assiemi (sospensioni e vettura intera):

- Aereodinamica: si può procedere con dei modelli aereodinamici e importare nel modello i valori già validati;
- Impianto frenante: può essere validato eseguendo una simulazione di frenata in cui viene estrapolato da adams il valore relativo alla forza di frenata su una singola ruota, se questo equivale a quello di design si può ritenere l’impianto validato;
- Telaio: con la stessa simulazione lanciata per l’impianto frenante posso validare anche il telaio, in quanto posso andare ad esaminare le curve delle forze aereodinamiche, se mostrano un telaio portante si ha che è validato;

- Ruote: per la validazione delle ruote si può procedere confrontando il comportamento longitudinale e laterale ottenuti durante i test con quelli mostrati dal modello;
- Motore: un metodo per validare il motore è quello di estrapolare dalla telemetria diversi canali, tra cui marcia innestata, velocità, numero di giri del motore e la richiesta dell'acceleratore; all'interno di Adams si possono impostare questi valori per il motore tramite una finestra di dialogo chiamata "Powertrain parameters"; una volta inseriti i dati richiesti in questa finestra il software sarà in grado di fornirci una curva potenza-velocità del motore, che potrà essere esaminata per validare il motore;
- Sospensioni: per la validazione del sistema sospensivo possiamo lanciare due simulazioni, una di scuotimento, ottenuto spostando le ruote di una stessa quantità, e una di rollio, ottenuto spostando le ruote di una quantità uguale in modulo ma opposta in segno. Lo scopo con cui sono lanciate queste simulazioni è quello di ottenere dei grafici in cui sono rappresentate le variazioni di determinati parametri (come possono essere la carreggiata, l'anti-dive, l'angolo di caster, l'angolo di kingpin, l'andamento dell'installation ratio di ammortizzatori, molle e rocker ecc.) dovuto allo spostamento della ruota durante lo scuotimento, e con questi grafici fare una verifica dei parametri caratteristici del modello con quelli di progettazione;
- Sterzo: infine per validare lo sterzo possiamo lanciare una simulazione di sterzata delle sospensioni anteriori, facendo variare lo sterzo dal valore di angolo massimo di sterzata fino al minimo; così facendo possiamo chiedere ad Adams di plottare un grafico in cui sono messi a confronto l'angolo di sterzo e l'angolo di sterzata delle ruote e grazie a questo grafico possiamo verificare se il rapporto di sterzata e il valore massimo di sterzata della ruota siano coerenti con quelli di design.

Il passo successivo, prima di passare alla validazione del veicolo intero, è quello di verificare la validità dei valori calcolati dal CAD delle masse, delle inerzie e delle coordinate del centro di massa (che possono essere verificate vedendo che distribuzione dei pesi tra anteriore e posteriore per determinate coordinate del centro di massa); se queste risultano valide si possono confrontare con quelle di Adams ed effettuare un controllo massa del modello. Una volta fatto questo e una volta validato ogni subsystem non rimane che validare l'insieme del veicolo intero; questa validazione finale viene effettuata lanciando simulazioni full-vehicle che rispecchiano il più possibile il tracciato e le condizioni dei test in pista, al termine di queste vengono plottati grafici confrontabili con i grafici ottenuti dai dati sperimentali, così facendo posso capire quanto il modello si discosta dalla vettura reale.

## 5. Capitolo 5: Conclusioni

Il presente lavoro ha avuto come scopo principale quello di analizzare, per la prima volta nel team, le fasi che costituiscono la procedura di validazione. L'elaborato ha l'ambizione di diventare la base delle future procedure e di fornire al team della formula SAE delle guide linee per l'implementazione e l'ottimizzazione del processo di validazione stesso.

Lo studio effettuato è stato applicato a un software di tipo multibody. Questa scelta è stata dettata dal tipo di modello attualmente in uso all'interno del reparto di dinamica del veicolo del team della formula SEA. Tuttavia, le analisi fatte, le considerazioni esposte e i passaggi evidenziati hanno un carattere del tutto generico e possono essere applicati a un qualsiasi tipo di software. Sempre con l'idea di dare un carattere polivalente al documento, si è preferito esporre diversi scenari di lavoro, dal caso in cui il modello sia completamente funzionante a quello in cui il modello funziona solo per determinate manovre, e discutere per ognuno le possibili scelte.

Per portare il modello attuale a validazione sarebbe necessario implementarlo sotto alcuni aspetti: modellare il telaio come corpo flessibile e non come corpo rigido, implementare l'aerodinamica inserendo i valori ottenuti dalla galleria del vento o tramite simulazioni CFD, modellare meglio il motore adattandolo il più possibile al nostro; queste sono tutte modifiche che porterebbero il modello sviluppato nel software ad essere il più possibile simile alla vettura e al vero. Infine, un'ultima miglioria da apportare al modello è quello di implementare il funzionamento del modello a livello simulativo, garantendo un corretto funzionamento per le manovre in cui si imposta un tracciato personalizzato.

La realizzazione dei microcontrollori necessari alla raccolta dati rappresenta ad oggi il punto focale delle prossime possibili implementazioni. L'avere a disposizione sufficienti schede per la raccolta dati, permetterebbe al team di poter avviare il processo di validazione del modello e conseguentemente dare una

consapevolezza all'intero team di quali potrebbero essere le problematiche e/o gli aspetti da implementare nel breve periodo.

Come ampiamente spiegato, il processo di validazione del modello di simulazione rappresenta un processo cruciale per l'utilizzo a regime del modello di simulazione, il quale può rivelarsi essere un jolly nelle fasi preliminari di un nuovo progetto.

Il team di Formula SAE è attualmente impegnato nella progettazione del nuovo modello elettrico. Riuscire a validare il modello in essere il prima possibile significherebbe dare uno strumento aggiuntivo al team e porterebbe definitivamente un grande beneficio al team ed al nuovo progetto, che sarà la base dei lavori degli anni a venire.

Un possibile sviluppo futuro della tesi potrebbe essere rappresentato dallo studio e dal confronto dei sensori disponibili sul mercato.

Come detto all'interno dell'elaborato, i sensori sono dei componenti importanti e non trascurabili. La possibilità di registrare dati sempre più veritieri ed approfonditi porterebbe ad un affinamento della tecnica di convergenza del simulatore, con conseguente possibilità di simulare con una migliore realtà il comportamento del veicolo.

Quest'implementazione rappresenterebbe un ulteriore step verso un'ottimizzazione dell'intera fase di progetto in quanto un modello molto prossimo al vero, permetterebbe al team di studiare e validare con grande cura le scelte di design in una fase iniziale del progetto con un conseguente guadagno in termini di tempo e budget.

# Ringraziamenti

Volevo ringraziare vivamente il Professor Matteo Claudio Palpacelli per la disponibilità e il supporto ricevuto durante lo svolgimento del lavoro.

Un ringraziamento particolare al Polimarche Racing Team, una vera e propria famiglia che mi ha dato la possibilità di toccare con mano il progetto e che ha contribuito alla mia crescita personale e professionale.

Un sentito ringraziamento lo faccio ai miei genitori, senza i quali tutto questo non sarebbe stato possibile; vi ringrazio per il continuo supporto che mi avete dato, siete stati motivo di ispirazione per continuare a dare sempre il massimo. Ringrazio mio fratello Antonio, rappresenti la fonte di ispirazione da cui è nato tutto e il faro che mi ha sempre illuminato la strada quando questa si faceva buia, non potrò mai ringraziarti a pieno per quello che anche indirettamente fai per me. Vi voglio tanto bene.

Vorrei includere in questi ringraziamenti i miei coinquilini (Alessandro, Gianvito e Giuseppe); con voi ho condiviso gioie, dolori (soprattutto per le bollette), successi e fallimenti e in tutti i casi siete stati sempre al mio fianco pronti a dare il vostro sostegno. Il supporto che mi avete dato non è stato da meno, anzi, fate parte di quelle poche persone che sono riuscite a tirarmi su di morale nei momenti peggiori. Grazie.

Un altro ringraziamento va al gruppo di “Ingegneria \*\*\*\*\*” (Fede, Simone, Alessio e Lollo), più di un semplice gruppo di studio. Affrontare questo percorso con voi lo ha reso molto più semplice, divertente e con il giusto pizzico di competitività; senza di voi sarebbe stato tutto diverso e sicuramente più difficile. Non posso dimenticare di ringraziare tutti i miei VERI amici, tutti quelli che ho incontrato durante questo percorso e che mi hanno aiutato a renderlo più leggero,

e tutti quelli che c'erano prima di iniziare; non siamo fatti per stare soli, ma nemmeno con chiunque.

Un ultimo ringraziamento, ultimo non per importanza, vorrei farlo a Luisa. Sei arrivata al termine di questo percorso ma il tuo sostegno è stato fondamentale e non è mai passato inosservato, anche quando simbolicamente non eri al mio fianco; è anche grazie a te e al tuo modo di comprendermi, se oggi sono arrivato ad essere la persona che sono.