



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica
A.a. 2024/2025
Sessione di Laurea Ottobre 2025

Studio del comportamento dinamico di un rover agricolo mediante analisi multibody

Relatori:
Prof. Aurelio Soma'
Salvatore Martelli

Candidato:
Pala Giorgio

Sommario

Indice delle figure	3
Indice delle tabelle.....	5
1. Introduzione	7
1.1 Rover agricoli	11
1.2 Requisiti di un rover agricolo.....	12
1.3 Robot sul mercato.....	13
2. Stato dell'arte dei sistemi di sospensione per rover.....	19
3. Caso studio: Smilla H2 e obiettivo del lavoro	27
3.1 Obiettivo del lavoro	34
4. Modellazione multibody e prove virtuali	37
4.1 Modellazione del rover	38
4.2 Prove virtuali.....	43
5. Analisi e discussione risultati.....	47
5.1 Prove su single bump	49
5.2 Prove su concavità multiple	57
5.3 Prove su concavità alternate	65
5.4 Analisi di sensitività: effetto della massa del payload	74
6. Conclusioni e sviluppi futuri	81
Bibliografia.....	83

Indice delle figure

Figura 1.1 aspetto del robot Burro[7]	14
Figura 1.2 aspetto del robot Agrointelli Robotti [8]	15
Figura 1.3 aspetto del robot Oz [9]	16
Figura 1.4 aspetto del VitiBot Bakus [10]	17
Figura 1.5 aspetto del robot Autoagri ICS20[11]	18
Figura 2.1 modello quarter-car [12]	20
Figura 2.2 a) sospensione rigida, b) passiva, c) attiva, d) ibrida; Fonte:[14]	22
Figura 2.3 rover BoniRob [15] a sx, Ted Naio [16] a dx, sospensioni rigide	24
Figura 2.4 AgBot II [17] a sx, Vinerobot II [18] a dx, sospensioni passive	24
Figura 2.5 Agri Q. [19] con sospensioni attive	25
Figura 2.6 AgAR [20] con sospensioni ibride, massima altezza a sx, minima a dx	26
Figura 2.7 Tom v4 [21] con sospensioni passive	26
Figura 3.1 aspetto del rover SmillaH2; Fonte: [22]	27
Figura 3.2 riepilogo delle mansioni svolgibili dal rover; Fonte: [22]	29
Figura 3.3 assieme telaio e montanti; Fonte: [23]	30
Figura 3.4 assieme finale con pianale e cassetto frontale; Fonte [23]	30
Figura 3.5 aspetto del montante a sinistra e della giunzione bullonata a destra; Fonte: [23]	31
Figura 3.6 aspetto gruppo ruota e montante, con il montaggio del motore; Fonte [23]	31
Figura 3.7 architettura schematica del rover; Fonte:[24]	33
Figura 3.8 esempio di supporti antivibranti in gomma piatti presenti in commercio e tipica configurazione di sospensione cabina	36
Figura 3.9 esempio di ammortizzatore per cabine	36
Figura 4.1 rover costruito su Adams	38
Figura 4.2 raffigurazione dei collegamenti in celeste e del gruppo molla-smorzatore in rosso	40
Figura 4.3 rappresentazione del ground su cui si muove il rover in verde, della traiettoria e del dummy body	42
Figura 4.4 individuazione nel rover del posizionamento delle misure effettuate	43
Figura 4.5 profilo del single bump, il verde rappresenta il ground, la parte superiore è sporgente rispetto al ground	45
Figura 4.6 aspetto del percorso di simulazione single bump	45
Figura 4.7 profilo della concavità con le dimensioni corrispondenti	46
Figura 4.8 aspetto del percorso a concavità fisse	46
Figura 4.9 profilo del fosso con le dimensioni analoghe al caso precedente	47
Figura 4.10 aspetto del percorso a concavità alternate	47
Figura 5.1 spostamento Y su single bump, misura CM	50
Figura 5.2 dettaglio spostamento CM su single bump	50
Figura 5.3 Spostamento Y percorso a single bump, misura montante anteriore	51

Figura 5.4 dettaglio spostamento Y percorso a single bump, misura montante anteriore.....	52
Figura 5.5 Forza su ammortizzatore frontale, percorso a single bump	53
Figura 5.6 dettaglio forza su ammortizzatore frontale, percorso a single bump.....	53
Figura 5.7 Forza su ammortizzatore posteriore, percorso a single bump	54
Figura 5.8 Forza su ammortizzatore posteriore, percorso a single bump	55
Figura 5.9 Forza ammortizzatore frontale con caso rigido, percorso a concavità multiple	59
Figura 5.10 Forza ammortizzatore posteriore con caso rigido, percorso a concavità multiple.....	Error!
Bookmark not defined.	
Figura 5.11 Spostamento Y percorso a concavità multiple, misura montante anteriore.....	62
Figura 5.12 Forza ammortizzatore frontale con caso rigido, percorso a concavità multiple	63
Figura 5.13 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità multiple.....	63
Figura 5.14 Forza ammortizzatore posteriore con caso rigido, percorso a concavità multiple.....	64
Figura 5.15 Spostamento Y percorso a concavità alternate, misura CM.....	66
Figura 5.16 Spostamento Y percorso a concavità alternate , misura montante anteriore	66
Figura 5.17 Forza ammortizzatore frontale con caso 0, percorso a concavità alternate	67
Figura 5.18 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate	67
Figura 5.19 dettaglio forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate	68
Figura 5.20 Forza ammortizzatore posteriore con caso 0, percorso a concavità alternate	68
Figura 5.21 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate	69
Figura 5.22 dettaglio forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate	69
Figura 5.23 Spostamento Y percorso a concavità alternate , misura CM.....	70
Figura 5.24 Spostamento Y percorso a concavità alternate , misura montante anteriore	71
Figura 5.25 Forza ammortizzatore anteriore con caso 0, percorso a concavità alternate	71
Figura 5.26 Forza ammortizzatore anteriore, percorso a concavità alternate	72
Figura 5.27 dettaglio forza ammortizzatore anteriore, percorso a concavità alternate	72
Figura 5.28 Forza ammortizzatore posteriore con caso 0, percorso a concavità alternate	73
Figura 5.29 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate	73
Figura 5.30 dettaglio forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate	73
Figura 5.31 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico, misura CM, caso 1	75
Figura 5.32 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico , misura montante anteriore, caso 1.....	76
Figura 5.33 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate con carico, caso 1	76
Figura 5.34 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate con carico, caso 1	77
Figura 5.35 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico, misura CM, caso 2	78
Figura 5.36 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico , misura montante anteriore, caso 2.....	78
Figura 5.37 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate con carico, caso 2	79
Figura 5.38 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate con carico, caso 2	80

Indice delle tabelle

Tabella 1.3.1 specifiche del pacco batterie [22]	32
Tabella 1.3.2 specifiche del gruppo motore-riduttore [22]	33
Tabella 4.1.1 caratteristiche del telaio.....	39
Tabella 4.1.2 caratteristiche dei montanti	39
Tabella 4.1.3 caratteristiche delle ruote	39
Tabella 4.1.4 valori utilizzati per modellare il contatto ruota-terreno.....	41
Tabella 5.1.1 Spostamento Y percorso single bump, misura CM	51
Tabella 5.1.2 Spostamento Y percorso a single bump, misura montante anteriore.....	52
Tabella 5.1.3 Forza su ammortizzatore frontale, percorso a single bump	54
Tabella 5.1.4 Forza su ammortizzatore posteriore, percorso a single bump.....	55
Tabella 5.2.1 Prestazioni minime del motore per spostare il rover a 2.2 km/h sul percorso a concavità multiple	57
Tabella 5.2.2 Spostamento Y percorso a concavità multiple, misura CM.....	58
Tabella 5.2.3 Spostamento Y percorso a concavità multiple, misura montante anteriore	59
Tabella 5.2.4 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità multiple	60
Tabella 5.2.5 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità multiple	61
Tabella 5.2.6 Spostamento Y percorso a concavità multiple, misura CM.....	62
Tabella 5.2.7 Spostamento Y percorso a concavità multiple , misura montante anteriore	63
Tabella 5.2.8 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità multiple	64
Tabella 5.2.9 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità multiple	65
Tabella 5.3.1 Spostamento Y percorso a concavità alternate, misura CM	66
Tabella 5.3.2 Spostamento Y percorso a concavità alternate, misura montante anteriore	67
Tabella 5.3.3 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate.....	68
Tabella 5.3.4 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate	69
Tabella 5.3.5 Spostamento Y percorso a concavità alternate , misura CM	70
Tabella 5.3.6 Spostamento Y percorso a concavità alternate , misura montante anteriore.....	71
Tabella 5.3.7 Forza ammortizzatore anteriore, percorso a concavità alternate	72
Tabella 5.3.8 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate	74
Tabella 5.4.1 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico, misura CM, caso 1	75
Tabella 5.4.2 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico , misura montante anteriore caso 1.....	76
Tabella 5.4.3 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate con carico, caso 1	77
Tabella 5.4.4 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate con carico, caso 1	77
Tabella 5.4.5 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico, misura CM, caso 2	78
Tabella 5.4.6 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico , misura montante anteriore, caso 2.....	79
Tabella 5.4.7 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate con carico, caso 2	79

Tabella 5.4.8 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate con carico, caso 2	80
Tabella 5.4.9 Valori ottimali per il sistema di sospensioni di SMILLA H2	80

1. Introduzione

Il settore agricolo è costantemente in evoluzione verso pratiche e tecnologie che permettano l'ottimizzazione dei processi. Nel corso del tempo si è passati dall'avere un grande numero di persone impiegate nel lavoro dei campi, ad un solo operatore che oggi, grazie agli strumenti disponibili, è in grado di gestire tutte le fasi di preparazione, semina del terreno e raccolta, in minor tempo, senza l'impiego di lavoro fisico e riuscendo a coprire estensioni di terreno prima impensabili [1].

L'evoluzione continua tutt'oggi, in direzione di tecnologie che mirano ad un'ulteriore riduzione della componente umana del lavoro, grazie ad un'automazione dei processi ripetitivi che integra la misura, l'elaborazione e l'intelligenza decisionale digitale permessi dai sistemi moderni di gestione dei dati. L'applicazione della raccolta dati ai fini gestionali e produttivi, già presente nelle macchine industriali dal secondo dopoguerra, si realizza nei veicoli autonomi per le lavorazioni del terreno, in cui si utilizzano tecnologie di navigazione satellitare (di tipo GNSS) per l'orientamento nello spazio, algoritmi di calcolo del percorso ottimale, programmi di ottimizzazione per avere le massime prestazioni o i minimi consumi e raccolta dati sui parametri di processo utili alla casa madre e agli algoritmi ai fini decisionali, così da migliorare continuamente il processo sulla base dell'esperienza precedente. Ciò è reso possibile anche dal costo via via contenuto, unito al drastico aumento di prestazioni negli ultimi anni, dei sensori e delle schede di elaborazione dati disponibili [2].

L'aumento dei dati a disposizione permette uno spostamento verso uno tipo di strategia denominato "agricoltura di precisione", in cui l'impiego di risorse avviene in maniera mirata. Si possono diminuire gli sprechi di pesticidi, fertilizzanti, la perdita di piante per malattie effettuando trattamenti mirati alle colture; automatizzando il processo si riduce la componente umana che interviene solo nel caso di segnalazione della macchina (così come capita nell'industria). Questo porta con sé una possibilità di aumento della produzione alimentare e agricola in generale con una riduzione delle risorse impiegate. L'agricoltura di precisione è quindi una strategia di gestione dell'attività agricola che consiste nel raccogliere dati, elaborarli, analizzarli e combinarli con altre informazioni per orientare le decisioni aziendali e di processo al fine di migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse (utilizzandole solamente dove e quando necessario, in base ai dati raccolti) la produttività, la qualità e la redditività della produzione agricola[3].

L'introduzione di più capillari sistemi di controllo permette di ottimizzare la produzione garantendo trattamenti su misura per le esigenze delle colture, l'aumento della redditività grazie al minor spreco di risorse e un aumento del rendimento del raccolto. Questo porta una migliore pianificazione aziendale sia economica che agricola dovuta alla presenza di dati specifici relativi alle esatte quantità prodotte in determinate posizioni del terreno, abbinate ai dati del clima, alle continue analisi sulla qualità del prodotto e prestazioni dei mezzi [4]. La capacità di un veicolo a guida autonoma di localizzare la propria posizione precisamente in un campo consente la creazione di mappe degli

andamenti superficiali di tutte le variabili che possono essere misurate dai sensori (resa delle colture, caratteristiche/topografia del terreno, contenuto di materia organica, livelli di umidità, livelli di azoto, pH, EC, Mg, K, livelli di clorofilla). Questi dati possono essere combinati con le immagini satellitari e utilizzati per ottimizzare la gestione, mediante ad esempio tecnologie di distribuzione a rateo variabile (VRT), applicate all'irrigazione, alla concimazione o alla semina. [3]

Negli ultimi anni si registra che oltre 4,6 miliardi di dollari sono stati investiti in aziende tecnologiche per l'agricoltura. Uno dei sistemi più promettenti, che si sta recentemente diffondendo nel settore come tecnologia per effettuare analisi e monitoraggio delle colture è quello dei droni, sia aerei che terrestri. Grazie a questo nuovo approccio è possibile ricavare una grossa mole di dati utilizzabile per una migliore gestione delle operazioni agricole. L'utilizzo dei droni permette una elevata riduzione del lavoro manuale unito alla altrimenti impossibile raccolta dati e monitoraggio delle colture, con una soluzione poco ingombrante utilizzabile in terreni aperti, serre e vigneti. L'automazione dei compiti manuali e ripetitivi riduce enormemente la componente di errore umano, aumentando la sicurezza degli operatori che vedono una ridotta esposizione al rischio di incidenti con i macchinari, oltre che ridurre l'esposizione dell'operatore a gas tossici, polveri, pesticidi, vibrazioni e rumore [5].

I rover rappresentano una forma di automazione dei processi agricoli via terra, per tali tecnologie si registra un crescente interesse sia accademico che industriale, dimostrato dai grossi investimenti fatti dalle aziende produttrici di mezzi agricoli e dai numerosi prodotti già presenti sul mercato. Pertanto risulta interessante ed estremamente attuale andare ad analizzare cosa sia in grado di fare questa tecnologia. Il crescente interesse globale verso le soluzioni agricole di tipo rover, può essere spiegato da diverse ragioni, alcune delle quali già anticipate, sono spinte di tipo economico, demografico, tecnologico e ambientale [4]:

- **Mancanza di manodopera e aumento dei costi di impiego:** il reperimento di manodopera specializzata e non, per compiti stagionali come la raccolta, sta diventando sempre più difficile nelle nazioni sviluppate, anche per via dell'elevata inflazione che rende molto costoso al produttore fornire uno stipendio adeguato. L'invecchiamento generale della popolazione inoltre fa sì che sia ridotta la percentuale di individui giovani, essi rappresentano il target di età più adatto ai lavori agricoli. I produttori sono costretti a trovare altre soluzioni oppure a ridurre la produttività. L'automazione dei processi può sostituire la forza lavoro mancante garantendo prestazioni costanti nel tempo per tutta la durata dell'autonomia prevista e dando continuità alle operazioni agricole che sono strettamente tempo-dipendenti. L'impiego di soluzioni automatiche contribuisce all'abbassamento dei costi aziendali nel lungo termine.
- **Aumento della domanda per pratiche di Agricoltura di Precisione:** la pressione economica sulle aziende agricole fa sì che aumenti l'interesse verso pratiche di ottimizzazione delle risorse impiegate nei processi, di riduzione degli sprechi e di aumento del raccolto. I sensori di cui sono dotati i robot e i sistemi di elaborazione permettono un approccio di precisione alle operazioni agricole.

-
- **Avanzamenti tecnologici:** i progressi in tecnologie quali algoritmi decisionali, sistemi di automazione, sensori, hanno reso l'agricoltura robotica di precisione realizzabile anche a livello commerciale, fornendo la componentistica di ultima generazione, ad altissime prestazioni come capacità di elaborazione dati, a prezzi relativamente accessibili.
 - **Sostenibilità e preoccupazioni ambientali:** l'attenzione alla sostenibilità e rinnovabilità dei processi sta influenzando sempre maggiormente le pratiche agricole. I consumatori e gli enti normatori richiedono una riduzione dell'impatto ambientale riguardante l'uso indiscriminato di sostanze chimiche, l'erosione e l'impoverimento del suolo, lo spreco di acqua. I rover consentono di effettuare lavorazioni di precisione in grado di trattare solamente i siti interessati ad esempio con diserbanti o pesticidi, senza inutile dispersione nell'ambiente. Esistono rover in grado di eseguire il diserbo meccanicamente o tramite ausilio di laser, eliminando completamente l'impiego di sostanze inquinanti. Si rende dunque più facile la coltivazione di prodotti biologici, è possibile soddisfare la nuova domanda di mercato e rispettare l'ente normatore senza sacrificare le cure alle piante o la produttività.
 - **Aumento del fabbisogno alimentare:** il bisogno di incrementare la produzione alimentare è uno dei fattori più influenti nel mercato dei rover agricoli. Le previsioni di crescita della popolazione mondiale suggeriscono una necessaria crescita del 60% della produzione agricola al fine di soddisfare il crescente fabbisogno di alimenti. Le soluzioni robotizzate sono in grado di aumentare la produzione grazie all'aumentata efficienza rispetto alla manodopera umana, alla capacità di lavorare senza sosta per tutto il tempo necessario, alla minimizzazione dello spreco di risorse, garantendo una gestione e raccolto migliori da un dato appezzamento di terreno.
 - **Contributi statali e politiche di agevolazione:** il recente supporto dei governi sta accelerando e facilitando la diffusione dei robot agricoli, elargendo premi o coprendo parte dei costi iniziali di acquisto. L'obiettivo di queste politiche è l'abbassamento della barriera finanziaria, specialmente per piccole e medie aziende. Si danno agevolazioni ad aziende che effettuano investimenti in questo tipo di tecnologie e se ne finanzia la ricerca.

Nonostante i numerosi fenomeni che la favoriscono, l'integrazione di tali prodotti nelle operazioni agricole globali è ostacolata da alcuni limiti di tipo economico, tecnologico e logistico:

- **Elevato costo iniziale:** è la barriera più incidente sulla diffusione, il costo d'acquisto di un rover autonomo è comunque elevato. La combinazione di sistemi di analisi, raccolta dati ad alte prestazioni e la loro continua gestione concorrono al valore elevato del costo iniziale, esso è tuttavia principalmente dovuto alla produzione ancora in scala ridotta. Le piccole aziende agricole risultano sfavorite in quanto il ritorno immediato è troppo basso per giustificare tale investimento.
- **Manutenzione e costi operativi:** oltre i costi iniziali vanno sostenuti dei continui costi di esercizio. Trattandosi di macchine molto complesse i rover richiedono costante manutenzione e particolari parti di ricambio, non reperibili agevolmente specialmente nella fase iniziale della

diffusione. È inoltre necessaria la presenza di manodopera specializzata, anch'essa difficile da reperire, penalizzando le zone di lavoro più remote/svantaggiate.

- **Difficoltà di utilizzo:** i sistemi robotici attualmente presenti in commercio richiedono delle conoscenze tecniche per poter essere messi in esercizio, come la calibrazione dei sensori o la manutenzione dei sistemi digitali. In generale anche l'uso dell'interfaccia oppure la programmazione delle funzioni da eseguire in base all'ambiente di lavoro, necessarie per sfruttare al massimo il prodotto, richiedono addestramento e corsi di aggiornamento per i proprietari, la cui infrastruttura non è ancora diffusa. È disponibile l'assistenza online o nelle zone vicine alle case madri, servizio non adeguato alla diffusione capillare del prodotto.
- **Assenza dell'infrastruttura informatica:** i sistemi di elaborazione e scambio dati utilizzano la connessione alla rete, pertanto le operazioni dipendono dalla velocità di connessione localmente disponibile. Per non appesantire e complicare ulteriormente i sistemi di gestione dati a bordo rover, molte operazioni di processamento sono previste su server esterni (cloud computing), così come lo scambio di informazioni con i database della casa madre. Nelle aree rurali non è garantita la presenza di connessioni ad alta velocità, non è detto che il rover riesca a lavorare con lo scambio dati per cui è stato progettato. Lo stesso segnale GPS potrebbe essere non accessibile invalidando la capacità di navigazione.

Visto il crescente interesse per la ricerca sui rover agricoli si sviluppa il seguente lavoro di tesi. È trattata la modellizzazione e simulazione di un sistema di sospensione per il rover Smilla H2 sviluppato dalla collaborazione tra Ecothea Srl e il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale (DIMEAS) del Politecnico di Torino. Il lavoro è articolato in 5 capitoli contenenti i seguenti argomenti:

- **Capitolo 1:** dopo il breve paragrafo introduttivo precedente, contiene un paragrafo spiegazione e illustrazione di alcune tecnologie di rover esistenti già presenti sul mercato, insieme alla spiegazione concettuale dei requisiti di un mezzo di questo tipo.
- **Capitolo 2:** contiene lo stato dell'arte per quanto riguarda le soluzioni di sospensione per rover adottate dai produttori, con i corrispondenti terreni, caratteristiche di funzionamento ed esempi di rover in cui sono implementate
- **Capitolo 3:** contiene il caso studio del rover SMILLA H2; si descrivono brevemente le sue componenti principali, successivamente si spiega nel dettaglio l'obiettivo del lavoro.
- **Capitolo 4:** si descrive la fase di modellazione, ripercorrendo passo passo le fasi di costruzione del modello del rover. Sono descritti i percorsi in cui verranno svolte le simulazioni.
- **Capitolo 5:** si riportano i risultati del lavoro di simulazione e l'analisi degli andamenti ottenuti mediante KPI, sono riportati infine i parametri migliori ottenuti.

1.1 Rover agricoli

I rover agricoli possono essere definiti come macchine automatiche o semi-automatiche progettate per svolgere funzioni specifiche nel settore agricolo. Sono dotati di sistemi di percezione dell'ambiente circostante e di intelligenza decisionale in grado di interagire attivamente con l'esterno, svolgono compiti con elevata precisione, accuratezza ed efficienza per un determinato tempo di autonomia, sostituendo la forza lavoro umana passibile di stanchezza e calo di prestazioni.

Data la complessità delle condizioni di lavoro sono dotati di avanzati sistemi di navigazione e capacità di adattamento, si possono individuare almeno 4 macro componenti che accomunano tutti i rover attualmente esistenti [5]:

- Sistemi di visione: effettuano la raccolta dei dati in input, possono essere costituiti da telecamere a infrarossi, a tempo di volo, a colori e profondità (RGB-D), multispettrali.
- Sistema di controllo: effettua l'attività decisionale e di programmazione del percorso, in genere fatto con algoritmi di Intelligenza artificiale o Machine Learning.
- Attuatori meccanici: permettono l'interazione del controllo con l'ambiente esterno, consistono in appendici o sistemi di presa necessari per svolgere determinate funzioni.
- Sistemi di localizzazione: tramite informazioni satellitari e sensori RTK/GNSS raccolgono i dati necessari al tracciamento della traiettoria e al controllo della posizione durante il movimento.

Esistono anche tecnologie di tipo aereo concepite per applicazioni agricole (droni a guida autonoma).

Il sistema di visione permette la percezione dell'ambiente esterno, ricevendo in input informazioni di vario tipo in base al tipo di sensore, come ad esempio telecamere nello spettro del visibile, le cui immagini possono essere destinate ad algoritmi di riconoscimento semplici o al controllo di missione da parte dell'operatore, sensori ottici (Lidar) o infrarossi, usati per gli ostacoli in prossimità del rover in modo da evitare gli urti, telecamere multispettrali, che permettono rilevazioni più complete e riconoscimenti più precisi dei dintorni. Questo, insieme a quello di localizzazione, permette loro di navigare autonomamente nell'ambiente seguendo il percorso preimpostato, evitando il danneggiamento proprio o di beni esterni. La tipologia e quantità di sensori utilizzabili dipendono dalla forma del rover, in quanto il telaio e l'ingombro devono permetterne l'installazione fisica, e dalla funzione: applicazioni esterne esigono sensori più robusti e resistenti dalle intemperie, applicazioni di monitoraggio necessitano di adeguati strumenti di rilevazione quali telecamere multispettrali e schede di elaborazione, applicazioni di preparazione del terreno come l'aratura necessitano principalmente di sistemi di rilevazione ostacoli e tracciamento del percorso.

Le appendici meccaniche, allo stesso modo, dipendono dal compito da svolgere. Si possono avere organi tattili, per la raccolta di frutti, aghi o ugelli per l'irrorazione di pesticidi o l'irrigazione, bracci robotici per il diserbo meccanico, forbici per la potatura. [2]

Le prime ricerche su applicazioni di automazione agricola a guida autonoma risalgono agli anni 50'-80', con l'ideazione di diversi prototipi concettuali ispirati ai macchinari che stavano diffondendosi nell'industria. Attualmente si è giunti a prodotti funzionanti disponibili in commercio, la ricerca comunque continua ad ottimizzare i processi decisionali, di navigazione, di orientamento e localizzazione spaziale, di elaborazione e riconoscimento immagini. I robot agricoli sono utilizzati per applicazioni tra cui la preparazione del terreno, il controllo delle infestanti, l'applicazione di erbicidi, la raccolta, la potatura, il trapianto e la semina..

1.2 Requisiti di un rover agricolo

I requisiti per la realizzazione di un robot agricolo sono molto più stringenti rispetto ad un macchinario industriale, in quanto in genere esso lavora in un ambiente con caratteristiche non pienamente prevedibili [6]. Esso deve effettuare contemporaneamente la raccolta dati, elaborarli con i processi decisionali e implementare la decisione in tempo reale, a differenza della progettazione di un robot industriale, che si interfaccia costantemente con lo stesso ambiente.

È richiesta un'ottima capacità di elaborare dati ed algoritmi efficienti per gestire le informazioni che arrivano dai sensori, prendere una decisione ed effettuare le operazioni assegnate in un ambiente con topografia variabile, con raccolto di forma casuale e con condizioni meteorologiche avverse. Inoltre, dato che la produzione agricola è stagionale, è poco appetibile l'acquisto di un robot a singola funzione, è ottimale dunque l'integrazione di funzioni diverse.

Secondo la letteratura la maggior parte dei robot in commercio trova applicazione nelle operazioni di gestione del raccolto. La natura delicata delle piante, dei semi e dei frutti, unita all'imprevedibilità e complessità del loro posizionamento spaziale fa sì che sia necessaria un'elevata mobilità e accuratezza di posizionamento degli organi meccanici per applicazioni di questo tipo, insieme con funzioni di riconoscimento delle varie parti vegetali.

Attività come la semina, la fertilizzazione, il diserbo e la raccolta sono estremamente legate, nel loro successo, alla tempistica di esecuzione. Pertanto i robot devono essere in grado di operare, anche in condizioni avverse, per lunghi periodi di tempo. La riparazione e manutenzione richiedono l'intervento di tecnici specialistici, la cui infrastruttura negli stadi iniziali di commercializzazione non sarà diffusa, pertanto è necessario che i robot siano altamente duraturi e resistenti, con un'elevata affidabilità almeno pari a quella dei mezzi di produzione già presenti.

Un'azienda agricola ha necessariamente bisogno di più rover per effettuare tutte le lavorazioni nei tempi previsti. È necessaria un'infrastruttura informatica che permetta di gestire la complessità computazionale generata dall'utilizzo dei robot in modalità flotta, con algoritmi di calcolo della suddivisione del lavoro, della copertura superficiale, di scongiura delle collisioni. Questo rende più allettante al cliente l'acquisto di più rover.

1.3 Robot in commercio

È interessante riportare alcuni esempi di robot agricoli effettivamente presenti sul mercato per cui è disponibile l'elenco delle specifiche e delle funzioni effettuabili.

1.3.1 Burro

Burro è un robot collaborativo progettato per lavorare nella raccolta, liberando l'operatore umano dal trasporto e dallo spostamento di carichi. È in grado di lavorare come piattaforma di supporto per sistemi di irrorazione, monitoraggio e falciatura. È un robot di medie dimensioni con un ingombro di 140x92x73 cm (La x Lu x A) e un peso di 182 kg, è in grado di lavorare con carichi fino a 226 kg e di trascinare attrezzi attaccati posteriormente del peso di 900 kg.

È dotato di 4 motori elettrici con spazzole, uno per ruota, in grado di erogare una potenza massima di 3.9 kW, una coppia media di 125.7 Nm, una coppia massima di 439 Nm. La velocità massima misurata senza carico è di 7.7 km/h. La batteria è da 2.4 kWh, con una porta da 24V, ed un tempo di ricarica di 8h. La temperatura indicata di lavoro è nell'intervallo da -20°C a 45°C.

Dal punto di vista informatico e sensoristico è dotato di 4 telecamere stereo (12 in totale), di componenti che permettono lo sfruttamento della tecnologia GPS RTK, di un modem 4G per l'invio e la ricezione di dati, GPU e CPU localmente installati con una RAM di 16GB aumentabile fino a 32 ed una memoria SSD da 256 GB.

È dotato di uno schermo touch, di luci anteriori e posteriori per la segnalazione visiva e di casse per la segnalazione audio, di sistemi per la visualizzazione online della posizione sulla mappa da parte dell'utente.

I sistemi di controllo permettono lo spostamento in modalità collaborativa, inseguendo l'operatore rimanendo ad una distanza di sicurezza prefissata, oppure definendo un percorso preciso che viene fatto percorrere manualmente al rover ed è così memorizzato. Il percorso può essere definito anche informaticamente tramite la mappa sfruttando il GPS.

È dotato di sensori anticollisione e per seguire i filari e lo spostamento tra essi, è in grado di effettuare autonomamente il monitoraggio del raccolto inviando le immagini all'operatore.



Figura 1.1 aspetto del robot Burro[7]

1.3.2 AgroIntelli Robotti

Agrointelli Robotti è un robot autonomo in grado di eseguire semina, diserbo, irrorazione, rullatura, rinalzatura del terreno ed altre operazioni di preparazione. È in grado di utilizzare le attrezzature standard per le lavorazioni del terreno, di svolgere funzioni di controllo e raccolta dati sulle colture. È progettato per svolgere le operazioni con estrema precisione grazie alla possibilità di tracciare e monitorare tutte le grandezze del processo, è pertanto adatto a lavorare nell'orticoltura, nei vivai e nei filari.

Utilizza un sistema di posizionamento RRK-VRS che garantisce un errore massimo di posizionamento di 2.5 cm. A differenza dei robot descritti è alimentato da un motore diesel a 4 cilindri con 72 cavalli e un serbatoio da 300l che garantisce 60 ore di autonomia.

La velocità di avanzamento in esercizio è di 5 km/h e di 10 km/h nello spostamento libero.

Ha un attacco standard a 3 punti con capacità di sollevamento di 1250 kg, ha 3 distributori idraulici da 50l/m. Senza carichi ha una massa di 3000kg, la distribuzione dei pesi è tale da ridurre la compattazione del suolo.

È in grado di sterzare intorno a un punto con raggio di sterzata nullo, questo gli consente ottima manovrabilità in spazi ridotti, aumentando l'area di lavoro del terreno.

Essendo dotato di un ingombro e una massa considerevoli è fornito di sistemi di anticollisione quali sensori LiDAR, paraurti sensibile alla pressione, limite di avvicinamento ad un ostacolo sulla base delle informazioni GPS, monitoraggio di deviazione dal percorso e sorveglianza dello slittamento delle ruote, prevenzione degli impantanamenti, pulsante di arresto sul telecomando, fari anteriori e posteriori e telecamere frontali e posteriori.

Il robot è di grosse dimensioni, l'ingombro è di 490x244x215 cm (La x Lu x A).



Figura 1.2 aspetto del robot Agrobot Oz [8]

1.3.3 Oz

Il robot Oz prodotto dalla Naio è dotato di un ingombro di 62x130x83 cm (La x Lu x A), con un peso di 160kg. Ha 4 ruote motrici alimentate da una batteria da 2.6 kWh, che necessita di una ricarica di 6h. È in grado di lavorare ad una velocità fino a 1.8 km/h e di trasportare un carico di 60kg.

È modificabile con l'aggiunta di attrezzi specifici per la preparazione del terreno, la semina, il diserbo sul filare, il diserbo interfilare che sono disponibili in modelli e tipi diversi.

È dotato di un'antenna GPS e di sistemi di registrazione in grado di generare il percorso di lavoro in base alle dimensioni del filare, sulla base della mappatura del terreno che il robot traccia ad ogni lavorazione. La mappatura è poi validata da un esperto in modo tale che sia garantita la guida ottimale del rover.



Figura 1.3 aspetto del robot Oz [9]

1.3.4 Vitibot Bakus

Il robot Vitibot Bakus è un robot progettato per lavorare nei vigneti, con un peso ai 2.000 chili, è disponibile in due versioni, entrambe lunghe 3,5 m; la S ha una larghezza di 1,75 m e un'altezza di 2,0 m, ed è indicata per i vigneti stretti, mentre la L, di dimensioni maggiori, è larga 1,95 m e alta 2,5 m.

La riserva energetica di 40-60 kWh (a seconda del modello) è garantita da quattro batterie agli ioni di litio che alimentano quattro motori elettrici brushless indipendenti con recupero dell'energia in discesa. Viene così assicurata un'autonomia di circa dieci ore, variabile ovviamente a seconda della pendenza, del tipo di terreno e degli attrezzi impiegati. È in grado di viaggiare ad una velocità massima di 6 chilometri orari e di erogare una forza di trazione di 1.800 chilogrammi, con un costo orario di funzionamento che il costruttore dichiara inferiore a un euro.

Il tempo di ricarica delle batterie è inferiore a 2 ore per passare da 0 a 80 per cento di carica.

La guida automatica si avvale di due GPS RTK per una precisione centimetrica, mentre due centraline inerziali segnalano cambiamenti inabituali della topografia che provocano il rallentamento e/o lo stop di Bakus. 12 pulsanti di emergenza ripartiti intorno al robot-trattore causano lo stop immediato nel caso in cui vengano azionati.

Bakus si muove tra un filare e l'altro in totale autonomia a una distanza tra le file di un metro, gira su se stesso in 4 metri grazie alle 4 ruote motrici e direzionali e riesce ad affrontare tranquillamente pendenze frontali fino al 45 per cento nonché a lavorare su una pendenza laterale massima del 20 per cento.

Per entrambi i modelli VitiBot ha sviluppato una gamma di attrezzi elettrici installabili sui portattrezzi laterali, in grado di svolgere le comuni lavorazioni interfilari. È possibile combinare fino a due attrezzi per lato, e in simultanea. Attualmente sono disponibili la lama interceppo, il trinciaerba e la cimatrice.

Si possono usare inoltre la maggior parte degli strumenti passivi (dischi falciatori, zappatrici a dita, sarchiatrici, vomeri scalzanti, ecc...) in combinazione, o no, con gli strumenti elettrici VitiBot.



Figura 1.4 aspetto del VitiBot Bakus [10]

1.3.5 Autoagri ICS20

L'Autoagri ICS20 è un robot a guida autonoma progettato per essere compatibile con gli attrezzi da trattore per lavorazioni pesanti sul terreno, è infatti dotato di attacco a tre punti posizionato centralmente nel telaio con una presa di forza sia meccanica che elettrica. L'ingombro è di 411x240x226 cm, considerato di grandi dimensioni, il peso senza carico è di 2500kg, in grado di lavorare con attrezzi fino a 2000 kg.

È dotato di 4 motori con una potenza nominale di 10 kW e massima di 17 kW. La coppia massima per ciascuna ruota è di 3600Nm. Le ruote sono dotate di motorini sterzanti e sono capaci di ruotare di 360°, garantendo un raggio nullo di sterzo.

La velocità massima è di 12 km/h senza carico, la batteria è in grado di immagazzinare 64 kWh.

È dotato di sensori LiDAR anticollisione, di telecamere per il monitoraggio, è in grado di lavorare in modalità autonoma o telecomandata, ed utilizza la tecnologia GPS RTK.



Figura 1.5 aspetto del robot Autoagri ICS20[11]

2. Stato dell'arte dei sistemi di sospensione per rover

La funzione principale del sistema di sospensione di un veicolo è quella di isolare la massa sospesa da ondulazioni e irregolarità del profilo stradale, facendo aderire contemporaneamente tutte le ruote al terreno. L'isolamento della massa sospesa da vibrazioni indesiderate e la continua aderenza delle ruote risultano in un moto regolare del veicolo. Il tipico sistema di sospensioni è costituito da una molla e uno smorzatore, opportunamente collegati meccanicamente alla massa da ammortizzare.

Un veicolo dotato di un sistema di sospensioni in generale può essere modellizzato considerandone solamente un quarto, secondo il modello quarter-car. Il modello è strutturato nel seguente modo:

- Massa sospesa (M_s) : rappresenta la massa del veicolo che è supportata dalle sospensioni
- Massa non sospesa (M_u): è costituita da parti come i cerchioni e gli pneumatici, che non poggiano sulle sospensioni.
- Rigidezza della sospensione (K_s): determina quanto il sistema si comprime sotto carico, è misurata in N/m, ovvero i N necessari ad ottenere una compressione di 1 m.
- Coefficiente di smorzamento (C_s): determina la capacità di smorzamento delle oscillazioni e dissipazione di energia, si misura in Ns/m e rappresenta i N necessari a far spostare alla velocità di 1 m/s l'estremo della sospensione
- Rigidezza dello pneumatico (K_t): si può vedere lo pneumatico come una molla con una determinata rigidezza.
- Smorzamento dello pneumatico (C_t): lo smorzamento interno dello pneumatico.

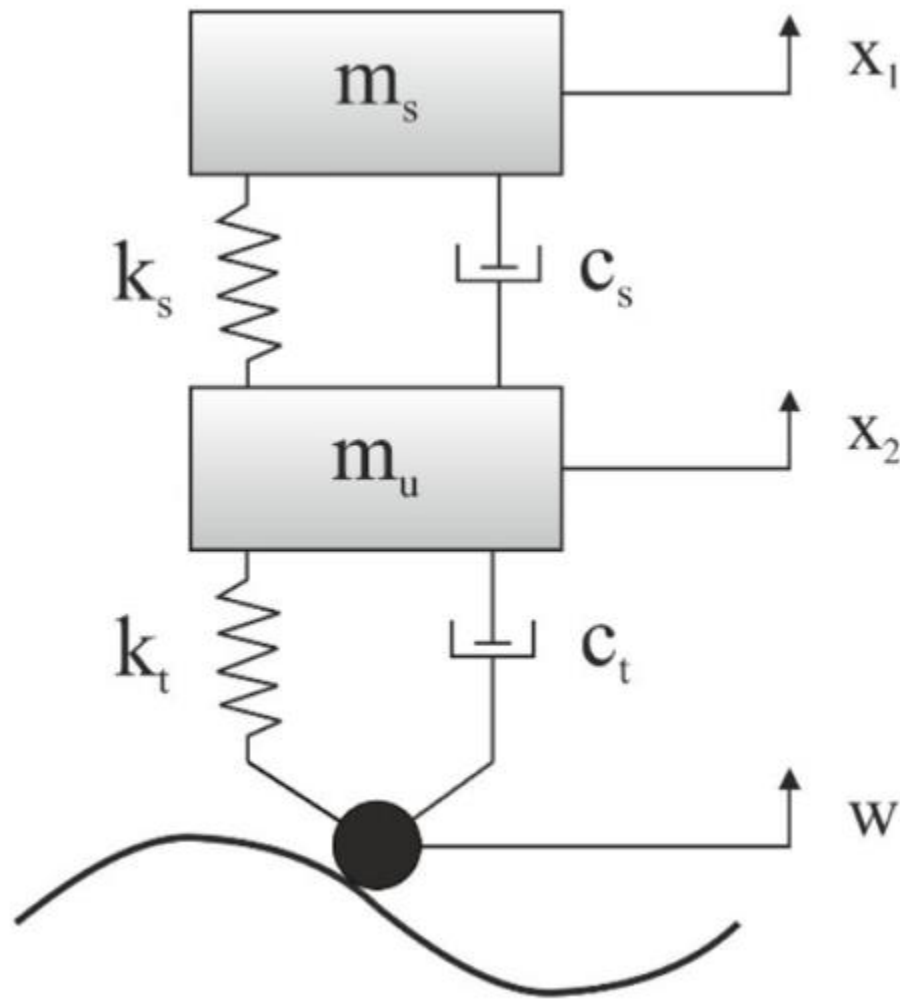


Figura 2.1 modello quarter-car [12]

La rigidezza influenza il trasferimento dei carichi originati dalla variazione del profilo stradale, che causa l'accumulo dell'energia elastica di interazione con l'ostacolo. Una bassa rigidezza trasmette forze minori alla massa sospesa, a parità di spostamento della ruota, aumentandone la stabilità durante il movimento. Una rigidezza elevata trasmette forze maggiori alla massa, rendendo il moto di essa sensibile ai disturbi del profilo stradale, per contro aumenta l'aderenza del veicolo in curva trasmettendo carichi più elevati alle ruote posizionate esternamente al centro di curvatura.

Il coefficiente di smorzamento influenza l'assorbimento di energia immagazzinata in forma elastica e il ritorno alle condizioni iniziali. Un elevato coefficiente di smorzamento arresta immediatamente le vibrazioni riportando il sistema alla stabilità, riducendo la trasmissibilità dei disturbi, questo risulta in elevate sollecitazioni al carico. Un coefficiente di smorzamento basso aumenta la trasmissione di disturbi, si hanno maggiori oscillazioni ma con andamenti più morbidi e ritorno graduale, le forze trasmesse sono molto minori.

In agricoltura i sistemi di sospensione sono sfruttati per ridurre l'impatto delle irregolarità del terreno sull'operatore, l'esposizione a vibrazioni continue per parecchie ore al giorno può causare problemi alle articolazioni e alla schiena. L'aumento della comodità delle condizioni di lavoro permette di lavorare più a lungo e di ridurre gli errori associati alla stanchezza/distrazione. Gli effetti sono benefici anche per i macchinari, si hanno minori sollecitazioni sui componenti, aumenta la vita utile e riduce l'incidenza di interventi di manutenzione. Aumentano la stabilità e la trazione, migliora l'adattabilità alle condizioni del terreno, si può così procedere più velocemente durante le lavorazioni in sicurezza. L'aumento della trazione è garantito dal contatto di tutte le ruote sul terreno, i carichi sono ripartiti uniformemente negli pneumatici, e negli ingranaggi e negli assi, si riducono i sovraccarichi e aumenta la vita utile [13].

I terreni di tipo agricolo comprendono una grande varietà di condizioni, gli ambienti di lavoro per un veicolo non sono facilmente prevedibili come per un'automobile che circola su strada. Nel caso di veicoli a guida autonoma questo limita considerevolmente il campo di applicazione rispetto ai veicoli tradizionali, perché non è presente un operatore in grado di prevedere e gestire l'interazione del veicolo con il terreno, questo è lasciato al sistema di controllo del robot [14].

Il sistema di sospensione deve essere in grado di facilitare il passaggio del veicolo su un percorso di tipo altamente variabile, garantendo, oltre allo smorzamento di vibrazioni e oscillazioni, il contatto di tutte e quattro le ruote in ogni istante con il terreno. Si tratta il caso di rover gommato, ma esistono anche rover che dispongono di soluzioni a cingoli.

Nella letteratura scientifica gli articoli riguardanti i rover agricoli si concentrano principalmente sullo studio dello svolgimento delle mansioni previste, oppure sul sistema di localizzazione, quasi assenti sono gli studi sulla stabilità del rover durante l'esercizio, che dà invece una grossa limitazione alle condizioni in cui può essere impiegato.

I tipi di terreno su cui il rover si dovrà muovere possono essere classificati in base a diverse caratteristiche, tra le tante se ne possono individuare tre principali:

- Regolarità
- Coesione
- Pendenza

La regolarità tiene conto delle variazioni nel profilo del terreno che impattano direttamente nel moto del veicolo, cambiando la distribuzione e l'intensità delle forze scambiate nel contatto. Per terreno irregolare s'intende un terreno contenente variazioni altimetriche di dimensioni variabili. In generale le serre o i campi in cui si coltivano verdure o cereali presentano un'elevata regolarità, mentre le aree boschive possono avere regolarità molto basse.

La coesione del suolo invece quantifica la resistenza di quest'ultimo a sollecitazioni di taglio, come quella applicata da un veicolo in movimento. Un suolo con bassa coesione si deforma considerevolmente e può causare impantanamenti. Per via delle comuni operazioni svolte nell'agricoltura il suolo risulta spesso a bassa coesione, può inoltre essere argilloso, sabbioso oppure fangoso. Queste condizioni influenzano la capacità di trazione delle ruote e possono causare sbandate, scivolamenti e impantanamenti. Alcuni accorgimenti adottabili per ridurre l'impatto di un suolo poco coeso sono l'utilizzo di pneumatici che riducano la pressione sul terreno, ad esempio con un battistrada più largo, e con la presenza di profili in rilievo in grado di aumentare la trazione.

La pendenza infine influenza la distribuzione di peso tra le ruote e la posizione del centro di massa del veicolo rispetto alla struttura, lo spostamento del centro di massa, unito alle interazioni con il terreno può causare ribaltamento.

Sulla base dell'indagine letteraria condotta è stato possibile caratterizzare in quattro categorie le soluzioni di sospensioni usate dai rover UGV (unmanned ground vehicle):

- Rigide
- Passive
- Attive
- Ibrida

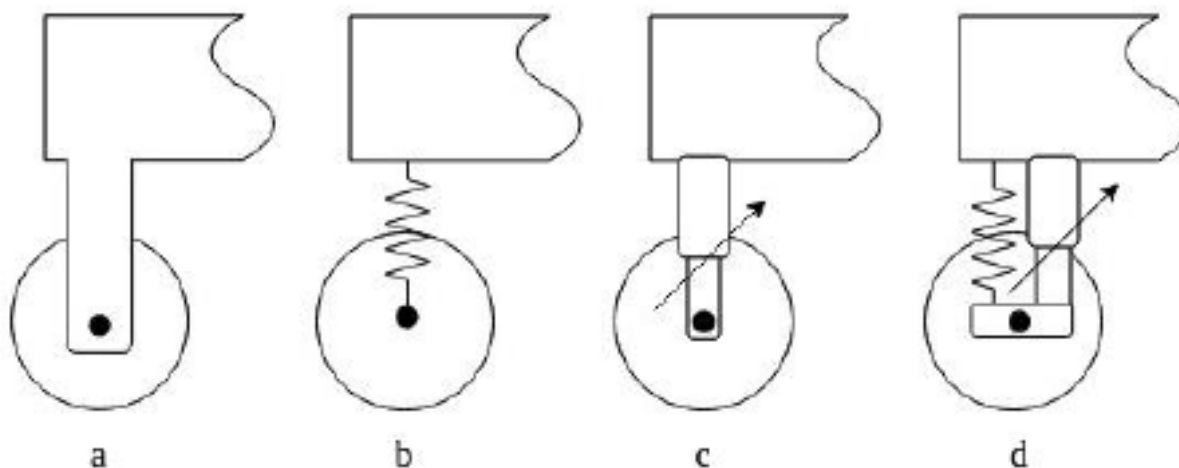


Figura 2.2 a) sospensione rigida, b) passiva, c) attiva, d) ibrida; Fonte:[14]

Nel caso della configurazione rigida la ruota è collegata rigidamente al telaio, dato che non vi è possibilità di movimento relativo questo sistema non lavora bene in caso di terreno irregolare, specialmente se poco coeso (trazione ridotta per via delle ruote non sempre a contatto con il terreno), aumenta il rischio di ribaltamento in presenza di pendenze. L'utilizzo di questa soluzione è consigliato per terreni regolari e coesi, con basse pendenze e a basse velocità. Il sistema è quello

meno complesso e costoso tra i quattro, ma anche il meno prestante (velocità più basse di sposamento, stabilità ridotta).

Il caso passivo consiste in un sistema con elementi meccanici quali come molle, smorzatori idraulici o meccanismi articolati. Sono implementate soluzioni con smorzatori a coefficiente di smorzamento variabile in esercizio, in tal caso la sospensione è considerata parzialmente attiva (perché il controllo avviene solo sullo smorzatore e non sull'intera sospensione). Il sistema così configurato è di media complessità ma abbastanza diffuso in quasi tutti i mezzi di locomozione, è poco costoso e garantisce buone prestazioni. Aumenta la percorribilità (trazione e stabilità maggiore, ruote sempre a contatto con il piano stradale) di terreni mediamente irregolari e poco coesi (post aratura), lavora bene a pendenze medio-elevate.

La soluzione attiva consiste nell'avere ruote connesse al telaio tramite attuatori idraulici, pneumatici o elettromagnetici comandati da un sistema di controllo; esso deve essere configurato opportunamente scegliendo un criterio di stabilità, ed essere abbastanza veloce da rispondere per tempo agli stimoli ricevuti in base al terreno. Malgrado il costo e complessità di implementazione elevati, questa soluzione non performa bene ad alte velocità e in terreni irregolari in quanto anche piccoli errori possono mandare in instabilità il sistema. È tuttavia comodo, a basse velocità, in caso di carichi pesanti o pendenze elevate in quanto è possibile modificare opportunamente i parametri della sospensione e l'altezza del telaio.

Il caso ibrido unisce le ultime due soluzioni combinandone i vantaggi. Con elementi attivi, come cilindri pneumatici o idraulici, è possibile regolare l'altezza e l'inclinazione del telaio, oppure con opportuni sistemi di controllo, si variano rigidità e smorzamento del sistema passivo. Questo tipo di robot è in grado di viaggiare bene su una grande varietà di condizioni, come su terreni irregolari e poco coesi ad alte velocità, è necessario un complesso sistema di controllo in grado di gestire la continua variazione delle forze di contatto. Il costo e la complessità di progettazione sono i più elevati.

La maggior parte dei rover per vigne in commercio adotta la soluzione rigida per via della semplicità, basso costo ,buona coesione e regolarità del terreno presente nelle applicazioni considerate.

Sulla base dell'indagine letteraria condotta nei principali editori di articoli scientifici ed articoli di settore si evince che i sistemi di sospensione utilizzati sono nel 50% dei casi di tipo rigido, 30% passivo o parzialmente passivo, 10% di tipo attivo e 10% di tipo ibrido. La maggior parte dei robot analizzati è progettata per muoversi in terreni regolari e poco o mediamente coesi, ovvero delle vigne, serre e campi coltivati. L'unica "sospensione" in questo caso è costituita dallo pneumatico, che dà una minima deformabilità migliorando il contatto di tutte e quattro le ruote con il terreno. [14]

Si riportano alcuni esempi di robot con le tipologie corrispondenti di sospensione:



Figura 2.3 rover BoniRob [15] a sx, Ted Naio [16] a dx, sospensioni rigide



Figura 2.4 AgBot II [17] a sx, Vinerobot II [18] a dx, sospensioni passive



Figura 2.5 Agri Q. [19] con sospensioni attive



Figura 2.6 AgAR [20] con sospensioni ibride, massima altezza a sx, minima a dx



Figura 2.7 Tom v4 [21] con sospensioni passive

3. Caso studio: Smilla H2 e obiettivo del lavoro

Il caso studio del presente lavoro di tesi riguarda il rover a guida autonoma “SMILLA H2” sviluppato da Ecothea in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Meccanica del Politecnico di Torino. Il rover rappresenta una soluzione veicolare multifunzione per applicazioni in terreni di tipo agricolo, necessitanti di costante monitoraggio, in particolare vigneti e frutteti.



Figura 3.1 aspetto del rover SmillaH2; Fonte: [22]

Il rover nasce per ridurre le emissioni dei veicoli agricoli nell’ottica di un’integrazione, direttamente in azienda, con elettrolizzatori e pannelli solari per la produzione di energia e di idrogeno a livello locale. Il sistema di alimentazione consiste in un pacco batterie e una cella a combustibile ad idrogeno. Dotato di guida autonoma, è in grado di svolgere semplici compiti ripetitivi riducendo la componente di lavoro umana, migliorando le condizioni del lavoro in agricoltura e aumentando la sicurezza, durante queste attività sono infatti soliti verificarsi più frequentemente incidenti. Grazie agli strumenti presenti a bordo è possibile implementare le pratiche dell’agricoltura di precisione.

Tra i punti di forza del rover vi è la possibilità di effettuare più funzioni grazie alle soluzioni costruttive adottate che permettono la modularità degli strumenti. Il rover infatti è compatibile con diverse piattaforme modulari che, tramite l’interscambiabilità degli strumenti, consentono di eseguire attività che spaziano da quelle proprie dell’agricoltura di precisione, al trasporto di carichi, alle lavorazioni leggere sul terreno, dal monitoraggio dello stato di salute e qualità delle piante, fino alla possibilità di essere una piattaforma per droni UAV (unmanned aerial vehicle) o di eseguire delle lavorazioni come l’irroramento. Il prodotto rientra nella categoria dei robot agricoli multifunzionali.

Da un punto di vista tecnico, come menzionato precedentemente, il veicolo è dotato di un sistema a propulsione ibrida in cui è presente un pacco batterie integrato con una cella a combustibile, quest'ultimo permette un aumento dell'autonomia senza installare sistemi di accumulo dell'energia troppo ingombranti e dal peso eccessivo come risulterebbe dall'adozione di un pacco batterie di capacità più elevata. Il sistema di guida autonoma sfrutta la tecnologia basata su sistemi GPS-RTK, i quali sono in grado di garantire un livello di precisione centimetrico della posizione, sfruttando le informazioni provenienti dal satellite e da ripetitori locali. La rete di sensori e la logica di controllo assicurano il completo governo e indipendenza del veicolo durante lo svolgimento delle sue mansioni.

Il rover è stato realizzato con i seguenti criteri di progettazione e funzionamento:

- Modularità
- Multifunzionalità
- Dimensioni ridotte (1.5 m di altezza e di ingombro laterale, passo ruote 1 m, lunghezza 2.4 m)
- Propulsione ibrida

La modularità è la capacità della struttura di poter assumere configurazioni diverse. Il rover è concepito in modo da supportare variazioni nella lunghezza dei montanti, nel raggio delle ruote, nel posizionamento del pacco batterie. In generale è possibile riassemblare la struttura in modalità differenti, si ha un rover con elevata adattabilità e possibilità di personalizzazione.

La multifunzionalità è la capacità di svolgere mansioni diverse, costituisce un vantaggio dal punto di vista realizzativo di un prototipo (possibilità di provare su uno stesso prototipo configurazioni di funzionamento diverse) e un vantaggio economico per l'utente finale. Come per i tradizionali trattori agricoli è possibile collegare sulla stessa base moduli svolgenti funzioni diverse, permettendo una semplificazione dell'utilizzo e aumentando la facilità di diffusione del veicolo nel mercato rispetto ad una soluzione fissa. La multifunzionalità è prevista anche a livello software e hardware sensoristico.

È possibile utilizzare i rover in flotta, gestendo contemporaneamente più veicoli che svolgono le stesse mansioni oppure mansioni differenti. Questo ne incoraggia l'acquisto in quantità e velocizza l'esecuzione delle lavorazioni.

Le funzioni che per ora sono gestibili dal rover sono le seguenti [22]:

- Trasporto di carichi (fino a 400 kg) collaborando con l'operatore durante le mansioni svolte (ad esempio il trasporto del raccolto fino al punto di stoccaggio)(Figura 3.2a).
- Controllo e monitoraggio: il veicolo è in grado di verificare lo stato di salute delle colture oppure di rilevare la condizione del suolo se provvisto degli opportuni sensori (figura 3.2a).
- Piattaforma per droni a guida autonoma (Unmanned Aerial Vehicle), il rover collabora con essi in modo tale da aumentarne il raggio d'azione e/o l'autonomia (Figura 3.2b).

- Irroramento: il rover può essere dotato di un irroratore ed è in grado di effettuare il diserbo, l'innaffiamento o altri trattamenti simili alle colture in modo mirato (Figura 3.2c).
- Presa di potenza elettrica: il rover può essere dotato di una presa di potenza elettrica che può essere utilizzata per collegare strumenti, con una tensione nominale di 48 V DC (Figura 3.2d).

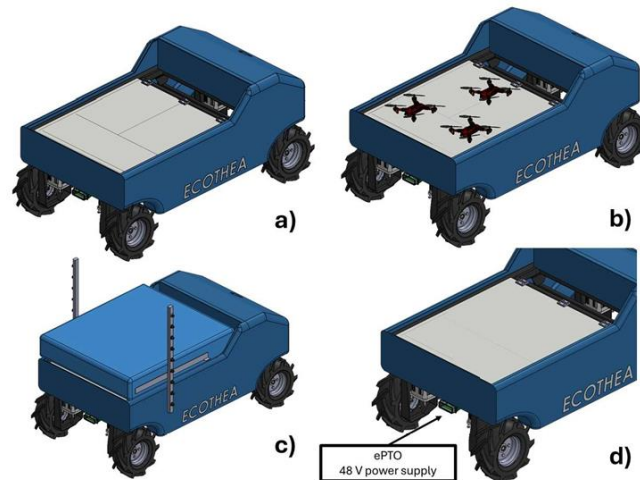


Figura 3.2 riepilogo delle mansioni svolgibili dal rover; Fonte: [22]

Dal punto di vista funzionale-componentistico il rover può essere visto come suddiviso in tre sistemi principali [23]:

- Struttura meccanica
- Sistema di propulsione
- Elettronica e sensori

Il sistema è costituito da una struttura semplice suddivisa nei seguenti componenti:

- Telaio
- Montanti
- Ruote

Il telaio mostrato in figura 3.3 rappresenta la parte della struttura che ha il compito di sopportare le sollecitazioni dinamiche e statiche dei carichi trasportati dal rover, su di essa sono infatti montati tutti gli altri componenti. Ad esso è richiesta elevata rigidità e peso ridotto nell'ingombro prefissato. Per comodità di montaggio è costituito da due parti assemblabili tramite giunzioni bullonate costituite da:

- Telaio vero e proprio
- Culla portabatterie

Il telaio vero e proprio (parte in grigio chiaro in figura 3.3) è costituito da profilati d'acciaio a sezione quadrata saldati tra loro. Essi sono disposti in una struttura esterna rettangolare a cui sono saldati dei profilati in direzione trasversale così da aumentare la rigidezza torsionale dell'assieme.

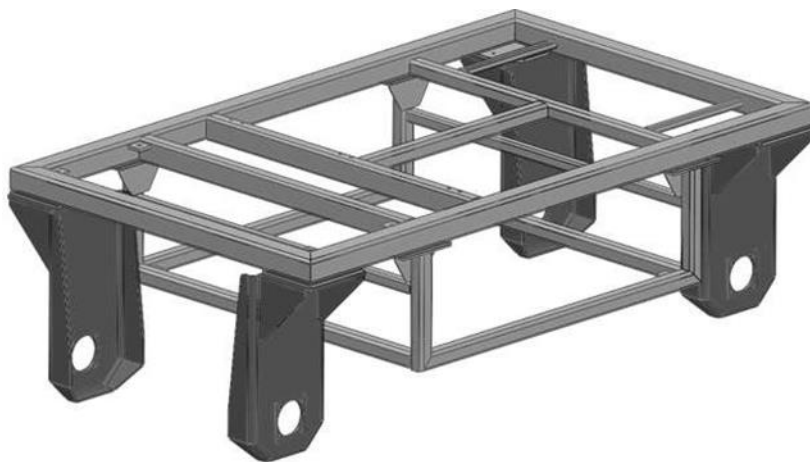


Figura 3.3 assieme telaio e montanti; Fonte: [23]

La culla portabatterie è costituita sempre da profilati d'acciaio a sezione quadrata. È posizionata nella parte inferiore della struttura principale e ospita il pacco batterie insieme ad altri componenti (inverter dei motori elettrici delle ruote, unità di controllo elettronico del veicolo), il posizionamento inferiore abbassa il centro di gravità della struttura. Il collegamento tramite giunzione bullonata permette un facile accesso ai componenti e smontaggio e riconfigurazione della struttura.

La struttura è sovrastata posteriormente da un pianale in acciaio (Figura 3.4), che consente di posizionare carichi; frontalmente è presente una struttura rialzata con uno scomparto anteriore richiudibile che ospita la componentistica (costituita dalle schede dei sensori e dall'elettronica di comando) e la protegge dagli agenti esterni, nello spazio rialzato si posizionano i sensori.

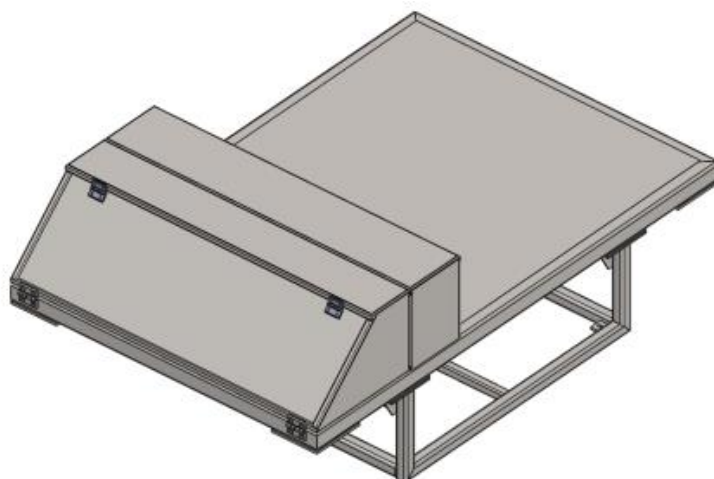


Figura 3.4 assieme finale con pianale e cassetto frontale; Fonte [23]

I montanti (Figura 3.3 e 3.5) rappresentano gli elementi di collegamento tra il telaio e le ruote, sono costruiti in modo da poter ospitare i motori elettrici di ciascuna ruota. Sono costituiti da fogli d'acciaio di spessore pari a 8mm piegati e saldati insieme. La parte superiore viene collegata al telaio tramite giunzione bullonata, sono presenti anche due spine di centraggio per assicurare il corretto allineamento delle ruote altrimenti non garantito dalla giunzione bullonata e che risulterebbe in un funzionamento non ottimale del sistema (strisciamenti e usure anomale).

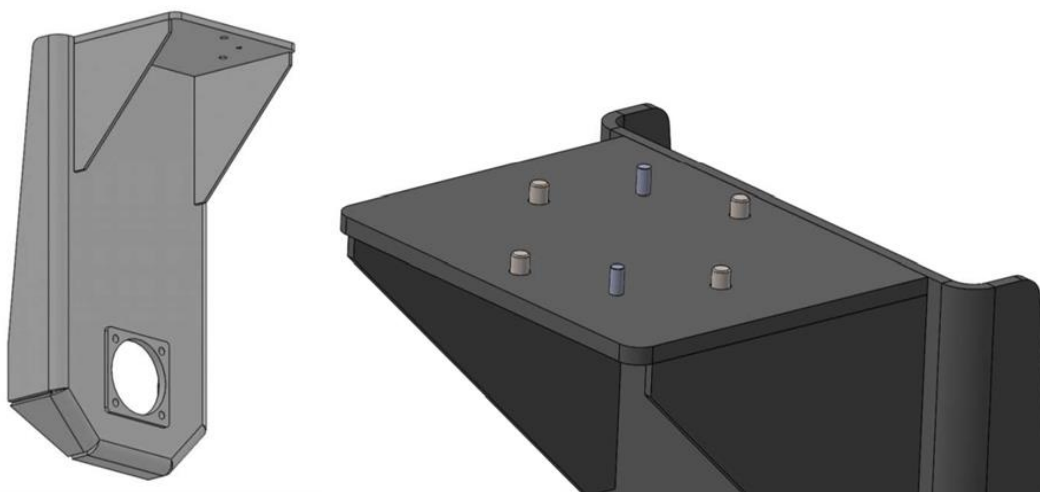


Figura 3.5 aspetto del montante a sinistra e della giunzione bullonata a destra; Fonte: [23]

Le ruote (Figura 3.6) costituiscono il punto di contatto del rover con il terreno e, data l'assenza di un sistema di sospensione, anche l'unico contributo, oltre ai giunti antivibranti presenti nei collegamenti della struttura, allo smorzamento delle vibrazioni sul carico. Sono collegate ai motori mediante la presenza di un riduttore. La tipologia è quella classica del settore agricolo con il battistrada a lisca di pesce.

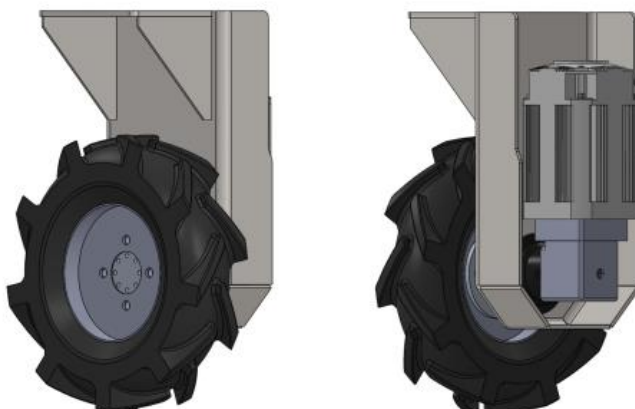


Figura 3.6 aspetto gruppo ruota e montante, con il montaggio del motore; Fonte [23]

Il sistema di propulsione è costituito in modo da avere emissioni nulle in esercizio, può essere schematizzato nei seguenti componenti:

- Pacco batterie
- Inverter e convertitori
- Gruppo motore-riduttore
- Cella a combustibile

Il pacco batterie costituisce il serbatoio di una parte energia del veicolo nonché il sistema di alimentazione principale, è caratterizzato da una capacità tale da fornire la potenza necessaria per l'esercizio considerando il caso peggiore di percorrenza in salita con carico, adotta celle agli ioni di litio, ha una tensione nominale di 48 V ed è in grado di contenere fino a 5 kWh di energia le caratteristiche sono riportati nella tabella 1.3.1:

Tabella 1.3.1 specifiche del pacco batterie [22]

Tensione nominale	Capacità	Potenza nominale	Potenza massima continua	Dimensioni (LxWxH)	Massa
48V	105 Ah	4.8 kW	14.4 kW	355x300x250 mm	28.5 kg

A bordo veicolo sono presenti degli inverter, che collegano ciascun motore elettrico al pacco batteria. Essi rappresentano l'interfaccia tra centralina, il computer di bordo e il sistema di propulsione, prelevano dalle batterie la potenza necessaria in base alla richiesta del controllo e trasformano la corrente continua in uscita dal pacco batterie in quella alternata trifase necessaria ai motori elettrici, sono montati sul telaio e ciascuno è collegato al proprio motore secondo lo schema sottostante.

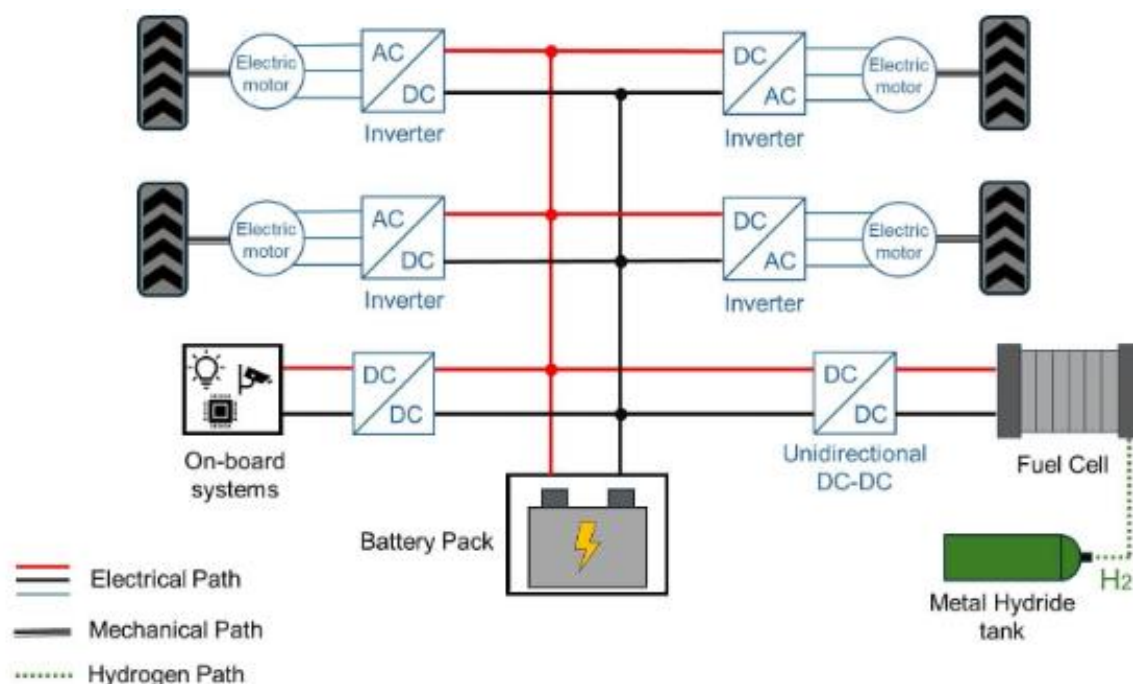


Figura 3.7 architettura schematica del rover; Fonte:[24]

Il motore elettrico scelto è di tipo sincrono a magneti permanenti per via dell'alta efficienza e densità di potenza garantita dal principio fisico utilizzato, un ulteriore vantaggio è quello di poter controllare finemente la coppia erogata e i giri del motore. Lo svantaggio principale è dato dal costo del motore e dei vari applicativi ausiliari come gli inverter, più elevato rispetto alle altre soluzioni.

Sono utilizzati 4 motori indipendenti tra loro, ciascuno collegato alle ruote tramite un riduttore. Grazie all'aggiunta del riduttore, il motore può lavorare a coppie più basse e ad un numero di giri più alto, riducendone la taglia necessaria.

Il riduttore scelto per il veicolo è di tipo epicicloidale, questo per via della compattezza a fronte di alti rapporti di riduzione, con un'orientazione a 90° tra albero di ingresso e di uscita per favorire il montaggio negli ingombri previsti. Le caratteristiche del gruppo sono nella tabella 1.3.2:

Tabella 1.3.2 specifiche del gruppo motore-riduttore [22]

Tensione nominale	Potenza nominale	Velocità nominale	Coppia nominale	Coppia massima	Rapporto di riduzione
48 V	1.2 kW	2300 rpm	5 Nm	15 Nm	1:12

La cella a combustibile incrementa l'autonomia fino all'80%, la quantità di idrogeno trasportabile corrisponde circa a 1.5 kWh. Il serbatoio utilizzato è di tipo a idruri metallici, richiede brevi tempi di ricarica. L'unico prodotto in uscita dalla cella è acqua, il sistema è perciò localmente a emissioni zero.

La propulsione ad idrogeno permette un passo in avanti nella direzione dell'implementazione di un'economia circolare. L'idrogeno può essere prodotto "in casa" a partire da acqua distillata, per mezzo di un elettrolizzatore alimentato con l'energia elettrica proveniente da pannelli solari installati nell'azienda, sarebbe quindi possibile produrre autonomamente idrogeno a circa zero emissioni ed con zero costi di esercizio dopo l'investimento iniziale [24].

3.1 Obiettivo del lavoro

Il rover così concepito presenta un limite importante, non avendo previsto un sistema di sospensioni esso è limitato nella sua funzionalità a terreni regolari, mediamente coesi e a basse velocità di funzionamento. Con la configurazione attuale non si ha la garanzia di avere le 4 ruote sempre a contatto con il terreno, questo aumenta l'incidenza di vibrazioni, di situazioni di impantanamento, problematiche di distribuzione della coppia, controlli aggiuntivi al sistema di propulsione. Il controllo, a causa delle oscillazioni che danno perdita di aderenza per via della costante variazione del peso premente sul terreno, può incorrere in situazioni di non continuità dell'erogazione della coppia, risultando in un andamento non regolare.

L'obiettivo del seguente lavoro di tesi è simulare il comportamento del rover valutando le prestazioni a seguito dell'inserimento di un sistema di sospensione. Le simulazioni prevedono il movimento del veicolo su terreni con ostacoli diversi anche al variare delle condizioni di carico. Esse sono mirate a osservare il comportamento del sistema di ammortizzazione nei casi peggiori di funzionamento, in modo da prevedere una soluzione che permetta un funzionamento ottimale durante l'esercizio.

Dopo aver ricercato le soluzioni già utilizzate per questo tipo di applicativi nella letteratura scientifica, riportate nel Capitolo 2, si è proceduto alla ricerca dei valori da implementare nelle simulazioni sulla base della configurazione stabilita, scegliendo quelli tipici dei componenti realmente disponibili in commercio.

Le soluzioni attive e ibride sono poco utilizzate ed è stato valutato che risulterebbero troppo complesse, costose e a basso valore aggiunto per il rover in esame, l'unica utilità potrebbe risiedere nel tenere ad un determinato livello il telaio per migliorare le rilevazioni in caso di lavoro a pendenze elevate e o con carichi pesanti. Inoltre esse limiterebbero la potenza disponibile in uscita dalla batteria, in quanto necessaria agli attuatori, oppure necessiterebbero un aumento di batterie a bordo quindi di peso.

La soluzione passiva si ritiene il miglior compromesso tra prestazioni, costo e realizzabilità, in quanto i terreni di esercizio sono curati, a media pendenza e non presentano grosse irregolarità, inoltre il rover in esame non deve effettuare lavorazioni che necessitano l'impiego di attrezzi pesanti (caso che necessiterebbe una regolazione della rigidità sospensioni diversa dall'ammortizzazione durante il movimento normale, per non comprometterne il funzionamento e non inclinare eccessivamente il telaio).

3.1.1 Possibili soluzioni di sospensione

A seguito dello svolgimento di ricerche sullo stato dell'arte dei sistemi di sospensioni dei rover si è giunti alla conclusione che non esistono soluzioni standard e che ogni produttore sceglie ciò che sembra più opportuno; non sono stati trovati in letteratura studi pubblici che trattano esplicitamente ed estensivamente questa tematica pertanto si è pensato, nel caso in esame, di utilizzare delle sospensioni già impiegate nell'ambiente agricolo. In particolare si è optato per le soluzioni utilizzate nel caso dell'ammortizzazione di cabine di trattori, in quanto tra le varie tecnologie esistenti in commercio, sono quelle che più si assomigliano, in termini di ciclo di sollecitazione, allo scopo del caso studio.

Il rover SMILLA H2 ha una massa sospesa (da ammortizzare) di circa 240 kg senza carico, dunque ipotizzando un carico medio di 100-150kg, fino a un massimo di 200kg, sono state ricercate le soluzioni utilizzate per la sospensione di cabine di circa 300 - 400 kg. In letteratura sono presenti diversi studi relativi alle analisi vibrazionali delle cabine dei trattori che fortunatamente riportano valori di rigidità e smorzamento di ammortizzatori presenti in commercio, sono pertanto utilizzabili come base di partenza nelle simulazioni.

Dalla letteratura si evince come le sospensioni della cabina nella maggior parte dei casi siano dei seguenti tipi:

- Supporti antivibranti in gomma in 4 punti
- 2 supporti antivibranti in gomma anteriori e 2 ammortizzatori posteriori
- Ammortizzatori in 4 punti

Con “supporti antivibranti in gomma”, ci si riferisce dei componenti in gomma ed acciaio, utilizzati come collegamento tra la cabina e il telaio dei trattori agricoli e in generale dei veicoli pesanti. Ne esistono di diversi tipi e per lo scopo in esame si considerano quelli a configurazione piatta riportati in figura 3.8, ovvero con una direzione di carico verticale corrispondente all'asse di assialsimmetria della parte in gomma. Essi sono costituiti da una parte piatta in acciaio su cui sono presenti due sedi per giunzioni bullonate, tale parte è ricoperta da materiale polimerico ad alta rigidità che prosegue in un profilo a disco, al centro è presente una sede d'acciaio per collegamento filettato, attraverso la quale è possibile fissare l'altra parte da collegare; la sezione polimerica interviene dunque il collegamento meccanico smorzando parzialmente le oscillazioni. Sono estremamente diffusi in tutti i settori industriali ed il loro compito è appunto quello di ridurre ed assorbire le vibrazioni generate da macchinari ed attrezzi durante l'esercizio, spesso originate da sollecitazioni elevate.

Essi sono facilmente montabili sul rover, in quanto l'ingombro dello spessore nella direzione di lavoro è, nei vari tipi presenti in commercio, intorno ai 5 cm. Potrebbero essere installati come collegamento tra i montanti e il telaio.



Figura 3.8 esempio di supporti antivibranti in gomma piatti presenti in commercio e tipica configurazione di sospensione cabina

Gli ammortizzatori utilizzati invece sono simili a quelli automobilistici, costituiti da una molla a spirale e uno smorzatore idraulico. Nei prodotti (trattori agricoli da 4-6 tonnellate) meno recenti si utilizzava la soluzione a 4 supporti antivibranti, attualmente sono standard nel mercato tecnologie a due o quattro ammortizzatori. Per essere montabili su Smilla è necessario che abbiano una lunghezza sotto carico intorno o inferiore ai 40 cm, è stato verificato che in commercio sono effettivamente presenti soluzioni che rispettano queste caratteristiche. Gli ammortizzatori automobilistici ad esempio hanno lunghezze sotto carico in media maggiori, non sono pertanto utilizzabili.



Figura 3.9 esempio di ammortizzatore per cabine

4. Modellazione multibody e prove virtuali

Per lo studio del comportamento del rover è richiesto un tipo di modellazione che permetta la simulazione del robot nel suo movimento, in particolare è necessario in questo caso esaminare la reazione ad un ostacolo o ad un percorso dissestato durante l'avanzamento, tenendo conto della reazione di tutti i componenti. Tra i diversi tipi di modellazione utilizzabili si sceglie quella di tipo multibody.

La simulazione multicorpo o multibody (MBS) è appunto un metodo di simulazione numerica in cui è possibile gestire sistemi composti da più corpi indipendenti. I corpi possono essere sia rigidi che elastici e le loro interazioni reciproche vengono stabilite con legami logici rappresentati ad esempio da vincoli cinematici (come giunti) o elementi di forza (come ammortizzatori a molla). Questo metodo permette di ottenere le caratteristiche cinematiche e dinamiche del sistema in esame. Esso è in genere utilizzato per valutare il rispetto di criteri di sicurezza, di comfort e di prestazione di un prodotto senza dover lavorare su un prototipo fisico, riducendo drasticamente i costi e i tempi della ricerca e sviluppo.

Il processo di simulazione si articola solitamente in cinque fasi. La prima è quella di costruzione della geometria del sistema, ovvero del modello CAD, tenendo conto anche dei materiali utilizzati che vanno ad influenzare densità, quindi massa e conseguentemente le proprietà inerziali calcolate dal programma in base al sistema di riferimento dell'oggetto in esame. Molti programmi permettono anche l'importazione di un CAD esterno di formato diverso. In realtà il programma non lavora sulla geometria, che è solo un ausilio visivo, ma con le informazioni racchiuse nei MARKER che vengono posizionati con essa, questa fase pertanto può anche consistere solamente nell'opportuno posizionamento di questi ultimi in modo tale da produrre il modello senza che questo abbia la rappresentazione visiva geometrica. Si passa poi alla modellazione multibody, dove vengono stabiliti i legami tra i corpi costituenti il sistema. I programmi permettono di collegare i corpi tramite incastri, cerniere, guide prismatiche, circolari e così via, è possibile aggiungere poi forze e spostamenti ai gradi di libertà presenti, scrivendone anche la legge del moto. La terza fase è rappresentata dalla simulazione del modello precedentemente creato, dove in base ai rapporti logici tra i corpi il risolutore fornirà i rispettivi comportamenti. La fase successiva consiste nell'analisi dei risultati di simulazione, molti programmi forniscono la possibilità sia di esportare che di elaborare direttamente i dati ottenuti. La quinta e ultima fase è quella di modifica orientata all'ottimizzazione del modello sulla base dei risultati prodotti, questa rappresenta il vantaggio nell'utilizzo di questo tipo di programmi, grazie ai quali effettuando cicli di simulazione e ottimizzazione è possibile ottenere facilmente e velocemente elevate prestazioni e risultati di qualità. [25]

Il programma utilizzato è Adams View MSC, della Hexagon.

4.1 Modellazione del rover

Per le quote relative alla geometria del sistema sono stati presi come riferimento le dimensioni reali del veicolo oggetto di studio. La struttura altrimenti complessa è rappresentata in modo semplificato in quanto ai fini della simulazione non è necessario rappresentare con dettaglio tutti i particolari, a patto che gli ingombri di massima, il peso totale e sospeso siano coerenti con il prototipo presente in dipartimento.

Il veicolo è stato semplificato nelle seguenti sottoparti costruite con figure geometriche semplici rappresentate in Figura 4.1:

- Telaio
- Montanti
- Ruote
- Carico

Per telaio si intende qui la parte di struttura a cui sono opportunamente collegati tutti i componenti, è semplificato in un parallelepipedo sottile le cui quote e caratteristiche sono riportate nella Tabella 4.1.1 in basso. Esso riprende le dimensioni in lunghezza ed in larghezza dell'ingombro massimo del rover insieme con il peso supposto della parte superiore del veicolo senza carico.

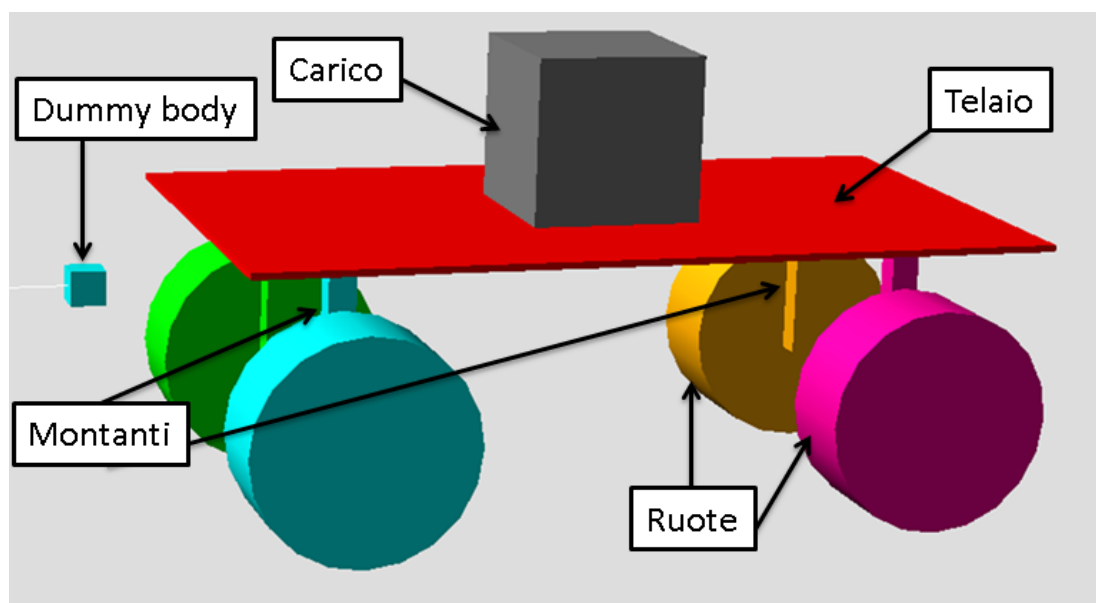


Figura 4.1 rover costruito su Adams

Tabella 4.1.1 caratteristiche del telaio

Massa	Ixx	Iyy	Izz	Densità	lunghezza	larghezza	altezza
231.8 kg	1.45E+08 kg*mm ²	1.07E+08 kg*mm ²	3.78E+07 kg*mm ²	3508 kg/m ³	2360 mm	1400 mm	20 mm

Al fine di tenere conto anche delle proprietà inerziali lungo il sistema principale di inerzia si modifica la densità in modo da avere la massa desiderata, in questo modo il programma calcola automaticamente le inerzie lungo gli assi principali.

I montanti rappresentano gli elementi di collegamento tra mozzo ruota e telaio. Hanno la funzione di rappresentare sia l'ingombro geometrico che il peso dei materiali utilizzati, sistemi di ammortizzazione compresi. Sono semplificati in 4 parallelepipedi identici per tutte le ruote.

Tabella 4.1.2 caratteristiche dei montanti

Massa	Ixx	Iyy	Izz	Densità	lunghezza	larghezza	altezza
26.71 kg	6.51E+05 kg*mm ²	6.51E+5 kg*mm ²	2.85E+04 kg*mm ²	7801 kg/m ³	80 mm	80 mm	535 mm

Con la dicitura ruote si intende qui il gruppo ruota costituito da pneumatico e mozzo ruota. Gli ingombri del gruppo dipendono solo dal primo, nel modello si tiene conto degli altri due modificando la densità del cilindro utilizzato come figura di semplificazione, in modo tale da arrivare alla massa di 10 kg che rappresenta il peso reale misurato del gruppo ruota.

Tabella 4.1.3 caratteristiche delle ruote

Massa	Ixx	Iyy	Izz	Densità	spessore	raggio	Distanza mozzo-telaio
10 kg	5.45E+05 kg*mm ²	3.47E+05 kg*mm ²	3.47E+05 kg*mm ²	97.43 kg/m ³	300 mm	330 mm	495 mm

Il carico è rappresentativo di tutte le aggiunte in termini di componentistica che è possibile fare al rover, il quale ha una struttura concepita in modo tale da poter portare sopra di sé moduli con peso e funzioni diverse. È modellato attraverso una scatola alla quale, modificando la densità, si cambia la massa e i conseguenti momenti di inerzia, calcolati automaticamente dal programma.

I collegamenti presenti nella struttura mostrati in Figura 4.2 sono del tipo seguente:

- Incastro/giunto fisso
- Cerniera
- Guida prismatica
- Collegamento cedevole (molla-smorzatore)
- Contatto ruote-terreno

I collegamenti rappresentano i rapporti logici presenti tra i vari sottosistemi menzionati sopra, essi sono uniti in base alle funzioni che devono assolvere i diversi componenti.

Il giunto fisso è un collegamento che vincola sei gradi di libertà nello spazio, modellato come infinitamente rigido, qui è utilizzato come joint tra telaio e carico.

La cerniera è il collegamento che vincola tutte le traslazioni e le rotazioni, eccetto quella intorno al proprio asse, viene utilizzato per modellare il collegamento tra il mozzo della ruota e il montante, avendo cura di far corrispondere l'asse del vincolo con l'asse della ruota.

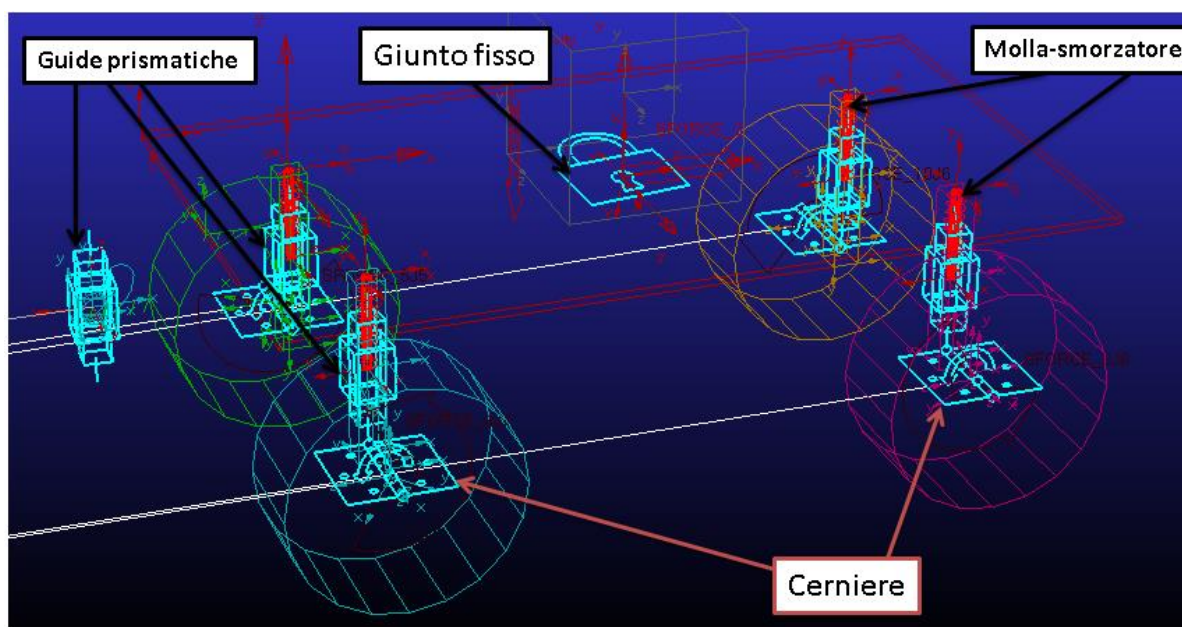


Figura 4.2 raffigurazione dei collegamenti in celeste e del gruppo molla-smorzatore in rosso

La guida prismatica garantisce una traslazione lungo il proprio asse, vincola tutti gli altri gradi di libertà, viene utilizzata per vincolare ciascun montante con il telaio in modo che questi abbiano la possibilità di scorrere verticalmente (grado di libertà da vincolare tramite le sospensioni).

Il gruppo molla-smorzatore non fa parte dei collegamenti elementari, il sistema lo classifica come una forza, viene utilizzato per modellare sistemi cedevoli solo lungo il proprio asse o lungo una direzione, permette di modificare la rigidità e lo smorzamento. Qui è utilizzato come collegamento tra i montanti ed il telaio. Strutturalmente nel programma è inserito all'interno dei montanti, con cui non importa se c'è compenetrazione, in quanto il programma non la considera a meno dell'inserimento di un vincolo, questa configurazione fa sì che le molle lavorino nella direzione in cui in genere lavorano nella realtà e che si tenga comunque conto del peso dei montanti nel totale della massa sospesa. Modificando la rigidità e lo smorzamento è possibile variare il comportamento del

sistema, tali parametri si riferiscono alle caratteristiche del gruppo solamente lungo la retta d'azione verticale, ovvero lungo il proprio asse.

Il programma permette di modellare il tipo di contatto che avviene tra ciascuna ruota e il ground. I valori utilizzati sono presi da [22] come modellazione di terreni di vario tipo, quelli riportati sono relativi ad un terreno agricolo semicoeso, non fangoso e non sabbioso:

Tabella 4.1.4 valori utilizzati per modellare il contatto ruota-terreno

Tipo di forza	Rigidezza	Esponente della forza	Smorzamento	Forza di attrito	Profondità di penetrazione	Coefficiente statico	Coefficiente dinamico
Impatto	200 N/mm	1	3.0E-02 Ns/mm	Coulombiana	0.1	0.5	0.45

Le interazioni presenti nelle parti sono le seguenti:

- Movimenti ai giunti
- Forza di attrito volvente

Il programma permette di aggiungere forze e coppie a piacimento, così come leggi del moto, ai gradi di libertà non vincolati. I movimenti ai giunti fanno le veci del motore del rover, necessari a darne il moto durante le simulazioni, sono impostati per ciascuna cerniera in base alla caratteristica di moto scelta. Qui si opta per un controllo in velocità del rover, impostando la velocità angolare costante per ciascuna ruota in modo tale da ottenere la velocità globale di avanzamento desiderata per le prove. Si impone la velocità angolare desiderata attorno all'unico grado di libertà presente nel vincolo considerato:

Velocità angolare	Velocità globale del CM
2.525 rad/s	3 km/h

Dato che il contatto non permette di tenerne conto, è necessario aggiungere nel computo la forza di attrito volvente. Nel modello è stimata come il peso totale moltiplicato per un coefficiente di attrito preso da [22]. Si utilizza pertanto una forza fissa che viene applicata nel centro di massa del telaio, in direzione opposta al moto.

Si stima nel seguente modo, tramite valori presi da [22] sulla base del contatto dello pneumatico con un terreno agricolo, dove μ_{rr} è il coefficiente adimensionale di resistenza a rotolamento:

$$F_v = mg * \mu_{rr} \quad \text{Eq. 1}$$

m	g	μ_{rr}
380 kg	9.81 m/s ²	0.07

Per muoversi il veicolo necessita delle seguenti aggiunte che danno informazioni riguardo l'ambiente esterno, rappresentate nella Figura 4.3:

- Ground
- Traiettoria

Al rover si aggiunge una superficie su cui muoversi e che poi, opportunamente modificata, rappresenterà i terreni di prova in cui verranno misurate le prestazioni delle sospensioni. In questo caso viene realizzata inizialmente una superficie semplice in cui farlo muovere, rappresentata da un grosso parallelepipedo sottile vincolato al ground, ovvero che rimane fisso nello spazio.

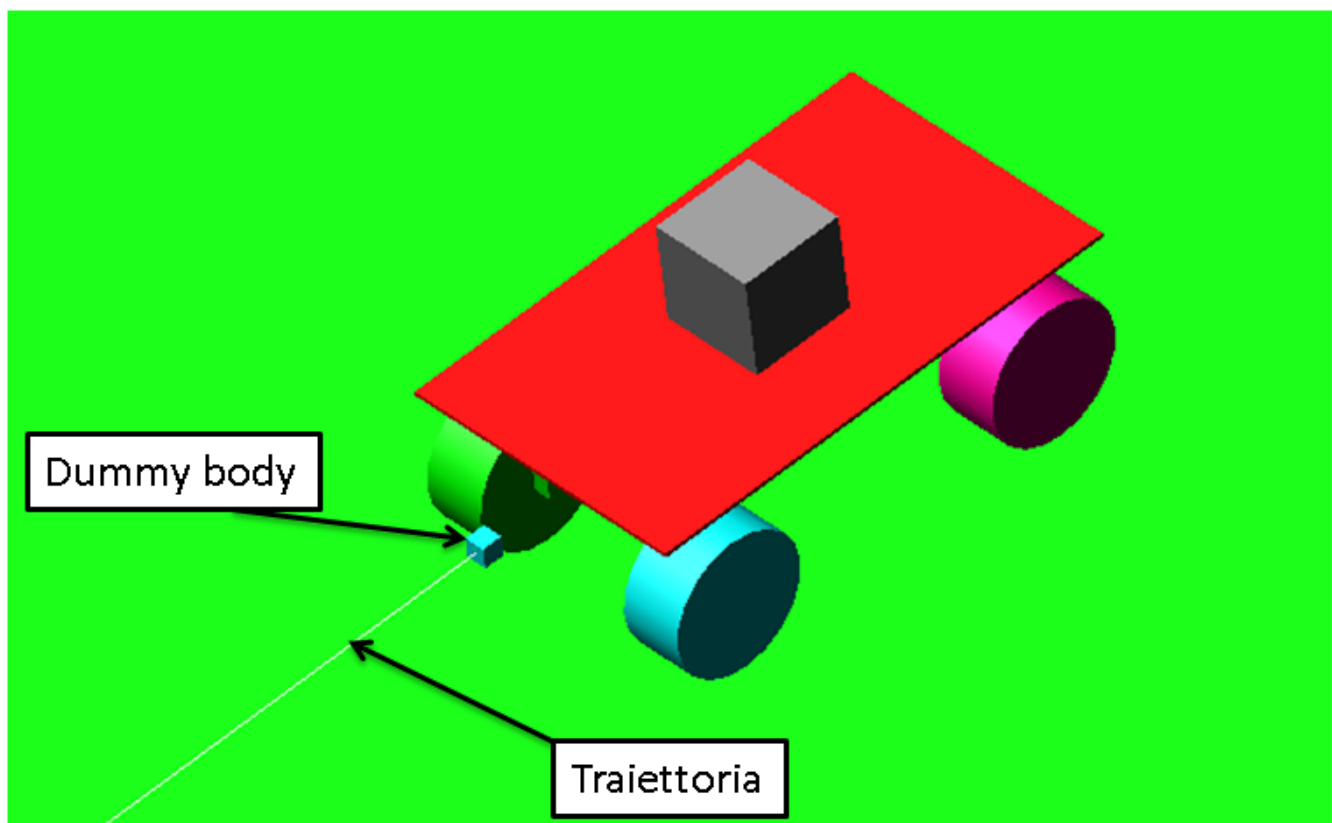


Figura 4.3 rappresentazione del ground su cui si muove il rover in verde, della traiettoria e del dummy body

Per far muovere il rover, che in questo caso è senza sistema di sterzo fisico, è necessario, con i movimenti ai giunti sopra menzionati, che ci sia un modo per vincolare il mezzo ad una linea da seguire durante il movimento. Questo è possibile tramite la funzione point-curve constraint che permette di vincolare un punto ad una curva. Per ottenere un vincolo che permetta di far muovere

liberamente il rover ma che gli faccia seguire la traiettoria, si è scelto di procedere utilizzando un dummy body vincolato alla traiettoria tramite la funzione sopracitata, esso è poi vincolato al corpo tramite una guida prismatica che lascia libero il movimento verticale in modo tale che il corpo venga trascinato in avanti ma abbia la libertà di oscillare in tale direzione. La curva è tracciata con la funzione opportuna e viene vincolata al ground così da rimanere fissa nello spazio.

4.2 Prove virtuali

Lo scopo del lavoro è quello di ottenere dei parametri di rigidità e smorzamento come criterio di scelta delle sospensioni reali che dovranno essere poi effettivamente montate sul rover. Per farlo si modificano i parametri di ciascuna sospensione in base a valori trovati in letteratura. Si modificano solamente i valori di rigidità e smorzamento.

Per avere un'idea completa delle grandezze in gioco si scelgono poche misure tra le più significative per riassumere il comportamento del mezzo:

- Spostamento verticale Y del centro di massa
- Spostamento verticale Y della parte laterale su montante anteriore destro
- Misura di forza trasmessa da ammortizzatore anteriore destro
- Misura di forza trasmessa da ammortizzatore posteriore sinistro

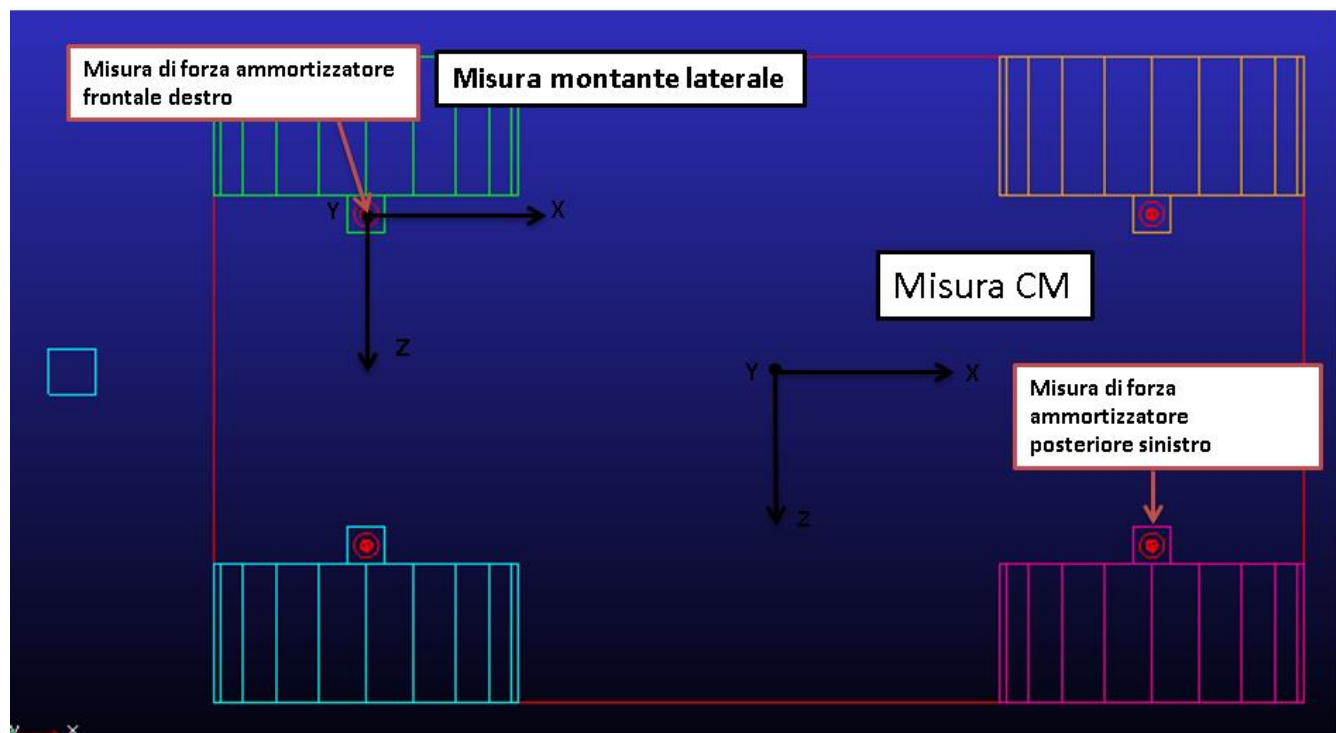


Figura 4.4 individuazione nel rover del posizionamento delle misure effettuate

Lo spostamento verticale del CM è utile per capire a che ampiezza e frequenza di oscillazioni è sottoposto il carico del rover, allo stesso modo la misura sul montante laterale è invece più rappresentativa delle oscillazioni dei sensori, in quanto disposti più esternamente.

La misura della forza dell'ammortizzatore anteriore e di quello posteriore sono utilizzate per mostrare le sollecitazioni agenti sul telaio e quindi sul carico sottoforma di inerzia, trasmesse dalla ruota attraverso l'accorciamento della molla. L'obiettivo dell'impiego di un sistema di sospensione è quello di minimizzare entrambe le problematiche.

Le prove virtuali effettuate consistono in tre percorsi diversi sopra i quali viene fatto muovere il rover così da evidenziare il comportamento del sistema di sospensione, i percorsi scelti sono 3:

- Single Bump
- Concavità fisse
- Concavità alternate

L'idea dietro i percorsi a concavità fisse è quella di simulare un terreno agricolo e le sue irregolarità principali, dove le variazioni altimetriche, seppure di piccola entità, costituiscono il disturbo più presente nei vigneti rispetto agli ostacoli in rilievo. I terreni dei vigneti sono continuamente puliti e ricevono attenta manutenzione, è difficile che si incontrino grossi massi o rami e fronde che possano dare origine a disturbi di questo tipo. Queste considerazioni si traggono dall'osservazione di un classico vigneto. Si svolge un'analisi su concavità multiple disposte in modo alternato, sempre nell'ottica di simulare un terreno complesso e vedere la reazione del sistema di ammortizzazione ad una diversa frequenza di sollecitazione.

Il percorso single bump invece è utilizzato per provvedere un disturbo all'avanzamento del rover, esso permette di osservare velocemente quali siano i valori più promettenti da tenere nel sistema di sospensioni, dando così una scrematura in base all'osservazione della risposta degli ammortizzatori e del sistema nei vari punti di interesse selezionati.

Per valutare le prestazioni del rover, in quanto sarebbe difficile effettuare l'ottimizzazione dei parametri su prove complesse si è scelto di partire dalla prova con un disturbo semplice assimilabile ad un gradino, che consiste in un ostacolo semicircolare.

Sulla base dei risultati ottenuti con il gradino si valuta poi il comportamento delle sospensioni negli altri terreni. Sulla base delle prestazioni mostrate sul gradino si è restringe il campo dei valori da simulare effettuando una prima selezione.

Il percorso di simulazione è costituito da un piano con una sporgenza a semicerchio. Le dimensioni utilizzate sono quelle riportate:

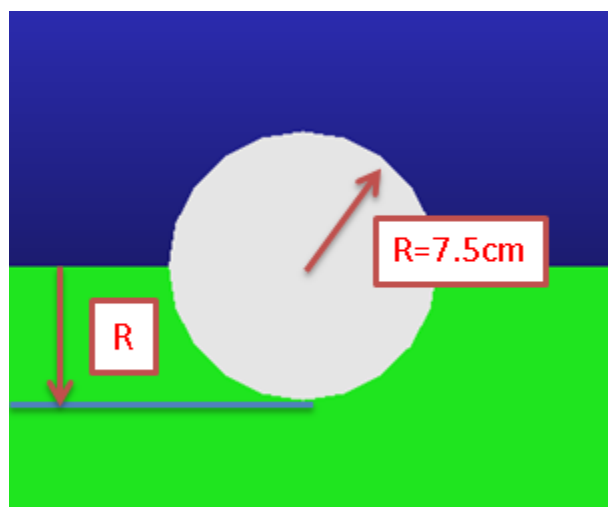


Figura 4.5 profilo del single bump, il verde rappresenta il ground, la parte superiore è sporgente rispetto al ground

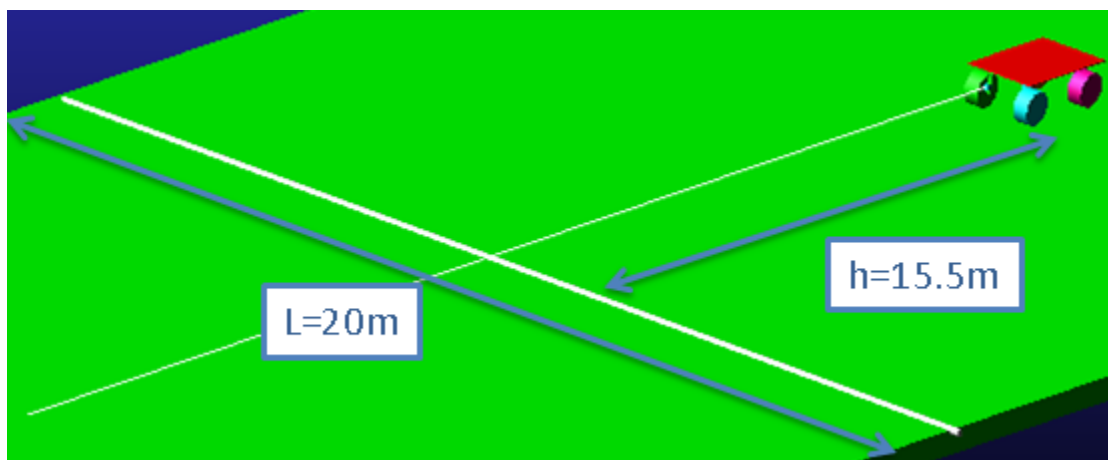


Figura 4.6 aspetto del percorso di simulazione single bump

Il percorso di simulazione a concavità fisse è costituito da un piano con 10 concavità costruite scavando il piano con un semicerchio e raccordando il taglio con la funzione apposita, distanti di due metri l'uno dall'altro. Le dimensioni utilizzate sono quelle riportate:

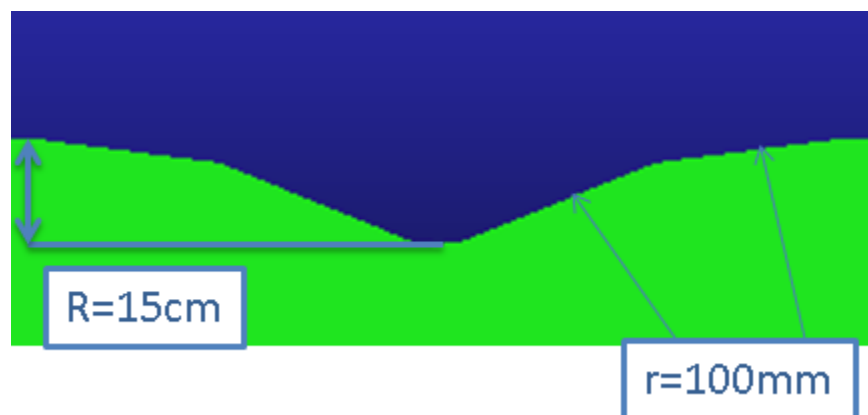


Figura 4.7 profilo della concavità con le dimensioni corrispondenti

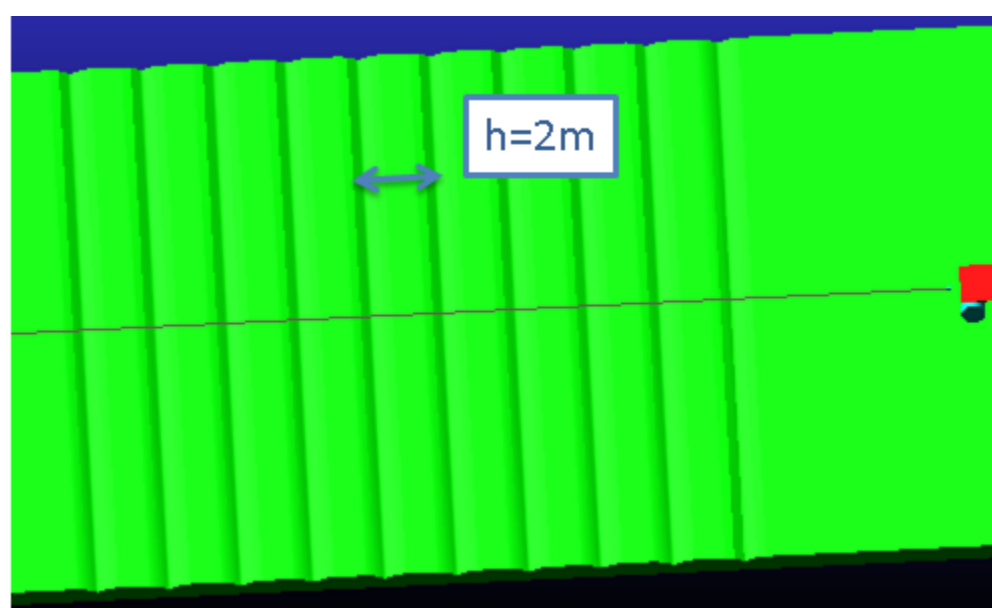


Figura 4.8 aspetto del percorso a concavità fisse

Il percorso di simulazione a concavità alternate è costituito da un piano con 10 concavità disposte alternativamente a destra e a sinistra, costruite scavando il piano con un semicerchio e raccordando il taglio con la funzione apposita, distanti di due metri l'uno dall'altro, e un metro tra destra e sinistra. Le dimensioni utilizzate sono quelle riportate:

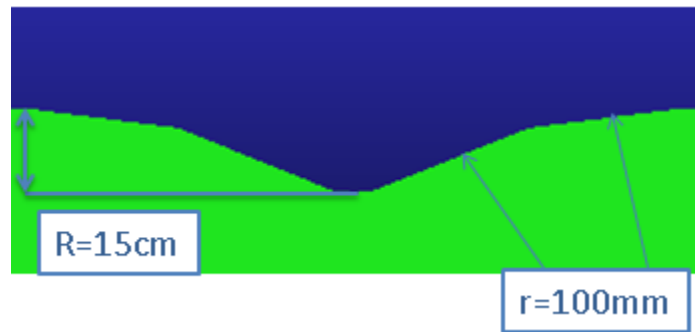


Figura 4.9 profilo del fosso con le dimensioni analoghe al caso precedente

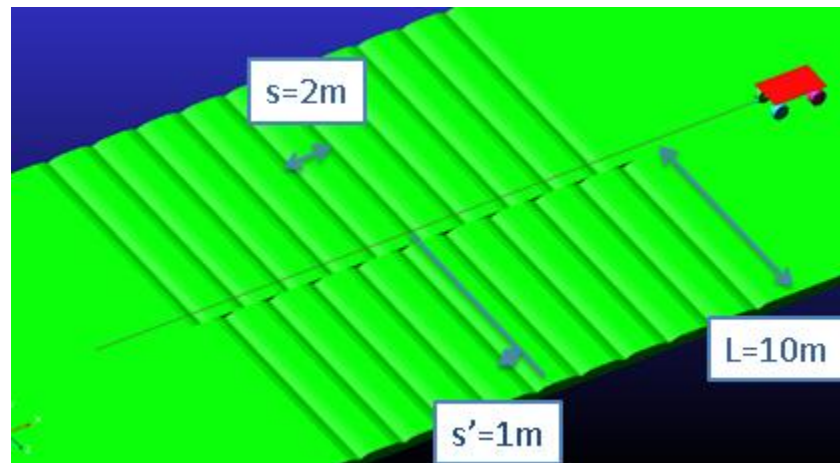


Figura 4.10 aspetto del percorso a concavità alternate

5. Analisi e discussione risultati

Lo scopo delle prove è quello di analizzare il comportamento delle sospensioni in varie condizioni di funzionamento, con ostacoli o diverso carico trasportato. Si eseguono 3 set di prove, una per ogni percorso, dove si simulano i valori della componentistica presa in considerazione. La valutazione della qualità delle prestazioni di ciascun set di parametri è effettuata mediante degli indici di performance. Le prove iniziali sono effettuate sul percorso col single bump, in cui si simulano i valori delle diverse soluzioni trovate in letteratura. In base ai risultati si sceglie il miglior set di parametri, esso verrà utilizzato come valore di riferimento nei rimanenti 2 set di prove, in cui si varierà prima il valore della rigidezza, così da trovare quello più adatto, poi quello dello smorzamento, attorno a tale set. I valori selezionati da questa procedura verranno utilizzati nelle simulazioni al variare del carico nel percorso più articolato, ovvero quello a concavità alternate.

Da diversi articoli trovati in letteratura si ottengono dei valori di sospensione e smorzamento caratteristici sia dei supporti in gomma, sia degli ammortizzatori per cabina. Si riportano i valori e gli articoli corrispondenti:

Tabella 5.1 parametri utilizzati nelle simulazioni

		Rigidezza frontale k_f	Rigidezza posteriore k_p	Coefficiente di smorzamento frontale C_{sf}	Coefficiente di smorzamento posteriore C_{sp}
Caso senza sospensioni	Caso 0	$k=2.59E+12$ N/mm	$k=2.59E+12$ N/mm	$C_s=1E-02$ Ns/mm	$C_s=1E-02$ Ns/mm
Supporti in gomma	Caso 1 [26]	1247 kN/m	702 kN/m	3270 Ns/m	1920 Ns/m
	Caso 2 [27]	1132.5 kN/m	618.6 kN/m	2208 Ns/m	1278 Ns/m
Ammortizzato ri	Caso 3 [28]	18.65 kN/m	18.65 kN/m	1650 Ns/m	2038 Ns/m
	Caso 4 [29]	4 kN/m	26 kN/m	943 Ns/m	850 Ns/m
	Caso 5 [30]	23 kN/m	23 kN/m	1400 Ns/m	1400 Ns/m

Il caso senza sospensioni rappresenta quello in cui i montanti sono rigidamente collegati al telaio, è modellizzato inserendo una rigidità molto elevata, di essa interessa solamente l'ordine di grandezza per avere un andamento esemplificativo, nelle prove, del collegamento supposto come infinitamente rigido. Con la stessa logica il valore di smorzamento utilizzato è molto piccolo, tendente a zero.

In una parte delle prove si misurano gli spostamenti verticali, per queste si utilizza come sistema di riferimento verticale quello della condizione di equilibrio statico, si considerano quindi le oscillazioni misurate dal sistema di riferimento con lo zero posizionato in corrispondenza dell'equilibrio statico, in modo che visivamente si noti la differenza tra i valori raggiunti dai vari set di parametri. Dai valori valutati si esclude il transitorio iniziale.

Per valutare la bontà della prestazione di un determinato set di valori si utilizzano degli indicatori in grado di riassumere le qualità salienti delle curve. Alcuni degli articoli citati come fonti dei parametri di simulazione utilizzano la sovraelongazione massima (come percentuale del massimo raggiunto), il tempo di stabilizzazione, il tempo per cui il picco si trova entro il 90% del suo valore massimo, il tempo di salita (in cui il valore passa dal 10% al 90%).

Per l'analisi qui proposta si scelgono dei parametri semplici da valutare con gli strumenti a disposizione ma comunque rappresentativi delle curve:

-
- Picco massimo: il massimo valore raggiunto nel grafico.
 - Sovraelongazione massima: intesa come il valore massimo negativo registrato, in quanto rappresentativo della capacità della sospensione di smorzare il picco/disturbo dato dal percorso e di riportare la grandezza d'interesse all'equilibrio.
 - Tempo di stabilizzazione: tempo per il quale si registra nel grafico un andamento diverso dalla condizione di equilibrio imputabile all'interazione con il percorso, considerato dall'istante prima dell'impatto con il primo ostacolo fino all'istante seguente al recupero del così instauratosi transitorio.

Per le forze si considerano anche:

- Valore medio: la media dei valori assunti dalla curva, riconducibile alla tensione media percepita nel ciclo, sottoforma di inerzia, dalla struttura sospesa.
- Ampiezza: massimo valore di discostamento dal valore medio, riconducibile alla fatica meccanica applicata alla struttura.

Si ricorda che, per tutti i percorsi, vengono riportate 4 misure:

- Spostamento verticale del centro di massa del telaio
- Spostamento verticale misurato in un montante anteriore
- Forza trasmessa da un ammortizzatore frontale al telaio
- Forza trasmessa da un ammortizzatore posteriore al telaio

Si ricorda anche che il sistema di sospensione simulato è costituito da una guida prismatica, che permette solamente la traslazione in direzione verticale, lungo la quale è posizionata una molla e uno smorzatore che agiscono solo in tale direzione.

5.1 Prove su single bump

Per il single bump si usano negli spostamenti, come indici di performance, solamente il valore massimo e il tempo di transitorio, dato che si provano valori molto diversi e non è necessaria una discriminazione fine per osservare la qualità delle prestazioni. Per le forze si valuta anche la sovraelongazione massima, ovvero in questo caso, il minimo registrato. Si eseguono le prove a 3 km/h e si simulano i valori riportati nella tabella 5.1.1.

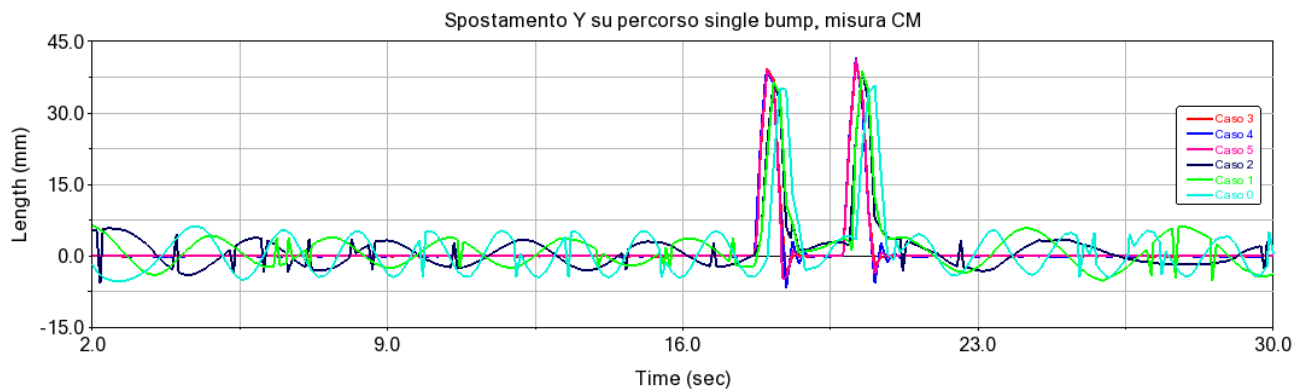


Figura 5.1 spostamento Y su single bump, misura CM

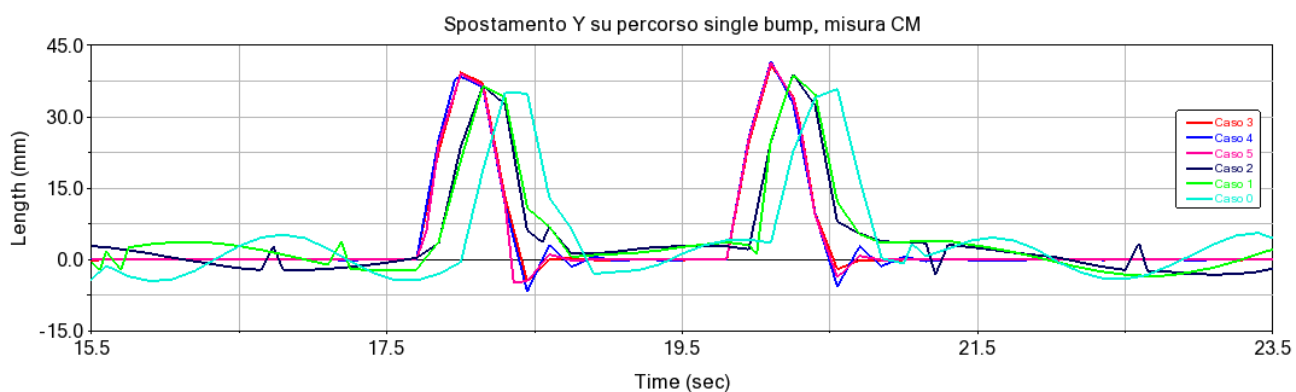


Figura 5.2 dettaglio spostamento CM su single bump

Si riportano i parametri nella tabella 5.1.1:

Tabella 5.1.1 Spostamento Y percorso single bump, misura CM

KPI		Picco max (mm)	Variazione percentuale rispetto al Caso 0	Tempo di stabilizzazione (s)
Caso 1	kf=1247N/mm, kr=702N/mm, Csf= 3.27Ns/mm Csr=1.92Ns/mm off	38.8	+11%	>5
Caso 2	kf=1132.5, kr=618.6, Csf=2.2, Csr=1.3 off	39.0	+11%	>5
Caso 3	k=18.65N/mm, Csf=1.65, Csr=2.04 off	40.8	+17%	3
Caso 4	k=26N/mm, Cs=0.85 Ns/mm off	41.7	+19%	3.45
Caso 5	k=23 N/mm, Cs=1.4 Ns/mm off	41.5	+19%	3
Caso 0	k=2.59E+12 N/mm, Cs=1E-02 Ns/mm off	35	0%	>5

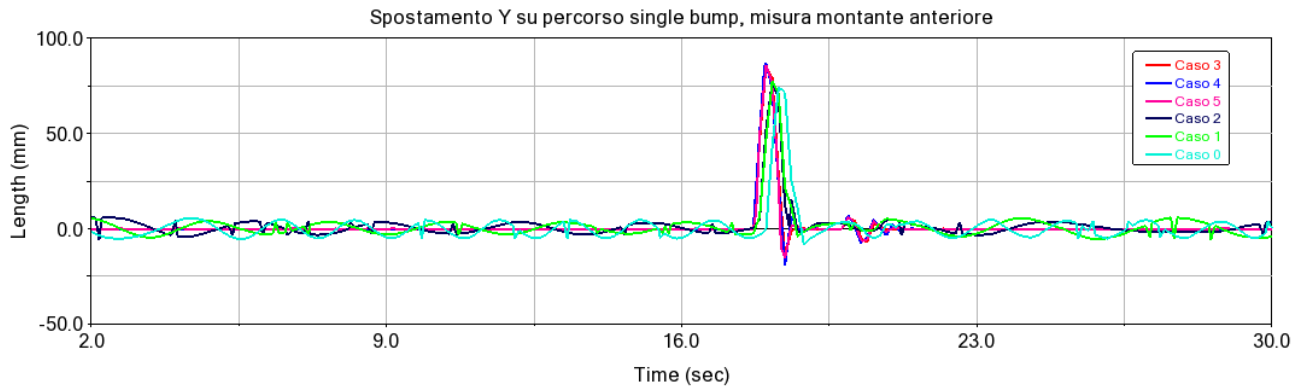


Figura 5.3 Spostamento Y percorso a single bump, misura montante anteriore

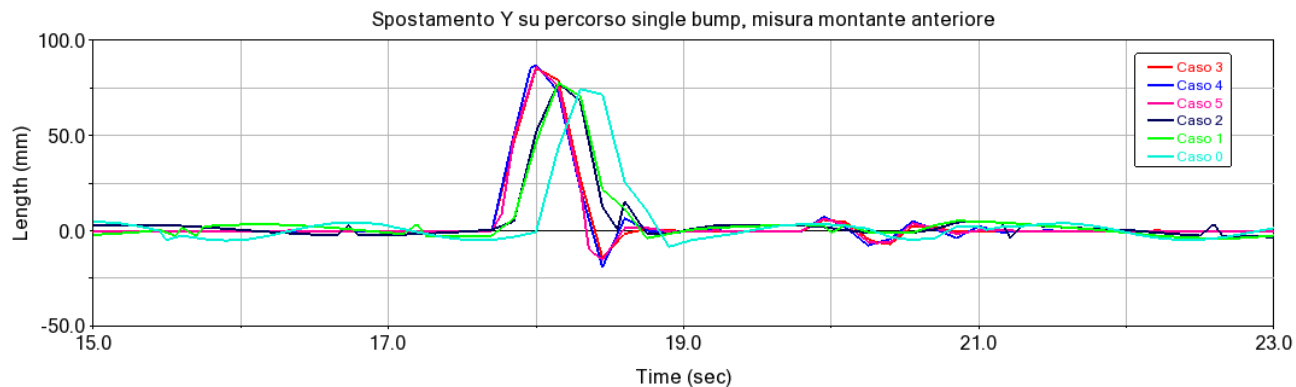


Figura 5.4 dettaglio spostamento Y percorso a single bump, misura montante anteriore

Tabella 5.1.2 Spostamento Y percorso a single bump, misura montante anteriore

KPI		Picco max (mm)	Variazione percentuale rispetto al Caso 0	Tempo di stabilizzazione (s)
Caso 1	kf=1247N/mm, kr=702N/mm, Csf= 3.27Ns/mm Csr=1.92Ns/mm off	77.7	+4%	>5
Caso 2	kf=1132.5, kr=618.6, Csf=2.2, Csr=1.3 off	77.6	+4%	>5
Caso 3	k=18.65N/mm, Csf=1.65, Csr=2.04 off	85.6	+15%	3.15
Caso 4	k=26N/mm, Cs=0.85 Ns/mm off	87.0	+17%	3.45
Caso 5	k=23 N/mm, Cs=1.4 Ns/mm off	86.0	+15%	3.15
Caso 0	k=2.59E+12 N/mm, Cs=1E-02 Ns/mm off	74.5	0%	>5

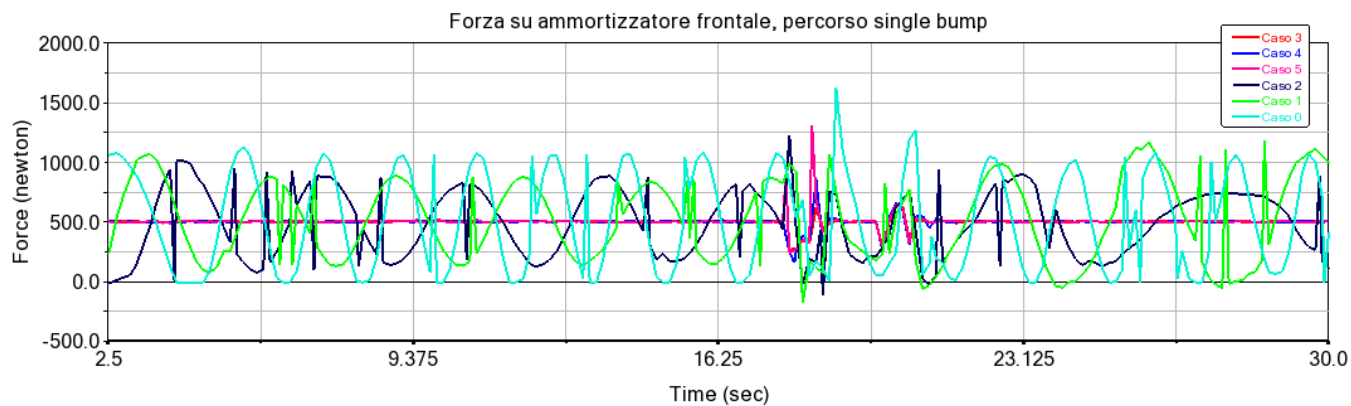


Figura 5.5 Forza su ammortizzatore frontale, percorso a single bump

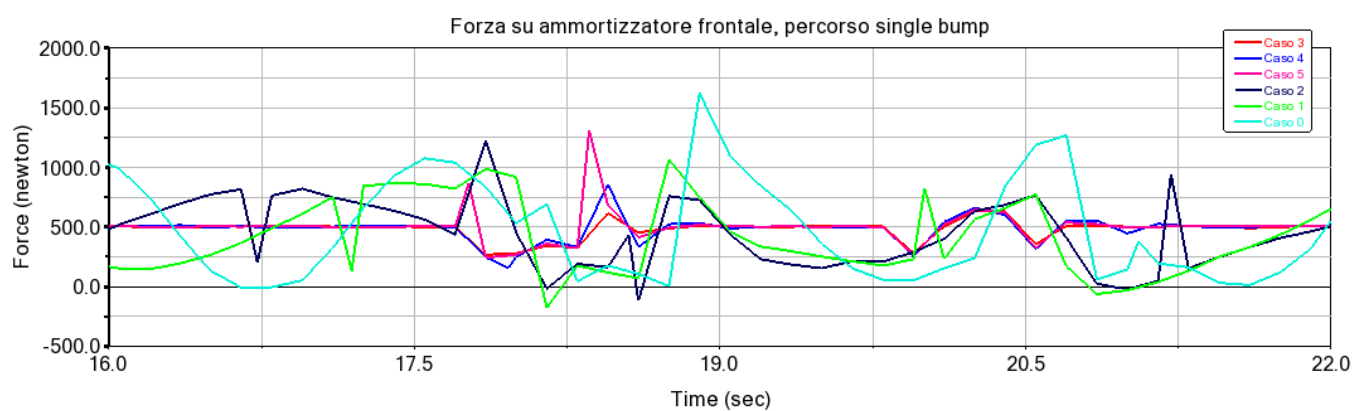


Figura 5.6 dettaglio forza su ammortizzatore frontale, percorso a single bump

Tabella 5.1.3 Forza su ammortizzatore frontale, percorso a single bump

KPI		Picco max (N)	Variazione percentuale rispetto al Caso 0	Tempo di stabilizzazione (s)	Picco minimo (contatto terreno) (N)	Scostamento dal valore medio di 500N (N)	Variaz. % rispetto a 0
Caso 1	kf=1247N/mm, kr=702N/mm, Csf= 3.27Ns/mm Csr=1.92Ns/mm off	1066	-40%	>5	-179	-679	+145%
Caso 2	kf=1132.5, kr=618.6, Csf=2.2, Csr=1.3 off	1222	-31%	>5	-118	-618	+132%
Caso 3	k=18.65N/mm, Csf=1.65, Csr=2.04 off	638	-64%	3	268	-232	-51%
Caso 4	k=26N/mm, Cs=0.85 Ns/mm off	855	-52%	3.6	157	-343	-37%
Caso 5	k=23 N/mm, Cs=1.4 Ns/mm off	1307	-27%	3	241	-259	-45%
Caso 0	k=2.59E+12 N/mm, Cs=1E-02 Ns/mm off	1782	0%	>5	4	-469	0%

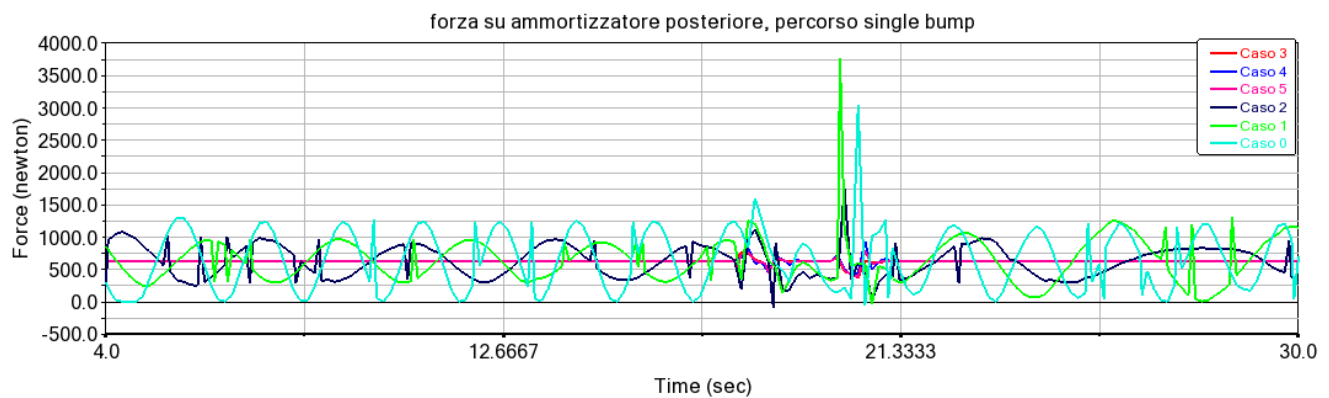


Figura 5.7 Forza su ammortizzatore posteriore, percorso a single bump

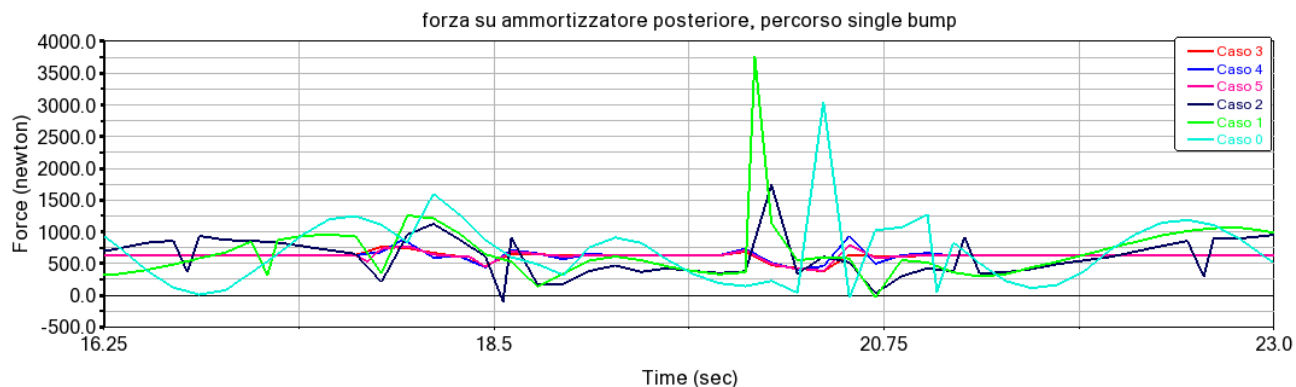


Figura 5.8 dettaglio forza su ammortizzatore posteriore, percorso a single bump

Tabella 5.1.4 Forza su ammortizzatore posteriore, percorso a single bump

KPI		Picco max (N)	% rispetto al caso 0	Tempo di stabilizzazione(s)	Picco minimo (contatto terreno)	Scostamento minimo dal valore medio di 630N	Variazione % di scostamento minimo rispetto al Caso 0
Caso 1	kf=1247N/mm, kr=702N/mm, Csf= 3.27Ns/mm Csr=1.92Ns/mm off	3765	+23%	>5	-35	-665	-1%
Caso 2	kf=1132.5, kr=618.6, Csf=2.2, Csr=1.3 off	2673	-12%	>5	-97	-727	+108%
Caso 3	k=18.65N/mm, Csf=1.65, Csr=2.04 off	1082	-65%	3	376	-254	-62%
Caso 4	k=26N/mm, Cs=0.85 Ns/mm off	937	-69%	3.6	407	-223	-67%
Caso 5	k=23 N/mm, Cs=1.4 Ns/mm off	796	-74%	3	383	-247	-63%
Caso 0	k=2.59E+12 N/mm, Cs=1E-02 Ns/mm off	3052	0%	>5	-41	-671	0%

Dalle prove effettuate si nota una grossa differenza in termini di stabilità del sistema tra i valori relativi ai supporti in gomma e agli ammortizzatori da come si vede nelle figure 5.1 e 5.3, i primi infatti tendono a far oscillare continuamente il telaio non riuscendo neanche a recuperare il disturbo iniziale dato dal posizionamento del sistema sul percorso, si hanno tempi di stabilizzazione superiori ai 5s. Questo potrebbe essere dovuto a fenomeni di risonanza e ad uno smorzamento inadeguatamente piccolo per rigidità così elevate. Le oscillazioni negli spostamenti e nelle forze aumentano di ampiezza dopo il passaggio sull'ostacolo, suggerendo un aumento dell'energia presente nel sistema in seguito all'urto, e che essa venga dissipata in maniera inadeguata. I supporti in gomma trasmettono le forze più elevate e in maniera continua, come si vede in figura 5.5 o 5.7, ciò significa che si avranno grosse sollecitazioni sul carico date dall'inerzia. Si hanno valori massimi di 2500-4000 N per le forze trasmesse dai supporti, contro valori intorno ai 1000 N degli ammortizzatori. Le sollecitazioni, unite alla continua oscillazione del telaio ora scarico, sono un fenomeno inaccettabile che peggiorerebbe le prestazioni di sensori e sistemi di misura, andando sia ad invalidarne la misura per il continuo cambio di posizione, sia a ridurre la durata per la continua sollecitazione a fatica meccanica.

I parametri relativi agli ammortizzatori per cabina risultano più o meno nello stesso intervallo in termini di KPI, non danno rumore e recuperano subito il posizionamento dopo il disturbo accompagnando lo spostamento. Mostrano bassi tempi di stabilizzazione, con una massa sospesa di circa 250 kg sono intorno ai 3 s. Essi danno sollecitazioni molto minori rispetto ai supporti in gomma per via delle rigidità di due ordini di grandezza più piccole.

Si sceglie pertanto di utilizzare solamente i valori relativi agli ammortizzatori e di variare i parametri in un intorno di quelli reali così da trovare la combinazione migliore, provando direttamente nei percorsi più articolati.

Facendo il confronto con il caso rigido, esaminando gli spostamenti nelle tabelle 5.1.1 e 5.1.2, c'è apparentemente un effetto benefico nella riduzione dello spostamento massimo del CM, come si vede dalla colonna di variazione percentuale (seppur si abbia un andamento non pulito come per i supporti in gomma, dovuto alle vibrazioni della struttura nell'avanzamento e contatto col terreno). Il prezzo da pagare è una maggiore trasmissione di forze al carico dovuta alla elevata rigidità del collegamento, come si vede dalle tabelle 5.1.3 e 5.1.4, in cui gli altri casi presentano riduzioni di forza trasmessa fino al 74% rispetto caso rigido. Si osservano inoltre riduzioni del picco minimo di forza nel caso degli ammortizzatori rispetto al caso rigido fino al 67%, l'aumento del 140% nel caso dei supporti in gomma è giustificabile con la probabile insorgenza di fenomeni di risonanza.

Le oscillazioni, essendo il collegamento rigido, rappresentano condizioni di riduzione del carico sulle ruote e di probabile distacco: specialmente in terreni irregolari e meno coesi il telaio rigido non riesce a seguire il profilo del terreno e dunque non si hanno contemporaneamente tutte e 4 le ruote a contatto. Ciò crea instabilità e fa lavorare male il controllo automatico che regola l'erogazione di coppia, è per evitare tali problematiche si rende necessario l'utilizzo di sospensioni.

5.2 Prove su concavità multiple

Nel percorso a concavità multiple si variano i parametri di simulazione attorno a quelli degli ammortizzatori ottenuti da letteratura, così da identificare la combinazione migliore di rigidezza e smorzamento. Si varia prima la rigidezza, poi lo smorzamento. Le prove sono eseguite ad una velocità di avanzamento del rover di 2.2 km/h (1.85 rad/s alle ruote), in quanto questa è la velocità alla quale la coppia massima necessaria richiesta al motore per muoversi su tale percorso è pari a quella massima erogabile.

Le prestazioni richieste al motore per muovere il rover a tale velocità su questo percorso sono ricavate dal programma e risultano coerenti con le prestazioni reali del mezzo, sono le seguenti:

Tabella 5.2.1 Prestazioni minime del motore per spostare il rover a 2.2 km/h sul percorso a concavità multiple

Cmax	Pmax	Cmedia	Pmedia
180 Nm	330 W	26 Nm	48 W

5.2.1 Valutazione del valore di rigidezza ottimale

Le prove sono svolte fissando un valore arbitrario di smorzamento, si sceglie $C_s=1$ Ns/mm perché simile ai valori di smorzamento trovati in letteratura. I grafici risultanti da questa prova hanno andamento simile per tutte le rigidzze, sono simili i picchi massimi (minimi in questo caso perché gli spostamenti sono negativi) e praticamente uguali i tempi di stabilizzazione, si valuta pertanto qui anche il valore medio di spostamento. Esso è stato valutato tenendo conto della somma dei picchi, mostra quale rigidezza ha la somma maggiore di picchi, ovvero fa oscillare più ampiamente il carico per più del tempo.

Per le forze si considera anche il picco minimo, in quanto alle sollecitazioni di fatica concorrono le oscillazioni in entrambi i segni. Per l'ampiezza massima si considera il massimo scostamento dal valore medio, che sia questo positivo o negativo.

Nelle prove non si scende sotto i 18N/mm perché oltre, come mostrato dai grafici, diminuirebbero le forze applicate al telaio ma ne aumenterebbe eccessivamente l'escursione sia dinamica che statica (gli attuali limiti di oscillazione di 8 cm e 14 cm sono già sufficientemente alti per un carico non fissato).

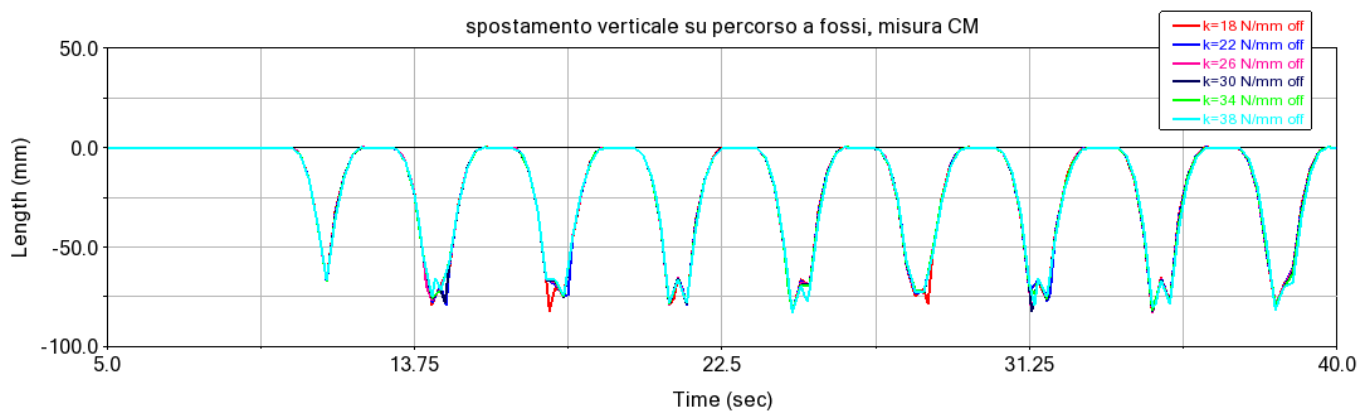


Figura 5.9 Spostamento Y percorso a concavità multiple, misura CM

Tabella 5.2.2 Spostamento Y percorso a concavità multiple, misura CM

KPI	Picco minimo (<0) (mm)	Valore medio (<0) (mm)
K=18 N/mm	83.5	19.1
K=22 N/mm	83.2	19.9
K=26 N/mm	83.0	18.8
K=30 N/mm	82.6	19.3
K=34 N/mm	82.4	19.4
K=38 N/mm	82.8	18.9

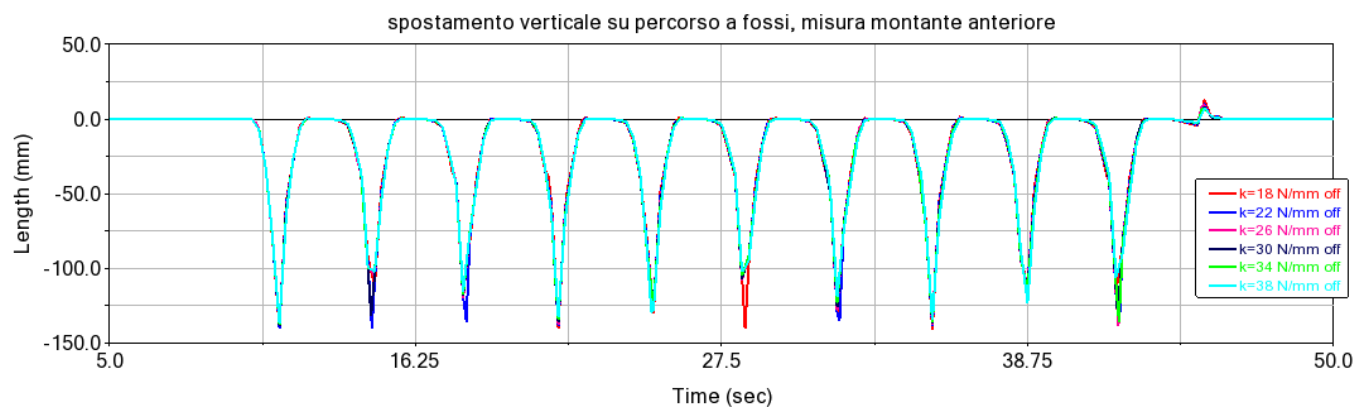


Figura 5.10 Spostamento Y percorso a concavità multiple, misura montante anteriore

Tabella 5.2.3 Spostamento Y percorso a concavità multiple, misura montante anteriore

KPI	Picco minimo (<0) (mm)	Valore medio (<0) (mm)
K=18 N/mm	141.4	18.8
K=22 N/mm	140.4	21.4
K=26 N/mm	138.4	18.2
K=30 N/mm	138.0	19.9
K=34 N/mm	137.6	19.4
K=38 N/mm	136.8	18.5

Dai grafici relativi agli spostamenti in figura 5.9 e 5.10 non emergono grosse differenze in termini di spostamento al variare della rigidezza, i picchi massimi e i valori medi sono simili, discostandosi solo per qualche millimetro o decimo di millimetro; si può vedere come il caso a 38 N/mm dia il massimo minore e il valore medio tra i più piccoli.

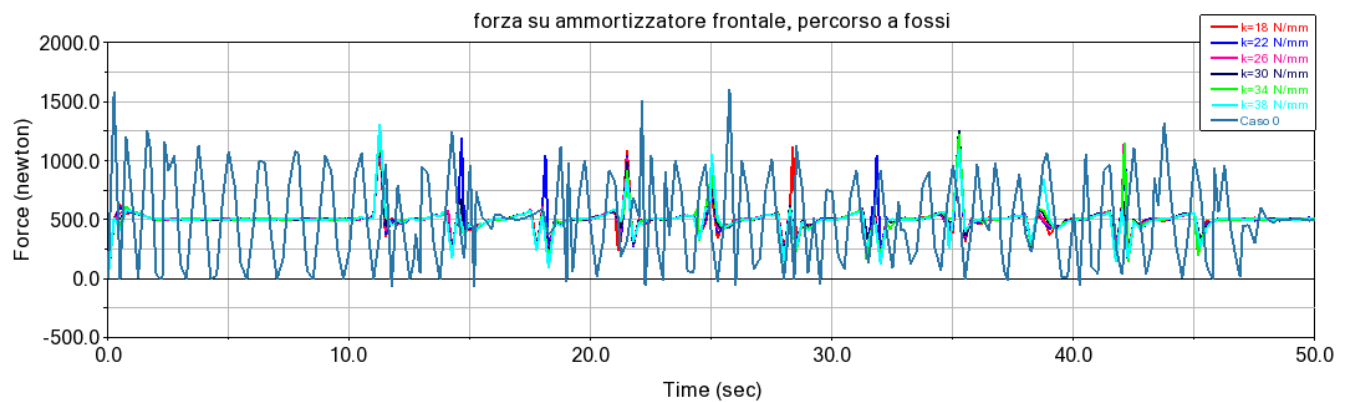


Figura 5.11 Forza ammortizzatore frontale con caso rigido, percorso a concavità multiple

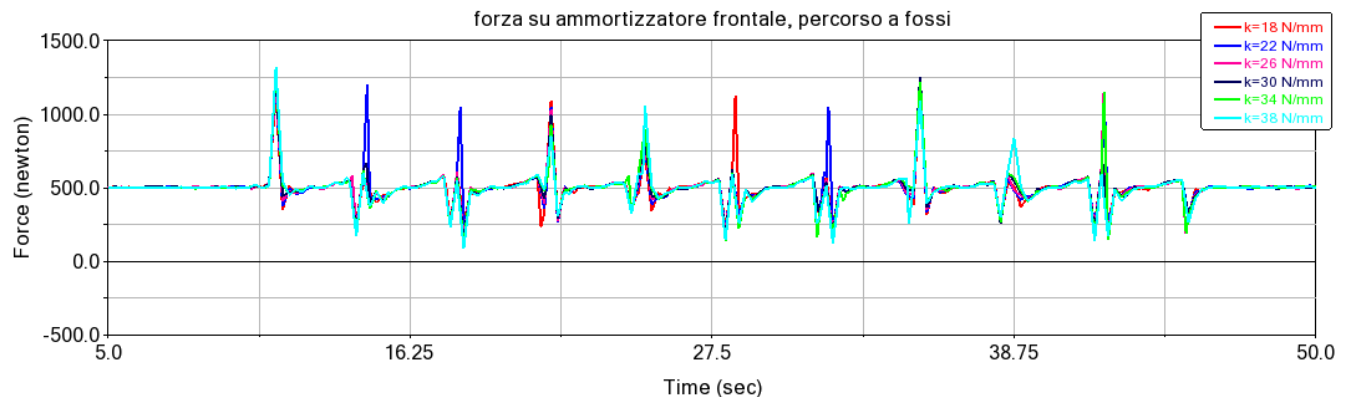


Figura 5.12 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità multiple

Tabella 5.2.4 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità multiple

KPI	Picco massimo (N)	Picco minimo (N)	Valore alternato massimo rispetto a valore medio di 500N (N)	Variazione percentuale del valore alternato max rispetto al caso 0
K=18 N/mm	1213	230	713	-35%
K=22 N/mm	1218	202	718	-35%
K=26 N/mm	1223	165	723	-34%
K=30 N/mm	1268	146	768	-30%
K=34 N/mm	1297	121	797	-28%
K=38 N/mm	1315	88	815	-26%
Caso 0	1600	-75	1100	0%

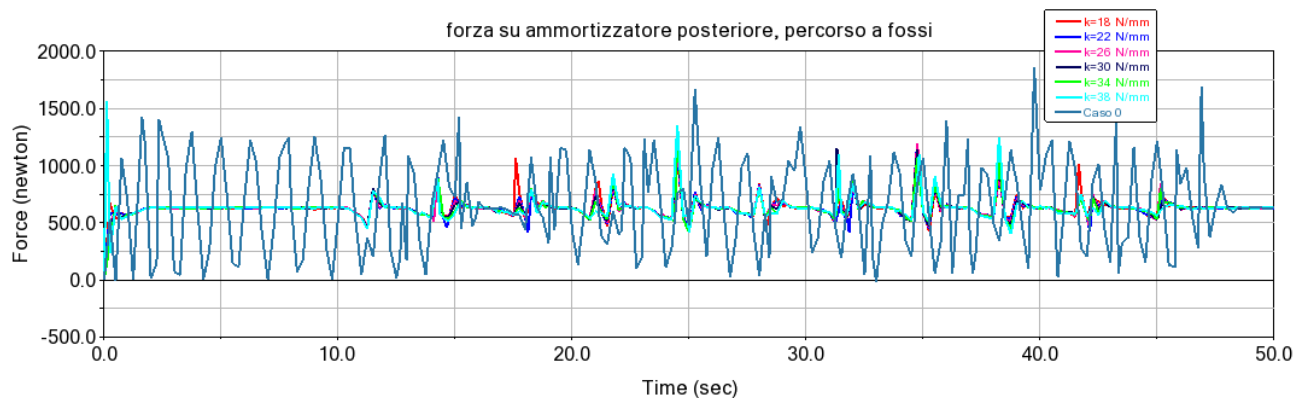


Figura 5.13 Forza ammortizzatore posteriore con caso rigido, percorso a concavità multiple

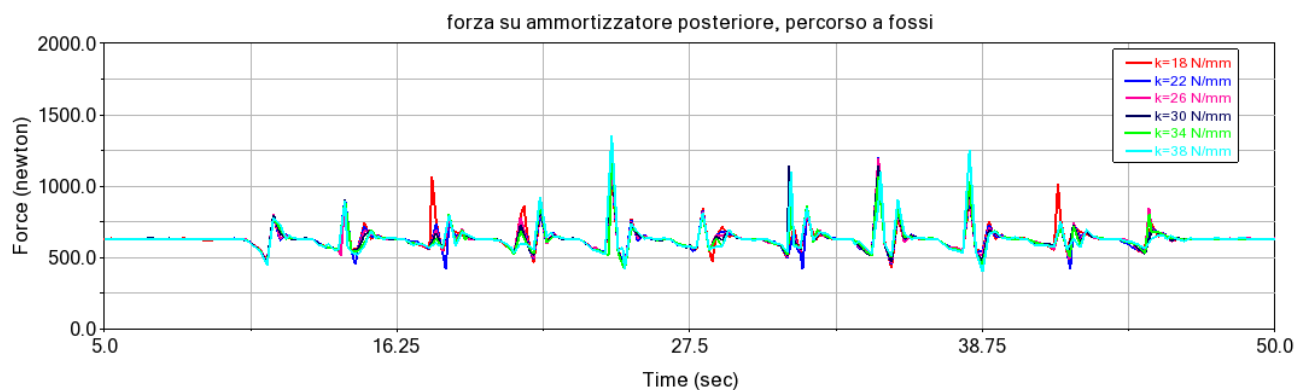


Figura 5.14 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità multiple

Tabella 5.2.5 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità multiple

KPI	Picco massimo (N)	Picco minimo (N)	Valore alternato massimo rispetto a valore medio di 630 N (N)	Variazione percentuale del valore alternato max rispetto al caso 0
K=18 N/mm	1193	426	563	-54%
K=22 N/mm	1200	420	570	-54%
K=26 N/mm	1196	432	566	-54%
K=30 N/mm	1209	423	579	-53%
K=34 N/mm	1273	414	643	-48%
K=38 N/mm	1354	401	724	-41%
Caso 0	1865	-18	1232	0%

I grafici relativi alla forza, in figura 5.11 e 5.12, mostrano meglio la differenza tra i valori provati, in particolare si vede come a rigidzze più basse si abbiano picchi di forza inferiori, dunque di inerzie/sollecitazioni sugli elementi di fissaggio e gli strumenti che comprendono il carico, così come si hanno picchi minori in uscita dal fosso, con una differenza tra il primo caso e l'ultimo di 142 N nelle sollecitazioni percepite dal carico. Il valore di forza medio è intorno alla quota di peso del telaio che si scarica su ogni ammortizzatore (1/4 della massa sospesa). Il valore di forza alternato massimo è dunque maggiore con rigidzze elevate, causando una maggiore sollecitazione a fatica dei componenti. Il caso migliore risulta essere dunque quello a 18 N/mm per la parte anteriore e 18/22/26 N/mm per quella posteriore, in quanto tali valori hanno minori di picchi e scostamenti dall'equilibrio. Si sceglie pertanto il valore di 18 N/mm sia per la parte frontale che per quella posteriore, così da avere un unico parametro di rigidzza.

Il confronto col caso rigido nella tabella 5.2.5 mostra il miglioramento delle prestazioni in termini di forze trasmesse al carico, si osserva una riduzione fino al 54% del picco massimo con K=18/22/26 N/mm, e in generale un andamento più pulito con il sistema globalmente più stabile, come evidente in figura 5.13.

5.2.2 Valutazione del valore di smorzamento ottimale

Si eseguono le prove di smorzamento con una rigidzza di 18 N/mm, in quanto vicino a quelli trovati in letteratura, inoltre da le prestazioni migliori come risultato dalle simulazioni al variare della rigidzza.

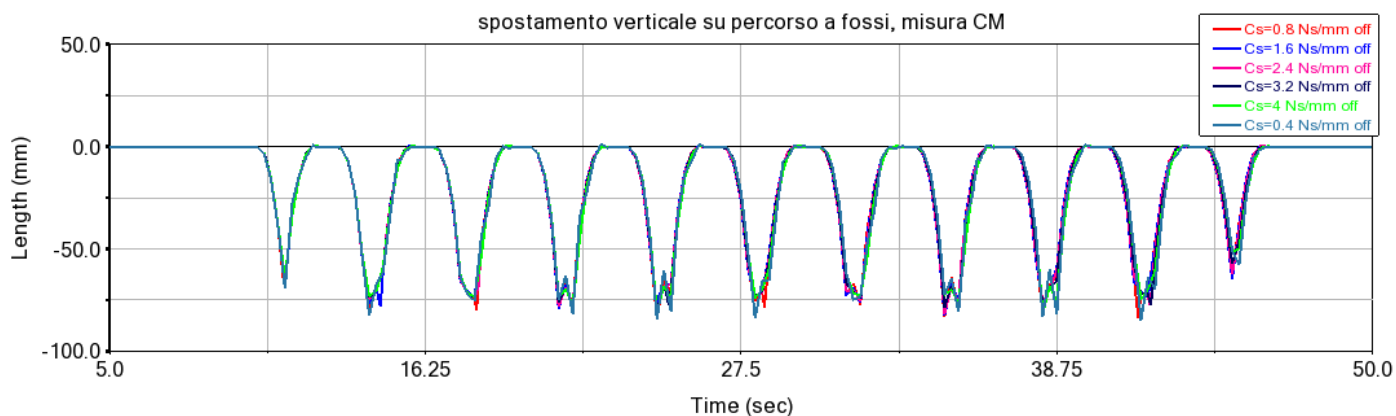


Figura 5.15 Spostamento Y percorso a concavità multiple, misura CM

Tabella 5.2.6 Spostamento Y percorso a concavità multiple, misura CM

KPI	Picco minimo (<0) (mm)	Valore medio (<0) (mm)
$C_s=0.4$ Ns/mm	85.2	17.7
$C_s=0.8$ Ns/mm	83.7	19.1
$C_s=1.6$ Ns/mm	82.6	18.6
$C_s=2.4$ Ns/mm	81.6	18.8
$C_s=3.2$ Ns/mm	80.4	19.6
$C_s=4$ Ns/mm	81.2	18.2

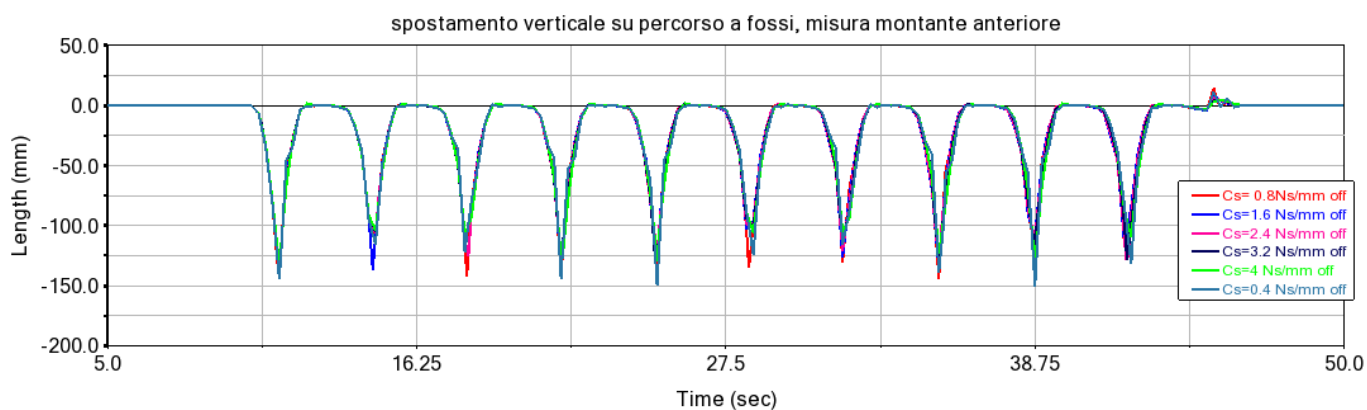


Figura 5.16 Spostamento Y percorso a concavità multiple, misura montante anteriore

Tabella 5.2.7 Spostamento Y percorso a concavità multiple , misura montante anteriore

KPI	Picco minimo (<0) (mm)	Valore medio (<0) (mm)
Cs=0.4 Ns/mm	150.7	18.4
Cs=0.8 Ns/mm	144.0	19.7
Cs=1.6 Ns/mm	137.8	18.7
Cs=2.4 Ns/mm	135.8	20.0
Cs= 3.2 Ns/mm	134.1	20.4
Cs=4 Ns/mm	133.2	18.9

Anche in questo caso i valori di spostamento non danno molte indicazioni, se non che al diminuire dello smorzamento aumenta lo spostamento verticale, arrivando a 15mm con 0.4Ns/mm.

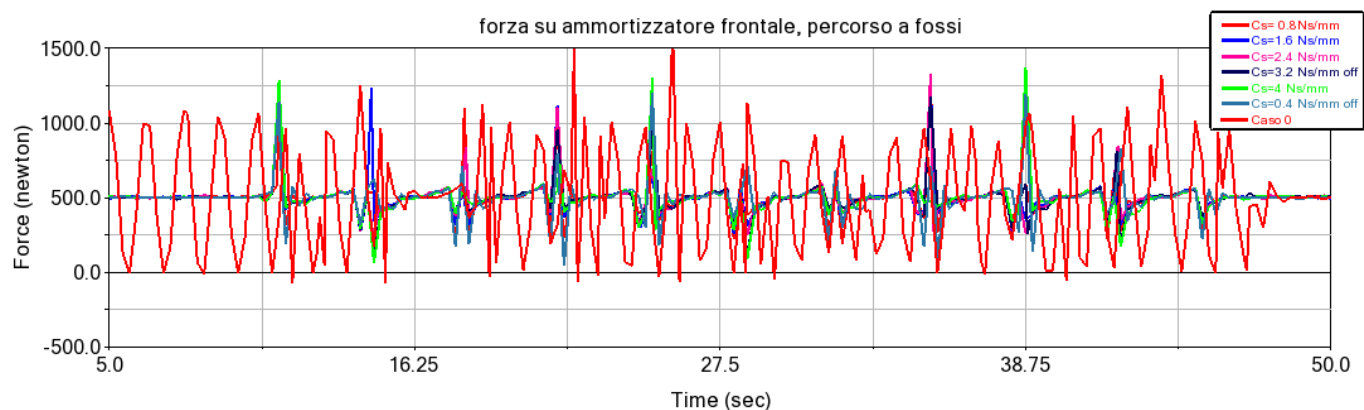


Figura 5.17 Forza ammortizzatore frontale con caso rigido, percorso a concavità multiple

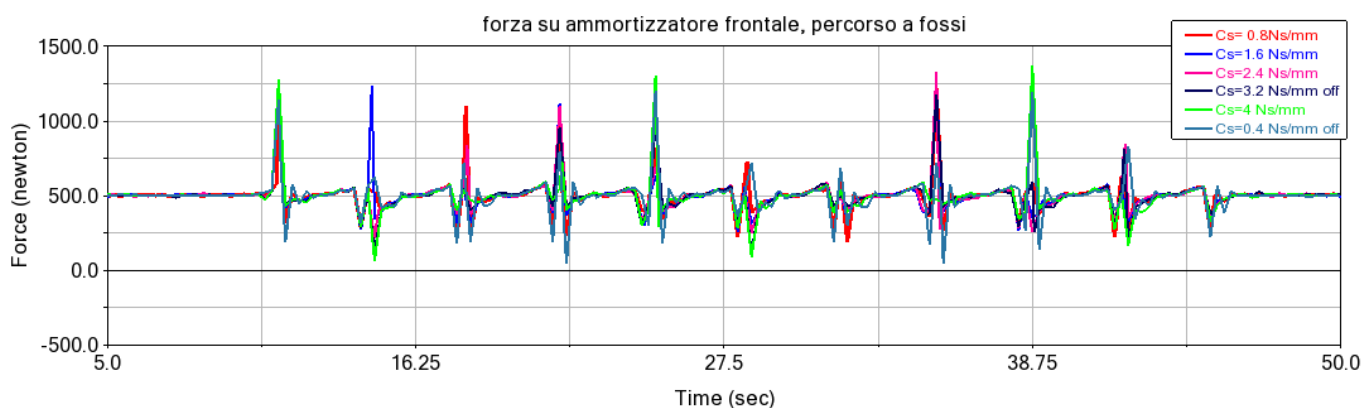


Figura 5.18 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità multiple

Tabella 5.2.8 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità multiple

KPI	Picco massimo (N)	Sovraelongazione massima (N)	Valore alternato massimo rispetto a valore di equilibrio di 500 N (N)	Variazione percentuale del valore alternato max rispetto al caso 0
Cs=0.4 Ns/mm	1201	45	701	-36%
Cs=0.8 Ns/mm	1220	193	720	35%
Cs=1.6 Ns/mm	1238	258	738	-33%
Cs=2.4 Ns/mm	1332	215	832	-24%
Cs= 3.2 Ns/mm	1245	11	745	-32%
Cs=4 Ns/mm	1369	63	869	-21%
Caso 0	1600	-75	1100	0%

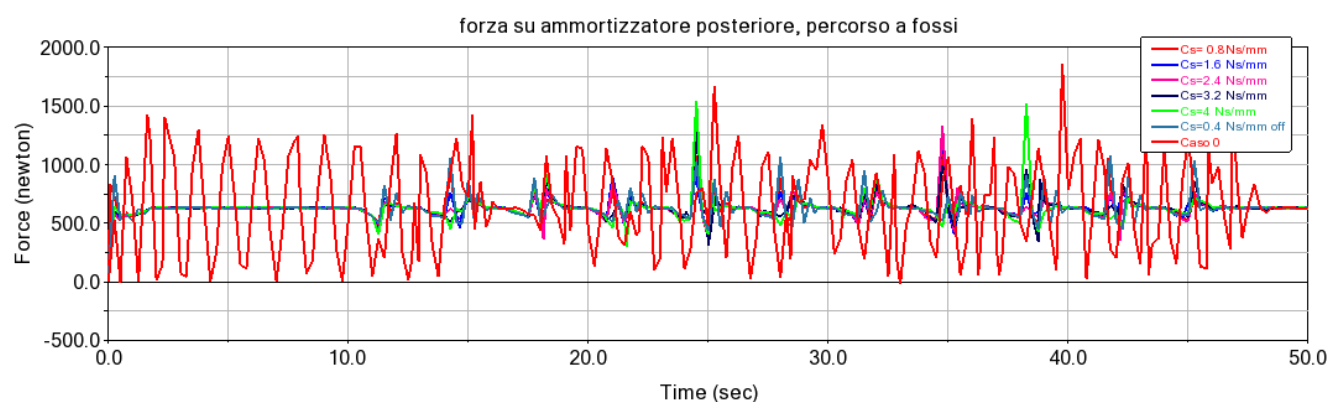


Figura 5.19 Forza ammortizzatore posteriore con caso rigido, percorso a concavità multiple

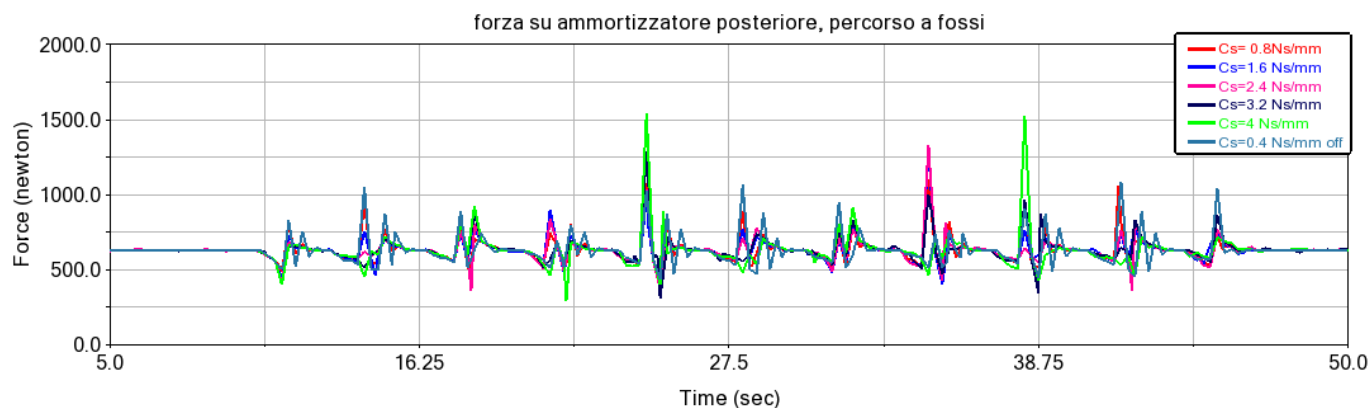


Figura 5.20 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità multiple

Tabella 5.2.9 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità multiple

KPI	Picco massimo (N)	Sovraelongazione massima (N)	Valore alternato massimo rispetto a valore di equilibrio di 633 N (N)	Variazione percentuale del valore alternato max rispetto al caso 0
Cs=0.4 Ns/mm	1083	435	450	-63%
Cs=0.8 Ns/mm	1096	436	463	-62%
Cs=1.6 Ns/mm	1295	404	662	-46%
Cs=2.4 Ns/mm	1328	358	695	-44%
Cs= 3.2 Ns/mm	1290	313	657	-47%
Cs=4 Ns/mm	1545	296	912	-26%
Caso 0	1865	-18	1232	0%

Le forze invece mostrano come all'aumentare dello smorzamento aumentino le sollecitazioni sul carico. I valori che danno quelle minime sono 1.6 Ns/mm per gli ammortizzatori frontali e 0.4/0.8 Ns/mm per quelli posteriori, si sceglie 1.6 Ns/m per gli anteriori, si prende 0.8 Ns/mm per i posteriori in quanto a parità di forze trasmesse tale valore da un'escursione verticale minore ed un andamento più pulito nei grafici.

Anche in questo caso si nota come le prestazioni migliorino sensibilmente rispetto al caso rigido, in termini di riduzione del numero di oscillazioni (figura 5.19) e dei valori massimi fino al 63% (tabella 5.2.9)

5.3. Prove su concavità alternate

Si eseguono le prove sul percorso a concavità alternate ad una velocità di percorrenza pari a 2.2 km/h, così da avere valori confrontabili con il caso precedente il rispetto del limite di coppia delle prestazioni del motore.

5.3.1 Valutazione del valore ottimale di rigidità

Le prove sono eseguite con uno smorzamento di 1 Ns/mm, scelto arbitrariamente perché vicino a quelli trovati in letteratura.

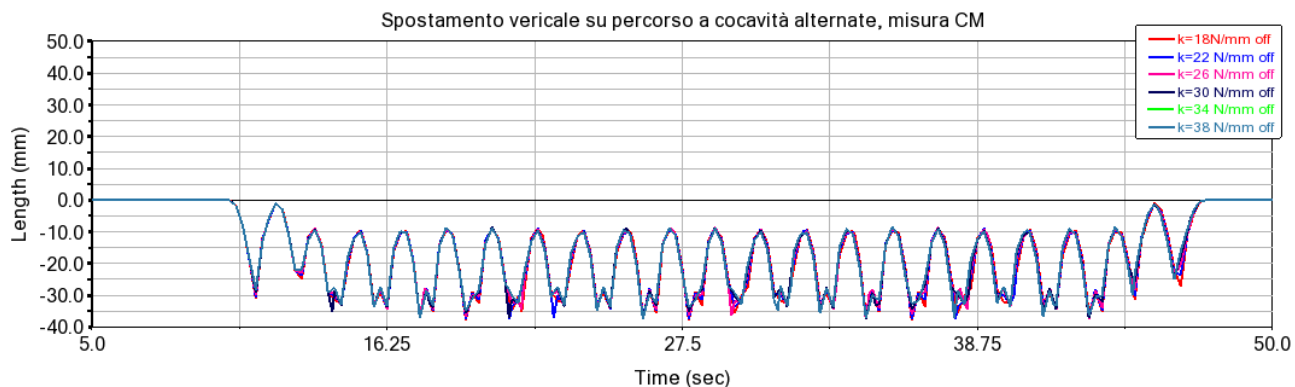


Figura 5.21 Spostamento Y percorso a concavità alternate, misura CM

Tabella 5.3.1 Spostamento Y percorso a concavità alternate, misura CM

KPI	Picco minimo (<0) (mm)	Valore medio (<0) (mm)
K=18 N/mm	38.1	16.5
K=22 N/mm	37.6	16.4
K=26 N/mm	37.5	16.6
K=30 N/mm	37.5	16.4
K=34 N/mm	37.4	16.4
K=38 N/mm	37.4	16.4

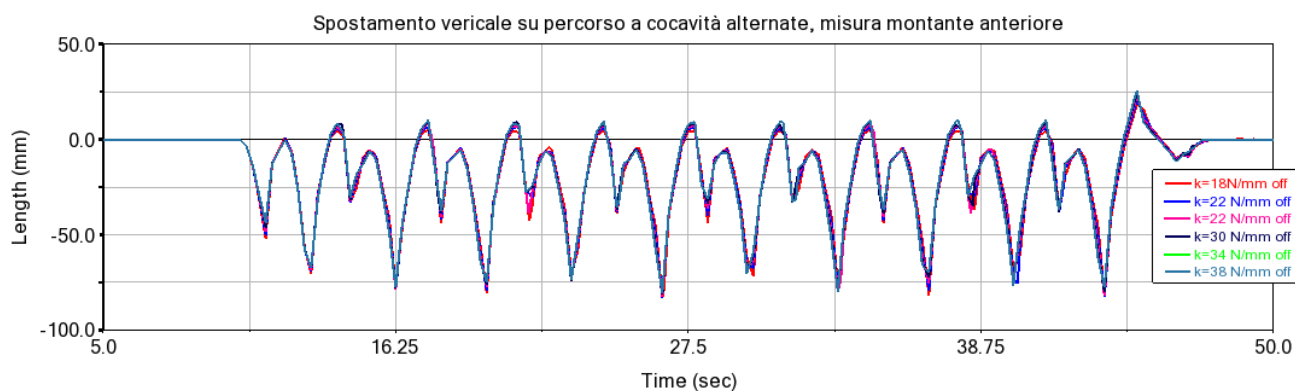


Figura 5.22 Spostamento Y percorso a concavità alternate , misura montante anteriore

Tabella 5.3.2 Spostamento Y percorso a concavità alternate, misura montante anteriore

KPI	Picco minimo (<0) (mm)	Valore medio (<0) (mm)	Sovraelongazione massima (mm)
K=18 N/mm	83.0	16.7	18.3
K=22 N/mm	83.0	16.2	20.7
K=26 N/mm	82.6	16.5	22.8
K=30 N/mm	81.4	16.0	24.6
K=34 N/mm	80.3	15.8	25.6
K=38 N/mm	80.3	15.8	25.6

In maniera analoga alle altre prove, i valori di spostamento sono simili e non mostrano grosse differenze in termini di picchi e sovraelongazioni a rigidzze così elevate. La misura sul montante manifesta spostamenti amplificati rispetto al CM similmente alle altre simulazioni.

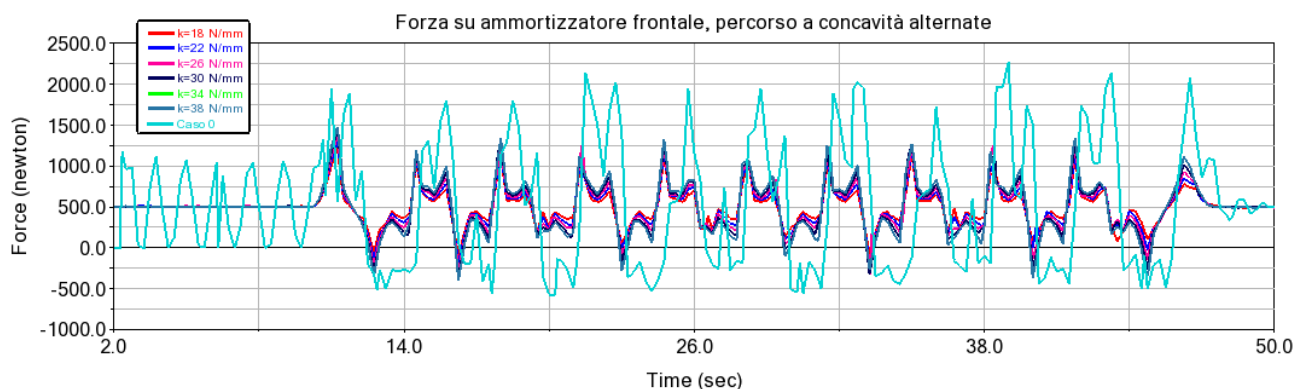


Figura 5.23 Forza ammortizzatore frontale con caso 0, percorso a concavità alternate

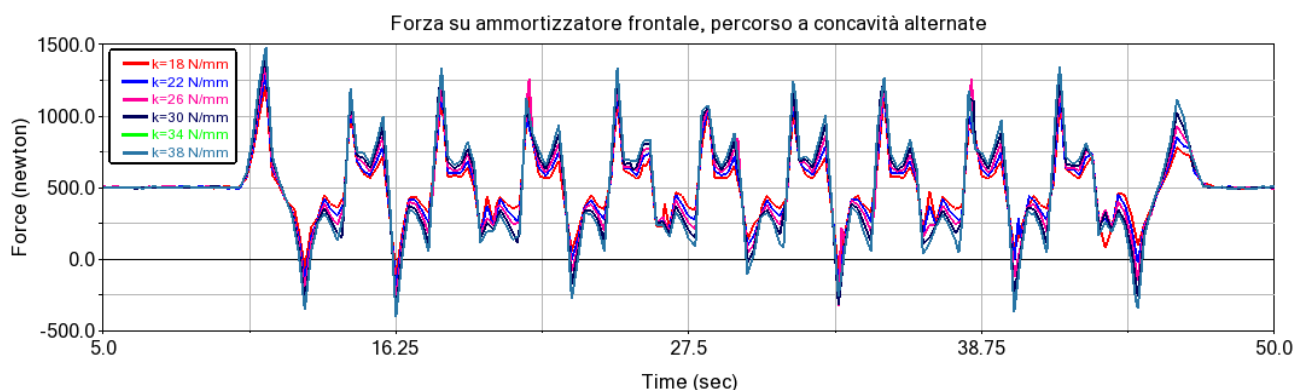


Figura 5.24 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate

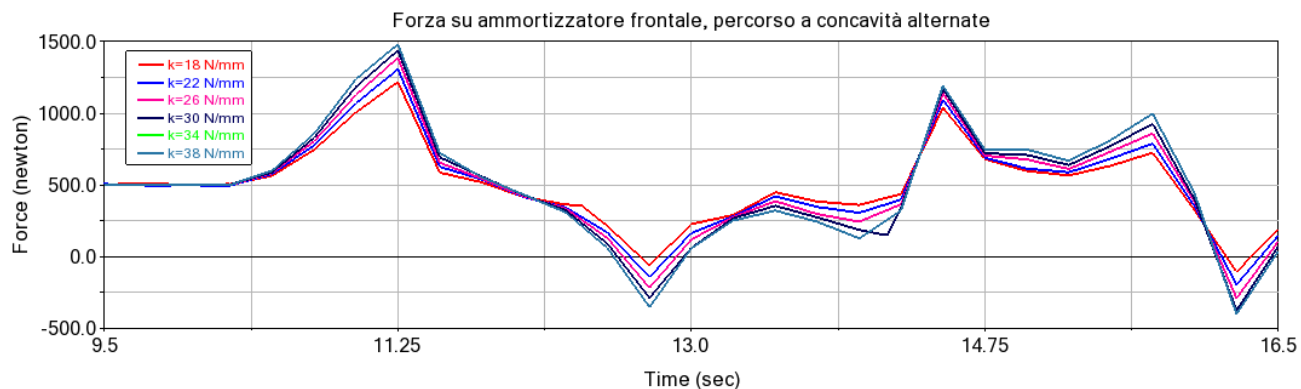


Figura 5.25 dettaglio forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate

Tabella 5.3.3 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate

KPI	Picco massimo (N)	Picco minimo (N)	Valore alternato massimo rispetto a valore di equilibrio di 500 N (N)	Variazione percentuale del valore alternato max rispetto al caso 0
K=18 N/mm	1219	-106	719	-59%
K=22 N/mm	1307	-200	807	-54%
K=26 N/mm	1387	-325	887	-50%
K=30 N/mm	1439	-374	939	-47%
K=34 N/mm	1482	-401	982	-44%
K=38 N/mm	1482	-401	982	-44%
Caso 0	2269	-580	1769	0%

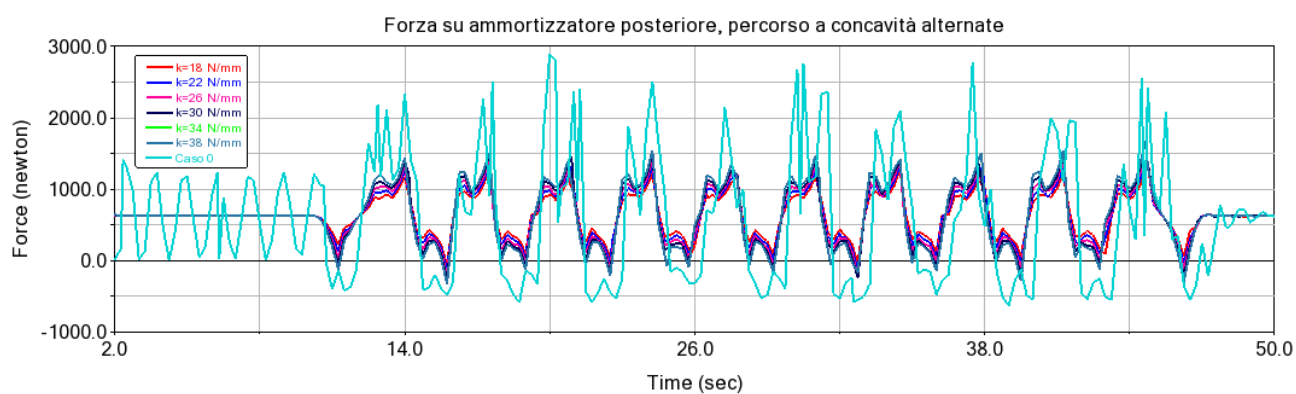


Figura 5.26 Forza ammortizzatore posteriore con caso 0, percorso a concavità alternate

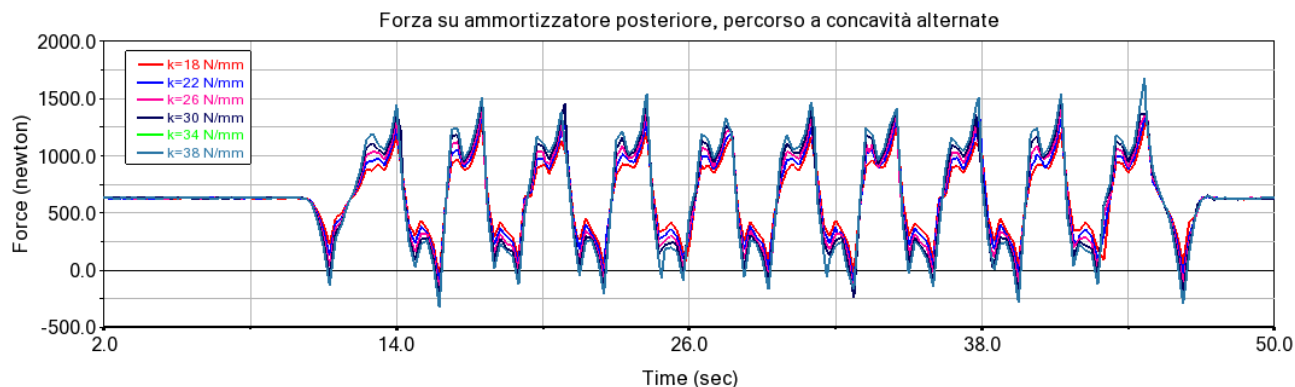


Figura 5.27 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate

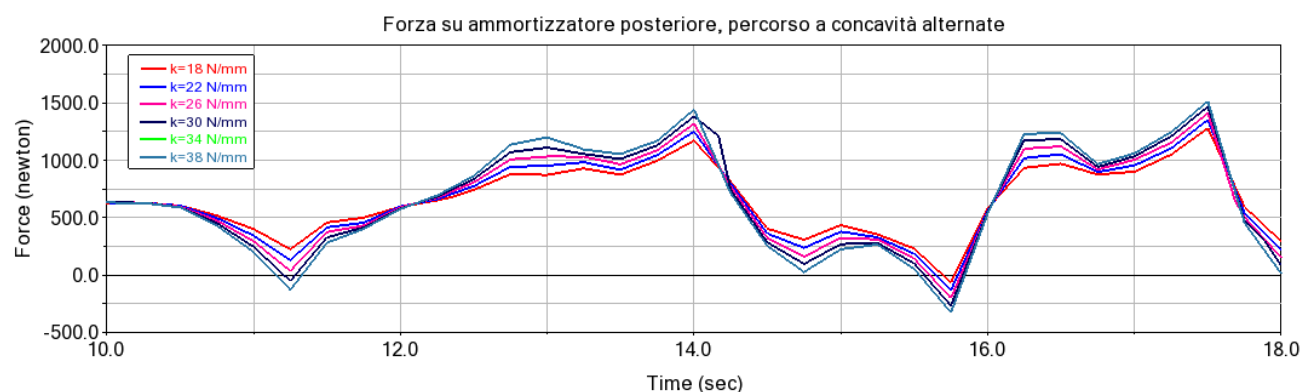


Figura 5.28 dettaglio forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate

Tabella 5.3.4 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate

KPI	Picco massimo (massimo) (N)	Picco minimo (N)	Valore alternato massimo rispetto a valore di equilibrio di 630 N (N)	Variazione percentuale del valore alternato max rispetto al caso 0
K=18 N/mm	1331	-66	701	-69%
K=22 N/mm	1374	-132	762	-66%
K=26 N/mm	1425	-218	848	-63%
K=30 N/mm	1509	-269	899	-60%
K=34 N/mm	1680	-327	1050	-54%
K=38 N/mm	1680	-327	1050	-54%
Caso 0	2896	-635	2266	0%

Le curve delle forze mostrano delle differenze con la variazione delle rigidzze. In particolare si vede come l'andamento abbia la stessa forma ma all'aumentare della rigidzza aumentino i minimi e massimi registrati. Confrontando la tabella 5.3.3 e 5.3.4 si evince che le sollecitazioni sul carico siano

minime con rigidzze più basse, a differenza delle prove a concavità fisse l'ammortizzatore posteriore risulta più sollecitato di quello anteriore. Il valore migliore in termini di scostamenti minimi dal valor medio è la rigidzza di 18 N/mm, sia per il caso anteriore, sia per quello posteriore.

Analogamente ai casi precedenti nella tabella 5.3.4 si vede come diminuiscano i massimi delle sollecitazioni trasmesse al carico, e come gli andamenti nei grafici siano più regolari (figura 5.26)

5.3.2 Valutazione del valore ottimale di smorzamento

Le prove sono eseguite impostando una rigidzza di 18 N/mm. Questo perché rappresenta il valore migliore ottenuto nelle prove precedenti ed è rappresentativo delle caratteristiche della componentistica reale, come mostrato dai risultati dell'analisi della letteratura.

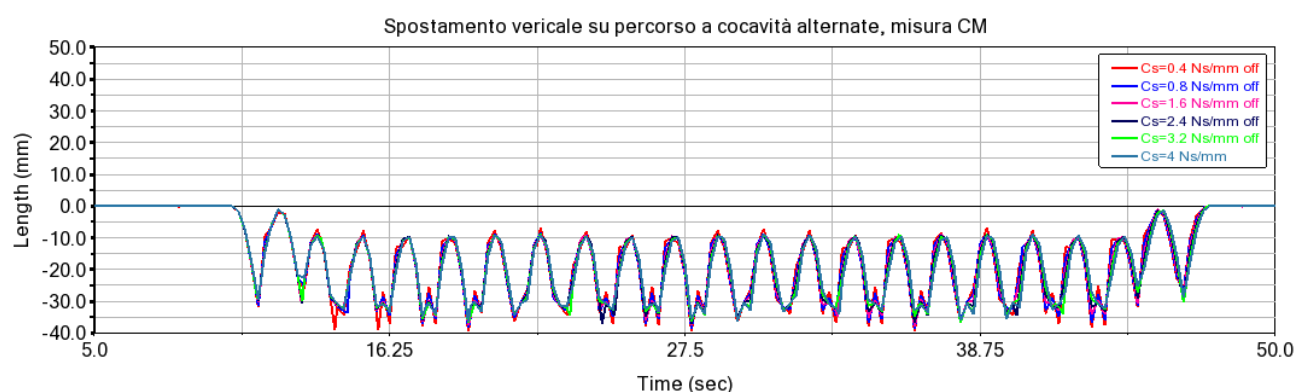


Figura 5.29 Spostamento Y percorso a concavità alternate , misura CM

Tabella 5.3.5 Spostamento Y percorso a concavità alternate , misura CM

KPI	Picco minimo (<0) (mm)	Valore medio (<0) (mm)
Cs=0.4 Ns/mm	39.5	16.7
Cs=0.8 Ns/mm	38.6	16.3
Cs=1.6 Ns/mm	37.7	16.5
Cs=2.4 Ns/mm	37.2	16.8
Cs= 3.2 Ns/mm	36.9	16.8
Cs=4 Ns/mm	36.6	16.9

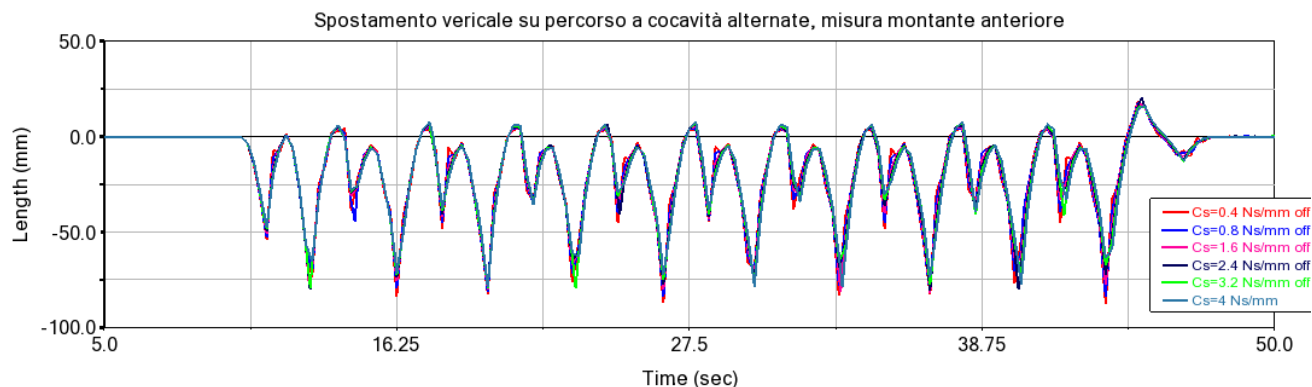


Figura 5.30 Spostamento Y percorso a concavità alternate , misura montante anteriore

Tabella 5.3.6 Spostamento Y percorso a concavità alternate , misura montante anteriore

KPI	Picco minimo (<0) (mm)	Valore medio (<0) (mm)	Sovraelongazione massima (mm)
Cs=0.4 Ns/mm	87.4	16.5	18.8
Cs=0.8 Ns/mm	83.9	16.5	18.4
Cs=1.6 Ns/mm	81.6	16.9	17.6
Cs=2.4 Ns/mm	80.3	16.6	20.6
Cs= 3.2 Ns/mm	79.4	17.2	15.9
Cs=4 Ns/mm	78.8	17.0	16.5

I dati dello spostamento mostrano delle oscillazioni leggermente maggiori per smorzamenti più bassi, i valori sono comunque sostanzialmente simili, la differenza tra gli estremi in termini di picchi è, nella tabella 5.3.5, di 3 mm, nella tabella 5.3.6, di 9 mm.

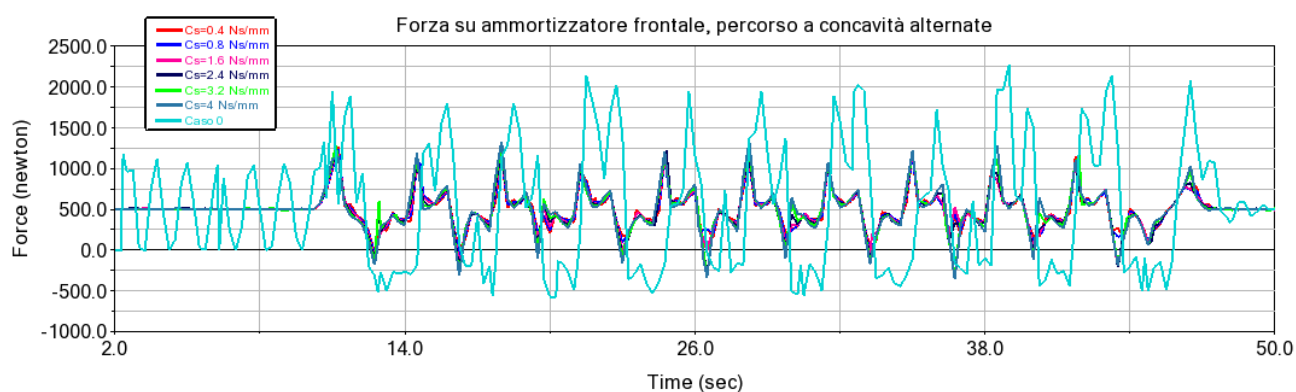


Figura 5.31 Forza ammortizzatore anteriore con caso 0, percorso a concavità alternate

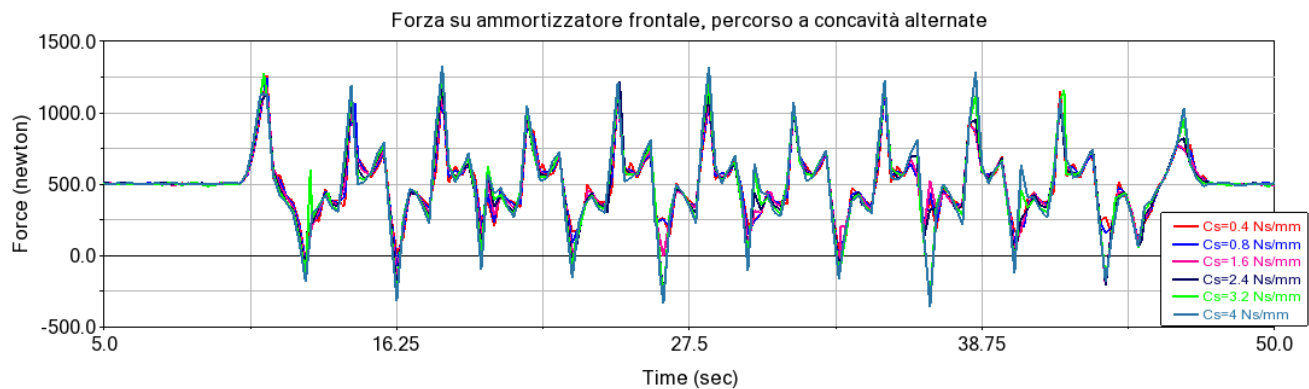


Figura 5.32 Forza ammortizzatore anteriore, percorso a concavità alternate

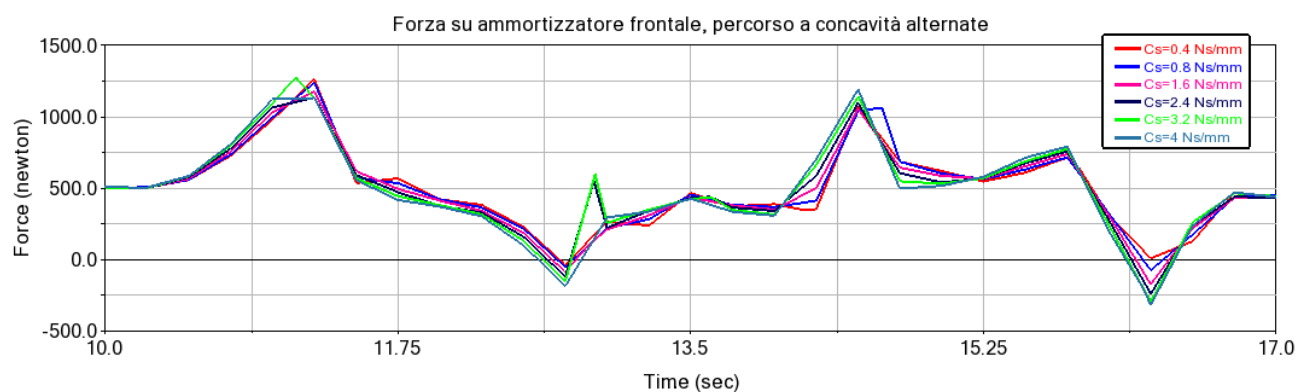


Figura 5.33 dettaglio forza ammortizzatore anteriore, percorso a concavità alternate

Tabella 5.3.7 Forza ammortizzatore anteriore, percorso a concavità alternate

KPI	Picco massimo (N)	Picco minimo (N)	Valore alternato massimo rispetto a valore di equilibrio di 500 N (N)	Variazione percentuale del valore alternato max rispetto al caso 0
Cs=0.4 Ns/mm	1263	-36	763	-57%
Cs=0.8 Ns/mm	1239	-74	739	-58%
Cs=1.6 Ns/mm	1188	-212	712	-60%
Cs=2.4 Ns/mm	1224	-312	812	-54%
Cs= 3.2 Ns/mm	1297	-336	836	-53%
Cs=4 Ns/mm	1333	-357	857	-52%
Caso 0	2269	-580	1769	0%

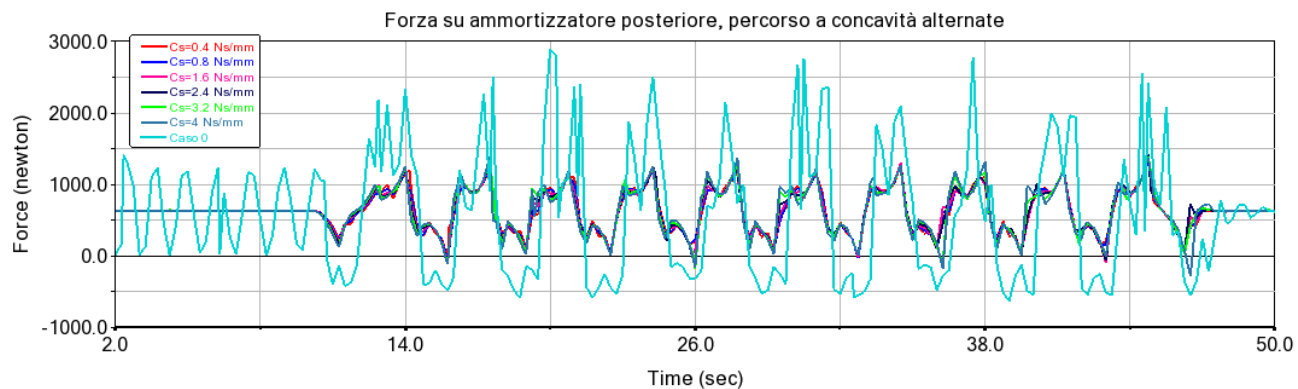


Figura 5.34 Forza ammortizzatore posteriore con caso 0, percorso a concavità alternate

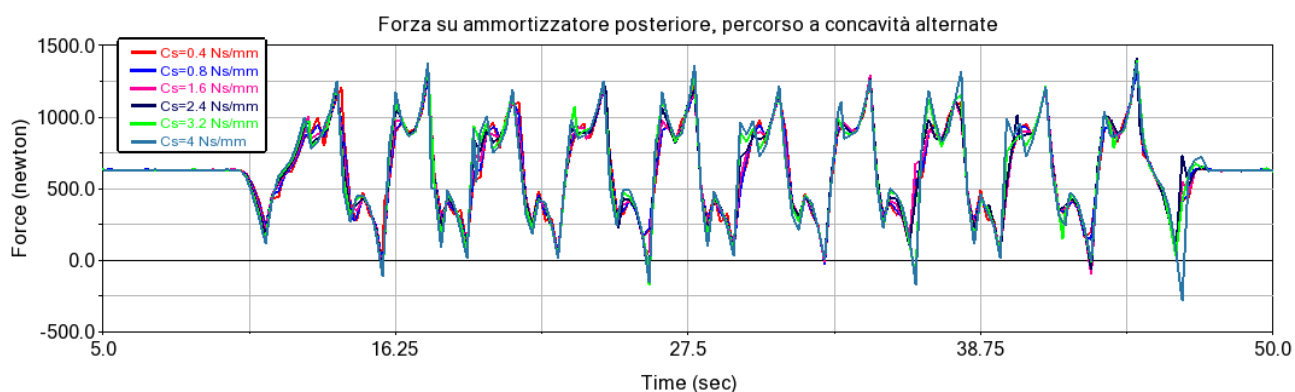


Figura 5.35 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate

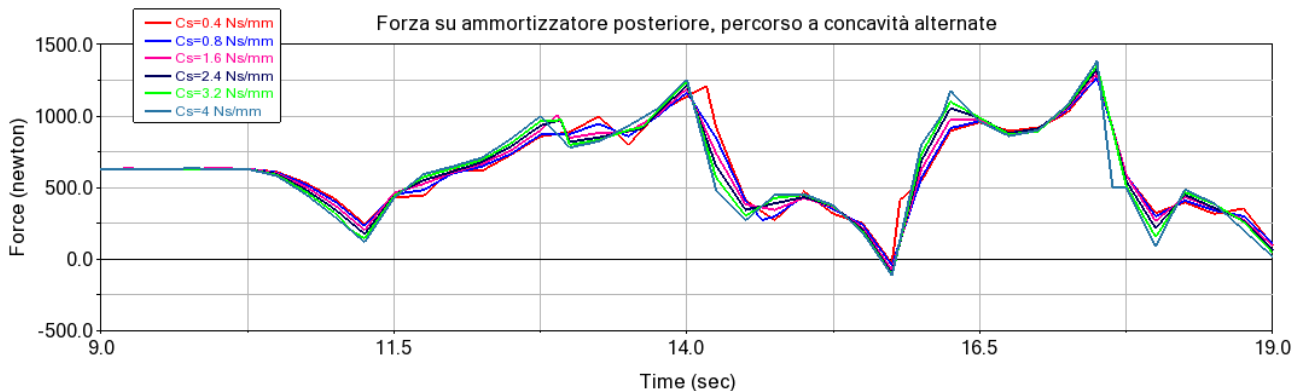


Figura 5.36 dettaglio forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate

Tabella 5.3.8 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate

KPI	Picco massimo (N)	Picco minimo (N)	Valore alternato massimo rispetto a valore di equilibrio di 630 N (N)	Variazione percentuale del valore alternato max rispetto al caso 0
Cs=0.4 Ns/mm	1353	-31.2	723	-68%
Cs=0.8 Ns/mm	1326	-42.4	696	-69%
Cs=1.6 Ns/mm	1383	-101	753	-67%
Cs=2.4 Ns/mm	1417	-152	787	-65%
Cs= 3.2 Ns/mm	1394	-168	798	-65%
Cs=4 Ns/mm	1383	-285	915	-60%
Caso 0	2896	-635	2266	0%

I dati sulla forza mostrano differenze apprezzabili tra i massimi e i minimi dei valori di smorzamento simulati. In particolare si nota come l'andamento dei massimi e minimi non sia monotono con lo smorzamento. I valori minimi di sollecitazioni, evidenti guardando il valore alternato massimo, si hanno per gli stessi valori del caso a concavità fisse: 0.4 Ns/mm e 0.8 Ns/mm per l'ammortizzatore posteriore, e a 0.8 Ns/mm e 1.6 Ns/mm per quello anteriore. Le prestazioni migliori in assoluto si hanno con uno smorzamento frontale di 1.6 Ns/mm, e uno posteriore di 0.8 Ns/mm.

Analoghe considerazioni ai casi precedenti per quanto riguarda il confronto con il caso rigido.

5.4 Analisi di sensitività: effetto della massa del payload

Si eseguono delle prove al variare del carico trasportato per valutare il comportamento dei parametri che hanno performato al meglio nei casi con carico nullo. Le prove sono effettuate a 0 kg, 50 kg, 100kg e 200kg, così da verificare le prestazioni nelle condizioni peggiori di funzionamento, con carichi elevati e percorso dissestato. La velocità di avanzamento del rover è di 2.2 km/h, così da avere coppia massima e potenza massima entro le prestazioni massime del motore a 200 kg.

Il percorso di prova è quello a concavità alternate.

Si utilizza una rigidezza di 18 N/mm in quanto è il valore migliore ottenuto in tutte le prove senza che ci siano altri valori di rigidezza con prestazioni altrettanto buone (eccetto nella forza frontale del caso a concavità fisse, in cui 18/22/26 N/mm avevano le stesse prestazioni). Con la stessa logica il valore di smorzamento posteriore utilizzato è fisso e pari a 0.8 Ns/mm

Si confrontano al variare del carico due set di parametri di smorzamento anteriore, quello con le prestazioni migliori in assoluto e un altro che ha dato prestazioni vicine al precedente. I parametri provati sono i seguenti:

- Caso 1: 1.6 Ns/mm di smorzamento frontale.
- Caso 2: 0.8 Ns/mm di smorzamento frontale

5.4.1 Caso 1

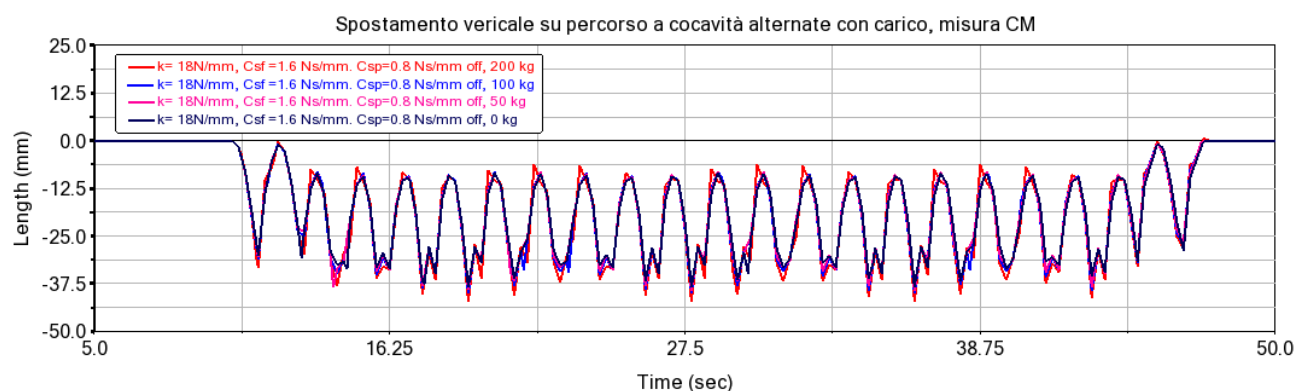


Figura 5.37 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico, misura CM, caso 1

Tabella 5.4.1 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico, misura CM, caso 1

KPI	Picco minimo (<0) (mm)	Valore medio (<0) (mm)
200 kg	42.2	16.9
100 kg	40.0	16.9
50 kg	39.3	16.5
0 kg	38.4	16.7

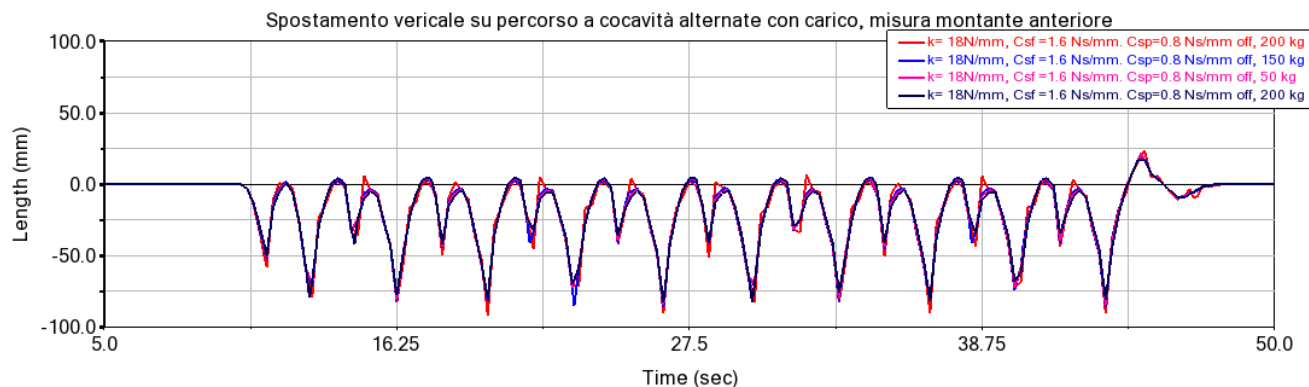


Figura 5.38 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico , misura montante anteriore, caso 1

Tabella 5.4.2 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico , misura montante anteriore caso 1

KPI	Picco minimo (<0) (mm)	Sovraelongazione massima	Valore medio (<0) (mm)
200 kg	91.6	23.6	16.6
100 kg	86.2	18.1	17
50 kg	84.6	21.9	15.5
0 kg	82.8	17.2	16.7

Dalle prove sullo smorzamento si nota un comportamento sostanzialmente simile in termini di spostamenti al variare del carico trasportato, con differenze tra il massimo e il caso scarico pari a 9mm in termini di picco massimo nel caso della tabella 5.4.2.

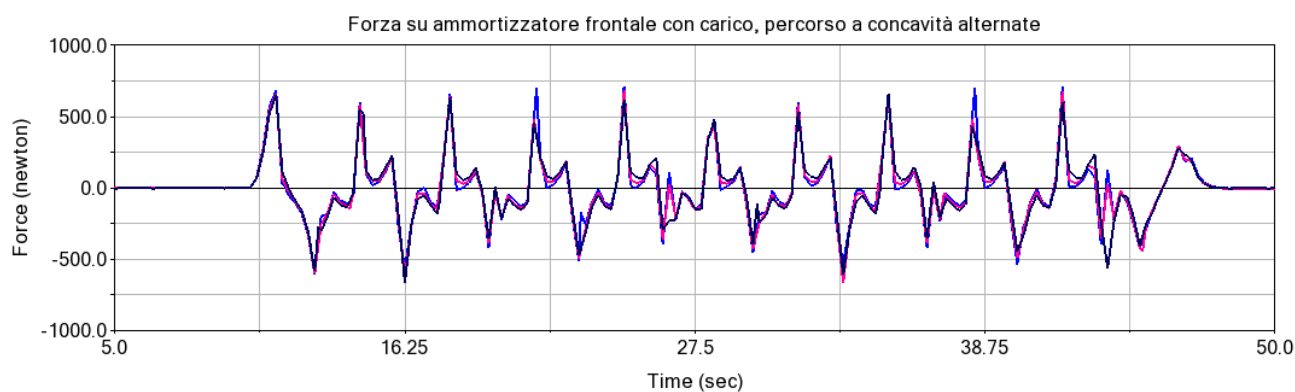


Figura 5.39 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate con carico, caso 1

Tabella 5.4.3 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate con carico, caso 1

KPI	Picco massimo (N)	Picco minimo (N)	Valore medio (N)	Valore alternato massimo (N)
200 kg	709	-608	-2	707
100 kg	710	-606	-2	708
50 kg	681	-669	-12	693
0 kg	658	-666	-7	659

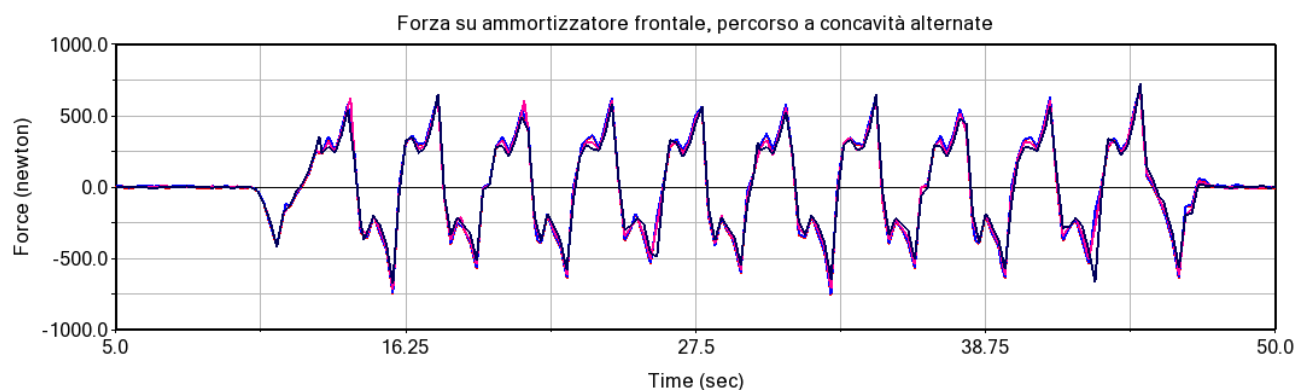


Figura 5.40 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate con carico, caso 1

Tabella 5.4.4 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate con carico, caso 1

KPI	Picco massimo (N)	Picco minimo (N)	Valore medio (N)	Valore alternato massimo (N)
200 kg	699	-754	-3	751
100 kg	706	-747	4	751
50 kg	698	-718	21	739
0 kg	730	-676	10	720

Le misure di forza mostrano differenze tra i picchi del caso scarico e massimamente carico entro i 100 N, nel caso dell'ammortizzatore anteriore aumenta il picco massimo all'aumentare del carico, nel caso posteriore diminuisce il picco minimo. L'indicazione sulle sollecitazioni a fatica del valore alternato massimo mostra che, ragionevolmente, l'ampiezza massima della sollecitazione registrata dal valore medio si ha per il caso massimamente caricato. Il confronto tra le prestazioni a 0 kg e 200 kg mostra che nel caso maggiormente caricato, si ha un peggioramento di 30 N in termini di cicli di fatica. Si conclude che il set di parametri simulato si comporta bene sotto carico in quanto i parametri dei KPI sono simili al caso scarico.

5.4.2Caso 2

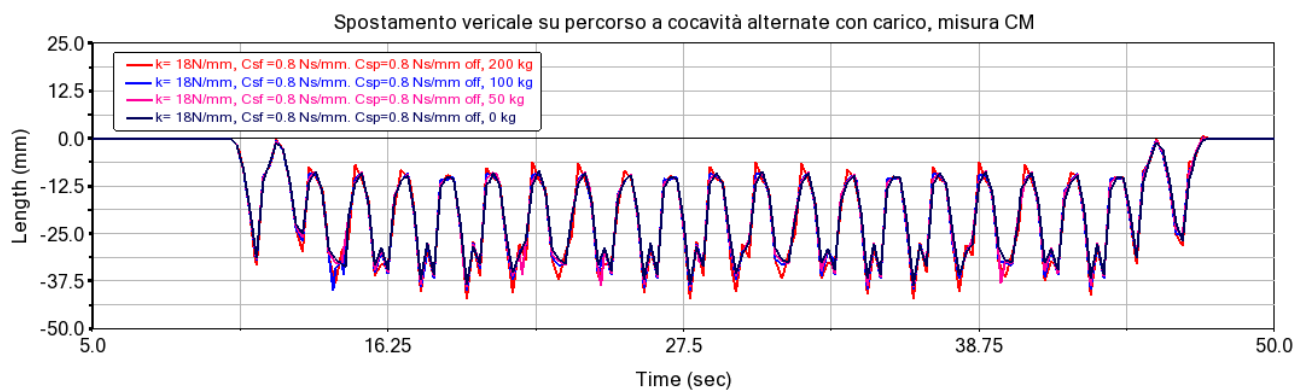


Figura 5.41 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico, misura CM, caso 2

Tabella 5.4.5 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico, misura CM, caso 2

KPI	Picco minimo (<0) (mm)	Valore medio (<0) (mm)
200 kg	42.2	16.9
100 kg	39.9	17.0
50 kg	39.2	16.6
0 kg	38.6	16.3

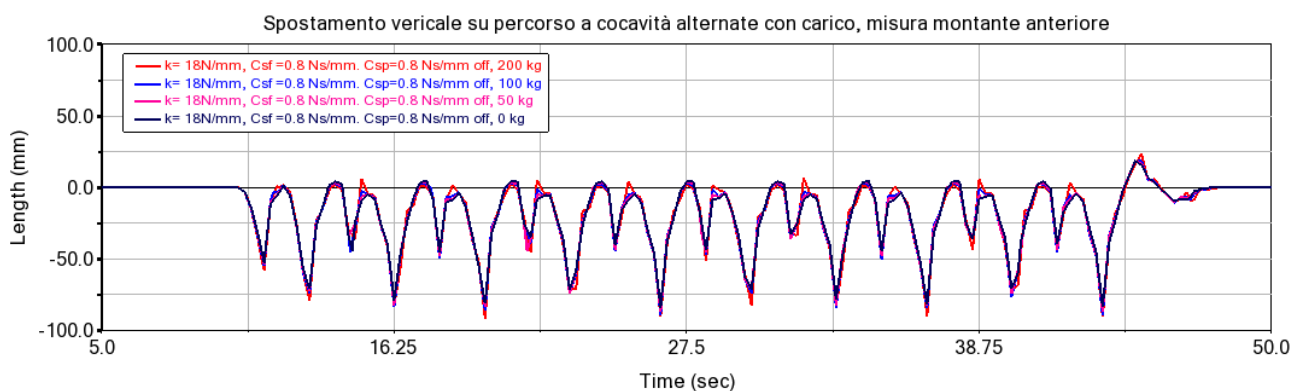


Figura 5.42 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico , misura montante anteriore, caso 2

Tabella 5.4.6 Spostamento Y percorso a concavità alternate con carico , misura montante anteriore, caso 2

KPI	Picco minimo (<0) (mm)	Sovraelongazione massima	Valore medio (<0) (mm)
200 kg	91.6	23.6	-16.6
100 kg	89.4	18.9	-16.6
50 kg	86.9	18.4	-16.2
0 kg	83.9	18.4	-16.5

Analogamente al caso 1 i valori di spostamento del caso 2 sono simili al variare del carico, con un'escursione massima di 8 mm. Confrontando i valori delle tabelle 5.4.5 e 5.4.6 con quelle 5.4.1 e 5.4.2 si osserva che i parametri sono sostanzialmente simili.

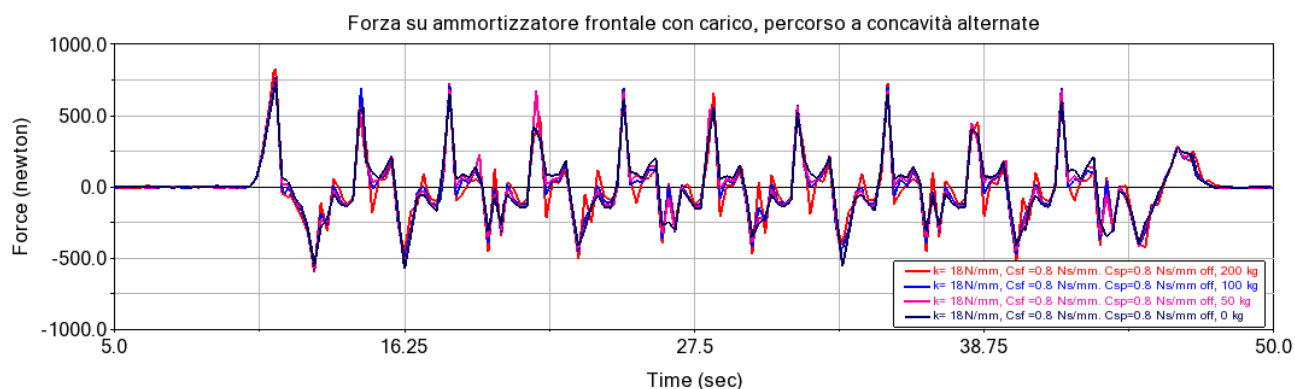


Figura 5.43 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate con carico, caso 2

Tabella 5.4.7 Forza ammortizzatore frontale, percorso a concavità alternate con carico, caso 2

KPI	Picco massimo (N)	Picco minimo (N)	Valore medio (N)	Valore alternato massimo (N)
200 kg	832	-600	-3	835
100 kg	768	-577	-8	776
50 kg	747	-572	0	747
0 kg	736	-577	-3	739

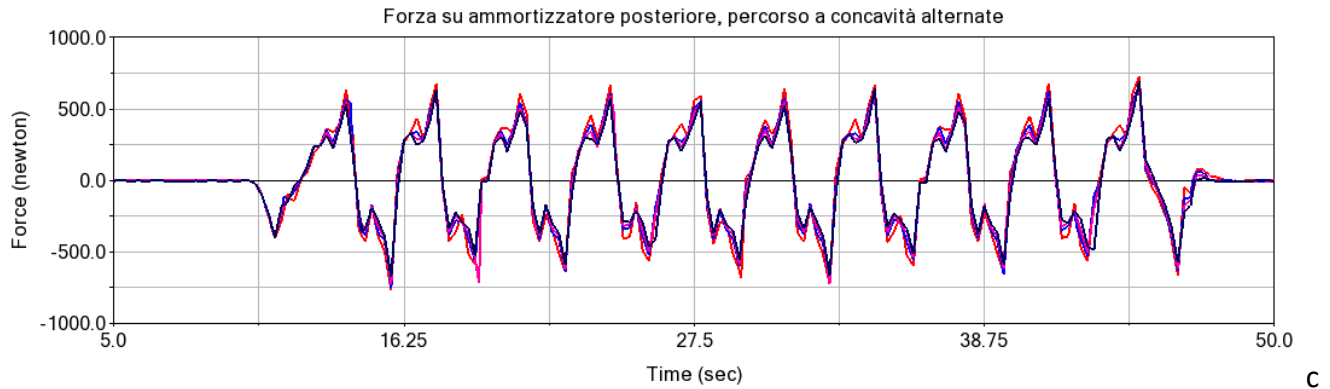


Figura 5.44 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate con carico, caso 2

Tabella 5.4.8 Forza ammortizzatore posteriore, percorso a concavità alternate con carico, caso 2

KPI	Picco massimo (N)	Picco minimo (N)	Valore medio (N)	Valore alternato massimo (N)
200 kg	729	-763	3	766
100 kg	663	-749	9	758
50 kg	669	-723	2	725
0 kg	693	-675	2	691

Le misure di forza mostrano differenze più evidenti tra il caso a 200kg e quello scarico. Nel caso 2 all'aumentare del carico aumenta il picco massimo e diminuisce quello minimo, come osservabile nelle tabelle 5.4.7 e 5.4.8. All'aumentare del carico si ha un netto peggioramento delle prestazioni, i valori alternati massimi differiscono per 75 N nel caso posteriore e per 94 N nel caso anteriore, intervallo di variazione maggiore rispetto al caso 1. I valori alternati massimi registrati nel caso 1 sono di 707 N e 751 N rispettivamente nel caso anteriore e posteriore, contro gli 835 N e 766 N del caso 2.

Si conclude che il set migliore di parametri, ovvero quello indicato per il sistema di sospensioni del rover SMILLA H2 è quello riportato nella tabella 5.4.9:

Tabella 5.4.9 Valori ottimali per il sistema di sospensioni di SMILLA H2

Rigidezza verticale anteriore	Rigidezza verticale posteriore	Smorzamento verticale anteriore	Smorzamento verticale posteriore
18 N/mm	18 N/mm	1.6 Ns/mm	0.8 Ns/mm

6. Conclusioni e sviluppi futuri

Le analisi svolte nei capitoli precedenti hanno riguardato la simulazione di un sistema di sospensione per un rover agricolo a guida autonoma. Dopo la definizione e il delineamento delle caratteristiche, con esempi di rover in commercio, si passa all'analisi dello stato dell'arte sulle sospensioni. Si analizza il rover SMILLA H2 oggetto dello studio. Tale rover presenta un limite importante al funzionamento dato dalla mancanza di un sistema di sospensioni. Il collegamento rigido tra ruote e telaio non garantisce il contatto delle ruote con il terreno durante l'esercizio, riducendo la trazione e aumentando l'instabilità. Si modella il rover sul software ADAMS View, aggiungendo un sistema di sospensione semplice costituito da una guida prismatica e da una molla e smorzatore posizionati verticalmente. Si simula il comportamento in un percorso a single bump, provando dei valori propri di sospensioni utilizzate in campo agricolo relative a supporti antivibranti in gomma, giudicati inadeguati, e ad ammortizzatori per cabine. Si confrontano col caso rigido. Si variano leggermente i parametri di rigidità e smorzamento degli ammortizzatori in un intorno, per trovarne il valore ottimale. I percorsi di prova sono a concavità fisse e a concavità alternate, Si valuta il comportamento dei casi migliori in prove a variare del carico sul percorso a concavità alternate. Si conclude, alla luce dei risultati ottenuti, che i parametri che hanno ottenuto le prestazioni migliori nei due percorsi e nelle prove al variare del carico sono i seguenti: 18 N/mm di rigidità anteriore e posteriore, 1.6 Ns/mm di smorzamento anteriore, 0.8 Ns/mm di smorzamento posteriore. La scarsità di materiale simile in letteratura, ovvero di studi sulla simulazione di ammortizzatori per rover agricoli gommati, ha reso necessario supporre dei percorsi di prova che potessero mostrare dei comportamenti significativi all'analisi, dei parametri di sospensione da simulare, dei KPI da utilizzare nella valutazione delle curve, quali misure effettuare. Nonostante questo i risultati ottenuti sono soddisfacenti considerando le approssimazioni effettuate, come dimostrato dalla convergenza verso un unico set di valori ottimali riportati in Tabella 5.4.9. Si potrebbe completare il lavoro seguente anche misurando sperimentalmente i profili stradali dei terreni per vigne nelle condizioni risultanti dalle diverse lavorazioni, l'importazione del profilo e la simulazione del moto su di essi tramite ADAMS fornirebbero certamente prestazioni più veritiere dei sistemi di sospensione. Il lavoro può essere sviluppato progettando e simulando/provando un sistema di sospensione che possa essere fisicamente montato sul rover, tenendo conto del sistema di sterzo. In tal modo lo studio sul sistema di sospensione adeguato per il rover verrebbe completato e si potrebbe procedere all'implementazione della modifica sul veicolo, che è l'obiettivo finale della ricerca.

Bibliografia

- [1] R. J. Herrera, *Ancestral DNA, human origins, and migrations*. London: Academic press, 2018.
- [2] «<https://www.mouser.com/blog/agricultural-robots-current-state-smart-farming>».
- [3] «https://en.wikipedia.org/wiki/Precision_agriculture».
- [4] «<https://www.verifiedmarketresearch.com/product/global-agriculture-robots-market-size-and-forecast/>».
- [5] «https://en.wikipedia.org/wiki/Agricultural_robot».
- [6] L. Liu *et al.*, «A review of the current status and common key technologies for agricultural field robots», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 227, p. 109630, dic. 2024, doi: 10.1016/j.compag.2024.109630.
- [7] «<https://burro.ai/>».
- [8] «<https://agointelli.com/robotti/>».
- [9] «<https://www.naio-technologies.com/oz/>».
- [10] «<https://vitibot.fr/robots-viticoles-bakus-s/?lang=it>».
- [11] «<https://autoagri.no/ic-20/>».
- [12] S. Ebrahimi-Nejad, M. Kheybari, e S. V. N. Borujerd, «Multi-objective optimization of a sports car suspension system using simplified quarter-car models», *Mechanics & Industry*, vol. 21, fasc. 4, p. 412, 2020, doi: 10.1051/meca/2020039.
- [13] «<https://www.weber-hydraulik.com/en/suspension-systems-in-agricultural-machinery-for-comfort-and-sustainability-in-the-workplace/>».
- [14] H. R. Fernandes, E. C. M. Polania, A. P. Garcia, O. Barrero, e D. Albiero, «Agricultural unmanned ground vehicles: A review from the stability point of view», *REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA*, vol. 51, fasc. 5, 2020, doi: 10.5935/1806-6690.20200092.
- [15] «<https://lectura.press/en/article/bonirob-research-into-field-robotics/5875>».
- [16] «<https://www.naio-technologies.com/ted/>».
- [17] «<https://research.qut.edu.au/qcr/Projects/agbot-ii-robotic-site-specific-crop-and-weed-management-tool/>».
- [18] «<http://www.interempresas.net/Grandes-cultivos/Articulos/166466-VineRobot-II-nuevo-aliado-para-el-sector-viticola-internacional.html>».
- [19] «QUAGLIA, G. et al. Design of a UGV Powered by Solar Energy for Precision Agriculture. Robotics, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 1, 2020.».
- [20] Faculty of Mechanical Engineering, University of Niš, Niš, Serbia *et al.*, «AgAR: A MULTIPURPOSE ROBOTIC PLATFORM FOR THE DIGITAL TRANSFORMATION OF AGRICULTURE», in *Proceedings*, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering, 2025, p. XXIII–XXXI. doi: 10.46793/IRMES25.plA4B.
- [21] «<https://www.randle.co.uk/case-studies/small-robot-company-tom-v4/>».
- [22] S. Martelli, «Electrification of Autonomous Working Vehicles - Design and Autonomous Driving Strategies development for Agricultural Rovers», Doctoral Thesis, Politecnico di Torino, 2025.
- [23] M. Scanavino, «Progettazione e simulazione di rover elettrici a guida autonoma per applicazioni agricole», Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica, Politecnico di Torino, 2023.
- [24] «<https://ecothea.it/attivita-e-progetti/smilla-h2/>».

-
- [25] M. Blundell e D. Harty, *Multibody systems approach to vehicle dynamics*, Transferred to digital print. in Automotive engineering. Amsterdam Heidelberg: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2010.
- [26] K. Choi, J. Oh, D. Ahn, Y.-J. Park, S.-U. Park, e H.-S. Kim, «Experimental Study of the Dynamic Characteristics of Rubber Mounts for Agricultural Tractor Cabin», *Journal of Biosystems Engineering*, vol. 43, fasc. 4, pp. 255–262, dic. 2018, doi: 10.5307/JBE.2018.43.4.255.
- [27] D.-V. Ahn, K. Kim, J. Oh, J. Seo, J. W. Lee, e Y.-J. Park, «Optimal Control of Semi-Active Suspension for Agricultural Tractors Using Linear Quadratic Gaussian Control», *Sensors*, vol. 23, fasc. 14, p. 6474, lug. 2023, doi: 10.3390/s23146474.
- [28] J. Brunetti, W. D'Ambrogio, A. Fregolent, e M. Papa, «Analysis of Agricultural Machinery to Reduce the Vibration to the Operator Seat», in *Proceedings of XXIV AIMETA Conference 2019*, A. Carcaterra, A. Paolone, e G. Graziani, A c. di, Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 322–335.
- [29] «Mehdizadeh, Saman. (2015). Optimization of passive tractor cabin suspension system using ES, PSO and BA. International Journal of Agricultural Technology. 11. 595-607.».
- [30] L. Zhao, C. Zhou, Y. Yu, e F. Yang, «A method to evaluate stiffness and damping parameters of cabin suspension system for heavy truck», *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, fasc. 7, p. 1687814016654429, lug. 2016, doi: 10.1177/1687814016654429.
- [31] D. Montagni, «Simulation of the dynamic behaviour of a self driving rover for off-road applications», Master of Science in Automotive Engineering, Politecnico di Torino, 2024.