UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica
(classe LM-33, codice IN0518)

Acquisizione dei carichi aerodinamici della vettura Formula S.A.E. MG 13.18

Relatore:
Prof. Giovanni Meneghetti

Laureando:
Daniele Tassetto
1153747

Anno accademico 2017-2018

Alla mia famiglia

Indice

Sommario

Obiettivo della tesi è acquisire dati sperimentali relativi ai carichi di downforce e drag dell'ala anteriore e dell'ala posteriore della vettura F.S.A.E. MG 13.18 del Race Up team dell'Università di Padova. Questi dati servono a convalidare i modelli C.F.D. che il team utilizza per progettare i componenti aerodinamici e per simulare il comportamento dinamico della vettura durante gli eventi a cui partecipa.

A tal fine sono state progettate delle celle di carico multicomponente che vanno a sostituire gli originali supporti delle ali. Ciascuna di queste celle di carico è stata studiata per avere un canale sensibile alla downforce e un canale sensibile al drag.

Dopo la progettazione, produzione, estensimetraggio e cablaggio e dopo il processo di taratura, le celle di carico sono state montate in vettura e utilizzate per una sessione di test nella quale sono stati acquisiti i dati che, dopo elaborazione numerica, hanno confermato i dati precedenti ottenuti con simulazioni C.F.D.

CAPITOLO 1: Introduzione

1.1 La competizione F.S.A.E.

La Formula S.A.E. è una competizione studentesca universitaria organizzata dalla Society of Automotive Engineers (S.A.E.) che prevede la progettazione e la produzione di un'auto da corsa, valutata durante una serie di prove in base alle sue qualità di design e di efficienza ingegneristica [1].
Istituita nel 1981, con lo scopo di dare agli studenti universitari la possibilità di confrontarsi in un evento che risulti quanto più appetibile e interessante, la competizione è ad oggi diffusa in tutto il mondo (Figura 1.1), con dieci eventi annuali, organizzati direttamente dalla SAE in collaborazione con le associazioni nazionali di ingegneri e tecnici dell'automobile.

Figura 1.1: Foto panoramica di tutti i team partecipanti alla Formula Student Germany 2009

L'idea posta alla base della 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, definiti come "weekend autocross racers". Ogni team di studenti deve progettare, costruire, testare e promuovere il prototipo, il quale viene valutato in otto tipologie di prove, che spaziano dalle performance pure, al design, alla pubblicizzazione e alla presentazione del veicolo stesso.
Ad ogni evento è possibile totalizzare un massimo di 1000 punti distribuiti tra varie prove secondo il seguente schema:

- Presentazione piano aziendale: 75
- Presentazione design vettura: 150
- Analisi dei costi: 100
- Prova di accelerazione: 75
- Prova skid-pad: 50
- Prova autocross: 150
- Consumo carburante: 100
- Endurance: 300

Ogni evento FSAE si compone di quattro giorni di gare, dal giovedì alla domenica, in alcuni dei più famosi e importanti circuiti mondiali, come il Michigan International Speedway negli Stati Uniti, l'autodromo di Silverstone in Inghilterra o l'Hockenheimring in Germania. L'evento italiano si svolge presso l'Autodromo Riccardo Paletti di Varano de' Melegari solitamente verso la metà di luglio.
Gli eventi sono tutti accomunati dallo stesso regolamento, ma costituiscono ognuno una competizione indipendente, senza cioè contribuire ad assegnare punti per un campionato.

1.2 L'evento

Prima di poter partecipare alle prove guidate le vetture vengono sottoposte ad una serie di verifiche ed ispezioni, note comunemente come "techs", da parte dei giudici, che ne verificano la conformità al regolamento, soprattutto per quanto concerne le norme preposte a garantire l'incolumità del pilota.

A seguito del superamento dell'ispezione avviene il rifornimento della vettura, che viene successivamente posizionata sulla "tilt table", una piattaforma in grado di inclinare il prototipo su entrambi i lati fino ad un angolo di 60 gradi, al fine di certificare che non vi sia perdita di liquidi (Figura 1.2).
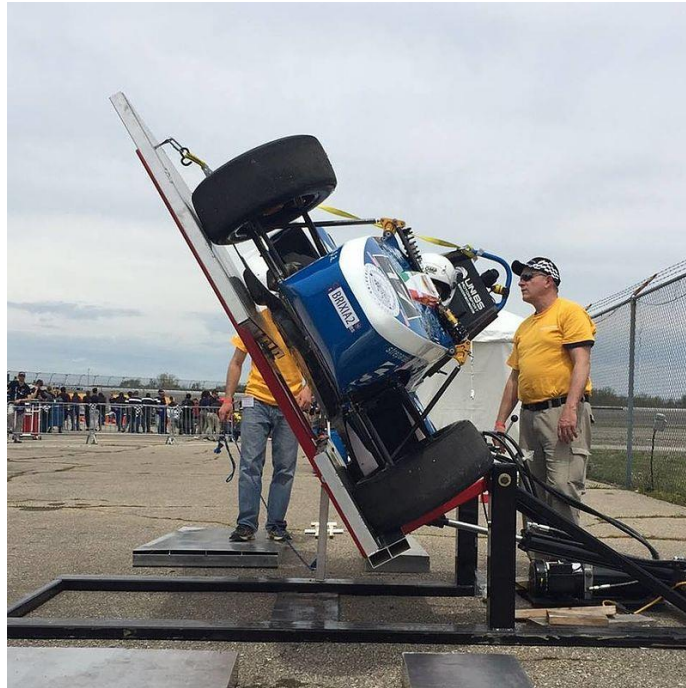

Figura 1.2: Tilt table

Eseguita la prova di tilt, la vettura viene sottoposta alla prova di "noise", nella quale i giudici accertano che il motore, girando a diversi regimi, non superi i 110 dB di rumore. L'ultima delle prove pre-gara è il test di frenata, in cui la macchina deve essere in grado, dopo una lunga accelerazione, di bloccare contemporaneamente tutte e quattro le ruote senza arrivare allo spegnimento del motore.

Superate le verifiche preliminari, si può accedere alle prove vere e proprie dell'evento, le quali iniziano con delle prove statiche:

- Cost analysis: L'obiettivo dell'analisi dei costi 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. La prova è suddivisa in due parti: la compilazione di un report scritto (che deve essere inviato ai giudici prima della competizione) e una 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.
- Business plan presentation: 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 un esecutivo rappresentate le varie aree di 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.
- Engineering Design: 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.

Finite le prove statiche, si procede con le prove dinamiche:

- Acceleration: Durante il test di accelerazione la vettura deve accelerare per 75 metri lungo un percorso rettilineo su superficie piana. La prova è divisa in due batterie, che devono essere corse da due differenti piloti, ognuno dei quali ha a disposizione due tentativi. Il punteggio è determinato dalla

differenza tra il peggiore e il migliore tempo assoluti fatti registrare, tenendo presente che il tempo più alto preso in considerazione dai giudici non deve superare i 5.8 secondi, pari ad una velocità media di 46.55 km/h.

- Skid-pad: La prova valuta la capacità in curva della vettura. Il tracciato richiama la figura di un 8 con due cerchi di 15.25 metri, al cui centro è posta la linea di partenza/arrivo e delimitati da sedici piloti nel lato esterno e sedici lungo il lato interno di ciascun cerchio (Figura 1.3).
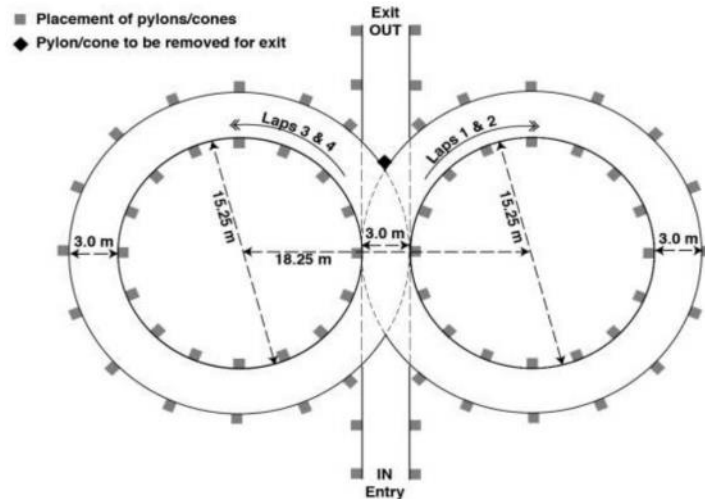

Figura 1.3: Tracciato della prova di Skid-pad

La vettura, una volta entrata nel percorso, deve compiere un giro del cerchio destro, per stabilire il senso di marcia, al termine del quale deve compierne un secondo, il quale viene cronometrato dai giudici. Terminato il secondo giro, la vettura deve spostarsi nel cerchio sinistro per effettuare due ulteriori giri, il secondo dei quali viene cronometrato. Ultimato il quarto giro, la macchina lascia il tracciato, nella stessa direzione da cui è entrata. La prova è divisa in due batterie, che devono essere corse da due differenti piloti, ognuno dei quali ha a disposizione due tentavi. Il punteggio è determinato sulla capacità di accelerazione laterale.

- Autocross: è una prova di sprint da eseguire su due giri di circuito per valutare la maneggevolezza della vettura. Il circuito è disegnato in modo da ottenere velocità medie comprese tra i 30 ed i 40 km/h e comprende brevi rettilinei (non più di 60 metri), curve a raggio costante (da 23 a 45 metri di diametro), tornanti (9 m di diametro esterno minimo), slaloms (coni a distanza compresa tra 25 e 40 m), chicanes e curve a raggio variabile. Per il punteggio vale il miglior tempo su due prove effettuate da piloti diversi
- Endurance and fuel economy: La prova di endurance è l'evento che chiude il week end di gare e mira a valutare le performance complessive del prototipo. Si svolge lungo un tracciato molto simili a quello in cui si corre la prova di autocross, per un totale di 22 km. Ai componenti del team non è permesso di intervenire sul veicolo durante lo svolgimento della prova, mentre è previsto un cambio di pilota a metà prova, durante un periodo di sosta di tre minuti. L'ordine di partenza viene stilato in base ai risultati dell'autocross, con il team più veloce primo a scendere in pista, seguito dal secondo e così via, scorrendo la classifica. Il tempo complessivo dell'endurance è dato dalla somma dei tempi di ciascun pilota, cui vanno a sommarsi le eventuali penalità, comparato con quello del team più rapido in pista. Nello stesso contesto dell'endurance viene stilata una classifica, e conseguentemente assegnati dei punti, per la fuel economy. Il risparmio di carburante rappresenta un aspetto fondamentale in molte forme di competizione motorsportiva, oltre a mostrare quanto efficacemente sia stata preparata la vettura. Durante l'endurance non è consentito per questo alcun rifornimento di carburante. Il punteggio è basato sul conteggio della media di litri di carburante per chilometro durante la prova di endurance.

1.3 Il Race Up team

L'Università degli Studi di Padova partecipa agli eventi della Formula SAE dal 2006 con il nome di "Race Up team". Nel 2015 nasce la divisione elettrica dal nome "Race Up Electric" con il compito di progettare una monoposto elettrica, mentre la divisione che si occupa della vettura con motore tradizionale a combustione si chiama "Race Up Combustion" (Figura 1.4).

Figura 1.4: Vettura MG 13.18 Combustion impegnata nelle prove nel circuito Varano De' Melegari

Entrambe le divisioni contano circa 30 studenti di diverse facoltà e presenta una divisione interna in 7 reparti:
- Aerodinamica
- Frame and body
- Sospensioni
- Freni
- Elettronica
- Motore
- Business and marketing

Ciascun reparto ha il compito di progettare i diversi componenti della vettura seguendo le linee guida decise all'inizio della stagione.

La vettura della stagione 2017-2018 della divisione Combustion prende il nome di MG 13.18 ed ha preso parte agli eventi FSAE avvenuti in Italia e in Germania.

1.4 L'aerodinamica

L'aerodinamica è la branca della fluidodinamica che studia la dinamica dei gas, in particolare dell'aria, e la loro interazione con corpi solidi.

Lo studio dell'aerodinamica nelle competizioni automobilistiche ha inizio nei primi anni del '900. Inizialmente l'obiettivo principale era ridurre la resistenza all'avanzamento opposta dall'aria usando forme allungate che ritardavano la separazione del flusso dal profilo. La prima vettura progettata con un sistema di ali ideato per generare deportanza fu la "Chaparral 2E" del 1966 (Figura 1.5).

Figura 1.5: Chaparral 2E (1966)

Nel giro di pochi anni ogni vettura da competizione, persino in Formula 1, avrebbe montato alettoni su lunghi ammortizzatori, sebbene molti non fossero comparabili a quelli ideati dalla Chaparral; i loro cedimenti strutturali, infatti, causarono gravi incidenti che portarono le varie commissioni sportive organizzatrici a limitarne o addirittura vietarne l'uso.

Da allora ogni azienda si è focalizzata sullo studio dell'aerodinamica per incrementare le performance delle proprie vetture: non solo in termini di riduzione della resistenza all'avanzamento (drag) ma anche cercando di aumentare la deportanza (downforce).

Le forze aerodinamiche nascono dall'interazione del fluido con le superfici, generando sforzi normali e sforzi di taglio sulle superfici stesse. La risultante di queste forze può essere divisa in varie componenti, le direzioni più comunemente scelte sono definite classicamente da un sistema di riferimento fisso con il baricentro della vettura (Figura 1.6):

- Componente drag lungo l'asse x, la direzione di avanzamento della macchina,
- Componente lift lungo l'asse z, la direzione verticale,
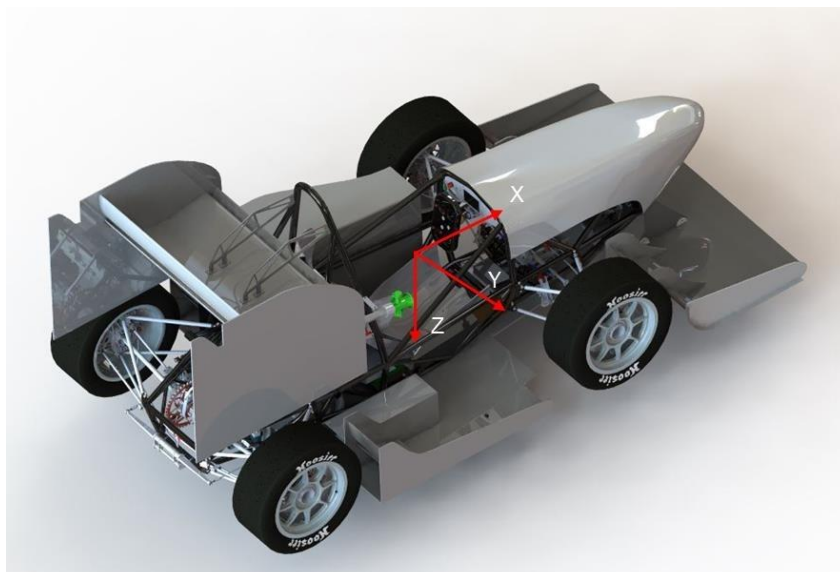- Componente laterale lungo l'asse y, a completare la terna.

Figura 1.6: Sistema di riferimento adottato

Queste tre componenti di forza sono definite nel seguente modo (Figura 1.7):

- Drag: la componente che si oppone all'avanzamento del veicolo (relazione 1.1).

$$D = \frac{1}{2} C_D A \rho V_{inf}^2 \qquad (1.1)$$

- Lift (o downforce): la componente perpendicolare alla direzione di movimento (relazione 1.2). Questa forza deriva direttamente dalla Legge di Bernoulli, la quale stabilisce una correlazione tra velocità del fluido e pressione lungo un ideale tubo di flusso. Considerando un semplice caso bidimensionale, i profili aerodinamici sono studiati per indurre una velocità del fluido maggiore lungo la parte inferiore del profilo, ciò corrisponde secondo Bernoulli a una pressione minore che induce l'effetto di deportanza.

$$L = \frac{1}{2} C_L A \rho V_{inf}^2 \qquad (1.2)$$

- Side force: la componente laterale (relazione 1.3).

$$Y = \frac{1}{2} C_Y A \rho V_{inf}^2 \qquad (1.3)$$

Come si vede dalle relazioni sopra riportate, le forze aerodinamiche dipendono dalla densità dell'aria ρ [kg/m³], da una certa area di riferimento A [m²] (solitamente l'area frontale della vettura), dal quadrato della velocità indisturbata dell'aria che raggiunge il profilo V_{inf} [m/s] e da un coefficiente adimensionale C che dipende dalla geometria.

Il punto di applicazione della risultante delle forze aerodinamiche che nascono su una superficie è detto centro di pressione; ipotizzando di incernierare in quel punto il profilo, non sono necessari momenti per garantire l'equilibrio.
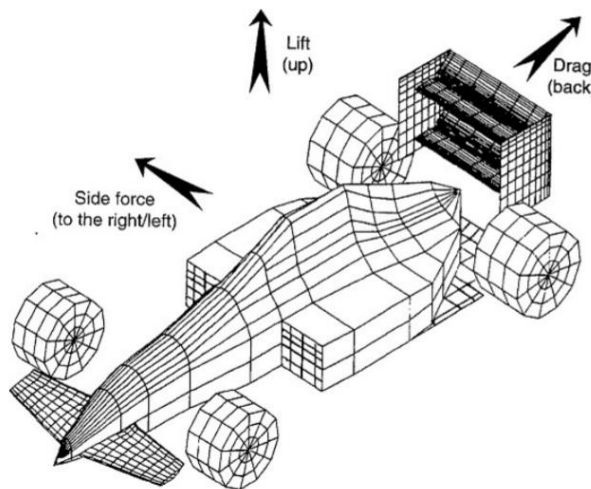

Figura 1.7: Forze aerodinamiche

Per la performance di una vettura le componenti che è importante controllare sono drag e lift, la componente laterale invece si può ritenere nulla nel caso di veicolo simmetrico ed assenza di vento laterale.

Per lo studio della dinamica del veicolo è di fondamentale importanza poter valutare tali forze. Una macchina tocca il suolo solo attraverso i quattro punti determinati dalla zona di contatto tra la strada e le gomme; attraverso queste aree tutte le forze, necessarie per il movimento della macchina, vengono trasmesse al suolo come forze d'attrito. Le forze di attrito sono proporzionali all'area e alla forza normale in superficie, quindi, aumentando il carico sulle ruote, l'auto è in grado di trasmettere più forza a terra. Attraverso le forze aerodinamiche di downforce è possibile aumentare il carico sulle ruote senza aumentare il peso della vettura: questo consente, ad esempio, di aumentare la velocità con cui è possibile affrontare una curva perché se il carico sulle ruote è superiore anche la forza di attrito delle gomme saranno più grandi e quindi l'aderenza della vettura sarà migliorata. D'altra parte, l'aumento di downforce è sempre accompagnato da un aumento di resistenza al movimento della vettura limitando le prestazioni soprattutto in termini di velocità massima. Ciò

implica la ricerca di un compromesso che dipende da diversi aspetti come il tipo di auto, la pista e le condizioni esterne.

Avere degli strumenti che permettano di valutare a priori tali forze e di fondamentale importanza per la progettazione e la valutazione della performance del veicolo.

1.5 La C.F.D. nel Race Up Team

La Computational Fluid Dynamics (C.F.D.) è l'analisi di sistemi che coinvolgono correnti fluide attraverso l'utilizzo di software di simulazione. Il principale vantaggio della C.F.D. è che permette di ottenere risultati in maniera veloce e relativamente poco costosa.

Il reparto aerodinamica del Team Race Up fa largo uso di simulazioni C.F.D. per stimare le forze di drag e downforce e conseguentemente progettare i profili alari della vettura. Tali risultati vengono poi forniti agli altri reparti, in particolare al reparto sospensioni e freni, per poter valutare la dinamica del veicolo e progettare i vari componenti della macchina nella maniera più opportuna.

Appare evidente come la C.F.D. sia uno strumento indispensabile per una corretta progettazione e proprio per questo è allo stesso modo importante avere strumenti di verifica della bontà dei risultati numerici di tale strumento. L'analisi numerica deve sempre andare di pari passo con le rilevazioni sperimentali.

I primi dati propri del team a riguardo sono associati al lavoro di tesi di Marco De Lazzari [2], il quale realizzò delle celle di carico ad anello che misuravano i carichi dei 4 puntoni e dei 2 tiranti con cui era montata l'ala posteriore della MG 10.15 (Figura 1.8).

Figura 1.8: Vettura MG 10.15 con celle di carico applicate all'ala posteriore [2]

Tali risultati sperimentali furono poi utilizzati da Riccardo Milan [3] come validazione del suo modello C.F.D. I risultati numerici di Milan risultano in accordo con quelli sperimentali di De Lazzari entro un errore massimo del 6 %. Convalidato il modello sulla MG 10.15, Milan ha poi eseguito simulazioni aerodinamiche sulla vettura MG 13.18 considerando 3 diverse configurazioni dell'ala anteriore (Front wing F.W.) e 3 diverse configurazioni dell'ala posteriore (Rear wing R.W.). Sia l'ala anteriore sia quella posteriore infatti presentano dei flap regolabili che permettono di modificare il comportamento aerodinamico della vettura

In tabella 1.1 sono riportati i risultati ottenuti dalle simulazioni C.F.D. eseguite da Milan: le 3 configurazioni dell'ala anteriore combinate con le 3 configurazioni dell'ala posteriore danno 9 differenti configurazioni complessive per l'assetto della vettura. I valori numerici si riferiscono a una velocità di 50 km/h. Nella tabella si parla di "Alto", "Medio" e "Basso carico", per una spiegazione approfondita delle varie configurazioni delle ali si rimanda al paragrafo 7.1.

R.W. CARICO	F.W. CARICO	R.W. D.F. [N]	R.W. DRAG [N]	F.W. D.F. [N]	F.W. DRAG [N]	D.F. [N]	DRAG [N]	EFFICIENCY (D.F./DRAG)
Alto	Alto	87	45.08	105.14	19.72	187.56	127.92	1.466
Basso	Alto	71.48	29.9	106.62	20.2	167.04	109.22	1.529
Medio	Alto	82.72	38.7	105.68	19.94	177.4	118.82	1.493
Alto	Medio	89.54	46.8	101.28	17.46	183.24	125.74	1.457
Alto	Basso	89.48	45.1	90.36	12.74	170.6	118.48	1.440
Medio	Medio	86.6	37.88	97.96	16.7	173.4	110.82	1.565

Medio	Basso	84.5	38.76	89.6	12.56	158.74	109.58	1.449
Basso	Medio	71.16	29.38	99.72	16.46	161.86	101.32	1.597
Basso	Basso	71.78	29.42	86.88	12.26	143.7	101.22	1.420

Tabella 1.1: Risultati C.F.D. a una velocità di 50 km/h [3]

Obiettivo della presente tesi è acquisire per i via sperimentale gli effettivi carichi aerodinamici rilevati in prove in pista e verificare l'accordo di tali dati con le previsioni C.F.D. A tal fine si progettano delle celle di carico multicomponente che andranno a sostituire le interfacce di supporto dell'ala anteriore e dell'ala superiore.

Capitolo 2: Progettazione e realizzazione delle celle di carico

2.1 Individuazione componenti da riprogettare

Al fine di progettare le celle di carico che dovranno misurare le forze di downforce e drag dell'ala anteriore e posteriore, è necessario innanzitutto individuare i componenti da riprogettare al fine di renderli sensibili a tali forze nel modo più disaccoppiato possibile.
L'idea è stata riprogettare i supporti delle ali in quanto è proprio attraverso tali supporti che le forze che si generano alle ali vengono trasmesse alla vettura e infine a terra.
L'ala anteriore risulta montata in vettura tramite due triangoli (Figura 2.1) in fibra di carbonio con all'interno Rohacell.
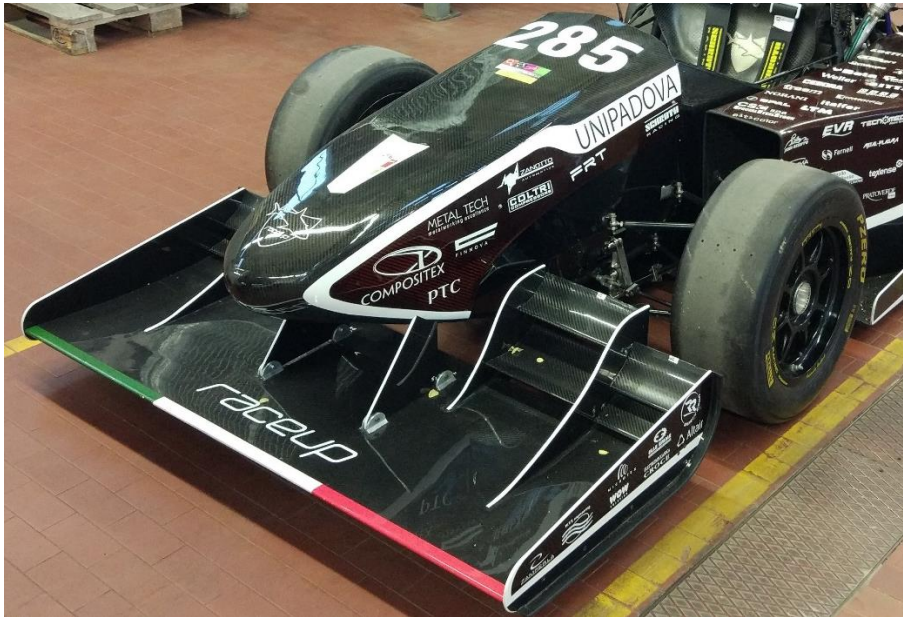

Figura 2.1: Triangoli di supporto dell'ala anteriore

L'ala posteriore invece è collegata a telaio mediante due strutture reticolari (Figura 2.2) in Ergal.

Figura 2.2: Reticolari di supporto dell'ala posteriore

L'obiettivo è riprogettare tali componenti senza modificare la geometria della vettura, cioè mantenendo come vincoli le posizioni spaziali dei collegamenti bullonati che collegheranno queste interfacce al telaio e alle rispettive ali.

2.2 Progettazione delle celle di carico

Il principio della progettazione è stato pensare a una geometria che consentisse di disaccoppiare il più efficacemente possibile il contributo della downforce da quello del drag. L'idea più semplice ed efficace è stata concepire le celle di carico come l'insieme di due travi incastrate a sbalzo, l'una orizzontare sensibile alla downforce e l'altra verticale sensibile al drag. Tale concept doveva comunque rispettare gli ingombri e la geometria originaria della vettura, cioè consentire di montare le ali nelle stesse posizioni che occupano in configurazione da gara.

Concepita la geometria, il dimensionamento ha seguito le successive linee guida:
- Resistenza: coefficiente di sicurezza rispetto allo snervamento almeno di 3,
- Rigidezza: valori confrontabili con quelle dei supporti originari, per evitare spostamenti delle ali eccessivi sotto carico,
- Sensibilità alle forze: sensibilità a fondo scala di circa 0.5 mV/V.

Per quanto riguarda l'ala anteriore i dati di progetto che si sono considerati per il dimensionamento derivano da analisi C.F.D. del team e sono:
- Downforce su 1 supporto a 100 km/h in configurazione di alto carico: 220 N
- Drag su 1 supporto a 100 km/h in configurazione di alto carico: 40 N
- Posizione centro di pressione (Figura 2.3): x=2362.08mm, y=-464.72mm

La posizione del centro di pressione è stata scelta arbitrariamente in quanto in un sistema piano, come il caso in esame, esiste una retta luogo dei punti dei centri di pressione (vedi Appendice A). Va inoltre precisato che il centro di pressione cambia sensibilmente in funzione della velocità e della configurazione delle ali, quello preso in considerazione è il centro di pressione relativo alla configurazione di alto carico a 100 km/h, ossia il caso più gravoso.
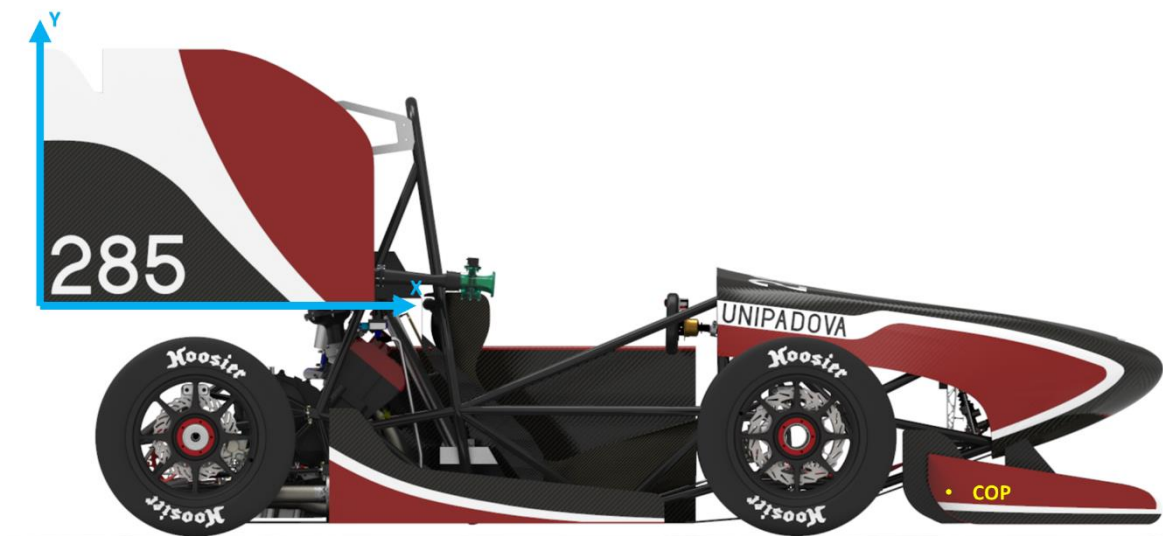

Figura 2.3: Posizione del centro di pressione dell'ala anteriore in configurazione di alto carico a 100 km/h

Partendo da questi dati si è eseguito il dimensionamento, inizialmente eseguito con conti carta-penna e infine con simulazioni F.E.M. tramite "Ansys Mechanical APDL 19.1". Come materiale si è scelto una lega di alluminio 7075-T6 (nome commerciale Ergal) di cui il team già possedeva una lastra dallo spessore nominale di 5 mm in magazzino. I dati considerati di tale materiale sono modulo elastico E = 71000 MPa, sigma di snervamento = 460 MPa, sigma di rottura = 540 MPa, durezza Brinell = 150, coefficiente di Poisson = 0.32 [4]. Per verificare i dati trovati in letteratura è stata eseguita una prova di durezza Brinell su uno spezzone di lamiera che ha confermato la durezza trovata in precedenza.

La geometria definitiva per quanto riguarda i supporti anteriori è mostrata in figura 2.4, in figura 2.5 è mostrata la messa in tavola con indicate le dimensioni principali.
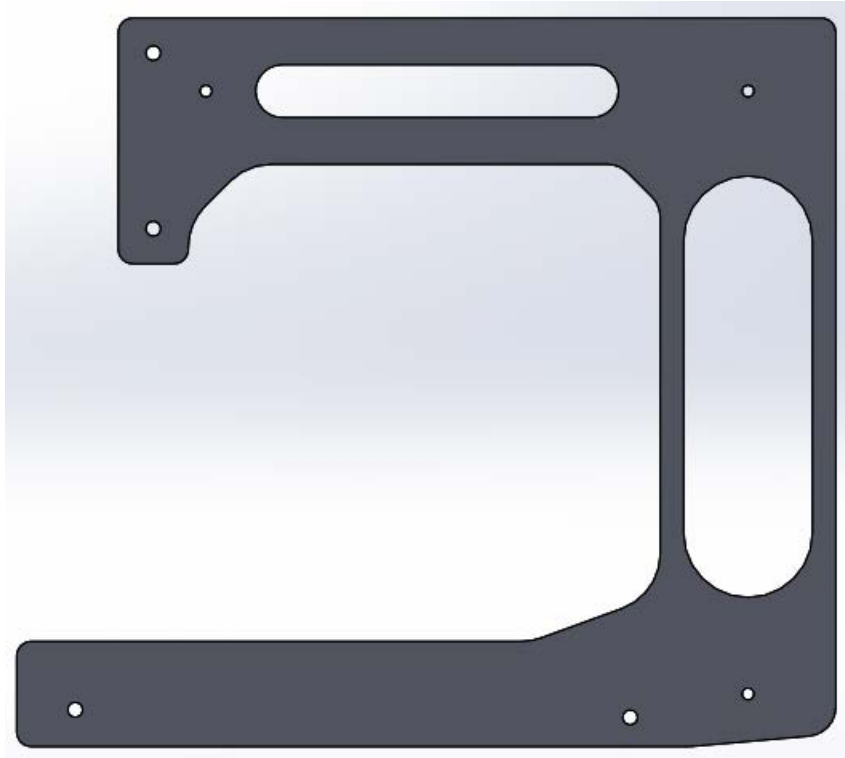
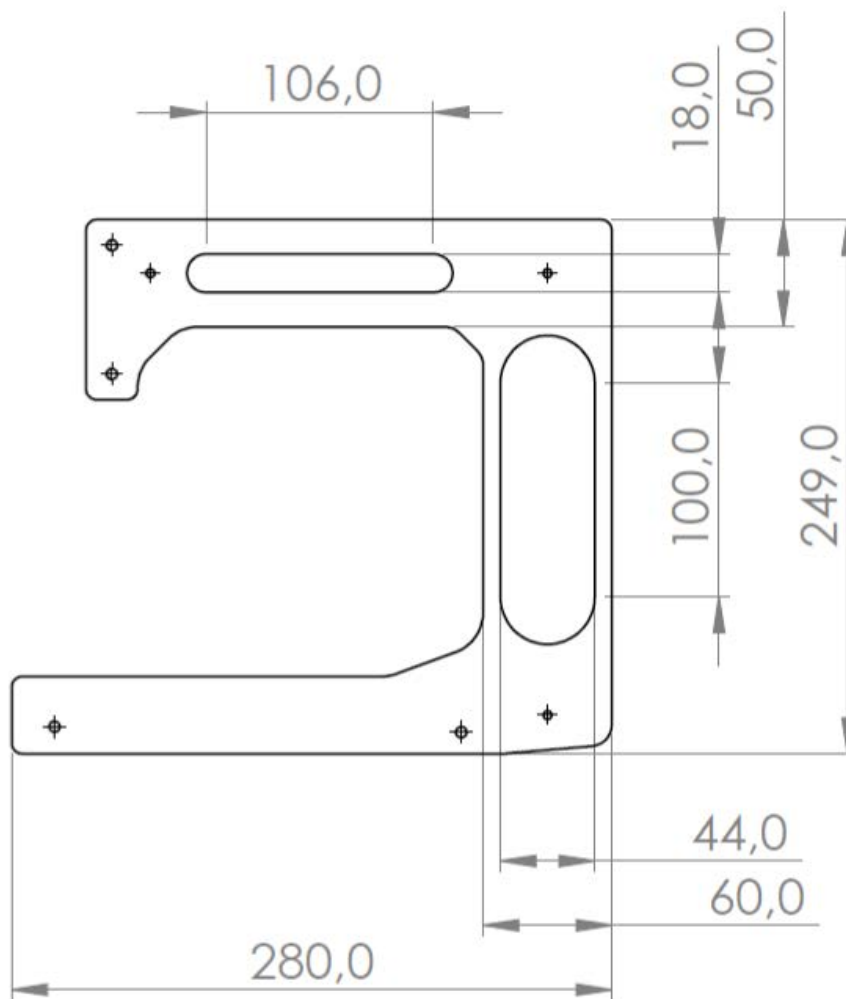*Figura 2.4: CAD interfaccia anteriore*

Figura 2.5: Messa in tavola interfaccia anteriore con quote principali

13

Si nota come sia per la trave superiore (quella sensibile alla downforce) che per quella verticale (quella sensibile al drag) è stata assunta una soluzione a "doppia trave": tale soluzione si è resa necessaria per mantenere segnali elevati e allo stesso tempo aumentare la rigidezza della struttura, infatti così facendo si è aumentato il momento statico mantenendo invariata la sezione netta. I 2 fori per il montaggio a telaio e i 2 per il montaggio dell'ala hanno diametro di 5 mm (come i supporti triangolari preesistenti), inoltre si nota la presenza di altri 3 fori dal diametro di 4 mm: questi ultimi fori sono stati pensati per permettere l'attacco di tiranti da un'interfaccia all'altra ed aumentare così la rigidezza laterale.

In figura 2.6 si mostra la struttura analizzata con un'analisi FEM. Sono stati usati elementi "plane 182" per l'interfaccia e "beam 188" per trasmettere le forze dal centro di pressione alla struttura.
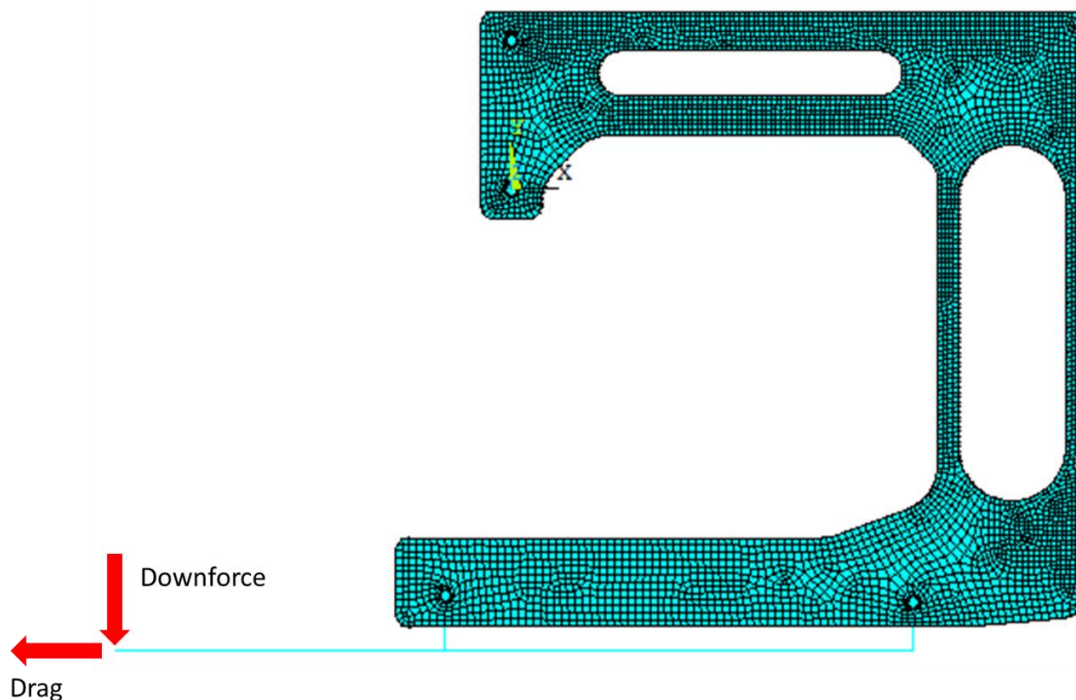

Figura 2.6: FEM interfaccia anteriore

L'analisi ha dato come risultati una tensione massima equivalente secondo Von Mises di 59 MPa, che garantisce un coefficiente di sicurezza rispetto allo snervamento di 7.8. La sensibilità teorica a fondo scala risulta di 0.69 mV/V per il canale downforce e di 0.47 mV/V per il canale drag (per la spiegazione del posizionamento degli estensimetri si guardi paragrafo 2.4.1). Le celle di carico commerciali solitamente hanno sensibilità a fondo scala di 2 mV/V, mentre per quanto riguarda quelle customizzate da esperienza sono sufficienti anche valori più bassi intorno a 0.5 mV/V.

La rigidezza verticale dell'intera struttura, cioè considerando entrambe le interfacce di supporto, vale 267.4 N/mm e quella longitudinale 279.8 N/mm. Per quanto riguarda la rigidezza laterale essa risulta di soli 10.0 N/mm, eccessivamente bassa in confronto ai carichi laterali che si sono stimati considerando la massa dell'ala anteriore (4.3 kg) e le accelerazioni laterali massime fornite dal team di circa 2g (circa 19.6 m/s²). Quindi i carichi laterali massimi anteriori sono di circa 40 N per supporto.

Per aumentare la rigidezza laterale si è pensato di inserire dei tiranti montati a "X": questa soluzione permette di avere una rigidezza laterale di 79.2 N/mm, mantenendo inalterata la sensibilità alla downforce e al drag. Per valutare questa soluzione è stato implementato un modello tridimensionale in Ansys utilizzando elementi "solid 185", i tiranti invece sono stati modellati con elementi "link 180". Nella figura 2.7 si notano le due coppie di tiranti a "X" mentre la struttura inferiore rappresenta l'ala attraverso cui le forze vanno dal centro di pressione alle due interfacce.
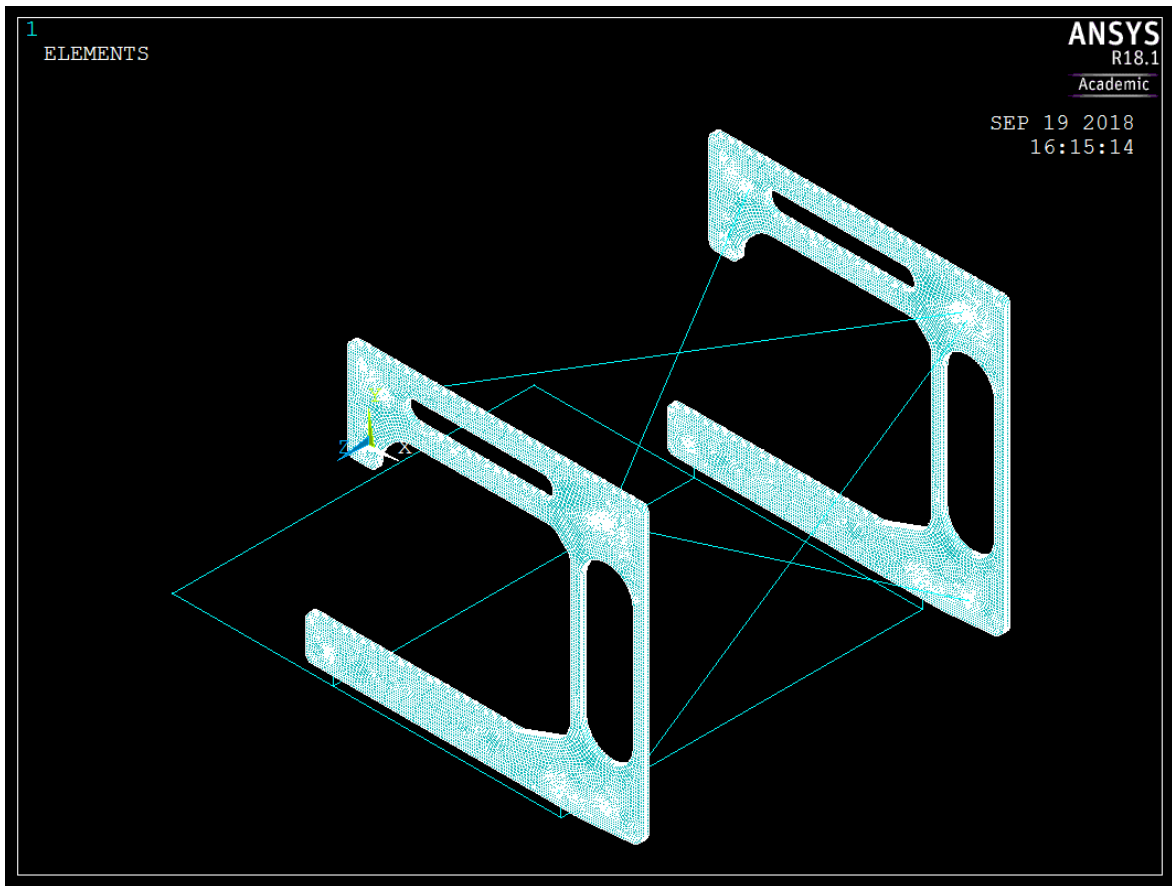
Figura 2.7: FEM struttura di supporto ala anteriore

Di seguito si riportano sinteticamente i risultati teorici ottenuti già esposti in precedenza:

- Sigma equivalente massima di Von Mises: 59 MPa
- Coefficiente di sicurezza allo snervamento: 7.8
- Sensibilità a fondo scala downforce: 0.69 mV/V
- Sensibilità a fondo scala drag: 0.47 mV/V
- Rigidezza verticale: 267.4 N/mm
- Rigidezza longitudinale: 279.8 N/mm
- Rigidezza laterale: 79.2 N/mm

Trattando dell'ala posteriore i dati di progetto che si sono considerati per il dimensionamento sono:
- Downforce su 1 supporto a 100 km/h in configurazione di alto carico: 180 N
- Drag su 1 supporto a 100 km/h in configurazione di alto carico: 90 N
- Posizione centro di pressione (Figura 2.8):   x=326.69mm
            y=324.66mm

Figura 2.8: Posizione del centro di pressione dell'ala posteriore in configurazione di alto carico a 100 km/h

Per quanto riguarda il posteriore valgono le stesse considerazione fatte per l'anteriore e il materiale scelto per i supporti posteriori è sempre Ergal.
In figura 2.9 è mostrato il CAD dell'interfaccia posteriore mentre in figura 2.10 è possibile vedere la messa in tavola con le dimensioni principali.
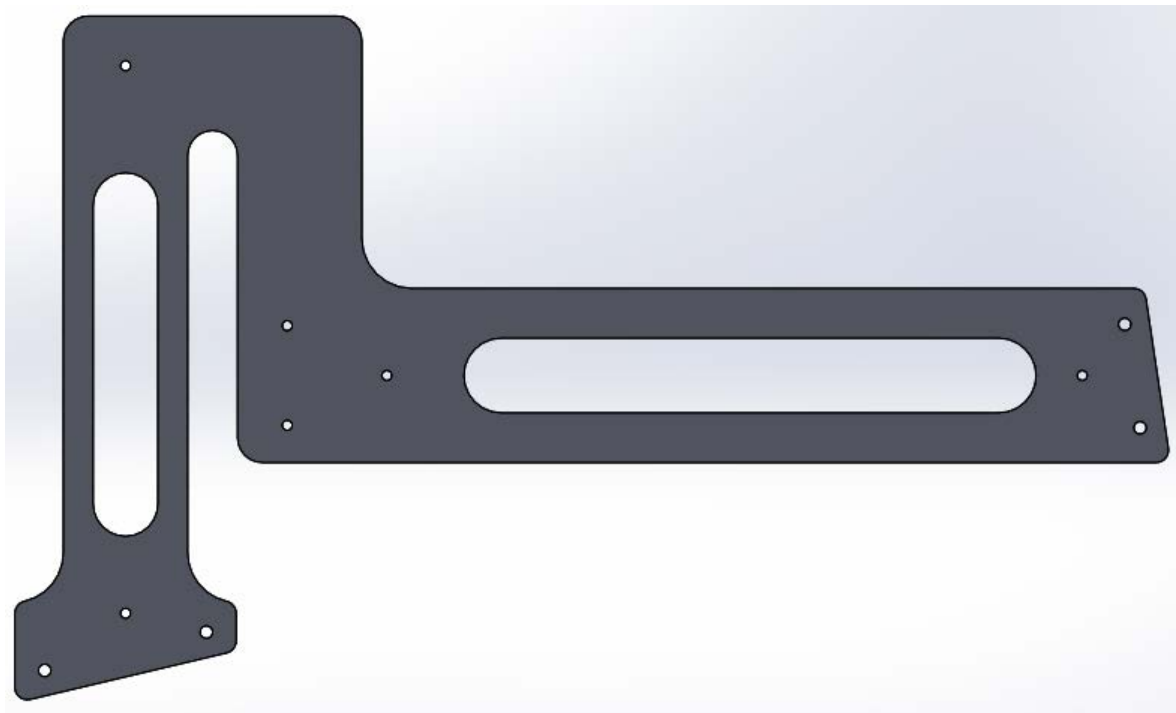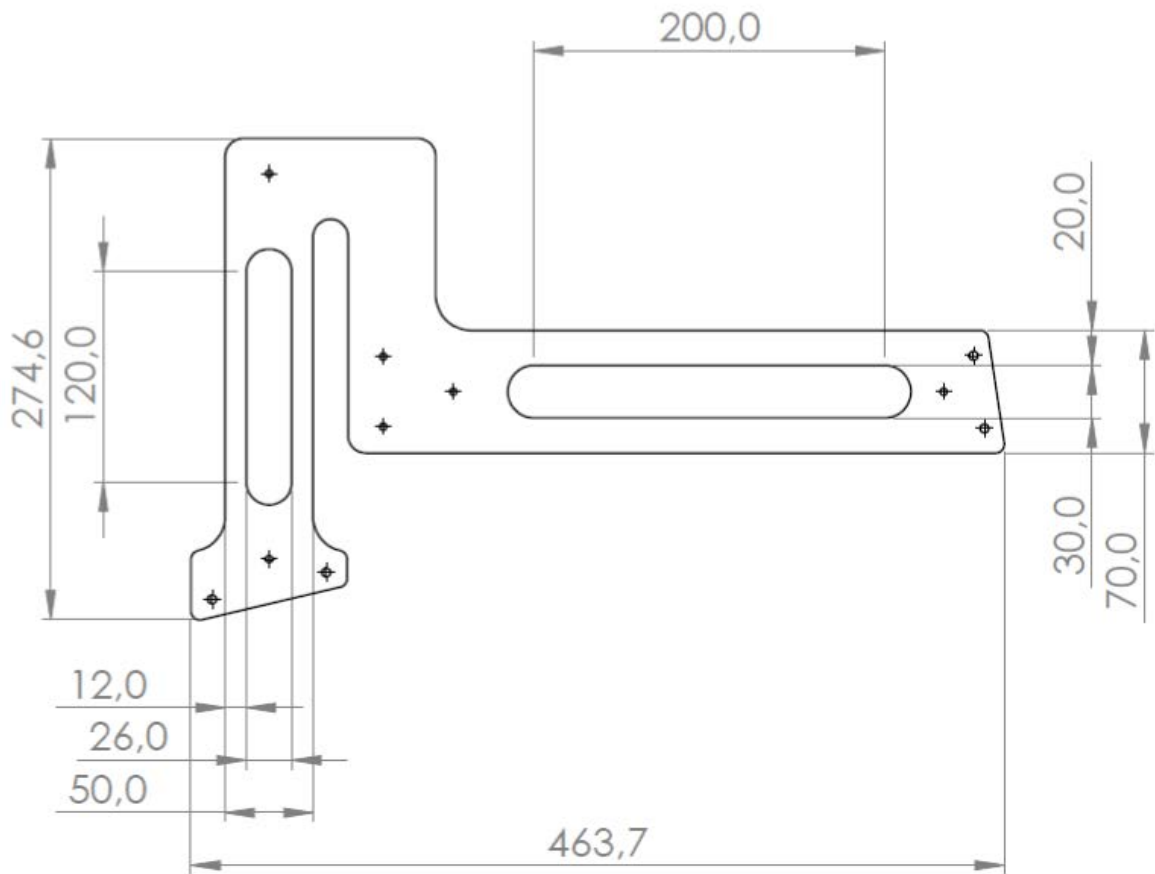

Figura 2.9: CAD interfaccia posteriore

Figura 2.10: Messa in tavola interfaccia posteriore con quote principali

In figura 2.11 si può vedere l'interfaccia posteriore meshata per le analisi FEM, in figura 2.12 invece si vede l'intera struttura di supporto dell'ala posteriore dove è stata adottata, allo stesso modo dell'anteriore, una soluzione con tiranti a "X" per irrigidire lateralmente.
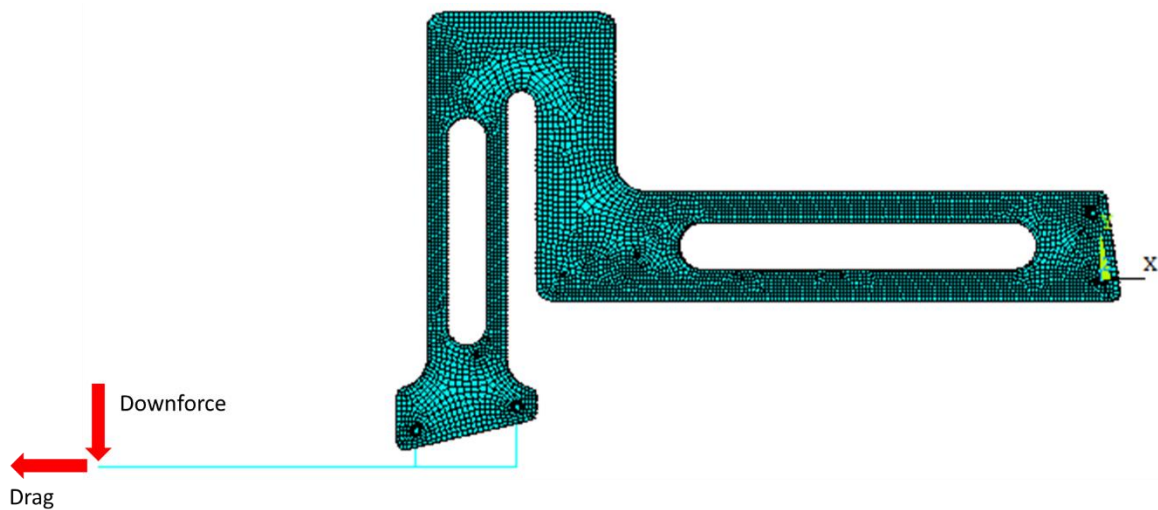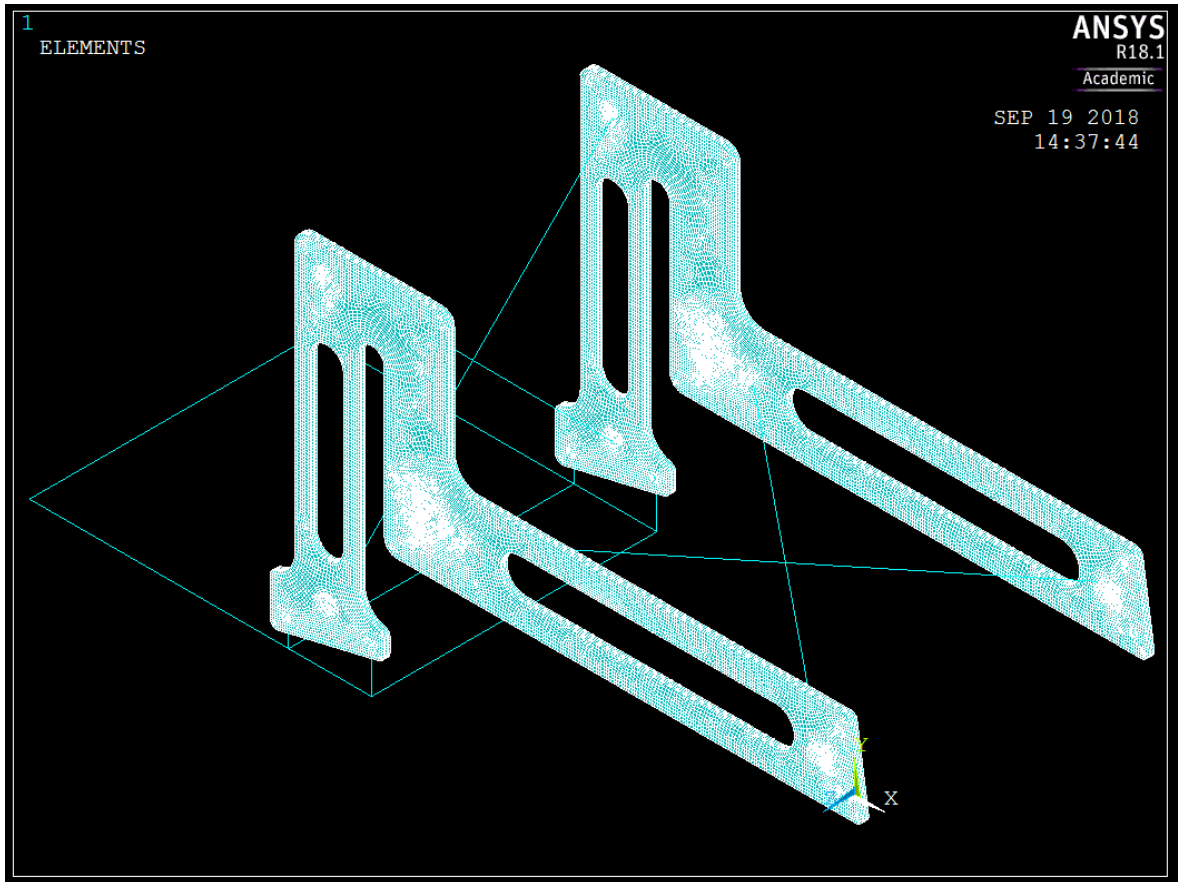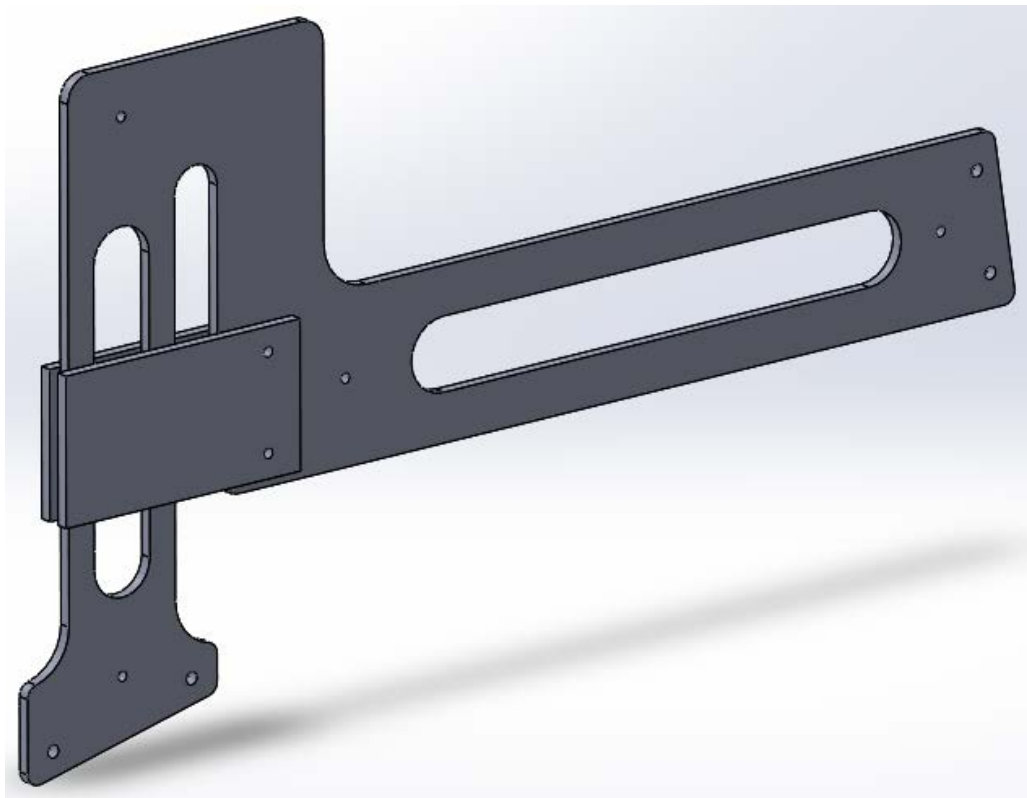

Figura 2.11: FEM interfaccia posteriore

Figura 2.12: FEM struttura di supporto ala posteriore

Per incrementare ulteriormente la rigidezza laterale si è poi pensato di aggiungere due lamine di metallo esternamente ai bracci sensibili al drag al fine di impedire lo "sbandamento" laterale di tali parti (Figura 2.13).


Figura 2.13: CAD interfaccia posteriore irrigidita lateralmente con lamine metalliche

Per concludere si riportano i risultati teorici ottenuti dei supporti posteriori:

- Sigma equivalente massima di Von Mises: 44 MPa
- Coefficiente di sicurezza allo snervamento: 10.5
- Sensibilità a fondo scala downforce: 0.70 mV/V
- Sensibilità a fondo scala drag: 0.55 mV/V
- Rigidezza verticale: 233.6 N/mm
- Rigidezza longitudinale: 345.1 N/mm
- Rigidezza laterale: 48.2 N/mm

Infine in figura 2.14 si mostra il concept della vettura con montate le celle di carico che sorreggono le ali.
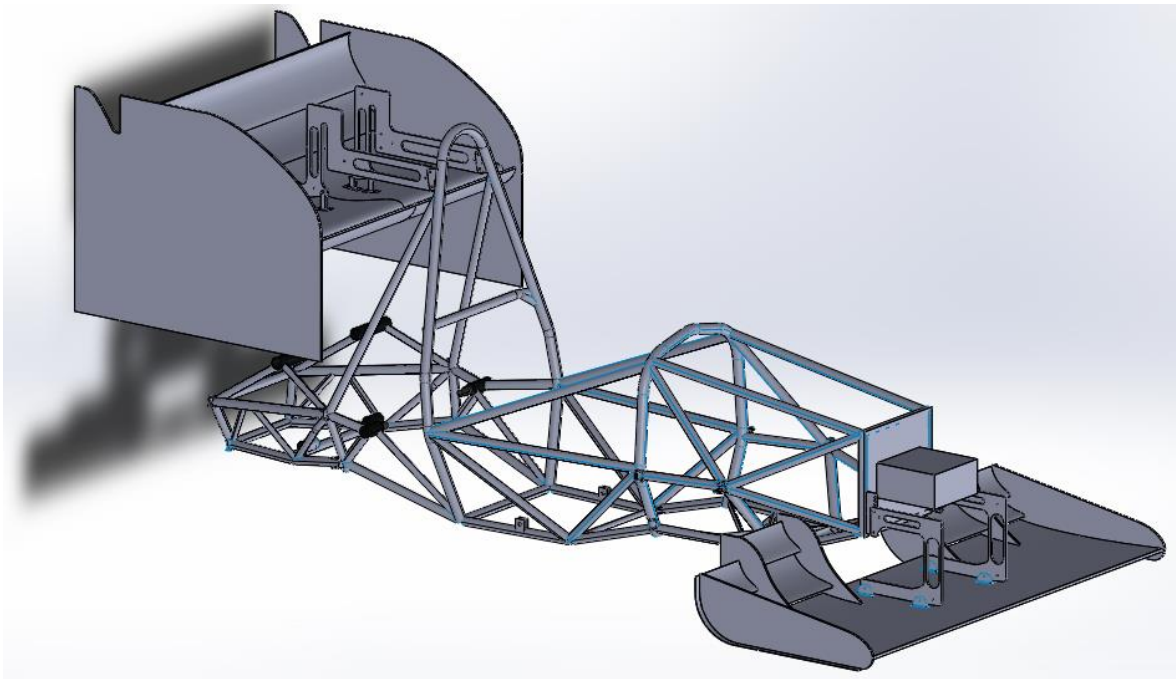
Figura 2.15: CAD del telaio con montate le ali su le celle di carico

2.3 Produzione delle celle di carico

Le celle di carico sono state prodotte partendo da una lastra di Ergal dalle dimensioni di 1000x1500 mm che il team aveva in magazzino. Al fine di minimizzare lo spreco di materiale si sono disposti i pezzi come in figura 2.16, è stato così sufficiente utilizzare uno spezzone di lastra dalle dimensioni di 460x650 mm.
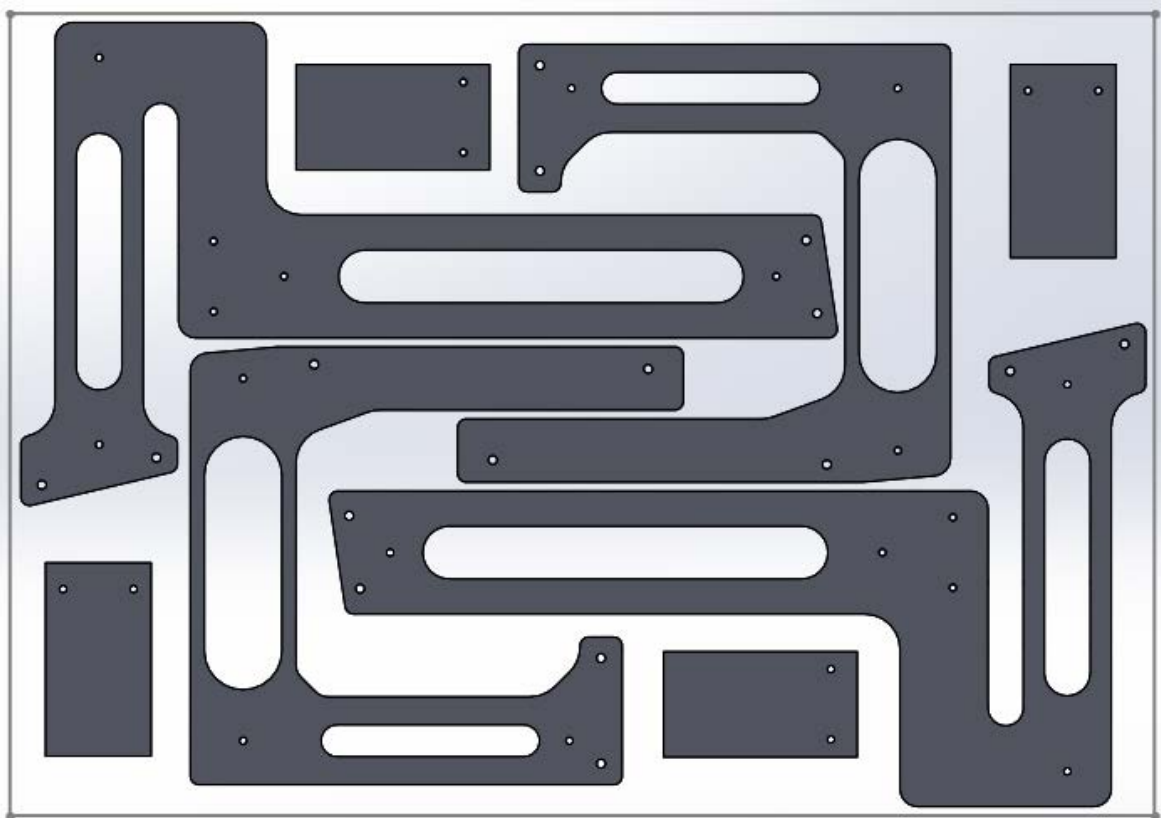
Figura 2.16: Disposizione dei pezzi sulla lastra di Ergal da tagliare
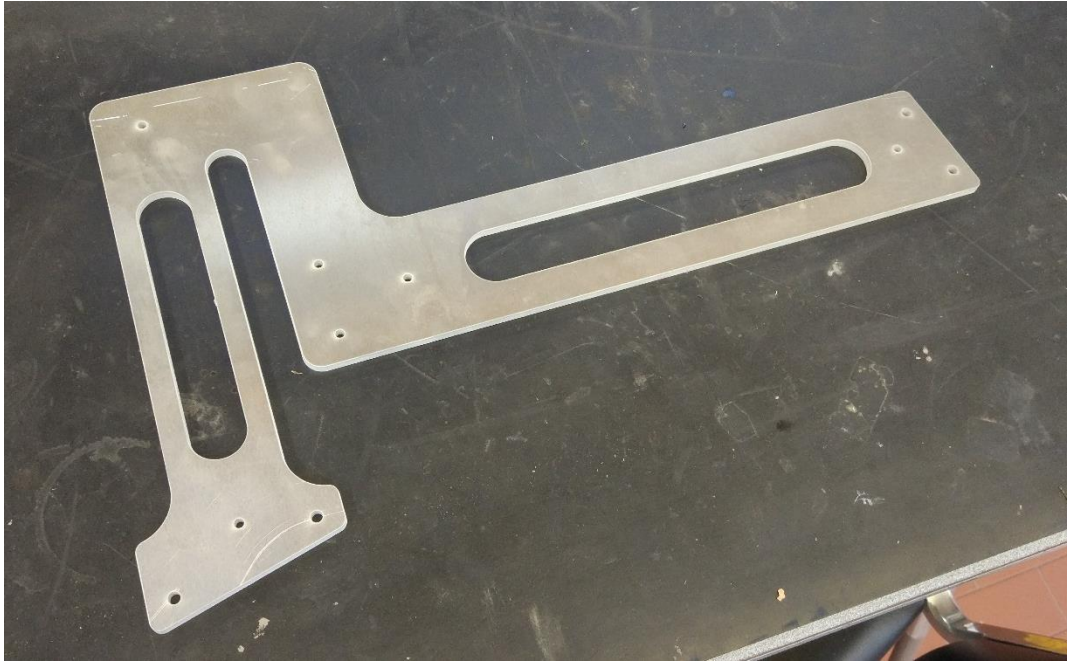
La lavorazione eseguita è stata un taglio ad acqua presso l'azienda "Breda Racing S.R.L." con sede a Villafranca Padovana.
In figura 2.17 e 2.18 si vedono realizzati i pezzi che andranno a costituire rispettivamente la cella di carico anteriore e quella posteriore.

Figura 2.17: Supporto ala anteriore

Figura 2.18: Supporto ala posteriore

2.4 Preparazione del sistema di misura

2.4.1 Scelta della disposizione degli estensimetri

Ogni cella di carico deve presentare due canali, uno sensibile alla downforce e uno sensibile al drag. Visto che il centro di pressione non è un punto fisso, ma varia sensibilmente la sua posizione in funzione della velocità e della configurazione aerodinamica dell'ala, era necessario scegliere una disposizione degli estensimetri che permettesse di misurare la componente di carico di interesse indipendentemente dal suo punto di applicazione. A tal fine è stata scelta una disposizione del tipo mostrato in figura 2.19, in cui lo sbilanciamento del ponte è proporzionale al carico applicato e non alla sua posizione, infatti:

$$V_0 = V_S \frac{K}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = V_S \frac{K}{4}(\varepsilon_A + \varepsilon_A - \varepsilon_B - \varepsilon_B) = \frac{V_S \, K \, L2}{2 \, E \, W_f} P \qquad (2.1)$$
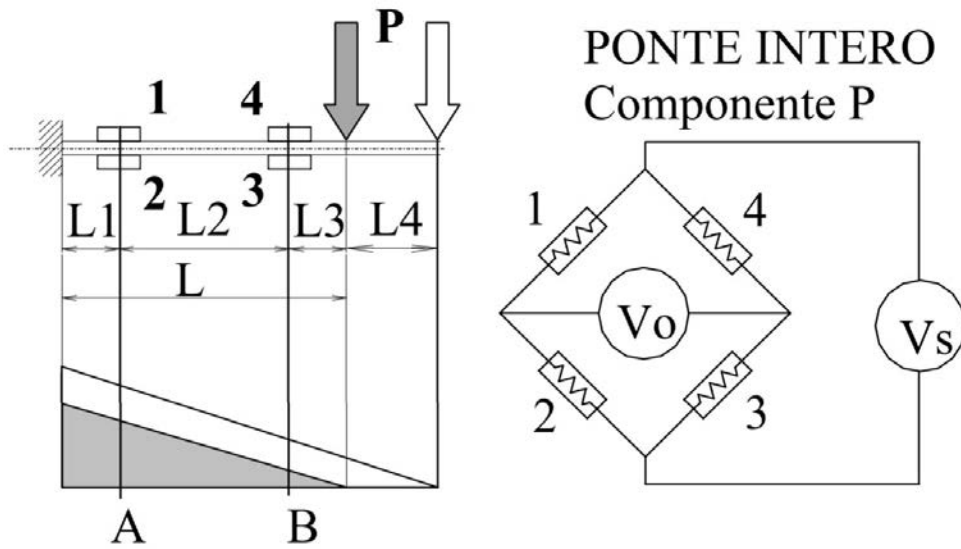

Figura 2.19: Disposizione degli estensimetri adottata per avere misure di carico indipendenti dal punto di applicazione [5]

In figura 2.20 è mostrato il posizionamento degli estensimetri sulle celle di carico anteriori. Si nota come ogni cella di carico presenti 8 estensimetri: 4 per il ponte intero di Wheatstone sensibile alla downforce (in rosso nell'immagine) e 4 per il ponte sensibile al drag (in giallo).
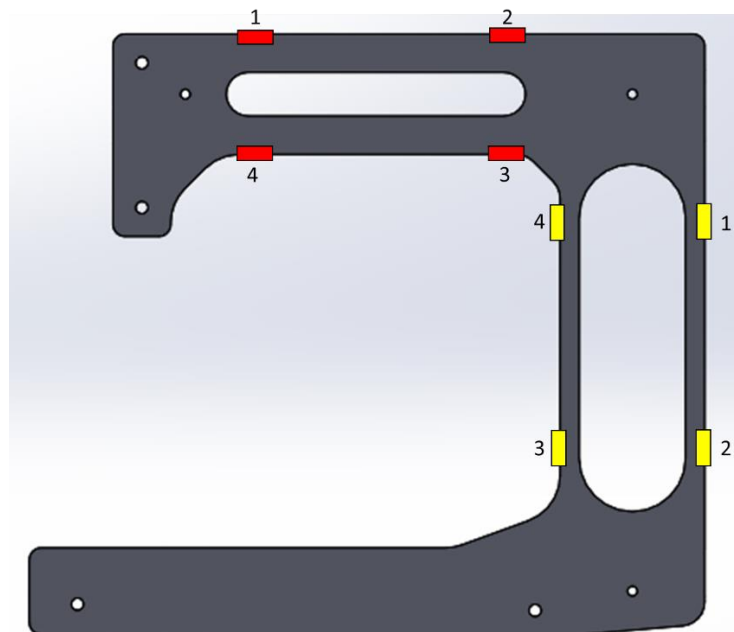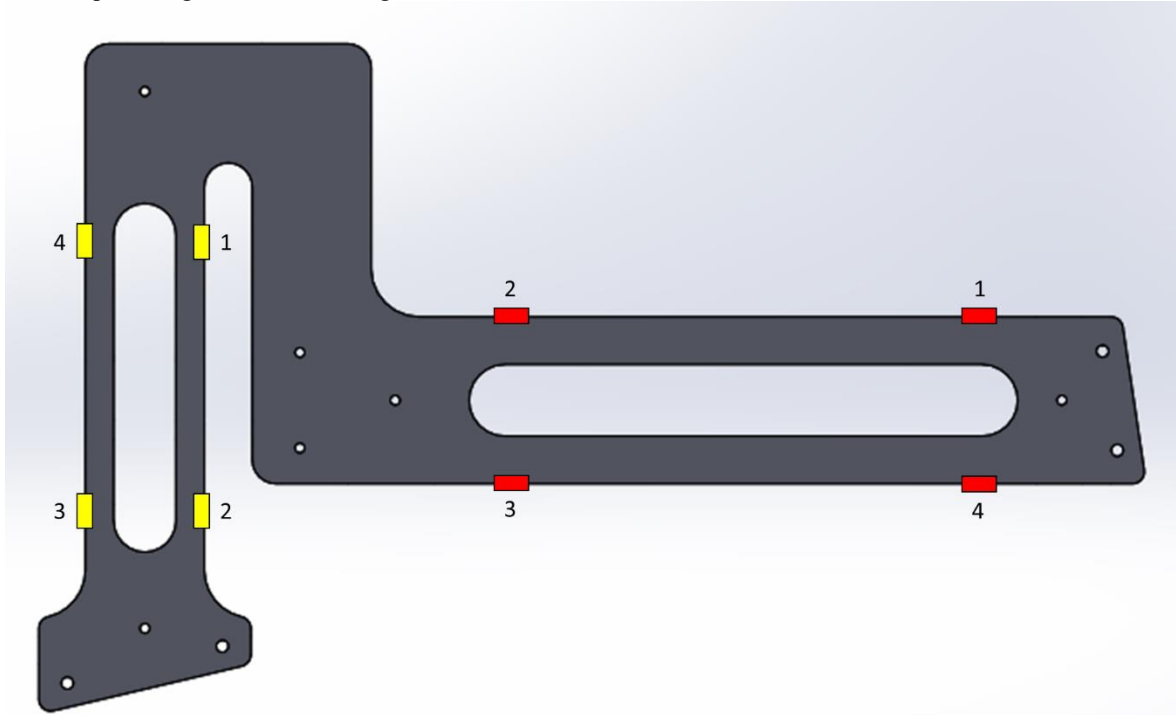

Figura 2.20: Posizione degli estensimetri sulla cella di carico anteriore (in rosso gli estensimetri del ponte di Wheatstone sensibile alla downforce, in giallo quelli del drag)

In figura 2.21 invece è possibile vedere come sono stati posizionati gli estensimetri sulle celle di carico posteriori. Allo stesso modo dell'anteriore, gli estensimetri rappresentati in rosso formano il canale downforce mentre quelli in giallo il canale drag.

Figura 2.21: Posizione degli estensimetri sulla cella di carico posteiore (in rosso gli estensimetri del ponte di Wheatstone sensibile alla downforce, in giallo quelli del drag)

Complessivamente quindi si acquisiranno 8 canali, cioè un segnale di downforce e uno di drag per ciascuna delle 4 celle di carico realizzate.

A seguire viene spiegata la procedura operativa utilizzata per l'incollaggio degli estensimetri, per maggiori informazioni a riguardo è possibile consultare il manuale Kyowa [6].

2.4.2 Preparazione delle superfici e tracciatura

Al fine di un corretto incollaggio degli estensimetri è necessario innanzitutto preparare le superfici sulle quali vanno applicati. Infatti la superficie deve risultare il più liscia possibile, senza graffi o solchi che potrebbero comportare errate misurazioni delle deformazioni da parte degli estensimetri. A tal fine le superfici dei siti dove andranno applicati gli estensimetri sono state preparate con carta vetrata dalla granulosità crescente: si è partiti da una grana di 100 per poi passare a 240, 320, 500 e infine a 1000. I movimenti eseguiti con la carta vetrata sono stati circolari per evitare direzioni preferenziali.

Una volta preparata la superficie e pulita con alcool, si procede con la tracciatura. Tale operazione serve ad avere dei riferimenti ai quali sovrapporre la griglia estensimetrica per un corretto e preciso posizionamento. Per le tracce longitudinali si è utilizzato un apposito tracciatore (Figura 2.22) dotato di calibro integrato per individuare correttamente la metà dello spessore.
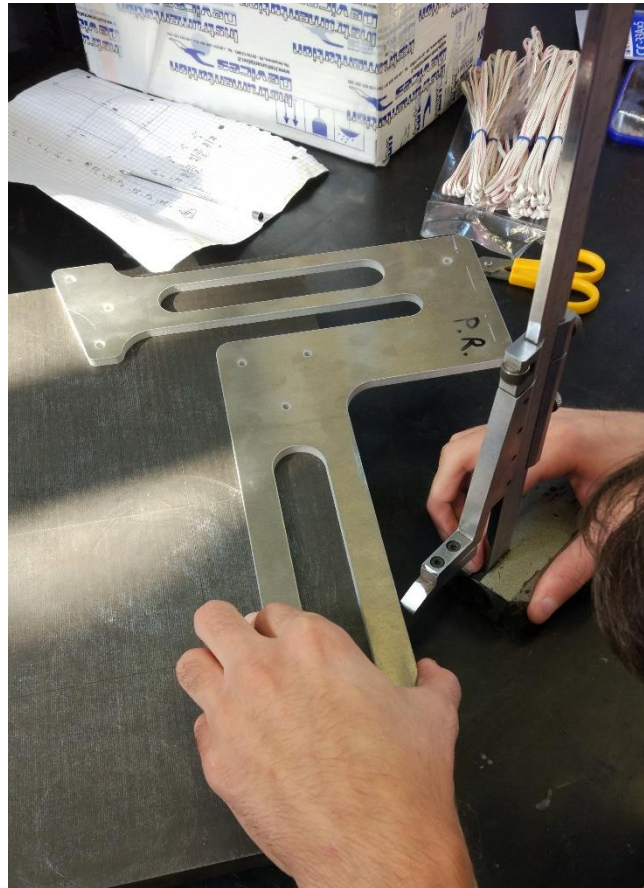

Figura 2.22: Tracciatura longitudinale

Per le tracce trasversali invece si è fatto uso di una squadra e un incisore (Figura 2.23). Queste tacche sono state fatte in corrispondenza dell'inizio della sezione netta minima, ossia dove finivano i raggi di raccordo degli intagli centrali (per maggior chiarezza si rimanda alle immagini 2.20 e 2.21).

Figura 2.23: Tracciatura trasversale

2.4.3 Posizionamento ed incollaggio degli estensimetri

I 32 estensimetri utilizzati sono estensimetri Kyowa modello "KFGS-3-120-C1-11 L3M3R" precablati con cavo di 3 metri a tre fili e presentano i seguenti parametri (Figura 2.24):

- Gauge factor: $K = 2.08 \pm 1\%$
- Resistenza: $119.6\ \Omega \pm 0.4\ \%$

Figura 2.24: Data sheet degli estensimetri utilizzati

Dall'immagine osserviamo inoltre che sono stati utilizzati estensimetri compensati per acciaio, mentre le celle di carico sono in lega di alluminio. Ciò non appare un problema in quanto i test saranno eseguiti all'aperto e quindi a temperatura ambiente, non ci sono motivi per considerare variazioni di temperatura tali da rendere necessaria una compensazione.

Per il posizionamento si procede nel seguente modo: con l'aiuto di uno specchietto appoggiato sul tavolo si attacca l'estensimetro su un pezzo di scotch semi-trasparente (Figura 2.25), tale striscia di nastro permette di posizionare l'estensimetro correttamente allineando le tacche di centratura con gli indicatori presenti attorno alla griglia dell'estensimetro (Figura 2.26 e 2.27).
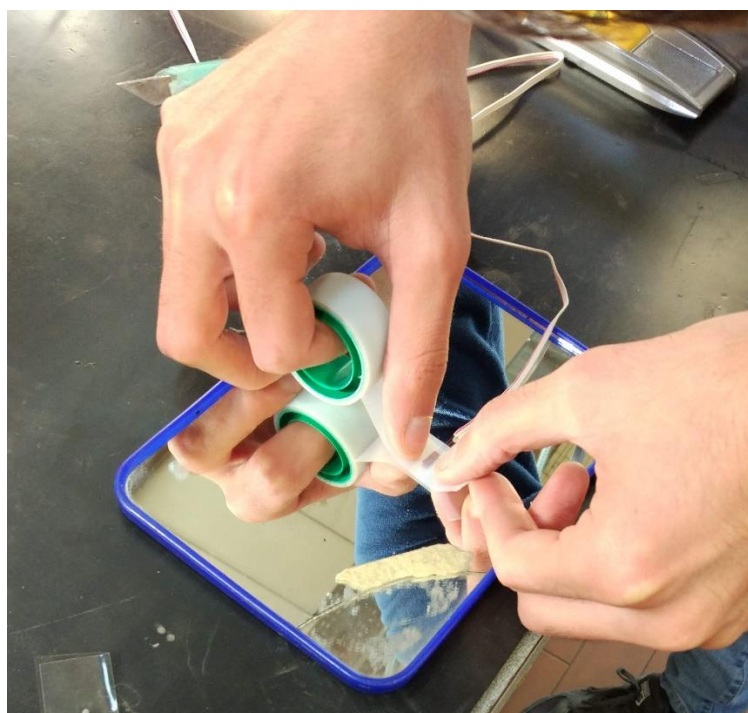
Figura 2.25: Estensimetro attaccato allo scotch

Figura 2.26: Posizionamento dell'estensimetro
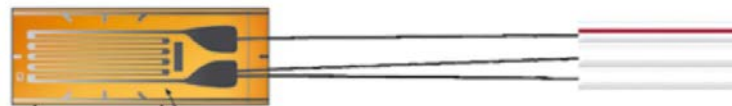
Figura 2.27: Griglia estensimetrica con indicatori per il centraggio

Una volta posizionato l'estensimetro, facendo attenzione a far andare i cavi nella direzione in cui si troverà l'abitacolo della vettura, si procede all'incollaggio vero e proprio. Si alza lo scotch su cui è ancora attaccato l'estensimetro (Figura 2.28), si applica una goccia di colla (cianoacrilato CC-33A, figura 2.29) e rapidamente si abbassa lo scotch premendo per almeno 60 secondi con un foglio di teflon (Figura 2.30). Infine si rimuove lo scotch verificando che l'estensimetro resti incollato alla superficie del pezzo.
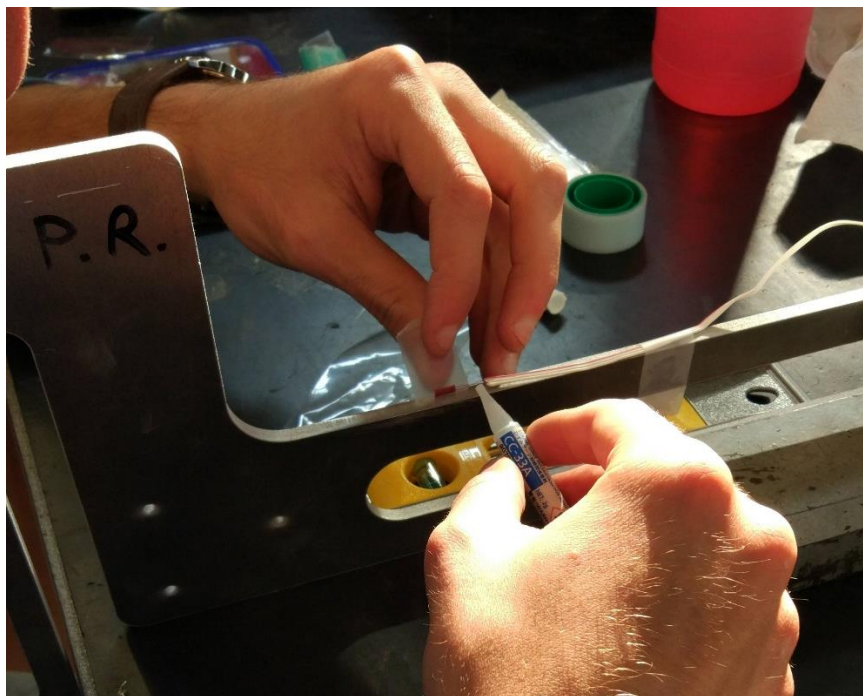
Figura 2.28: Applicazione della colla

Figura 2.29: Cianoacrilato CC-33A
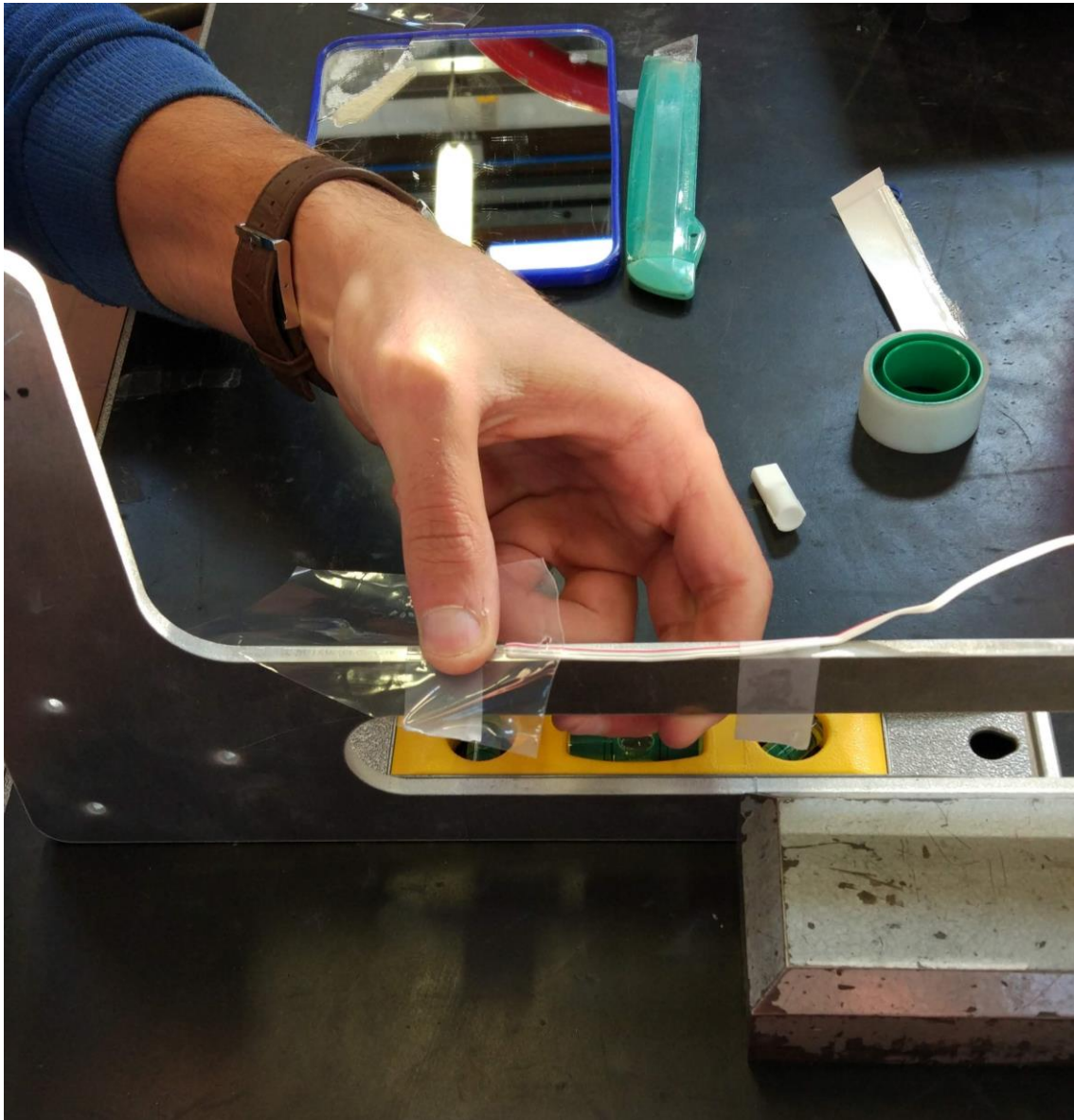
Figura 2.30: Fase di reticolazione della colla

Terminata la fase di incollaggio, si procede all'applicazione di uno strato di silicone che ha il compito di proteggere l'estensimetro dagli agenti esterni e dalla sporcizia (Figura 2.31).

Figura 2.31: Strato protettivo di silicone sopra all'estensimetro incollato

2.4.4 Cablaggio

Per eseguire il collegamento degli estensimetri a ponte intero si utilizzano degli spinotti (Figura 2.32) su cui si vanno a collegare i terminali dei fili. Ciascuno spinotto consente di configurare due canali, quindi infine gli spinotti cablati risulteranno 4.
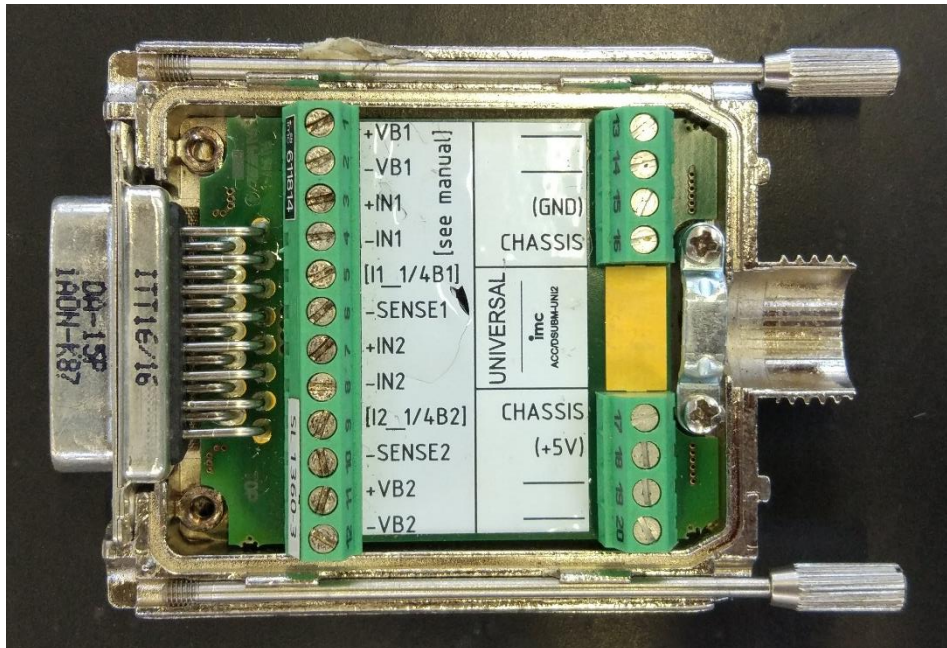
Figura 2.32: Spinotto della centralina IMC

Per riprodurre la disposizione del ponte intero di Wheatstone (Figura 2.33) è necessario eseguire il cablaggio mostrato in figura 2.34, come spiegato nel manuale allegato alla centralina IMC utilizzata. Nello schema la dicitura "VB" indica l'alimentazione mentre "in" indica l'output, cioè lo sbilanciamento. Con "sense" si fa riferimento al collegamento previsto nelle centraline IMC per compensare la lunghezza dei cavi, la quale comporta un'attenuazione del segnale di misura direttamente proporzionale alla lunghezza del cavo.
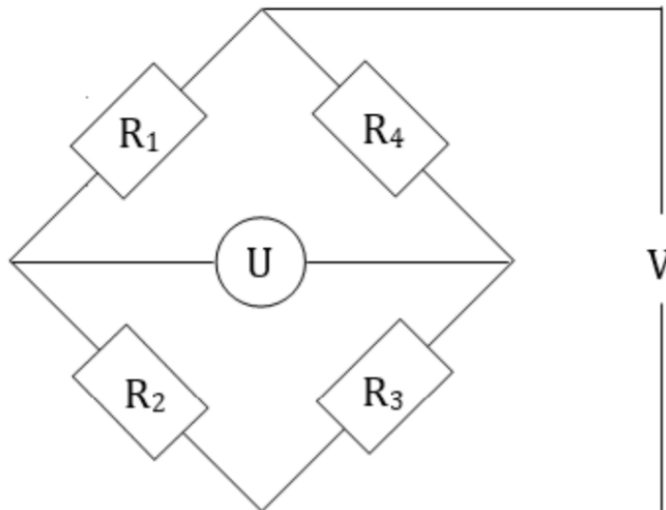
Figura 2.33: Configurazione ponte intero di Wheatstone
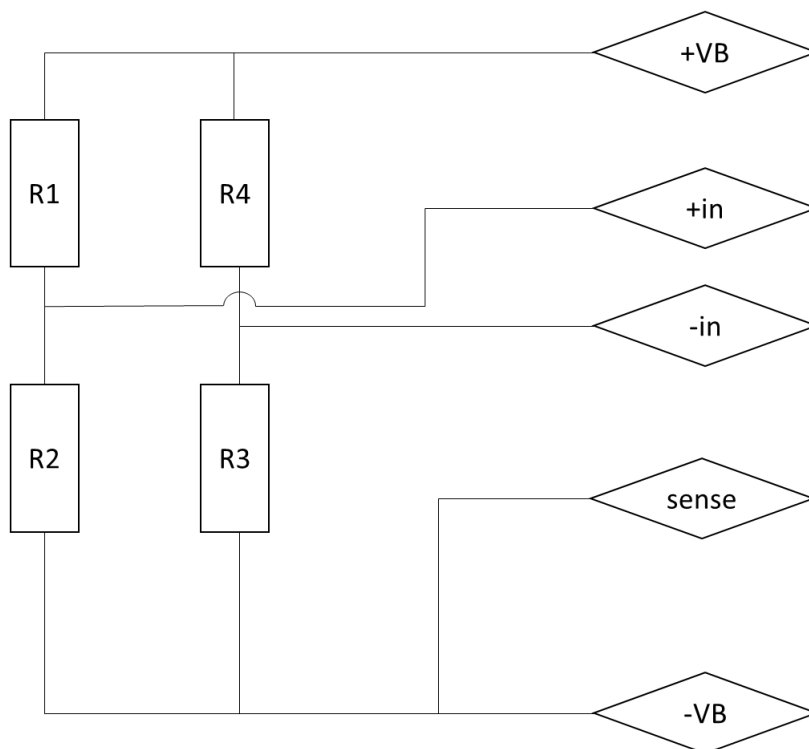
Figura 2.34: Schema elettrico di collegamento degli estensimetri nello spinotto IMC

Ogni estensimetro presenta 1 cavo rosso e 2 bianchi e il cablaggio è stato eseguito come mostrato in figura 2.35 (i cavi bianchi sono in nero nell'immagine).
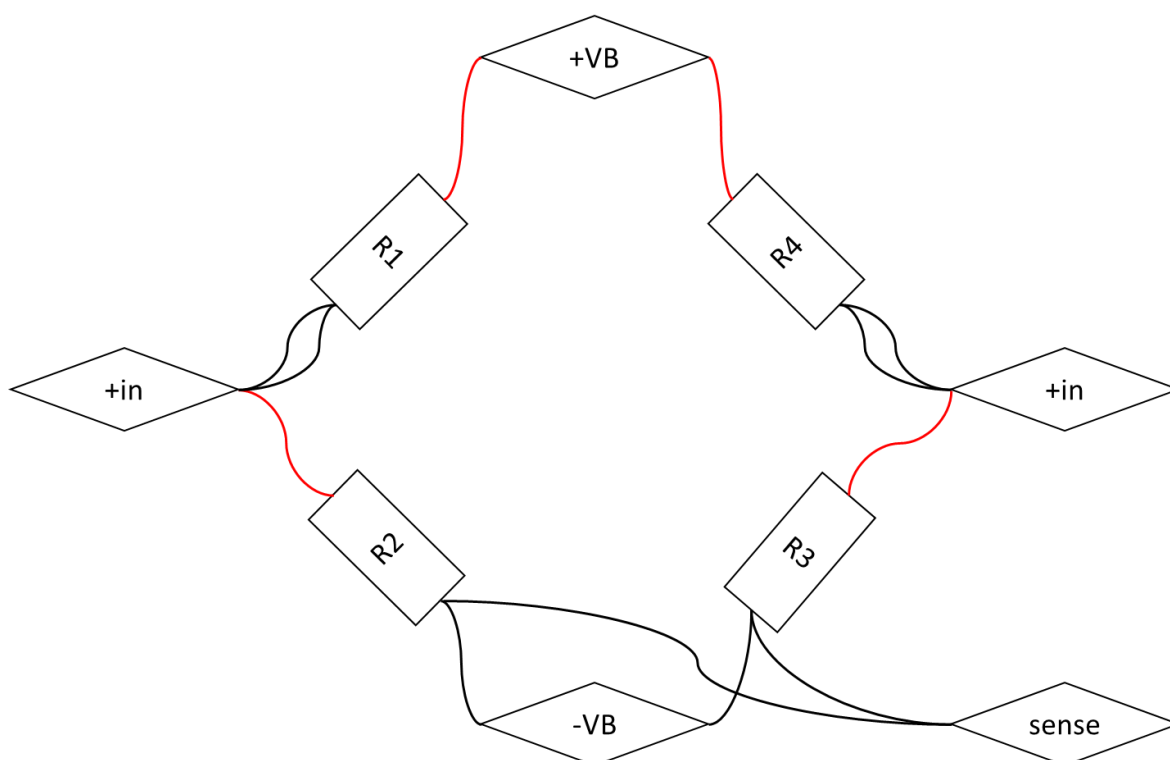
Figura 2.35: Schema del cablaggio eseguito

In figura 2.36 viene mostrato un esempio di cablaggio di un canale eseguito su uno spinotto.
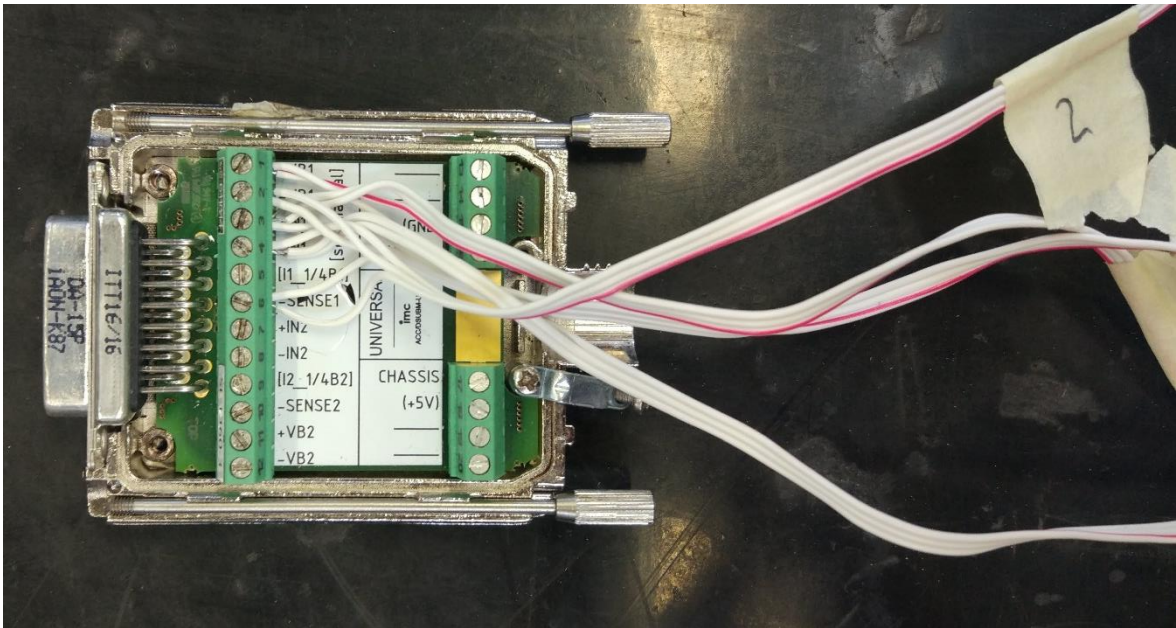
Figura 2.36: Spinotto con un canale cablato

Infine, in figura 2.37 vengono mostrate le interfacce estensimetrate e cablate pronte per l'utilizzo in vettura.
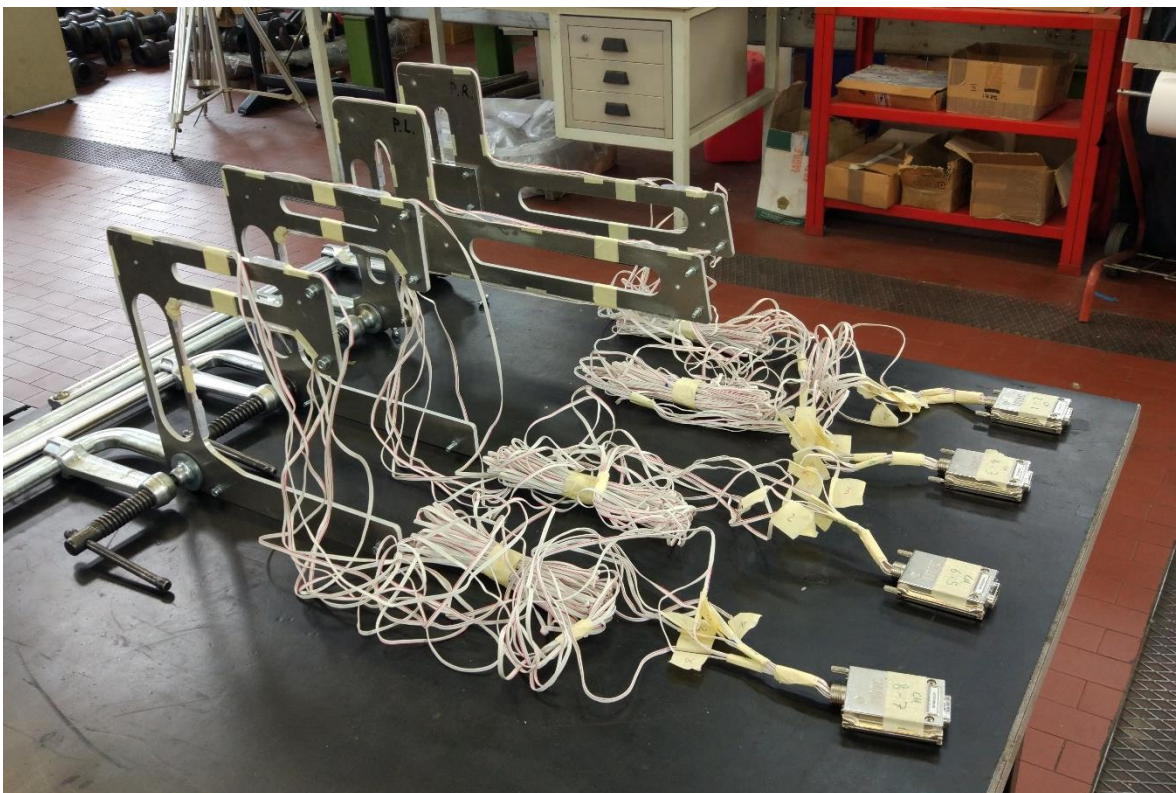
Figura 2.37: Celle di carico

2.4.5 Strumenti di acquisizione dei dati

Per l'acquisizione dei carichi sono state utilizzate due centraline, la centralina "IMC Cronos-PL2" e l'espansione "Cansas-L-UNI8", come sarà spiegato più in dettaglio nel paragrafo 4.1.

Queste centraline vanno inserite in vettura in modo da non modificare l'aerodinamica e allo stesso tempo non creare ingombro alla libera guida del pilota. A tal fine è stata realizzata una tavola di compensato opportunamente forata (Figura 2.38) che fa da supporto per l'alloggiamento delle centraline stesse. Si può notare inoltre come la tavola sia stata dotata di due piccole fasce di materiale spugnoso che serviranno ad aumentare l'isolamento delle centraline alle vibrazioni della vettura.

Figura 2.38: Tavola di compensato per il supporto delle centraline

Le centraline sono fissate a tale supporto con fascette da elettricista e sono posizionate in vettura sospese nello spazio libero sopra le gambe del pilota come si vede in figura 2.39. A sua volta, la tavola di compensato è legata al telaio attraverso fascette da elettricista (Figura 2.40).
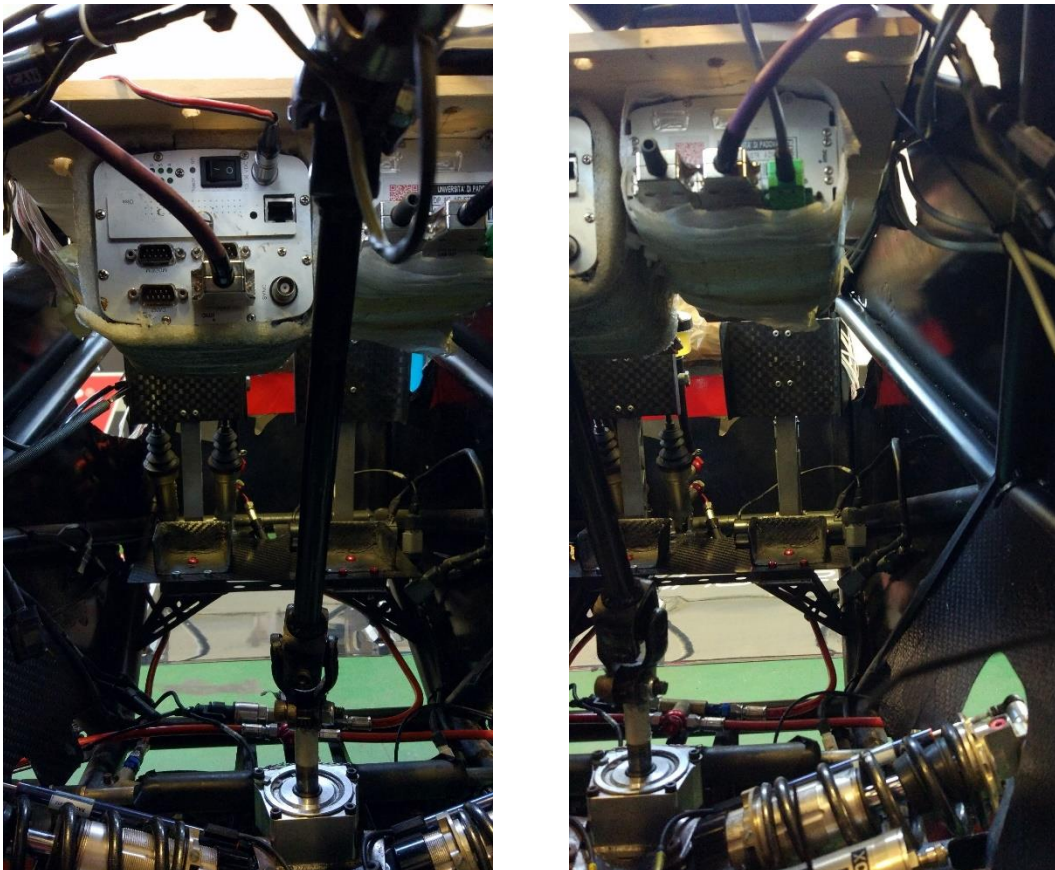
Figura 2.39: Posizionamento delle centraline in vettura, sopra le gambe del pilota

Figura 2.40: Fissaggio della tavola porta-centraline a telaio

L'alimentazione delle centraline è garantita da due batterie da 12V (Figura 2.41), le quali sono state posizionate anteriormente sopra il parallelepipedo di Honeycomb (Figura 2.42).

Figura 2.41: Batteria da 12 V per l'alimentazione della centralina
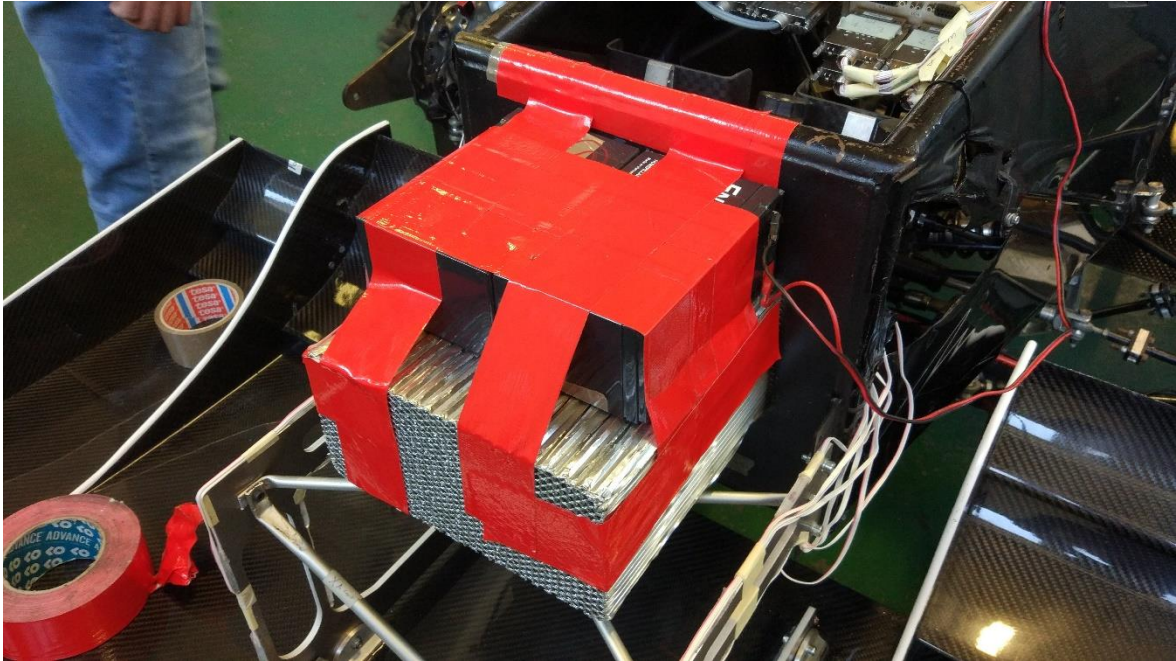
Figura 2.42: Posizionamento delle batterie in vettura

In figura si vedono le batterie fissate unicamente con scotch, in fase di test per sicurezza sono state utilizzate anche delle fascette metalliche al fine di garantire un fissaggio più sicuro.

Completano il kit di acquisizione i cavi di alimentazione e il cavo viola di collegamento tra centralina Cronos ed espansione. Questi cavi sono stati posizionati in modo tale da non interferire con i pedali e i movimenti dei piedi del pilota così da garantire una guida sicura (Figura 2.43).
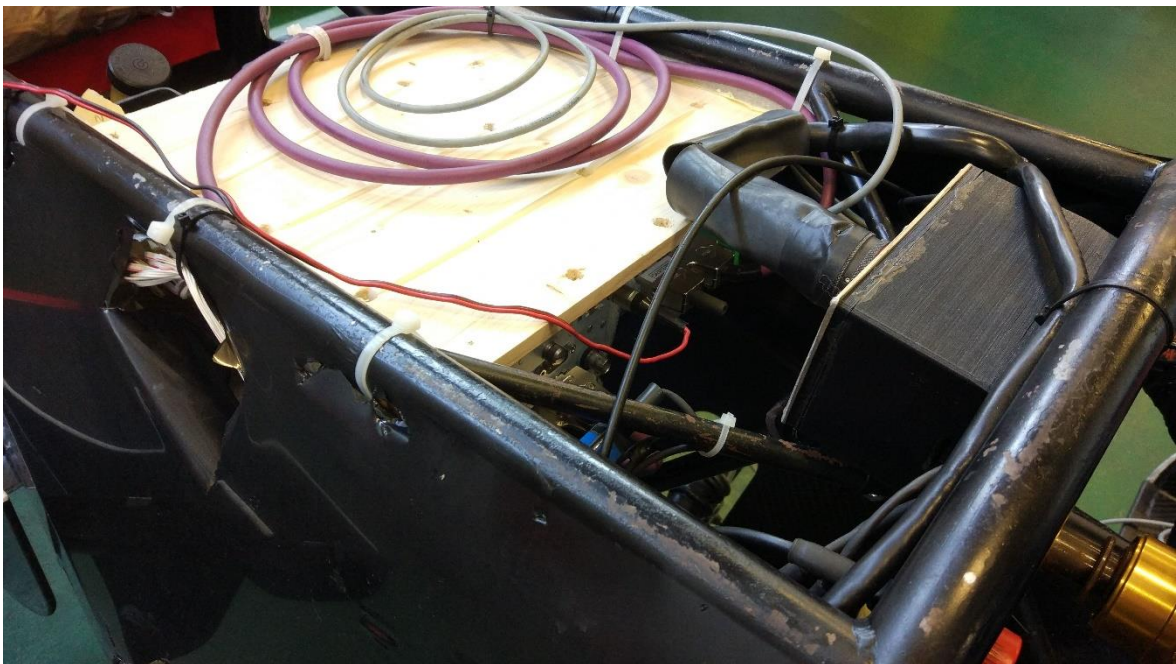
Figura 2.43: Posizionamento dei cavi delle centraline

2.5 Montaggio

Terminate le fasi di realizzazione e cablaggio delle celle di carico descritte in precedenza, si può procedere al montaggio delle stesse in vettura. Come descritto in precedenza, al fine di garantire anche una sufficiente rigidezza laterale alle strutture di supporto delle ali, sono stati tagliati e deformati plasticamente dei tubicini di alluminio (Figura 2.43) che vanno a costituire i tiranti a "X".

Figura 2.43: Taglio del tubicino di alluminio (a sinistra) e tubicino piegato (a destra)

In figura 2.44 si possono osservare le celle di carico anteriori montate sull'ala anteriore con installata la struttura tubolare di irrigidimento. In figura 2.45 invece si osserva l'intera struttura di supporto anteriore montata a telaio.

Figura 2.44: Struttura di supporto anteriore con montati i tubicini a "X"
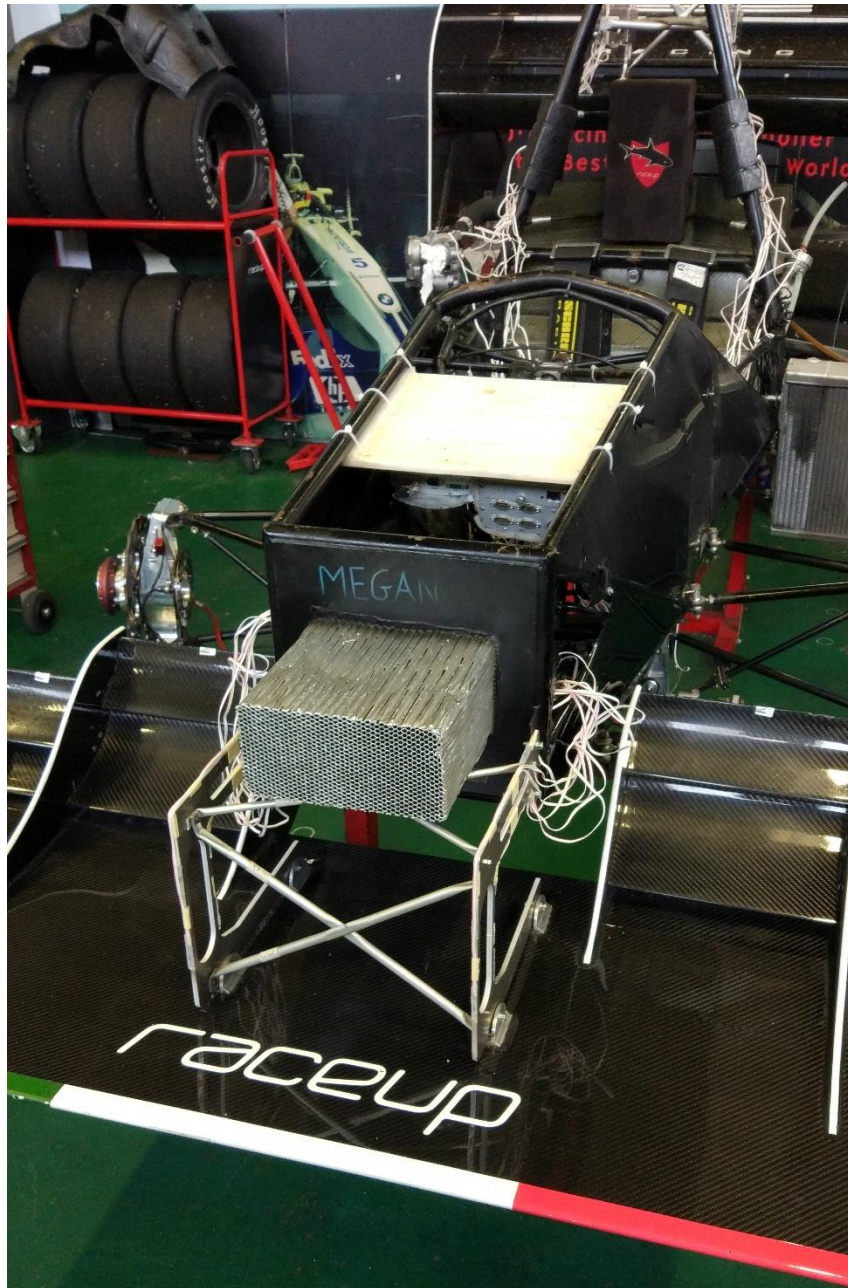
Figura 2.45: Struttura di supporto anteriore montata

Per quanto riguarda il posteriore sono state effettuate scelte analoghe come si può osservare in figura 2.46. Infine, in figura 2.47 viene mostrata l'intera struttura di supporto dell'ala posteriore.
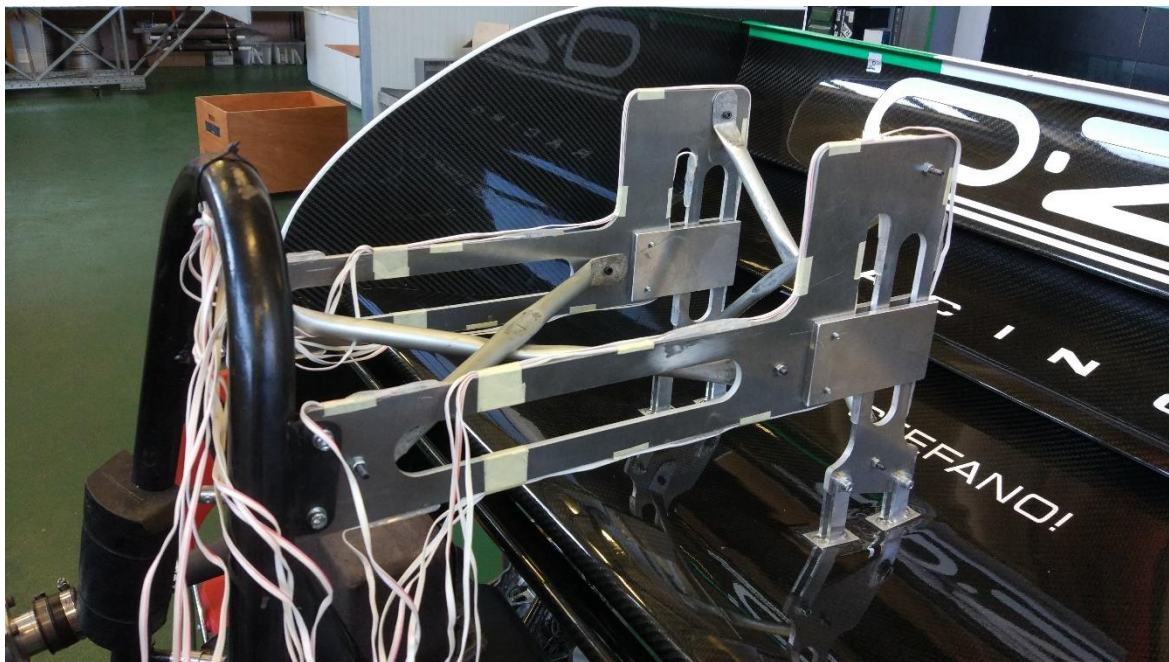
Figura 2.46: Struttura di supporto dell'ala posteriore con montati i tubicini a "X"
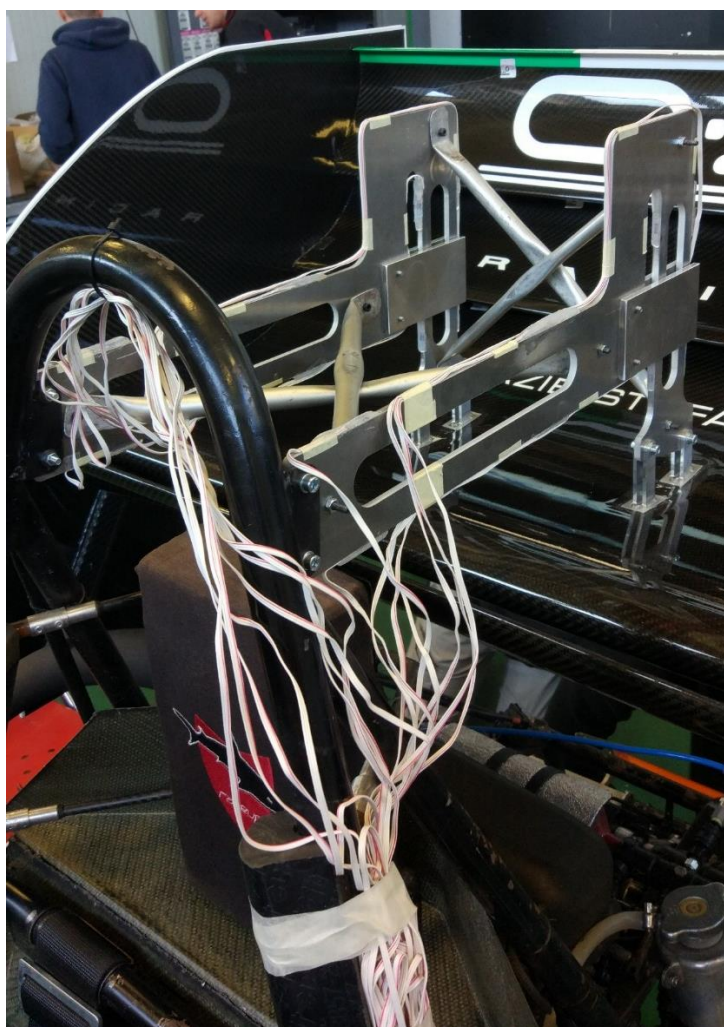
Figura 4.47: Struttura di supporto dell'ala posteriore montata

Come si nota dalle immagini precedenti, ci sono numerosi cavi che partono dagli estensimetri delle celle di carico e vanno in centralina attraverso gli spinotti. È quindi importante e necessario studiare accuratamente anche il percorso dei cavi al fine in primis di non danneggiarli e allo stesso tempo non recare disturbo alla guida del pilota o all'aerodinamica. A tal fine i cavi sono stati raggruppati e fatti correre lungo il telaio al quale sono stati fissati con fascette da elettricista. Si è cercato inoltre di allontanare il più possibile tutti i cavi dal motore e da altri punti dove si sarebbero potuti danneggiare.

Oltre ai cavi degli estensimetri, sono presenti anche altri cavi relativi ad altri segnali acquisiti (Si veda paragrafo 4.1) per i quali sono stati presi gli stessi provvedimenti descritti in precedenza.

I cavi sono stati fissati in più punti così da evitare che durante i test ci siano tratti in movimento, ciò potrebbe modificare l'aerodinamica ma ancora di più potrebbe essere di intralcio per il pilota.

Nelle seguenti figure è possibile osservare le scelte effettuate per quanto riguarda il percorso e il fissaggio dei cavi in abitacolo.

In particolare, in figura 4.48 e 4.49 si possono vedere i connettori attaccati alle centraline e i relativi cavi che sono stati fissati in modo da non interferire con i pedali e con i piedi del pilota.
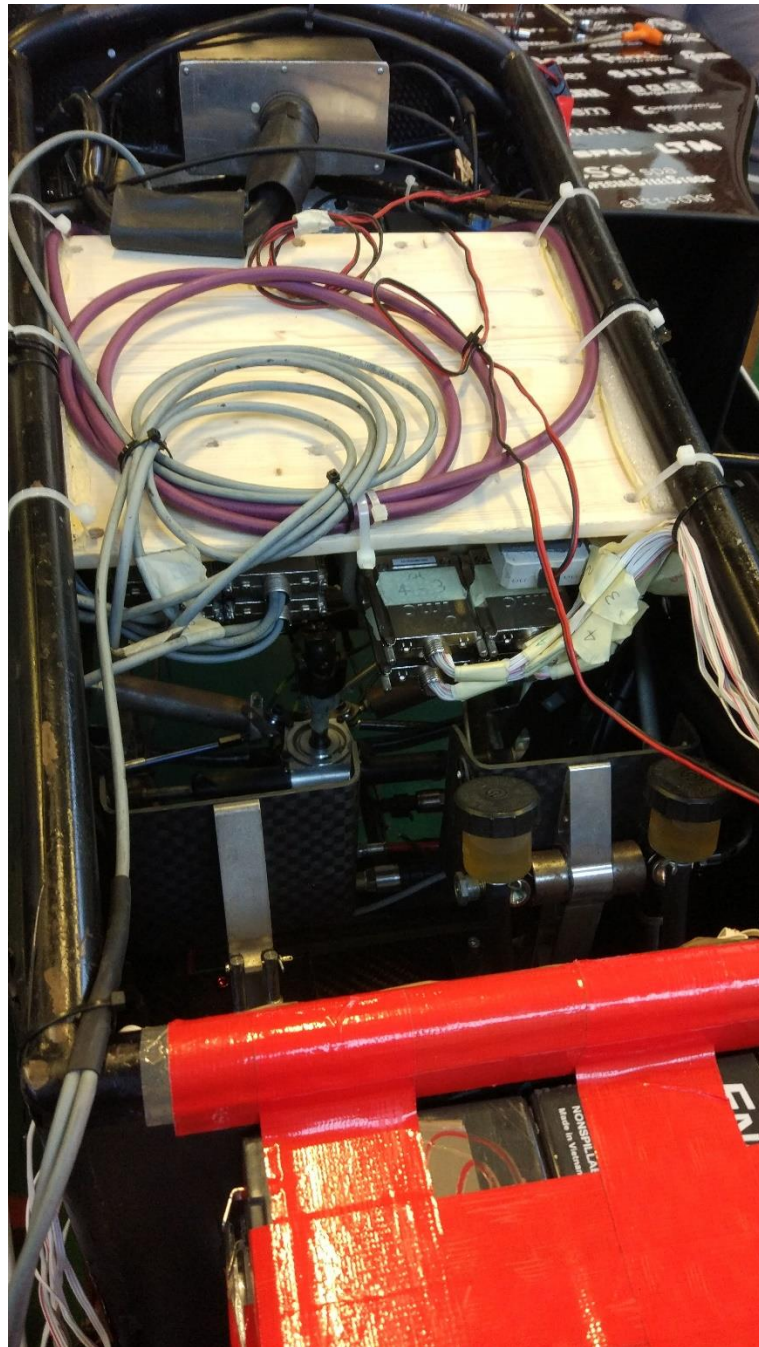
Figura 4.48: Connettori cablati collegati alle centraline e percorso dei relativi cavi
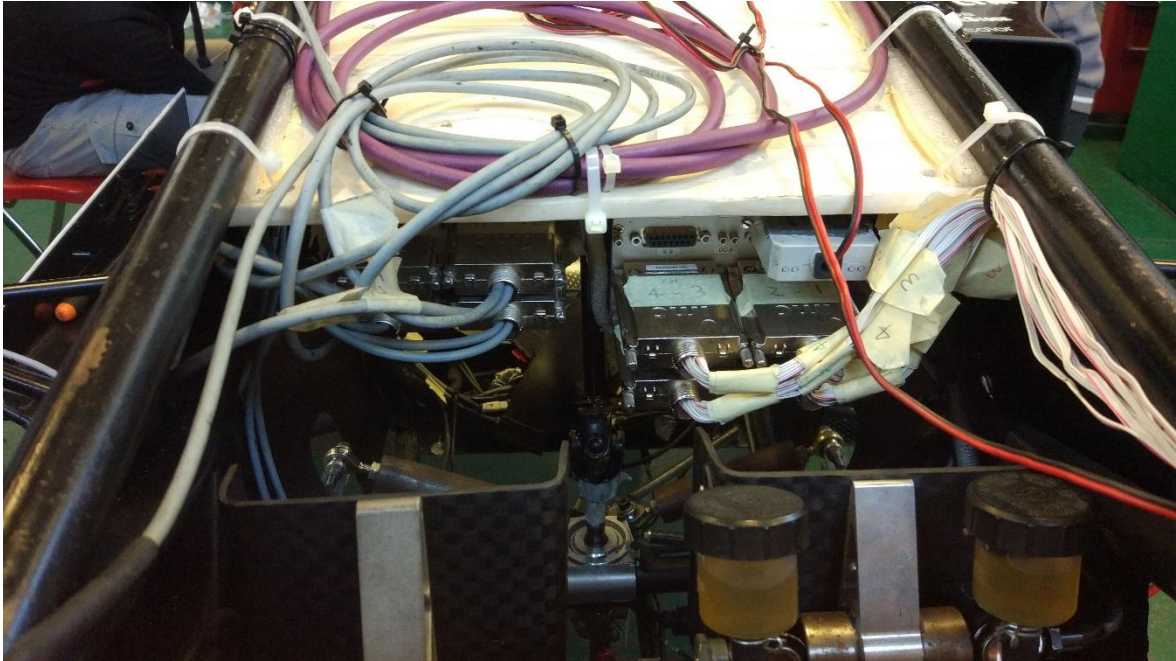
Figura 4.49: Connettori cablati collegati alle centraline

In figura 4.50 e 4.51 si mostra il percorso dei cavi delle celle di carico posteriori.

Figura 4.50: Percorso dei cavi provenienti dalle celle di carico posteriori
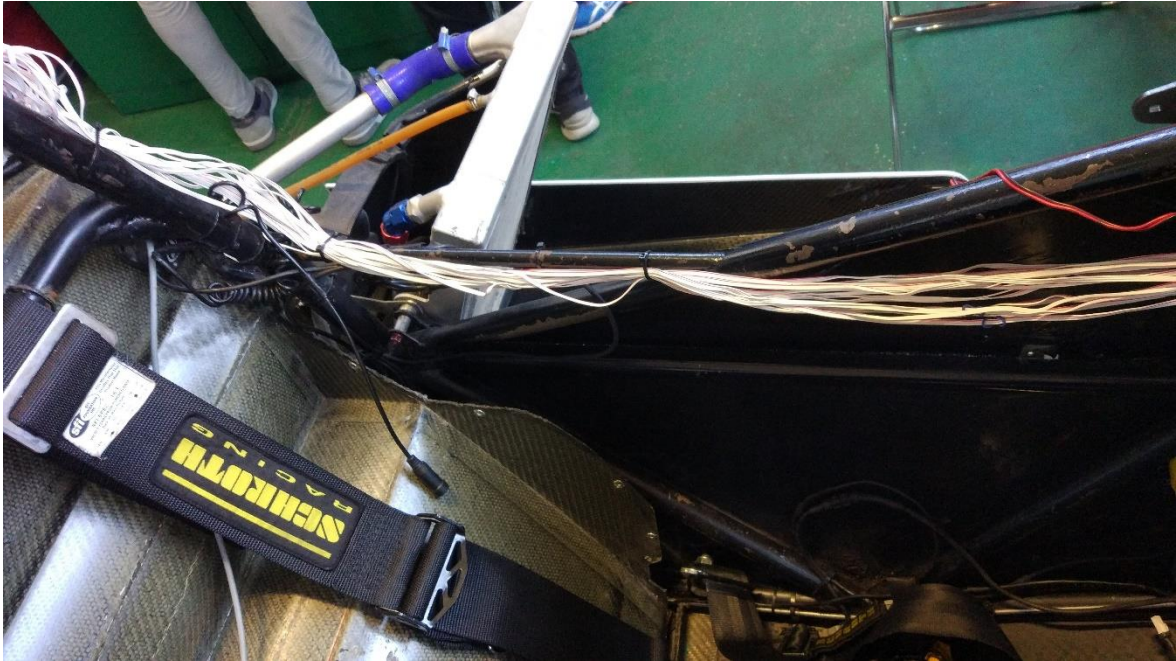
Figura 4.51: Percorso dei cavi provenienti dalle celle di carico posteriori lungo il telaio

Per quanto riguarda le celle di carico anteriori invece le soluzioni assunte per il percorso cavi sono mostrate in figura 4.52.

Figura 4.52: Percorso dei cavi provenienti dalle celle di carico anteriori

Il trigger, ossia il "grilletto" che permette al pilota di iniziare o stoppare un'acquisizione, è stato posizionato esternamente all'abitacolo, come mostrato in figura 4.53, in una posizione facilmente raggiungibile dal pilota con le mani. Esso è stato fissato con nastro adesivo.

Figura 4.53: Posizionamento del trigger in vettura

Infine, va montato il muso anteriore che va a coprire completamente le centraline, le batterie e tutto il cablaggio. Come si nota in figura 4.54, la geometria delle celle di carico anteriori obbliga a montare il muso circa 10 cm più in avanti rispetto alla sua posizione "normale". Questa scelta di compromessa si è resa necessaria in quanto tagliare opportunamente il muso avrebbe provocato modifiche aerodinamiche più pesanti, invece questa soluzione non comporta sostanziali modifiche all'aerodinamica della monoposto.

Figura 4.54: Muso della vettura montato sopra il sistema di misura

CAPITOLO 3: Calibrazione delle celle di carico

3.1 Allestimento banco per il fissaggio

Per eseguire la taratura statica delle celle di carico, ossia applicare una serie di pesi dalla massa crescente, è necessario innanzitutto vincolarle nella maniera più simile possibile alle reali condizioni di utilizzo. In vettura le interfacce anteriori e posteriori saranno collegate a telaio attraverso collegamenti bullonati, che nelle analisi F.E.M. sono stati simulati con incastri al centro dei due fori interessati.
Per riprodurre tale vincolo in fase di calibrazione si è utilizzato un blocco di alluminio opportunamente forato, fissato a una morsa, che a sua volta era vincolata a un banco (Figura 3.1 e 3.2).
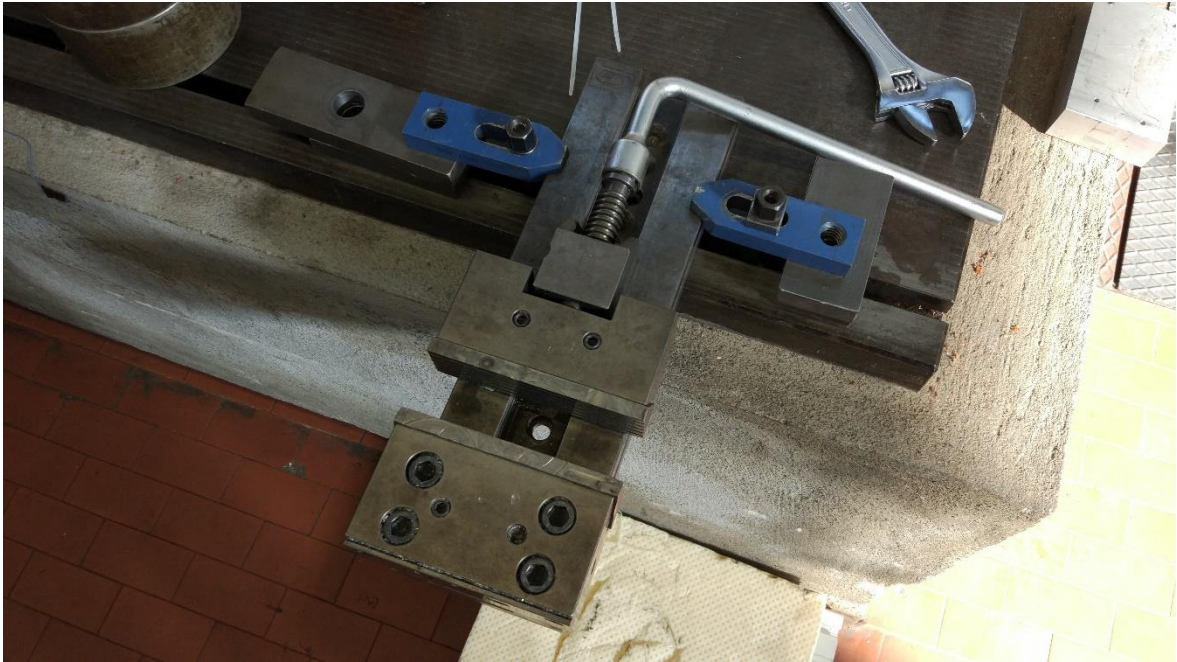
Figura 3.1: Morsa vincolata al banco

Figura 3.2: Blocco di alluminio fissato in morsa

Su tale supporto è possibile cambiare l'orientazione del pezzo semplicemente ruotando il blocco di alluminio, così da poter sollecitare a downforce (Figura 3.3) o a drag (Figura 3.4).

Figura 3.3: Componente sollecitato a downforce

Figura 3.4: Componente sollecitato a drag

3.2 Applicazione dei carichi

Il processo di taratura è necessario per correlare le grandezze in ingresso (forze agenti in N) con le grandezze in uscita dal sistema (deformazioni in microepsilon).

Durante la calibrazione è fondamentale ridurre al minimo le perturbazioni del sistema in modo da ottenere una relazione ingresso/uscita precisa e aderente alla realtà.

Il processo di taratura consiste nel sollecitare una cella di carico per volta, i pesi verranno applicati in maniera crescente fino al peso massimo e in seguito si effettuerà la fase di scarico. Quindi in uscita si avrà un segnale a rampa, prima crescente e poi decrescente. Per verificare la ripetibilità del processo di misura, ogni rampa è stata ripetuta due volte.

Iniziamo trattando la cella di carico anteriore destra (Anterior right A.R.) rispetto alla postazione di guida. Per quanto riguarda la calibrazione a downforce la cella è stata fissata come mostrato in figura 3.5 e sono stati applicati i pesi attraverso il bilanciere.

Figura 3.5: cella di carico A.R. sollecitata a downforce

Visto che da progetto il carico massimo di downforce dei supporti anteriori è di 220 N, si è deciso di applicare la seguente serie di pesi:
0,528 - 1,060 - 1,592 - 2,589 - 4,589 - 6,589 - 9,942 - 14,942 - 18,305 - 20,307 - 21,304 - 22,302 - 21,304 - 20,307 - 18,305 - 14,942 - 9,942 - 6,589 - 4,589 - 2,589 - 1,592 - 1,060 - 0,528 kg.

I segnali acquisiti durante l'applicazione di tali carichi sono riportati in figura 3.6, si nota come una pura sollecitazione a downforce comporti anche la presenza di un segnale di drag diverso da zero. Ciò è dovuto al fatto che i due canali non sono perfettamente disaccoppiati.
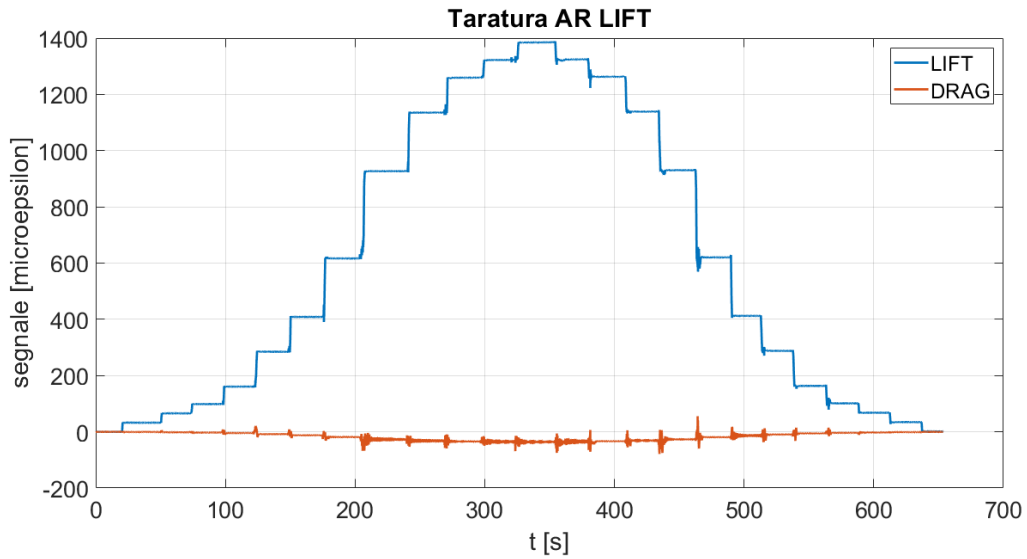
Figura 3.6: Rampa di taratura downforce (o lift) cella di carico A.R.

Per ogni "scalino" si è considerato un intervallo in cui il segnale era abbastanza costante (Figura 3.7) e si è calcolato il valor medio di downforce e di drag corrispondente a un certo carico applicato. Si è poi proceduto al calcolo della sensibilità come sarà spiegato nel prossimo paragrafo.
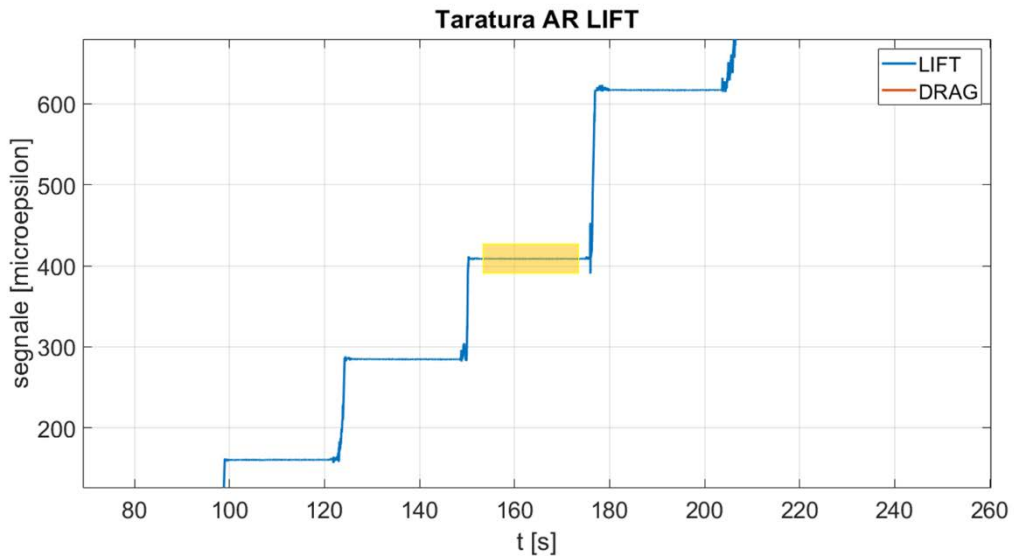
Figura 3.7: Esempio di intervallo considerato, il valore considerato è la media dei segnali misurati in quell'intervallo

Per quanto riguarda il drag, la cella è stata montata come mostrato in figura 3.8 e la serie di pesi applicata è la seguente, considerando che il carico massimo di progetto è di 40 N:
0,200 - 0,728 - 1,26 - 2,257 - 3,257 - 4,252 - 4,784 - 4,984 - 4,784 - 4,252 - 3,254 - 1,260 - 0,728 - 0,200 kg.

Figura 3.8: cella di carico A.R. sollecitata a drag

I segnali acquisiti sono mostrati nella seguente figura 3.9.
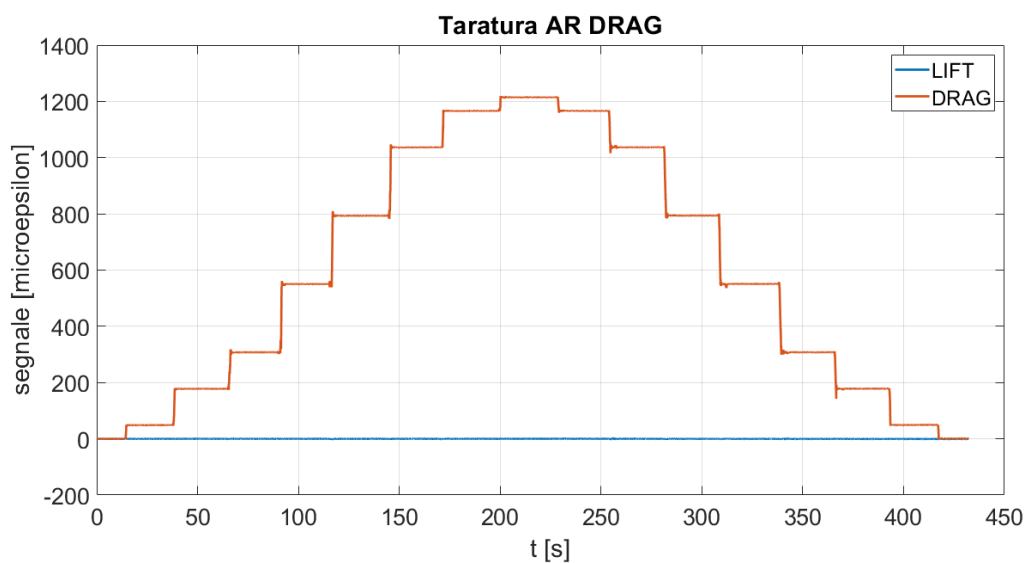
Figura 3.9: Rampa di taratura drag cella di carico A.R.

Per quanto riguarda il drag si nota che il segnale è quasi perfettamente disaccoppiato dal segnale di downforce, il quale rimane quasi identicamente nullo per tutta la prova.

La procedura di taratura della cella di carico anteriore sinistra (Anterior left A.L.) è del tutto analoga a quella effettuata per la cella A.R. Si riporta in seguito la rampa di taratura a downforce (Figura 3.10) e quella a drag (Figura 3.11).
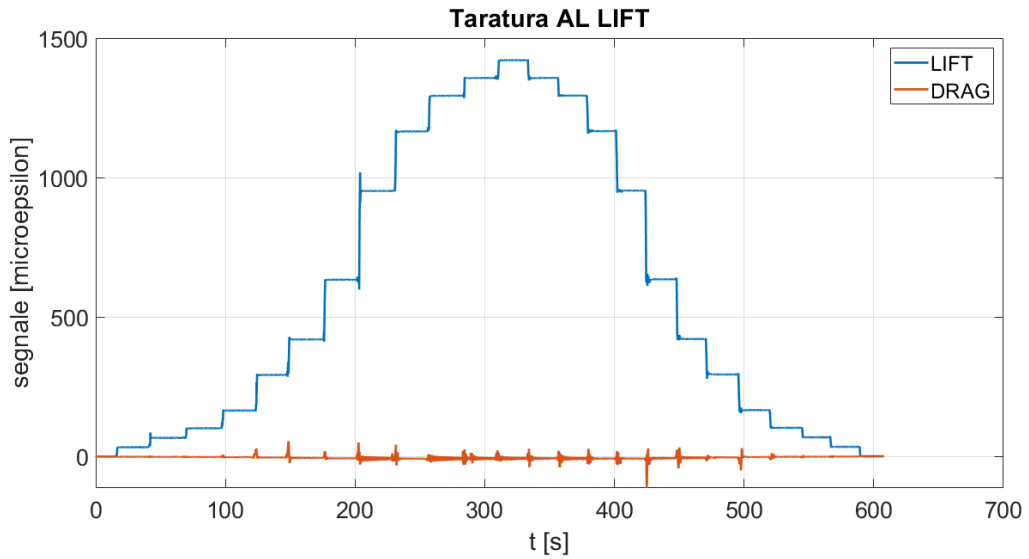
Figura 3.10: Rampa di taratura downforce (o lift) cella di carico A.L.
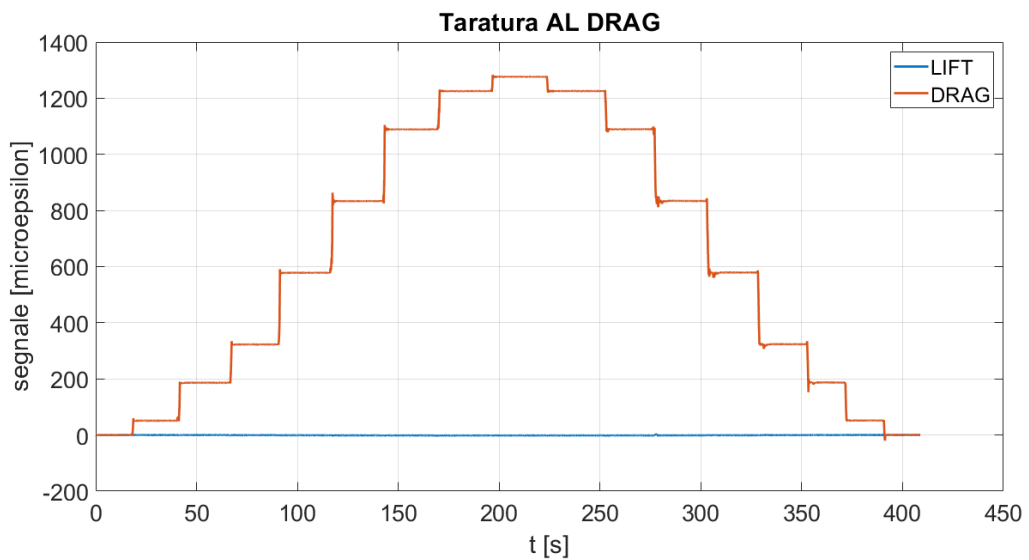
Figura 3.11: Rampa di taratura drag cella di carico A.L.

La cella di carico posteriore destra (Posterior right P.R., figura 3.12) invece presenta un carico massimo di progetto a downforce di 180 N per cui si è deciso di applicare questa serie di pesi:
0,997 - 2,997 - 4,997 - 8,350 - 13,350 - 16,713 - 18,713 - 19,710 - 18,713 - 16,713 - 13,350 - 8,350 - 4,997 - 2,997 - 0,997 kg.

Figura 3.12: cella di carico P.R. sollecitata a downforce

In figura 3.13 si riportano i segnali acquisiti durante la procedura di taratura a downforce.
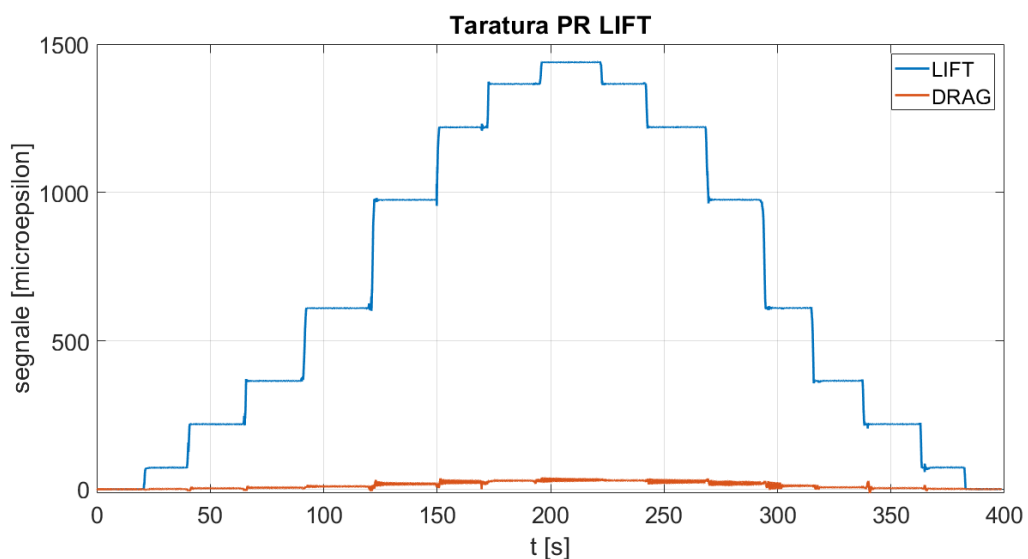
Figura 3.13: Rampa di taratura downforce (o lift) cella di carico P.R.

Infine, a drag i carichi massimi di progetto sono previsti in 90 N e si è deciso di applicare come serie di pesi: 0,528 - 1,525 - 2,522 - 4,522 - 6,522 - 8,524 - 9,522 - 10,054 - 9,522 - 8,524 - 6,522 - 4,522 - 2,522 - 1,525 - 0,528 kg.
In figura 3.14 è riportata la rampa di taratura eseguita a drag.
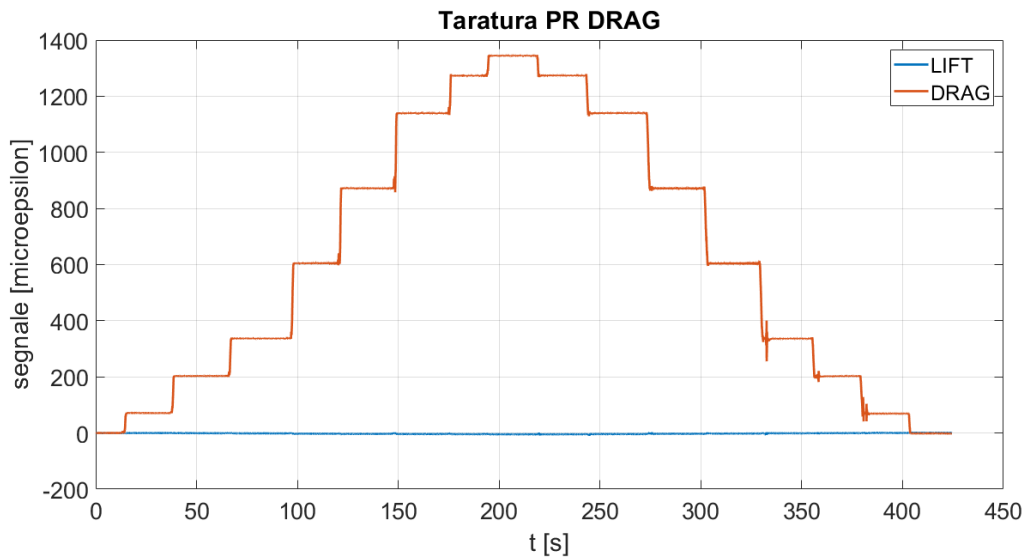
Figura 3.14: Rampa di taratura drag cella di carico P.R.

L'applicazione dei carichi della cella di carico posteriore sinistra (Posterior left P.L.) è identica a quella eseguita per la P.R. In figura 3.15 viene riportata la rampa di taratura a downforce e in figura 3.16 la rampa a drag.
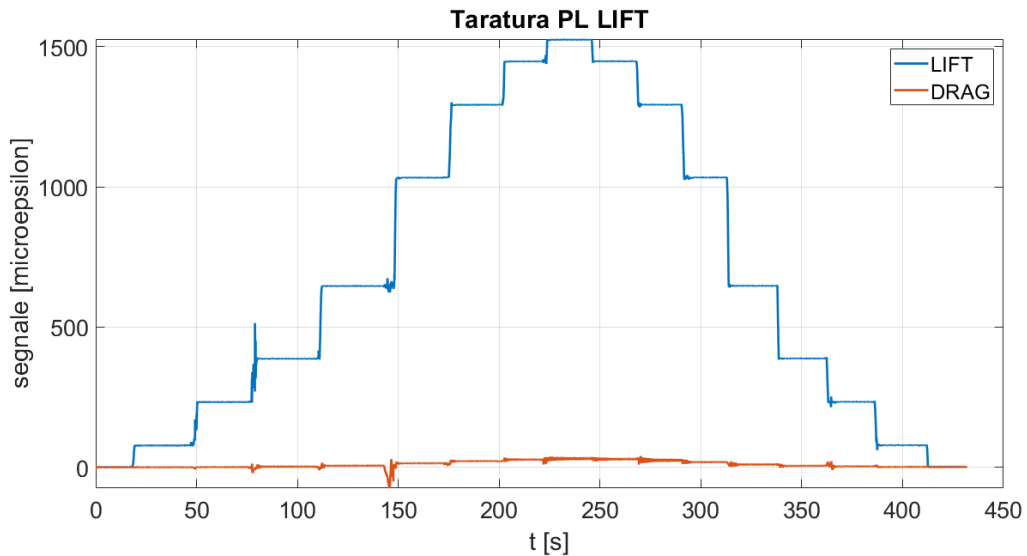
Figura 3.15: Rampa di taratura downforce (o lift) cella di carico P.L.

Figura 3.16: Rampa di taratura drag cella di carico P.L.

3.3 Matrici di taratura

Le celle di carico considerate si definiscono multicomponente in quanto un'unica struttura presenta due canali, uno studiato per misurare la downforce e uno per il drag. Ottenere segnali completamente disaccoppiati è impossibile e capita sempre che una pura sollecitazione a downforce comporti anche un segnale di drag e viceversa. È quindi necessario lavorare con matrici di sensibilità, che nel caso in esame saranno 2x2, definite nel seguente modo:

$$\begin{Bmatrix} segnale\_lift \\ segnale\_drag \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} L \\ D \end{Bmatrix} \tag{3.1}$$

Il vettore segnale, in µε, è uguale al vettore dei carichi esterni, in N, pre-moltiplicato per la matrice di sensibilità [S]. Questa matrice si trova elaborando i dati acquisiti effettuando le rampe viste in precedenza: consideriamo innanzitutto il lift, riportando in un piano cartesiano in ascissa il valore del carico applicato e in ordinata i corrispondenti segnali misurati (media del segnale nell'intervallo considerato) si ottiene il grafico di due rette, una relativa alla downforce e una al drag. Se i canali sono ben disaccoppiati, una delle due rette, quella della componente non sollecitata, avrà pendenza quasi nulla.
Interpolando i punti sperimentali con delle rette di intercetta nulla si trovano i valori dei coefficienti della matrice di sensibilità S_{11} e S_{21} leggendo l'inclinazione di tali rette.
Eseguendo lo stesso procedimento con le rampe relative al drag, si ottengono altre due rette i cui coefficienti angolari sono i coefficienti S_{12} e S_{22}.
Nella fase di test però non saranno noti i carichi applicati ma si misureranno solamente i segnali. Sarà quindi necessario utilizzare la matrice di calibrazione o taratura [C], cioè quella matrice che moltiplicata per il segnale ci dà i carichi esterni applicati:
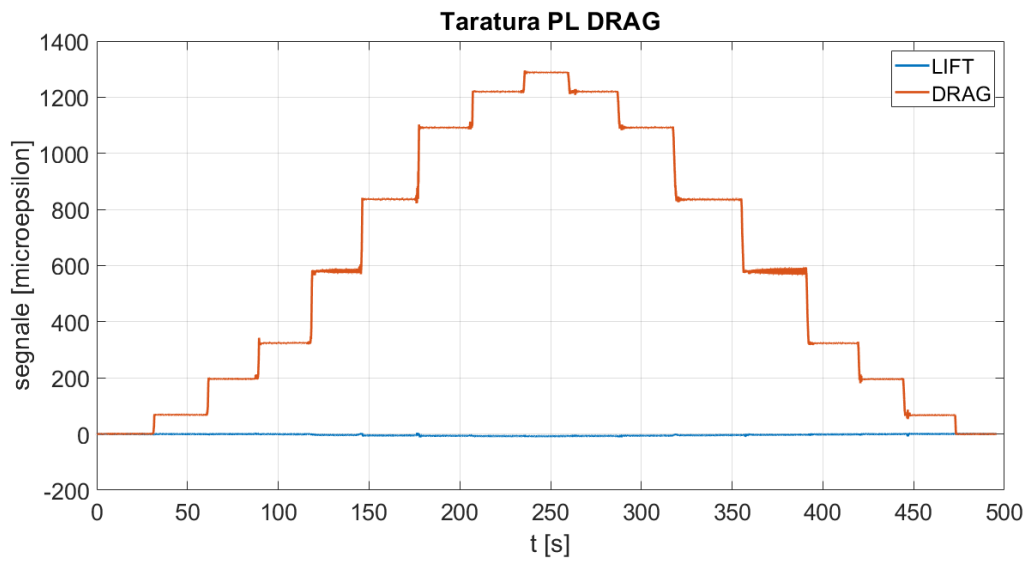
$$\begin{Bmatrix} L \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} segnale\_lift \\ segnale\_drag \end{Bmatrix} \tag{3.2}$$

Appare evidente come la matrice di calibrazione [C] non sia altro che l'inversa della matrice di sensibilità [S], quindi una volta calcolata [S] è immediato ricavare [C].
Per verificare l'accuratezza con cui si è realizzata la cella di carico è utile confrontare la matrice di sensibilità ottenuta sperimentalmente con quella teorica ottenuta mediante analisi F.E.M.
Applicando un carico unitario di downforce e misurando le deformazioni nei punti in cui sono applicati gli estensimetri, è possibile risalire ai valori teorici dei coefficienti S_{11} e S_{21}, che risultano numericamente uguali proprio alla deformazione totale essendo il carico applicato unitario. Allo stesso modo applicando un carico unitario di drag si può risalire ai valori teorici di S_{12} e S_{22}.
Per quanto riguarda le celle di carico anteriori, la matrice di sensibilità teorica e quella di taratura teorica risultano:

$$[S_{A.t}] = \begin{bmatrix} 6.309 & 0.001 \\ -0.020 & 23.280 \end{bmatrix}$$

$$[C_{A.t}] = \begin{bmatrix} 158.50 & 0.00681 \\ 0.136 & 42.96 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3}$$

Si vanno ora ad analizzare i dati sperimentali al fine di ottenere le reali matrici di calibrazione, partendo dalla cella di carico anteriore destra. In appendice B si trovano riportati in dettaglio i valori numerici ottenuti ed elaborati.

In figura 3.17 e 3.18 si riportano rispettivamente le rette di taratura ottenute sottoponendo la cella a carichi di downforce e di drag.

Figura 3.17: Rette di taratura della cella di carico A.R. sollecitata a downforce
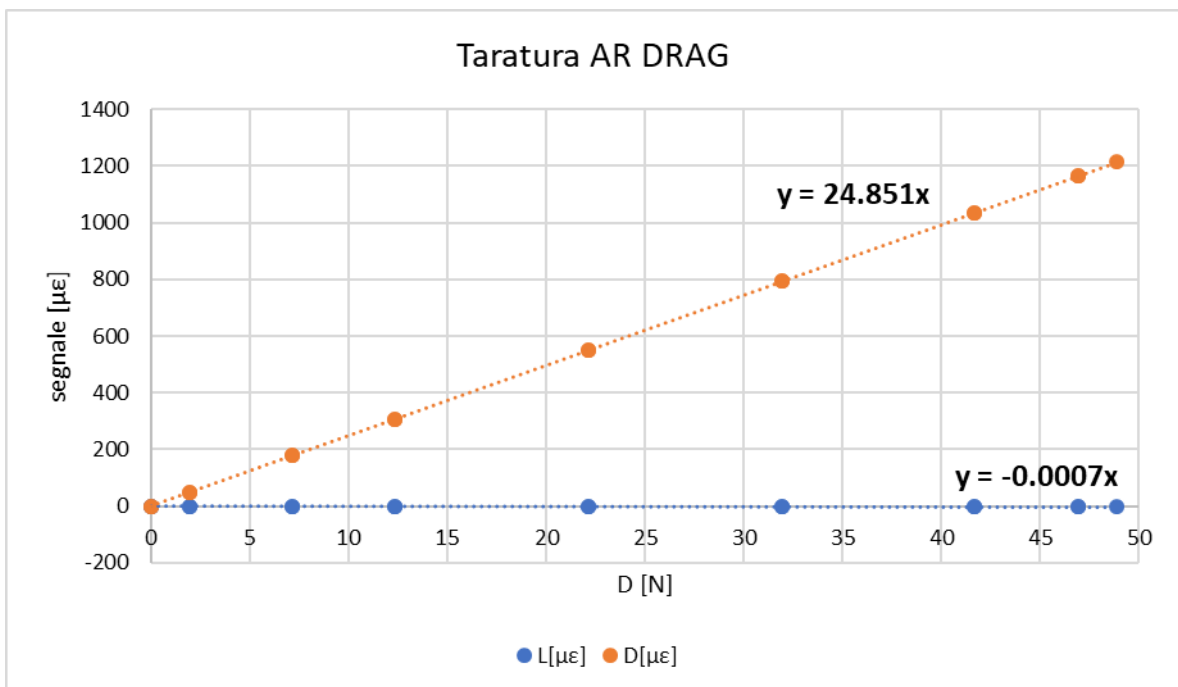
Figura 3.18: Rette di taratura della cella di carico A.R. sollecitata a drag

Si nota come non vi siano effetti di isteresi in quanto i punti sperimentali nella fase di scarico sono sovrapposti a quelli nella fase di carico.
Come visto in precedenza, dai coefficienti angolari è possibile ricavare la matrice di sensibilità e, invertendola, la matrice di taratura:

$$[S_{A.R.}] = \begin{bmatrix} 6.333 & -0.0007 \\ -0.1735 & 24.851 \end{bmatrix}$$

$$[C_{A.R.}] = \begin{bmatrix} 157.90 & 0.00445 \\ 1.102 & 40.24 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3}$$

Si analizza ora la cella di carico anteriore sinistra, in figura 3.19 vengono mostrate le rette di taratura ottenute sollecitando a downforce e in figura 3.20 sollecitando a drag, successivamente vengono riportate le matrici di calibrazione.
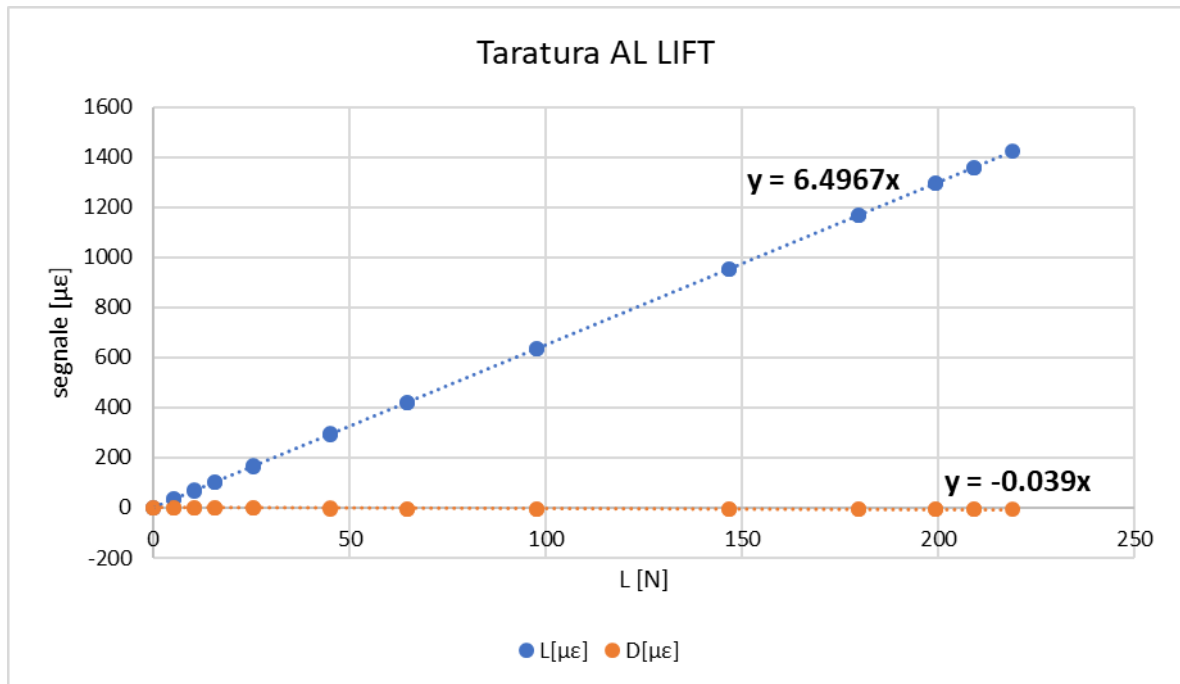
Figura 3.19: Rette di taratura della cella di carico A.L. sollecitata a downforce
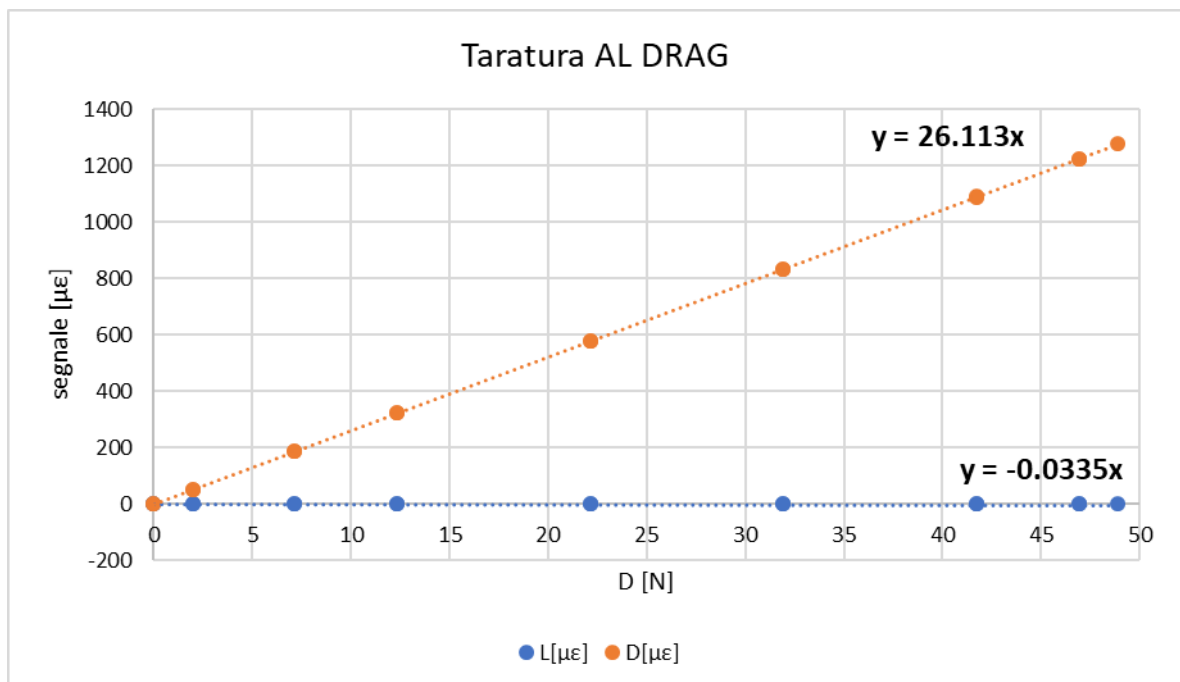
Figura 3.20: Rette di taratura della cella di carico A.L. sollecitata a drag

$$[S_{A.L.}] = \begin{bmatrix} 6.497 & -0.0335 \\ -0.039 & 26.113 \end{bmatrix}$$

$$[C_{A.L.}] = \begin{bmatrix} 153.92 & 0.197 \\ 0.230 & 38.30 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3}$$

Trattando le celle di carico posteriori, la matrice di sensibilità teorica e quella di taratura teorica risultano da analisi F.E.M.:

$$[S_{P.t}] = \begin{bmatrix} 7.739 & -0.001 \\ 0.010 & 12.240 \end{bmatrix}$$

$$[C_{P.t}] = \begin{bmatrix} 129.22 & 0.0105 \\ -0.106 & 81.70 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3}$$

La cella di carico posteriore destra presenta le seguenti rette di taratura (Figura 3.21 e 3.22) e matrici.
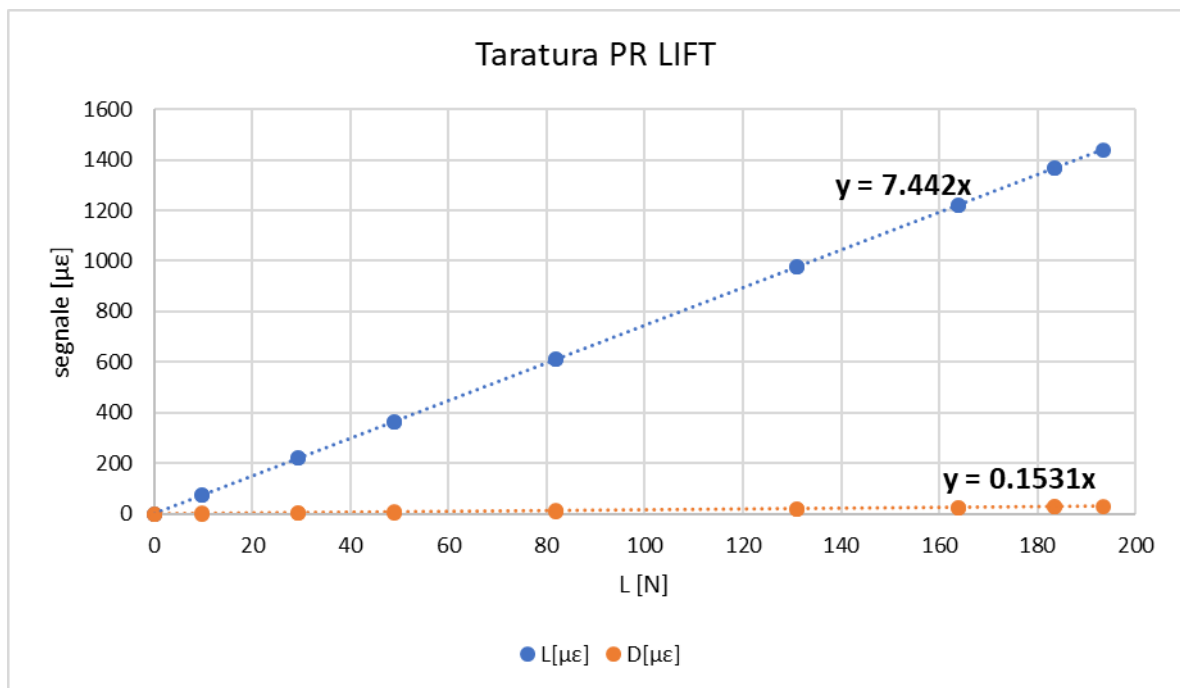
Figura 3.21: Rette di taratura della cella di carico P.R. sollecitata a downforce
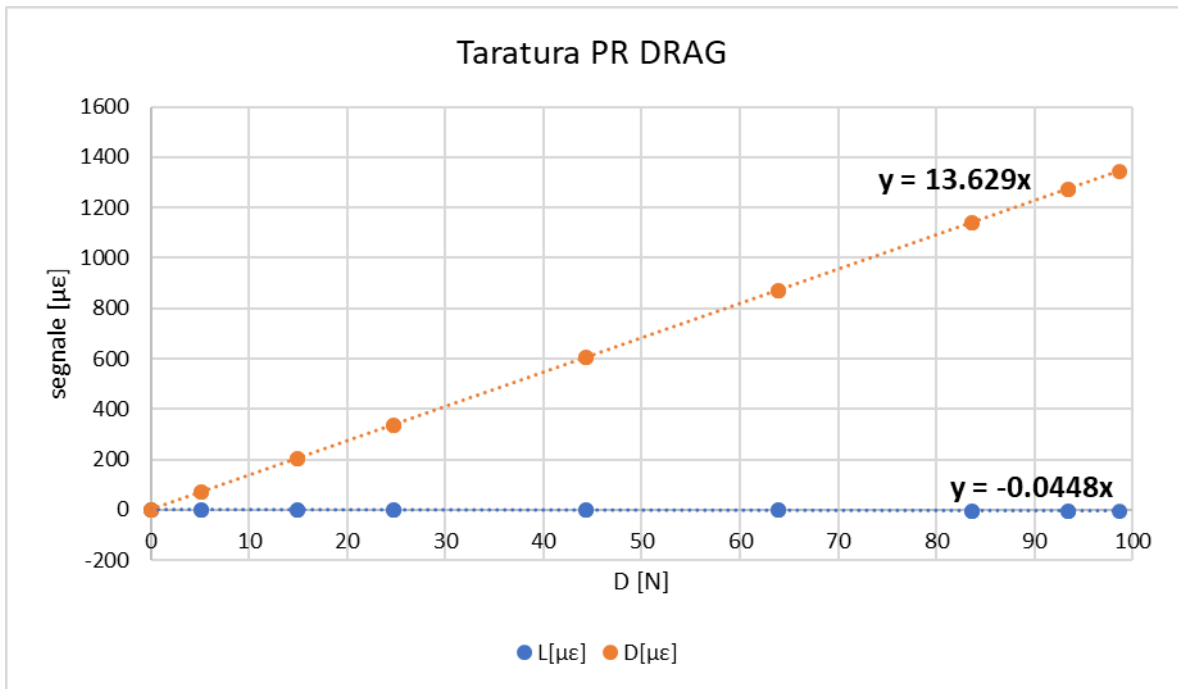
Figura 3.22: Rette di taratura della cella di carico P.R. sollecitata a drag

$$[S_{P.R.}] = \begin{bmatrix} 7.442 & -0.0448 \\ 0.1531 & 13.629 \end{bmatrix}$$

$$[C_{P.R.}] = \begin{bmatrix} 134.36 & 0.442 \\ -1.509 & 73.37 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3}$$

Infine, si analizza la cella di carico posteriore sinistra di cui vengono riportate di seguito le rette di taratura (Figura 3.23 e 3.24) e le matrici di calibrazione.
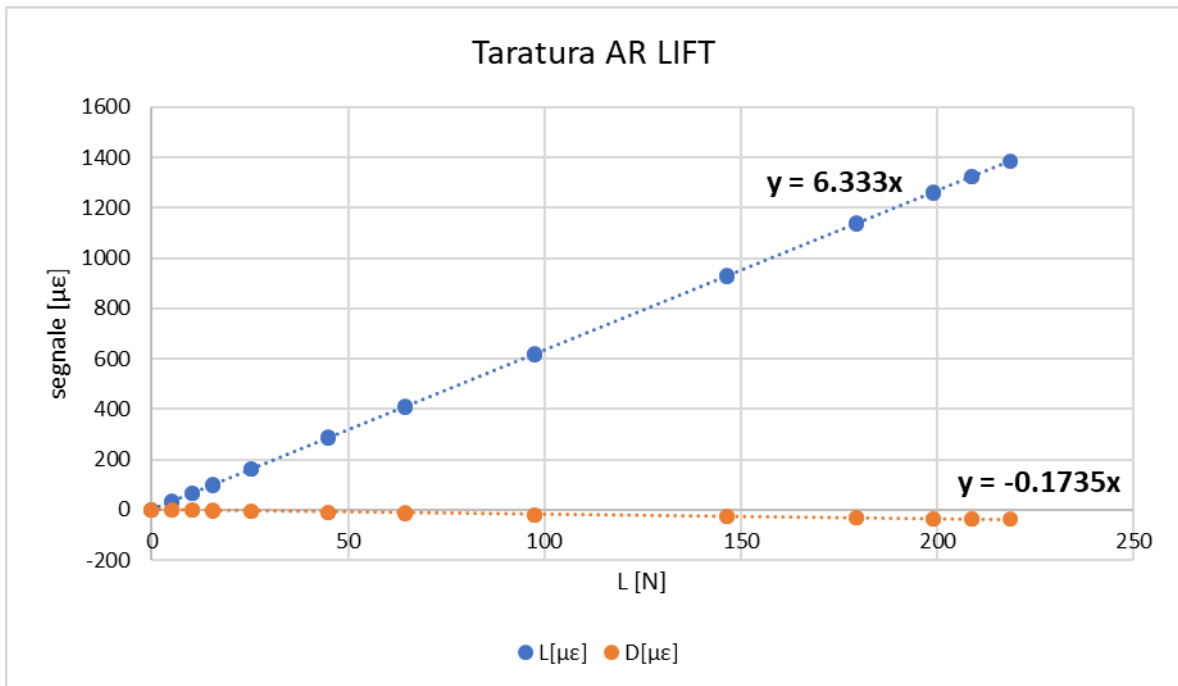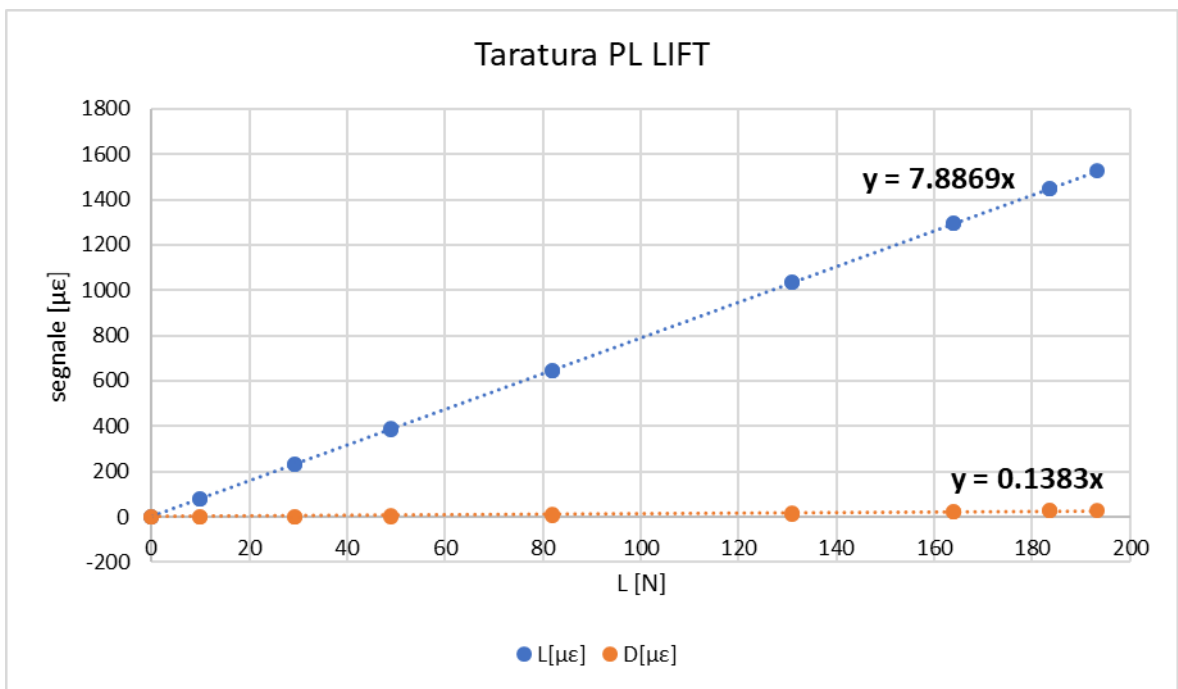

Figura 3.23: Rette di taratura della cella di carico P.L. sollecitata a downforce
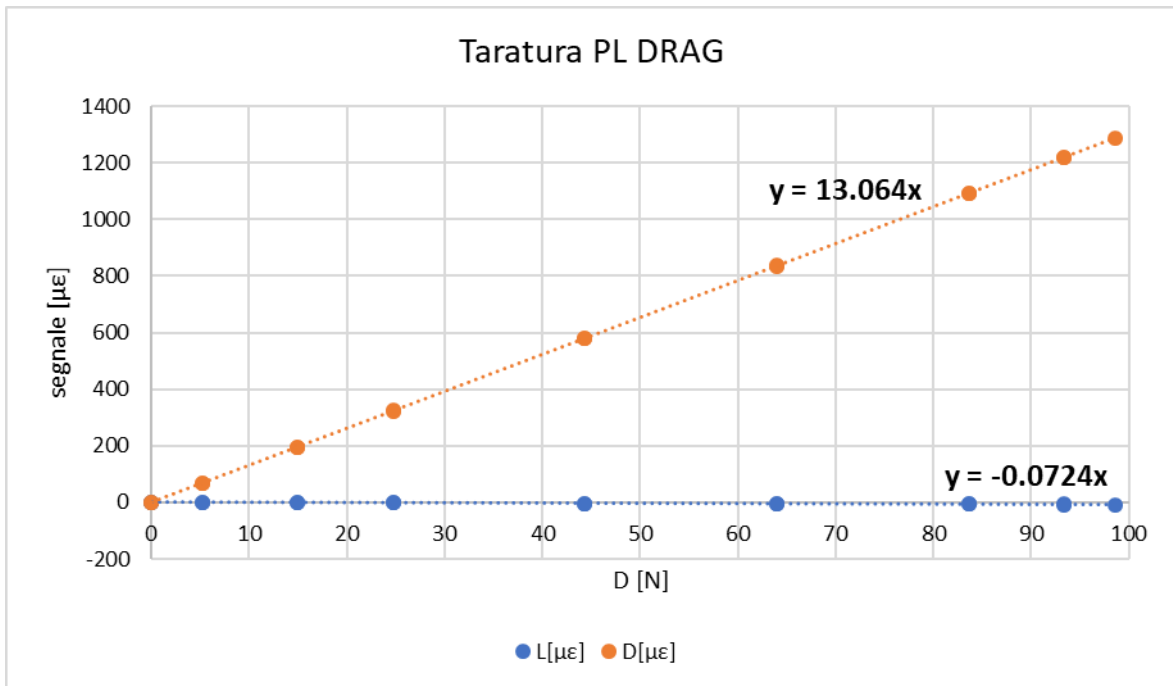
Figura 3.24: Rette di taratura della cella di carico P.L. sollecitata a drag

$$[S_{A.L.}] = \begin{bmatrix} 7.887 & -0.0724 \\ 0.1383 & 13.064 \end{bmatrix}$$

$$[C_{A.L.}] = \begin{bmatrix} 126.78 & 0.703 \\ -1.342 & 76.54 \end{bmatrix} \cdot 10^{-3}$$

Capitolo 4: Configurazione del sistema di misura

4.1 Strumentazione per l'acquisizione dei carichi aerodinamici

Si dispone di 4 celle di carico, cioè i due supporti dell'ala anteriore e i due supporti dell'ala posteriore. Ciascuna cella di carico è in grado di misurare la componente downforce e la componente drag ad essa applicata. Si ha quindi un totale di 8 canali acquisiti attraverso le celle di carico progettate. Questi 8 canali vengono acquisiti attraverso gli 8 ingressi disponibili nella centralina "IMC Cronos-PL2" (Figura 4.1, gli 8 ingressi utilizzati corrispondono ai 4 attacchi per gli spinotti più in basso nell'immagine).

Figura 4.1: Centralina IMC Cronos-PL2

In tabella 4.1 si riporta la numerazione scelta per indicare i vari canali acquisiti.

Centralina	Canale	Nome	Posizione	Sensore	Resistenza [Ω]
IMC Cronos-PL2	C001	PR_LIFT	Supporto destro ala posteriore	Kyowa KFGS-3-120-C1-11 L3M3R	119.6±0.4%
	C002	PR_DRAG	Supporto destro ala posteriore	Kyowa KFGS-3-120-C1-11 L3M3R	119.6±0.4%
	C003	PL_LIFT	Supporto sinistro ala posteriore	Kyowa KFGS-3-120-C1-11 L3M3R	119.6±0.4%
	C004	PL_DRAG	Supporto sinistro ala posteriore	Kyowa KFGS-3-120-C1-11 L3M3R	119.6±0.4%

	C005	AR_LIFT	Supporto destro ala anteriore	Kyowa KFGS-3-120-C1-11 L3M3R	119.6±0.4%
IMC Cronos-PL2	C006	AR_DRAG	Supporto destro ala anteriore	Kyowa KFGS-3-120-C1-11 L3M3R	119.6±0.4%
	C007	AL_LIFT	Supporto sinistro ala anteriore	Kyowa KFGS-3-120-C1-11 L3M3R	119.6±0.4%
	C008	AL_DRAG	Supporto sinistro ala anteriore	Kyowa KFGS-3-120-C1-11 L3M3R	119.6±0.4%

Tabella 4.1: Scelta dei canali nella centralina IMC

4.2 Strumentazione per l'acquisizione di segnali aggiuntivi

Oltre agli 8 segnali derivanti dai carichi aerodinamici, si è deciso di acquisire altri 8 segnali significativi al fine di correlare le variazioni di carico aerodinamico con i trasferimenti di carico in vettura.
Si è scelto di acquisire i segnali dei pull dei 4 gruppi sospensione della vettura (Figura 4.2 e 4.3). Tali pull estensimetrati (Figura 4.4) sono stati ereditati dal lavoro di tesi di Riccardo Chiarin e si rimanda al suo lavoro per ulteriori dettagli [7].
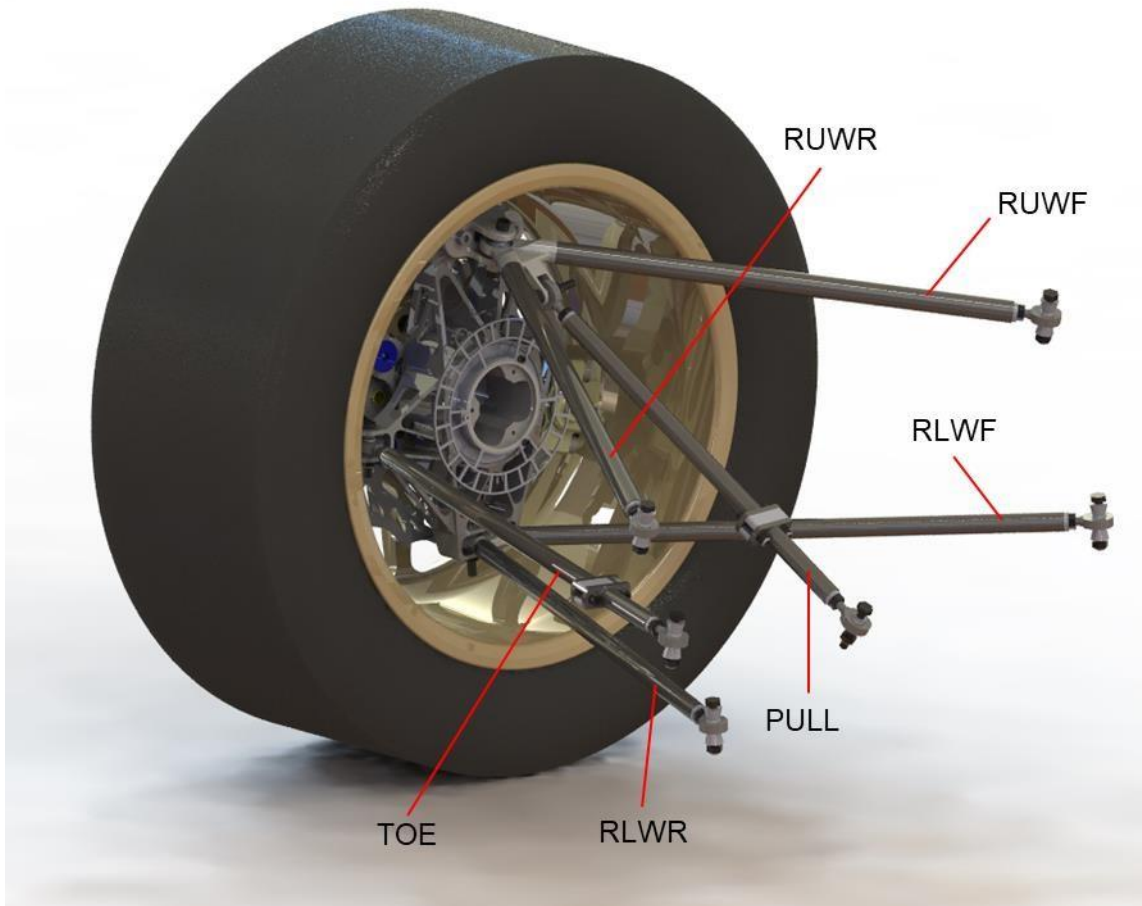
Figura 4.2: Rendering del gruppo sospensione della ruota posteriore sinistra della vettura MG 13.18
(Le sigle indicate significano: R.U.W.F. Rear Up Wishbone Front, ovvero il tubo frontale del triangolo
posteriore alto, R.U.W.R. Rear Up Wishbone Rear, R.L.W.F. Rear Low Wishbone Front e R.L.W.R. Rear
Low Wishbone Rear) [7]
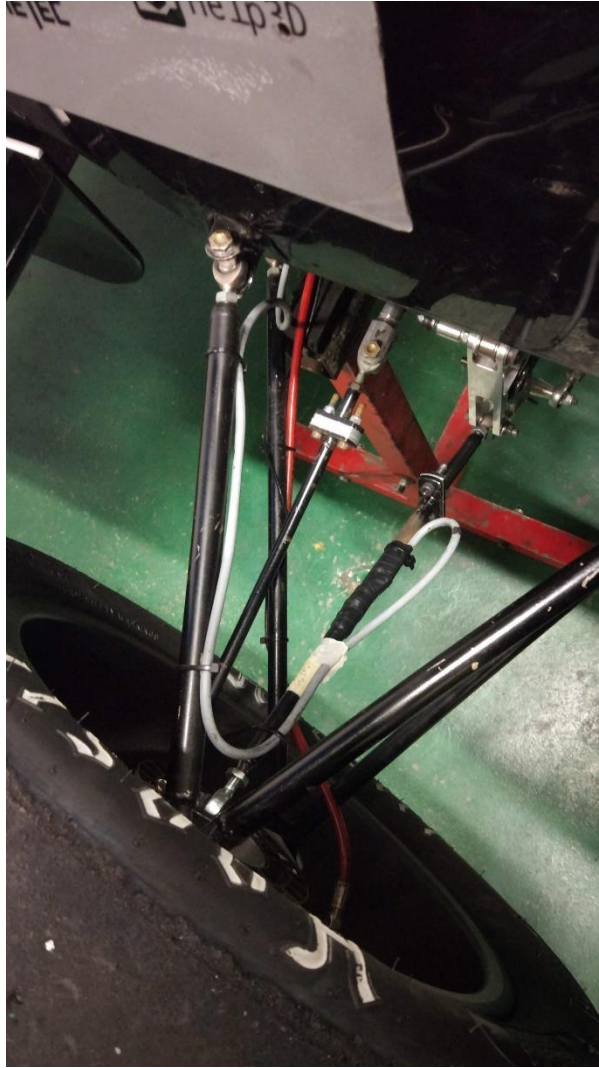
Figura 4.3: Gruppo sospensione anteriore sinistro con montato il pull estensimetrato

Figura 4.4: Pull estensimetrati e cablati

Gli altri 4 segnali che si è stabilito di misurare sono quelli derivanti dai 4 potenziometri lineari (Figura 4.5) che misurano le corse delle sospensioni. Questi potenziometri sono il modello "DIA9,5-75" dell'azienda AvioRace S.R.L. e hanno una corsa di 75 mm.

Il team utilizza tali potenziometri, per acquisire le corse delle sospensioni durante gli eventi e i test, collegati alla propria centralina della vettura. Per i test oggetto dello studio invece è stato eseguito un nuovo cablaggio dei potenziometri per collegarli alla centralina IMC (più precisamente alla sua espansione come si vedrà a breve) e avere così già tutti i dati sincronizzati.

In figura 4.6 si può osservare il potenziometro anteriore sinistro montato in parallelo con la relativa sospensione di cui misura la corsa.

Figura 4.5: Potenziometro lineare AvioRace
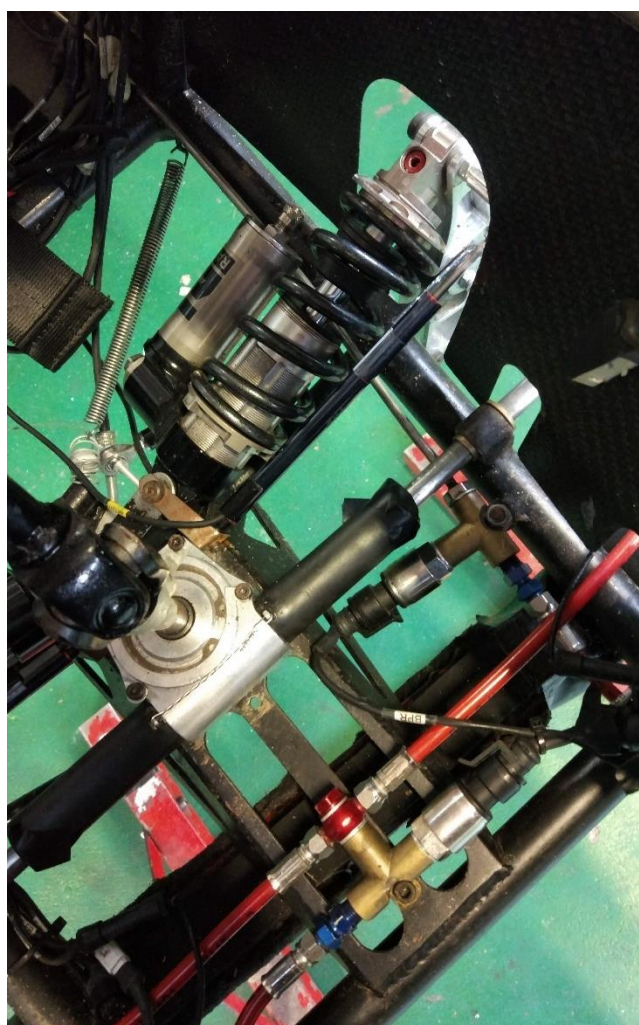
Figura 4.6: Potenziometro anteriore sinistro montato in vettura

Per acquisire questi aggiuntivi 8 canali è necessario utilizzare l'espansione "Cansas-L-UNI8" (Figura 4.7), un modulo di espansione della centralina IMC che consente di avere a disposizione altri 8 canali.
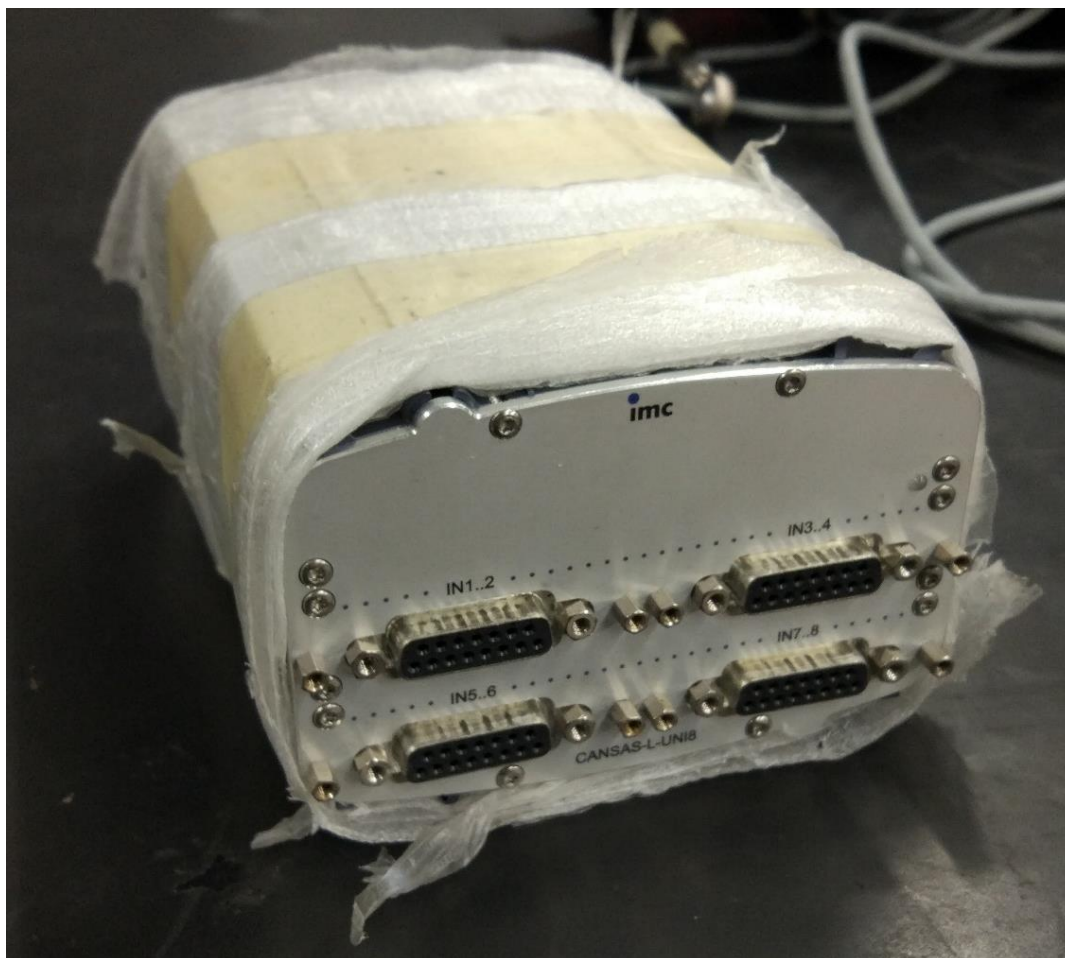
Figura 4.7: Espansione Cansas-L-UNI8

In tabella 4.2 si riporta la numerazione scelta per indicare i vari canali acquisiti.

Centralina	Canale	Nome	Posizione	Sensore
IMC Cansas L-UNI8	F001	PULL_PR	Sospensione posteriore destra	Estensimetri XY
	F002	PULL_PL	Sospensione posteriore sinistra	Estensimetri XY
	F003	PULL_AR	Sospensione anteriore destra	Estensimetri XY
	F004	PULL_AL	Sospensione anteriore sinistra	Estensimetri XY
IMC Cansas L-UNI8	F005	POT_PR	Sospensione posteriore destra	AvioRace pot. lineare DIA9,5-75
	F006	POT_PL	Sospensione posteriore sinistra	AvioRace pot. lineare DIA9,5-75
	F007	POT_AR	Sospensione anteriore destra	AvioRace pot. lineare DIA9,5-75
	F008	POT_AL	Sospensione anteriore sinistra	AvioRace pot. lineare DIA9,5-75

Tabella 4.2: Scelta dei canali nell'espansione Cansas

4.3 Configurazione software del sistema di misura

Per sapere come realizzare il collegamento hardware delle centraline e come eseguire la loro configurazione si rimanda ai manuali di utilizzo [8] e [9]. Di seguito si riportano le scelte effettuate.

La configurazione dei canali va svolta una tantum, prima dei test. Al momento dei test, o della taratura o della verifica dei segnali, basterà aprire la directory creata precedentemente che contiene già salvati tutti i settaggi decisi. I dati verranno memorizzati nella memoria interna della centralina, si consigliano almeno 400 MB di memoria libera.

Per configurare gli 8 canali della centralina Cronos si utilizza il software "imc Devices V2.6". Andando nella schermata di configurazione si può associare ad ogni ingresso un canale estensimetrico, secondo lo schema già mostrato in precedenza. Si ricorda che in ogni spinotto sono presenti due collegamenti dei canali, rispettivamente uno in posizione 1 e un in posizione 2. Poi per ogni canale si va ad impostare la durata massima dell'acquisizione (undefined, perché stopperemo manualmente di volta in volta l'acquisizione con il trigger), l'intervallo di campionamento (2 ms, ovvero una frequenza di campionamento di 500 Hz). È inoltre possibile impostare un fattore Y che converte direttamente i segnali misurati in microepsilon per esempio in forze in N, però non era utilizzabile nel nostro caso in quanto si aveva a che fare con celle di carico multicomponente che richiedevano matrici di conversione. Nella sezione "Amplifier" si può selezionare il tipo di ponte configurato, che nel caso delle celle di carico dell'aerodinamica è "General strain gauge – full bridge" (Figura 4.8), la resistenza nominale degli estensimetri utilizzati (120 Ohm), il gauge factor (2.08); si può inoltre impostare l'input range (2000 microepsilon), si consiglia di scegliere come input range il valore disponibile immediatamente superiore alle deformazioni massime che si ipotizza di avere, così da avere una risoluzione ottimale. Si è infine scelto di usare un filtro passa basso di tipo Butterworth con frequenza di taglio a 50 Hz per attenuare i disturbi derivanti dalle vibrazioni causate dal motore e da altri fattori esterni (Figura 4.9).
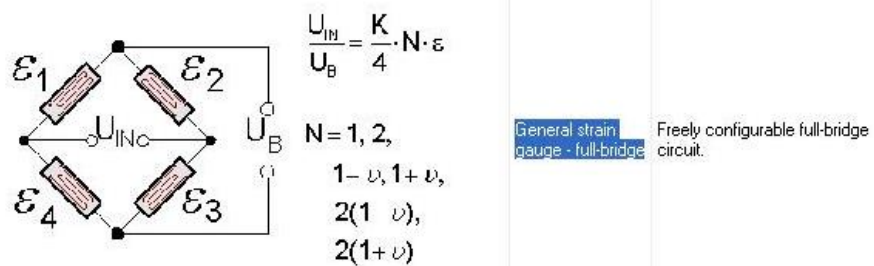
Figura 4.8: Configurazione del ponte di Wheatstone scelta per le celle di carico dell'aerodinamica nel software "imc Devices V2.6"
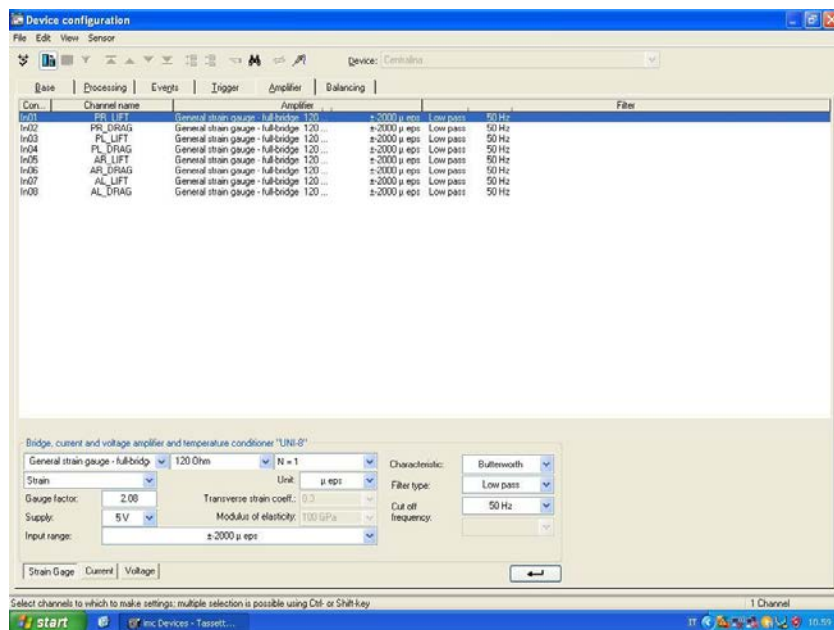
Figura 4.9: Schermata della scheda "Amplifier" delle celle di carico nel software "imc Devices V2.6"

65

La configurazione dei canali collegati all'espansione Cansas va eseguita con il software "imc CANSAS".
Per quanto riguarda i pull si sono riprodotte le impostazioni utilizzate da Chiarin nella sua tesi: input range 1538.46 microepsilon (Figura 4.10), "Full bridge, Poisson gages in adjacent arms" (Figura 4.11), Gauge factor 2 (Figura 4.12).
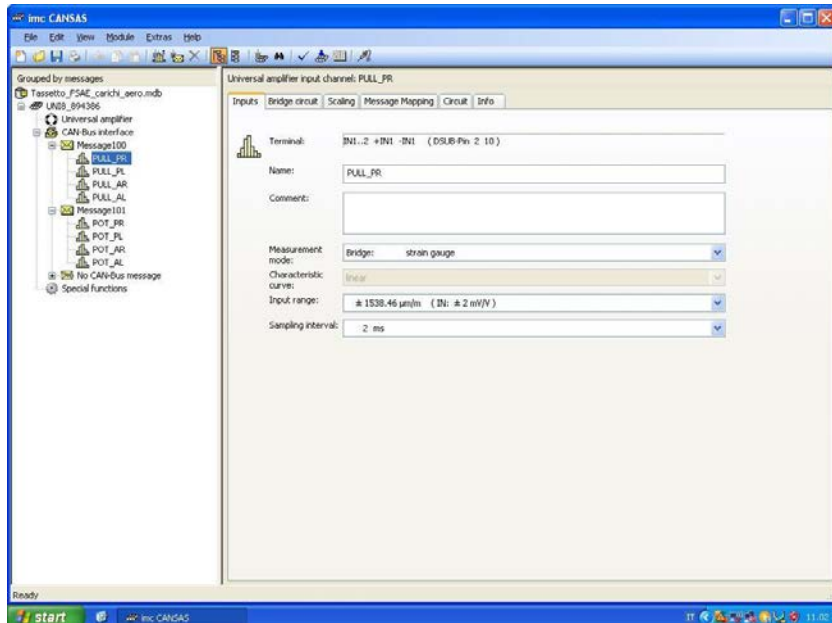
Figura 4.10: Schermata della scheda "Inputs" dei pull nel software "imc CANSAS"
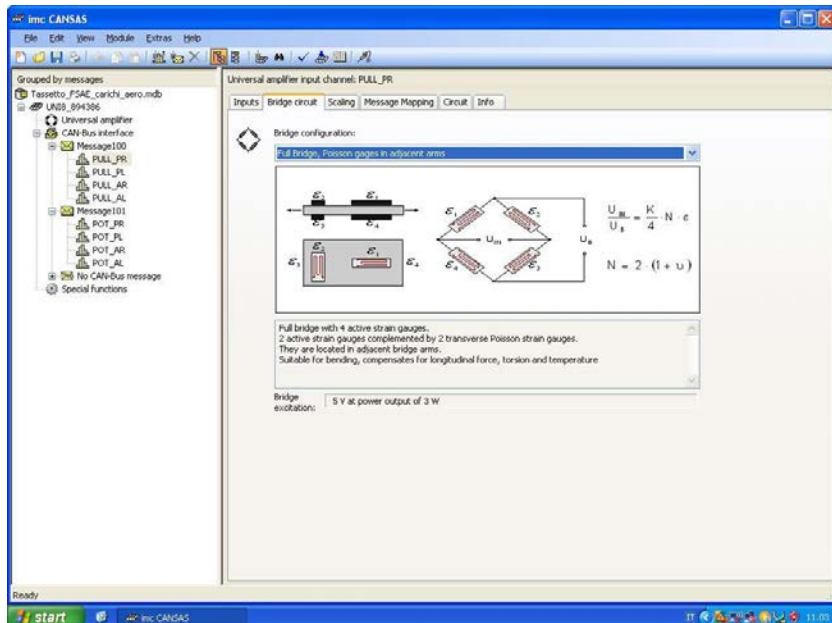
Figura 4.11: Schermata della scheda "Bridge circuit" dei pull nel software "imc CANSAS"
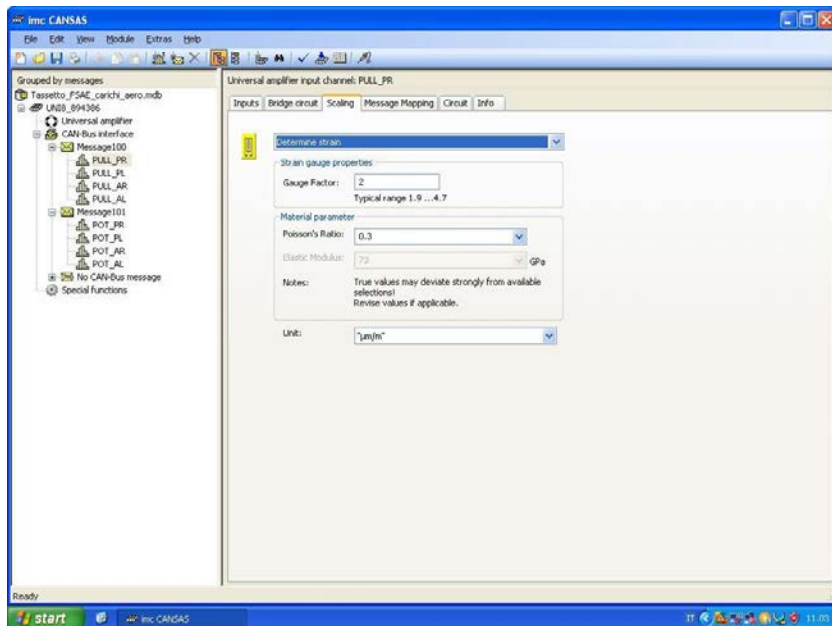
Figura 4.12: Schermata della scheda "Scaling" dei pull nel software "imc CANSAS"

Per i segnali derivanti dai potenziometri invece si sono configurati gli ultimi 4 canali restanti disponibili nell'espansione. Per essi è sufficiente impostare il voltaggio di alimentazione (5 V) (Figura 4.13), inoltre è possibile inserire direttamente una retta di taratura (Figura 4.14) così da avere immediatamente il segnale in mm (tale taratura è stata poi verificata applicando corse note ai potenziometri e rilevando i segnali misurati).
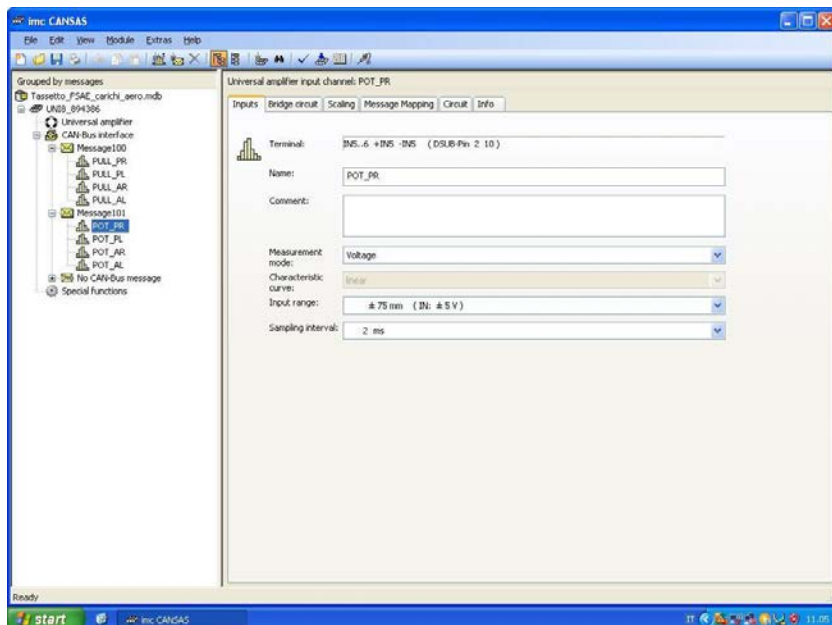
Figura 4.13: Schermata della scheda "Inputs" dei potenziometri nel software "imc CANSAS"
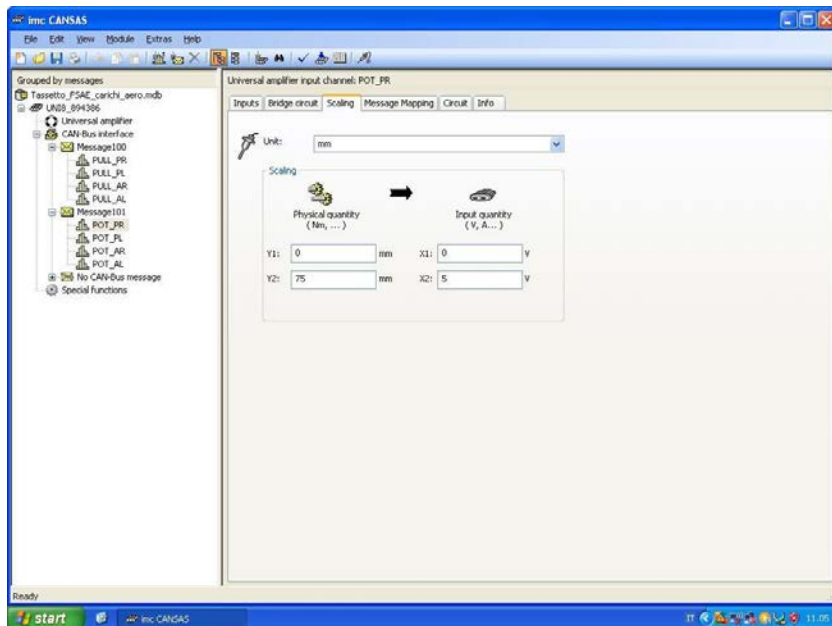
Figura 4.14: Schermata della scheda "Scaling" dei potenziometri nel software "imc CANSAS"

Come intervallo di campionamento anche per i segnali acquisiti con l'espansione Cansas si è impostato 2 ms. Una volta configurati anche i canali dell'espansione, le impostazioni vanno importate nel software "imc Devices" come spiegato nei manuali già citati. Ciò va fatto una sola volta, nei successivi utilizzi basterà aprire la directory e si troveranno già le configurazioni impostate anche dei canali della Cansas (Figura 4.15).
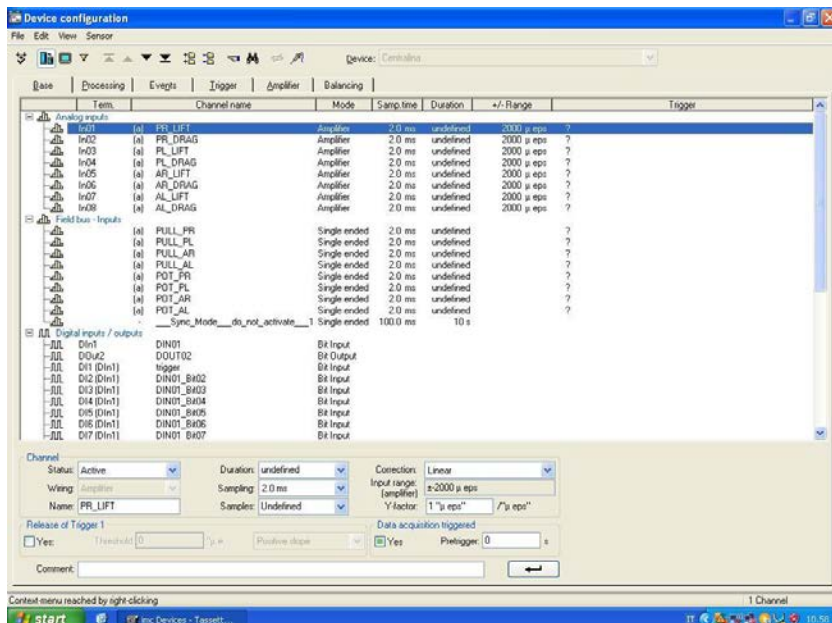
Figura 4.15: Schermata della scheda "Base" nel software "imc Devices V2.6"

L'ultima cosa da configurare è il trigger (Figura 4.16), infatti nei test si utilizzerà un trigger manuale attivato direttamente dal pilota che consentirà di acquisire solo i run interessanti ai fini delle analisi, semplificando così il post-processing.
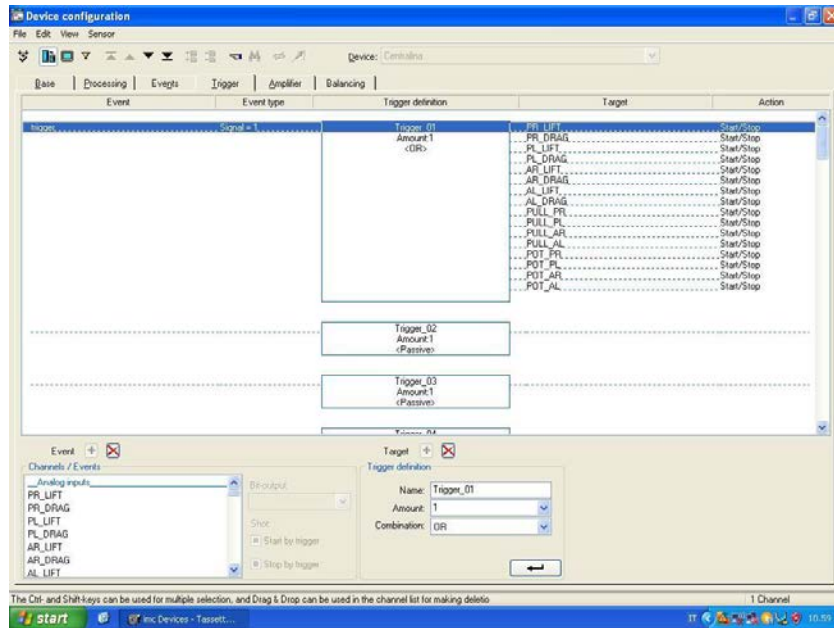
Figura 4.16: Schermata della scheda "Trigger" nel software "imc Devices V2.6"

Una volta terminata la configurazione dei canali e impostato il trigger, la schermata principale del software imc si presenta come in figura 4.17, tutto è pronto per l'azzeramento dei canali e l'inizio delle acquisizioni.
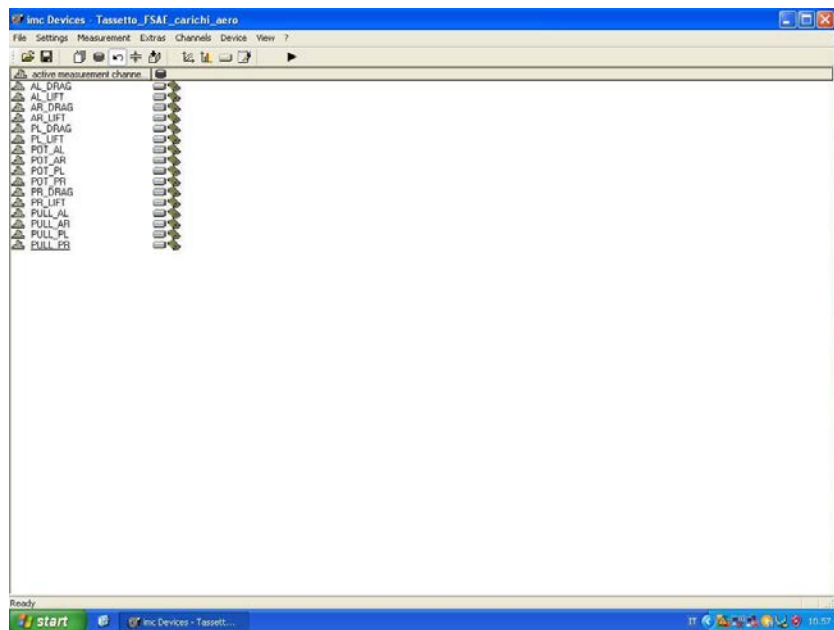
Figura 4.17: Schermata principale a configurazione terminata nel software "imc Devices V2.6"

Tutti i settaggi impostati sono stati salvati nella directory di lavoro "Tassetto_FSAE_carichi_aero".

4.4 Verifica dei segnali di acquisizione

Una volta installate in vettura le celle di carico e l'intero sistema di misura, si è verificato a motore spento il corretto funzionamento del sistema di acquisizione dei segnali. Sono stati applicati dei carichi a mano prima all'ala anteriore e poi all'ala posteriore, in figura 4.18 si possono osservare i segnali acquisiti.
L'elaborazione e l'analisi dei segnali è stata eseguita con il software "imc FAMOS Enterprise 7.3" come sarà spiegato nel capitolo 6.
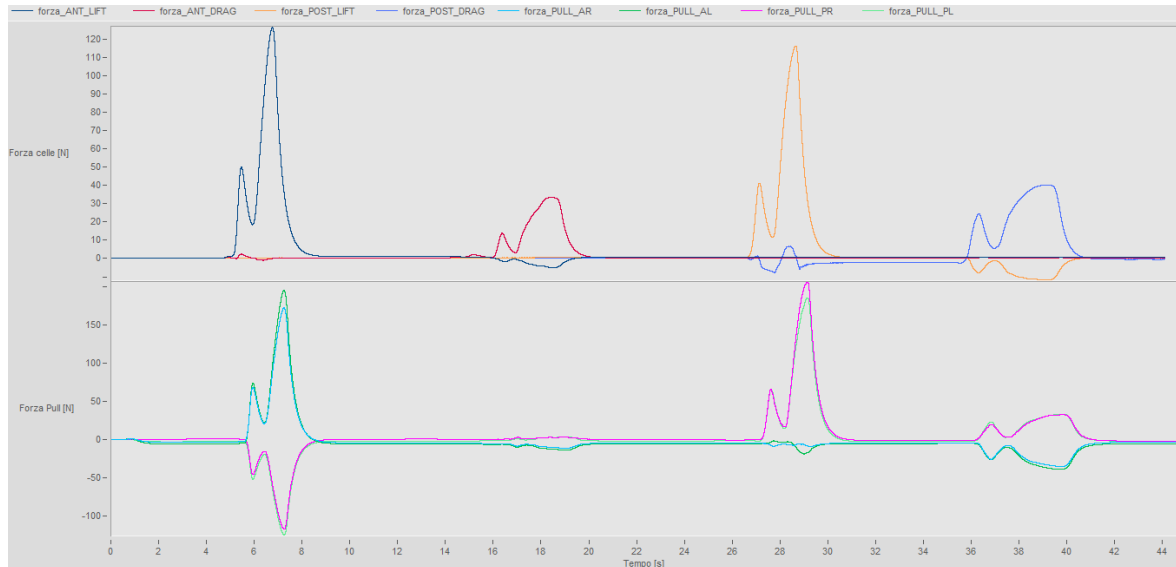
Figura 4.18: Verifica dei segnali di acquisizione

Per verificare la compatibilità dei segnali con le sollecitazioni applicate si controlla il segno degli outputs e l'ordine di grandezza. Si nota come un carico di lift all'anteriore comporti un trasferimento di carico all'anteriore con i pull anteriori che si caricano e quelli posteriori che si scaricano. Si osserva invece come il carico di lift al posteriore abbia comportato solo un aumento di carico dei pull posteriori, sinonimo di un carico quasi verticale ai i pull considerati. I carichi di drag invece non comportano significativi trasferimenti di carico alle sospensioni.
La presenza di drag all'applicazione di carichi di downforce e viceversa va spiegato con il fatto che caricando a mano è impossibile applicare carichi puramente di lift o di drag.
Va sottolineato come le osservazioni sopra riportate non vogliono avere carattere generale ma semplicemente servire da spiegazione alla correttezza dei segnali di prova acquisiti.
Non vengono riportati i segnali dei potenziometri in quanto la bassa entità dei carichi applicati comporta quasi nulle compressioni delle sospensioni.

Capitolo 5: Test in pista

5.1 Sito dei test

Il sito dove eseguire i test doveva garantire un asfalto con un grip sufficientemente elevato e l'assenza di particolari buche o avvallamenti. Inoltre, era importante avere sufficiente spazio libero per poter eseguire run a velocità costante e mantenere la velocità target almeno per 3 secondi.
Per queste ragioni il test è stato eseguito nel piazzale della Baita al Lago a Cittadella (PD) (Figura 5.1).
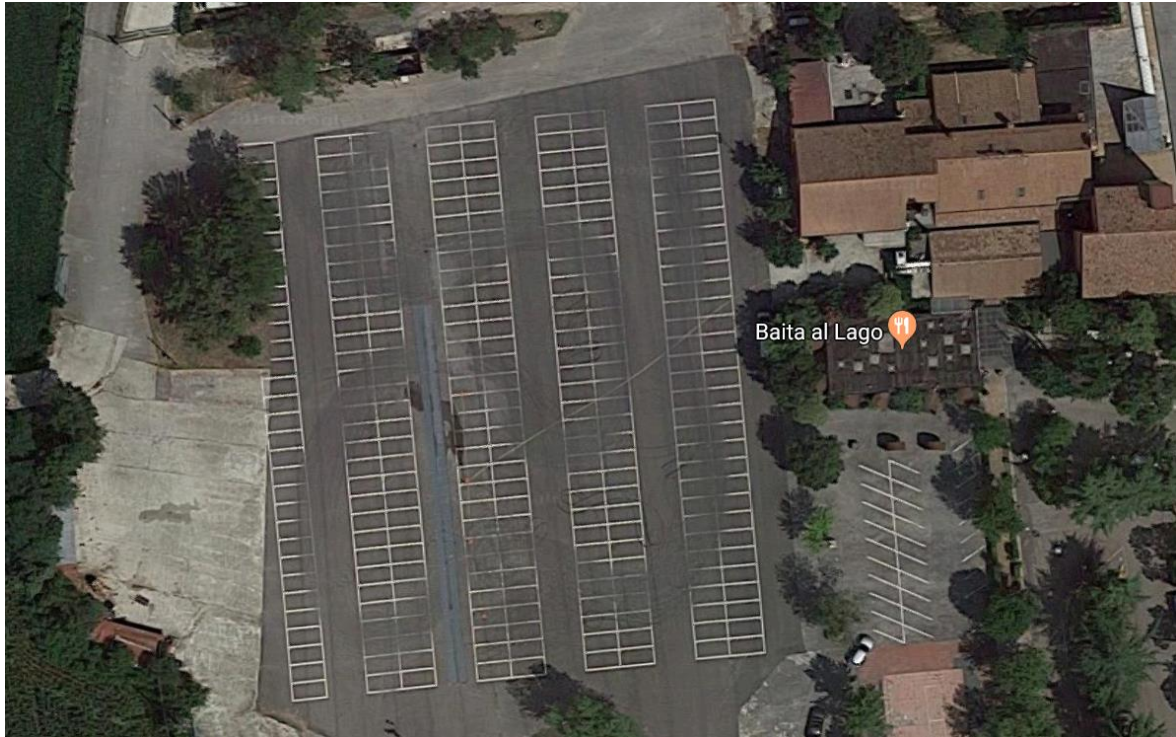
Figura 5.1: Visuale aerea del piazzale di Baita al Lago (PD)

Arrivati nel parcheggio, per prima cosa sono stati posizioni i birilli per definire il percorso delle varie prove ed è stata pulita la traiettoria da ghiaia e dalle foglie secche (Figura 5.2).

Figura 5.2: Piazzale pulito e pronto per l'inizio dei test

5.2 Prove in programma

Una volta sistemata la "pista", si è ultimato il setup della macchina, inserito e fissato le batterie delle centraline e montato il muso. Infine si è acceso il motore (Figura 5.3).

Figura 5.3: Vettura MG 13.18 pronta per la sessione di test

Prima di iniziare le prove, la vettura deve eseguire dei run di riscaldamento per portare in temperatura gomme e organi meccanici e per verificare che tutta l'attrezzatura montata in macchina sia fissata a dovere.
Terminata questa fase, si è fermata la macchina ed eseguito l'azzeramento di ciascun canale della centralina Cronos e del modulo di espansione Cansas. Questa procedura è stata eseguita a motore spento e con pilota a bordo.
Successivamente è stato eseguito un run di prova a velocità variabile per verificare il corretto funzionamento della strumentazione utilizzata a bordo (Figura 5.4).

Figura 5.4: Run di prova

Una volta fatte queste verifiche, si è dato il via alle prove che hanno seguito il seguente programma:

- Prove in rettilineo a velocità costante (Figura 5.5): durante i run si è cercato di mantenere per un intervallo di circa 3 secondi la velocità target che è stata di 30, 50, 70, 90 km/h. Per controllare la ripetibilità delle misure ogni run è stato ripetuto per 3 volte. Al fine di eliminare l'influenza del vento, per ogni velocità l'auto avrebbe dovuto percorrere un run in una direzione e poi un run alla stessa velocità ma in direzione opposta. Ciò è stato possibile solo per le velocità di 30 e 50 km/h in quanto a velocità più alte c'erano ostacoli a fine parcheggio che rendevano pericolosa l'esecuzione del test in una direzione. Infatti, la vettura nei run a 70 e soprattutto a 90 km/h riusciva ad acquisire la velocità solo nel tratto finale del parcheggio.

L'intensità del vento è stata misurata a ogni run con un anemometro a ventola (Figura 5.6).

Figura 5.5: Rettilineo utilizzato per i run a velocità costante

Figura 5.6: Anemometro a ventola

- Tracciato (Figura 5.7): si è riprodotto un semplice tracciato che permetta di studiare il comportamento in transitorio della vettura. Il percorso riproduce le tipiche caratteristiche di un circuito di F.S.A.E. e sono stati eseguiti 12 giri in senso antiorario.
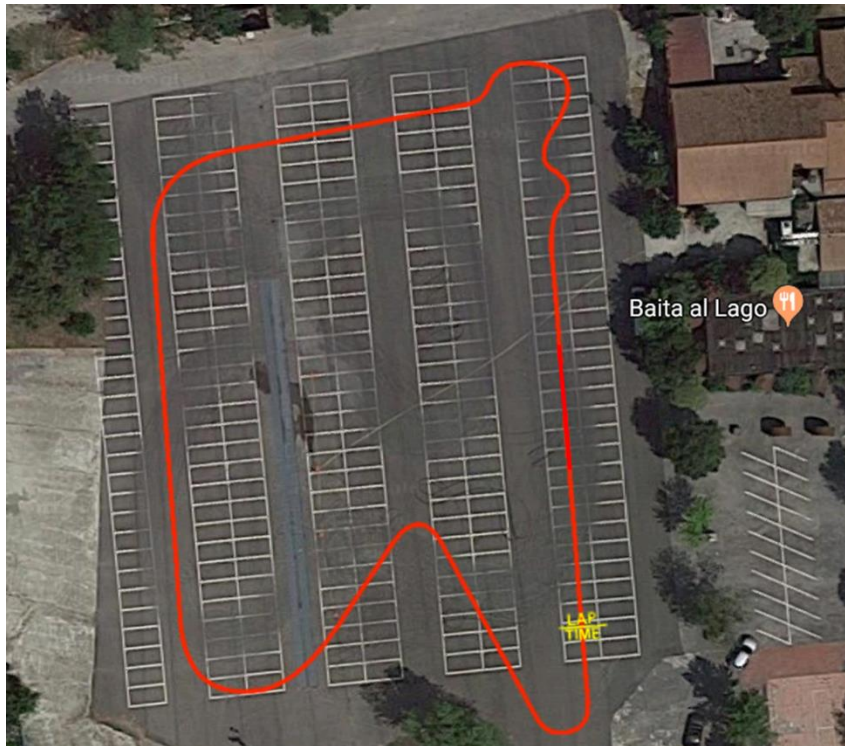
Figura 5.7: Mappa del tracciato

- Prove circolari a velocità costante (Figura 5.8): per riprodurre la prova di skid-pad sono stati posizionati dei birilli (Figura 5.9) che formavano una circonferenza di raggio tipico della prova, cioè con un raggio di 9.125 m, una circonferenza 3 m più grande e una 3 m più piccola.

Figura 5.8: Zona utilizzata per la prova dei run circolari

Figura 5.9: Prova run circolari a velocità costante

In questa prova la vettura percorreva la circonferenza 10 volte alla massima velocità possibile, sia in un senso che nel senso opposto.

5.3 Sessione di test

Di seguito vengono elencati i parametri dell'auto e le condizioni ambientali osservate all'inizio della sessione di test:

- Data: 19/11/2018
- Orario: Dalle 8.00 alle 17.00
- Condizioni del tracciato: Non gommato, pulito, con poco grip
- Temperatura dell'aria: 6°C
- Temperatura dell'asfalto: 10°C
- Pressione atmosferica: 101000 Pa
- Umidità: 40 %
- Peso totale (Vettura + pilota): 290 kg
- Rigidezza delle molle anteriori e posteriori: 60 N/mm
- Pneumatici: Hoosier 20.5x7.0-13 R25B (usate)
- Pressione degli pneumatici: 0.5 bar (a freddo)
- Raggio delle ruote: 250 mm
- Altezza C.O.G.: 300 mm
- Passo: 1535 mm

In tabella 5.1 si riporta in dettaglio la sessione di prove eseguita.

Numero Run	Configurazione ala anteriore	Configurazione ala posteriore	Velocità nominale[km/h]	Direzione	Orario	Direzione del vento	Velocità del vento [km/h]
1	A	A	30	N	11.40	Contrario	1
2	A	A	30	S	11.50	Favore	1
3	A	A	50	N	12.00	Contrario	1
4	A	A	50	S	12.02	Favore	1
5	A	A	70	N	12.26	Contrario	2
6	A	A	90	N	12.34	Contrario	0.5
7	M	A	30	N	12.50	Contrario	1
8	M	A	30	S	12.52	Favore	1
9	M	A	50	N	13.16	Contrario	1
10	M	A	50	S	13.17	Favore	1
11	M	A	70	N	13.30	Contrario	1.5
12	M	A	90	N	13.35	Contrario	0.5
13	M	M	30	N	13.44	Favore	1.5
14	M	M	30	S	13.46	Contrario	1.5
15	M	M	70	N	13.51	Contrario	0.5
16	M	M	90	N	13.59	Favore	1
17	M	M	50	N	14.15	Favore	1.5
18	M	M	50	S	14.17	Contrario	1.5
19	B	B	30	N	14.42	Favore	2
20	B	B	30	S	14.44	Contrario	2
21	B	B	50	S	14.46	Contrario	1.5
22	B	B	50	N	14.47	Favore	2
23	B	B	70	N	14.48	Favore	1
24	B	B	90	N	14.50	Favore	2
25	B	A	30	N	14.59	Favore	1

26	B	A	30	S	15.00	Contrario	1
27	B	A	50	S	15.02	Contrario	1
28	B	A	50	N	15.03	Favore	1
29	B	A	70	N	15.04	Contrario	0.5
30	B	A	90	N	15.06	Contrario	0.5
31	A	A	Variabile	CCW	15.26	-	1-3
32	A	A	26	CCW	16.04	-	0.5
33	A	A	26	CW	16.08	-	1
34	A	A	33	CW	16.10	-	2.5
35	A	A	33	CCW	16.12	-	2
36	A	A	40	CCW	16.16	-	2
37	A	A	40	CW	16.18	-	2

Tabella 5.1: Programma della sessione di prove

Per configurazione "A" si intende "Alto carico", con "M" "Medio carico" e con "B" "Basso carico".
Nel capitolo seguente i vari run verranno richiamati facendo riferimento al numero indicato nella tabella sopra riportata.

Capitolo 6: Analisi preliminare dei dati acquisiti

6.1 Analisi dei dati originali

Per spiegare l'analisi effettuata sui dati acquisiti si prendono in considerazione come esempio i due segnali acquisiti dalla cella di carico aerodinamica anteriore destra A.R. durante il run svolto alla velocità di 90 km/h con la configurazione delle ali in "Alto carico", svoltasi alle 12.34.

L'analisi dei dati e la loro successiva elaborazione viene svolta con il software "imc FAMOS Enterprise 7.3", il programma di elaborazione dati abbinato alle centraline utilizzate.

In figura 6.1 si possono vedere i due segnali vergini, cioè senza alcuna operazione di post-processing.
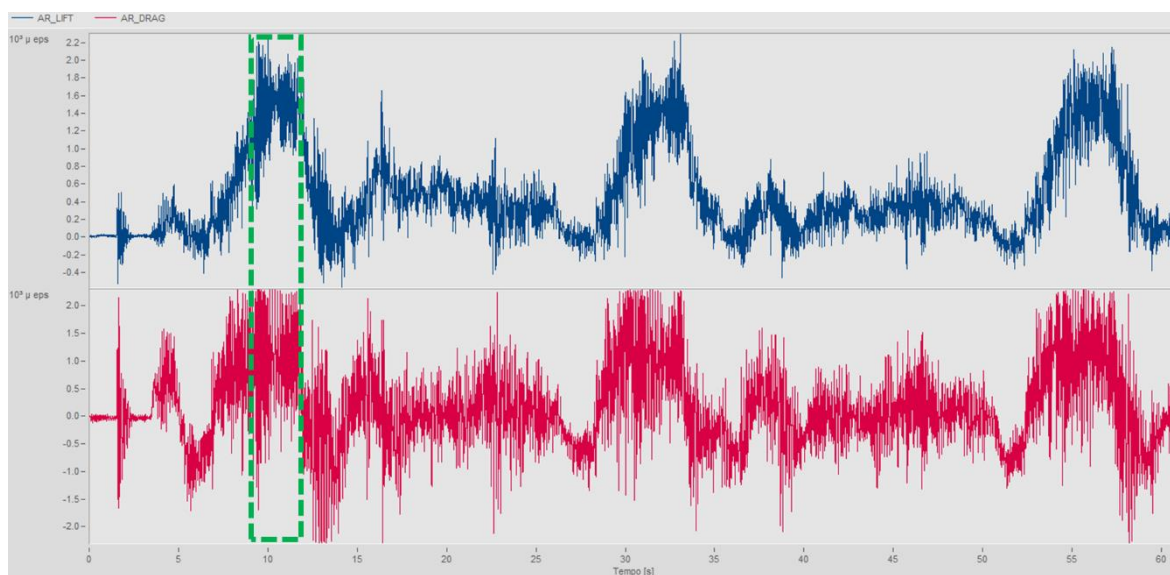
Figura 6.1: Segnali originali acquisiti dalla cella di carico A.R. nel run 6 (in blu il segnale di lift, in rosso quello di drag)

Si nota come i segnali appaiano alquanto rumorosi, nonostante sia già presente un filtro passa basso con frequenza di taglio a 50 Hz impostato nei parametri di configurazione della centralina.

In figura 6.2 viene proposto il segnale acquisito nell'intervallo da 9.5 a 11.5 secondi, quello inquadrato in verde nell'immagine precedente, ossia uno degli intervalli in cui si è mantenuta la velocità costante di 90 km/h nel run preso in considerazione.
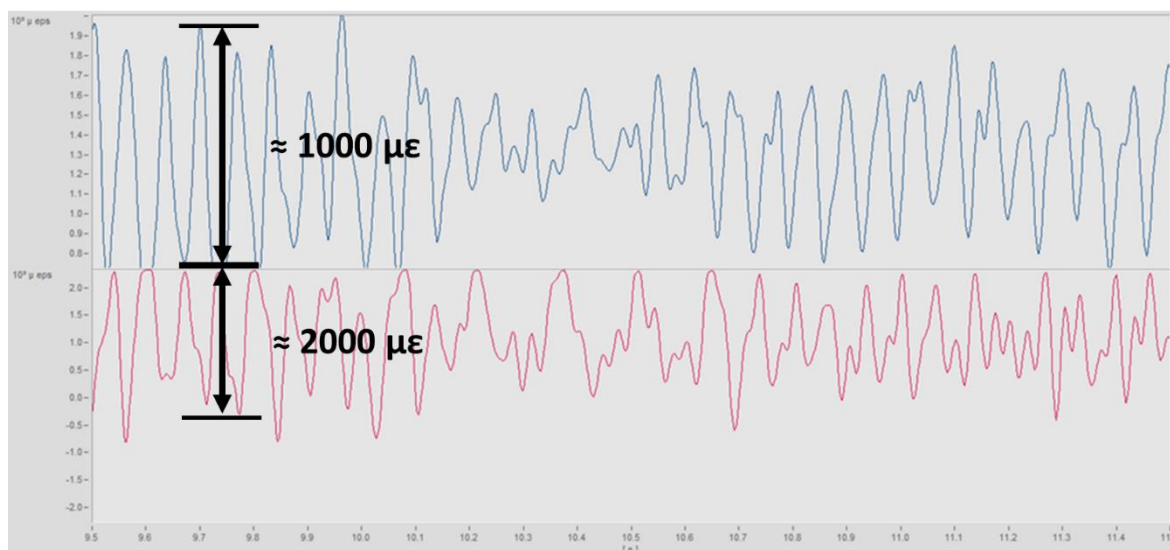
Figura 6.2: Dettaglio del segnale del run 6 tra 9.5 e 11.5 secondi

L'ampiezza del disturbo risulta di circa 1000 microepsilon per quanto riguarda il segnale di lift e quasi 2000 microepsilon per quello di drag. Passando alle forze attraverso le matrici di taratura queste incertezze equivalgono a circa 150 N per il lift e 80 N per il drag. È evidente come tali disturbi non siano accettabili al fine di ottenere risultati con un'incertezza non eccessivamente elevata.

6.2 Filtraggio dei dati

Al fine di ridurre l'incertezza delle misure, eliminando il rumore del segnale, si è passati alla fase di filtraggio dei dati.

Sempre utilizzando il software Famos si è deciso di utilizzare un ulteriore filtro passa basso in quanto i fenomeni che vogliamo studiare possono ritenersi quasi statici, è quindi possibile ignorare i fenomeni di vibrazioni proprie delle strutture in gioco.

Il filtro utilizzato è di tipo Butterworth, di secondo ordine, con una frequenza di taglio di 1 Hz. È stata scelta questa frequenza in quanto l'obiettivo principale era trovare il valore medio dei carichi agenti sulle ali durante i test a velocità costante.

Nelle seguenti figure 6.3 e 6.4 si possono vedere i blu i segnali di lift e drag vergini e in rosso gli stessi segnali filtrati.
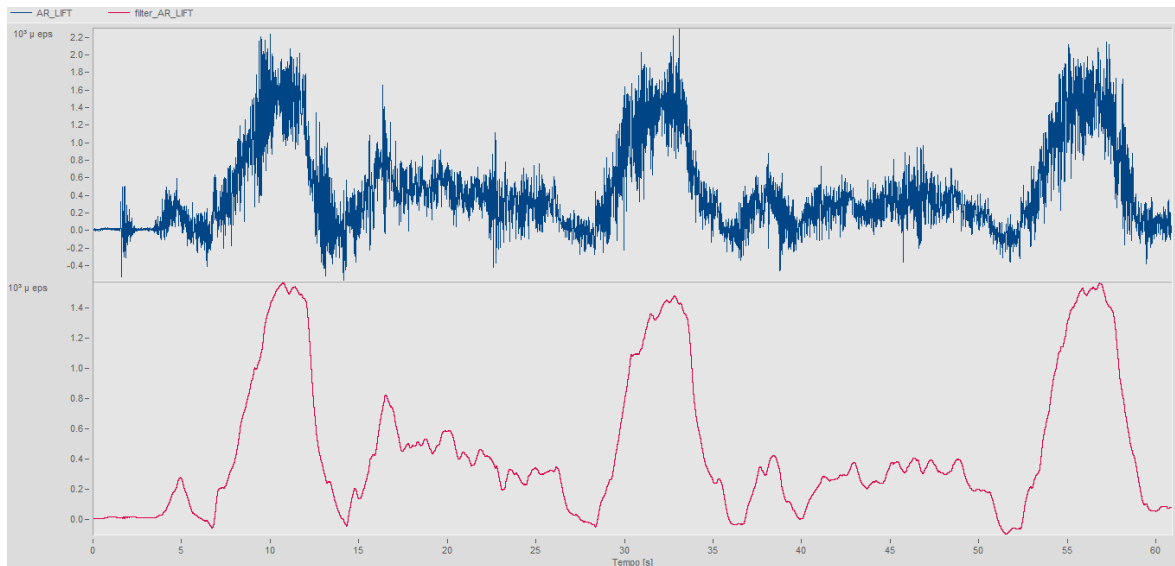
Figura 6.3: Confronto tra il segnale originale (in blu) di lift e il segnale filtrato (in rosso) in riferimento al run 6
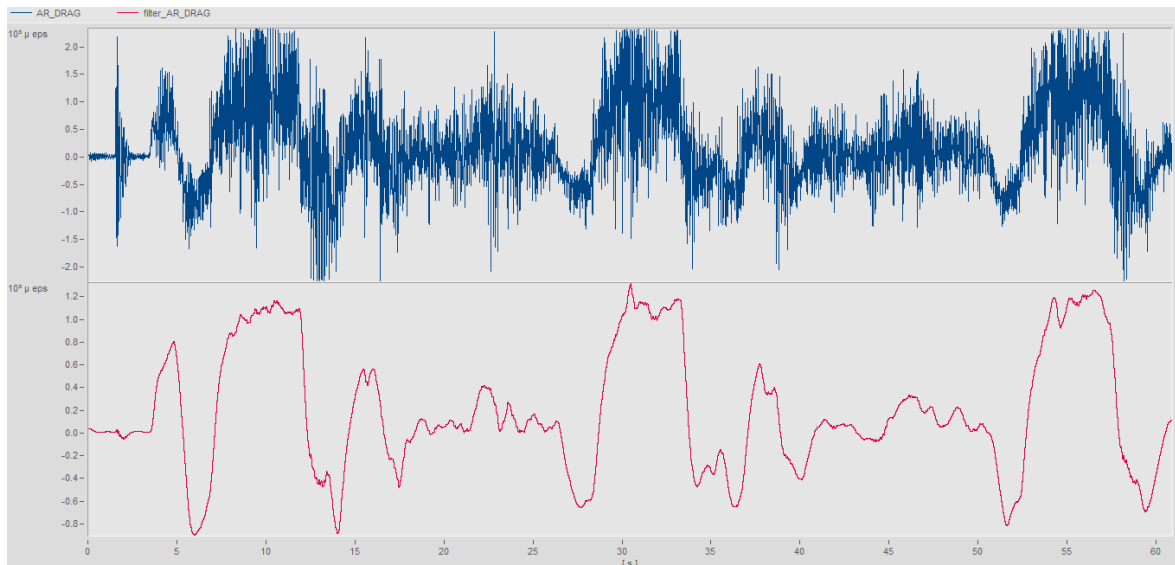
Figura 6.4: Confronto tra il segnale originale (in blu) di drag e il segnale filtrato (in rosso) in riferimento al run 6

Appare evidente come i segnali ora siano molto più puliti e di più facile comprensione.

Infine, in figura 6.5 viene proposto il dettaglio dell'intervallo tra 9.5 e 11.5 secondi: in blu e in rosso rispettivamente i segnali di lift e drag non filtrati, in azzurro e viola invece si vedono gli stessi segnali filtrati.
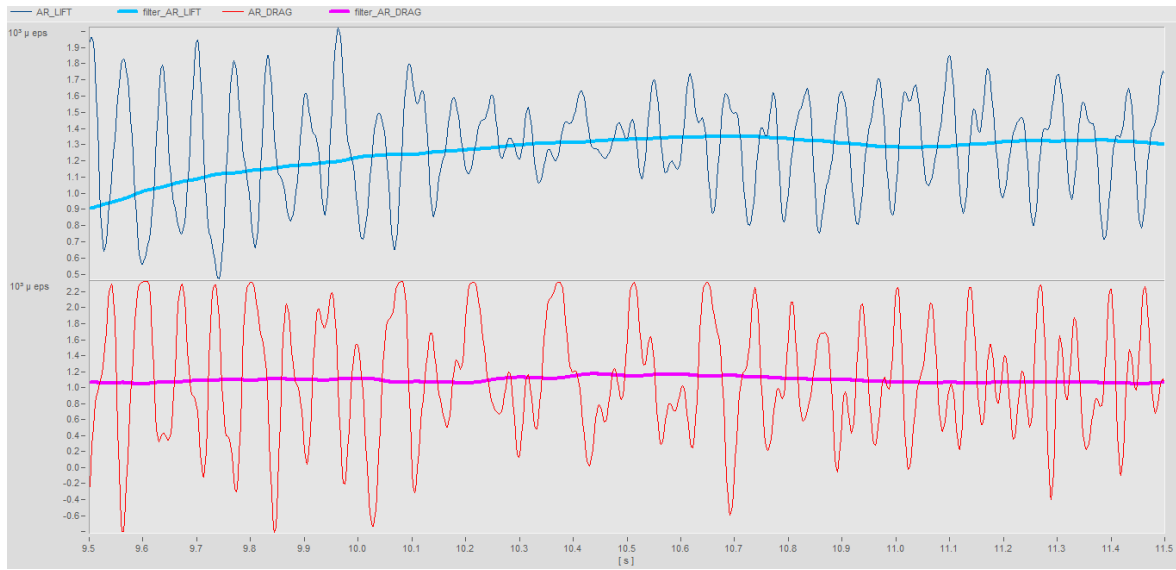
Figura 6.5: Confronto tra segnali non filtrati e filtrati nell'intervallo 9.5-11.5 secondi (in blu il segnale di lift non filtrato, in azzurro quello filtrato, in rosso il segnale di drag non filtrato, in viola quello filtrato)

6.3 Post-processing dei dati

Una volta filtrato ciascun canale acquisito, è necessario combinare i vari canali al fine di ottenere i carichi agenti su ciascun supporto. Per far ciò è sufficiente combinare i segnali attraverso le matrici di taratura come spiegato nel capitolo 3. Una volta ottenute le 8 componenti di forza (una componente di lift e una di drag per ogni supporto), si vanno a sommare tra di loro le 2 componenti di lift anteriore, le 2 di drag anteriore, le 2 di lift posteriore e le 2 di drag posteriore. Si ottengono così 4 segnali, ossia i carichi di lift e drag relativi all'ala anteriore e posteriore.

In figura 6.6 viene mostrato il risultato del post-processing dei dati relativi alla prova a 90 km/h in configurazione "Alto carico".
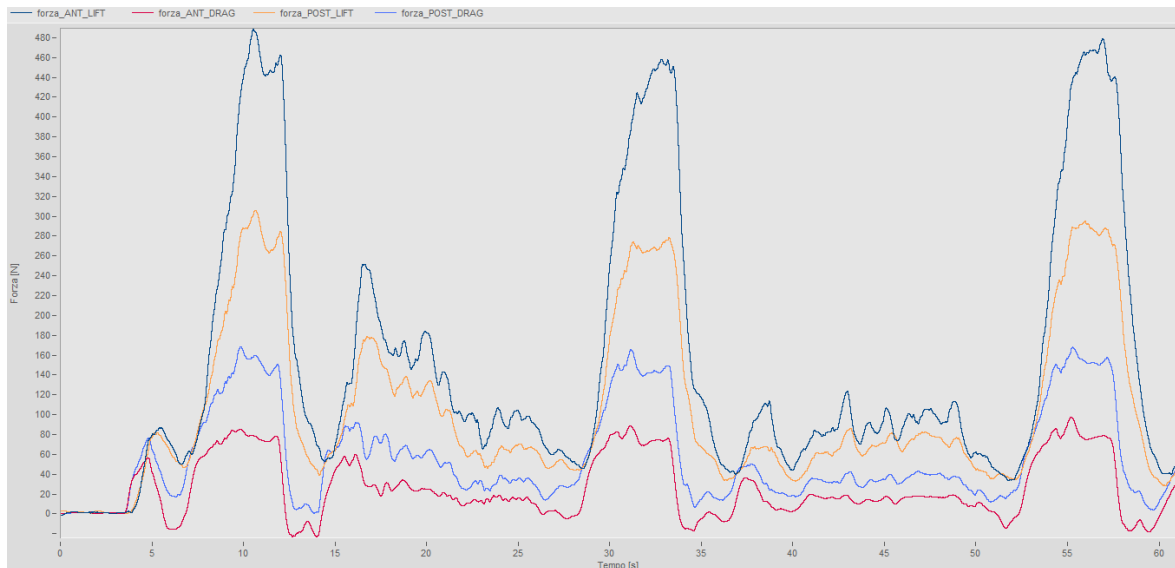
Figura 6.6: Acquisizione dei carichi aerodinamici del run 6

Nel caso in esame è facile individuare i tre tratti in cui la vettura ha assunto la velocità target, nei periodi intermedi invece il pilota ha guidato a velocità più moderata per riportarsi all'inizio del rettilineo. Questo andamento si ritroverà anche nelle prove a 70 km/h, in quelle a 30 km/h e a 50 km/h invece il pilota ha guidato a velocità maggiori nei tratti non di rettilineo per permettere a posteriori una più facile individuazione delle zone di run a velocità costante.

Oltre ai carichi aerodinamici, sono stati acquisiti anche i segnali relativi alle forze agenti sui pull e i segnali relativi alle corse delle sospensioni. Per essi è stato eseguito lo stesso filtraggio effettuato per i carichi aerodinamici, in figura 6.7 è possibile visionare tali segnali relativi alla stessa prova sopra menzionata.
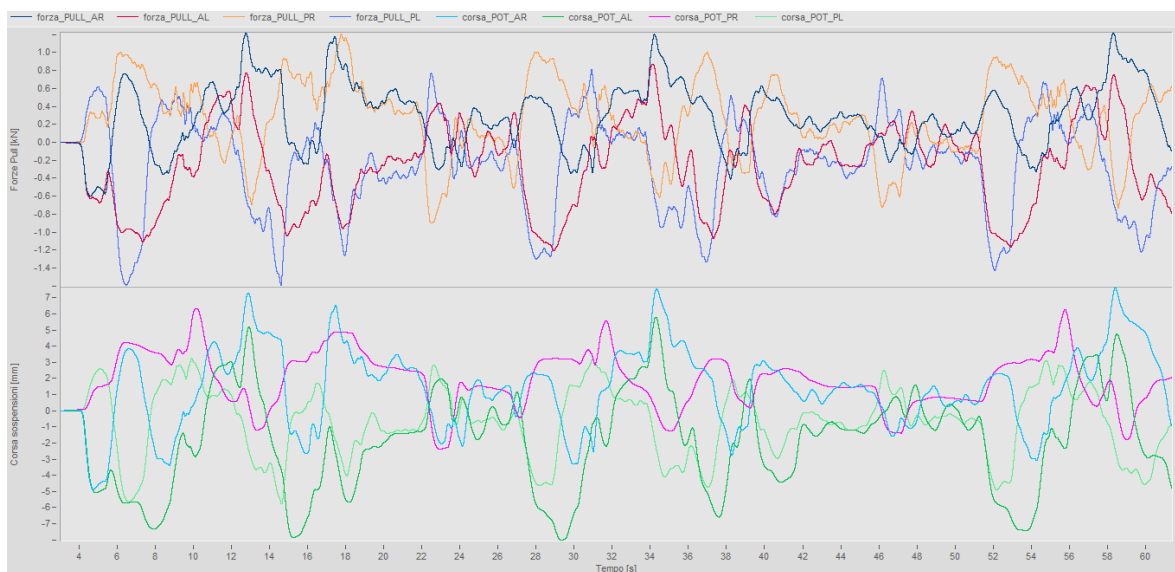
Figura 6.7: Acquisizione carichi pull e corse sospensioni del run 6

Si nota come i segnali di forza ai pull rispecchino l'andamento dei segnali di corsa delle sospensioni e viceversa. Questi segnali oltre a permettere un'analisi dei trasferimenti di carico della vettura in relazione ai carichi aerodinamici, sono utili indicatori delle manovre del pilota in pista, facilitando l'individuazione dei tratti a velocità costante qualora non risultino immediatamente evidenti dai segnali aerodinamici.

Per quanto riguarda i segni dei segnali si è utilizzata la convenzione di segno positivo per i pull sollecitati a trazione, va precisato che i segnali dei pull sono stati azzerati con macchina spensa e pilota a bordo, presentano già uno stato di pretensione iniziale. Se si vuole risalire al reale stato di tensione del materiale va sommata cambiata di segno la tensione che i pull presentano in una prova di sollevamento con pilota a bordo (Figura 6.8).

Figura 6.8: Segnali dei pull acquisiti nella prova di sollevamento della vettura

A macchina completamente sospesa i segnali misurati dai pull risultano i seguenti:
- Pull anteriore destro: -1582.1 N,
- Pull anteriore sinistro: -1465.4 N,
- Pull posteriore destro: -1969.8 N,
- Pull posteriore sinistro: -2124.7 N.

Si nota come i pull si trovino in uno stato di pretensione, quindi variazioni di carico negati dei segnali acquisiti durante i run non significano che l'elemento vada in stato di comprensione, ma semplicemente scarica parte della sua pretensione.

Per quanto riguarda i segnali dei potenziometri si è assunta la convenzione di utilizzare segnali positivi per indicare la compressione della molla, così da avere segnali concordi anche in segno con gli andamenti dei segnali dei pull. Inoltre, non viene plottata la corsa assoluta della sospensione, ma la sua variazione di corsa rispetto alla posizione di azzeramento dei canali che è sempre la condizione di macchina spenta con pilota a bordo.

Per completezza in appendice C vengono riprodotti gli esatti codici utilizzati per l'elaborazione dati con il software "imc FAMOS Enterprise 7.3".

Capitolo 7: Analisi dei dati e presentazione dei risultati

7.1 Configurazioni aerodinamiche delle ali

Prima di analizzare i dati sperimentali acquisiti si va a spiegare in dettaglio la geometria dei flap delle ali, che sono profili Naca BE 122-155.
Sia l'ala anteriore che quella posteriore presentano 2 flap regolabili (Figura 7.1) con continuità da un angolo minimo a uno massimo, variando l'angolo di attacco si può variare la configurazione aerodinamica dell'ala. I flap sono attaccati agli "endplates" con due viti M3 per lato, la vite più indietro è usata come pivot per cambiare l'angolo di attacco dei profili (Figura 7.2).
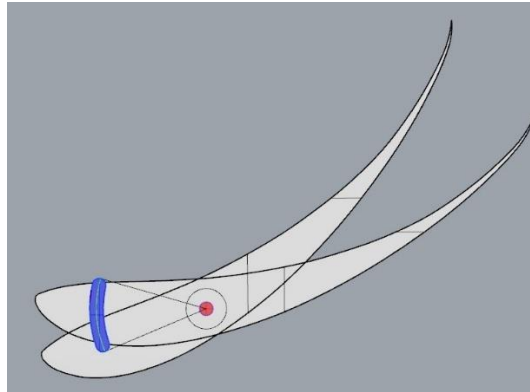
Figura 1.10: Esempio di rotazione del flap [3]
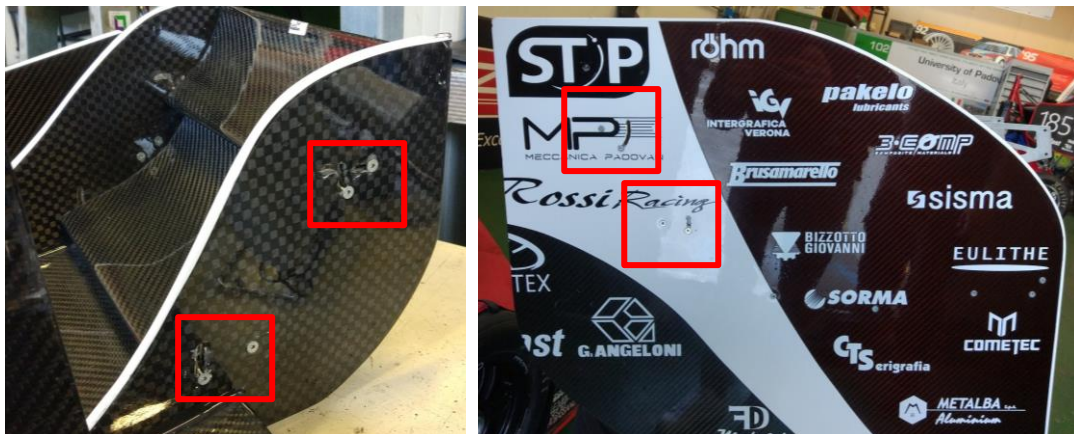
Figura 7.2: "Endplate" dell'ala anteriore (a sinistra) e posteriore (a destra)
con evidenziati gli inserti per l'attacco e la regolazione dei flap

In figura 7.3 viene mostrata una riproduzione dell'ala anteriore, per regolamento i flap laterali (in blu) devono restare fissi, quindi per variare l'assetto dell'ala si andrà ad agire solo sui flap centrali (in rosso). L'ala posteriore invece presenta due unici lunghi flap regolabili che occupano tutta la larghezza dell'ala.
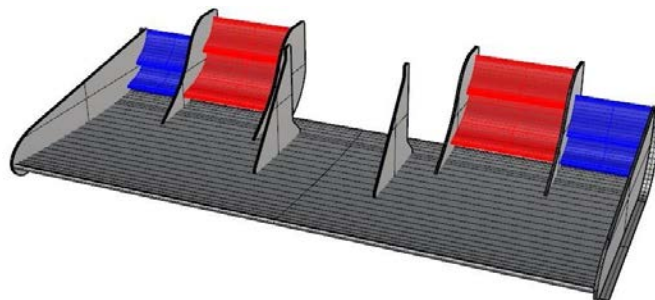
Figura 7.3: Ala anteriore con evidenziati i flap regolabili centrali (rosso) e quelli fissi laterali (blu) [3]

In figura 7.1 viene mostrato il profilo dell'ala anteriore, per agire sull'aerodinamica si va a variare l'angolo dei flap centrali definito come l'angolo assoluto tra la direzione orizzontare e la direzione della retta passante per il bordo d'ingresso del profilo e quello di uscita. Con F1 si indica l'angolo del flap 1 e con F2 l'angolo del flap 2.
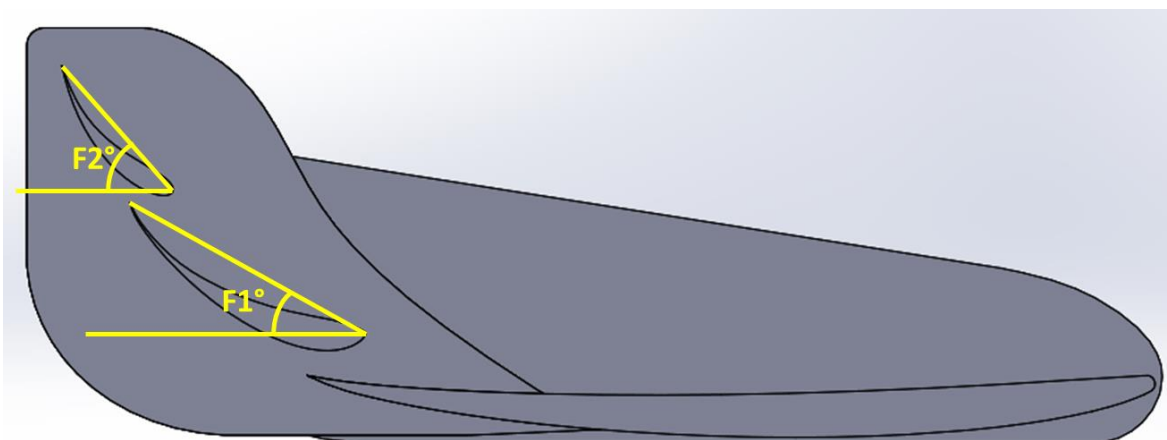
Figura 7.4: Profilo dell'ala anteriore con quotati gli angoli di posizionamento dei flap

In figura 7.5 viene invece mostrato il profilo dell'ala posteriore, allo stesso modo vengono quotati i flap regolabili che permettono di variare la configurazione aerodinamica dell'ala. Al posteriore i flap sono lunghi tutta la larghezza dell'ala.
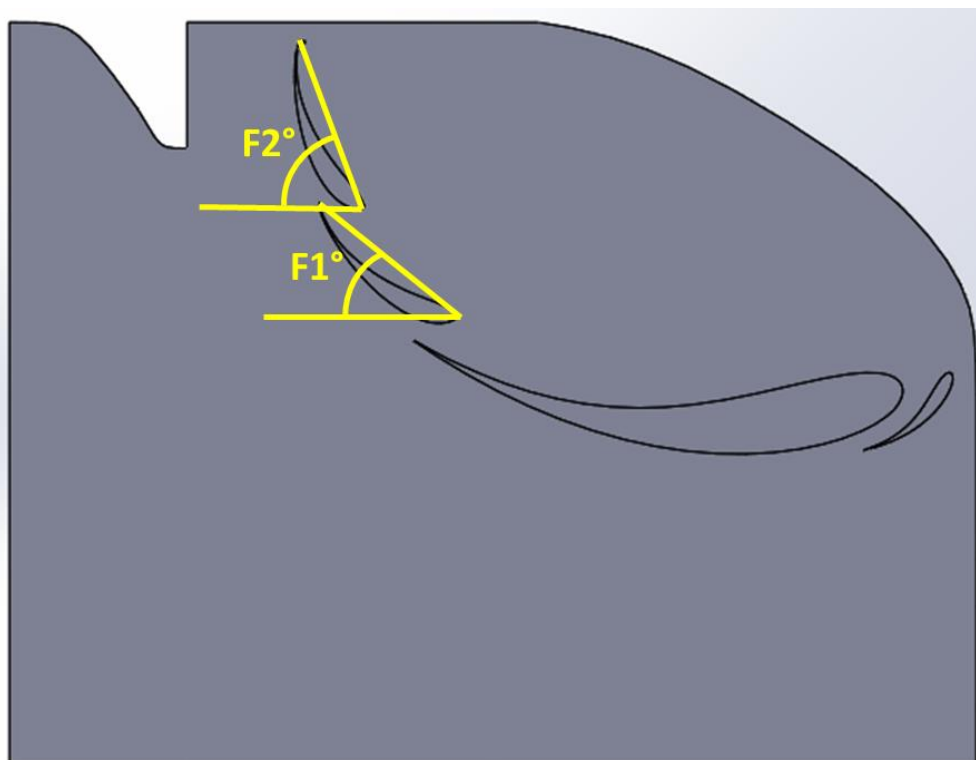
Figura 7.5: Profilo dell'ala posteriore con quotati gli angoli di posizionamento dei flap

In tabella 7.1 si riportano le configurazioni di alto, medio e basso carico prese in esame (Figura 7.6), che corrispondono alle tipiche configurazioni usate agli eventi dal team.
Nei prossimi paragrafi si parlerà di configurazione di "Alto carico" per indicare sia l'ala anteriore che quella posteriore settata con i flap nelle posizioni indicate dalla seguente tabella nel caso di alto carico, allo stesso modo si parlerà di "Medio carico" o di "Basso carico". Quando le due ali avranno configurazioni diverse verrà specificato parlando della configurazione dell'ala anteriore e di quella dell'ala posteriore.

	FLAP 1 (F1) [°]	FLAP 2 (F2) [°]	CARICO
ALA POSTERIORE	40	70	Alto
	30	52.5	Medio
	20	35	Basso
ALA ANTERIORE	30	50	Alto
	22.5	37.5	Medio
	15	25	Basso

Tabella 7.1: Angoli assoluti di inclinazione dei flap nelle varie configurazioni
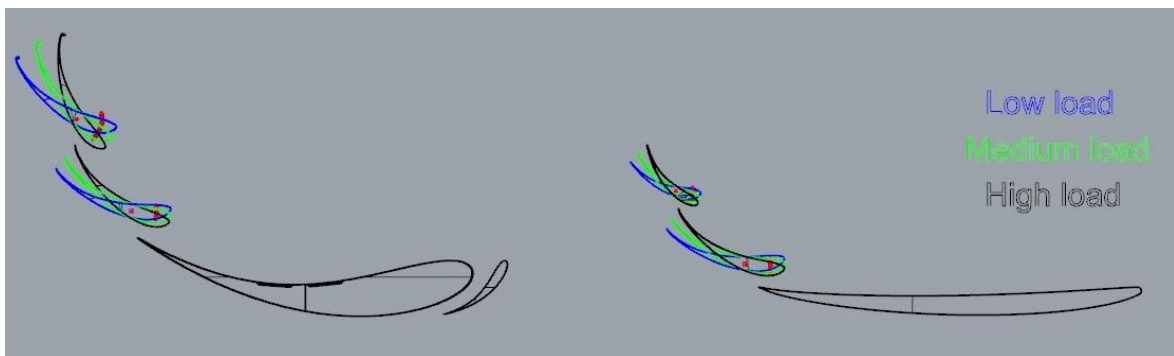
Figura 7.6: Configurazioni aerodinamiche [3]

7.2 Prove in rettilineo a velocità costante

7.2.1 Run in configurazione "Alto carico"
La prima sessione di run in rettilineo è stata eseguita con entrambe le ali in configurazione di "Alto carico".
La velocità della vettura è misurata alle ruote con l'utilizzo di 4 sensori ad effetto Hall, ciascuno montato su una ruota. La velocità misurata viene poi corretta con l'intensità rilevata del vento.

Run a 30 km/h
Si inizia con l'analizzare i run eseguiti a 30 km/h, in figura 7.7 si possono vedere i segnali acquisiti nel run eseguito in direzione Nord.
L'ultima finestra dell'immagine (quella più in basso) mostra il dato sulla velocità, così da facilitare l'individuazione degli intervalli in cui si è mantenuta la velocità costante.
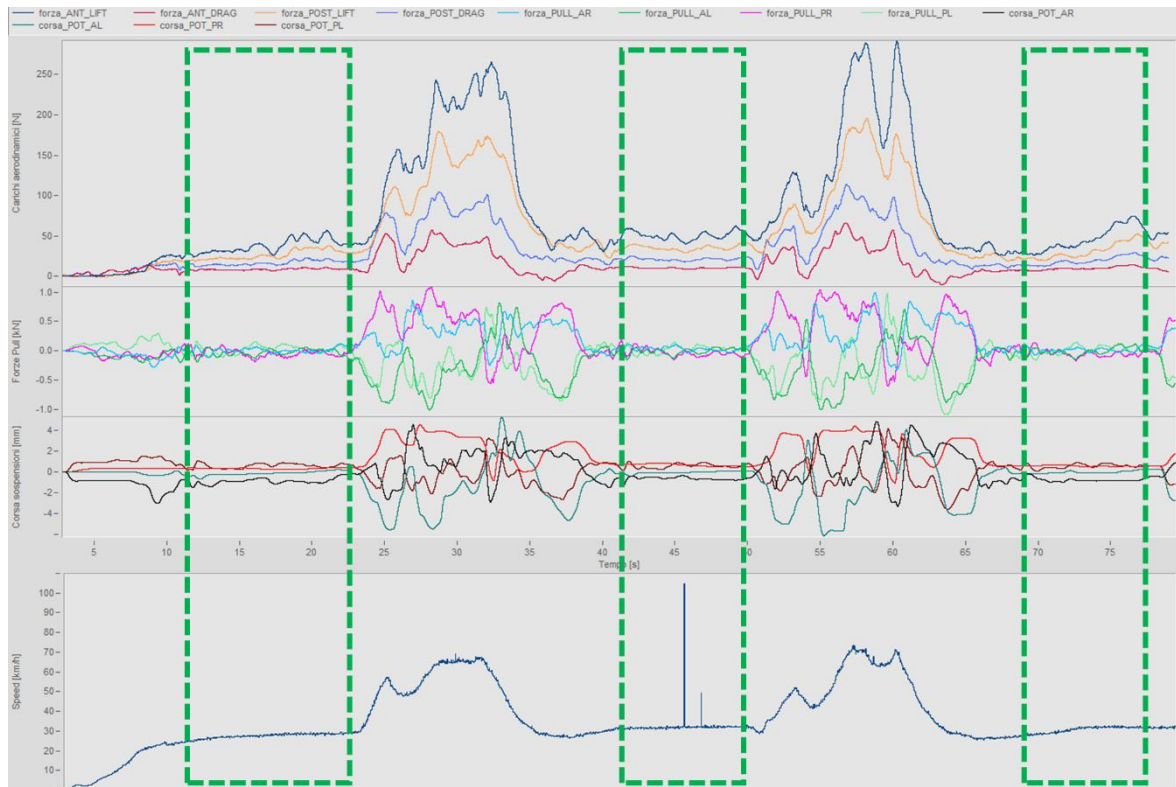
Figura 7.7: Segnali acquisiti nel run 1

In figura 7.8 invece sono raffigurati i dati acquisiti nel run eseguito in direzione opposta, cioè verso Sud.
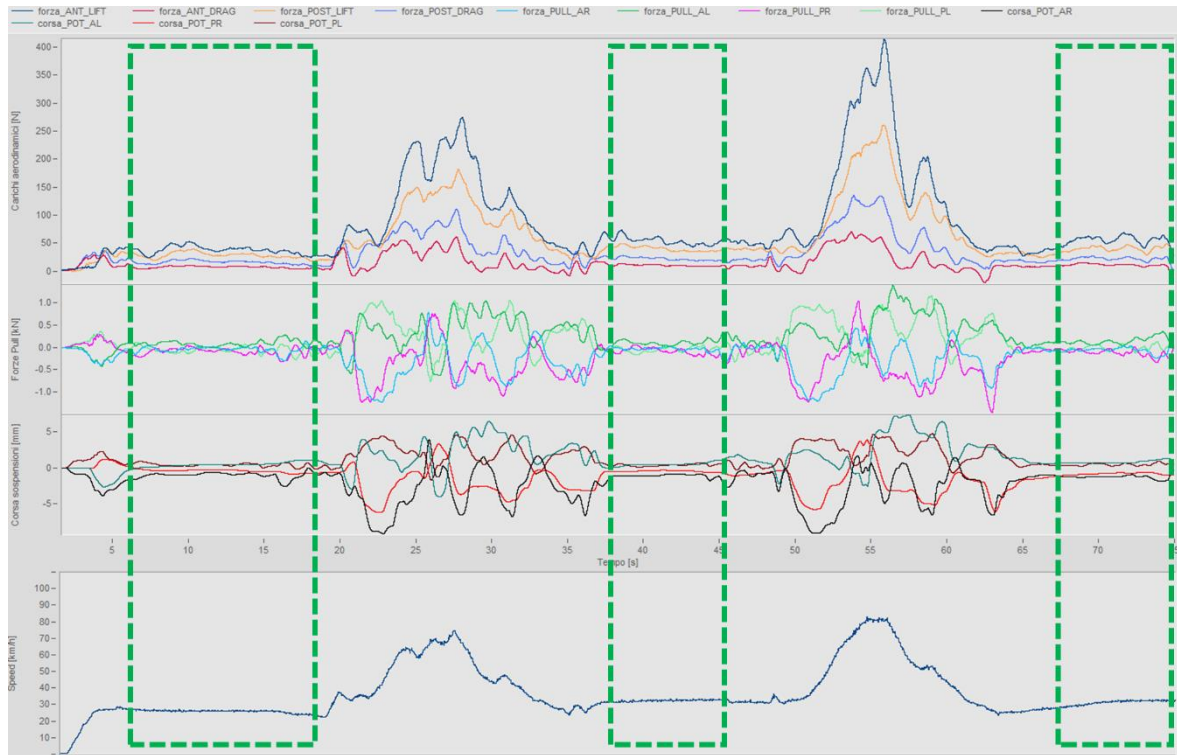
Figura 7.8: Segnali acquisiti nel run 2

Ogni riquadro verde evidenzia il tratto in cui si è mantenuta la velocità costante, si è calcolata la media dei segnali aerodinamici e la media della velocità alle ruote mantenuta in ciascun intervallo. Poi si è trovato il valor medio della velocità del run e dei carichi aerodinamici.

Il vento non ha variato considerevolmente la sua intensità nei due run considerati, quindi facendo la media tra i carichi nei run in una direzione e quelli nella direzione opposta si ottengono dei valori disaccoppiati dall'influenza del vento.

I risultati ottenuti in questo run fanno riferimento a una velocità di 31.2 km/h e sono:

- Downforce ala anteriore=   46.2 N
- Drag ala anteriore=   7.7 N
- Downforce ala posteriore=   31.5 N
- Drag ala posteriore=   18.8 N

Run a 50 km/h

In figura 7.9 e 7.10 si riportano rispettivamente i segnali acquisiti nel run a 50 km/h in un senso e nel senso opposto.
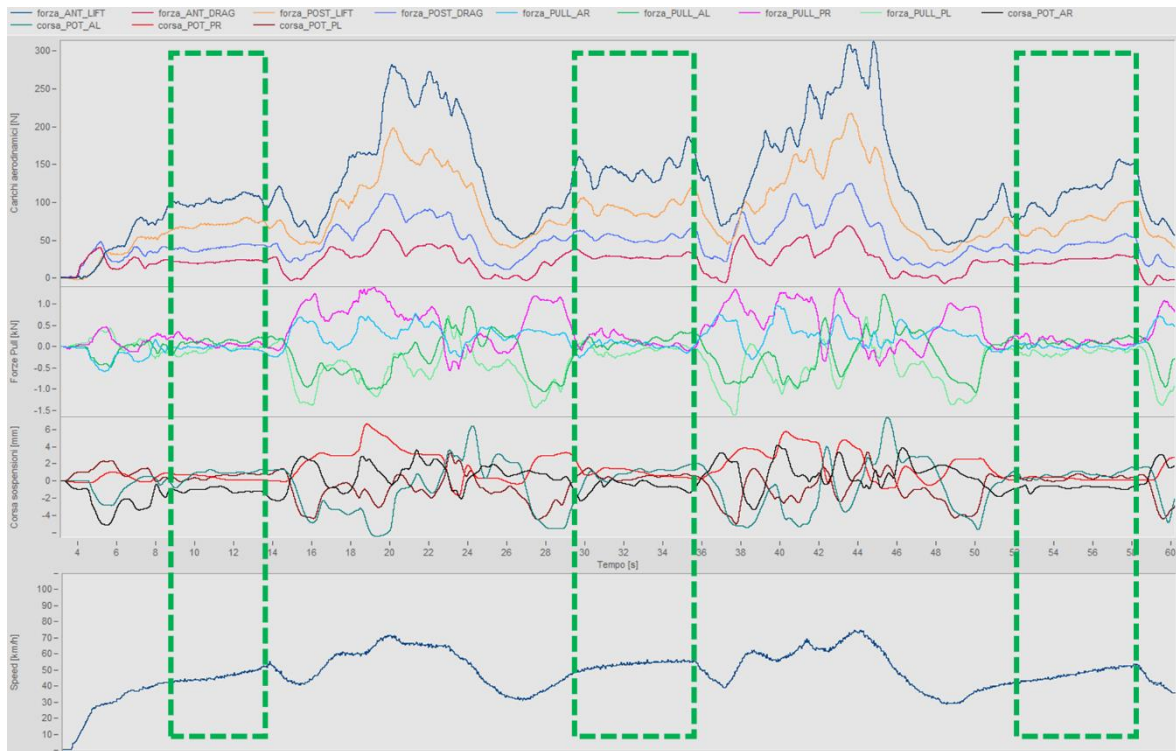
Figura 7.9: Segnali acquisiti nel run 3
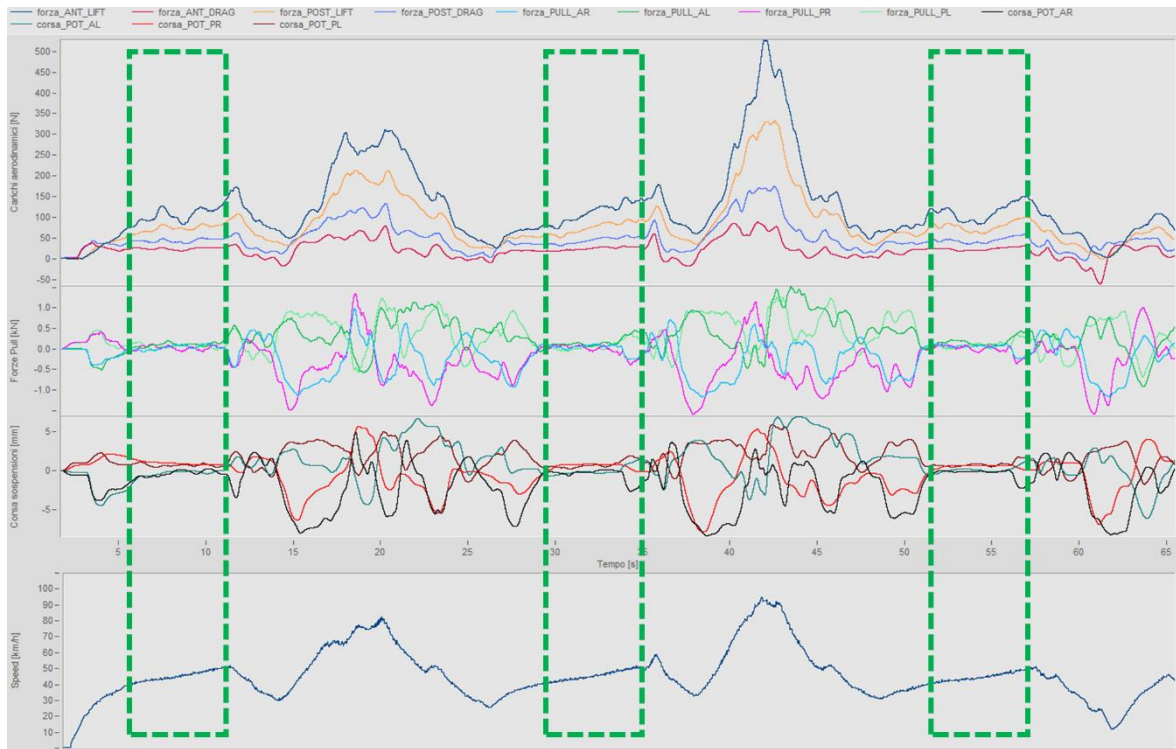
Figura 7.10: Segnali acquisiti nel run 4

Si nota come sia in un senso che in quello opposto la vettura abbia fatto fatica a mantenere una velocità costante di 50 km/h, descrivendo rampe che vanno da 45 km/h a circa 55 km/h. Questi run sono stati ripetuti più volte

ma il problema, legato alla mappa del motore utilizzata per mantenere la velocità costante, non sono stati risolti completamente.

Si considera dunque una velocità media di 48.2 km/h, considerando sia i run in una direzione che in quella opposta per eliminare l'influenza del vento, che durante i due run si è mantenuto costante.

I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   116.1 N
- Drag ala anteriore=   20.0 N
- Downforce ala posteriore=   79.2 N
- Drag ala posteriore=   42.3 N

Run a 70 km/h

In figura 7.11 vengono mostrati i segnali acquisiti nel run a 70 km/h. Questa prova è stata eseguita solo in un senso in quanto risultava pericoloso raggiungere la velocità di 70 km/h alla fine del rettilineo nel senso opposto. È quindi necessario tenere in considerazione l'influenza del vento che farà percepire all'ala una velocità diversa da quella nominale di 70 km/h.

Figura 7.11: Segnali acquisiti nel run 5

Durante il run la velocità del vento era in media di 2 km/h in direzione opposta a quella del rettilineo mentre la velocità media dei run misurata alle ruote della vettura era di 69.6 km/h, quindi la velocità da considerare per la prova è di 71.6 km/h.

I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   279.2 N
- Drag ala anteriore=   44.1 N
- Downforce ala posteriore=   170.1 N
- Drag ala posteriore=   89.2 N

Run a 90 km/h

In figura 7.12 vengono mostrati i segnali acquisiti nel run a 90 km/h. Anche questa prova è stata eseguita in un'unica direzione per gli stessi motivi spiegati in precedenza.

Figura 7.12: Segnali acquisiti nel run 6

Durante il run la velocità del vento era in media di 0.5 km/h in senso opposto alla direzione del rettilineo, la velocità media alle ruote è stata di 90.1 km/h, quindi la velocità da considerare per la prova è di 90.6 km/h.
I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   478.9 N
- Drag ala anteriore=   72.1 N
- Downforce ala posteriore=   287.6 N
- Drag ala posteriore=   150.5 N

Risultati dei run in configurazione di "Alto carico"

In tabella 7.2 vengono riassunti i risultati ottenuti durante i run a velocità costante con le ali in configurazione di "Alto carico".

CONFIGURAZIONE	VELOCITÀ [KM/H]	ANT LIFT [N]	ANT DRAG [N]	POST LIFT [N]	POST DRAG [N]
	31.2	46.2	7.7	31.5	18.8
A.A.	48.2	116.1	20.0	79.2	42.3
	71.6	279.2	44.1	170.1	89.2
	90.6	478.9	72.1	287.6	150.5

Tabella 7.2: Riassunto risultati ottenuti nei run a velocità costante in configurazione "Alto carico"

In figura 7.13 vengono mostrati gli andamenti dei risultati ottenuti.
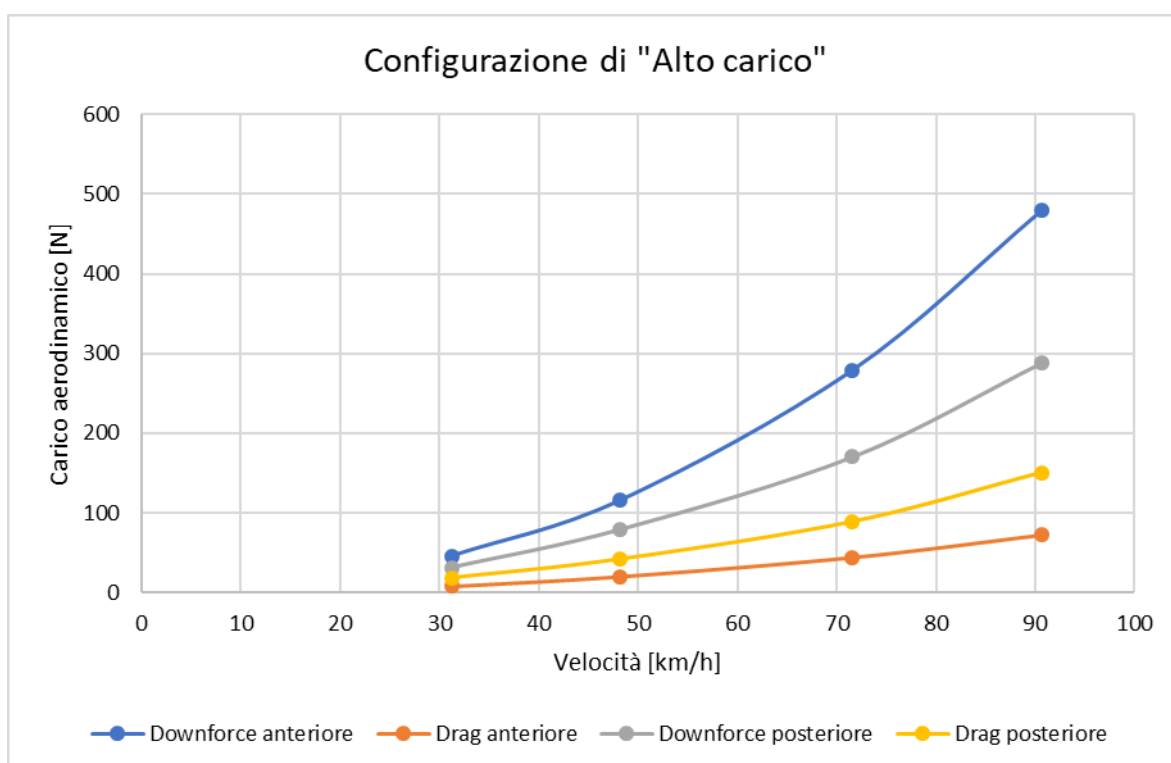
Figura 7.13: Andamento dei carichi in funzione della velocità nei run eseguiti in configurazione di "Alto carico"

7.2.2 Run in configurazione "Medio carico"

Run a 30 km/h

In figura 7.14 sono mostrati i segnali acquisiti nel run eseguito in direzione Nord e nei riquadri in verde gli intervalli in cui si è mantenuta la velocità costante.

Figura 7.14: Segnali acquisiti nel run 13

In figura 7.15 sono raffigurati i dati acquisiti nel run eseguito in direzione opposta, cioè verso Sud.

Figura 7.15: Segnali acquisiti nel run 14

Il procedimento eseguito per l'analisi dei dati è lo stesso svolto in precedenza.
La velocità media osservata nei rettilinei è di 31.1 km/h, mentre l'intensità del vento si può ritenere costante tra run in una direzione e quelli nella direzione opposta.
I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   44.1 N
- Drag ala anteriore=   6.3 N
- Downforce ala posteriore=   29.0 N
- Drag ala posteriore=   12.1 N

Run a 50 km/h

In figura 7.16 e 7.17 si riportano rispettivamente i segnali acquisiti nel run a 50 km/h in un senso e nel senso opposto.

Figura 7.16: Segnali acquisiti nel run 17

Figura 7.17: Segnali acquisiti nel run 18

Anche qui compare il problema di mantenere la velocità costante a 50 km/h, si assume una velocità media di 51.0 km/h osservando che tra run di andata e di ritorno la velocità del vento si mantiene pressoché costante.

I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   111.9 N
- Drag ala anteriore=   16.1 N
- Downforce ala posteriore=   77.2 N
- Drag ala posteriore=   33.3 N

Run a 70 km/h
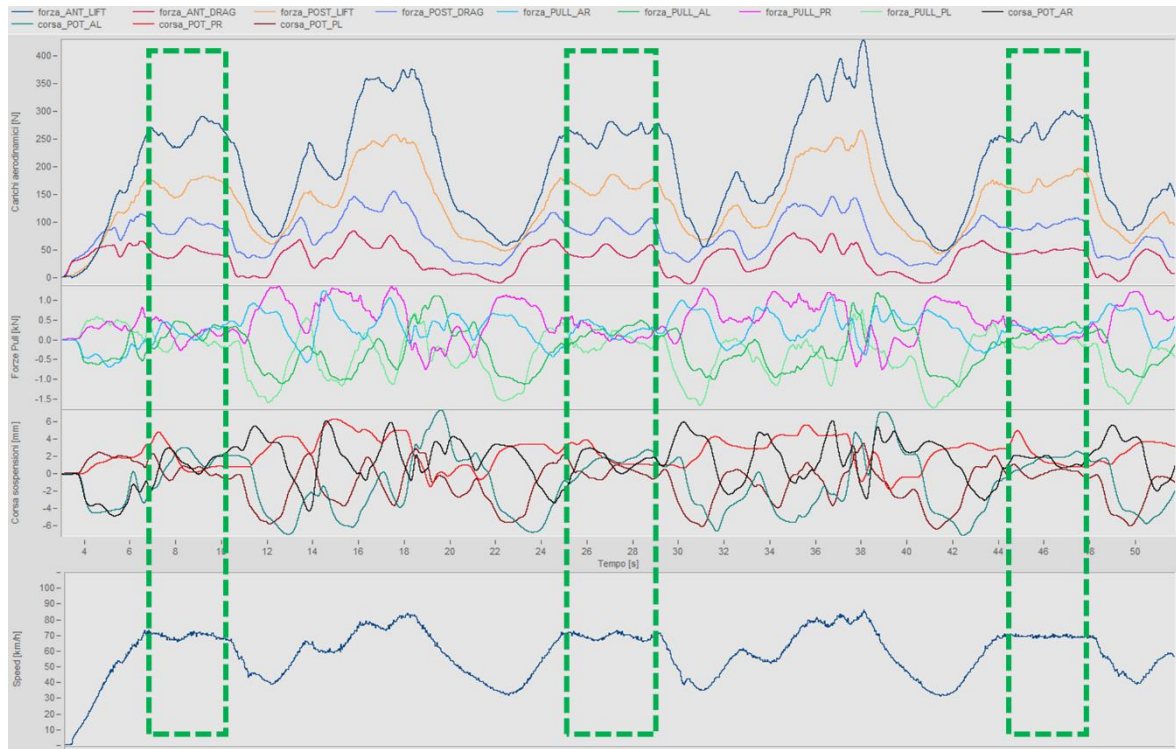
In figura 7.18 vengono mostrati i segnali acquisiti nel run a 70 km/h.

Figura 7.18: Segnali acquisiti nel run 15

Durante il run la velocità del vento era in media di 0.5 km/h in direzione opposta al moto, quindi la velocità da considerare per la prova è di 70.5 km/h.

I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   212.3 N
- Drag ala anteriore=   30.7 N
- Downforce ala posteriore=   157.7 N
- Drag ala posteriore=   68.2 N

Run a 90 km/h

In figura 7.19 vengono mostrati i segnali acquisiti nel run a 90 km/h. In questa prova i run eseguiti a velocità costante sono stati 5 per calibrare alcuni parametri del limitatore di velocità.
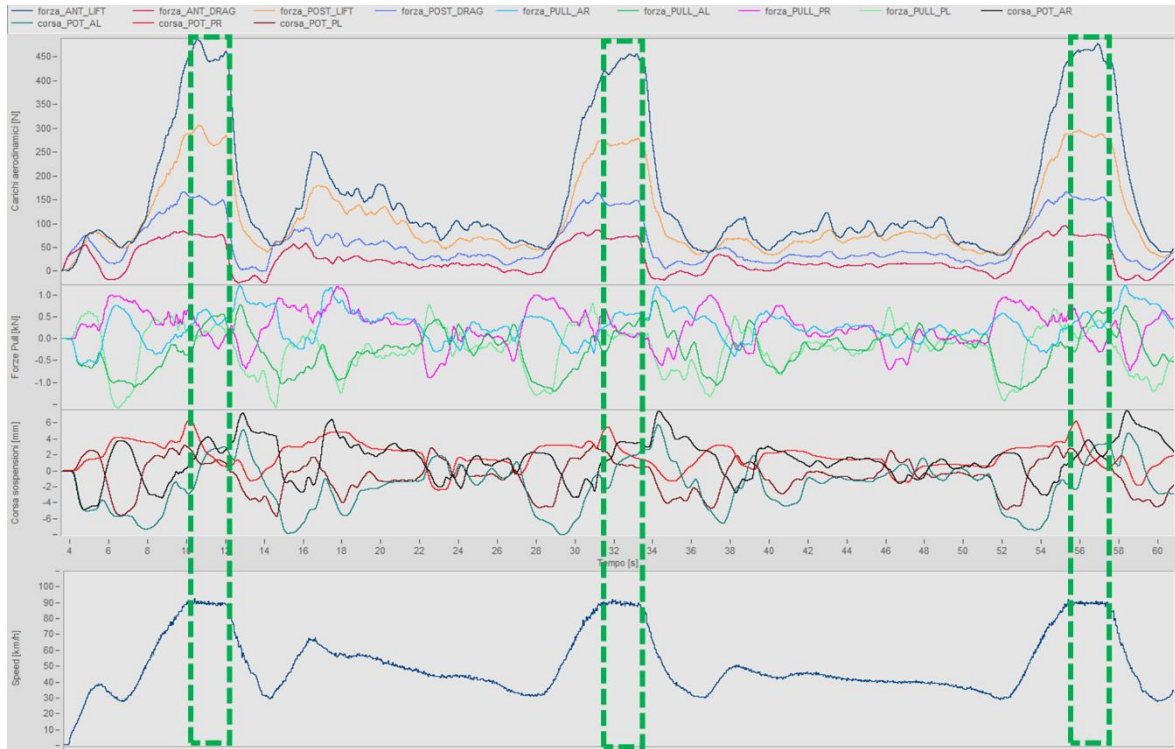

Figura 7.19: Segnali acquisiti nel run 16

Durante il run la velocità del vento era in media di 1 km/h nello stesso senso di percorrenza del rettilineo, quindi la velocità da considerare per la prova è di 88.8 km/h, visto che la velocità alle ruote media è stata misurata in 89.8 km/h.

I risultati ottenuti in questo run sono:
- Downforce ala anteriore=   347.8 N
- Drag ala anteriore=   48.5 N
- Downforce ala posteriore=   238.6 N
- Drag ala posteriore=   102.8 N

Risultati dei run in configurazione di "Medio carico"

In tabella 7.3 vengono riassunti i risultati ottenuti durante i run a velocità costante con le ali in configurazione di "Medio carico".

CONFIGURAZIONE	VELOCITÀ [KM/H]	ANT LIFT [N]	ANT DRAG [N]	POST LIFT [N]	POST DRAG [N]
	31.1	44.1	6.3	29.0	12.1
M.M.	51.0	111.9	16.1	77.2	33.3
	70.5	212.3	30.7	157.7	68.2
	88.8	347.8	48.5	238.6	102.8

Tabella 7.3: Riassunto risultati ottenuti nei run a velocità costante in configurazione "Medio carico"

In figura 7.20 vengono mostrati gli andamenti dei risultati ottenuti.
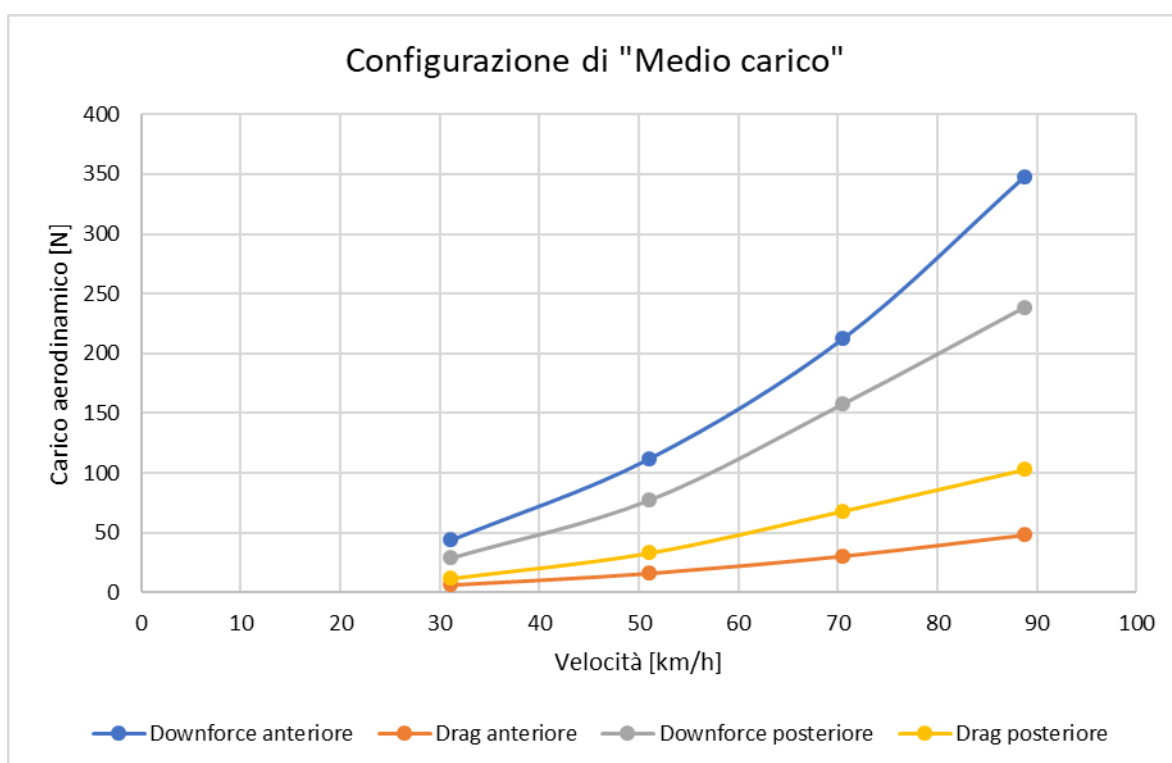
Figura 7.20: Andamento dei carichi in funzione della velocità nei run eseguiti in configurazione di "Medio carico"

7.2.3 Run in configurazione "Basso carico"

Run a 30 km/h

In figura 7.21 sono mostrati i segnali acquisiti nel run eseguito in direzione Nord e nei riquadri in verde gli intervalli in cui si è mantenuta la velocità costante.
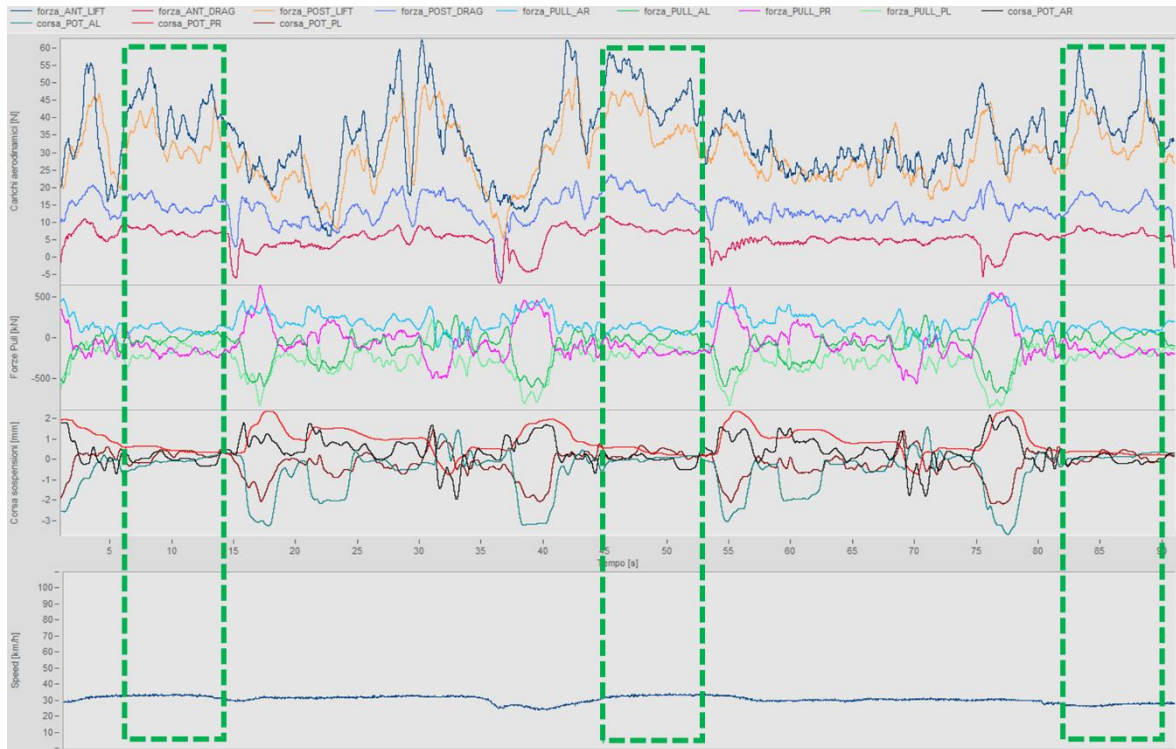

Figura 7.21: Segnali acquisiti nel run 19

In figura 7.22 sono raffigurati i dati acquisiti nel run eseguito in direzione opposta, cioè verso Sud.
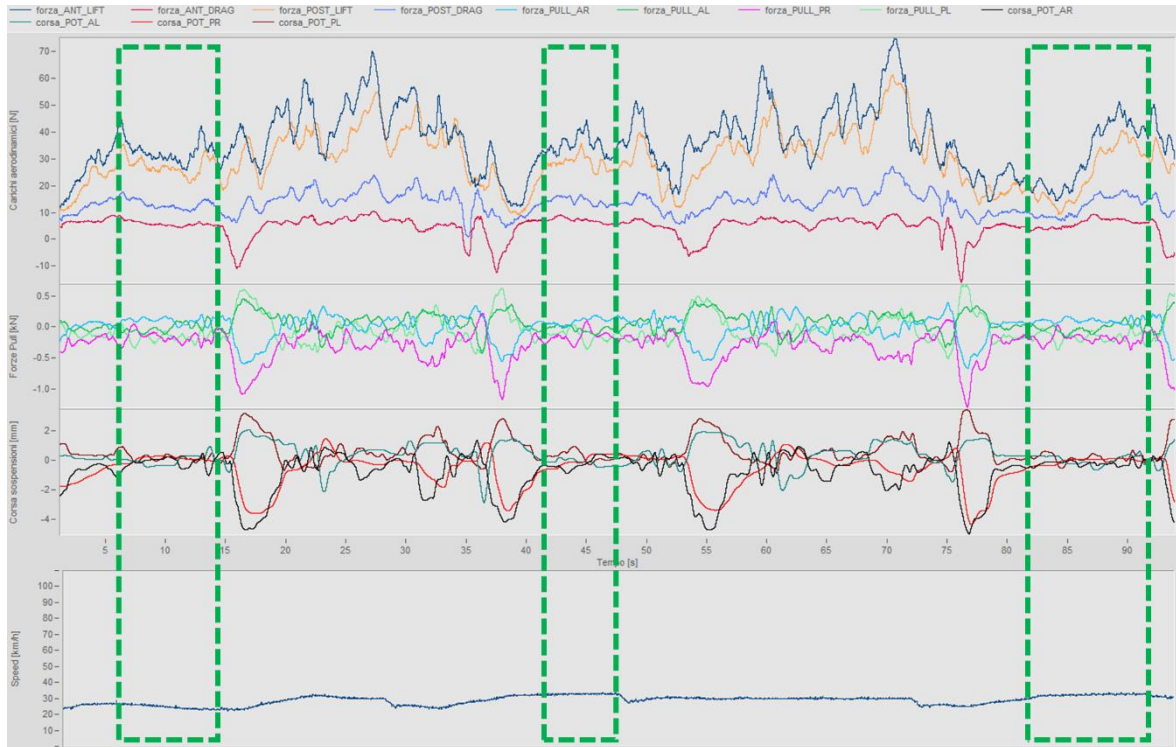

Figura 7.22: Segnali acquisiti nel run 120

La velocità media mantenuta dalla vettura nei rettilinei è stata di 32.1 km/h, la velocità del vento si è mantenuta pressochè costante tra i run in una direzione e quelli nella direzione opposta per cui si ritiene eliminata l'influenza del vento.

I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   29.6 N
- Drag ala anteriore=   3.9 N
- Downforce ala posteriore=   13.6 N
- Drag ala posteriore=   7.5 N

Run a 50 km/h

In figura 7.23 e 7.24 si riportano rispettivamente i segnali acquisiti nel run a 50 km/h in un senso e nel senso opposto.
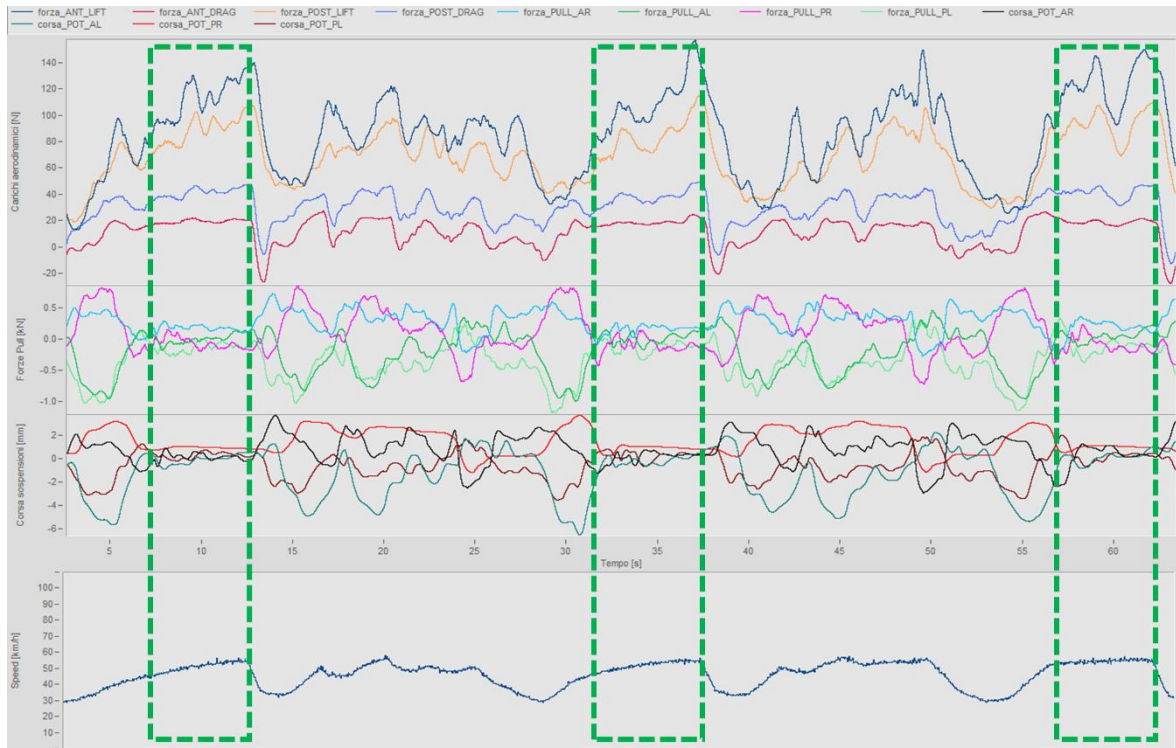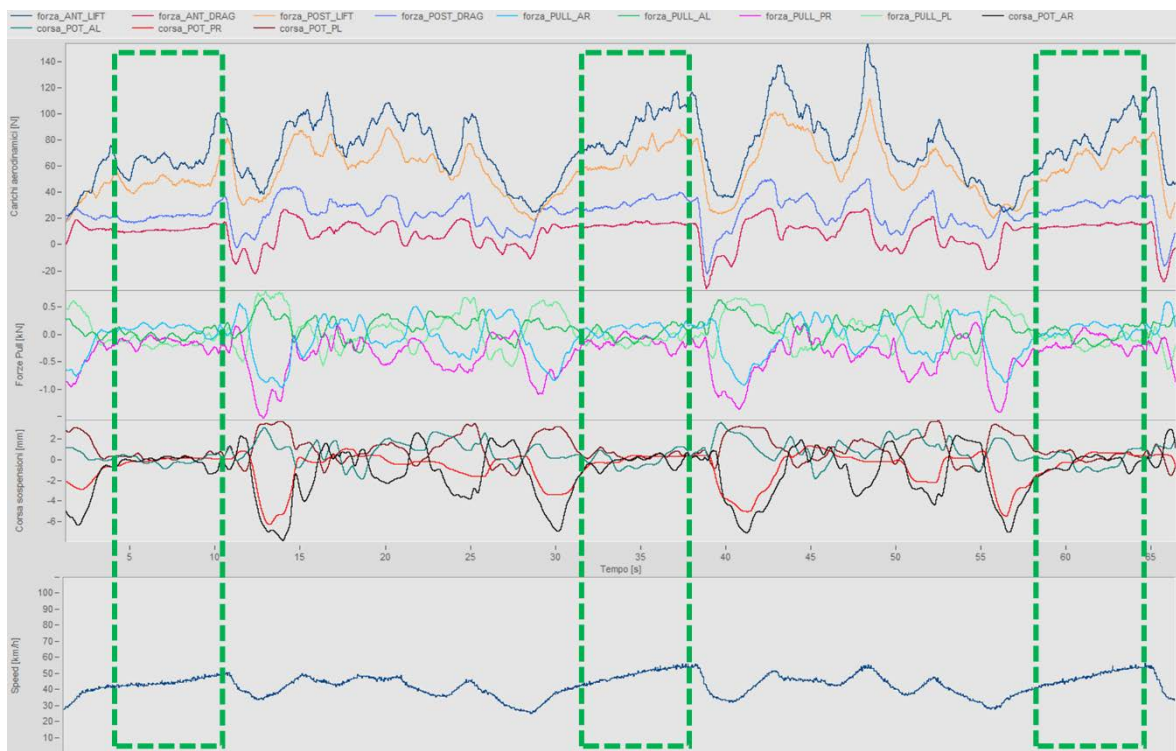

Figura 7.23: Segnali acquisiti nel run 22

Figura 7.24: Segnali acquisiti nel run 21

Anche in questi run si nota la difficoltà della vettura a mantenere la velocità costante di 50 km/h, eseguendo la media si può considerare una velocità del run di 48.6 km/h, trascurando l'influenza del vento che si è mantenuto costante nell'esecuzione dei run.

I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   62.0 N
- Drag ala anteriore=   11.2 N
- Downforce ala posteriore=   31.6 N
- Drag ala posteriore=   20.1 N

Run a 70 km/h

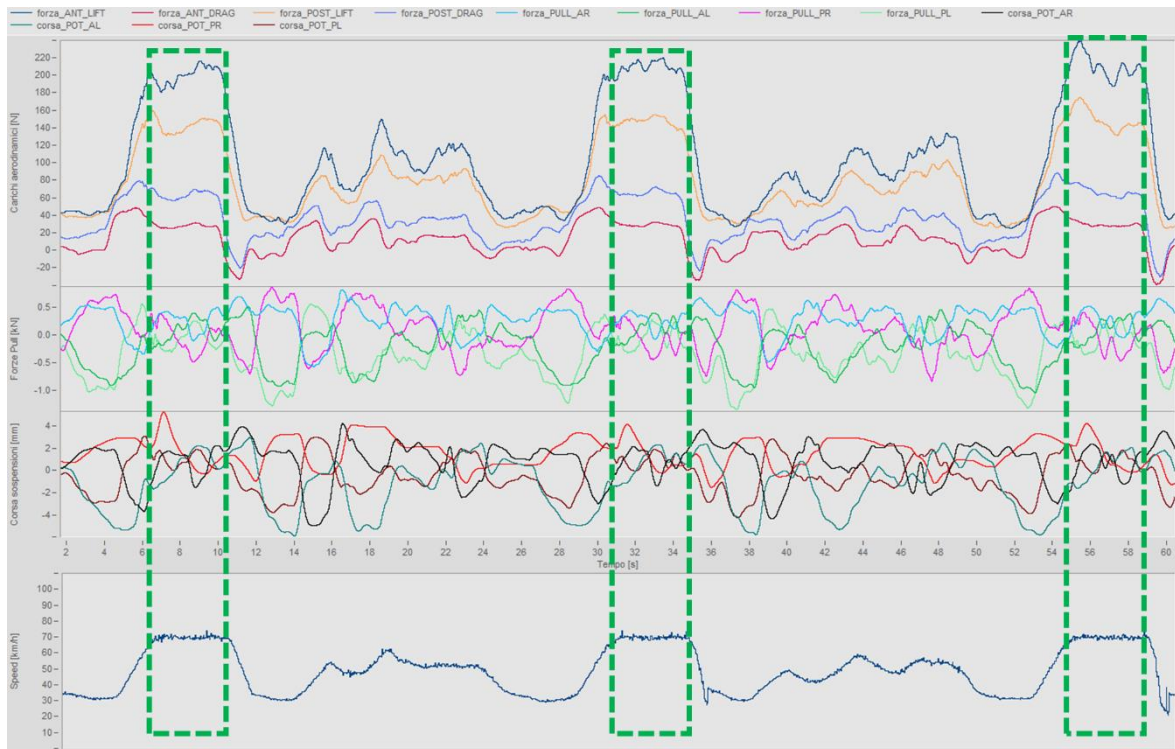In figura 7.25 vengono mostrati i segnali acquisiti nel run a 70 km/h.

Figura 7.25: Segnali acquisiti nel run 23

Durante il run la velocità del vento era in media di 1 km/h a favore di rettilineo, quindi la velocità da considerare per la prova è di 68.9 km/h, in quanto la velocità media registrata alle ruote è stata di 69.9 km/h.
I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   140.8 N
- Drag ala anteriore=   18.4 N
- Downforce ala posteriore=   61.8 N
- Drag ala posteriore=   33.6 N

Run a 90 km/h

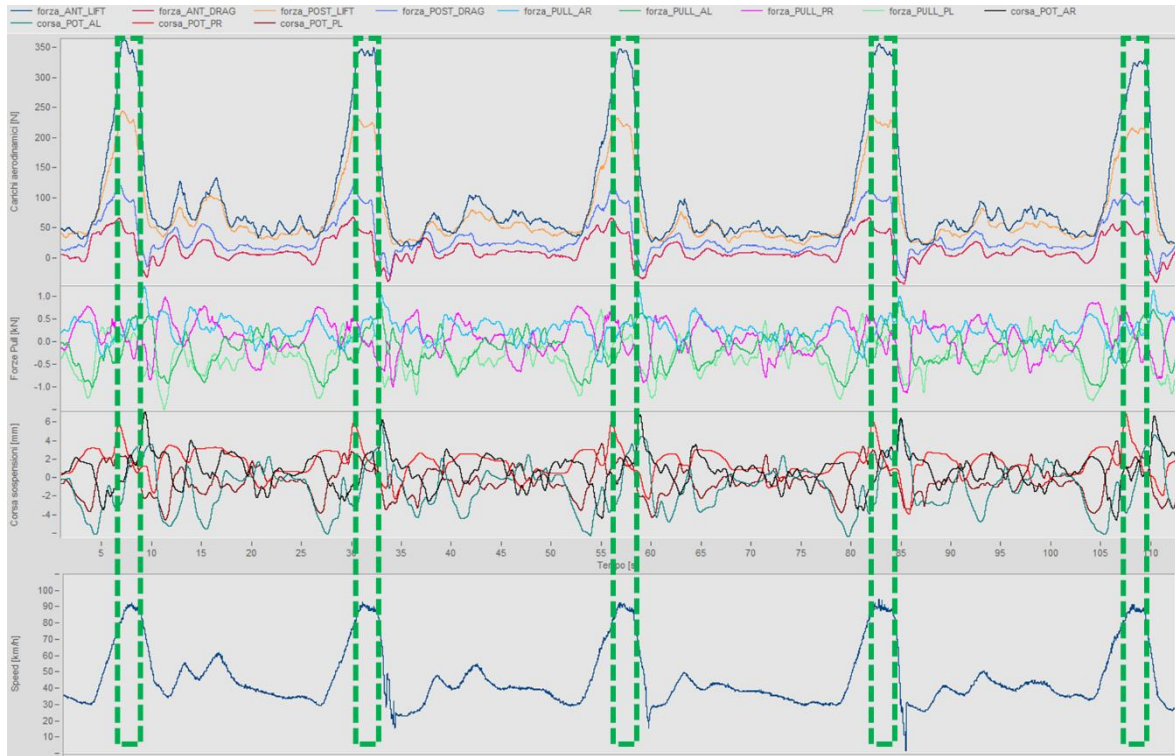In figura 7.26 vengono mostrati i segnali acquisiti nel run a 90 km/h.
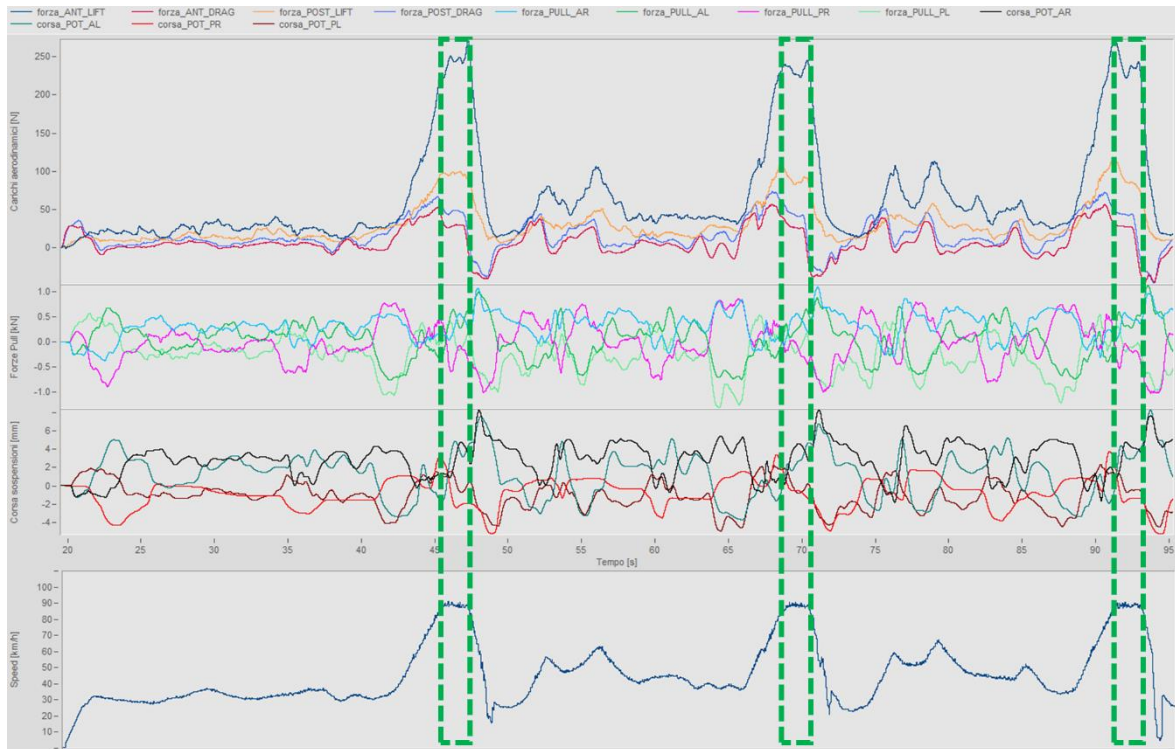
Figura 7.26: Segnali acquisiti nel run 24

Durante il run la velocità del vento era in media di 2 km/h nello stesso senso di percorrenza del rettilineo, quindi la velocità da considerare per la prova è di 87.0 km/h, in quanto la velocità media misurata alle ruote era di 89.0 km/h.

I risultati ottenuti in questo run sono:

- Lift ala anteriore=   242.8 N
- Drag ala anteriore=   26.2 N
- Lift ala posteriore=   98.7 N
- Drag ala posteriore=   50.8 N

Risultati dei run in configurazione di "Basso carico"

In tabella 7.4 vengono riassunti i risultati ottenuti durante i run a velocità costante con le ali in configurazione di "Basso carico".

CONFIGURAZIONE	VELOCITÀ [KM/H]	ANT LIFT [N]	ANT DRAG [N]	POST LIFT [N]	POST DRAG [N]
	32.1	29.6	3.9	15.6	7.5
B.B.	48.6	62.0	11.2	31.6	20.1
	68.9	140.8	18.4	61.8	33.6
	87.0	242.8	26.2	98.7	50.8

Tabella 7.4: Riassunto risultati ottenuti nei run a velocità costante in configurazione "Basso carico"

In figura 7.27 vengono mostrati gli andamenti dei risultati ottenuti.

Figura 7.27: Andamento dei carichi in funzione della velocità nei run eseguiti in configurazione di "Basso carico"

7.2.4 Run in configurazione "Basso carico" all'anteriore e di "Alto carico" al posteriore

Si va ora ad analizzare le configurazioni miste, partiamo da quella che prevede l'ala anteriore scarica e quella posteriore carica.

Run a 30 km/h

In figura 7.28 sono mostrati i segnali acquisiti nel run eseguito in direzione Nord e nei riquadri in verde gli intervalli in cui si è mantenuta la velocità costante.
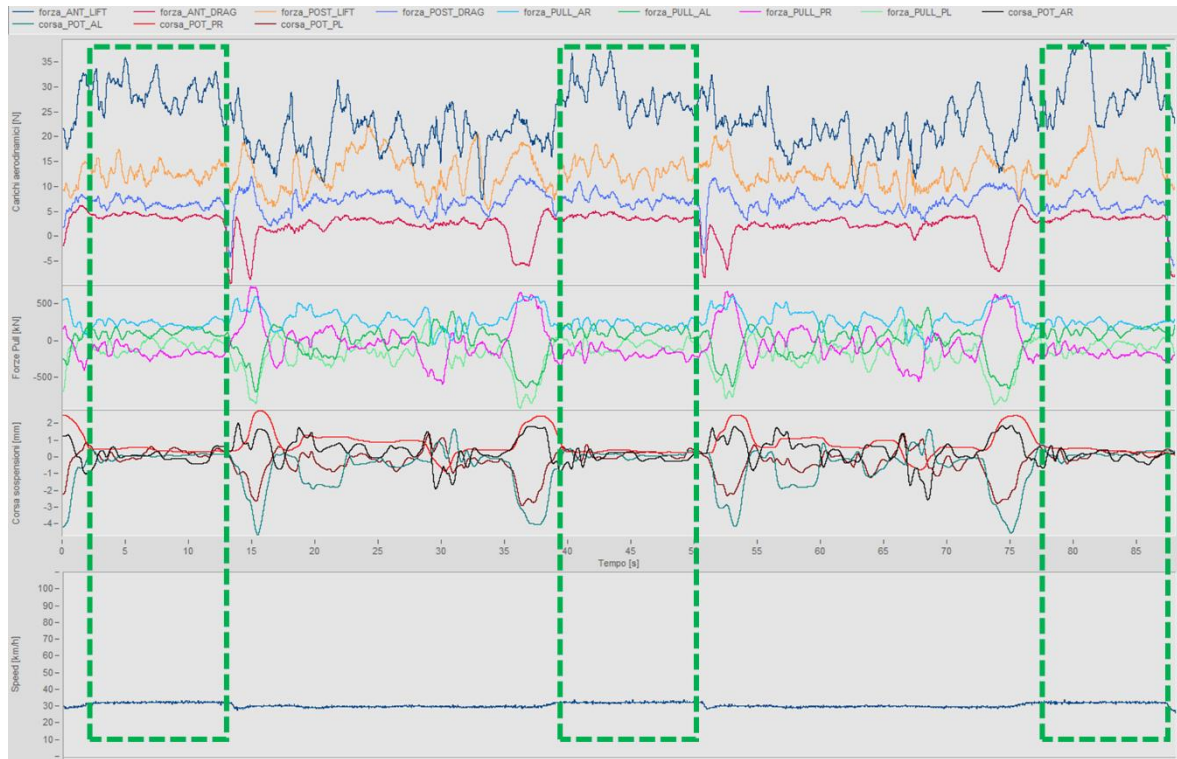

Figura 7.28: Segnali acquisiti nel run 25

In figura 7.29 sono raffigurati i dati acquisiti nel run eseguito in direzione opposta, cioè verso Sud.
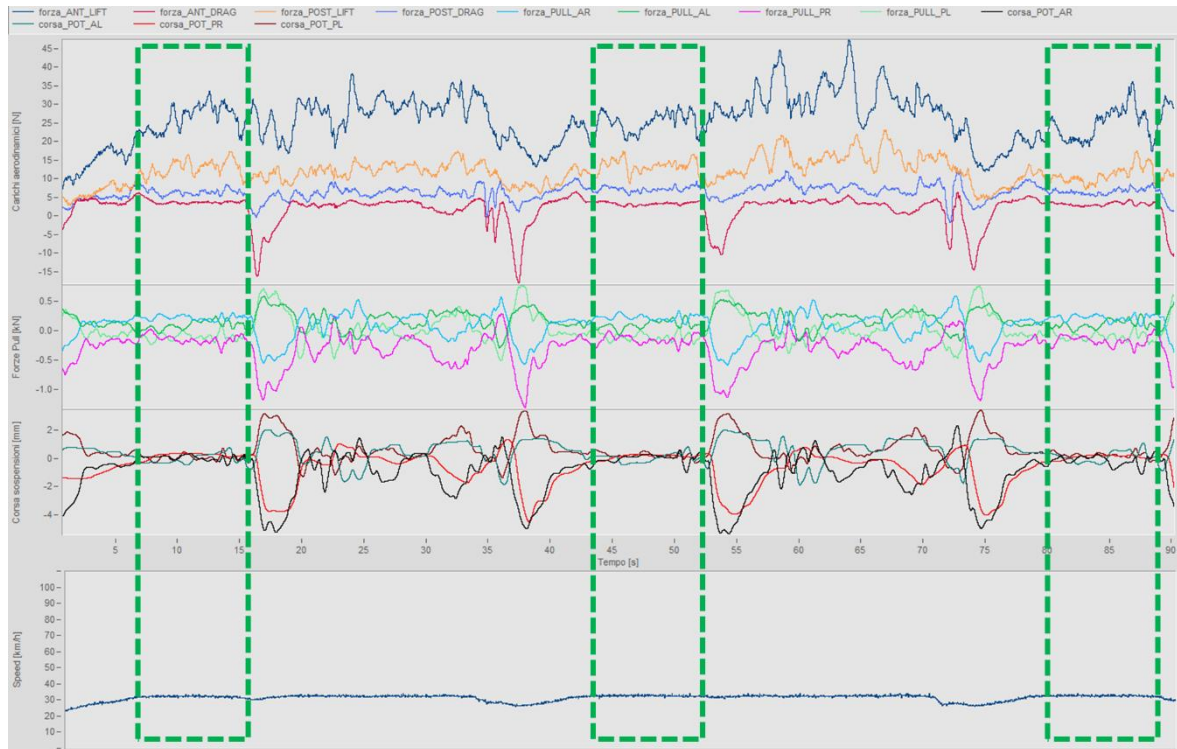

Figura 7.29: Segnali acquisiti nel run 26

109

La velocità media mantenuta dalla vettura nei rettilinei è stata di 32.8 km/h, la velocità del vento si è mantenuta pressochè costante tra i run in una direzione e quelli nella direzione opposta per cui si ritiene eliminata l'influenza del vento.

I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   27.8 N
- Drag ala anteriore=   3.4 N
- Downforce ala posteriore=   42.8 N
- Drag ala posteriore=   19.6 N

In figura 7.30 e 7.31 si riportano rispettivamente i segnali acquisiti nel run a 50 km/h in un senso e nel senso opposto.

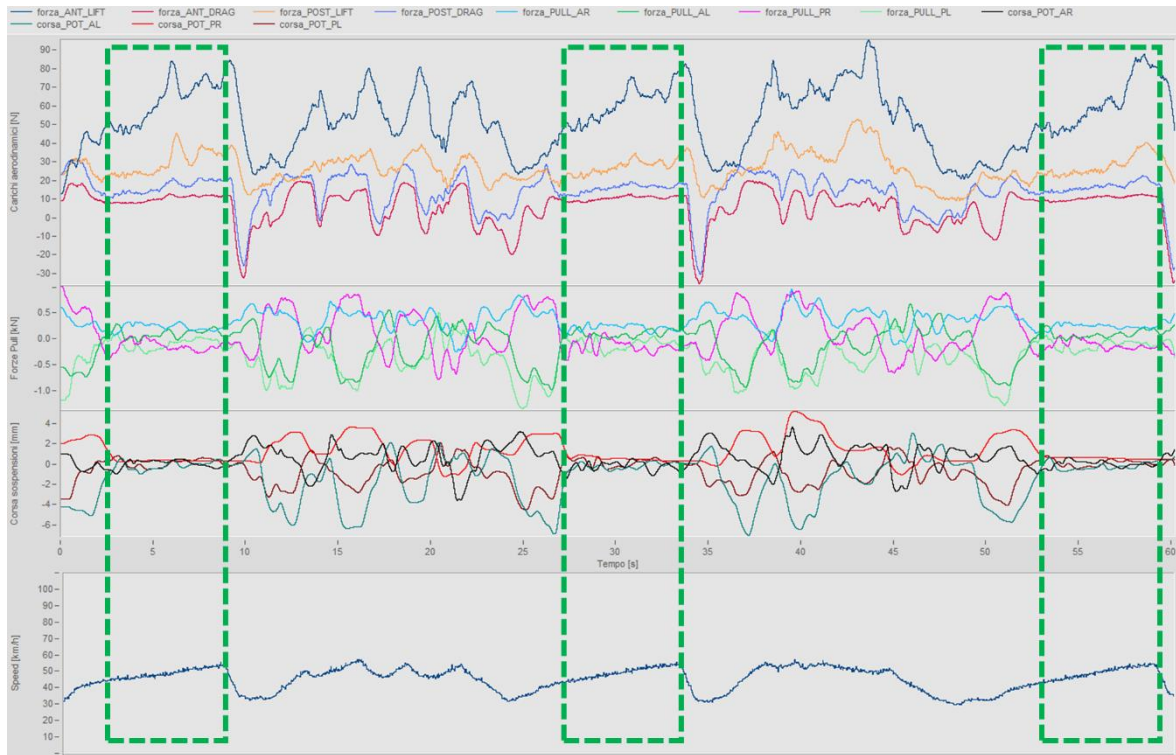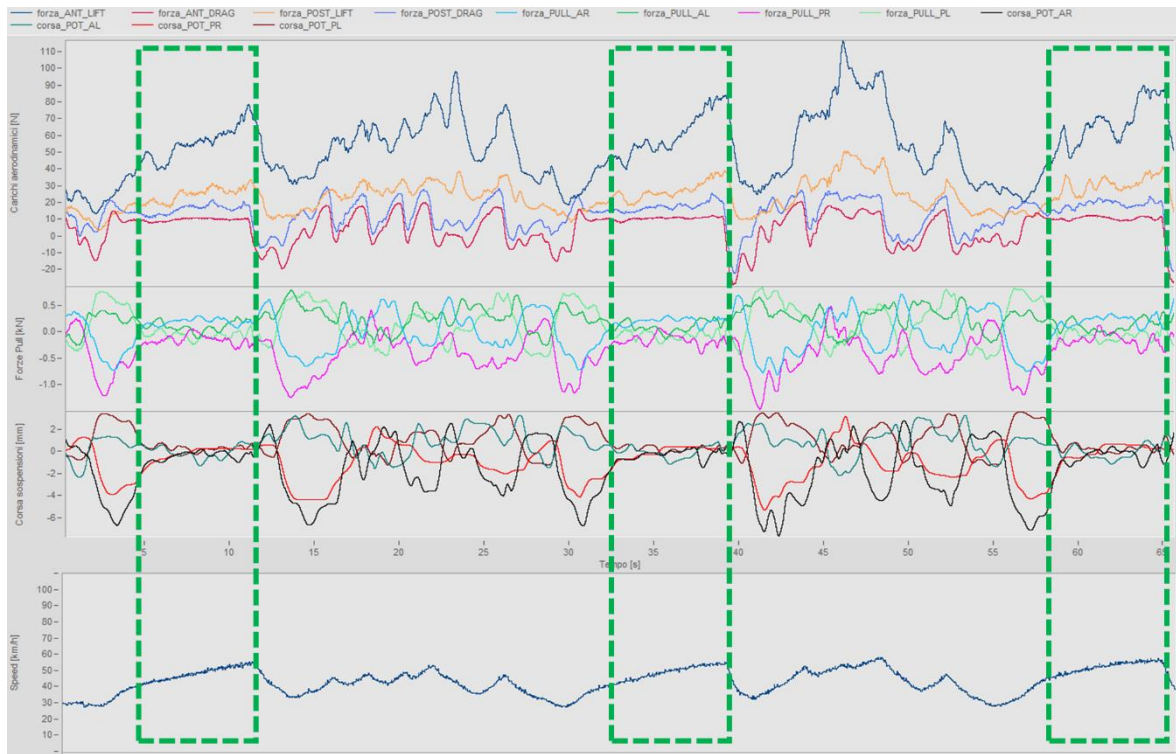*Figura 7.30: Segnali acquisiti nel run 28*
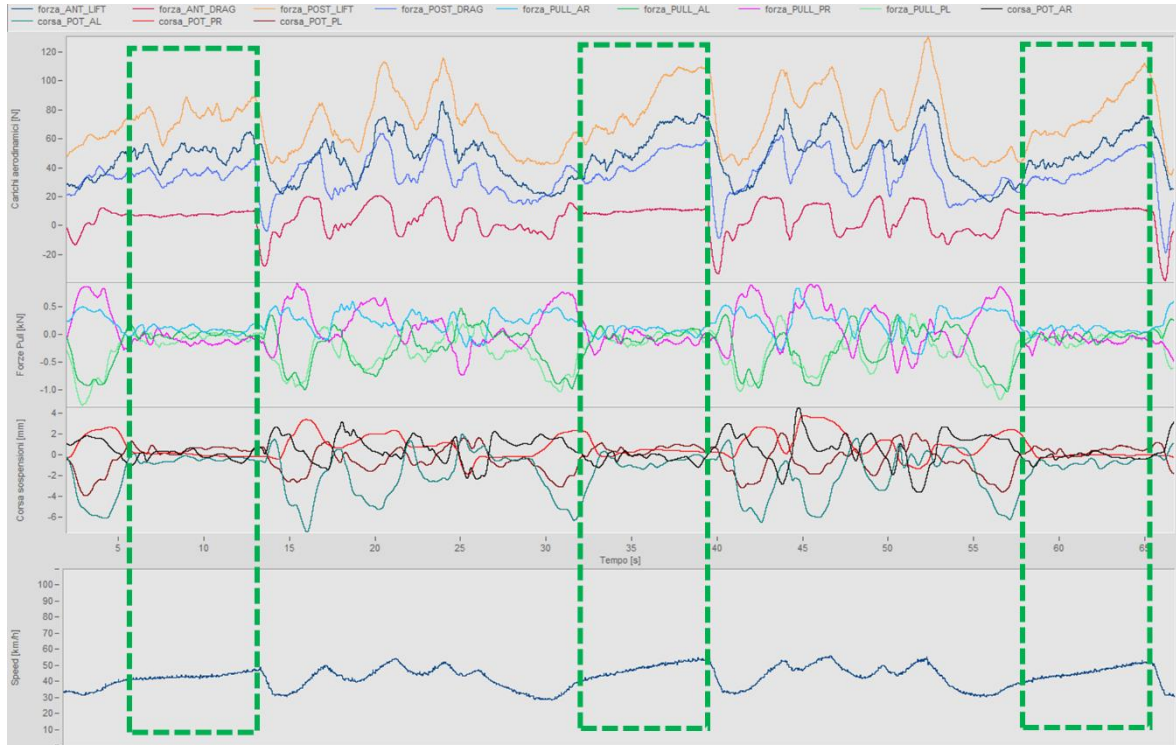
Figura 7.31: Segnali acquisiti nel run 27

Si nota la difficoltà della vettura a mantenere la velocità costante di 50 km/h, eseguendo la media si può considerare una velocità del run di 47.4 km/h, trascurando l'influenza del vento che si è mantenuto costante nell'esecuzione dei run.

I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   59.8 N
- Drag ala anteriore=   8.5 N
- Downforce ala posteriore=   86.6 N
- Drag ala posteriore=   42.2 N

Run a 70 km/h

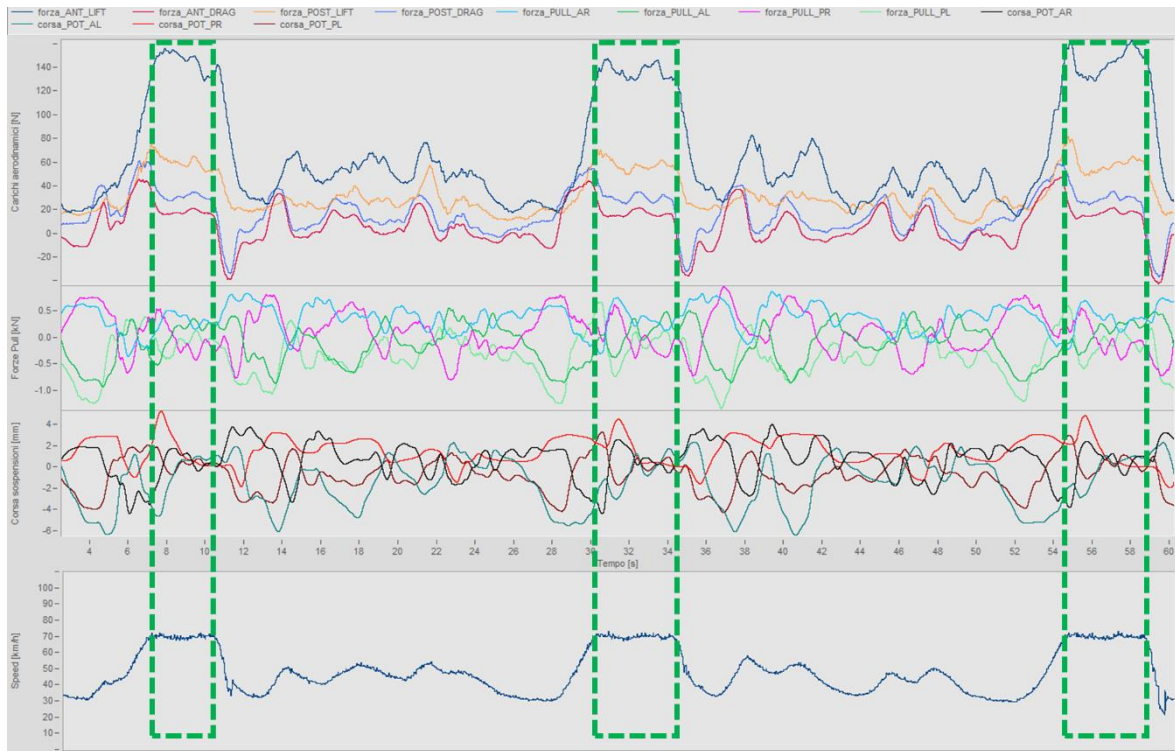In figura 7.32 vengono mostrati i segnali acquisiti nel run a 70 km/h.

Figura 7.32: Segnali acquisiti nel run 29

Durante il run la velocità del vento era in media di 0.5 km/h in direzione contraria al rettilineo, quindi la velocità da considerare per la prova è di 70.3 km/h, in quanto la velocità media registrata alle ruote è stata di 69.8 km/h. I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   128.3 N
- Drag ala anteriore=   15.9 N
- Downforce ala posteriore=   174.1 N
- Drag ala posteriore=   91.8 N

Run a 90 km/h

In figura 7.33 vengono mostrati i segnali acquisiti nel run a 90 km/h.
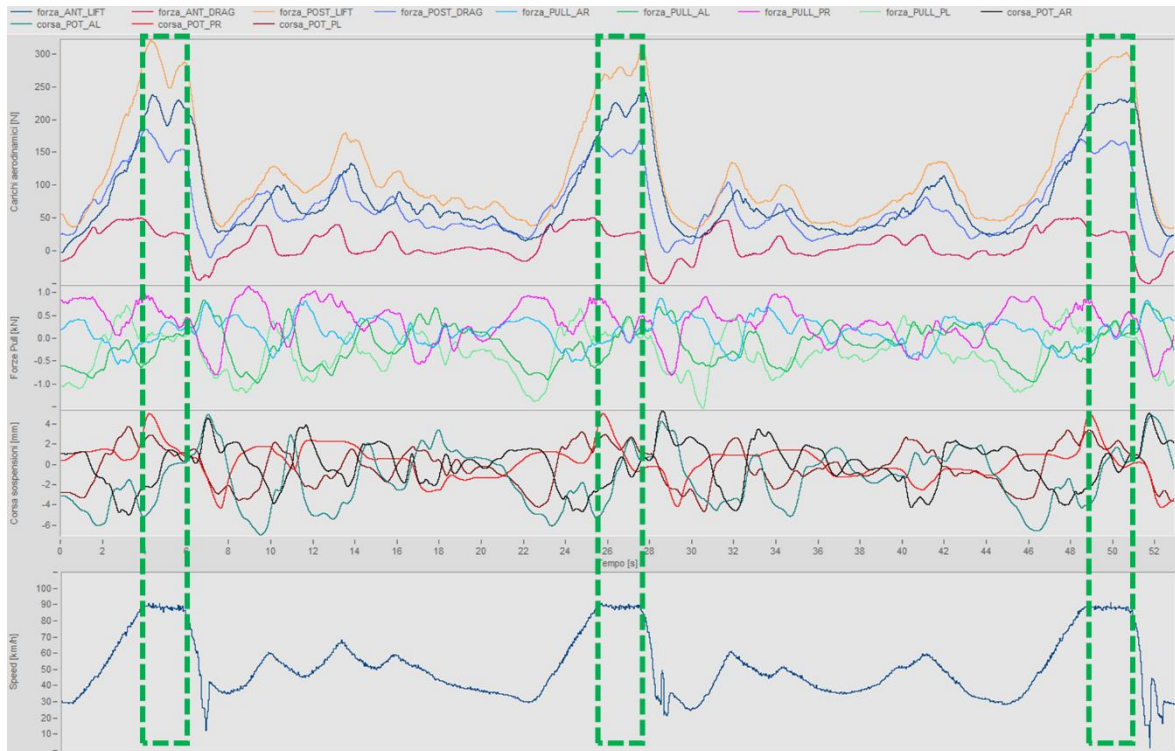
Figura 7.33: Segnali acquisiti nel run 30

Durante il run la velocità del vento era in media di 0.5 km/h in direzione contraria al verso di percorrenza del rettilineo, quindi la velocità da considerare per la prova è di 90.0 km/h, in quanto la velocità media misurata alle ruote era di 88.5 km/h.

I risultati ottenuti in questo run sono:

- Lift ala anteriore=   225.3 N
- Drag ala anteriore=   26.5 N
- Lift ala posteriore=   290.7 N
- Drag ala posteriore=   160.2 N

Risultati dei run in configurazione di "Basso carico" all'anteriore e "Alto carico" al posteriore

In tabella 7.5 vengono riassunti i risultati ottenuti durante i run a velocità costante con l'ala anteriore in configurazione di "Basso carico" e quella posteriore in configurazione di "Alto carico".

CONFIGURAZIONE	VELOCITÀ [KM/H]	ANT LIFT [N]	ANT DRAG [N]	POST LIFT [N]	POST DRAG [N]
	32.8	27.8	3.4	42.8	19.6
B.A.	47.4	59.8	8.5	86.6	42.2
	70.3	128.3	15.9	174.1	91.8
	90.0	225.3	26.5	290.7	160.2

Tabella 7.5: Riassunto risultati ottenuti nei run a velocità costante in configurazione "Basso carico" all'anteriore e di "Alto carico" al posteriore
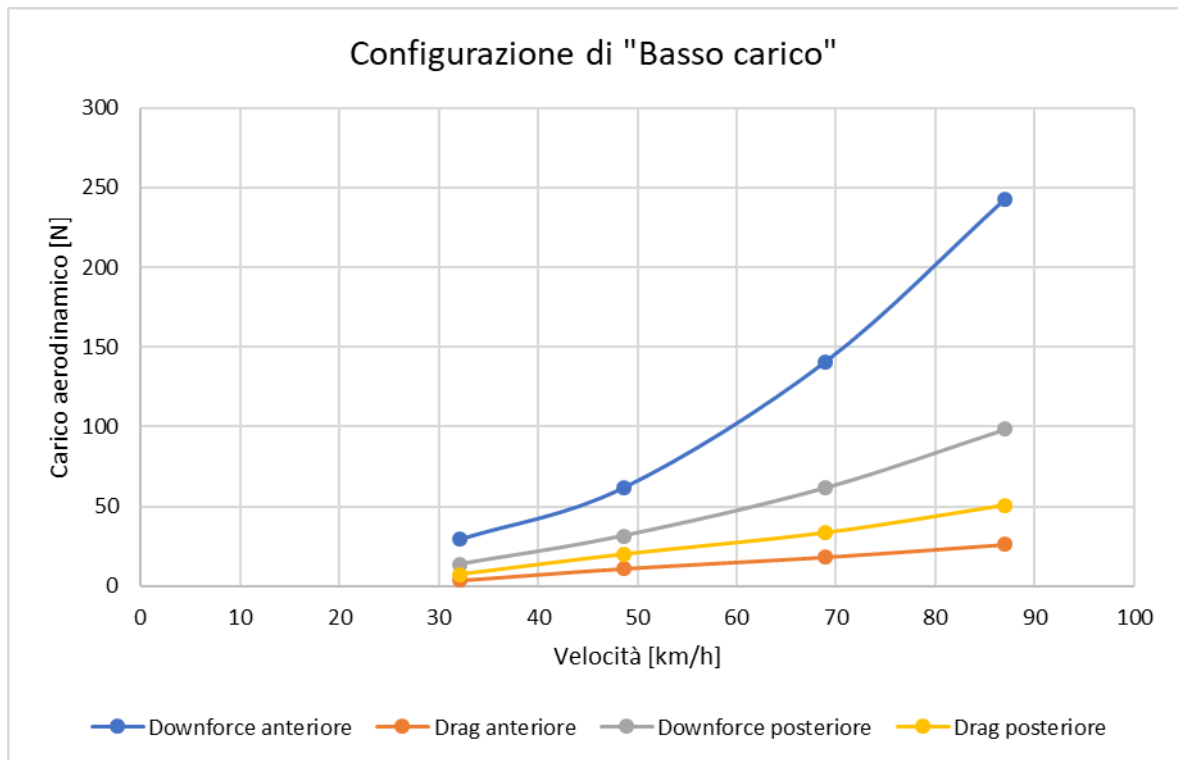
In figura 7.34 vengono mostrati gli andamenti dei risultati ottenuti.
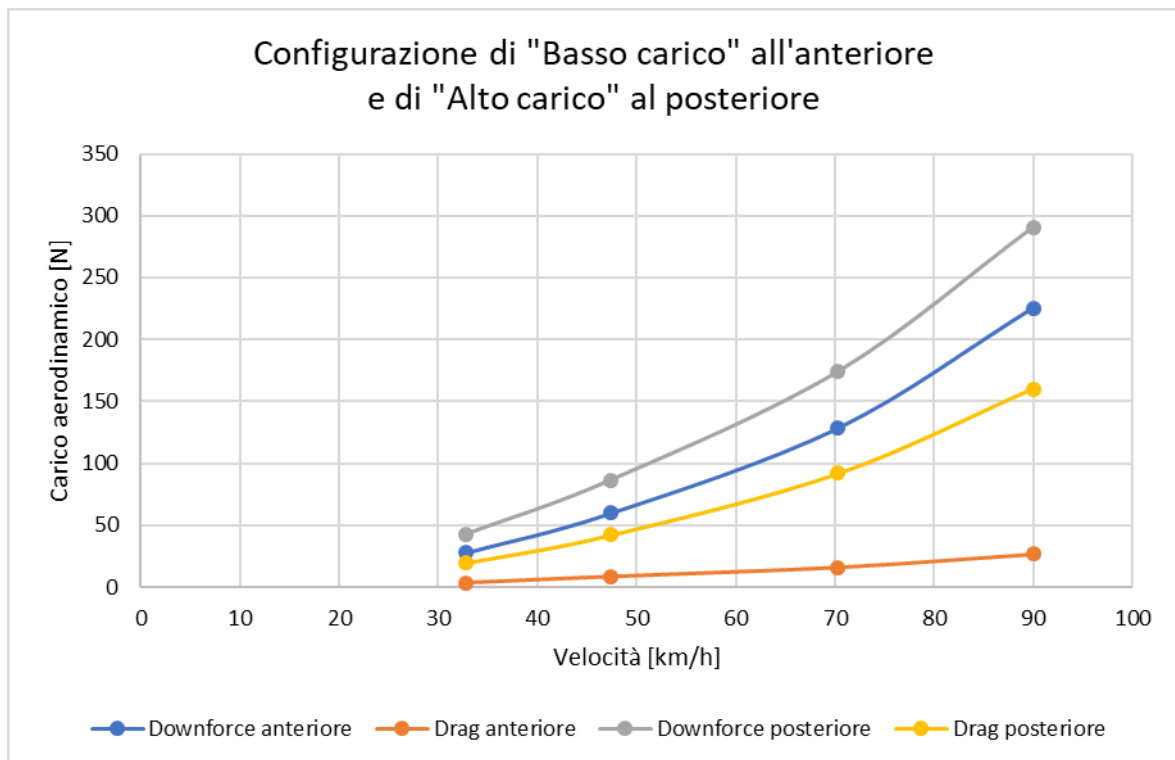
Figura 7.34: Andamento dei carichi in funzione della velocità nei run eseguiti in configurazione di "Basso carico" all'anteriore e di "Alto carico" al posteriore

7.2.5 Run in configurazione "Medio carico" all'anteriore e di "Alto carico" al posteriore

<u>Run a 30 km/h</u>

In figura 7.35 sono mostrati i segnali acquisiti nel run eseguito in direzione Nord e nei riquadri in verde gli intervalli in cui si è mantenuta la velocità costante.
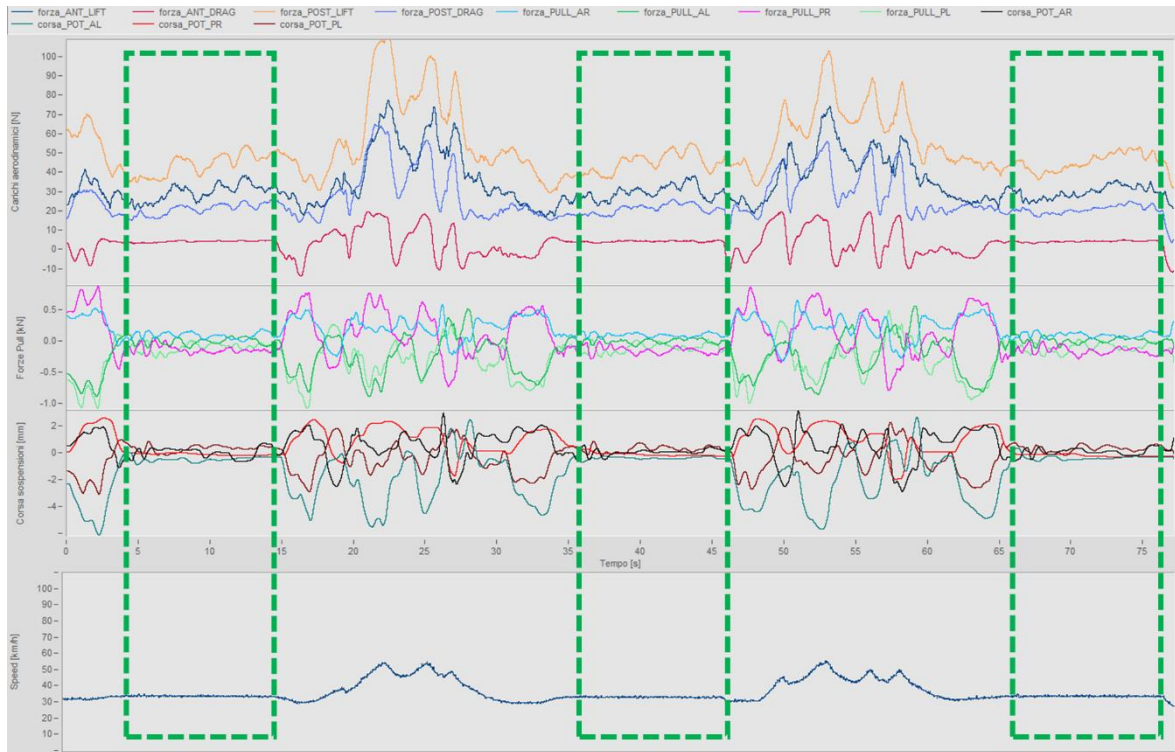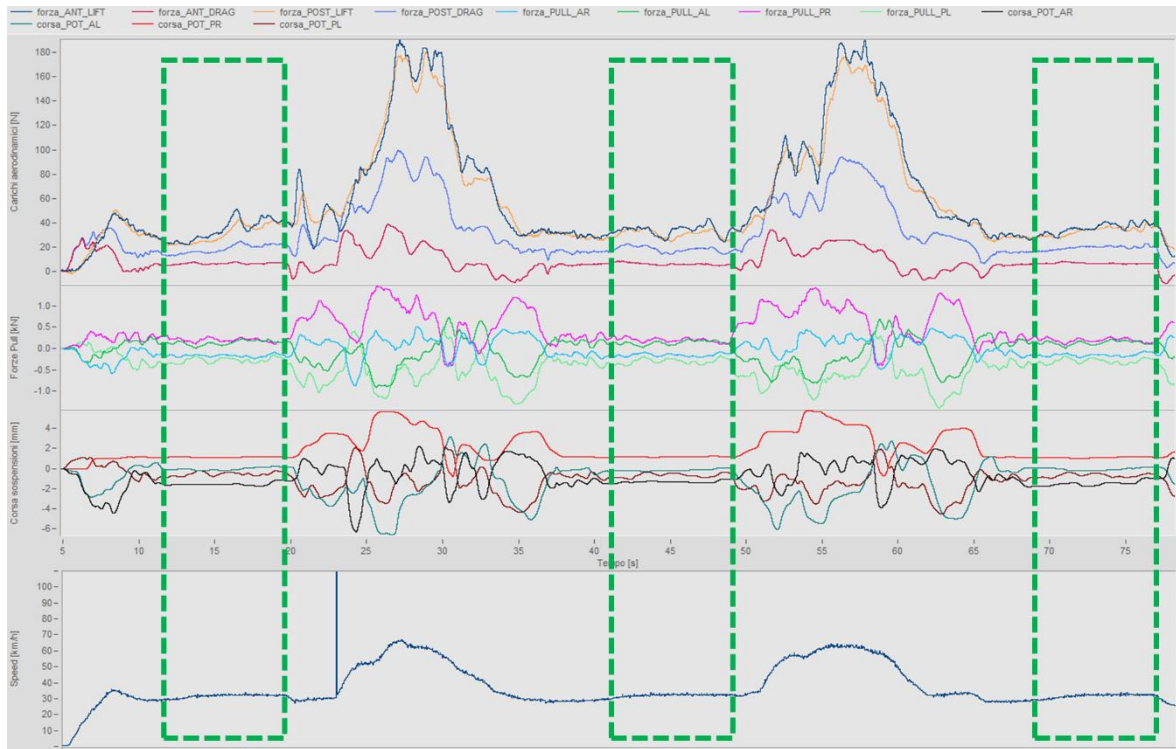

Figura 7.35: Segnali acquisiti nel run 7

In figura 7.36 sono raffigurati i dati acquisiti nel run eseguito in direzione opposta, cioè verso Sud.
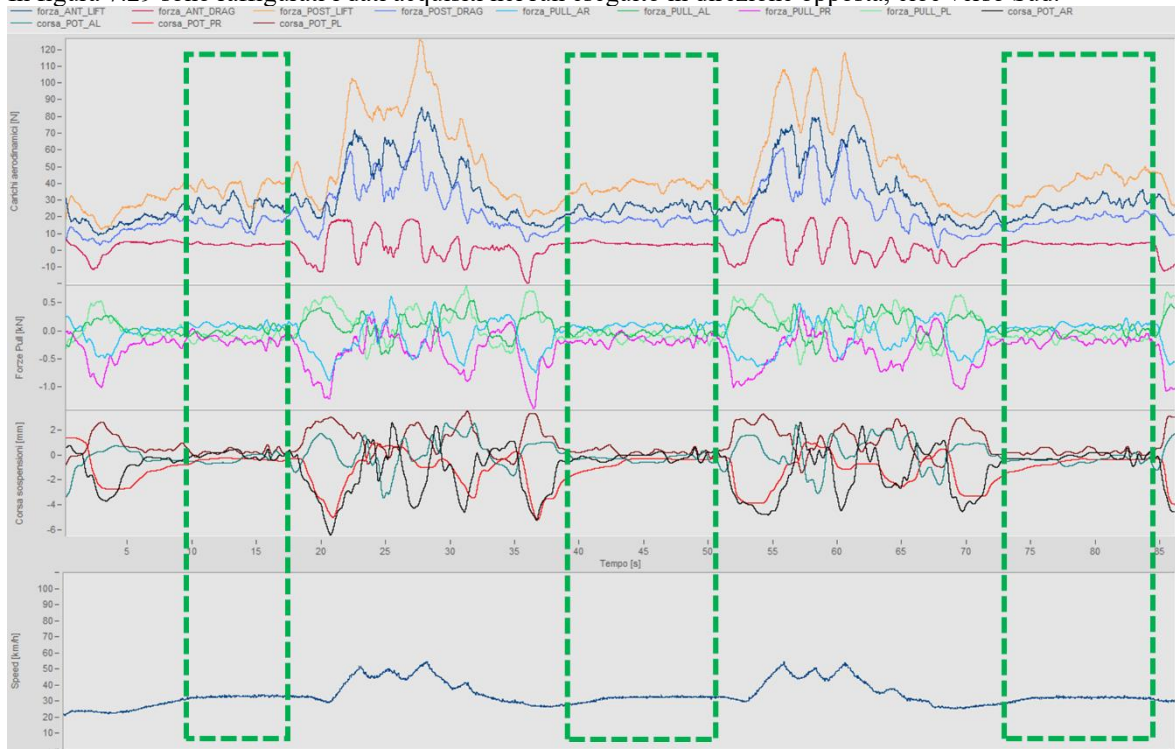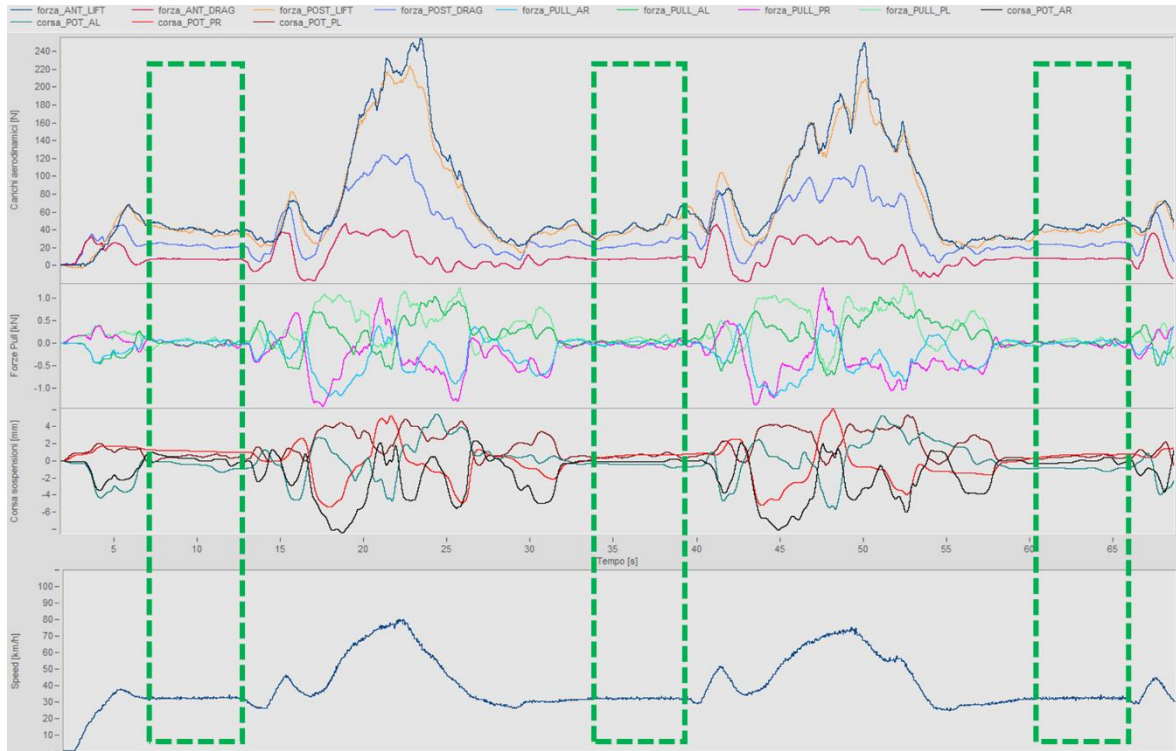

Figura 7.36: Segnali acquisiti nel run 8

La velocità media mantenuta dalla vettura nei rettilinei è stata di 32.1 km/h, la velocità del vento si è mantenuta pressochè costante tra i run in una direzione e quelli nella direzione opposta per cui si ritiene eliminata l'influenza del vento.

I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   39.5 N
- Drag ala anteriore=   6.3 N
- Downforce ala posteriore=   36.8 N
- Drag ala posteriore=   21.4 N

Run a 50 km/h

In figura 7.37 e 7.38 si riportano rispettivamente i segnali acquisiti nel run a 50 km/h in un senso e nel senso opposto.
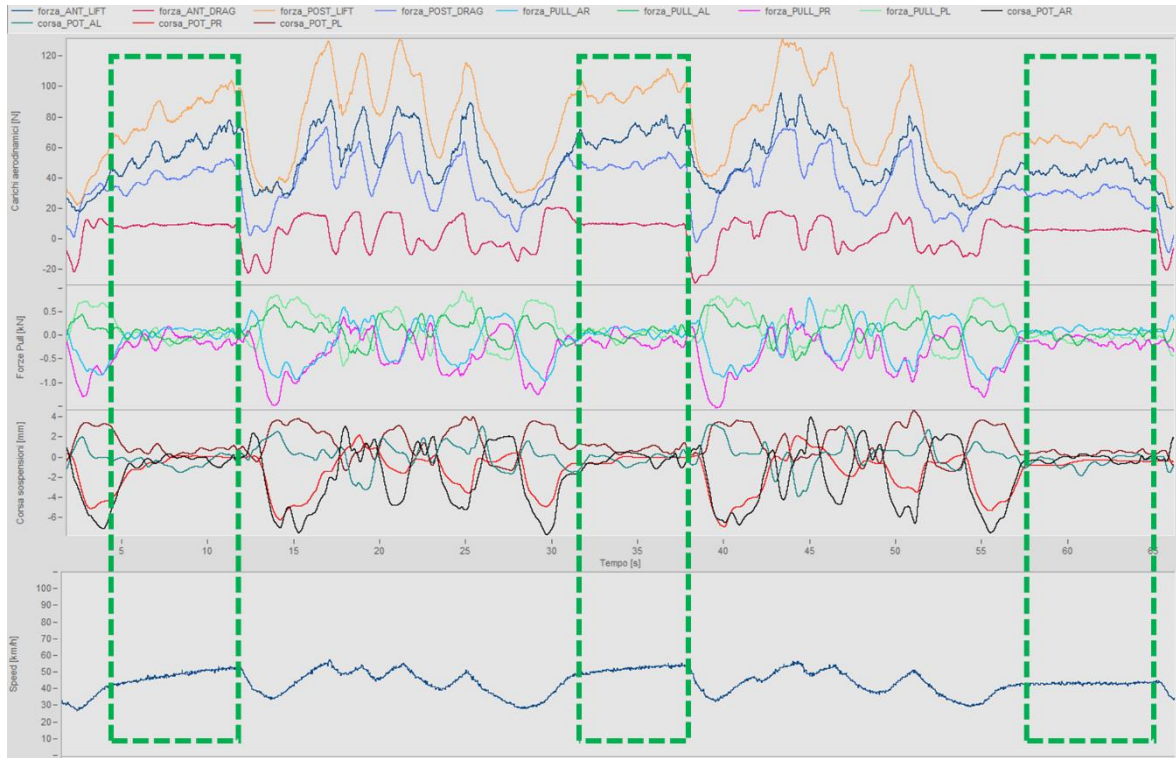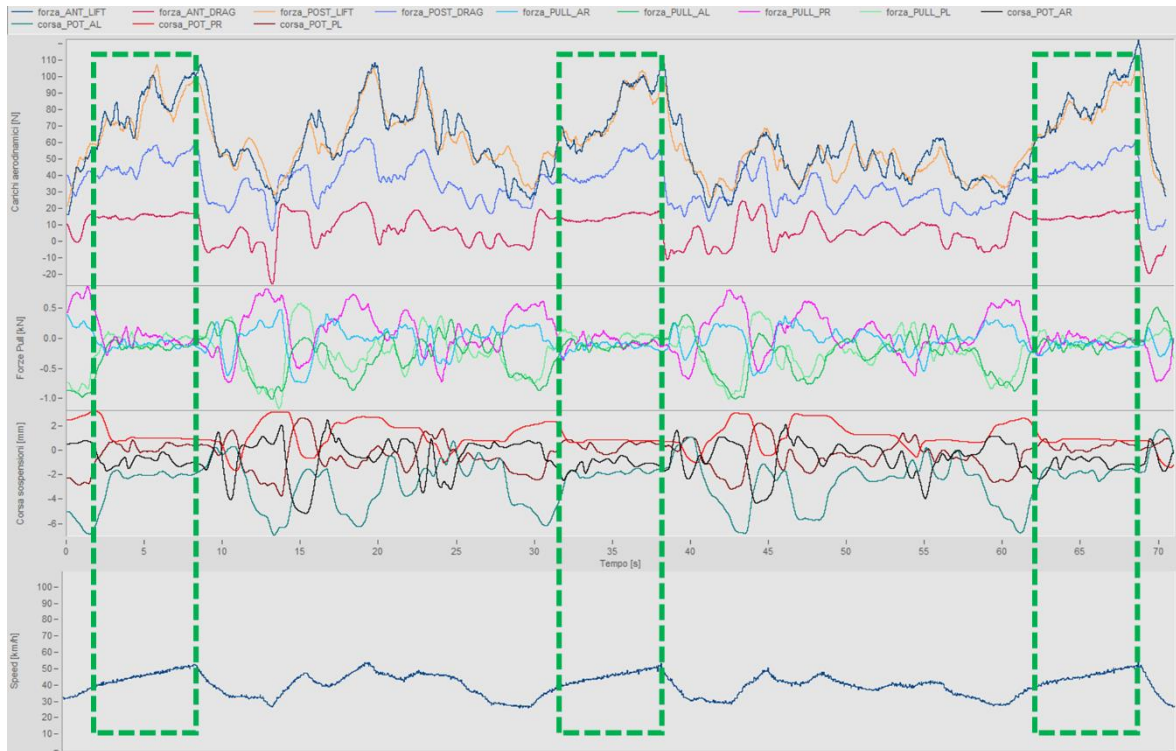

Figura 7.37: Segnali acquisiti nel run 9
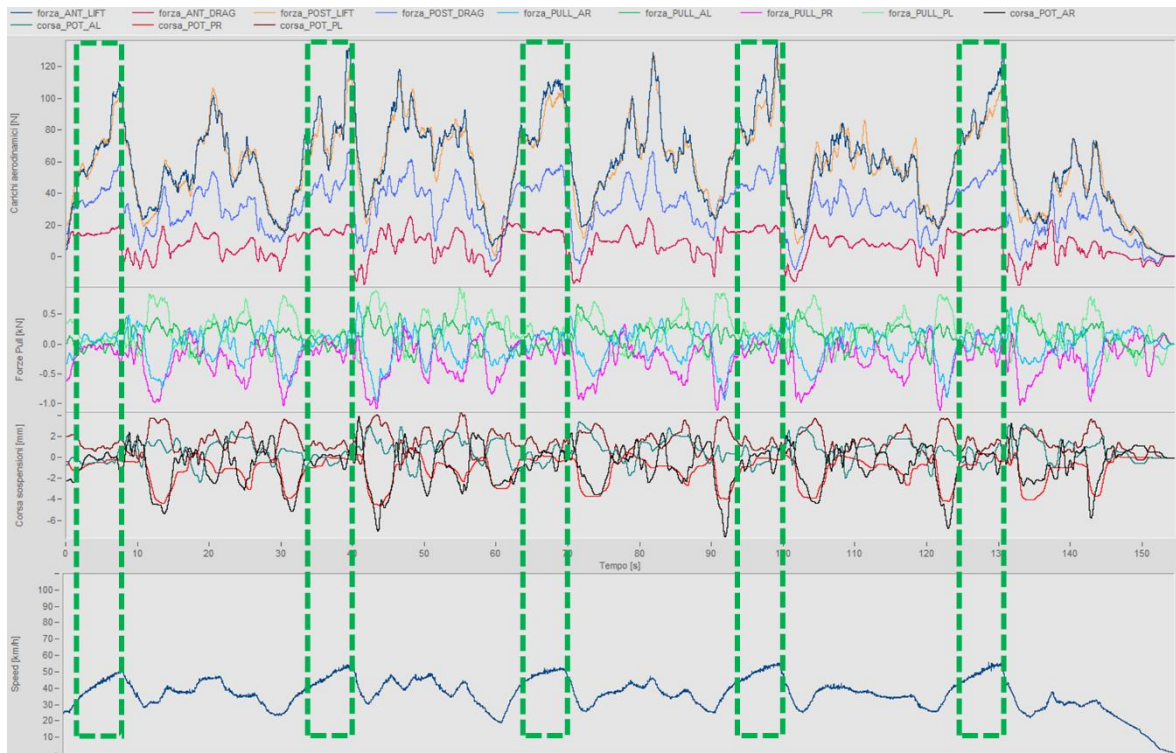
Figura 7.38: Segnali acquisiti nel run 10

Anche in questi run si nota la difficoltà della vettura a mantenere la velocità costante di 50 km/h, la velocità media considerata per il run è di 48.4 km/h, mantenendosi la velocità del vento costante in entrambi i run.
I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   89.2 N
- Drag ala anteriore=   15.4 N
- Downforce ala posteriore=   83.9 N
- Drag ala posteriore=   48.4 N

Run a 70 km/h

In figura 7.39 vengono mostrati i segnali acquisiti nel run a 70 km/h.
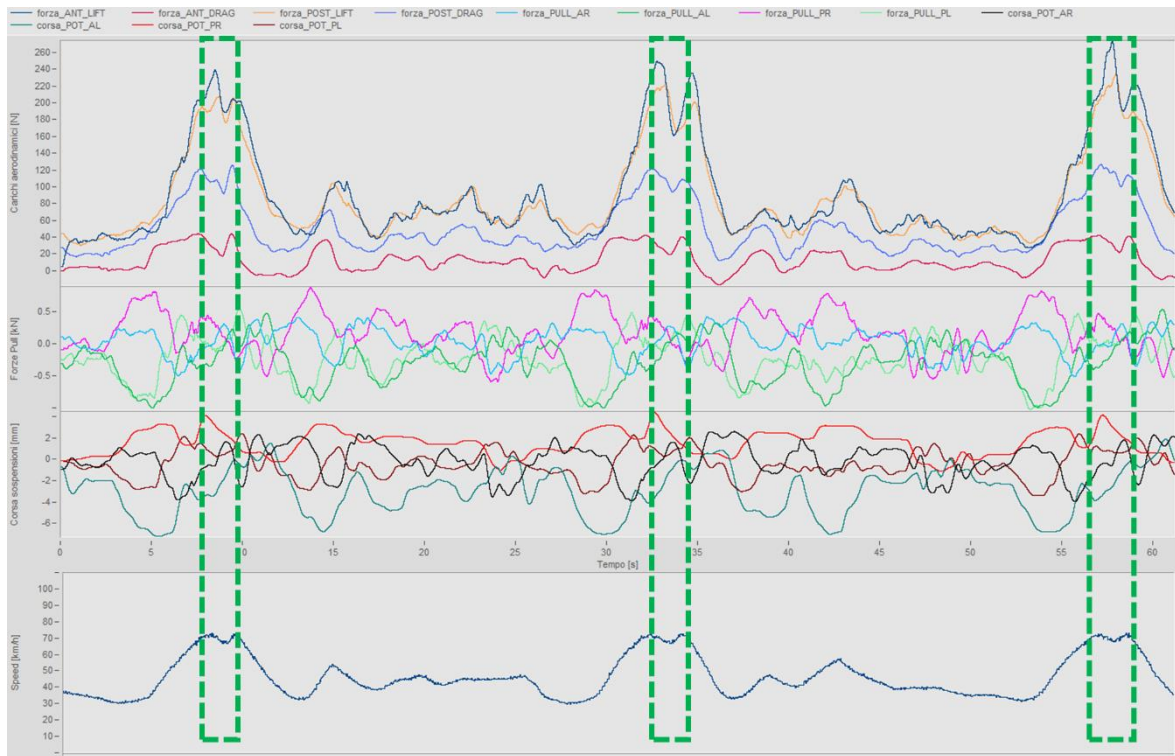
Figura 7.39: Segnali acquisiti nel run 11

Durante il run la velocità del vento era in media di 1.5 km/h in direzione opposta al rettilineo, quindi la velocità da considerare per la prova è di 71.8 km/h, in quanto la velocità media registrata alle ruote è stata di 70.3 km/h. I risultati ottenuti in questo run sono:

- Downforce ala anteriore=   208.5 N
- Drag ala anteriore=   32.9 N
- Downforce ala posteriore=   192.8 N
- Drag ala posteriore=   110.6 N

Run a 90 km/h

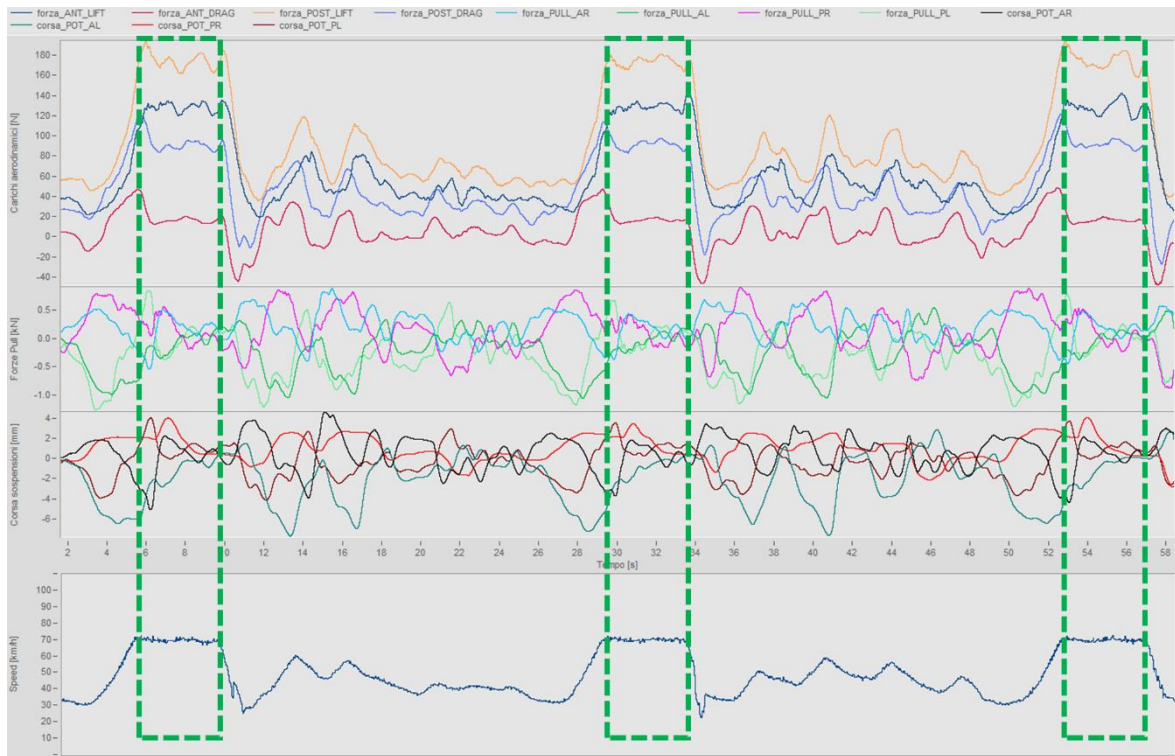In figura 7.40 vengono mostrati i segnali acquisiti nel run a 90 km/h.
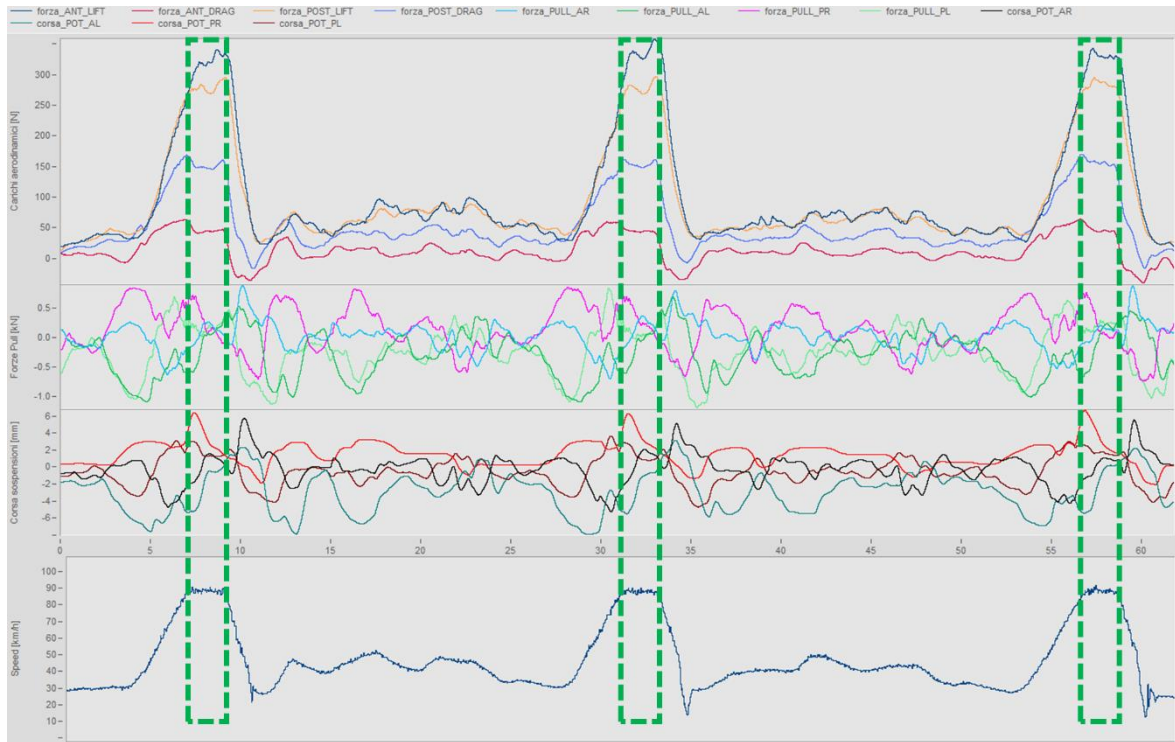
Figura 7.40: Segnali acquisiti nel run 12

Durante il run la velocità del vento era pressochè zero, quindi la velocità da considerare per la prova è la stessa della velocità misurata alle ruote ed è di 88.5 km/h.

I risultati ottenuti in questo run sono:

- Lift ala anteriore=   330.6 N
- Drag ala anteriore=   43.3 N
- Lift ala posteriore=   286.6 N
- Drag ala posteriore=   154.2 N

Risultati dei run in configurazione di "Medio carico" all'anteriore e di "Alto carico" al posteriore

In tabella 7.6 vengono riassunti i risultati ottenuti durante i run a velocità costante con le ali in configurazione di "Medio carico" all'anteriore e di "Alto carico" al posteriore.

CONFIGURAZIONE	VELOCITÀ [KM/H]	ANT LIFT [N]	ANT DRAG [N]	POST LIFT [N]	POST DRAG [N]
M.A.	32.1	39.5	6.3	36.8	21.4
	48.4	89.2	15.4	83.9	48.4
	71.8	208.5	32.9	192.8	110.6
	88.5	330.6	43.3	286.6	154.2

Tabella 7.6: Riassunto risultati ottenuti nei run a velocità costante in configurazione "Medio carico" all'anteriore e di "Alto carico" al posteriore

In figura 7.41 vengono mostrati gli andamenti dei risultati ottenuti.
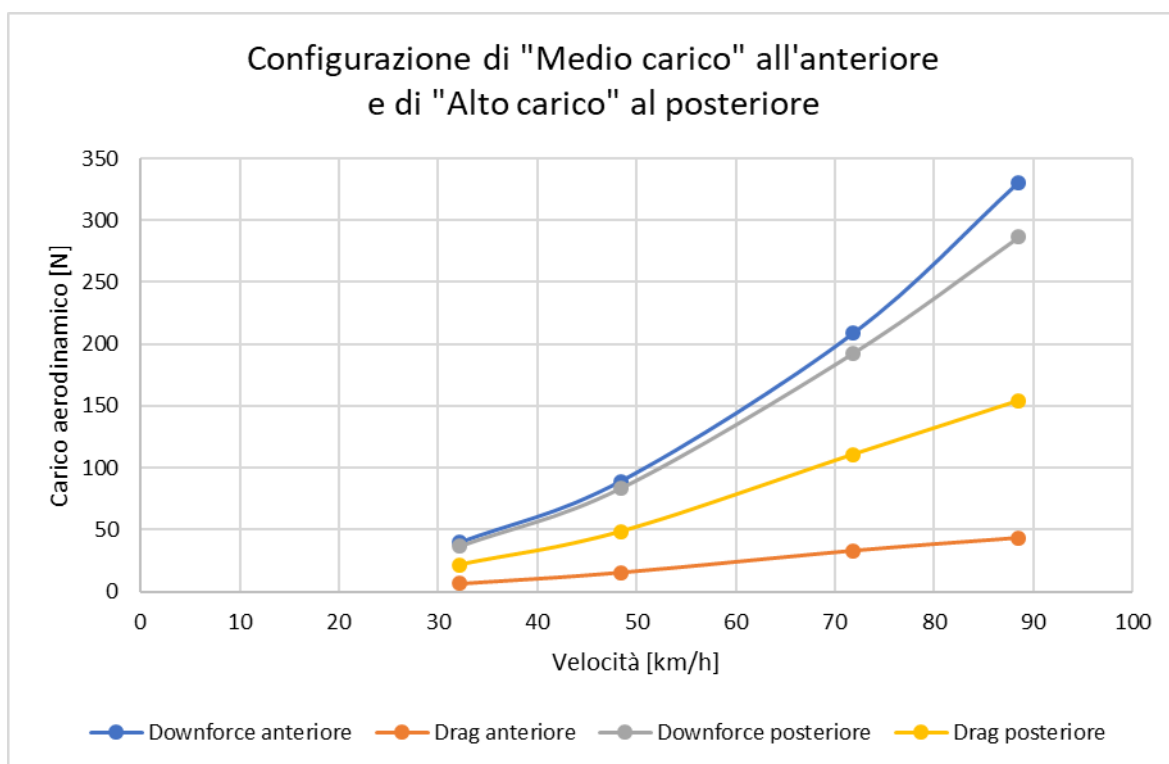
Figura 7.41: Andamento dei carichi in funzione della velocità nei run eseguiti in configurazione di "Medio carico" all'anteriore e di "Alto carico" al posteriore

7.3 Tracciato

Dopo aver eseguito i run in rettilineo sono stati sistemati i birilli per formare il circuito rappresentato in figura 7.42, di cui viene quotata la planimetria e vengono numerati i settori.
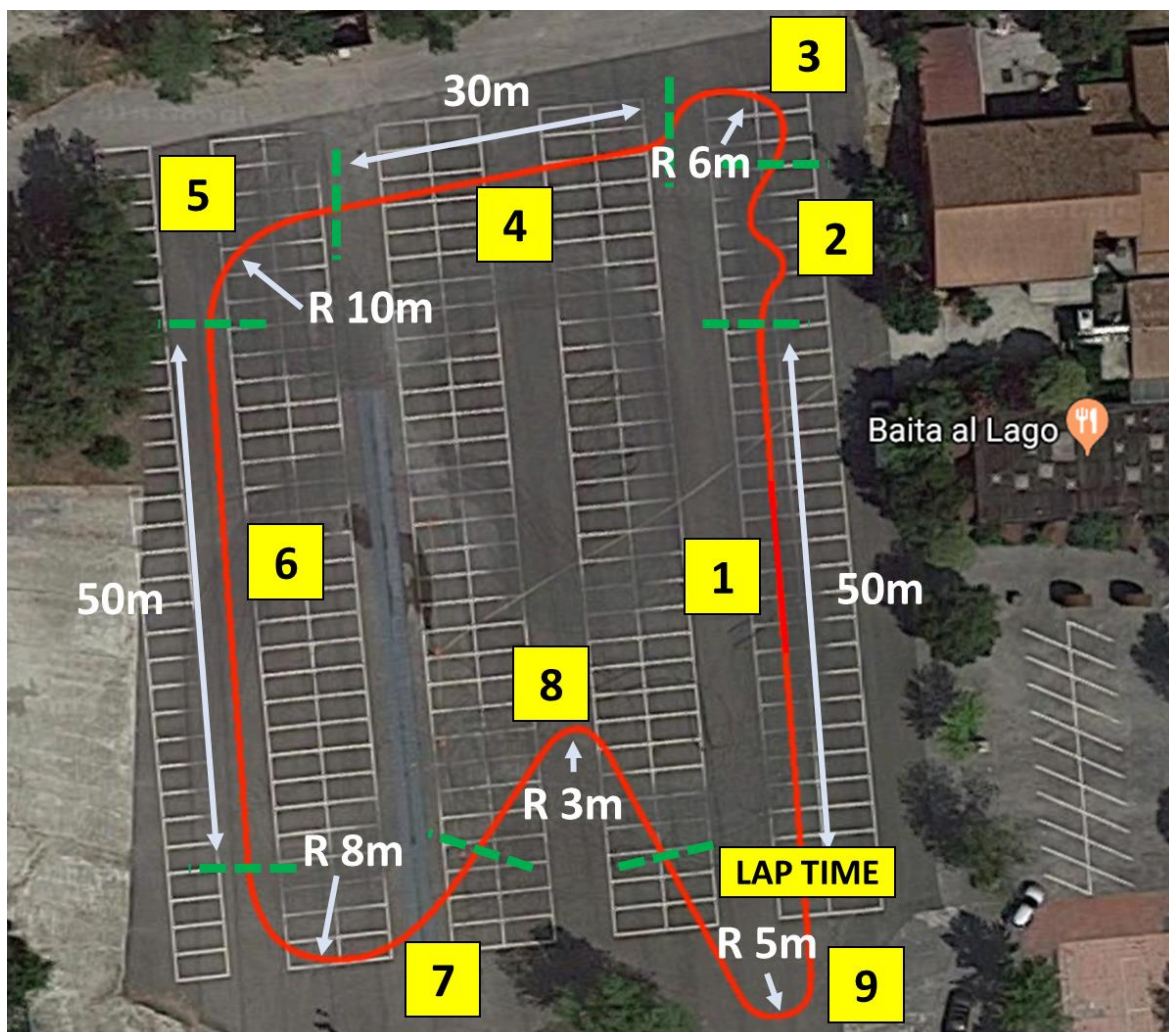
Figura 7.42: Planimetria circuito (in giallo la numerazione con cui sono stati indicati i settori della pista)

La pista è stata divisa in settori nel seguente modo:
- Settore 1: Rettilineo 1, lunghezza di circa 50 metri;
- Settore 2: slalom su 2 coni, 3 cambi di direzione;
- Settore 3: Curva a sinistra di raggio 6 metri;
- Settore 4: Rettilineo 2, lunghezza di circa 30 metri;
- Settore 5: Curva a sinistra di raggio 10 metri;
- Settore 6: Rettilineo 3, lunghezza di circa 50 metri;
- Settore 7: Curva a sinistra di raggio 8 metri;
- Settore 8: Curva a destra di raggio 3 metri;
- Settore 9: Curva a sinistra di raggio 5 metri.

In figura 7.43 si possono vedere i segnali acquisiti durante l'intero run in pista in cui sono evidenziati i 12 giri eseguiti. Tutto il run è stato eseguito con la configurazione di "Alto carico" sia all'anteriore che al posteriore.
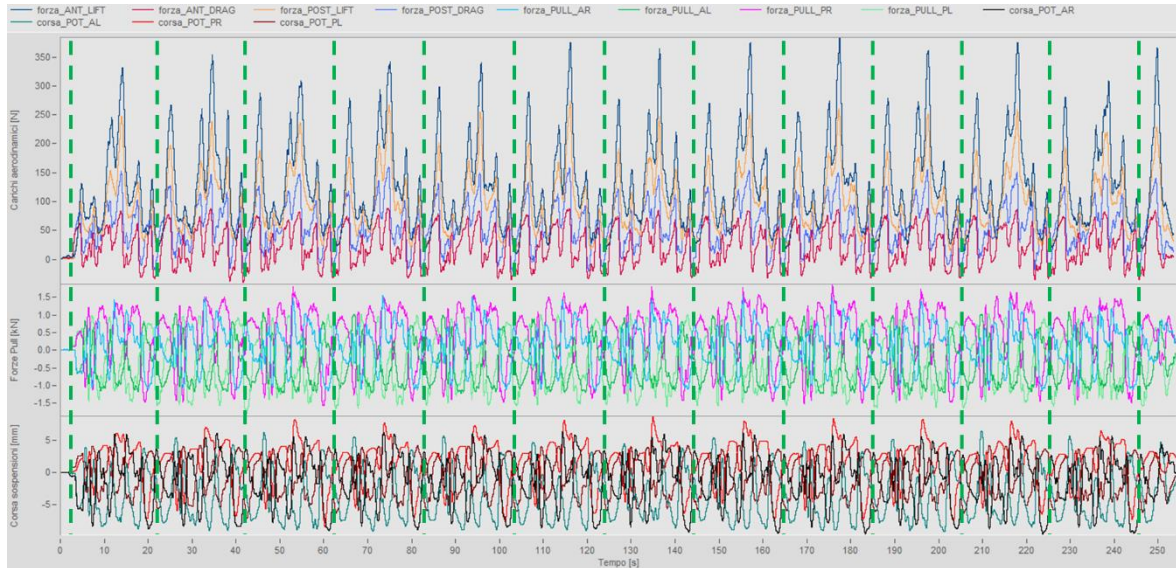
Figura 7.43: Segnali acquisiti nel tracciato (in verde sono delimitati i giri)

I tempi fatti registrare sono i seguenti:
- Giro 1:   20.6 secondi;
- Giro 2:   20.2 secondi;
- Giro 3:   20.6 secondi;
- Giro 4:   20.4 secondi;
- Giro 5:   20.5 secondi;
- Giro 6:   20.8 secondi;
- Giro 7:   20.8 secondi;
- Giro 8:   20.2 secondi;
- Giro 9:   20.2 secondi;
- Giro 10:   20.1 secondi;
- Giro 11:   20.8 secondi;
- Giro 12:   20.2 secondi.

Si va ora ad analizzare in dettaglio il decimo giro eseguito, quello più veloce. In figura 7.44 si possono vedere i segnali acquisite con le centraline IMC, mentre in figura 7.45 si possono vedere i segnali di velocità, accelerazione longitudinale e laterale acquisiti con la centralina di bordo della vettura.
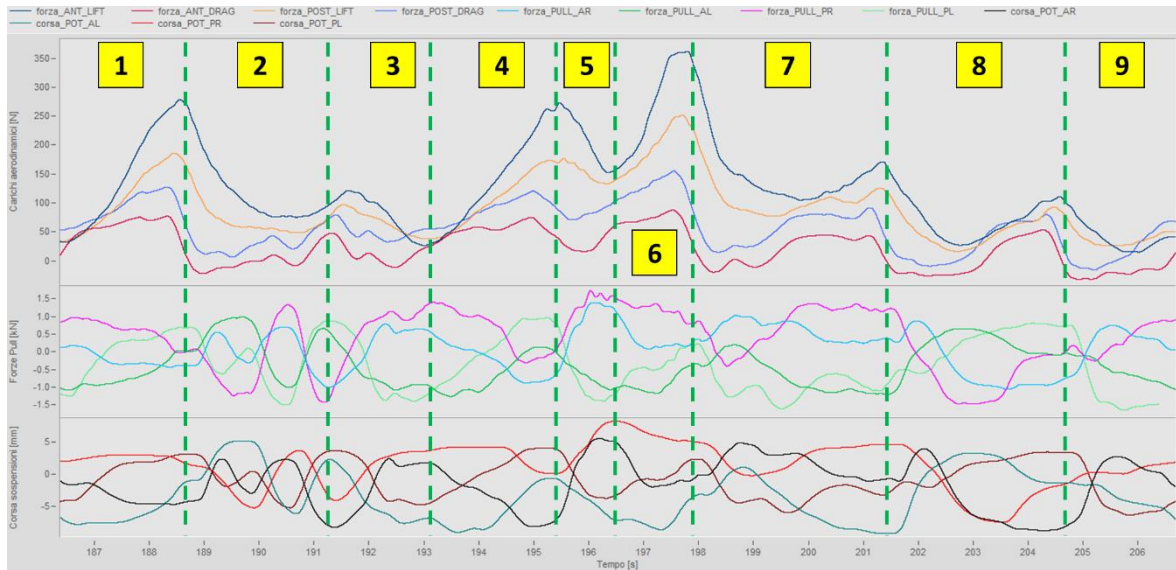
Figura 7.44: Segnali acquisiti nel giro 10 (con indicazione dei settori)
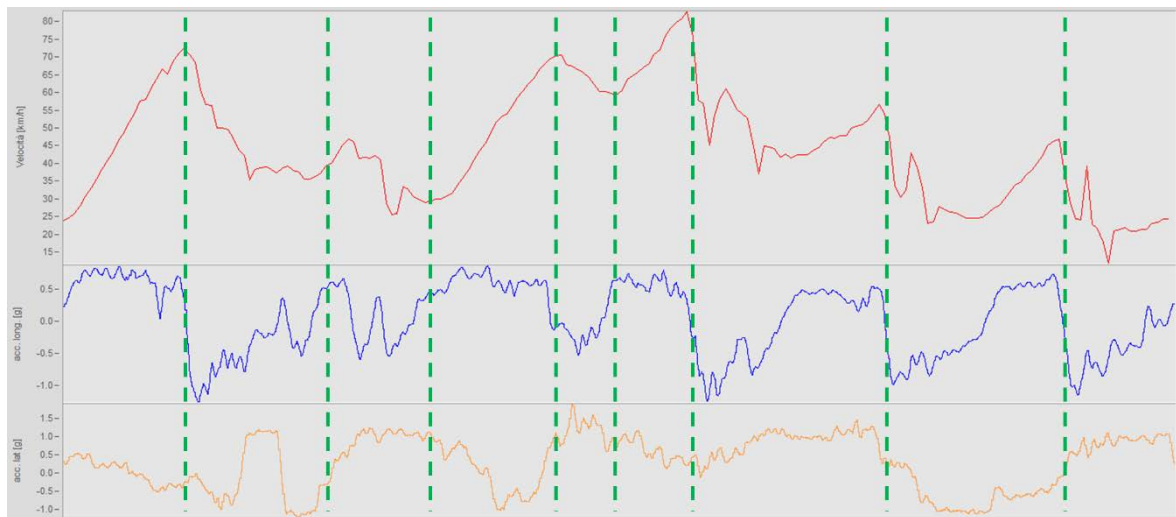
Figura 7.45: Segnali di velocità, accelerazione longitudinale e laterale nel giro 10 (con delimitazione dei settori)

Nel giro si è registrata una velocità media di 44.6 km/h con il picco nel rettilineo del settore 6 di 83.6 km/h. L'accelerazione longitudinale massima registrata è di 0.87 g in accelerazione e di -1.27 g in frenata, mentre quella laterale è stata al massimo di 1.9 g.

Si va ora a descrivere nel dettaglio l'interpretazione dei segnali per ogni settore:

- Settore 1: nel rettilineo iniziale si vede come l'accelerazione positiva, di circa 0.8 g, comporti un aumento della velocità, accompagnata da un aumento dei carichi aerodinamici;
- Settore 2: a fine rettilineo si frena per poter impostare alla giusta velocità lo slalom che prevede 3 cambi di direzione. Si nota come l'accelerazione laterale si cambi segno proprio 3 volte assumendo valori massimi di circa 1.1 g. Questi cambi di direzione sono accompagnati da trasferimenti di carico laterali come si nota sui segnali dei pull e su quelli dei potenziometri;
- Settore 3: nella curva verso sinistra per immettersi nel secondo rettilineo si osserva un'accelerazione laterale di circa 1 g e si vede come si vadano a caricare i pull anteriore e posteriore destro e si vadano a scaricare gli altri due, lo stesso comportamento si nota nei segnali dei potenziometri;
- Settore 4: nel secondo rettilineo si vede un'accelerazione positiva accompagnata da aumento di velocità e dei carichi aerodinamici;
- Settore 5: tra il rettilineo 2 e 3 c'è una curva verso sinistra di ampio raggio che consente di mantenere una velocità sostenuta di circa 60 km/h;
- Settore 6: il terzo rettilineo permette di raggiungere le velocità maggiori nel giro in quanto si parte dalla velocità del curvone precedente e si raggiungono velocità superiori agli 80 km/h. Qui si

raggiungono i carichi aerodinamici maggiori: circa 35 kg di downforce all'anteriore e 25 kg di downforce al posteriore;

- Settore 7: alla fine del terzo rettilineo si frena con un'accelerazione negativa di circa 1.2 g per impostare la curva verso sinistra. Si notano i trasferimenti di carico laterali che accompagnano l'accelerazione laterale di 1 g;
- Settore 8: segue una curva verso destra di accelerazione laterale di circa 1 g, si osserva come i pull anteriore e posteriore sinistri si vadano a caricare e, viceversa, quelli destri si scarichino;
- Settore 9: infine una curva verso sinistra riporta al rettilineo di partenza. L'accelerazione laterale è di circa 1 g e i trasferimenti di carico laterali evidenziano il fenomeno.

La presenza di segnali di drag negativi si spiega col fatto che in fase di decelerazione si generano forze di inerzia che sollecitano le celle di carico in direzione opposta a quella dei carichi di drag aerodinamici.

7.4 Prove circolari a velocità costante

7.4.1 Run sulla circonferenza di 6.125 metri

Infine, sono stati eseguiti dei run su circonferenze di raggio costante alla massima velocità percorribile.
In figura 7.46 si possono vedere i dati acquisiti nel run eseguito sulla circonferenza di 6.125 metri in senso orario. In questa prova, come nelle altre di questo genere, i flap dell'ala anteriore e di quella posteriore erano in configurazione di "Alto carico".

Figura 7.46: Dati acquisiti nel run 32

La velocità media mantenuta nel run è di 25.6 km/h e l'accelerazione laterale di 0.76 g.
I valori medi dei carichi aerodinamici registrati sono:

- Downforce dell'ala anteriore: 31.0 N,
- Drag dell'ala anteriore: -12.4 N,
- Downforce dell'ala posteriore: 22.0 N,
- Drag dell'ala posteriore: 12.4 N.

La presenza di un segnale di drag negativo all'anteriore non trova giustificazione in quanto la velocità era pressoché costante e non vi erano quindi forze di inerzia dirette nel verso opposto del moto. Questo risultato suggerisce di approfondire il comportamento delle celle se sollecitate a carichi laterali in quanto è probabile che i tiranti a "X" di supporto laterale inducano delle tensioni aggiuntive che vanno ad invalidare le matrici di taratura ottenute per puri carichi di downforce e di drag.
Per quanto riguarda i segnali dei pull e dei potenziometri si osserva il coerente trasferimento di carico alle ruote esterne.

In figura 7.47 vengono mostrati i dati relativi alla stessa prova eseguita in senso antiorario.

Figura 7.47: Dati acquisiti nel run 33

La velocità media mantenuta in questo run è di 26.0 km/h e l'accelerazione laterale di 0.79 g.

I valori medi dei carichi aerodinamici registrati sono:

- Downforce dell'ala anteriore: 30.1 N,
- Drag dell'ala anteriore: -8.2 N,
- Downforce dell'ala posteriore: 30.0 N,
- Drag dell'ala posteriore: 17.4 N.

La mancanza di simmetria tra i risultati dei run eseguiti in senso orario e di quelli eseguiti in senso antiorario non trova spiegazione e va motivata col fatto che va approfondito il comportamento delle celle di carico sottoposte a carichi laterali.

I comportamenti evidenziati nei run sulle circonferenze di 6.125 metri si ripetono anche per le circonferenze di 9.125 e 12.125 metri, per le quali valgono le stesse osservazioni qui esposte.

7.4.2 Run sulla circonferenza di 9.125 metri

Si passa successivamente a circonferenze di raggio 9.125 metri.

In figura 7.48 vengono mostrati i dati relativi alla prova eseguita in senso orario.

Figura 7.48: Dati acquisiti nel run 34

La velocità media mantenuta nel run è di 32.9 km/h e l'accelerazione laterale di 0.96 g.

I valori medi dei carichi aerodinamici registrati sono:
- Downforce dell'ala anteriore: 54.5 N,
- Drag dell'ala anteriore: -3.8 N,
- Downforce dell'ala posteriore: 36.4 N,
- Drag dell'ala posteriore: 24.0 N.

In figura 7.49 vengono mostrati i dati relativi alla stessa prova eseguita in senso antiorario.

Figura 7.49: Dati acquisiti nel run 35

La velocità media mantenuta nel run è di 34.0 km/h e l'accelerazione laterale di 0.98 g.

I valori medi dei carichi aerodinamici registrati sono:
- Downforce dell'ala anteriore: 58.5 N,
- Drag dell'ala anteriore: 1.1 N,
- Downforce dell'ala posteriore: 51.9 N,
- Drag dell'ala posteriore: 33.1 N.

7.4.3 Run sulla circonferenza di 12.125 metri

Si passa infine a circonferenze di raggio 12.125 metri.

In figura 7.50 vengono mostrati i dati relativi alla prova eseguita in senso orario.

Figura 7.50: Dati acquisiti nel run 37

La velocità media mantenuta nel run è di 39.9 km/h e l'accelerazione laterale di 1.04 g.

I valori medi dei carichi aerodinamici registrati sono:

- Downforce dell'ala anteriore: 54.5 N,
- Drag dell'ala anteriore: -3.8 N,
- Downforce dell'ala posteriore: 36.4 N,
- Drag dell'ala posteriore: 24.0 N.

In figura 7.51 vengono mostrati i dati relativi alla stessa prova eseguita in senso antiorario.
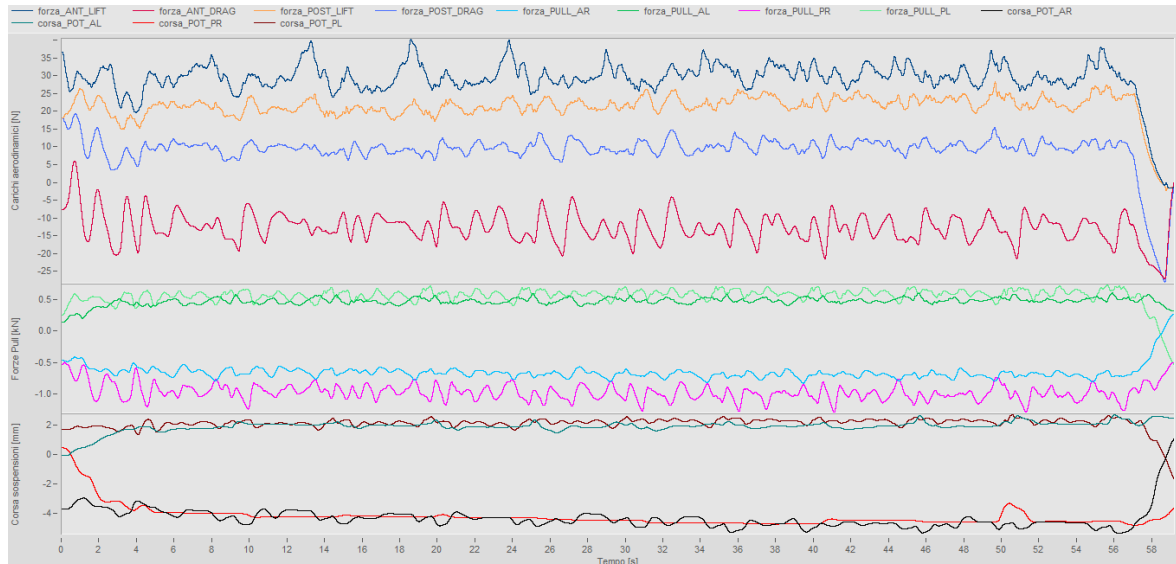

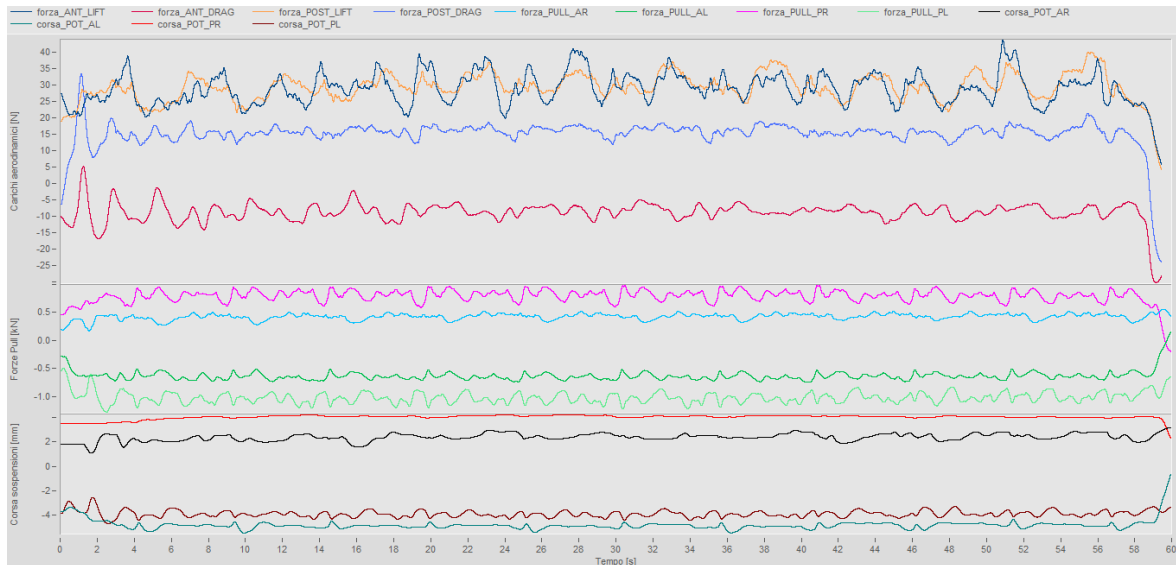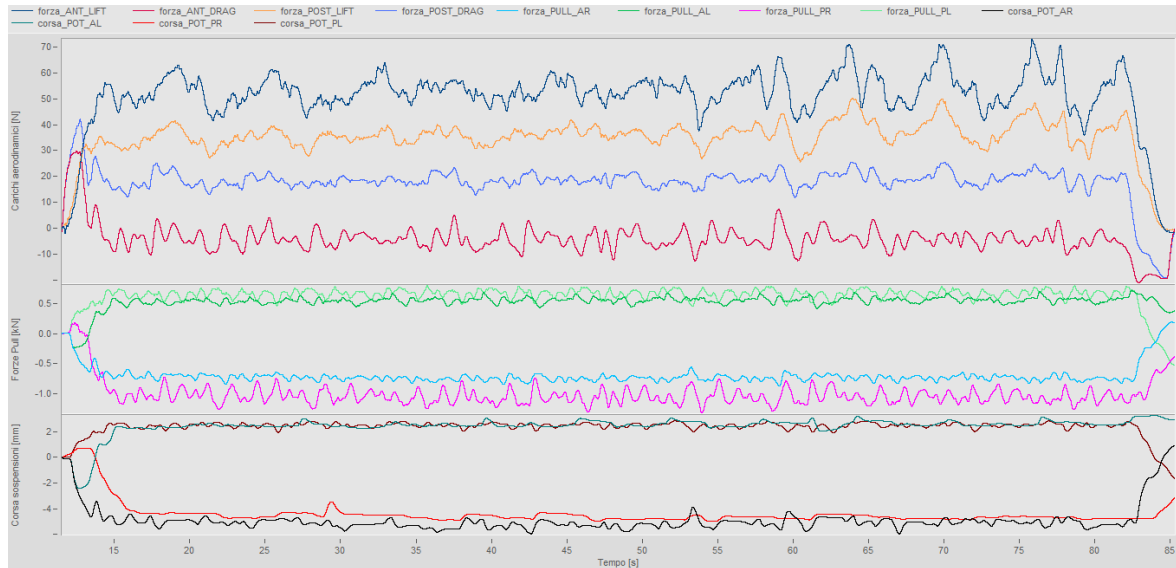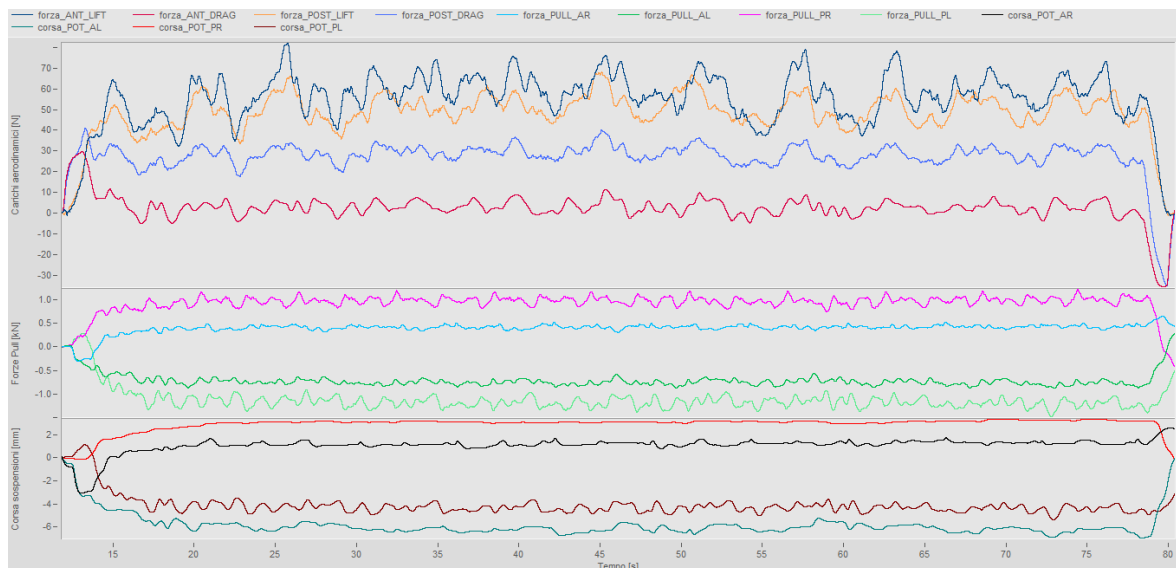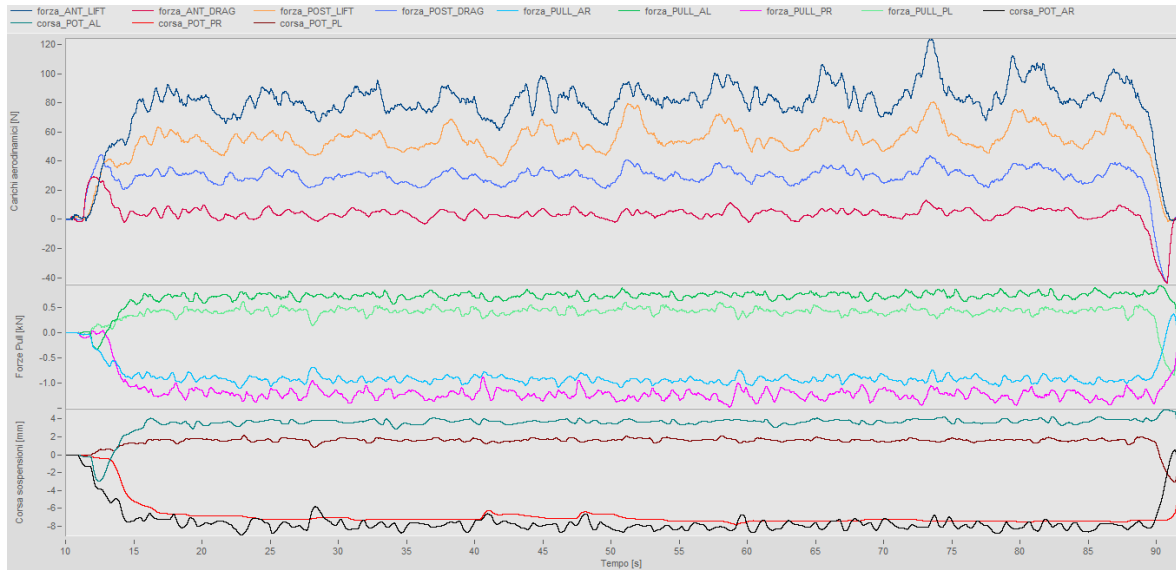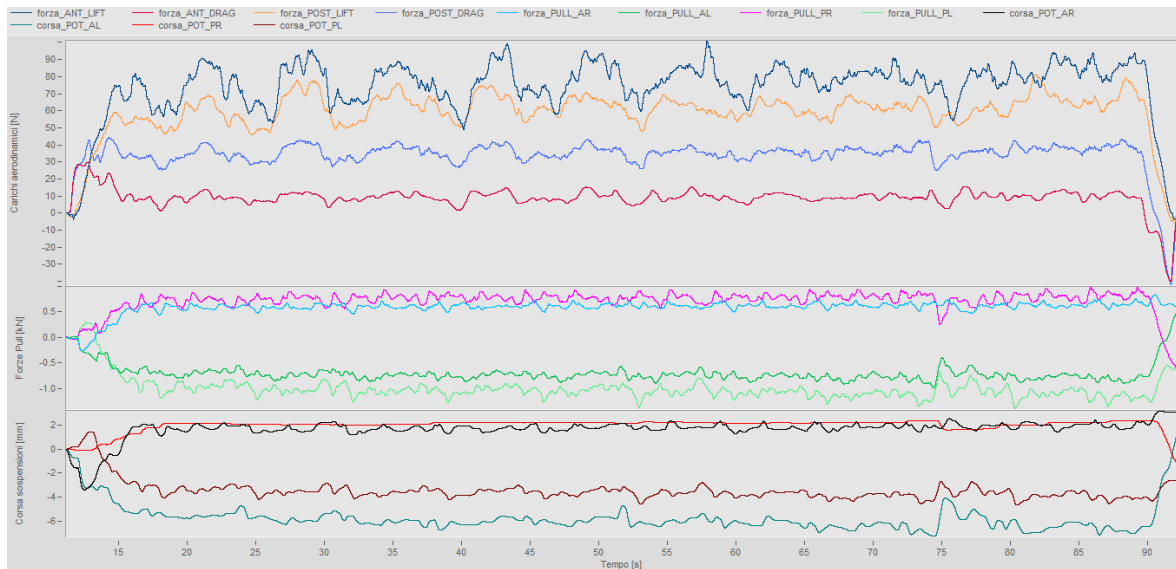*Figura 7.51: Dati acquisiti nel run 37*

La velocità media mantenuta nel run è di 39.7 km/h e l'accelerazione laterale di 1.01 g.

I valori medi dei carichi aerodinamici registrati sono:

- Downforce dell'ala anteriore: 58.5 N,
- Drag dell'ala anteriore: 1.1 N,
- Downforce dell'ala posteriore: 51.9 N,
- Drag dell'ala posteriore: 33.1 N.

7.5 Discussione dei risultati ottenuti

Si inizia con il considerare i risultati ottenuti dalle prove condotte in rettilineo. L'obiettivo di queste prove era mantenere per almeno 3-5 secondi una velocità costante al fine di instaurare delle condizioni di stazionarietà ed ottenere misurazioni più accurate. Ciò non è stato possibile a causa del vento che cambiava repentinamente la sua intensità e di cui si è riusciti solo a stimare un valore medio rappresentativo di ciascun run, a causa della mappa del motore che doveva mantenere la velocità della vettura costante ma non sempre risultava efficace (in particolare nei run a 50 km/h) e a causa del limitato spazio disponibile che consentiva di mantenere le velocità di 70 e in particolare di 90 km/h solo per poco tempo. Questi fattori, combinati con la presenza di un asfalto non perfettamente pianeggiante, hanno impedito di poter osservare segnali sufficientemente costanti negli intervalli di interesse. In particolare, i segnali dei pull e delle corse sospensioni, che dovevano fornire una misura indiretta dei carichi aerodinamici, sono risultati eccessivamente influenzati dai trasferimenti di carico della vettura per dare riferimenti numericamente significativi.

Per quanto riguarda i segnali aerodinamici, per ciascun intervallo in cui la velocità era nominalmente costante, si sono calcolati i valori medi e poi si è calcolata la media dei tra valori medi calcolati per ogni run. Tenendo presente i fattori di disturbo sopra esposti e osservando il comportamento dei segnali negli intervalli di interesse, si è deciso in base a considerazioni ingegneristiche di associare ai risultati ottenuti un'incertezza di misura del 5%.

Per poter confrontare direttamente i risultati sperimentali ottenuti con quelli derivanti da analisi C.F.D., per ogni configurazione analizzata si sono interpolati i dati con funzioni paraboliche e successivamente si è calcolato il carico corrispondente alla velocità esatta di 50 km/h, in analogia ai dati delle simulazioni numeriche a disposizione. I risultati di tale interpolazioni sono mostrati in tabella 7.7, insieme al confronto con i dati C.F.D. già esposti nel capitolo 1.

CONFIG.	DOWNFORCE ANTERIORE [N]			DRAG ANTERIORE [N]			DOWNFORCE POSTERIORE [N]			DRAG POSTERIORE [N]		
	Sper.	Num.	Diff [%]	Sper.	Num.	Diff [%]	Sper.	Num.	Diff [%]	Sper.	Num.	Diff [%]
A.A.	127.6	105.1	21.4	21.1	19.7	7.0	83.1	87.0	-4.5	44.8	45.1	-0.6
M.M.	107.7	98.0	9.9	15.5	16.7	-7.2	76.8	86.6	-11.3	33.2	37.9	-12.4
B.B.	69.7	86.9	-19.8	10.5	12.3	-14.4	33.0	71.8	-54.0	19.2	29.4	-34.7
B.A.	65.1	90.4	-28.0	8.6	12.7	-32.5	93.2	89.5	4.2	46.1	45.1	2.2
M.A.	97.3	101.3	-3.9	16.4	17.5	-6.1	91.4	89.5	2.1	53.1	46.8	13.5

Tabella 7.7: Confronto tra risultati sperimentali e numerici alla velocità di 50 km/h

L'analisi degli errori percentuali tra i risultati sperimentali e quelli numerici mostra per la maggior parte dei dati delle differenze inferiori al 15 %. I dati maggiormente in disaccordo risultano quelli relativi alla configurazione di "Basso carico" in cui si raggiungono differenze del 54 e 34.7 % rispettivamente per la downforce e il drag dell'ala posteriore.

Le prove eseguite in tracciato hanno mostrato qualitativamente come le celle di carico permettano anche un'analisi dinamica delle sollecitazioni alle ali, qui risultano interessanti anche i segnali dei pull e delle corse delle sospensioni, dalle cui analisi si possono osservare chiaramente i trasferimenti di carico e ricostruire le dinamiche eseguite in pista dalla vettura.

Infine, i test eseguiti su circonferenze di raggio costante hanno evidenziato come siano necessarie ulteriori analisi relative al comportamento delle celle di carico sottoposte a carichi laterali, infatti la presenza del segnale di drag dell'ala anteriore negativo non trova spiegazione, così come la mancanza di simmetria tra i risultati in un senso di percorrenza della circonferenza e quelli nel senso opposto.

Capitolo 8: Conclusioni

Il lavoro di tesi ha avuto come obiettivo la progettazione di celle di carico per acquisire i carichi aerodinamici dell'ala anteriore e dell'ala posteriore della vettura Formula S.A.E. MG 13.18 del Race Up Team dell'Università di Padova.

A tal fine sono stati riprogettati i supporti ala anteriori e posteriori in modo da renderli sensibili alla forza di downforce e a quella di drag. Dopo la progettazione con l'utilizzo di strumenti C.A.D. e F.E.M., i supporti sono stati realizzati a partire da una lastra di Ergal tagliata ad acqua, sono stati applicati gli estensimetri per realizzare un ponte intero di Wheatstone per ogni canale e infine è stata eseguita una taratura statica per creare una corrispondenza tra deformazioni misurate e carichi applicati.

Infine, è stata organizzata una giornata di test per convalidare gli strumenti di misura realizzati e per acquisire dei dati sperimentali relativi all'aerodinamica della vettura.

In tabella 8.1 sono riassunti i risultati ottenuti.

CONFIGURAZIONE	VELOCITÀ	DOWNFORCE ANTERIORE [N]	DRAG ANTERIORE [N]	DOWNFORCE POSTERIORE [N]	DRAG POSTERIORE [N]
A.A.	31.2	46.2	7.7	31.5	18.8
A.A.	48.2	116.1	20	79.2	42.3
A.A.	71.6	279.2	44.1	170.1	89.2
A.A.	90.6	478.9	72.1	287.6	150.5
M.M.	31.1	44.1	6.3	29	12.1
M.M.	51	111.9	16.1	77.2	33.3
M.M.	70.5	212.3	30.7	157.7	68.2
M.M.	88.8	347.8	48.5	238.6	102.8
B.B.	32.1	29.6	3.9	13.6	7.5
B.B.	48.6	62	11.2	31.6	20.1
B.B.	68.9	140.8	18.4	61.8	33.6
B.B.	87	242.8	26.2	98.7	50.8
B.A.	32.8	27.75	3.4	42.8	19.6
B.A.	47.4	59.8	8.45	86.6	42.15
B.A.	70.3	128.3	15.9	174.1	91.8
B.A.	90	225.3	26.5	290.7	160.2
M.A.	32.1	39.45	6.25	36.8	21.4
M.A.	48.4	89.15	15.35	83.85	48.35
M.A.	71.8	208.5	32.9	192.8	110.6
M.A.	88.5	330.6	43.3	286.6	154.2

Tabella 8.1: Risultati ottenuti

I dati acquisiti consentiranno al reparto "Aerodinamica" del Race Up team di verificare la bontà delle simulazioni C.F.D. effettuate durante la fase di progettazione.

Il confronto tra dati sperimentali e numerici permette di correggere eventuali errori presenti nel modello matematico. È di fondamentale importanza avere a disposizione un modello matematico che dia risultati quanto più aderenti alla realtà, infatti condurre una campagna di acquisizione dati come quella presente in questo lavoro è troppo oneroso in termini di tempo e risorse per essere ripetibile con una certa frequenza. È molto più conveniente avere un solido modello numerico che, dopo validazione sperimentale, consenta in maniera rapida e poco costosa di ottenere i risultati voluti.

Avere a disposizione i carichi aerodinamici corretti è di vitale importanza al fine di prevedere il comportamento dinamico della vettura e di conseguenza poter progettare nella maniera più opportuna i componenti meccanici.

Approfondendo il comportamento aerodinamico della vettura è possibile migliorare l'handling e in generale le prestazioni della vettura nelle prove dinamiche presenti agli eventi del circuito Formula S.A.E.

Un possibile sviluppo futuro del presente lavoro è eseguire un'altra campagna di acquisizione dati in un luogo più spazioso, che consenta di mantenere le velocità di 70 e 90 km/h per almeno 3-5 secondi al fine di avere risultati meno incerti. Un altro sviluppo possibile è l'investigazione del comportamento delle celle di carico

quando sono applicati carichi laterali, prima mediante acquisizioni statiche in laboratorio e poi con altri test tipo run circolari in pista.

Bibliografia

[1]   Sito internet: https://it.wikipedia.org/wiki/Formula_SAE
[2]   De Lazzari M., *Acquisizione e analisi dei carichi aerodinamici all'ala posteriore della vettura Formula S.A.E. MG 10.15,* Università degli Studi di Padova, 2016
[3]   Milan R., *Development of a surrogate model of F.S.A.E. car,* Università degli Studi di Padova, 2018
[4]   Kubit A., Kluz R., Trzepiecinski T., Wydrzynski D.,Bochnowski W., *Analysis of the mechanical properties and of micrographs of refill friction stir spot welded 7075-T6 aluminium sheets*, University of Rzeszow, 2017
[5]   Petrone N., *Strain gauge theroy application*, Università degli Studi di Padova, dispensa del corso di Sport engineering and rehabilitation devices
[6]   Kyowa, *Strain gauge installation manual*
[7]   Chiarin R., *Acquisizione dei carichi in pista e sviluppo di un banco per prove a fatica multiassiali su gruppi sospensione per vetture F.S.A.E.,* Università degli Studi di Padova, 2018
[8]   Meneghetti G., Saraceni M., *Utilizzo della centralina IMC-CRONOS PL2*, Università degli Studi di Padova, 2014
[9]   Meneghetti G., Zoccarato R., *Utilizzo del modulo di espansione IMC-CANSAS abbinato alla centralina IMC-CRONOS PL2*, Università degli Studi di Padova, 2016

Appendice A: Centro di pressione

Il centro di pressione (Center of pressure C.O.P.) di un profilo aerodinamico è il punto di applicazione della risultante di tutte le forze aerodinamiche applicate al profilo stesso, lì per definizione è nullo il momento risultante.

Il momento di una forza è definito come:

$$\vec{M} = \vec{r} \; x \; \vec{F} \tag{A.1}$$

Dove r è la distanza tra il punto di applicazione della forza e il polo attorno cui si calcola il momento e F è la forza risultante.

La precedente equazione può essere sviluppata scomponendo i vettori nelle loro componenti spaziali:

$$\begin{cases} M_x = -F_y z + F_z y \\ M_y = F_x z - F_z x \\ M_z = -F_x y + F_y x \end{cases} \tag{A.2}$$

Le analisi C.F.D. dei profili aerodinamici di una vettura consentono l'introduzione di ipotesi semplificative del problema in esame, ossia:

- Risultate F_y nulla (assenza di carichi laterali),
- Momenti M_x e M_z nulli.

Abbiamo a che fare a tutti gli effetti con un sistema piano di forze, le equazioni (A.2) quindi si semplificano nelle seguenti:

$$\begin{cases} M_y = F_x z - F_z x \\ y = 0 \end{cases} \tag{A.3}$$

In cui F_x è il drag e F_z è la downforce. Si nota come il sistema ha infinite soluzioni e il luogo dei punti descritto è una retta appartenente al piano di simmetria e orientata come la forza risultante.

Ecco spiegato perché, nonostante in letteratura si parli sempre di centro di pressione, è lecito parlare di retta luogo dei punti dei centri di pressione in quanto stiamo parlando di un caso piano di sistema di forze. Una volta nota tale retta, si può scegliere ad arbitrio un punto al fine di risolvere l'equilibrio della struttura ed eseguire ulteriori analisi.

Al fine di trovare la posizione del C.O.P. dalle simulazioni C.F.D., si calcola la forza risultante e il momento attorno l'asse y, poi si suppongono due valori di x del C.O.P. e si calcolano i rispettivi valori z, per tali punti passa la retta dei centri di pressione.

Nel caso della vettura MG 13.18, considerando una velocità di 100 km/h e la configurazione delle ali in alto carico, la retta dei centri di pressione dell'ala anteriore ha equazione y = 5.89x – 14386 e viene mostrata in figura A.1 con il sistema di riferimento considerato. Per quanto riguarda l'ala posteriore il luogo dei punti ha equazione y = 2.50x – 491 ed è mostrato in figura A.2.

Le equazioni di queste rette cambiano in funzione della velocità dell'aria e della configurazione dell'ala, le rette considerate per il dimensionamento sono quelle più gravose perché corrispondono a una velocità maggiore di quella massima prevista per i test (90 km/h) e a una configurazione di alto carico.

Una volta ottenute le linee dei C.O.P. è sufficiente scegliere arbitrariamente un punto su di esse da considerarsi come punto di applicazione delle forze risultanti e procedere con il dimensionamento.
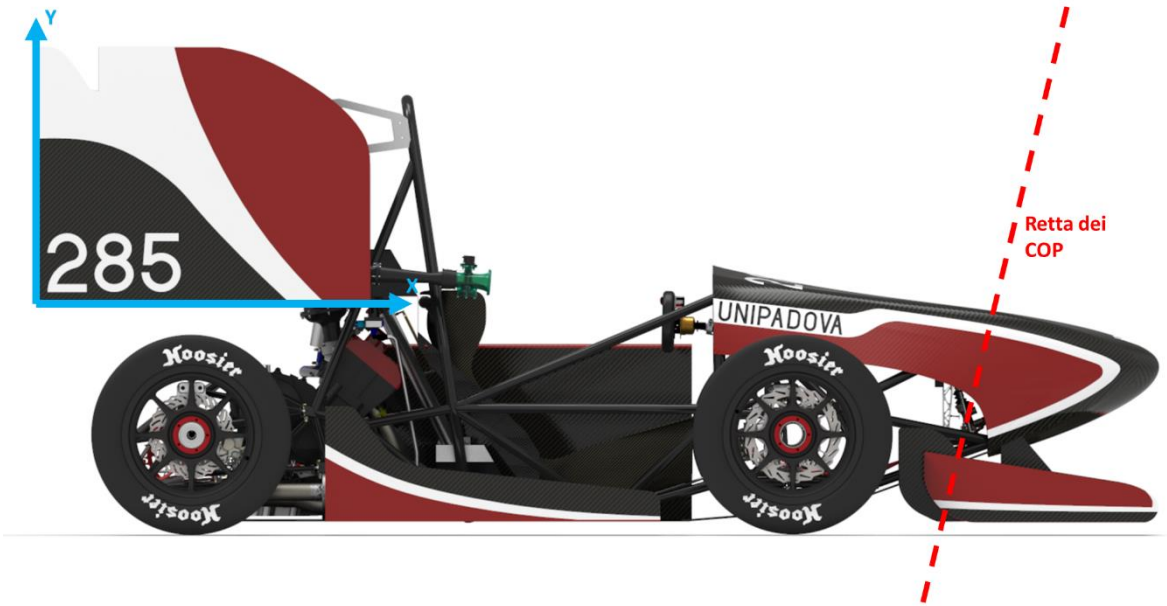
Figura A.1: Linea dei C.O.P. dell'ala anteriore

Figura A.2: Linea dei C.O.P. dell'ala posteriore

Appendice B: Dati numerici della fase di taratura

Nelle seguenti tabelle vengono riportati i valori numerici ottenuti ed elaborati nella fase di taratura delle celle di carico. La colonna m indica la massa in kg applicata e la colonna P indica il corrispondente carico in N. Le ultime due colonne indicano la media dei segnali misurati negli intervalli in cui il carico era costante.

m[kg]	P[N]	L[μɛ]	D[μɛ]
0	0	0	0
0.528	5.180	32.439	-0.634
1.060	10.399	65.675	-1.695
1.592	15.618	98.682	-2.678
2.589	25.398	160.727	-4.345
4.589	45.018	284.705	-8.301
6.589	64.638	408.616	-12.265
9.942	97.531	616.610	-18.603
14.942	146.581	926.865	-27.031
18.305	179.572	1135.071	-31.989
20.307	199.212	1259.368	-34.261
21.304	208.992	1322.264	-35.307
22.302	218.783	1384.909	-35.818
21.304	208.992	1324.175	-34.528
20.307	199.212	1262.788	-33.502
18.305	179.572	1138.749	-31.168
14.942	146.581	930.311	-26.708
9.942	97.531	620.200	-19.149
6.589	64.638	412.184	-13.370
4.589	45.018	287.856	-9.491
2.589	25.398	163.247	-5.535
1.592	15.618	101.177	-3.781
1.060	10.399	67.840	-2.463
0.528	5.180	34.392	-1.236
0	0	0.501	0.006

Tabella B.1: Dati numerici relativi alla taratura a lift della cella di carico A.R.

m[kg]	P[N]	L[μɛ]	D[μɛ]
0	0	0	0
0.200	1.962	-0.024	48.628
0.728	7.142	0.002	177.897
1.260	12.361	-0.042	307.574
2.257	22.141	-0.030	550.405
3.254	31.922	-0.045	793.321
4.252	41.712	0.061	1036.390
4.784	46.931	0.081	1166.030
4.984	48.893	0.100	1214.526
4.784	46.931	0.184	1166.165
4.252	41.712	-0.060	1036.584

m[kg]	P[N]	L[με]	D[με]
3.254	31.922	-0.210	793.833
2.257	22.141	-0.289	550.800
1.260	12.361	-0.462	307.774
0.728	7.142	-0.559	178.209
0.200	1.962	-0.618	49.273
0	0	0.002	0.901

Tabella B.2: Dati numerici relativi alla taratura a drag della cella di carico A.R.

m[kg]	P[N]	L[με]	D[με]
0	0	0	0
0.528	5.180	33.360	-0.793
1.060	10.399	67.070	-1.127
1.592	15.618	101.215	-1.599
2.589	25.398	164.950	-2.226
4.589	45.018	292.564	-3.391
6.589	64.638	419.950	-4.743
9.942	97.531	633.911	-6.360
14.942	146.581	952.132	-7.540
18.305	179.572	1165.700	-7.391
20.307	199.212	1293.408	-6.952
21.304	208.992	1357.154	-6.756
22.302	218.783	1420.970	-6.278
21.304	208.992	1357.365	-6.589
20.307	199.212	1294.134	-6.652
18.305	179.572	1166.760	-7.160
14.942	146.581	953.607	-7.125
9.942	97.531	635.401	-6.101
6.589	64.638	421.377	-4.250
4.589	45.018	294.195	-2.945
2.589	25.398	166.581	-1.633
1.592	15.618	102.941	-0.893
1.060	10.399	68.996	-0.490
0.528	5.180	34.961	-0.168
0	0	1.022	0.052

Tabella B.3: Dati numerici relativi alla taratura a lift della cella di carico A.L.

m[kg]	P[N]	L[με]	D[με]
0	0	0	0
0.200	1.962	0.046	51.034
0.728	7.142	-0.086	186.254
1.260	12.361	-0.476	322.699
2.257	22.141	-0.824	578.066
3.254	31.922	-1.200	833.428
4.252	41.712	-1.385	1088.878
4.784	46.931	-1.629	1225.260
4.984	48.893	-1.555	1276.360

4.784	46.931	-1.496	1225.476
4.252	41.712	-1.369	1089.482
3.254	31.922	-1.134	834.142
2.257	22.141	-0.814	579.043
1.260	12.361	-0.394	323.529
0.728	7.142	-0.037	187.138
0.200	1.962	0.113	51.703
0	0	0.002	0.563

Tabella B.4: Dati numerici relativi alla taratura a drag della cella di carico A.L.

m[kg]	P[N]	L[με]	D[με]
0	0	0	0
0.997	9.781	72.866	0.655
2.997	29.401	218.897	3.085
4.997	49.021	364.971	5.074
8.350	81.914	610.159	9.275
13.350	130.964	974.989	17.974
16.713	163.955	1219.680	24.815
18.713	183.575	1365.549	29.036
19.710	193.355	1438.564	31.141
18.713	183.575	1365.790	29.584
16.713	163.955	1220.099	26.082
13.350	130.964	975.455	20.230
8.350	81.914	610.472	11.454
4.997	49.021	365.379	6.364
2.997	29.401	219.251	3.625
0.997	9.781	73.321	1.415
0	0	0.952	0.022

Tabella B.5: Dati numerici relativi alla taratura a lift della cella di carico P.R.

m[kg]	P[N]	L[με]	D[με]
0	0	0	0
0.528	5.180	-0.071	71.242
1.525	14.960	-0.557	203.255
2.522	24.741	-1.241	336.962
4.522	44.361	-2.398	605.125
6.522	63.981	-3.109	872.059
8.524	83.620	-3.556	1139.403
9.522	93.411	-3.995	1273.061
10.054	98.630	-4.469	1344.339
9.522	93.411	-4.471	1273.698
8.524	83.620	-3.691	1139.833
6.522	63.981	-2.750	871.757
4.522	44.361	-1.874	604.354
2.522	24.741	-0.832	336.393
1.525	14.960	-0.363	202.675

0.528	5.180	0.487	69.171
0	0	0.010	0.650

Tabella B.6: Dati numerici relativi alla taratura a drag della cella di carico P.R.

m[kg]	P[N]	L[με]	D[με]
0	0	0	0
0.997	9.781	77.350	-0.351
2.997	29.401	232.215	0.185
4.997	49.021	386.772	1.820
8.350	81.914	646.064	5.264
13.350	130.964	1032.657	13.927
16.713	163.955	1292.645	21.655
18.713	183.575	1447.405	27.138
19.710	193.355	1524.762	30.146
18.713	183.575	1447.789	28.613
16.713	163.955	1293.018	24.635
13.350	130.964	1033.316	18.050
8.350	81.914	646.814	9.497
4.997	49.021	387.727	4.783
2.997	29.401	233.139	2.678
0.997	9.781	78.290	0.981
0	0	0.701	-0.054

Tabella B.7: Dati numerici relativi alla taratura a lift della cella di carico P.L.

m[kg]	P[N]	L[με]	D[με]
0	0	0	0
0.528	5.180	-0.235	68.603
1.525	14.960	-0.262	196.445
2.522	24.741	-0.647	324.333
4.522	44.361	-3.497	580.906
6.522	63.981	-5.034	836.631
8.524	83.620	-6.274	1091.783
9.522	93.411	-7.203	1219.898
10.054	98.630	-7.529	1288.329
9.522	93.411	-6.781	1219.917
8.524	83.620	-5.789	1091.915
6.522	63.981	-4.154	835.639
4.522	44.361	-2.804	579.838
2.522	24.741	-1.273	323.735
1.525	14.960	-0.451	195.612
0.528	5.180	0.266	67.384
0	0	0.005	0.557

Tabella B.8: Dati numerici relativi alla taratura a drag della cella di carico P.L.

Appendice C: Codici Famos

Si riporta il codice utilizzato nel software "imc FAMOS Enterprise 7.3" per elaborare i segnali acquisiti con le centraline.

```
;Filtraggio dei dati con filtro passa basso di secondo grado, frequenza di taglio 1 Hz
freq_taglio=1
grado=2
filter_AR_LIFT=FiltLP(AR_LIFT,0,0,grado,freq_taglio)
filter_AR_DRAG=FiltLP(AR_DRAG,0,0,grado,freq_taglio)
filter_AL_LIFT=FiltLP(AL_LIFT,0,0,grado,freq_taglio)
filter_AL_DRAG=FiltLP(AL_DRAG,0,0,grado,freq_taglio)
filter_PR_LIFT=FiltLP(PR_LIFT,0,0,grado,freq_taglio)
filter_PR_DRAG=FiltLP(PR_DRAG,0,0,grado,freq_taglio)
filter_PL_LIFT=FiltLP(PL_LIFT,0,0,grado,freq_taglio)
filter_PL_DRAG=FiltLP(PL_DRAG,0,0,grado,freq_taglio)
filter_PULL_AR=FiltLP(PULL_AR,0,0,grado,freq_taglio)
filter_PULL_AL=FiltLP(PULL_AL,0,0,grado,freq_taglio)
filter_PULL_PR=FiltLP(PULL_PR,0,0,grado,freq_taglio)
filter_PULL_PL=FiltLP(PULL_PL,0,0,grado,freq_taglio)
corsa_POT_AR=FiltLP(POT_AR,0,0,grado,freq_taglio)
corsa_POT_AL=FiltLP(POT_AL,0,0,grado,freq_taglio)
corsa_POT_PR=FiltLP(POT_PR,0,0,grado,freq_taglio)
corsa_POT_PL=FiltLP(POT_PL,0,0,grado,freq_taglio)

;Applicazione delle matrici di taratura ai segnali delle celle di carico aerodinamiche
forza_AR_LIFT=0.001*(157.9*FILTER_AR_LIFT+0.00445*FILTER_AR_DRAG)
forza_AR_DRAG=0.001*(1.102*FILTER_AR_LIFT+40.24*FILTER_AR_DRAG)
forza_AL_LIFT=0.001*(153.92*FILTER_AL_LIFT+0.197*FILTER_AL_DRAG)
forza_AL_DRAG=0.001*(0.23*FILTER_AL_LIFT+38.3*FILTER_AL_DRAG)
forza_PR_LIFT=0.001*(134.36*FILTER_PR_LIFT+0.442*FILTER_PR_DRAG)
forza_PR_DRAG=0.001*(-1.509*FILTER_PR_LIFT+73.37*FILTER_PR_DRAG)
forza_PL_LIFT=0.001*(126.78*FILTER_PL_LIFT+0.703*FILTER_PL_DRAG)
forza_PL_DRAG=0.001*(-1.342*FILTER_PL_LIFT+76.54*FILTER_PL_DRAG)

;Calcolo della forza aerodinamica risultante alle ali
forza_ANT_LIFT=(forza_AR_LIFT+forza_AL_LIFT)
forza_ANT_DRAG=(forza_AR_DRAG+forza_AL_DRAG)
forza_POST_LIFT=(forza_PR_LIFT+forza_PL_LIFT)
forza_POST_DRAG=(forza_PR_DRAG+forza_PL_DRAG)

;Applicazione del fattore di taratura ai segnali dei pull
forza_PULL_AR=5.9241*filter_PULL_AR
forza_PULL_AL=5.9241*filter_PULL_AL
forza_PULL_PR=5.9241*filter_PULL_PR
forza_PULL_PL=5.9241*filter_PULL_PL

;Eliminazione delle variabili inutili
delete AR_LIFT
delete AR_DRAG
delete AL_LIFT
delete AL_DRAG
delete PR_LIFT
delete PR_DRAG
delete PL_LIFT
delete PL_DRAG
delete PULL_AR
delete PULL_AL
delete PULL_PR
delete PULL_PL
```

```
delete POT_AR
delete POT_AL
delete POT_PR
delete POT_PL

;Azzeramento canali
c=0
forza_ANT_LIFT=forza_ANT_LIFT-Value(forza_ANT_LIFT,c)
forza_ANT_DRAG=forza_ANT_DRAG-Value(forza_ANT_DRAG,c)
forza_POST_LIFT=forza_POST_LIFT-Value(forza_POST_LIFT,c)
forza_POST_DRAG=forza_POST_DRAG-Value(forza_POST_DRAG,c)
forza_PULL_AR=forza_PULL_AR-Value(forza_PULL_AR,c)
forza_PULL_AL=forza_PULL_AL-Value(forza_PULL_AL,c)
forza_PULL_PR=forza_PULL_PR-Value(forza_PULL_PR,c)
forza_PULL_PL=forza_PULL_PL-Value(forza_PULL_PL,c)
corsa_POT_AR=corsa_POT_AR-Value(corsa_POT_AR,c)
corsa_POT_AL=corsa_POT_AL-Value(corsa_POT_AL,c)
corsa_POT_PR=corsa_POT_PR-Value(corsa_POT_PR,c)
corsa_POT_PL=corsa_POT_PL-Value(corsa_POT_PL,c)
```