



# Università degli studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali (DTG)

Corso di laurea in Ingegneria Meccatronica

## *Le sospensioni Telelever*

*Laureando: Bortolon Marco*  
*Relatore: prof. Boscariol Paolo*

*Matricola: 2006512*

Un ringraziamento speciale ai miei familiari per tutti i consigli ed il sostegno,  
ai miei compagni di corso per l'immenso aiuto e supporto in questi tre anni,  
a tutti i miei amici che mi sono stati accanto.

*Grazie*

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>I vari tipi di sospensioni</b>	<b>4</b>
2.1	Sospensioni a Parallelogramma . . . . .	4
2.2	Sospensione Springer . . . . .	5
2.3	Sospensioni Trailing, Leading Link e Earles . . . . .	6
2.4	Sospensioni Duolever . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Sospensioni Telescopiche</b>	<b>9</b>
3.1	Struttura . . . . .	9
3.2	Analisi cinematica . . . . .	10
3.3	Analisi delle forze . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Sospensioni Telelever</b>	<b>19</b>
4.1	Struttura . . . . .	19
4.2	Analisi cinematica . . . . .	20
4.3	Analisi delle forze . . . . .	24
<b>5</b>	<b>Confronto tra le due sospensioni</b>	<b>26</b>
5.1	Struttura . . . . .	26
5.2	Parametri geometrici . . . . .	27
5.3	Forze agenti . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>Sitografia</b>	<b>32</b>

# 1 Introduzione

Le sospensioni motociclistiche, che al giorno d'oggi conosciamo, sono frutto di un impegno ingegneristico che dura da più di un secolo. Hanno infatti subito un'evoluzione piuttosto articolata, dando alla luce dei meccanismi dalle più svariate forme e innovativi funzionamenti. Sono nate dal bisogno di stabilizzare la motocicletta durante la sua marcia, a fronte di urti e asperità del terreno, svolgendo quindi la funzione di sospensione del veicolo e chiaramente anche di sterzo.

Nei primi anni del '900 vi erano molti modelli in circolazione, nessuno prevaleva sull'altro, fino a quando venne introdotta la forcella a parallelogramma.

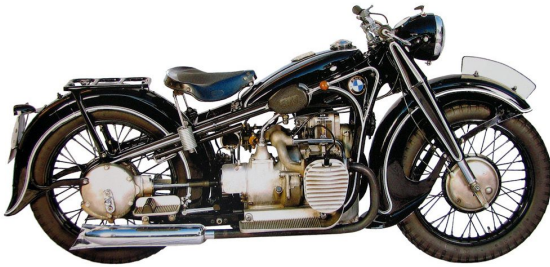
Con gli anni si notò che, oltre alla funzione di sospensione, c'era il bisogno di smorzare l'effetto "molleggiante" causato dall'impiego delle molle (principalmente elicoidali, ma anche a balestra e di torsione) e si sviluppò così l'ammortizzatore. Pertanto ora le funzionalità principali della forcella sono tre: sospensione, ammortizzazione e sterzo del motociclo.

Fu solo nel '35 che BMW, per merito anche della Nimbus, fece uscire quello che poi divenne il modello di sospensione anteriore più diffuso dal secondo dopoguerra fino all'età contemporanea, sebbene presenti oggi qualche modernizzazione: la sospensione telescopica. Tale dispositivo fu il primo che integrò le tre funzioni precedentemente elencate in modo compatto, robusto e facilmente smontabile e montabile. Furono questi aspetti la chiave del suo successo.

Chiaramente lo sviluppo di nuovi sistemi non si fermò mai, neanche oggi. Infatti l'ingegno moderno offre valide alternative e tra queste, nel presente documento, si vuole discutere riguardo la sospensione Telelever proposta sempre da BMW nel '93.

Telescopiche o Telelever? Analizzeremo le due sospensioni da un punto di vista strutturale, cinematico e delle forze coinvolte. Vedremo quali sono quindi i vantaggi e svantaggi, prendendo come riferimento alcuni parametri fondamentali nella progettazione delle motociclette come l'avancorsa, l'interasse (o passo) e l'angolo di sterzo. Osserveremo i dati e le informazioni risultanti, e sulla loro base trarremo le conclusioni.

Per questa trattazione può essere utile, se non addirittura interessante, esaminare brevemente le varie sospensioni. Ci concentreremo solo in seguito all'analisi ed al confronto tra la tanto acclamata sospensione Telescopica ed il brevetto BMW Telelever.



(a) Sospensione Telescopica di una BMW R12 del 35



(b) Sospensione Telelever di una BMW R1100RS del 93

Figura 1: Nelle immagini si possono notare i primi modelli di moto che montavano forcelle Telescopiche (1a) e forcelle Telelever (1b)

## 2 I vari tipi di sospensioni

### 2.1 Sospensioni a Parallelogramma



Figura 2: Sospensione a Parallelogramma di una Mondial 200 del 1951

In questo meccanismo abbiamo due coppie di bracci (I e III) che collegano le piastre di sterzo superiori e inferiori con la forcella vera e propria (II), andando quindi a formare difatto il parallelogramma che da il nome a tale sospensione. A sua volta la forcella è collegata alla piastra di sterzo superiore attraverso una sospensione a molla (IV, V e 7), la quale la si può notare nell'immagine adiacente (Fig:2), posta immediatamente dietro al fanale anteriore. Versioni più moderne presentano anche un gruppo ammortizzatore oltre che la sola sospensione a molla.

A differenza di quella telescopica, la sospensione a parallelogramma è soggetta ad attriti di natura volvente piuttosto che radente, quindi sottoposta ad un'usura inferiore e presenta una miglior scorrevolezza. Inoltre è possibile scegliere tra un'avancorsa costante, uno crescente o uno decrescente a seconda della corsa della sospensione. Presenta anche una notevole rigidità, essendo quindi resistente a flessione e torsione. La si può

inoltre configurare in modo tale che l'interasse della moto rimanga costante attraverso un'escursione verticale della ruota.

Questa sospensione è riconducibile ad un meccanismo articolato piano composto da 5 corpi (più il telaio), 6 accoppiamento rotoidali (1-6) e 1 primastico (7). Pertanto, attraverso l'equazione di Grubler (1), possiamo notare che abbiamo un sistema ad un grado di mobilità, quindi la sua configurazione è rappresentabile con un solo parametro. Inoltre si è rappresentato il punto di aggancio della ruota (Wheel) collegato alla sospensione attraverso il membro (II) il quale presenta un prolungamento (in rosso).

$$n = 3 \cdot (m - 1) - 2 \cdot C_1 \quad (1)$$

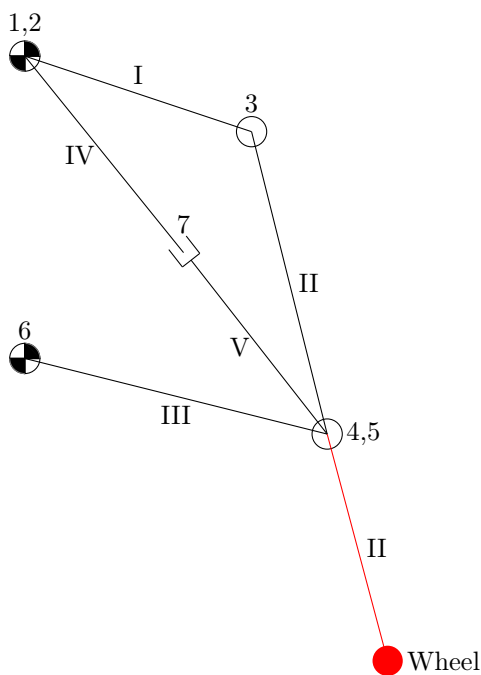


Figura 3: Schema cinematico della sospensione

## 2.2 Sospensione Springer



Figura 4: Sospensione Springer di una Harley Davidson Heritage 2003

il telaio), 1 accoppiamento prismatico e 3 rotoidali, uno dei quali, in particolar modo (4), non vi è fisicamente sulla sospensione, ma vuole rappresentare la mobilità laterale che deve avere la molla per poter permettere ai membri (I) e (II) di ruotare attraverso (2). Anche qui, attraverso l'equazione di Grubler (1) notiamo che abbiamo un sistema ad un grado di mobilità e che quindi la sua configurazione è rappresentabile con un solo parametro. Il centro della ruota è sempre rappresentato in rosso (Wheel) collegato al resto del meccanismo attraverso un prolungamento del membro (I) (rosso).

Sebbene sia a forma di parallelogramma, questa sospensione presenta alcune differenze dalla precedente; è infatti composta da una sola coppia di bracci (I) che collegano la forcella (telaio) ad una coppia di aste (II) le quali, collegate a delle molle (III e 3), svolgono la funzione di puntone.

Introdotta sul mercato motociclistico negli anni '30 è una sospensione che viene ancora oggi molto utilizzata soprattutto per il suo aspetto retrò su moto Cruiser come la Harley Davidson che possiamo vedere nell'immagine qui affianco (Fig:4).

I vantaggi di una soluzione di questo tipo sono sicuramente la semplicità costruttiva ed il ridotto numero di componenti, oltre a presentare una coppia di bracci in meno, ha anche in genere la metà dei cuscinetti (o elementi simili per la rotazione dei bracci). Pertanto è inevitabile che risulti più economica e affidabile della precedente, tuttavia presenta il notevole malus di avere una corsa ridotta della ruota, a causa delle piccole dimensioni che il braccio della sospensione può avere.

Lo schema cinematico è composto da 3 membri (più

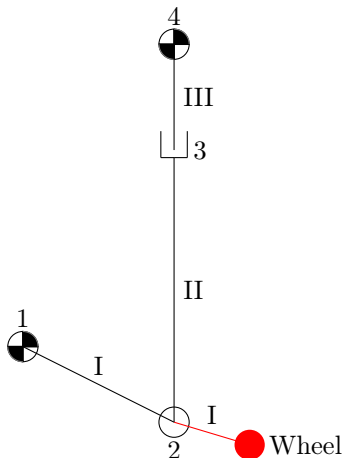


Figura 5: Schema cinematico della sospensione

## 2.3 Sospensioni Trailing, Leading Link e Earles



Figura 6: Sospensione Trailing Link di una Indian 1200 del 1930

(Wheel) è collegata alla sospensione con il membro (I) tramite un suo prolungamento (segnato in rosso).

Vediamo ora delle tipologie di sospensioni che oggi sono quasi, se non del tutto, scomparse.

Iniziamo dalla Trailing Link, la più vecchia delle tre. Ideata nei primi del '900 si cominciò ad usare questo meccanismo negli anni '30. Una delle case che ha adottato maggiormente questa soluzione è la Indian, della quale si può vedere un modello in Fig:6.

La particolarità di questa sospensione è certamente la molla a balestra, un'alternativa curiosa per le motociclette, la quale è collegata attraverso due coppie di bracci (I e II) alla ruota ed alla forcella.

La scelta di questa molla ha conferito alla sospensione una maggior resistenza alla flessione trasversale (sebbene presenti un minor numero di componenti e quindi peso) e uno smorzamento maggiore dovuto all'attrito tra le foglie della molla a balestra. Inoltre sono molle più semplici e meno costose di quelle elicoidali, tuttavia a parità di forze di sollecitazione e deformazione presentano un volume doppio.

Nello schema cinematico abbiamo 3 corpi, 3 accoppiamenti rotoidali e 1 prismatico (o in alternativa 2 corpi, 2 accoppiamenti rotoidali ed 1 camma piana) e il sistema ha sempre un solo grado di mobilità. La ruota

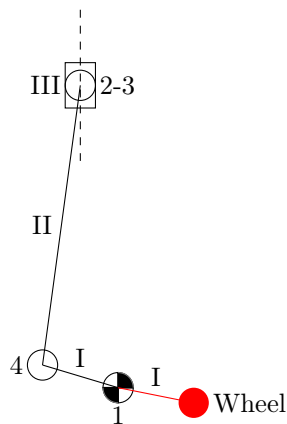


Figura 7: Schema cinematico della sospensione



Figura 8: Sospensione Leading Link della Curnutts su una Super Rat Hodaka

Tornando invece alle sospensioni a molla elicoidale, abbiamo la Leading Link, la quale è composta da un'asta a "U" (III) che collega la forcella alla ruota. La molla invece (I, II e 2) è posta tra la forcella e l'asta a "U". Se ne può vedere un esempio in Fig:8 montate su una motocross della Hodaka; questa sospensione è stata infatti usata molto per queste tipologie di moto, da case come Suzuki, Honda o la italiana Villa, attorno agli anni '60. Tuttavia ha trovato impiego anche su moto stradali come la BMW.

Questa sospensione presenta una notevole robustezza, soprattutto a sforzi trasversali ed è per questo motivo che veniva utilizzata spesso per la costruzione dei sidecar. Tale soluzione è semplice e a basso costo, tuttavia presenta una ridotta corsa della ruota a causa dell'ingombro dell'asta a "U", la quale è necessaria per aumentare la resistenza flessionale trasversale.

Un'evoluzione della Leading Link è la forcella Earles, la quale rivisitava il posizionamento dei componenti andando a formare un "triangolo", conferendo così una maggior rigidità in frenata. Infatti posizionando il perno della ruota nello stesso punto in cui si collega poi la sospensione (3), si forniva alle forze trasmesse dalle asperità del terreno un braccio inferiore riducendo così la corsa che compiva la sospensione e quindi la ruota.

Dagli schemi cinematici possiamo notare che i due meccanismi hanno entrambi un solo grado di mobilità. Inoltre si osserva che mentre nella Leading Link la ruota (Wheel) è collegata alla sospensione tramite un prolungamento del membro (III), nella Earles coincide con l'accoppiamento rotoidale (3).

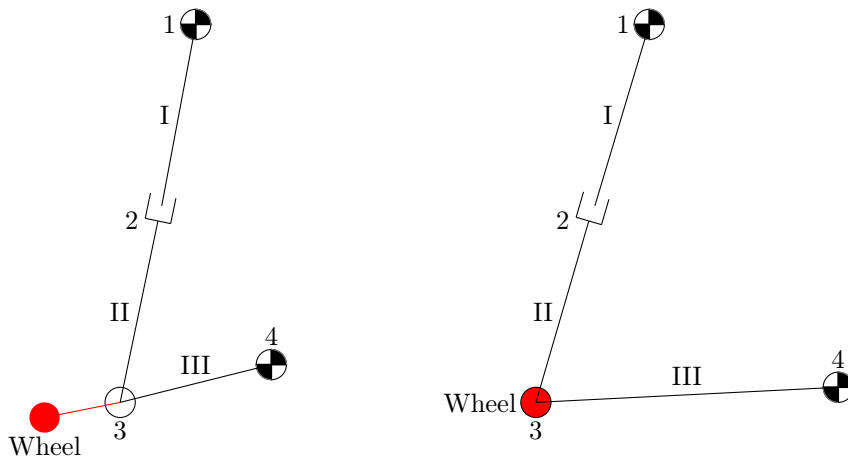


Figura 10: Schema cinematico della sospensione Leading Link (Sx) e la variante Earles (Dx)



Figura 9: Sospensione Earles di una BMW R50 del 1955



## 2.4 Sospensioni Duolever



Figura 11: Sospensione Duolever di una BMW K1200

Queste sospensioni sono di stampo sicuramente più recente e moderno rispetto alle precedenti che abbiamo trattato.

La particolarità di questa sospensione è che separa totalmente le funzioni di sterzo e ammortizzazione/sospensione. Il meccanismo di sospensione è riconducibile ad una sospensione a parallelogramma. Presenta due coppie di bracci (I e III) che collegano la forcella (II) al telaio della moto. Tali collegamenti (2 e 3) sono snodati permettendo quindi alla forcella di ruotare. La sospensione e l'ammortizzatore (un componente unico) (IV, V e 7) è posto diagonalmente tra il telaio della moto ed il braccetto inferiore. Per poter sterzare abbiamo altri due braccetti (VI e VII) che vanno dalla piastra di sterzo/manubrio (10) alla forcella.

I vantaggi di questa soluzione sono sicuramente una resistenza torsionale notevole conferendo quindi un'alta precisione di sterzo alla moto. Inoltre l'asse della ruota si muove quasi verticalmente facendo così rimanere pressochè costante sia l'interasse della moto che il suo avanzorsa. Grazie a questa caratteristica la moto presenta anche un ridotto affondamento in frenata conferendo un elevato confort di guida.

Dallo schema cinematico equivalente si può notare la sospensione vera e propria (in nero), il meccanismo di sterzo (in verde) e il prolungamento del corpo (II) che connette sospensione e asse della ruota (W) (in rosso). Difatto il meccanismo di sterzo è una diade RRR pertanto non influisce sul calcolo dei gradi di mobilità del sistema e andrà quindi trascurata. Il sistema presenta 6 accoppiamenti rotoidali, 1 prismatico (sospensione a molla) e 5 corpi. Attraverso l'equazione di Grubler (1) troviamo che il cinematismo ha un solo grado di mobilità.

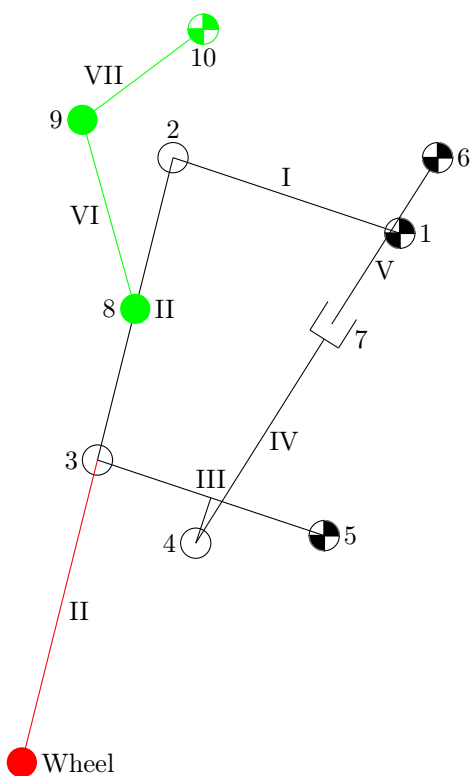


Figura 12: Schema cinematico sospensione Duolever

## 3 Sospensioni Telescopiche

### 3.1 Struttura

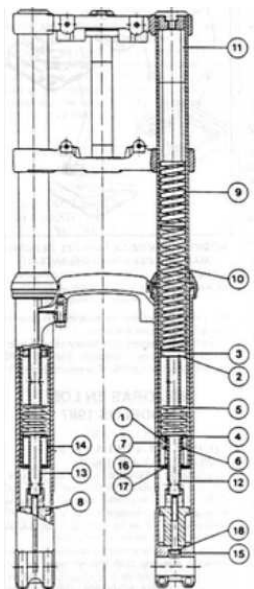


Figura 13: Disegno sospensioni Telescopiche

Questa sospensione è formata da due coppie di tubi coassiali (steli e foderi) che scorrono l'uno dentro l'altro, da cui il termine "telescopica".

Al loro interno vi è una molla che svolge la funzione di sospensione. In alcuni modelli la densità di eliche della molla non è costante al fine di rendere la compressione della sospensione via via più dura.

L'ammortizzatore invece è di tipo oleodinamico. I gambali (fodero + stelo) vengono riempiti quasi del tutto di olio, il quale viene compresso attraverso un pistone che presenta diversi fori, costringendolo così a passarvi attraverso dissipando l'energia dell'urto per attrito e calore. A seconda del tipo e quantità di olio e del numero e dimensioni dei fori del pistone la sospensione risulterà più o meno dura.

Chiaramente non esiste una sospensione universale e caratteristiche come la sua durezza vengono decise in base all'impiego per il quale saranno destinate. I gambali sono connessi tra loro attraverso due piastre, collegate a loro volta al canotto di sterzo.

Col passare degli anni si esigevano prestazioni sempre maggiori da queste sospensioni, motivo per il quale si sono evolute parecchio dal '35 ad oggi. Tra le modifiche più importanti che sono state fatte troviamo:

- Cromatura degli steli: migliorano la resistenza all'usura della sospensione
- Attacchi per pinza sui foderi: con gli anni si è passati dall'impiego dei freni a tamburo a quelli a disco
- Valvola di sfiato aria: lavorando l'olio produce gas che se non espulso mette in pressione i gambali irrigidendo così la sospensione.
- Copristeli: evitano che corpi esterni intacchino la superficie dello stelo
- Vite spurgo olio: per una facile e veloce sostituzione dell'olio.

Sono state sviluppate anche versioni alternative come la sospensione telescopica a molle esterne o le famose USD (Up Side Down, forcelle rovesciate). Le seconde, a differenza delle prime, hanno avuto un successo enorme e sono ad oggi le sospensioni anteriori per motociclette più diffuse al mondo, pertanto per il confronto con le telelever faremo riferimento alle USD.



(a) Sospensione Telescopica di una QJ Motor SRK 125



(b) Sospensione USD di una BMW S1000RR

Figura 14: Confronto tra le sospensioni telescopiche classiche (14a) e le USD (14b)

### 3.2 Analisi cinematica

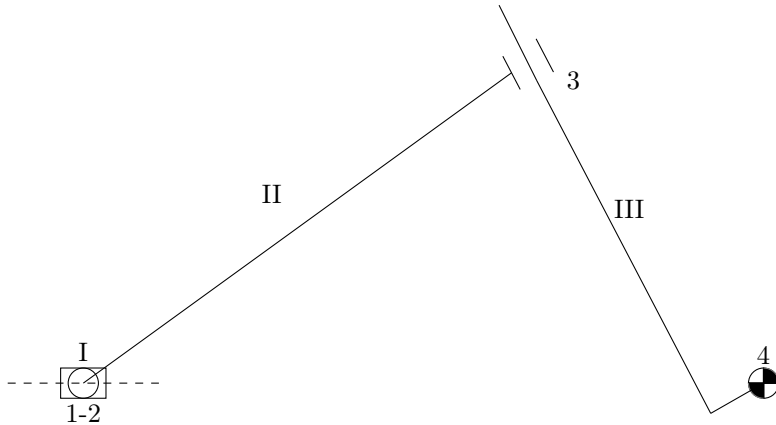


Figura 15: Schema cinematico sospensioni Telescopiche

A differenza degli altri schemi cinematici, si è voluto rappresentare la "moto per intero" attraverso il membro (II) e l'accoppiamento camma piana (1-2 e I) i quali rappresentano il legame fisico che c'è tra la forcella ed il resto della moto.

Difatto la sospensione è composta dall'accoppiamento rotoidale (4), dall'accoppiamento prismatico (3) e dal membro (III) il quale è collegato in maniera eccentrica all'accoppiamento (4). Pertanto gli accoppiamenti rotoidali (1) e (4) rappresentano gli assi di rotazione delle ruote.

Ricordiamo l'equazione di Grubler:

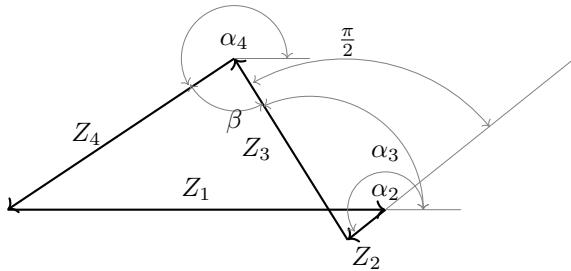
$$n = 3 \cdot (m - 1) - 2 \cdot C_1$$

la quale dato che abbiamo un'accoppiamento camma piana diventa:

$$n = 3 \cdot (m - 1) - 2 \cdot C_1 - C_2 \quad (2)$$

Usando pertanto l'equazione (2) con:  $m = 3$ ,  $C_1 = 2$  e  $C_2 = 1$  ricaviamo che il meccanismo ha un solo grado di mobilità, ovvero  $n = 1$  e pertanto la sua configurazione si determina con un solo parametro, una sola coordinata libera.

Costruiamo ora il poligono di vettori del cinematismo:



(a) Poligono di vettori della sospensione Telescopica

$Z_1$	variab. inc.	$\alpha_1$	cost. noto
$Z_2$	cost. noto	$\alpha_2$	variab. noto
$Z_3$	variab. inc.	$\alpha_3$	coord. lib.
$Z_4$	cost. noto	$\alpha_4$	variab. noto

(b) Tabella dei vettori e angoli

Figura 16: Poligono di vettori (Sx) e relativa tabella dati (Dx)

$Z_4$ , e di conseguenza il membro (II), rappresenta la linea "immaginaria" che c'è tra le piastre di sterzo e l'asse della ruota posteriore. Grazie all'accoppiamento prismatico della sospensione l'angolo tra  $Z_3$  e  $Z_4$  è fisso e lo abbiamo chiamato  $\beta$ . Invece  $Z_2$  rappresenta quello che di seguito chiameremo "offset delle sospensioni" che indicheremo con  $d$ . Tale parametro è molto utile nella progettazione dei motocicli dato che incide fortemente sull'avancorsa.

Risulta interessante studiare il poligono di vettori di Fig:16a, per analizzare come variano tra loro: angolo di sterzo, avancorsa, passo e compressione della sospensione. Dobbiamo pertanto ricavare le grandezze incognite  $Z_1$  e  $Z_3$ , e per farlo scriviamo le equazioni di chiusura del meccanismo (analisi di posizione).

$$\begin{aligned} Z_1 + Z_2 \cos \alpha_2 + Z_3 \cos \alpha_3 + Z_4 \cos \alpha_4 &= 0 \\ Z_2 \sin \alpha_2 + Z_3 \sin \alpha_3 + Z_4 \sin \alpha_4 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

Inoltre è utile notare che:

$$\alpha_4 = \alpha_3 + \pi - \beta \quad (4)$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 + \frac{\pi}{2} \quad (5)$$

Ricaviamo pertanto:

$$Z_3 = -\frac{Z_2 \sin \alpha_2 + Z_4 \sin \alpha_4}{\sin \alpha_3} \quad (6)$$

$$Z_1 = -Z_2 \cos \alpha_2 - Z_3 \cos \alpha_3 - Z_4 \cos \alpha_4 = -Z_2 \cos \alpha_2 + \frac{Z_2 \sin \alpha_2 + Z_4 \sin \alpha_4}{\sin \alpha_3} \cos \alpha_3 - Z_4 \cos \alpha_4 \quad (7)$$

$Z_1$  rappresenta il passo, o interasse della moto,  $Z_3$  invece la lunghezza della sospensione e quindi la sua compressione. L'angolo di sterzo si ricava dalla semplice relazione:

$$\gamma = \alpha_3 - \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

Per poter ricavare la formula dell'avancorsa dobbiamo analizzare la seguente figura:

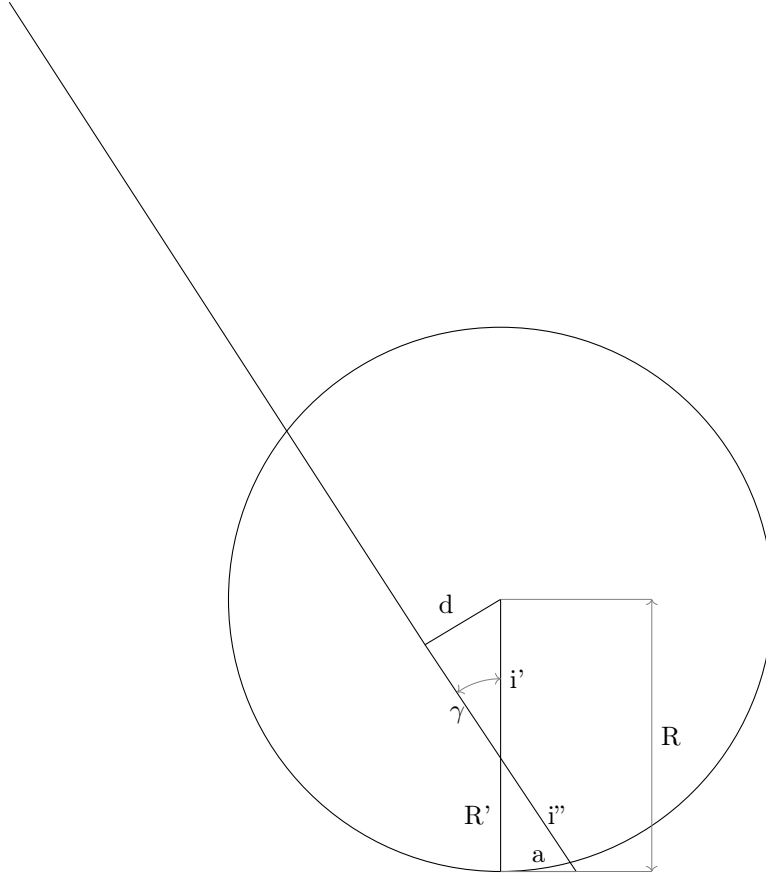


Figura 17: Grafico di studio avancorsa

In particolar modo analizziamo i due triangoli rettangoli, il primo con ipotenusa  $i'$  ed il secondo con ipotenusa  $i''$ . Notiamo che questi due triangoli sono simili, pertanto vale che;

$$i' \sin \gamma = d \Rightarrow i' = \frac{d}{\sin \gamma} \quad (9)$$

$$i'' \sin \gamma = a \Rightarrow i'' = \frac{a}{\sin \gamma} \quad (10)$$

$$i'' \cos \gamma = R' \Rightarrow (10) \Rightarrow R' = \frac{a}{\tan \gamma} \quad (11)$$

Da cui possiamo ricavare  $R$ :

$$R = R' + i' = \frac{d}{\sin \gamma} + \frac{a}{\tan \gamma} = \frac{d + a \cos \gamma}{\sin \gamma} \quad (12)$$

ed infine l'avancorsa  $a$ :

$$a = \left( R - \frac{d}{\sin \gamma} \right) \tan \gamma \quad (13)$$

dove:

- $a$ =avancorsa
- $R$ =raggio ruota anteriore (+battistrada)
- $\gamma$ =angolo di sterzo
- $d$ =offset sospensioni
- $\beta$ =angolo costante dell'accoppiamento prismatico
- $i'$ =ipotenusa triangolo superiore
- $i''$ =ipotenusa triangolo inferiore
- $R'$ =cateto verticale triangolo inferiore

Prendiamo in esame un BMW F800R del 2017, il quale monta delle classiche sospensioni USD e presenta i seguenti dati:

$d$	42,5	[mm]	fornito
$\gamma$	$\frac{5}{36}\pi$	[rad]	fornito
$R$	300	[mm]	fornito
$p$	1526	[mm]	fornito
$a$	91	[mm]	fornito
$\beta$	1,502	[rad]	ricavato
$Z_4$	1330	[mm]	ricavato

Tabella 1: Tabella dati BMW F800R 2017

I valori di  $\beta$  e  $Z_4$  sono stati ricavati osservando (a riposo) lo schema cinematico che in queste condizioni ha un  $Z_3 = 760mm$ , il quale rappresenta la lunghezza della sospensione sempre a riposo.

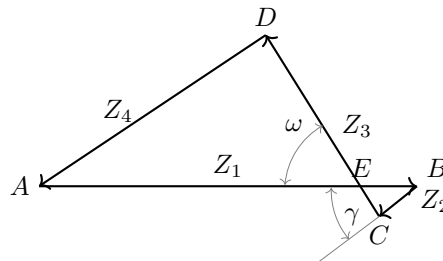


Figura 18: Analisi col metodo dei triangoli del cinematicismo

Notiamo prima di tutto che l'angolo tra  $Z_2$  e  $Z_1$  è uguale a  $\gamma$  che a riposo ricordiamo valere:  $\gamma = 0,454rad$ . Per trovare  $Z_4$  dobbiamo trovare le misure del triangolo ADE. Procediamo quindi calcolando:

$$EB = \frac{d}{\cos \gamma} = 50,07mm$$

$$EC = EB \cdot \sin \gamma = 21,96mm$$

da cui ricaviamo:

$$AE = p - EB = 1475,93mm$$

$$DE = Z_3 - EC = 738,04mm$$

Inoltre vale che:

$$\omega = \pi - \gamma - \frac{\pi}{2} = 1,117rad$$

e di conseguenza, usando il teorema del coseno e del seno troviamo che:

$$Z_4 = \sqrt{DE^2 + AE^2 - 2 \cdot AE \cdot DE \cos \omega} = 1329,67mm \quad (14)$$

$$\beta = \arcsin\left(\frac{AE}{Z_4} \sin \omega\right) = 1,502rad \quad (15)$$

Da notare che  $Z_4$  e  $\beta$  sono stati calcolati con parametri che variano a seconda della configurazione, ma, essendo costanti, questi possono essere calcolati con qualsiasi configurazione del meccanismo. In particolar modo, nel nostro caso, abbiamo sfruttato la configurazione a riposo dato che conoscevamo i relativi dati caratteristici come la lunghezza della sospensione.

A riposo, e quindi per un angolo di sterzo di  $25^\circ = \frac{5}{36}\pi rad$ , la moto dovrebbe presentare un avancorsa di 91mm. Con i dati che ci sono stati forniti, ed applicando la formula ricavata, troviamo un avancorsa di circa 93mm, il quale si avvicina con buona approssimazione a quello fornito dall'azienda produttrice ( $e\% \approx 2$ ). Anche il passo è stato calcolato teoricamente, ottenendo  $p = 1510,91mm$ , che si avvicina anch'esso con buona approssimazione con quello reale (a riposo) ( $e\% \approx 1$ ). Calcolando anche la lunghezza della sospensione  $Z_3$  (L) notiamo che abbiamo un valore di 729,97mm contro i 760mm misurati dal vivo ( $e\% \approx 4$ ). Le differenze dei valori ottenuti da quelli reali possono essere state causate dalle varie approssimazioni effettuate, incertezze sui valori dei dati ottenuti e dal fatto che si sono ricavati i dati da fonti diverse. Tali fattori influenzano in maniera diversa ognuno dei precedenti parametri, dando origine quindi ad errori percentuale diversi. Tuttavia è interessante osservare, nell'ipotesi che le sospensioni vengano compresse di tutta la loro escursione (125mm secondo l'azienda), di quanto e come variano passo e avancorsa nel caso in cui si freni. Nella seguente tabella si mettono a confronto i dati ricavati nei due casi:

dato	riposo	frenata	
$\gamma$	$\frac{5}{36}\pi$	0,359	rad
a	93	67,18	mm
L	729,97	605,29	mm
p	1510,91	1462,6	mm

Tabella 2: Confronto dati a riposo ed in full compressione

Risulta utile osservare anche l'andamento che hanno l'avancorsa, il passo e la compressione della sospensione in funzione dell'angolo di sterzo, attraverso il grafico di Fig:19.

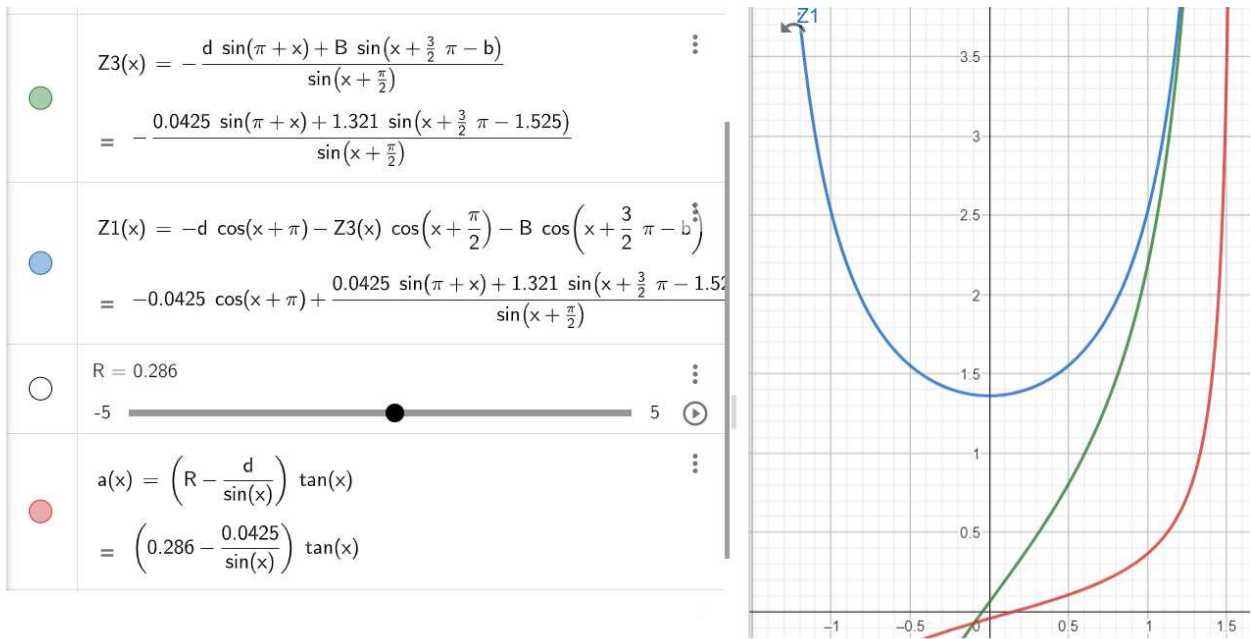


Figura 19: Andamento di: avancorsa (a-rosso), passo (Z1-blu chiaro) e compressione/lunghezza sospensioni (Z3-verde) al variare di  $\gamma$  (x)

Notiamo come questi tre parametri calino al calare di  $\gamma$ , e tale variazione influisce sulla stabilità e sul controllo della moto.

Infatti se l'avancorsa diminuisce, si ha un controllo inferiore del veicolo in rettilineo, il quale risulterà meno soggetto all'effetto raddrizzante. Tuttavia, dopo la frenata, o l'ostacolo, le sospensioni si estenderanno, facendo crescere nuovamente l'avancorsa e riallineando così la ruota anteriore.

Quando si progetta una motocicletta bisogna scegliere un valore del passo appropriato, dato che influisce sulla tendenza della moto all'impennata o, nel nostro caso di studio, al ribaltamento (tratteremo tale fenomeno nel paragrafo (5.3)). Tuttavia, a priori di tale valore, durante la frenata, o impatto con un ostacolo/asperità del terreno, il passo diminuisce, facilitando quindi il ribaltamento del motociclo. Durante la fase di progettazione sarà quindi opportuno tenere conto anche di questo fenomeno.

Abbiamo visto che angolo di sterzo e avancorsa sono correlati fra loro, pertanto le conseguenze di un avancorsa grande o piccolo sono comuni a quelle di un angolo di sterzo grande o piccolo. Infatti anche la scelta dell'angolo di sterzo a riposo, e del suo range di variazione, influisce sulle precedenti caratteristiche della moto, ma lo tratteremo più approfonditamente nel seguente paragrafo.

### 3.3 Analisi delle forze

Quando la motocicletta frena, o incontra un ostacolo, la ruota scambia col terreno due forze:

- Forza di frenata ( $F_f, F_r$ ): dovuta alla frenata del veicolo o all'impatto della ruota con un'asperità del terreno
- Forza di carico ( $N_f, N_r$ ): dovuta al trasferimento di carico e alla forza peso di veicolo e guidatore.

In riferimento allo schema di figura Fig:20 scriviamo le varie equazioni di equilibrio:

Eq. Verticale:

$$F_p = N_r + N_f \Rightarrow mg = N_r + N_f \quad (16)$$

Eq. Orizzontale:

$$F_i = F_r + F_f \Rightarrow md = F_r + F_f \quad (17)$$

Eq. Momenti (B):

$$-N_r b - F_r h + N_f(p - b) - F_f h = 0 \quad (18)$$

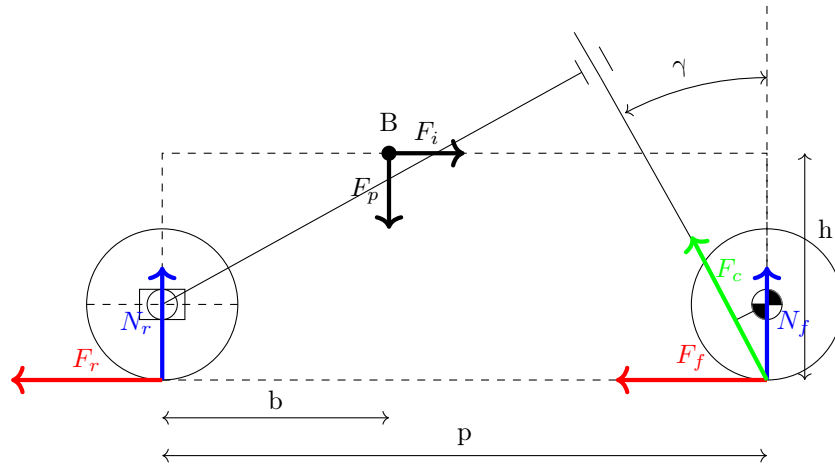


Figura 20: Schema delle forze del cinematismo

dove:

- $F_f$ =forza di frenata frontale
- $F_r$ =forza di frenata posteriore
- $F$ =forza di frenata totale
- $N_f$ =forza di carico frontale
- $N_r$ =forza di carico posteriore
- $F_p$ =forza peso di moto e guidatore
- $F_i$ =forza inerziale di decelerazione
- $F_c$ =forza di compressione sospensione
- $p$ =passo, o interasse, moto
- $b$ =braccio forze posteriori
- $h$ =altezza baricentro moto
- $m$ =massa moto+conducente
- $g$ =accelerazione gravitazionale
- $d$ =decelerazione veicolo



Unendo le equazioni (16) e (18) otteniamo:

$$N_r = mg - N_f \quad (19)$$

$$\Rightarrow -(mg - N_f)b - F_r h + N_f(p - b) - F_f h = 0 \Rightarrow N_f p = mgb + F_r h + F_f h \Rightarrow$$

$$N_f = mg \frac{b}{p} + F \frac{h}{p} \quad (20)$$

Usando invece (20) e (19) otteniamo:

$$N_r = mg \frac{p - b}{p} - F \frac{h}{p} \quad (21)$$

Inoltre vale che:

$$F_f = f_1 N_f \quad (22)$$

$$F_r = f_2 N_r \quad (23)$$

dove  $f_1$  e  $f_2$  sono i coefficienti d'attrito (statico) rispettivamente di ruota anteriore e posteriore i quali solitamente oscillano tra 0,7 e 0,9.

Dato che vogliamo analizzare la sospensione anteriore, ipotizziamo di frenare solo col freno davanti ( $\Rightarrow F_r = 0$ ) e uniamo anche le equazioni (20) e (22), ottenendo così:

$$N_f = \frac{mgb}{p - f_1 h} \quad (24)$$

Le forze  $F_f$  e  $N_f$ , oltre a indurre momenti flettenti nella sospensione, esercitano una forza di compressione  $F_c$  la quale sarà in asse con la sospensione, da cui:

$$F_c = N_f \cdot \cos \gamma + F_f \cdot \sin \gamma \quad (25)$$

Inoltre, unendo le equazioni (22), (24) e (25) otteniamo:

$$F_c = N_f \cdot \cos \gamma + f_1 N_f \cdot \sin \gamma \Rightarrow$$

$$F_c = (\cos \gamma + f_1 \sin \gamma) \frac{mgb}{p - f_1 h} \quad (26)$$

Si nota pertanto che la forza di compressione della sospensione è proporzionale all'angolo di sterzo  $\gamma$ . Generalmente tale parametro oscilla tra i  $22^\circ$ - $35^\circ$  ( $\frac{11}{90}\pi$ - $\frac{7}{36}\pi$ ) a seconda della tipologia di moto. Per  $\gamma$  crescente notiamo che  $F_c$  è anch'esso crescente con andamento del tipo raffigurato in Fig:21. Durante la frenata anche il passo  $p$  e l'altezza del baricentro  $h$  variano (in particolar modo diminuiscono), tuttavia nell'analisi delle forze faremo riferimento solamente a  $F_c$  in funzione di  $\gamma$  essendo più inerente all'argomento. Tra l'altro l'analisi del passo è già stata eseguita nel precedente paragrafo.

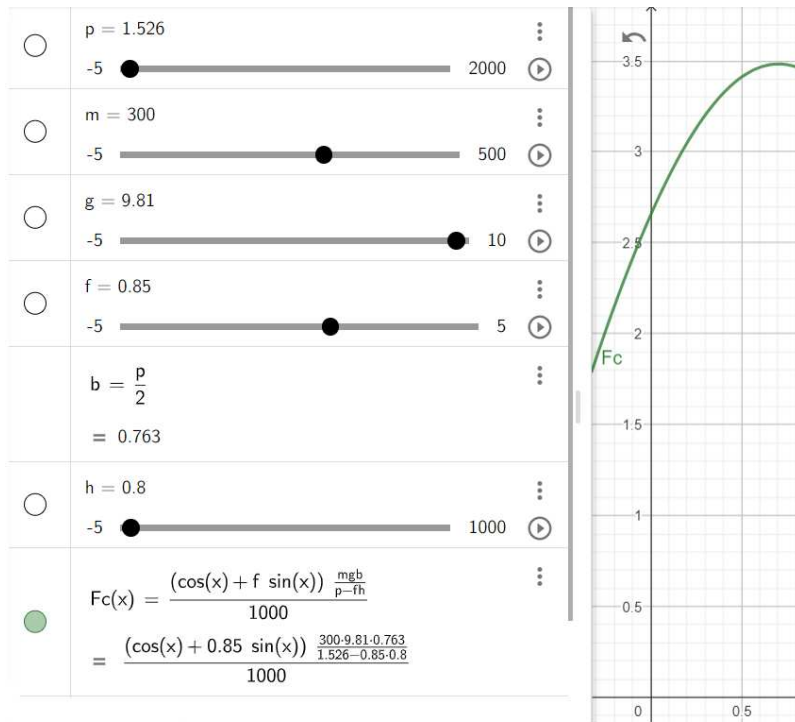


Figura 21: Andamento della forza di compressione (KN) delle sospensioni al variare di  $\gamma$  (x) in radianti: i valori di passo, altezza e peso fanno sempre riferimento ad una BMW F800R 2017, si ipotizza inoltre  $b = \frac{p}{2}$ , massa del conducente+veicolo  $m = 300Kg$  e coefficiente d'attrito  $f_1 = f = 0.85$

Tramite il grafico di Fig:21 si ricavano le forze massima e minima ( $F_{c1}$  e  $F_{c2}$ ) per i valori limite di  $\gamma$  ottenuti nello studio cinematico per una compressione della sospensione di  $125mm$ , ovvero  $\frac{5}{36}\pi rad$  e  $0, 359rad$  (vedi Tab:3).

Forza	Valore	Unità di misura
$F_{c1} = F_c\left(\frac{5}{36}\pi\right)$	3,359	KN
$F_{c2} = F_c(0, 359)$	3,278	KN

Tabella 3: Forza di compressione minima e massima delle sospensioni in esame (KN)

Si nota subito che, generalmente, per angoli più stretti la  $F_c$  è minore che per valori dell'angolo di sterzo più grandi. Alla luce di ciò si vorrebbe avere un angolo di sterzo sufficientemente basso, in modo tale da ridurre la forza di compressione e quindi l'affondamento della sospensione. Tuttavia al variare di  $\gamma$  il comportamento della moto cambia drasticamente. Infatti sono molteplici gli aspetti che variano con tale parametro, ne possiamo vedere alcuni in seguito.

#### Angolo di sterzo chiuso ( $\rightarrow 20^\circ$ )

Maggiore reattività alla sterzata

Maggiore sensibilità allo svergolamento ad alte velocità

Maggior controllo in curva

Minor forza di compressione

Minor forza di flessione sulla forcella

Maggior effetto anti-dive

#### Angolo di sterzo aperto ( $\rightarrow 35^\circ$ )

Minor reattività alla sterzata

Minore sensibilità allo svergolamento ad alte velocità

Maggior controllo in moto rettilineo

Maggior forza di compressione

Maggior forza di flessione sulla forcella

Minor effetto anti-dive

Ad esempio per moto da cross abbiamo  $\gamma = 26^\circ \div 27.5^\circ$ , per sportive  $\gamma = 22^\circ \div 25^\circ$  mentre per moto da viaggio  $\gamma = 25^\circ \div 32^\circ$ , di seguito si possono apprezzare alcuni esempi specifici.

Modello	Angolo di sterzo dalla verticale °	Avancorsa mm
BMW S1000RR	23,1	93,9
MV Agusta F3	24,0	99,0
Ducati Monster	24,0	93,0
Ducati Panigale V4	24,5	100,0
Ducati Multistrada V4	24,5	102,5
BMW R1250GS Adventure	24,9	95,4
BMW S1000XR	25,5	116,0
Honda CB650F	25,5	101,0
BMW R1250GS	25,7	100,6
BMW F800R	26,0	100,0
Harley-Davidson Ultra Limited	26,0	170,0
BMW F750GS	27,0	104,5
BMW F850GS	28,0	126,0
Honda GL 1800 Gold Wing	29,25	109,0
Harley-Davidson Iron 883	30°	117,0

Figura 22: Esempi di angolo di sterzo

Di entrambe le analisi che abbiamo svolto dobbiamo tenere presente che non abbiamo considerato le variazioni dei parametri geometrici della moto a causa dell'oscillazione della ruota posteriore. Inoltre abbiamo ricavato dei dati nell'ipotesi di escursione completa della sospensione, e di frenata al limite tra statica e dinamica, situazioni che si verificano difficilmente nella realtà.

Questo termina la nostra trattazione sulle forcelle telescopiche. Analizzeremo ora in modo analogo le sospensioni Telelever, per infine confrontare i due dispositivi.

## 4 Sospensioni Telelever

### 4.1 Struttura



Figura 23: Disegno 3D sospensioni Telelever di una BMW R1200GS

sono soggetti ad una usura inferiore che nelle telescopiche, dato che gran parte delle forze coinvolte nella sospensione vengono assorbite dal braccio longitudinale.

Non è comunque un sistema privo di difetti, il quale risulta più complesso e con un ingombro maggiore. Inoltre in questa soluzione abbiamo un unico componente di sospensione/ammortizzazione: il mono, sul quale gravano la quasi totalità delle forze trasmesse dal terreno alla ruota e dal peso della moto stessa. Bisogna anche notare che per una stessa compressione delle forcelle telescopiche, in una moto con Telelever l'elemento di sospensione/ammortizzazione si comprime meno essendo separato dalla forcella telescopica e posizionato più verso il retro del veicolo.

Sono state impiegate inizialmente su modelli da Gran Turismo come la BMW R1100RS (Fig:24b), mentre al giorno d'oggi è impiegata sulla enduro stradale BMW R1200GS (Fig:24a) e su tutta la sua gamma.



(a) BMW R1200GS del 2013



(b) BMW R1100RS del 1993

Figura 24: Impiego della sospensione Telelever su due modelli di moto di epoche diverse: in Fig:24b abbiamo il primo impiego di questa sospensione, mentre in Fig:24a un suo utilizzo più recente

## 4.2 Analisi cinematica

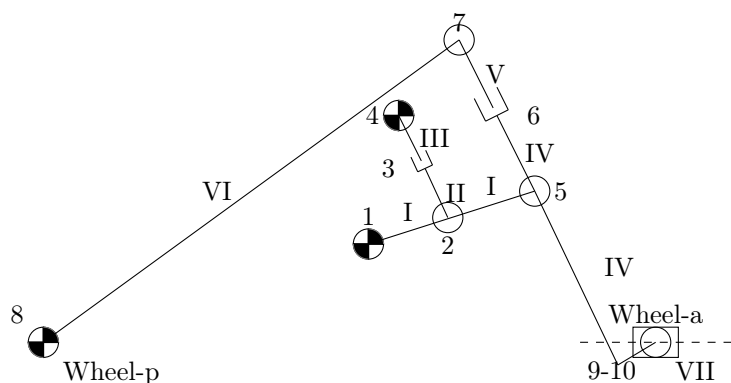


Figura 25: Schema cinematico sospensioni Telelever

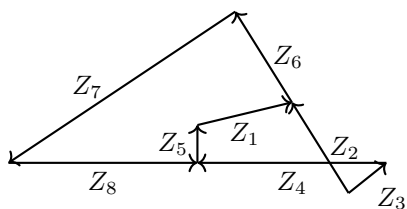
Nello schema cinematico troviamo rappresentati: la forcella telescopica (IV, 5 e 6), la quale attraverso il prolungamento del corpo (IV) collega l'asse della ruota anteriore (Wheel-a) al resto della sospensione, il monoammortizzatore (III, 3 e II) ed il braccio oscillante (I), il quale è collegato alla forcella telescopica ed al mono con due accoppiamento rotoidali (2 e 5). Il corpo (VI) vuole rappresentare il legame che si pone tra la sospensione e la ruota posteriore (Wheel-p). Il sistema è composto da 6 corpi, da 6 accoppiamento rotoidali, 2 prismatici e 1 camma piana (o 7 corpi, 7 acc. rot. e 3 prism.), pertanto, attraverso l'equazione di Grubler (1), ricaviamo che tale meccanismo presenta 1 grado di mobilità e quindi la sua configurazione è descrivibile con un solo

parametro.

La maggior complessità rispetto alla sospensione Telescopica la si può facilmente notare anche confrontando gli schemi cinematici tra loro.

Dato che lo schema cinematico del monoammortizzatore è una diade RPR, e quindi non incide sui gradi di mobilità del meccanismo, e data anche la sua collocazione nel dispositivo, non la considereremo nel poligono dei vettori e quindi nell'analisi di posizione; è più interessante concentrarsi sul resto del meccanismo.

Procediamo quindi tracciando il poligono di vettori del cinematismo di studio.



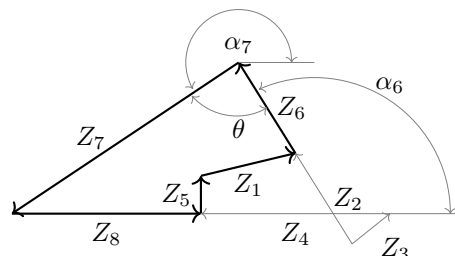
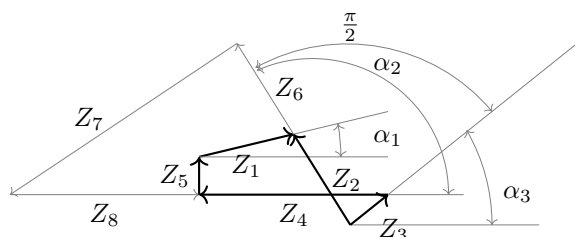
(a) Poligono di vettori della sospensione Telelever

$Z_1$	cost. noto	$\alpha_1$	variab. inc.
$Z_2$	cost. noto	$\alpha_2$	coord. lib.
$Z_3$	cost. noto	$\alpha_3$	variab. noto
$Z_4$	variab. inc.	$\alpha_4$	cost. noto
$Z_5$	cost. noto	$\alpha_5$	cost. noto
$Z_6$	variab. inc.	$\alpha_6$	variab. noto
$Z_7$	cost. noto	$\alpha_7$	variab. noto
$Z_8$	cost. noto	$\alpha_8$	cost. noto

(b) Tabella dei vettori e angoli

Figura 26: Poligono di vettori (Sx) e relativa tabella dati (Dx)

Notiamo che abbiamo un poligono di vettori multimaglia. Pertanto per risolvere l'analisi di posizione risolveremo prima la maglia di Fig:27a e poi quella di Fig:27b



(a) Maglia 1 del poligono di vettori della sospensione Telelever (b) Maglia 2 del poligono di vettori della sospensione Telelever

Figura 27: Maglie del cinematismo in esame evidenziate in nero con relative quote degli angoli

Inoltre è utile notare che:

$$\alpha_3 = \alpha_2 - \frac{\pi}{2} \quad (27)$$

$$\alpha_6 = \alpha_2 \quad (28)$$

Scriviamo quindi le equazioni di chiusura della maglia 1:

$$\begin{aligned} Z_1 \cos \alpha_1 - Z_2 \cos \alpha_2 + Z_3 \cos \alpha_3 - Z_4 &= 0 \\ Z_1 \sin \alpha_1 - Z_2 \sin \alpha_2 + Z_3 \sin \alpha_3 + Z_5 &= 0 \end{aligned} \quad (29)$$

dalle quali si ricava che:

$$\alpha_1 = \arcsin \left( \frac{Z_2 \sin \alpha_2 - Z_3 \sin \alpha_3 - Z_5}{Z_1} \right) \quad (30)$$

$$Z_4 = Z_1 \cos \alpha_1 - Z_2 \cos \alpha_2 + Z_3 \cos \alpha_3 = Z_1 \cos \left( \arcsin \left( \frac{Z_2 \sin \alpha_2 - Z_3 \sin \alpha_3 - Z_5}{Z_1} \right) \right) - Z_2 \cos \alpha_2 + Z_3 \cos \alpha_3 \quad (31)$$

Scriviamo ora le equazioni di chiusura della maglia 2:

$$\begin{aligned} Z_1 \cos \alpha_1 + Z_6 \cos \alpha_6 + Z_7 \cos \alpha_7 + Z_8 &= 0 \\ Z_1 \sin \alpha_1 + Z_6 \sin \alpha_6 + Z_7 \sin \alpha_7 + Z_5 &= 0 \end{aligned} \quad (32)$$

Notiamo che il problema richiede la risoluzione di equazioni non lineari, le quali richiederebbero metodi risolutivi approssimativi e iterativi come quello di Newton-Raphson. Tuttavia è possibile non ricorrere a tali metodi. Infatti possiamo ricavare l'angolo  $\alpha_7$  sfruttando le osservazioni fatte in Fig:18 per le sospensioni Telescopiche. In particolare modo la formula (15) vale ancora, dobbiamo però rivisitarla un attimo e considerare che ora l'angolo che prima chiamavamo  $\beta$ , e che adesso chiameremo  $\theta$ , non è costante in questo caso, ma varierà con la configurazione, esattamente come tutti gli altri parametri.

Otteniamo quindi che:

$$\theta = \arcsin \left( \frac{Z_8 + Z_4 - \frac{Z_3}{\cos(\alpha_2 - \frac{\pi}{2})}}{Z_7} \sin(\pi - \alpha_2) \right) \quad (33)$$

e con quanto risultato ricaviamo ciò che volevamo, ovvero:

$$\alpha_7 = \alpha_2 + \pi - \theta \quad (34)$$

Invece  $Z_6$  si ricava col metodo classico, risolvendo una delle due equazioni di struttura, ad esempio si può ottenere che:

$$Z_6 = -\frac{Z_1 \cos \alpha_1 + Z_7 \cos \alpha_7 + Z_8}{\cos \alpha_6} \quad (35)$$

In questo caso il passo è dato dall'espressione:

$$p = Z_4 + Z_8 \quad (36)$$

mentre la lunghezza delle forcelle telescopiche, e quindi la loro corsa, è data dalla formula:

$$L = Z_6 + Z_2 \quad (37)$$

L'angolo di sterzo si ricava immediatamente con un'espressione simile alla (8):

$$\gamma = \alpha_2 - \frac{\pi}{2} \quad (38)$$

L'avancorsa invece si ottiene in un modo del tutto identico a quello visto per le sospensioni Telescopiche; useremo quindi la relazione (13).

Per confrontare gli studi sulle due sospensioni ipotizziamo di installarle sulla stessa motocicletta (BMW F800R 2017), il che significa che andremo a considerare gli stessi parametri elencati nella tabella Tab:1, fatta eccezione di  $\beta$  dato che in questa sospensione, come abbiamo detto in precedenza, non è costante.

Tuttavia abbiamo bisogno anche di altri parametri. Nella tabella Tab:4 troveremo raggruppati tutti i dati di cui avremo bisogno per la nostra analisi.

d	42,5	[mm]	fornito
$\gamma$	$\frac{5}{36}\pi$	[rad]	fornito
R	300	[mm]	fornito
p	1526	[mm]	fornito
a	91	[mm]	fornito
$Z_7$	1330	[mm]	ricavato
$Z_2$	400	[mm]	ipotizzato
$Z_4$	426	[mm]	ipotizzato
$Z_5$	250	[mm]	ipotizzato
$Z_8$	885	[mm]	ipotizzato

Tabella 4: Tabella dati BMW F800R 2017 con Telelever

I valori di:  $Z_2$ ,  $Z_4$ ,  $Z_5$  e  $Z_8$  sono stati ipotizzati sulla base di altri modelli sempre di BMW (come la S1100RS) i quali però montavano effettivamente la sospensione Telelever. Hanno anche aiutato i modelli matematici attraverso i quali abbiamo adattato tali parametri per la BMW F800R in esame. Pertanto l'analisi che faremo si baserà su una moto che non è stata realmente costruita, tuttavia servirà per studiare le differenze sulle prestazioni di una stessa moto la quale monta però due sospensioni diverse.

A riposo pertanto ci aspetteremmo che la moto presenti gli stessi valori della versione con le Telescopiche, vediamo quindi in seguito il confronto fra le due versioni in questa configurazione:

	Telesc.	Telelever	
L	730	761,83	mm
p	1511	1507,94	mm

Tabella 5: Confronto parametri della moto a riposo con le due sospensioni

Mentre per il passo la differenza è minima, notiamo che non è lo stesso per la lunghezza delle forcelle telescopiche a riposo. Tale differenza è dovuta dal fatto che abbiamo calcolato le lunghezze con due espressioni diverse, in particolar modo (6) e (37)(+(35)), le quali a loro volta dipendono da parametri diversi. Dato che ogni parametro presenta un errore diverso (tra cui troviamo errori di approssimazione, errori dovuti alle ipotesi fatte e a fonti diverse dei dati) è naturale che i risultati delle due espressioni siano diversi. Notiamo però che quello ottenuto nel caso del Telelever si avvicina particolarmente al valore atteso nella realtà (di  $760mm$ ), ciò è dovuto dal fatto di cui parlavamo prima, ovvero che le varie ipotesi sono state fatte cercando di adattare il più possibile la sospensione Telelever alla moto in esame. Lo stesso ragionamento ci ha permesso di ottenere un valore del passo vicino a quello reale (di  $1526mm$ ), anche se di poco inferiore a quello calcolato nel caso con le Telescopiche. Facciamo notare che fino ad ora, nel caso Telelever, abbiamo parlato di "Lunghezza delle forcelle Telescopiche" invece che di "Lunghezza delle sospensioni Telescopiche" (che in questo caso sarebbe solo una la sospensione, il mono). Infatti la compressione di  $125mm$  fa riferimento alla compressione delle forcelle e non del monoammortizzatore, dato che in questo meccanismo i due elementi sono separati. Se avessimo considerato effettivamente una compressione di  $125mm$  sul mono, avremmo avuto una corsa molto maggiore delle forcelle telescopiche, non potendo più confrontare le analisi cinematiche.

In questo caso abbiamo ottenuto un passo con un errore percentuale di  $e\% \approx 1$  e una lunghezza della forcella Telescopica con un errore percentuale di  $e\% \approx 0,25$ . Tali errori sono inferiori rispetto a quelli del caso Telescopiche grazie alle ipotesi fatte; tuttavia non si è comunque potuto azzerarli dato che al variare dei vari parametri un errore incrementava, mentre l'altro diminuiva.

Osserviamo ora come variano i parametri geometrici della moto con Telelever sempre nel caso di una compressione della forcella telescopica di 125mm.

dato	riposo	frenata	
$\gamma$	$\frac{5}{36}\pi$	0,4155	rad
a	93	85,9	mm
L	761,83	637,14	mm
p	1507,94	1499,72	mm

Tabella 6: Confronto dati a riposo e in frenata

Risulta utile osservare anche l'andamento che hanno l'avancorsa, il passo e la compressione della sospensione a seconda dell'angolo di sterzo, attraverso il grafico di Fig:28.

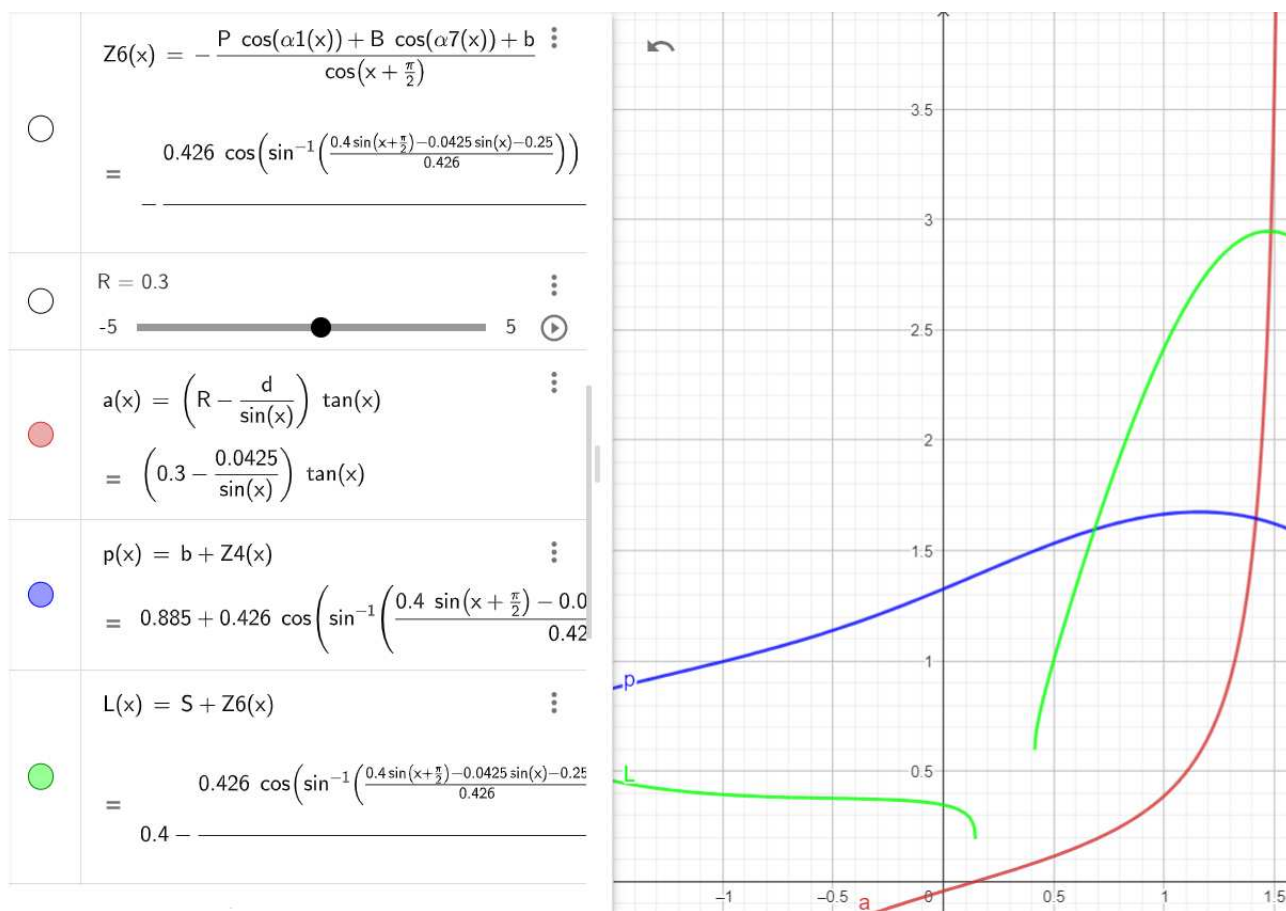


Figura 28: Andamento di: avancorsa (a-rosso), passo (p-blu) e compressione/lunghezza forcelle (L-verde chiaro) al variare di  $\gamma$  (x)

Anche in questo caso notiamo che passo e lunghezza delle forcelle calano al calare dell'angolo di sterzo  $\gamma$ , ma con andamenti diversi rispetto a quelli delle Telescopiche. Dato che l'espressione dell'avancorsa dipende solamente da parametri comuni ai due casi, l'andamento sarà lo stesso. Ciò non vuol dire che in compressione avremmo dovuto avere la stessa avancorsa, dato che la lunghezza delle forcelle varia diversamente, comportando un angolo di sterzo in frenata diverso.

Abbiamo descritto già in precedenza come cambiano le caratteristiche e le prestazioni della moto al variare di tali parametri, pertanto risulta più interessante studiare il confronto dei comportamenti della moto con le due sospensioni. Tale studio verrà eseguito più avanti nel paragrafo 5.



### 4.3 Analisi delle forze

Soffermiamoci ora sullo studio delle forze che agiscono sulla sospensione Telelever. La moto è soggetta sempre alle stesse forze viste in Fig:20 e, presentando caratteristiche geometriche uguali allo studio precedente, la forza di compressione  $F_c$  sarà data anche in questo caso dalla relazione (26) ovvero:

$$F_c = (\cos \gamma + f_1 \sin \gamma) \frac{mgb}{p - f_1 h}$$

Con questa sospensione abbiamo un angolo di sterzo  $\gamma$  che oscilla tra i  $\frac{5}{36}\pi rad$  ed i  $0,4155 rad$  e, tramite il grafico di Fig:21 (o comunque tramite la relazione (26)), ricaviamo delle forze di compressione massima e minima ( $F_{c1}$  e  $F_{c2}$ ) di:

Forza	Valore	Unità di misura
$F_{c1} = F_c(\frac{5}{36}\pi)$	3,359	KN
$F_{c2} = F_c(0,4155)$	3,339	KN

Tabella 7: Forza di compressione minima e massima delle sospensioni in esame (KN)

Notiamo che, mentre la forza di compressione massima è uguale al caso con le sospensioni Telescopiche, quella minima è superiore. Questo esito non ci sorprende, dato che abbiamo un angolo di sterzo in frenata maggiore che nello studio precedente.

Tuttavia  $F_c$  non è direttamente la forza che interessa la sospensione, ovvero il monoammortizzatore. Tale forza la indicheremo con  $F'_c$  e si ricava osservando il seguente schema:

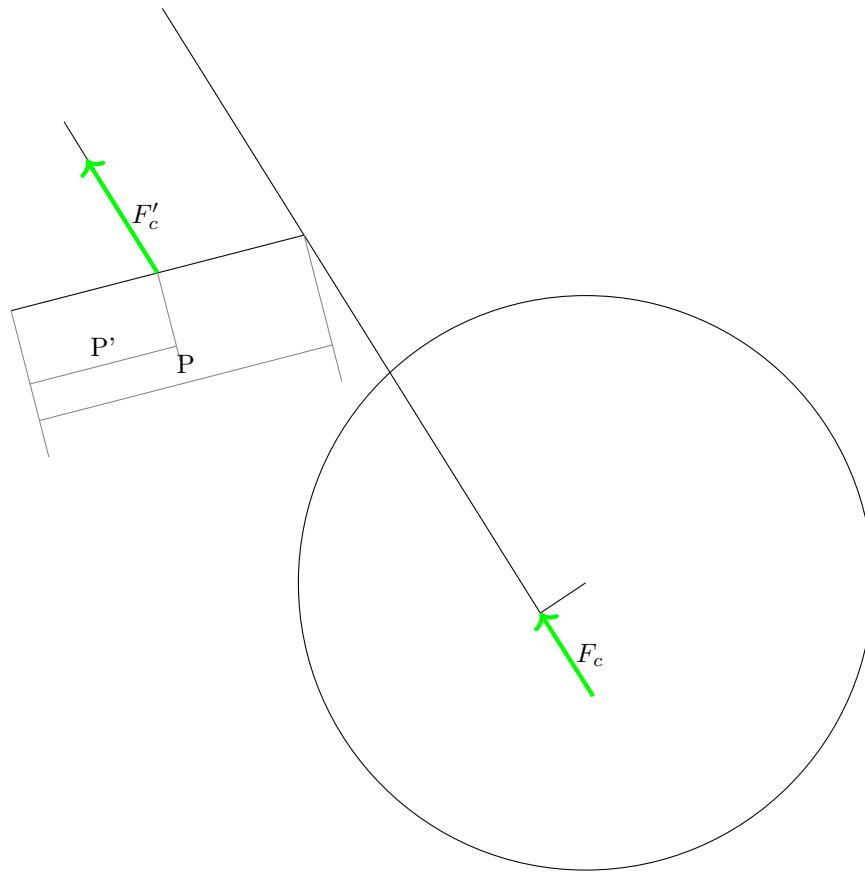


Figura 29: Schema delle forze del braccetto longitudinale

Notiamo che il braccetto longitudinale non è altro che un moltiplicatore di forza. Al fine di semplificare i conti e di concentrarci di più sulle osservazioni, ipotizziamo che le due forze siano tra loro parallele. Tale ipotesi è piuttosto realistica, anche se l'angolazione delle due forze varia con la compressione della sospensione.

Pertanto avremo che:

$$F'_c = \frac{P}{P'} F_c \quad (39)$$

Questo comporta che sulla singola sospensione del braccetto agisce una forza molto maggiore rispetto a quelle agenti sulle forcelle. Nella realtà si cerca di aumentare il più possibile  $P'$  in modo tale da ridurre l'incremento di forza, senza però compromettere il cinematiso. Durante la progettazione del monoammortizzatore si dovrà tenere conto di questo fenomeno, bisogna inoltre notare che, mentre nelle sospensioni Telescopiche  $F_c$  veniva dimezzata sulle due sospensioni, qui  $F'_c$  agisce interamente su una sola sospensione.

Sarà necessario quindi una molla con un coefficiente elastico maggiore, il che significa di dimensioni maggiori. Come abbiamo detto in precedenza la molla si trova all'esterno dello stelo, ciò comporta più libertà nel dimensionamento della molla, almeno per quanto ne riguarda l'ingombro.

L'ammortizzatore invece dovrà smorzare da solo la forza  $F'_c$  e l'effetto molleggiante dovuto dalla molla, pertanto l'olio richiederà un certo "spazio di espansione", che però le dimensioni della sospensione non permettono. Come soluzione a questo inconveniente si è ricorsi ad un vaso di espansione esterno nel quale l'olio può andare durante la compressione dell'ammortizzatore. Il funzionamento di tale meccanica è rappresentato nella Fig30:



Figura 30: Vaso di espansione esterno nell'ammortizzatore telescopico con molla esterna della sospensione Telelever

Nella Fig:30 si possono anche osservare un pistoncino, una molla ed una vite nel vaso di espansione, i quali vengono usati per la regolazione della sospensione.

Questo conclude lo studio sulla sospensione Telelever. Molte dimostrazioni, passaggi e ragionamenti sono stati comuni allo studio sulle Telescopiche, ma ciò non comporta che i due dispositivi lavorino in modo simile, anzi!

Nel seguente paragrafo confronteremo i due dispositivi, evidenziandone i rispettivi pro e i contro.

## 5 Confronto tra le due sospensioni

Dagli studi che abbiamo svolto sono emersi i diversi comportamenti che hanno queste due sospensioni. Spostiamo ora il focus dai singoli dispositivi al confronto tra i due.

### 5.1 Struttura

Partiamo parlando della loro struttura. Le sospensioni Telescopiche risultano sicuramente meno ingombranti; è tutto concentrato nei due gambali, il che conferisce anche una facile e rapida manutenzione della forcella. Il design, almeno all'apparenza è semplice ed essenziale, ma comporta degli aspetti negativi. L'inserimento all'interno degli steli delle molle ne limita molto la dimensione, e quindi per ottenere uno stesso coefficiente elastico sono richiesti materiali migliori. Tuttavia il posizionamento delle molle comporta anche un vantaggio. La molla è immersa nell'olio, il quale, durante la compressione, oltre a scorrere attraverso i fori preposti, deve scorrere anche attraverso le eliche della molla, aumentando così l'effetto smorzante, e dissipando più energia per attrito. Capiamo però che la presenza di molle, olio, e sistema smorzante incide notevolmente sulle masse non sospese della parte anteriore della moto, riducendo così la prontezza di risposta delle sospensioni. Aumenta anche la resistenza inerziale della forcella alla sterzata, risultando più difficile curvare. Presentano inoltre una certa semplicità costruttiva. Stelo e foderi vengono realizzati per tornitura, mentre le piastre di sterzo e i supporti per le pinze dei freni per stampaggio, o in casi più costosi, vengono ricavati dall'intero tramite fresatura. Sebbene siano la tipologia di sospensione più diffusa, ciò non vuol dire che siano anche le più economiche. Infatti i processi per realizzare l'impianto idraulico di ammortizzazione, renderlo compatibile con la molla e inserire il tutto all'interno dei gambali ha un determinato costo; per non considerare il fatto che i gambali sono pure due.



(a) BMW R1200C con sospensioni Telelever

(b) BMW HP4 con sospensioni USD

Figura 31: Fotografie di una Telelever del '97 (Sx) e di una moderna USD (Dx)

Le sospensioni Telelever sono sicuramente più ingombranti, la presenza del braccio longitudinale complica lo studio del posizionamento del radiatore per le moto raffreddate a liquido. Tale dispositivo risulta anche più complicato, ma è tale complessità che gli conferisce un'elevata robustezza. Come abbiamo già detto in precedenza abbiamo un solo ammortizzatore, il quale dovrà lavorare da solo e ciò incide molto sulla scelta/progettazione del componente. In questo caso però la molla è esterna, permettendo quindi diametri maggiori. Nella forcella telescopica sono presenti solo stelo e foderi, non vi sono ne molle, ne olio, ne sistema di ammortizzazione e ciò riduce le masse non sospese e la resistenza inerziale alla sterzata, quindi da questo punto di vista colma uno dei difetti delle Telescopiche. L'assenza delle molle sulle forcelle Telescopiche permette un'altra riduzione della massa dell'avantreno, infatti grazie a ciò è possibile adottare steli e foderi di diametri notevolmente inferiori. Uno dei vantaggi principali di questa soluzione è che, rispetto alle sospensioni Telescopiche, separa totalmente la funzione di sterzo da quella di sospensione/ammortizzazione, conferendo quindi un elevato confort di guida; è per questo motivo che tale dispositivo è stato impiegato da BMW per moto "da viaggio", come ad esempio la Cruiser BMW di Fig:31a. Steli e gambali vengono realizzati sempre per tornitura, come per le sospensioni Telescopiche, solo che in questo caso non devono ospitare ne l'elemento elastico ne l'elemento smorzante. Il braccio longitudinale invece viene realizzato per stampaggio, un po' come i supporti per le pinze dei freni e le piastre di sterzo. Sebbene questa sospensione presenti apparentemente più componenti, non vuol dire che il costo sia superiore a quello delle Telescopiche; infatti diminuisce di molto grazie al fatto che si ha solo una piccola sospensione telescopica di fattezze simili a quelle posteriori classiche, anziché le due anteriori di dimensioni maggiori.

## 5.2 Parametri geometrici

Assumiamo ora un punto di vista più tecnico, e confrontiamo gli andamenti di passo e compressione delle sospensioni che abbiamo ricavato nei paragrafi precedenti, in particolare nei paragrafi 3.2 e 4.2.

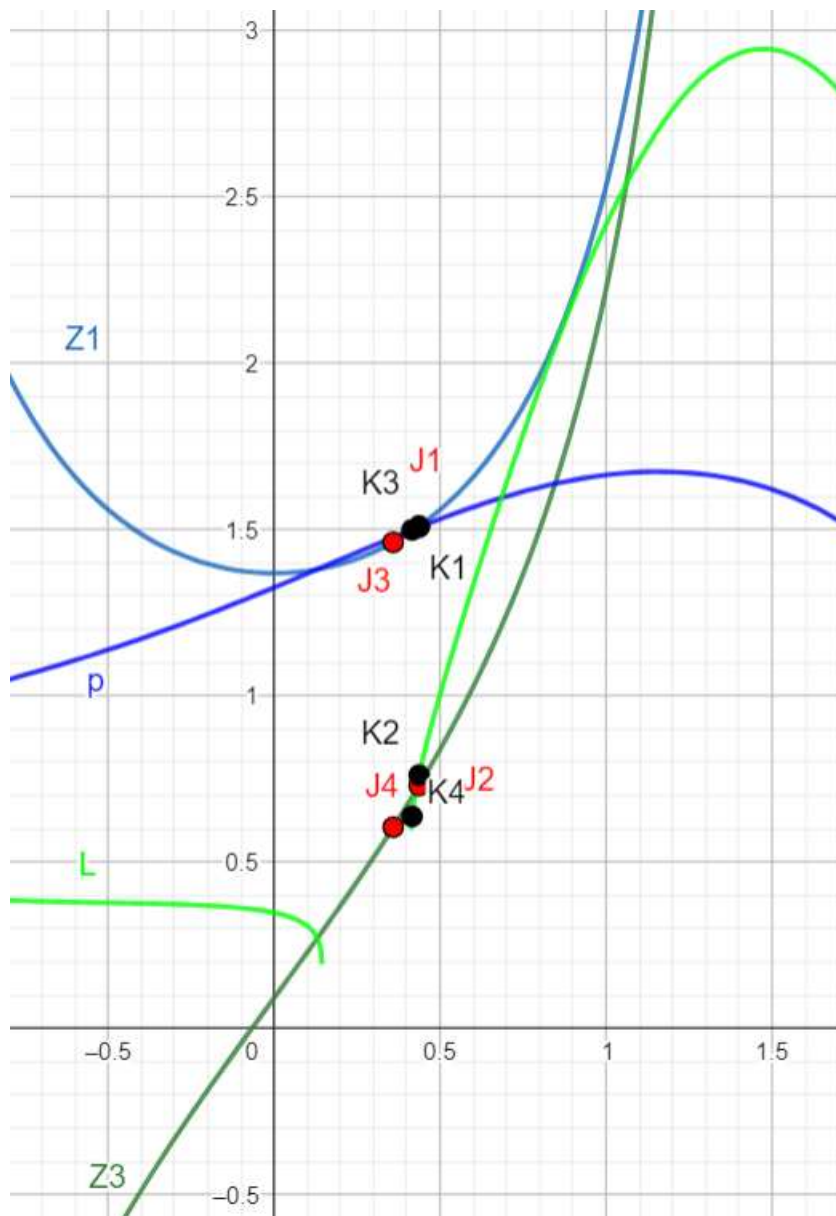


Figura 32: Confronto tra gli andamenti del passo (tonalità di blu) e della lunghezza delle forcelle telescopiche (tonalità di verde), in particolare:  $p$  (blu scuro) e  $L$  (verde chiaro) sono passo e lung. forc. tel. della sospensione Telelever, mentre  $Z1$  (blu chiaro) e  $Z3$  (verde scuro) sono passo e lung. forc. tel. della sospensione Telescopica. Tutti i parametri sono in funzione dell'angolo di sterzo  $\gamma$  ( $x$ )

Dal grafico di Fig:32 possiamo notare quanto, in termini di variazione di passo e di lunghezza della forcella, le due sospensioni si comportano in modo diverso.

Il passo nelle Telescopiche tende a diminuire più velocemente rispetto al passo nelle Telelever, per lo meno nell'intervallo di studio. In particolare, nel range che interessa a noi, del quale si può apprezzare un ingrandimento nella figura seguente (Fig:33a), si può notare come per uno stesso angolo di sterzo, il passo nel caso Telescopiche risulti sempre inferiore. Questo è vero almeno in teoria, dato che i punti J1 e K1 dovrebbero essere coincidenti (la moto con le due sospensioni e l'angolo di sterzo a riposo dovrebbe presentare lo stesso passo), ma non lo sono a causa degli errori di cui abbiamo già trattato in precedenza (vedi paragrafo 4.2). Quanto osservato fino ad ora ci fa capire che, anche se nel caso di frenata si avesse lo stesso angolo di sterzo, con le sospensioni Telescopiche si avrebbe comunque un passo inferiore, il che comporta delle problematiche di cui tratteremo nel seguente paragrafo, dato che riguarda le forze agenti sulla moto. Tuttavia nella realtà, in condizioni di frenata, l'angolo di sterzo non è uguale, ma inferiore nel caso Telescopiche, pertanto il passo risulterà ancora più piccolo rispetto al quello ottenuto con le Telelever.

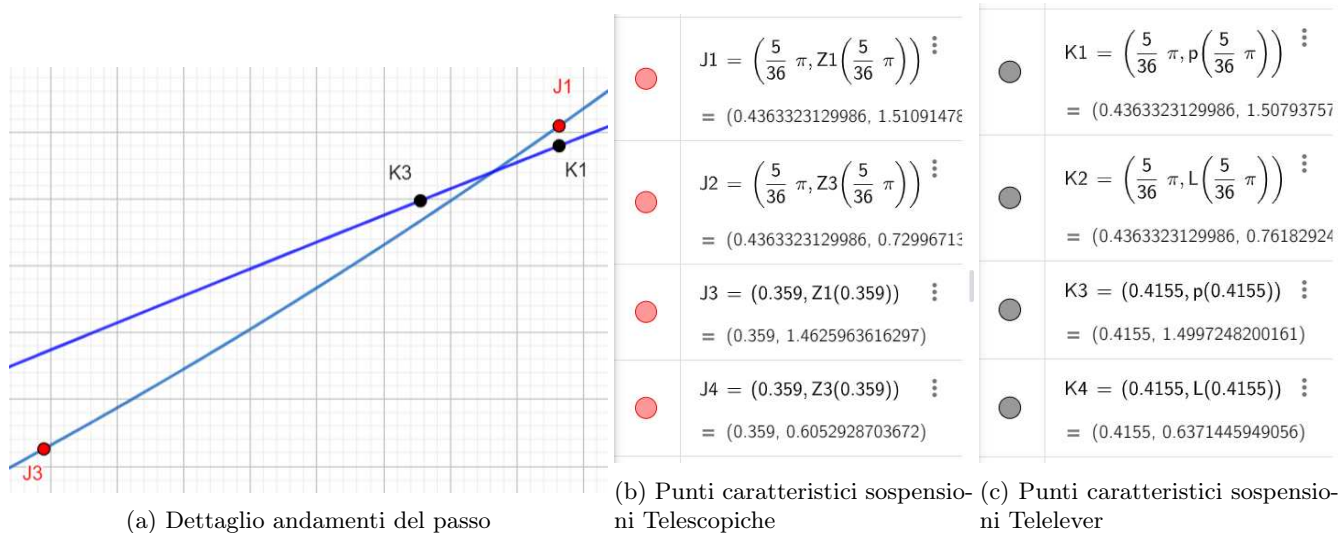


Figura 33

Passiamo ora ad osservare gli andamenti della lunghezza delle forcelle telescopiche. In questo caso sono le sospensioni Telelever ad avere l'andamento che diminuisce con maggior rapidità, per lo meno nell'intervallo d'interesse. Nell'immagine a lato possiamo osservare più da vicino tali andamenti. Anche in questo caso i punti K2 e J2 avrebbero dovuto esser coincidenti, ma sempre a causa degli errori osservati nel paragrafo 4.2 non è così. Al di là di tale imprecisione, per un generico angolo di sterzo, la sospensione Telelever comprime maggiormente la forcella. Tuttavia per una maggior resistenza esercitata dalla molla, la quale andrà quindi ad ostacolare la compressione. Tale fenomeno si può osservare anche sotto un altro punto di vista: per una stessa compressione delle forcelle, si ha una variazione dell'angolo di sterzo inferiore con le Telelever rispetto che con le Telescopiche. Infatti è ragionevole ipotizzare che, durante una frenata o una collisione tra ruota e asperità del terreno, le due sospensioni comprimono ugualmente la forcella telescopica. In questa situazione, in frenata avremo un angolo di sterzo maggiore con le sospensioni Telelever, il che permette un maggior controllo della moto in rettilineo, e tutti gli altri vantaggi già esposti nel paragrafo 3.3. Avendo una variazione di  $\gamma$  inferiore, ciò comporta un maggior effetto anti-dive o anti affondamento, e quindi anche un minor trasferimento di carico di cui si parleremo nel paragrafo (5.3). Pertanto oltre a caricare meno sull'avantreno, il guidatore percepisce meno la frenata del veicolo e le asperità del terreno, aumentando ulteriormente il confort di guida.

Nelle figure 33b e 33c si trovano riassunte tutte le coordinate dei vari punti analizzati.

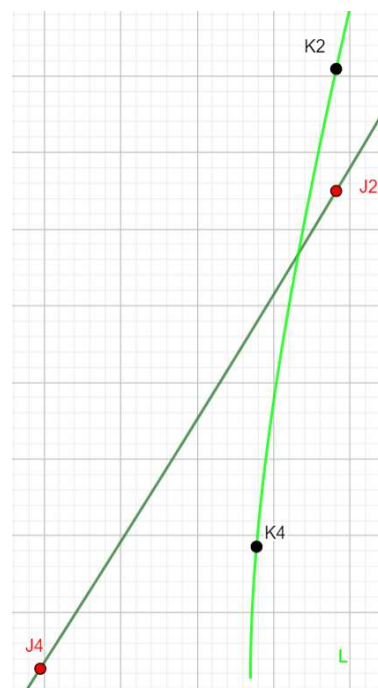


Figura 34: Dettaglio degli andamenti della lunghezza delle forcelle telescopiche

### 5.3 Forze agenti

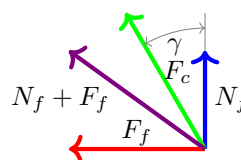
Abbiamo visto come cambiano le prestazioni della moto a seconda di come variano i parametri geometrici in base alla sospensione che monta la moto. Concentriamoci ora su quanto diversamente agiscono le forze che coinvolgono la moto in frenata.

Abbiamo visto che la struttura della sospensione Telelever ne conferisce una elevata robustezza, in particolare resistenza alla flessione. Infatti il braccio longitudinale, come abbiamo già detto, svolge la funzione di puntone o tirante, a seconda dei casi, e ciò non solo permette di ridurre ulteriormente i diametri di steli e foderi della forcella, ma permette anche di avere angoli di sterzo maggiori. Infatti per  $\gamma$  elevati, le forcelle sarebbero sottoposte ad una flessione maggiore, ma le forze vengono scaricate per la maggior parte sul braccio oscillante. Da questo punto di vista, le Telelever colmano uno dei difetti delle Telescopiche: l'attrito. Infatti essendo queste più esposte alla flessione, stelo e fodero vengono spinti l'uno contro l'altro, aumentano quindi la forza normale tra le due superfici e quindi la forza d'attrito; pertanto avremmo delle sospensioni che non solo lavorano male, ma che sono pure soggette ad una usura maggiore.

Di seguito riportiamo brevemente i valori della forza di compressione delle forcelle telescopiche, con affianco un piccolo schema che richiama quello di Fig:20:

$F_c$ [KN]	min	max
Telescopiche	3,278	3,359
Telelever	3,339	3,359

(a) Valori della  $F_c$ . min  $\rightarrow$  frenata, max  $\rightarrow$  inizio frenata



(b) Schema vettori ruota anteriore

Figura 35

Abbiamo detto in precedenza che si vorrebbe avere un angolo di sterzo il più stretto possibile, in modo tale da ridurre la  $F_c$ , comprimere meno la sospensione e quindi generare un effetto anti-affondamento. Tuttavia, per un valore di  $\gamma$  minimo ( $0^\circ$ ), la sospensione sarebbe verticale, garantendo quindi il braccio massimo per la forza  $F_f$  e generando così un momento flettente (di tale forza) massimo. Per valori di  $\gamma < 0$  è vero che avremmo una maggiore forza di compressione, ma ridurremmo il momento flettente di  $F_f$  sia riducendone il braccio (inclinando la sospensione) sia generando il momento flettente di  $N_f$ , il quale ha senso opposto a quello di  $F_f$ . Nel caso in cui i due momenti si annullino del tutto, in frenata avremmo una sospensione soggetta solo a compressione! Per quanto sia un vantaggio, è una situazione inverosimile, dato che il tutto dipende dalla dinamica della frenata; si può tuttavia cercare di minimizzare il momento flettente studiando un opportuno angolo di sterzo  $\gamma$ , considerando una forza di frenata media. La forza in viola è la risultante di  $N_f$  e  $F_f$ , nel caso in cui l'asse di sterzo fosse allineato con essa, si avrebbe affondamento massimo, dato che sarebbe anche massima la  $F_c$ . Per  $\gamma = 0$  abbiamo detto che si avrebbe un certo effetto anti-dive, ma ciò non vuol dire che avremmo affondamento nullo! In questa condizione si dice che abbiamo un affondamento neutrale, generato dal trasferimento di carico. L'effetto anti-affondamento massimo lo si avrebbe per angoli di sterzo negativi, in particolare per un valore di  $\gamma$  tale per cui la direzione dell'asse di sterzo è normale al vettore in viola. Tali dinamiche sono raffigurate in Fig:36

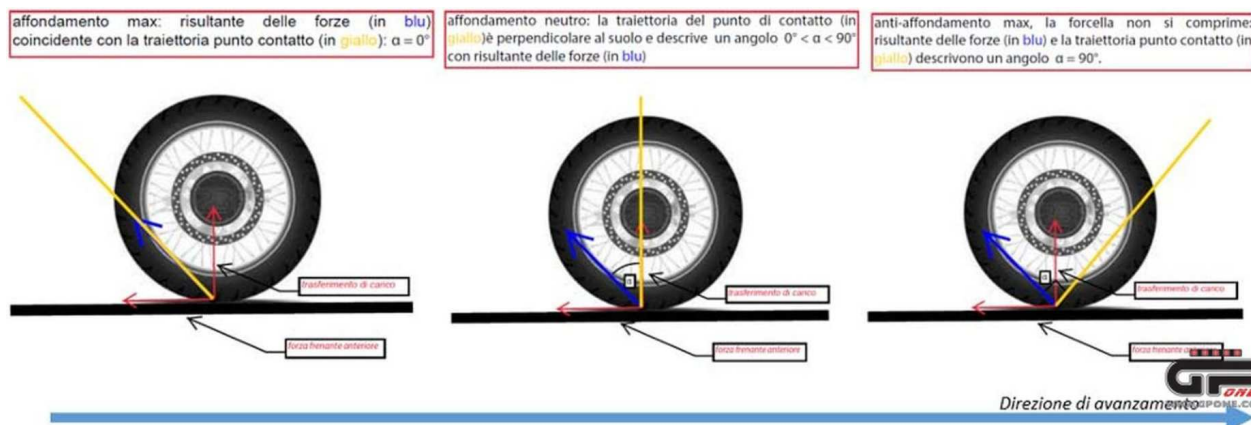


Figura 36: Affondamento a seconda di diverse configurazioni dell'asse di sterzo

La discussione precedente metteva in relazione l'asse di sterzo (e quindi le forcelle anteriori) con il fenomeno dell'anti-dive. Tale relazione è analoga anche tra la traiettoria del punto di contatto ruota-suolo (linea gialla raffigurata in Fig:36) e l'affondamento. Nel caso di sospensioni Telescopiche, la direzione dell'asse di sterzo coincide con tale traiettoria, mentre per le Telelever le due direzioni sono diverse; tuttavia quanto esposto fino ad ora vale comunque. Osservando il cinematismo infatti si nota subito che il percorso che traccia tale punto di contatto è un arco di circonferenza con centro nell'accoppiamento prismatico di perno del braccio oscillante (1). In questo modo, dimensionando opportunamente il meccanismo, è possibile far percorrere alla ruota una traiettoria, per lo meno inizialmente, verticale (affondamento neutro) o addirittura normale alla risultante delle forze (effetto anti-dive massimo).

Trattiamo ora del trasferimento di carico, di cui abbiamo accennato nel precedente paragrafo. La forza normale al piano stradale  $N_f$  si ottiene dalla formula (20) ovvero:

$$N_f = mg\frac{b}{p} + F\frac{h}{p}$$

I principali contributi che la compongono sono la forza peso della moto (+conducente) ed il trasferimento di carico. Entrambi sono inversamente proporzionali al passo, infatti se quest'ultimo calasse, tali contributi aumenterebbero, incrementando quindi  $N_f$ . Chiaramente, a meno degli errori, in condizioni di riposo  $N_f$  è uguale in entrambe le sospensioni, tuttavia in frenata abbiamo che:

	Telescopiche	Telelever	
p	1,463	1,500	m
$N_f$	2,868	2,738	KN

Tabella 8: Valori di  $N_f$  in condizione di frenata

Risulta evidente che le sospensioni Telelever diminuiscono il fenomeno di trasferimento di carico, in termini di "peso" alleggeriscono la ruota anteriore di poco più di 13Kg, una cifra sicuramente importante. In questo modo si stressa meno il pneumatico, riducendone anche l'usura, garantendo comunque una buona aderenza. Se per alcune tipologie di moto ciò è un vantaggio, per altre invece non lo è. Nelle sportive infatti, soprattutto in quelle da competizione, gli pneumatici hanno raggiunto delle performance davvero elevate. Tuttavia per raggiungerle, è necessario che la gomma "vada in temperatura", e affinché ciò avvenga è necessario deformare, e quindi sollecitare, il pneumatico. Maggiore sarà l'impronta della ruota sull'asfalto, maggiore sarà l'attrito e quindi la temperatura generata. Ancora una volta abbiamo trovato una motivazione che spiega ulteriormente perchè le sospensioni Telelever vengono usate maggiormente in applicazioni da turismo piuttosto che sportivo.

Inoltre se il trasferimento di carico fosse eccessivo si rischierebbe il ribaltamento del veicolo, condizione che si avrebbe se il momento generato dalla forza frenante anteriore superasse quello generato da  $N_f$  e se il carico sulla ruota posteriore ( $N_r$ ) e la forza frenante posteriore fossero nulli, non dando quindi il loro contributo coi momenti. In particolare osservando lo schema di Fig:20 e scrivendo l'equazione di equilibrio dei momenti attorno al baricentro si ottiene che:

$$\begin{aligned}
N_f(p-b) &= F_f h \rightarrow +(20) \rightarrow \left(mg\frac{b}{p}\right)(p-b) = F_f h \\
\rightarrow \frac{mgb(p-b)}{p} &= F_f \left(h - \frac{h}{p}(p-b)\right) \rightarrow \frac{mgb(p-b)}{p} = F_f \left(\frac{ph - h(p-b)}{p}\right) \rightarrow F_f = \frac{mgb(p-b)}{ph - h(p-b)} \rightarrow \\
F_f &= \frac{mg(p-b)}{h} \tag{40}
\end{aligned}$$

L'espressione (40) ci da il valore limite della forza frenante anteriore, che nei nostri due casi vale:

	Telescopiche	Telelever	
$F_f$	2,575	2,711	KN

Tabella 9: Valori massimi di  $F_f$

Pertanto la sospensione Telelever, oltre a ridurre il trasferimento di carico e l'effetto di ribaltamento, permette una forza frenante anteriore maggiore. Chiaramente rimarrebbe da verificare se tale forza frenante è concessa dal pneumatico, ma solitamente si cerca di equipaggiare la moto con un treno di gomme adatto alle sue prestazioni. Pertanto a noi risulta poco interessante verificare se il coefficiente d'attrito di 0,85 va bene o meno, tra l'altro tale valore non è quello effettivo della moto in analisi, è stato ipotizzato, ipotizzando anche che le superfici coinvolte siano gomma e asfalto in condizioni asciutte.

## 6 Conclusioni

Entrambi i dispositivi affrontati presentano ognuno i propri vantaggi e svantaggi. A seconda dell'applicazione una sospensione è più adatta rispetto all'altra. Come abbiamo visto, le Telelever non sono propriamente compatibili per un uso sportivo, per il quale vanno meglio le Telescopiche. Invece per moto cruiser o da turismo le Telelever sarebbero sicuramente la scelta migliore. I pochi svantaggi che comportano riguardano aspetti poco influenti per la guida tranquilla che caratterizza queste motociclette.

Una domanda sorge più che spontanea: come mai sono così poco usate? Innanzitutto il brevetto appartiene a BMW, quindi se un'altra casa volesse adottare tale meccanismo incomberebbe in costi aggiuntivi, o dovrebbe sviluppare un meccanismo simile rischiando però il plagio e facendosi carico di costi ben superiori. BMW l'unico costo che ha avuto è quello di R&D, progettazione e realizzazione della sospensione: investimento più che fruttuoso dato che così mette sul mercato delle motociclette le quali sicuramente si differenziano dalle altre, fornendo anche elevata qualità e performance e quindi vendendo di più.

Vogliamo far notare che abbiamo studiato una sospensione Telelever puramente teorica. I dati risultanti sono sicuramente migliori di quelli delle Telescopiche, per lo meno per i parametri per i quali ci si aspettava ciò, tuttavia nella realtà l'andamento di avancorsa e passo sono crescenti, invece che decrescenti. Ciò conferisce in frenata dei vantaggi ancora superiori rispetto a quelli che abbiamo notato con le nostre Telelever nei paragrafi (5.2) e (5.3).

La trattazione che abbiamo eseguito può essere spunto per argomenti di altre tesi, in particolare si potrebbe:

- eseguire un'analisi di una sospensione Telelever reale, e di conseguenza di una moto che effettivamente monta tale dispositivo
- eseguire le rilevazioni dei vari parametri geometrici, quindi prendere le misure direttamente sui componenti tangibili piuttosto che affidarsi ai valori forniti dall'azienda produttrice o da terzi
- svolgere dei test sulle sospensioni, verificando sperimentalmente i dati teorici
- modellazione 3D dei meccanismi per eventuali analisi al computer (FEA)

Si lasciano allegati i link per accedere ai grafici realizzati:

- Telelever: <https://www.geogebra.org/m/xabj4usc>
- Telescopiche: <https://www.geogebra.org/m/nmyn48td>
- Confronto: <https://www.geogebra.org/m/mpsefqnr>
- Forza di compressione: <https://www.geogebra.org/m/kjaufnkm>



## 7 Sitografia

Documenti, articoli e analisi varie:

- [http://www.dynamotion.it/dinamoto/8\\_on-line\\_papers/Telelever%20or%20forks/Telelever\\_ita.htm](http://www.dynamotion.it/dinamoto/8_on-line_papers/Telelever%20or%20forks/Telelever_ita.htm) consultato il 30/07/2023
- <https://www.moto.it/news/evoluzione-delle-sospensioni-anteriori-prima-parte.html> consultato il 30/07/2023
- <https://www.moto.it/news/evoluzione-delle-sospensioni-anteriori-seconda-parte.html> consultato il 30/07/2023
- [https://it.wikipedia.org/wiki/Forcella\\_\(moto\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Forcella_(moto)) consultato il 5/08/2023
- <https://www.motociclismo.it/sospensioni-moto-soluzioni-alternative-forcella-capitolo-2-lmw-yamaha-niken-69132> consultato il 25/09/2023
- <https://www.ralph-dte.eu/2010/08/23/forcella-a-parallelogramma-debess-technologies-il-funzionamento/> consultato il 28/09/2023
- <https://motocrossactionmag.com/it/link-principale-o-link-mancante-il-fantastico-fork-che-quel-tempo-ha-dimenticato/> consultato il 29/09/2023
- <https://www.bmw-motorrad.it/it/engineering/detail/suspension/duolever.html#/section-ultra-tecnologia-nel-dettaglio> consultato il 29/09/2023
- <https://california-motorcycles.com/en/blogs/mechanics-and-news-manicaharley/front-suspension-how-the-telescopic-fork> consultato il 30/09/2023
- <https://www.motorcyclespecs.co.za/index.htm> consultato il 2/10/2023
- <https://www.saferiders.it/avancorsa-e-angolo-di-inclinazione-dello-sterzo/> consultato il 28/10/2023
- <https://motocrossactionmag.com/it/dieci-cose-sull%27offset-a-tripla-pinza/> consultato il 28/10/2023
- <https://www.insella.it/news/la-tecnica-della-motocicletta-le-misure-della-ciclistica#:~:text=Angolo%20di%20sterzo&text=Le%20moto%20da%20viaggio%20e,poco%20superiori%20a%2020%C2%B0> consultato il 2/11/2023
- <https://www.gpone.com/it/2020/04/03/moto-news/tecnica-telelever-vs-forcella-telescopica-su-strada-ed-in-pista.html> consultato il 3/11/2023
- [https://www.dynamotion.it/dinamoto/8\\_on-line\\_papers/frenata/frenata\\_ita.html](https://www.dynamotion.it/dinamoto/8_on-line_papers/frenata/frenata_ita.html) consultato il 3/11/2023
- <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2010-01-0054/> consultato il 4/11/2023

Documenti aggiuntivi e immagini:

- <https://www.legendbikers.it/prodotto/harley-davidson-heritage-springer-100-fltsi-anniversary--30-year-stile-172/> consultato il 6/08/2023
- <https://www.yesterdays.nl/product/indian-1930-chief-1200cc-2-cyl-sv-3109/> consultato il 6/08/2023
- <https://encyclopedia.pub/entry/34160> consultato il 6/08/2023
- <https://www.saferiders.it/tag/telelever/> consultato il 25/09/2023
- <https://www.pinterest.it/amp/pin/433401164120496700/> consultato il 25/09/2023
- <https://bmwchepassione.wordpress.com/2013/08/02/r12-r17-1935/> consultato il 25/09/2023
- <https://roscianomoto.it/qj-motor/33117-qj-motor-srv-125.html> consultato il 29/10/2023
- <https://www.motociclismo.it/bmw-s-1000-rr-2019-segreti-ciclistica-72825> consultato il 30/10/2023
- <https://duomoto.it/differenza-forcelle-standard-e-rovesciate/> consultato il 30/10/2023
- <https://www.ebay.it/itm/142920762531> consultato il 31/10/2023
- <https://www.bmw-motorrad.it/it/engineering/detail/suspension/telelever.html#/section-altra-tecnologia-nel-dettaglio> consultato il 4/11/2023
- <https://www.dueruote.it/moto-scooter/bmw/bmw-r-1200-gs-1145-4/> consultato il 4/11/2023
- <https://www.tuningblog.eu/it/kategorien/tuning-wiki/externer-ausgleichsbehaelter-390532/> consultato il 9/11/2023
- <https://www.motoblog.it/post/959961/bmw-r-1200-c-nuove-indiscrezioni-sulla-erede> consultato il 10/11/2023