

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale  
«Analisi cinematica e dinamica dei sistemi  
sospensivi Carc e Paralever»***

Tutor universitario: Prof. Matteo Massaro

Laureando: *Fabbris Francesco*

Padova, 26/09/2023

**Paralever e Carc** sono due tipi di sistemi sospensivi utilizzati in diversi motocicli con **trasmissione ad albero** (invece della catena). In particolare, sono meccanismi a **quadrilatero articolato**.

Tali sistemi svolgono le funzioni di guida per la ruota posteriore e di trasmissione della potenza alla ruota.



In figura: a **sx** forcellone "Paralever" di BMW nineT Scrambler, a **dx** forcellone "Carc" di Moto Guzzi Bellagio



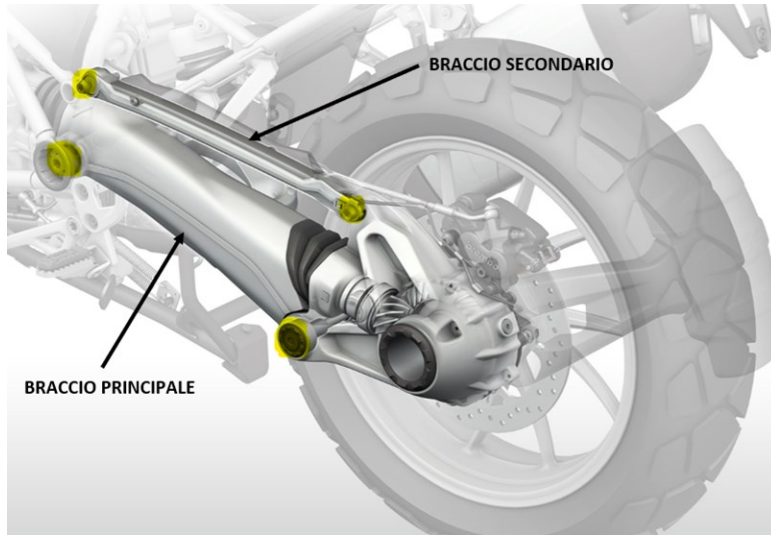
Figure da **sx** a **dx**: evoluzione temporale “Paralever” BMW, nella prima immagine è mostrata la prima versione (BMW R 100 GS, con asta di reazione in basso) introdotta nel **1987**, nella terza immagine si mostra la seconda versione migliorata (asta di reazione sopra) introdotta nella BMW R 1200 GS, nel **2004**. Link: <https://motofomo.com/bmw-paralever-carc-tetra-lever/>



In figura: unica versione di “Carc” Moto Guzzi, introdotta nel 2005.



In figura: “Monolever” di BMW R80, utilizzato prima dell’introduzione del paralever.

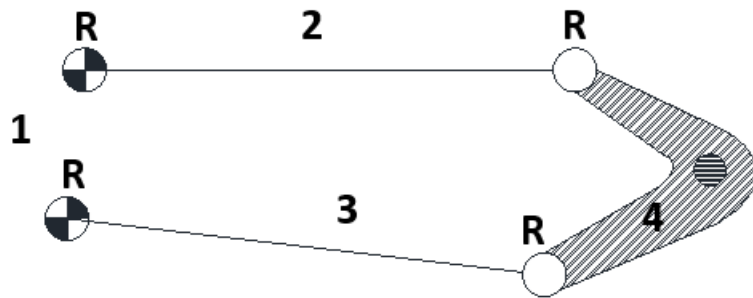


Il meccanismo è un quadrilatero articolato, di tipo **RRRR**, formato da:

4 membri (m=4):

- **1 telaio**, ovvero il corpo della moto (**1**).
- **2 bilancieri**, cioè il *braccio principale* (**3**) e il *braccio secondario* (**2**).
- **1 biella**, (**4**) collegata al centro ruota.

4 coppie rotoidali (R=4) che collegano tra loro i membri.



Calcolo gradi di libertà meccanismo (gdl):

$$m=4, R=4$$

$$n = 3(4 - 1) - 2 \cdot 4 = 1$$

**N.B:** le coppie rotoidali del braccio principale e del braccio secondario che si collegano alla biella non stanno sul centro ruota.

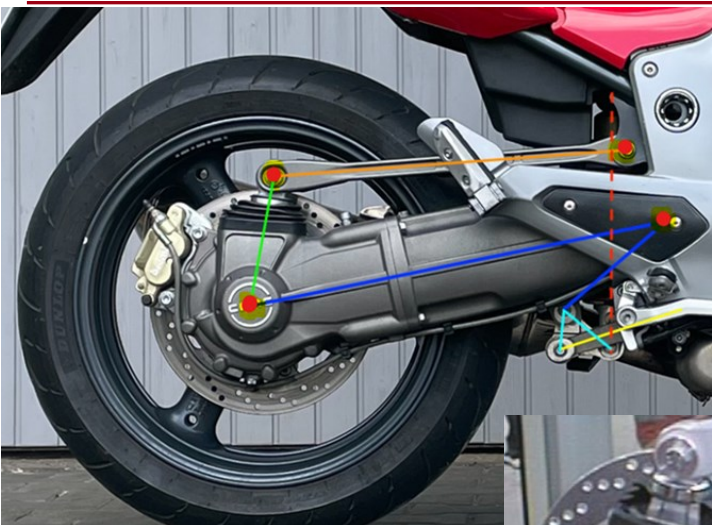
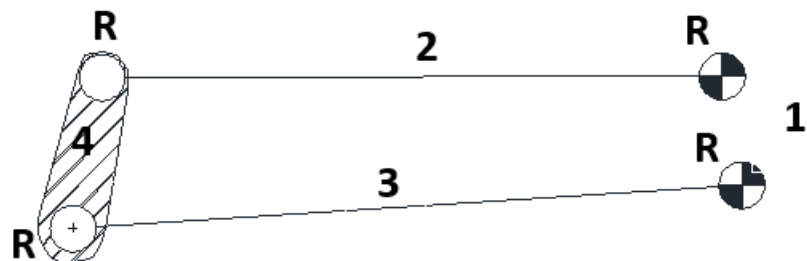


Figura di dx: ingrandimento della biella



Il meccanismo anche in questo caso è un quadrilatero articolato di tipo **RRRR** formato da:

4 membri (m=4):

- **1 telaio, (1)** ovvero il corpo della moto.
- **2 bilancieri**, il *bilanciere inferiore principale (3) collegato sia al telaio che alla ruota posteriore con coppie rotoidali*, il *bilanciere superiore più snello (2)*.
- **1 biella, (4)** nascosta e sporge appena dal carter, in prossimità del punto di attacco del bilanciere superiore.

4 coppie rotoidali (R=4) che collegano tra loro i membri.

**N.B:** la coppia rotoidale di collegamento tra il bilanciere inferiore e la biella è sovrapposta al centro ruota.

Calcolo gradi di libertà meccanismo (gdl):

$$m=4, R=4$$

$$n = 3(4 - 1) - 2 \cdot 4 = 1$$

Per la rappresentazione schematica del **meccanismo del retrotreno** del Paralever, è stato utilizzato il software di simulazione Working Model (WM); sono state usate le seguenti **dimensioni rappresentative**:

**Moto:** *BMW R nineT scrambler 2023*

- RUOTE: R17 170/60, per cui  $D_{cerchio} = 17 \text{ pollici} = 0,4318 \text{ m}$

$$h_{pneumatico} = 170 \cdot \frac{60}{100} = 0,1 \text{ m}$$

$$D_{cerchio+gomma} = 0.636 \text{ m} \quad R_{cerchio+gomma} = \frac{D_{cerchio+gomma}}{2} \cong 0.31 \text{ m}$$

- MASSA:  $m = (223 + 70) \text{ kg} = 293 \text{ kg}$  (223 Kg = massa moto e 70 Kg = massa pilota)
- DIMENSIONI:  $w$  (passo moto) = **1,527 m**

$$b \text{ (distanza baricentro da ruota posteriore)} = \frac{w}{2} = 0,764 \text{ m}$$

$$h \text{ (altezza baricentro)} = 0,7 \text{ m}$$

I valori di  $b$  e  $h$  sono stati assunti.

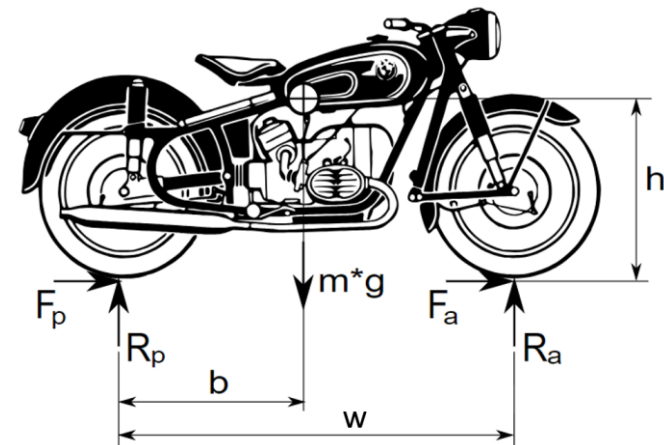
- LUNGHEZZA FORCELLONE:

$$L \cong 0,5 \text{ m}$$

In linea con le dimensioni reali, per semplicità di rappresentazione.



www.dii.unipd.it

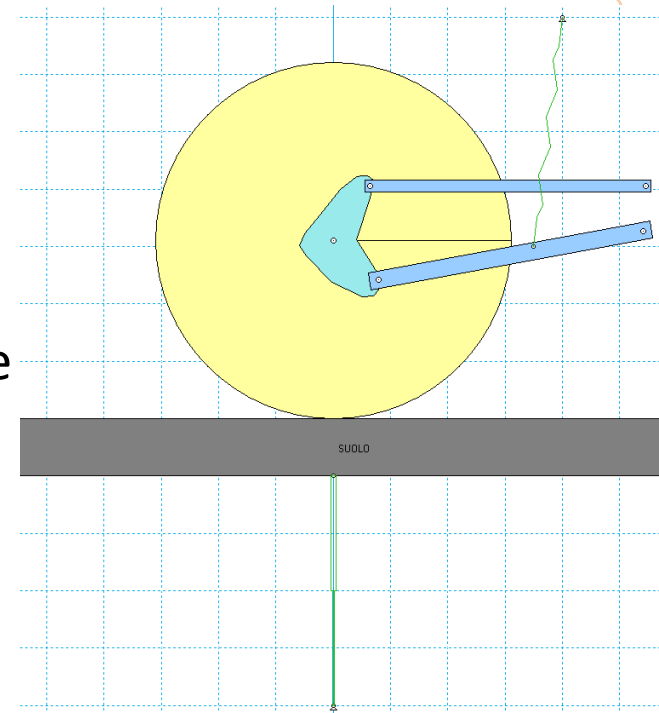


$$\tau_{Vm, Vy} = \frac{Vm \text{ (velocità escursione molla)}}{Vy \text{ (velocità verticale ruota)}}$$

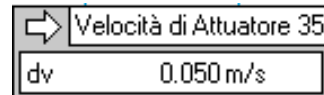
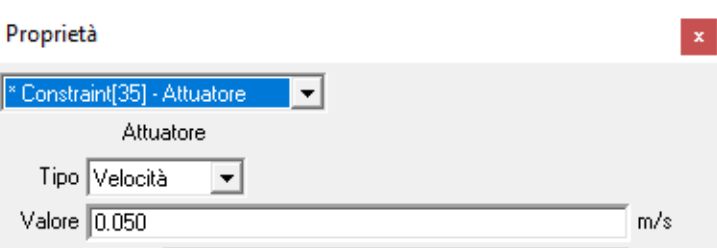
Per quanto riguarda le sospensioni a quadrilatero il rapporto di velocità varia **tra 0,25 e 0,5**

unipd.it

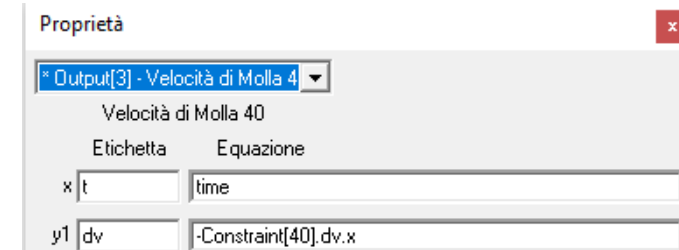
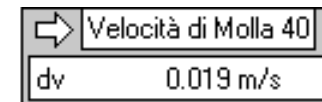
Per determinare il rapporto in WM si è collegato un **attuatore alla base** del terreno, ciò ha permesso di controllare, e mantenere costante la velocità verticale di salita del suolo e del centro ruota  **$Vy = 0,05 \text{ m/s}$** . Per quanto riguarda  **$Vm$** , è stata misurata con i comandi del software.



- Si rappresenta di seguito rispettivamente, la proprietà imposta dall'attuatore in questo caso la velocità costante, il relativo valore a schermo in tempo reale, e la variabile che ne contiene il valore ( **$Vy = \text{Constraint}[35].dv.x$** ).

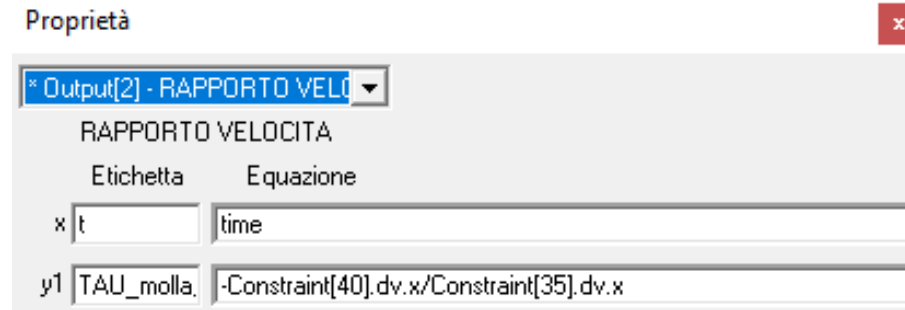


- Si rappresenta qui a destra, il valore mostrato in tempo reale della velocità della molla  **$Vm$**  e la variabile contenente il valore ( **$Vm = -\text{Constraint}[40].dv.x$** ).



- Si prende poi un blocco di visualizzazione a schermo e aprendo le proprietà si inserisce all'interno di "Equazione", il valore istantaneo che si vuole mostrare, in questo caso il rapporto di velocità

$$\tau_{V_m, V_y} = \frac{V_m}{V_y}, \text{ dato quindi da } \mathbf{-Constraint[40].dv.x/Constraint[35].dv.x.}$$



Durante la simulazione il **rapporto di velocità** varia da  $\tau_{V_m, V_y} = \mathbf{0.370}$  a  $\tau_{V_m, V_y} = \mathbf{0.379}$  per un'**escursione verticale** del posteriore di **10 cm**. I valori ottenuti risultano attendibili ( $0.25 < \tau < 0.5$ ).  $\tau_{V_m, V_y} = \mathbf{0.370}$  è il rapporto di velocità nella **condizione di equilibrio statico** (quando la moto è appoggiata a terra).

RAPPORTO VELOCITÀ	
TAU_molla,centroruota	0.370

RAPPORTO VELOCITÀ	
TAU_molla,centroruota	0.379



Si definisce il valore di  $k$  in modo da avere una  $k_r = 15000 \frac{N}{m}$  nella condizione di equilibrio statico.  
Si sottolinea inoltre che verrà **trascurato il precarico della molla**.

- Per avere condizione di equilibrio statico, si impone l'equilibrio verticale:

$$\Sigma F_y = 0$$

$$F = F_{el} \quad F_{el} = k_r \cdot \Delta l$$

$$\text{Con } F = \text{carico statico (reazione suolo)} = m \cdot g \cdot \left(\frac{w-b}{w}\right) \cong 1437 N$$

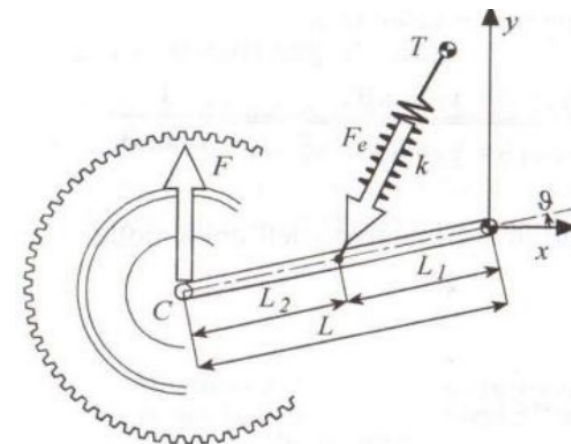
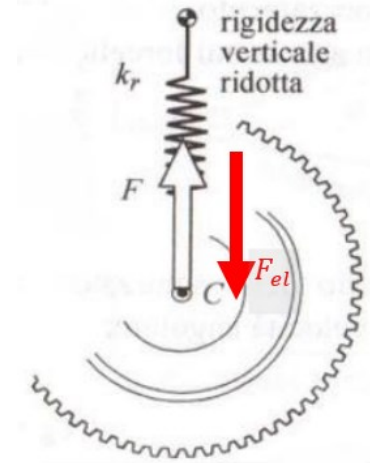
$$\Delta l = \frac{F}{k_r} = 0,0958 m$$

- Con  $\tau_{Vm, Vy} = 0.370$  (rapporto velocità in condizione Equil. Statico)

$$F_e = \frac{F}{\tau_{Vm, Vy}} \cong 3884 N$$

$$k = \frac{k_r}{\tau_{Vm, Vy}^2} = 109,6 \frac{kN}{m}$$

$$\Delta l = \frac{F_e}{k} = 0,0354 m$$



- Si rappresenta il **diagramma F-S**. Si entra quindi in proprietà e si modifica l' "etichetta" degli assi e si inserisce l'equazione delle relative variabili.

Nel diagramma **F-S**, la **pendenza locale** è  $k_r$ =rigidezza ridotta verticale/a terra (F ed S sono tra loro proporzionali).

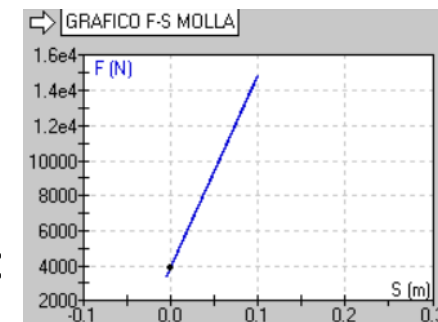
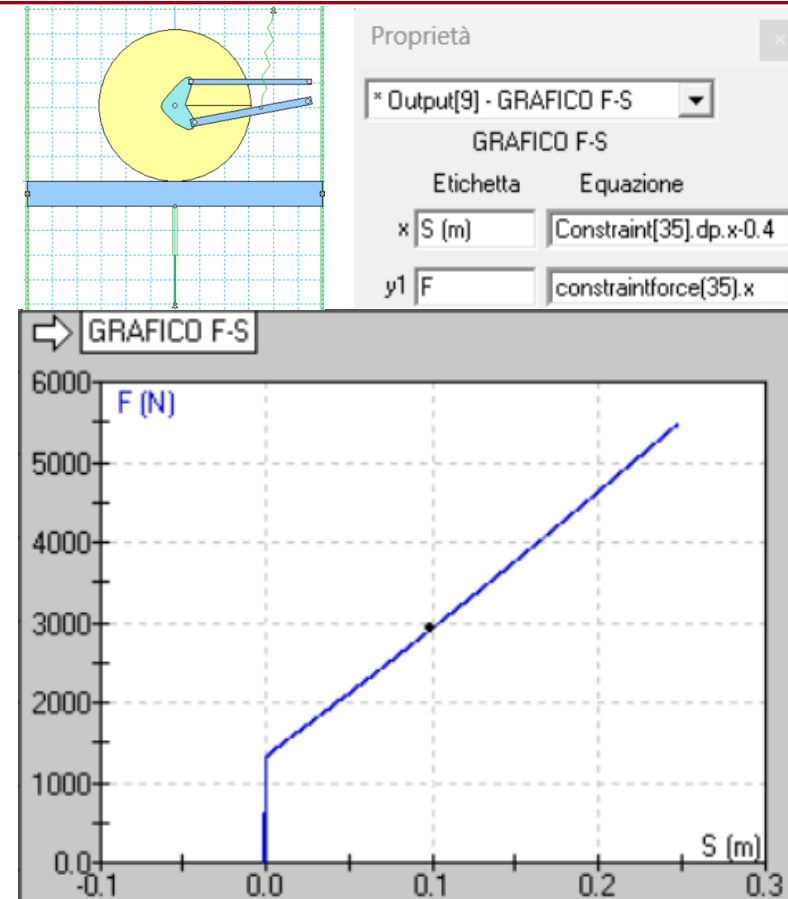
- Per completare la verifica, si **calcola** la pendenza  $k_r$  in corrispondenza della **configurazione di equilibrio statico**. Per eseguire il calcolo si ferma la simulazione a 2 precisi istanti vicino alla configurazione e si prendono i valori di F

ed S di questi 2 frame.  $k_r = \frac{F_2 - F_1}{S_2 - S_1} \cong 15000 \frac{N}{m}$

**Risulta** quindi **verificato** il valore di  $k_r$ .

In generale dato che  $\tau_{Vm, Vy}$  varia di poco con lo spostarsi dell'attuatore, la pendenza (e quindi  $k_r$ ) risulta pressoché costante.

È inoltre possibile eseguire lo stesso tipo di check per quanto riguarda il  $k$  reale della molla:



## SCHEMA CARC:

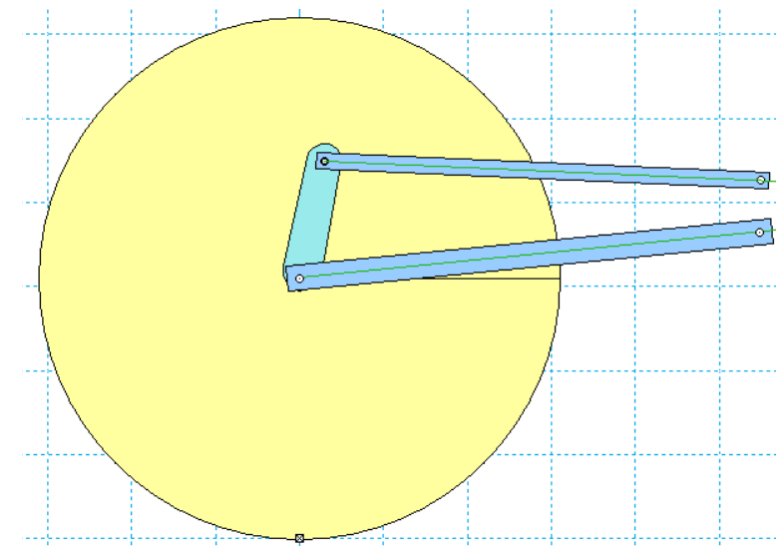
- Per un confronto corretto si assumono le **stesse dimensioni** caratteristiche e **stesso peso** del «**BMW R nineT scrambler 2023**», in particolare,

$R_{ruota} \cong 0.31 \text{ m}$ ,  $m = 223 + 70 \text{ kg}$ ,  $w = 1,527 \text{ m}$ ,  $b = \frac{w}{2} = 0,764 \text{ m}$ ,  $h = 0,7 \text{ m}$ , e si cerca di mantenere la lunghezza del forcellone L circa uguale.

- Si crea lo schema del Carc affinché sia **dinamicamente simile** al **Paralever**, in particolare è rilevante mantenere la stessa  $k_r = 15000 \frac{N}{m}$ , rigidezza a terra, in condizione di **equilibrio statico**.

Come si procede:

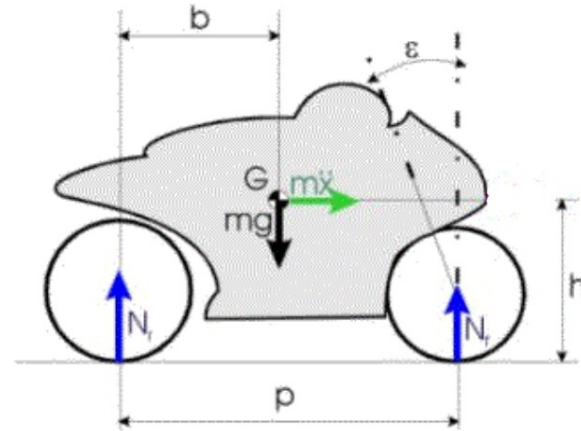
- costruzione*: il **braccio inferiore** deve passare **nel centro-ruota** (coppia rotoidale sul centro).
- C**: centro di istantanea rotazione deve essere **lo stesso del Paralever**, in **condizione di equilibrio statico** (Velocità costante,  $a_x = 0 \text{ m/s}^2$ )



Si simula ora la manovra di **accelerazione della motocicletta**. In particolare viene simulata applicando sul retrotreno dei 3 modelli le **forze** che caratterizzano questa manovra e la **coppia**:

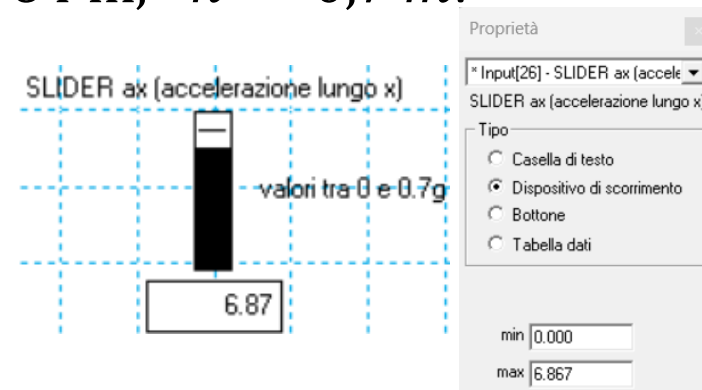
## ➤ FORZE

- FORZA LONGITUDINALE:  $F_x = m \cdot a_x$
- CARICO STATICO (FORZA VERTICALE):  $F_{y_{statico}} = m \cdot g \cdot \left(\frac{w-b}{w}\right) = 1437 \text{ N}$
- TRASFERIMENTO DI CARICO (FORZA VERTICALE):  $F_{y_{trasfcarico}} = m \cdot a_x \cdot \frac{h}{w}$



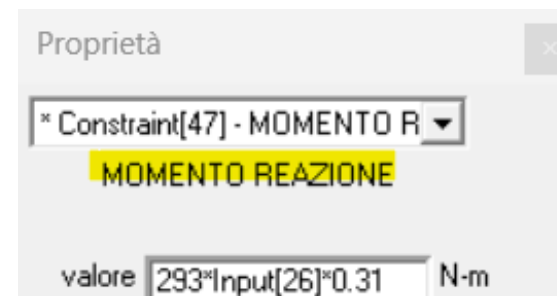
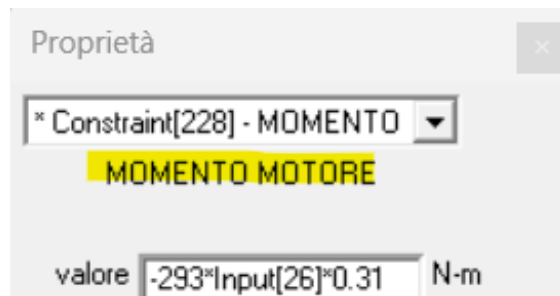
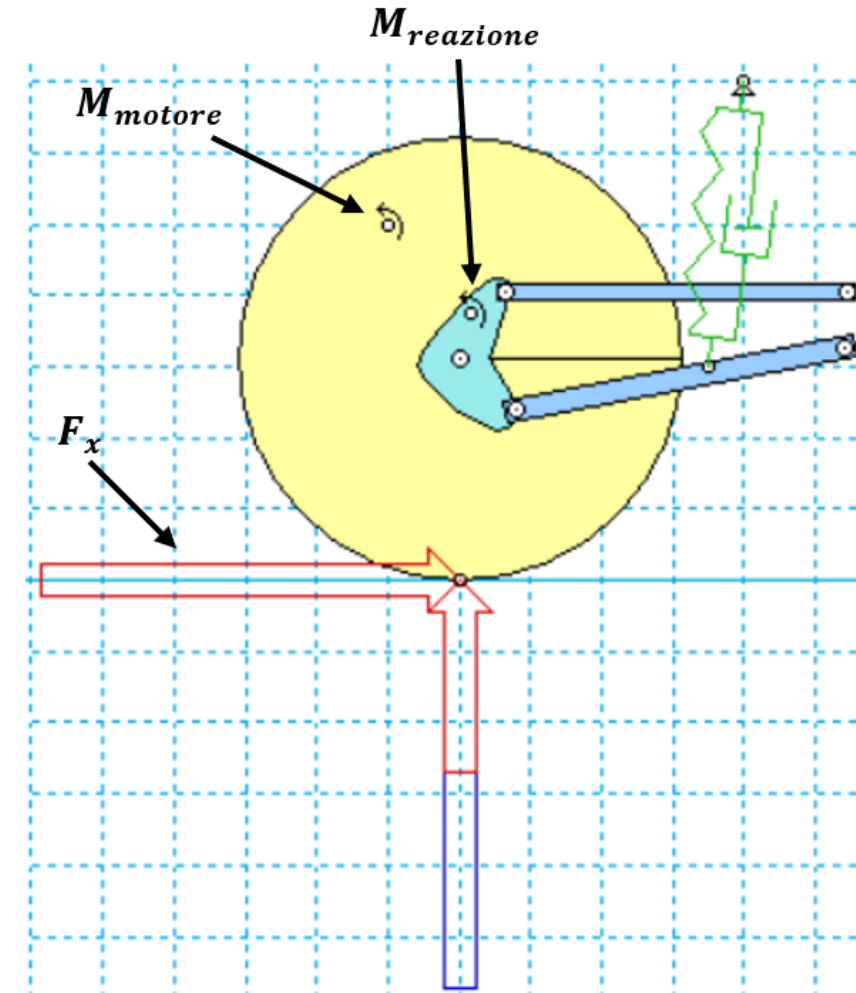
Nei 3 schemi a confronto si mantengono gli **stessi pesi e dimensioni generali** del motociclo, per avere un confronto 'fair', con  $m = 293 \text{ kg}$ ,  $g = 9,81$ ,  $w = 1,527 \text{ m}$ ,  $b = \frac{w}{2} = 0,764 \text{ m}$ ,  $h = 0,7 \text{ m}$ .

$a_x = \left[\frac{m}{s^2}\right]$  è l'accelerazione orizzontale della moto e viene fatta variare da 0 a  $0,7g$  ( $= 6,867 \frac{m}{s^2}$ ), tramite uno **slider**, che controlla il valore dell'accelerazione nelle simulazioni. La variabile che contiene il valore è  $a_x = \text{Input}[26]$ .



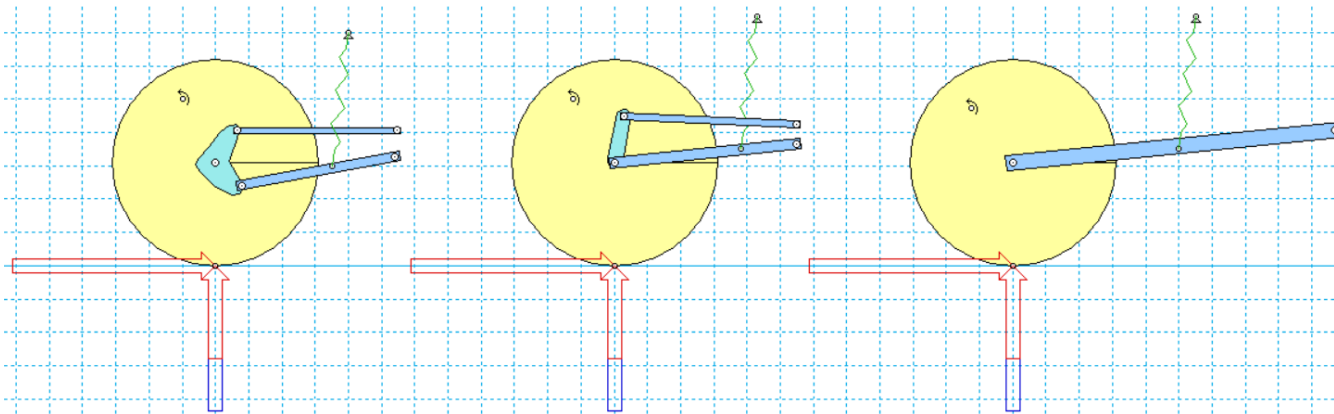
Si applicano le forze e i momenti al retrotreno:

- MOMENTO MOTORE  $M_{motore}$ :  
 Applicata la forza di spinta orizzontale  $F_x$  alla base, che consiste nella forza che il suolo esercita contro la ruota, se applicato anche il corretto valore del  $M_{motore} = F_x \cdot R_{ruota}$ , risulta che **forza e coppia si compensano**, facendo girare la ruota a **velocità costante**.
- MOMENTO DI REAZIONE  $M_{reazione}$ :  
 In fase di accelerazione la **biella reagisce** con un **momento opposto** a quello motore (principio di azione e reazione), nel centro ruota, che tenderebbe a far ruotare in senso antiorario la biella, che nella pratica **manda in trazione l'asta di reazione** (parte di quadrilatero superiore).



Avviata la simulazione è possibile tramite lo slider modificare l'accelerazione e osservare come cambia il comportamento delle 3 sospensioni.

**N.B:** I tre forcelloni hanno **stesso C** (centro istant. rotazione) e stessa rigidezza ridotta a terra  $k_r = 15000 \text{ N/m}$  in **condizione di equilibrio statico**, si specifica inoltre che hanno **ANTI – SQUAT RATIO = 0,915**, per cui secondo la teoria **per  $a_x \neq 0$** , la sospensione dovrà **comprimersi durante l'accelerazione**.



Verranno in particolare osservati i comportamenti per 3 valori rappresentativi di  $a_x$  (accelerazione longitudinale), controllata dallo slider:

- 1) **SOLO CARICO STATICO:  $a_x = 0$**
- 2) **BASSA ACCELERAZIONE MOTO:  $a_x = 0,3 \cdot g = 2,943 \text{ m/s}^2$**
- 3) **ALTA ACCELERAZIONE MOTO:  $a_x = 0,7 \cdot g = 6,867 \text{ m/s}^2$**

Nella presente relazione è stata svolta una **revisione** e **verifica** dei principali tipi di **sospensioni** con **trasmissione ad albero**: Paralever, Carc e Monolever.

Attraverso le simulazioni in WM è stato possibile verificare che i 3 modelli, **per piccole accelerazioni**, si comportano nello stesso modo, infatti per tali valori si possono considerare come **meccanismi equivalenti**, dato che hanno lo stesso **centro di istantanea rotazione**, la stessa **rigidezza a terra** e lo stesso **rapporto di anti-squat**.

Mentre per **alte accelerazioni**, quindi a distanza da configurazione di equilibrio statico, i 3 modelli si **comportano diversamente**, dato che presentano differenti centri di istantanea rotazione. In particolare nel Paralever e nel Carc **variano** i centri di rotazione **C**, facendo cambiare la risposta dei 2 retrotreni.