

# 1. ORGANI DI TRASMISSIONE DEL MOTO

Abbiamo visto che lo scopo di un motore è creare del movimento rotatorio. L'albero motore però si trova all'interno del dispositivo e nella maggior parte dei casi il movimento serve per mettere in rotazione qualcos'altro, ad esempio un'elica, le ruote della macchina, l'albero a camme. In alcuni casi l'albero motore è allineato con l'albero che deve prelevare il moto; in questo caso basta che uno dei due alberi sia la prosecuzione dell'altro. In altri casi i due alberi hanno direzioni diverse oppure devono ruotare a velocità differenti.

In questo capitolo studieremo quei dispositivi che consentono di ridurre l'attrito di un albero in rotazione, variare il numero di giri e trasmettere il moto da un elemento all'altro.

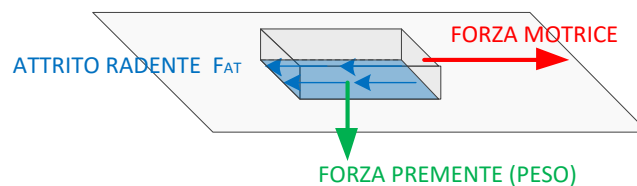
## 1.1. *Ridurre l'attrito: i cuscinetti*

La ruota è una delle più grandi invenzioni dell'uomo perché consente di ridurre l'attrito. L'attrito è una forza non conservativa, cioè l'energia cinetica che a causa dell'attrito si trasforma in calore non può più essere ripristinata. Si dice che l'energia cinetica si dissipa sotto forma di calore.

### 1.1.1. I tipi di attrito

Sappiamo infatti dai corsi di fisica che esistono diversi tipi di attrito:

- **ATTRITO RADENTE:** è il tipo di attrito causato da una superficie che striscia su un'altra (ad esempio una cassa che viene spinta sul pavimento).

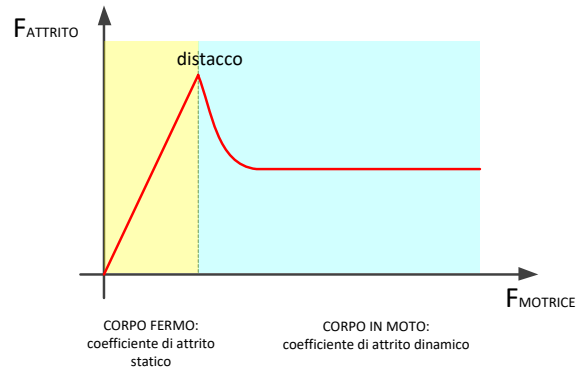


L'attrito radente dipende dalla forza con cui l'oggetto viene premuto sulla superficie (nel disegno questa forza è il peso) e dal materiale. In realtà dipende anche dalla superficie di strisciamento: se la superficie è molto piccola l'attrito sarà maggiore perché il peso sarà tutto concentrato in una zona molto piccola. Di solito però si trascura l'effetto dell'estensione della superficie e la formula utilizzata per il [calcolo](#) è:

$$F_{AT} = \mu \cdot F_{\perp}$$

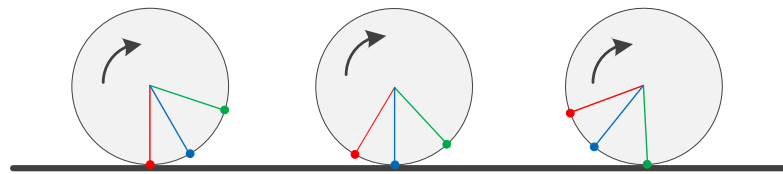
dove  $F_{AT}$  è la forza d'attrito (considerata applicata nel baricentro),  $\mu$  è il coefficiente di attrito (che dipende dai materiali di cui sono fatte le superfici) e  $F_{\perp}$  è la forza premente (in questo caso il peso). Il coefficiente di attrito non è costante. Non solo cambia in base al materiale, ma anche in base al fatto che l'oggetto sia o meno in movimento. All'aumentare della forza motrice, aumenta anche la

forza di attrito che le si oppone. Ad un certo punto però la forza di attrito raggiunge il suo massimo valore e da quel momento in poi non è più in grado di opporsi alla forza motrice. L'oggetto si mette in moto e il coefficiente di attrito (che a questo punto prende il nome di attrito dinamico) diminuisce.



- **ATTRITO VOLVENTE:** questo tipo di attrito è tipico della ruota. Sappiamo che la ruota rotola senza strisciare, per lo meno nel caso ideale. Sappiamo però che anche la ruota ha un certo attrito. Se così non fosse le ruote non si riscalderebbero come invece fanno dopo un lungo periodo di funzionamento. L'attrito di un corpo che rotola è molto inferiore a quello di un oggetto che striscia, ma è comunque presente.

Innanzitutto possiamo osservare che una ruota ideale (che non si deforma e rotola senza strisciare) ha di volta in volta un solo punto di contatto con il terreno:

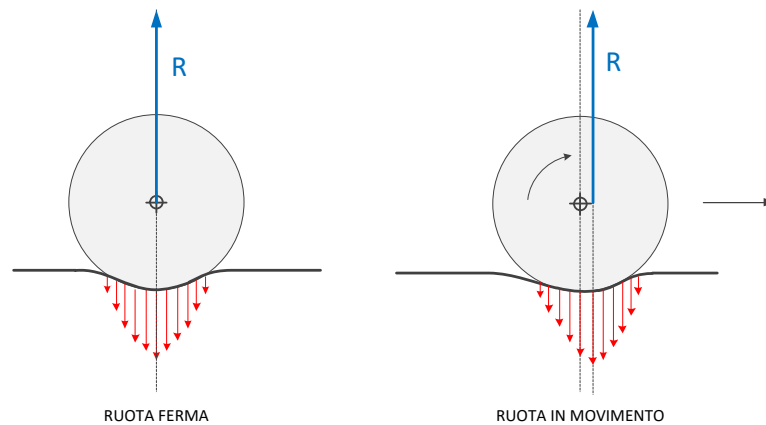


Se le cose stessero veramente così, la ruota rotolerebbe senza attrito (salvo quello legato alla presenza dell'aria).

Nella realtà però le cose sono differenti. Sappiamo che la forza peso viene contrastata dalla reazione vincolare della superficie sulla quale l'oggetto preme. Questa forza di reazione viene anche chiamata **FORZA NORMALE**. Il termine normale viene utilizzato come sinonimo di perpendicolare e in questo caso indica il fatto che la reazione è sempre perpendicolare alla superficie. La superficie su cui poggia un oggetto (in questo caso una sfera) si deforma leggermente a causa del carico che l'oggetto esercita sulla superficie.

Se la sfera è ferma, il suo peso deforma la superficie sulla quale essa poggia in modo simmetrico e quindi la reazione normale passa per il centro della sfera.

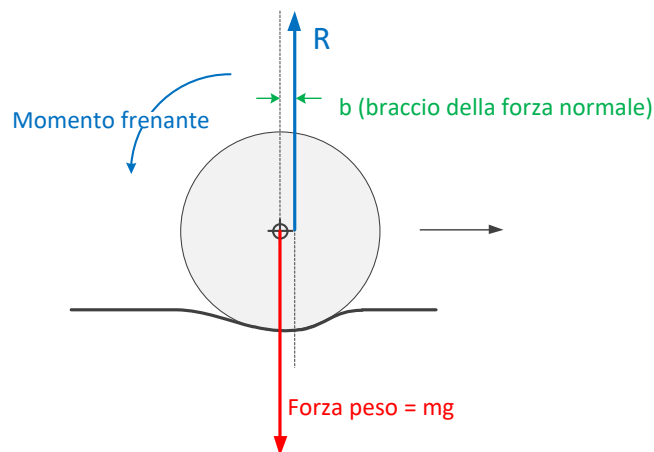
Se però sfera si muove, il terreno si deforma maggiormente davanti alla sfera e quindi la reazione normale risulta spostata anteriormente:



In questo caso l'attrito, che dissipa l'energia cinetica del corpo, non è più una forza, ma un momento e la sua formula di calcolo è la seguente:

$$M_{frenante} = b \cdot mg$$

dove  $b$  è il braccio della forza di reazione e  $mg$  è la forza peso:

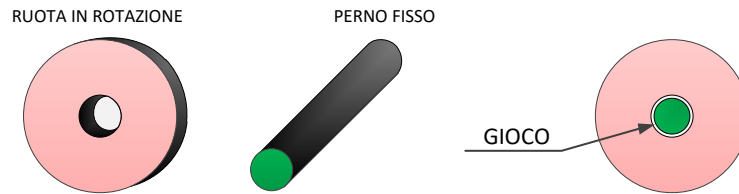


- **ATTRITO VISCOSO:** questo tipo di attrito è quello che abbiamo già studiato nella sezione precedente e che abbiamo chiamato resistenza aerodinamica. Si tratta dell'attrito esercitato da un fluido su un oggetto che si muove su di esso. Per questo capitolo l'attrito viscoso non è rilevante in quanto gli organi di trasmissione si trovano dentro al motore e non sono quindi investiti direttamente dal flusso d'aria.

### 1.1.2. Come è fatto un cuscinetto

Una ruota, come quella delle vecchie carrozze trainate dai cavalli, deve essere sempre collegata ad una struttura fissa. Le ruote della carrozza (che sono in rotazione) sono collegate al pianale (che invece non ruota). Questo significa che è necessario provvedere ad un sistema di accoppiamento tra la ruota e lo perno (o asse) che la sostiene.

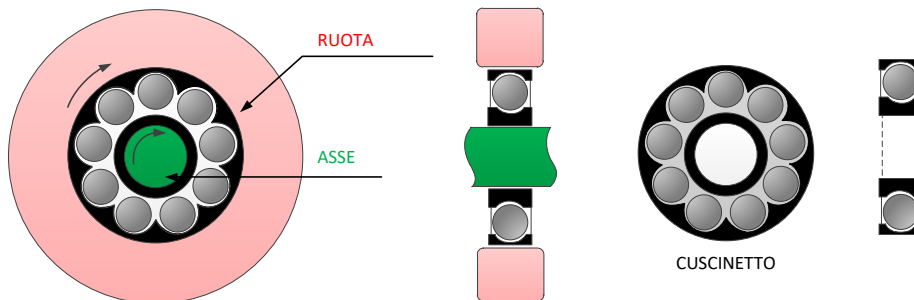
Possiamo immaginare, in una forma semplificata, che la ruota sia un disco forato e l'asse sia un cilindro che si infila nel buco del disco. L'asse deve essere un po' più piccolo del foro in modo che ci possa essere rotazione tra le due parti.



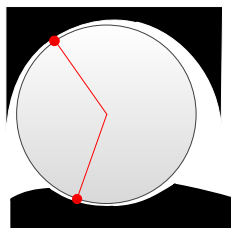
Un tempo l'accoppiamento ruota-asse veniva fatto rivestendo di metallo la superficie di sfregamento e mettendo del grasso come lubrificante. Questo sistema però consumava il materiale e già nell'ottocento è stato sostituito dal cuscinetto volante.

I cuscinetti sono formati da 3 componenti fondamentali:

- un anello esterno, più grande, che rimane fisso alla ruota
- un anello interno, più piccolo, che rimane fisso all'asse
- un certo numero di elementi che rotolano (possono essere sfere o rulli) tra i due anelli riducendo l'attrito
- un separatore che tiene distanti l'uno dall'altro gli elementi rotanti



Dall'immagine seguente possiamo capire perché il cuscinetto riduce così tanto l'attrito:

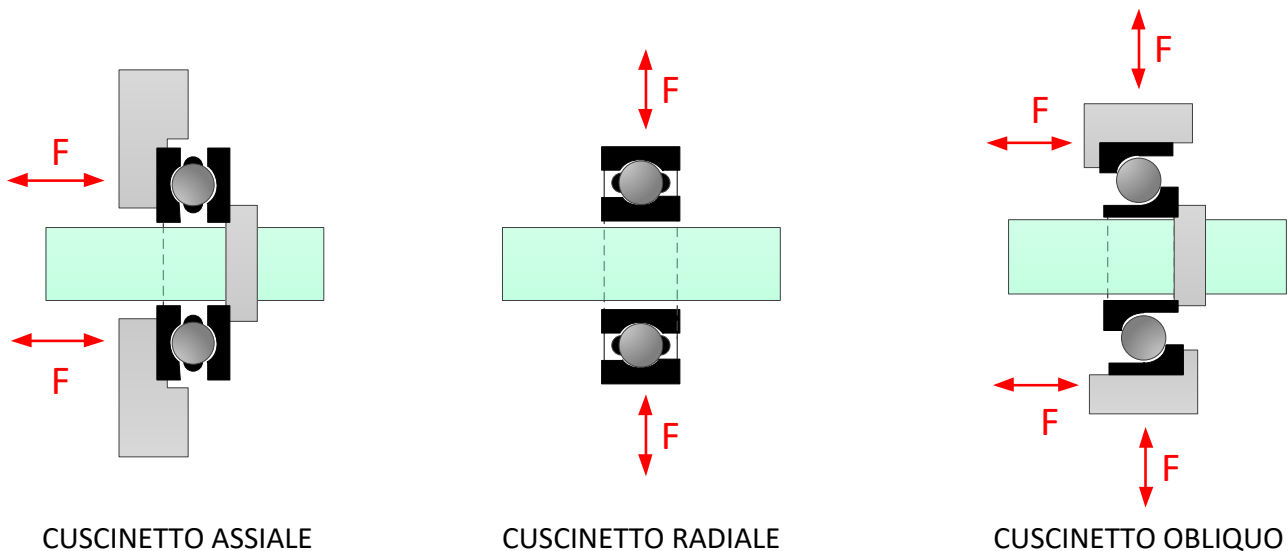


I punti di contatto della sfera con i dischi sono solo 2, quindi l'attrito (almeno nel caso ideale) è puramente volante.

### ***1.1.3. Tipi di cuscinetti***

I cuscinetti possono essere costruiti in moltissimi modi per sostenere diversi tipi di spinte. Possiamo suddividerli in tre categorie:

- **CUSCINETTI RADIALI:** sono in grado di sopportare forze dirette perpendicolarmente all'asse
- **CUSCINETTI ASSIALI:** sono in grado di sopportare forze dirette lungo l'asse di rotazione
- **CUSCINETTI OBLIQUI:** sono in grado di sopportare forze dirette in entrambe le direzioni.



La differenza tra questi tipi di cuscinetto sta nel modo in cui sono costruiti gli anelli interno ed esterno e la scelta di adottarne un tipo piuttosto che un altro dipende dal tipo di cariche che il macchinario deve sopportare.

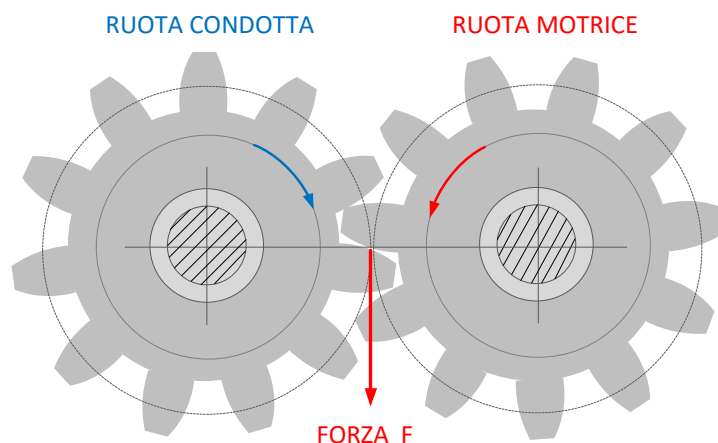
## 1.2. *Trasmettere il moto tra due alberi.*

Con il termine trasmissione si intende il passaggio del moto da un oggetto in rotazione (che normalmente si muove grazie ad un motore) verso altri oggetti che altrimenti sarebbero fermi. Un esempio classico di trasmissione del moto è quello utilizzato nell'automobile per far girare le ruote.

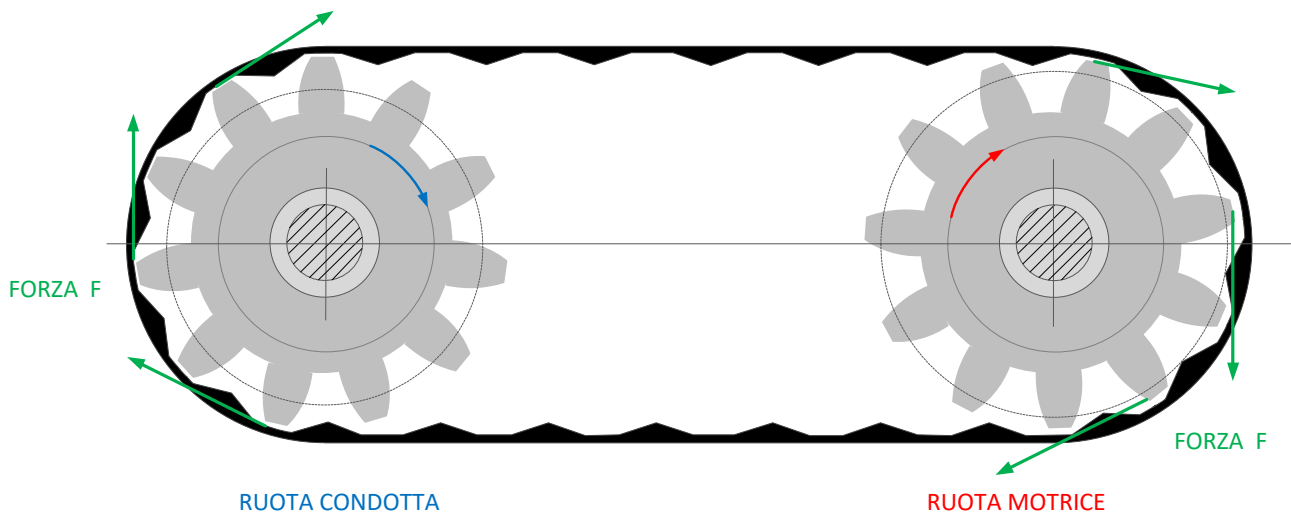
Trasmettere il moto significa sostanzialmente collegare un albero motore con un albero condotto. Il termine motore indica che il primo albero è in rotazione; il termine condotto indica che il secondo albero vien trascinato dal primo.

Il principale organo per trasmettere il moto da un albero ad un altro sono le ruote dentate o, più semplicemente, ingranaggi.

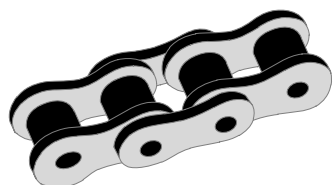
Esse sono ruote costituite da una corona di denti che ingranano gli uni sugli altri. I denti della **RUOTA MOTRICE** spingono sui denti della **RUOTA CONDOTTA** passandole la forza  $F$ .



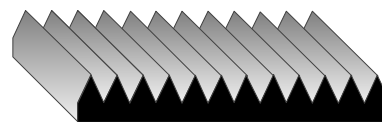
Come si può vedere dall'immagine, la ruota motrice spinge quella condotta facendola ruotare in senso opposto. Se è necessario mantenere lo stesso senso di rotazione bisogna usare una cinghia di trasmissione o una catena di trasmissione. Questi due dispositivi sono diversi, ma funzionano secondo lo stesso principio: entrambi ingranano sui denti della ruota motrice che trasmette loro un moto rotatorio; esse quindi ingranano sulla ruota condotta trascinandola e facendola ruotare. Dall'immagine seguente si può osservare come il senso di rotazione questa volta rimanga invariato:



La differenza tra una cinghia e una catena sta nel fatto che la cinghia (come quella rappresentata nella figura precedente) è lievemente elastica ed è liscia all'esterno e zigrinata all'interno, in modo da ingranare con i denti della ruota. La catena invece (come quelle usate nelle biciclette) è costituita da anelli di metallo e si inseriscono tra i denti della ruota ingranando con essa. In generale, le cinghie sono più silenziose e meno costose, ma si rompono più facilmente delle catene e quindi richiedono più manutenzione.



CATENA DI TRASMISSIONE



CINGHIA DI TRASMISSIONE

### ***1.2.1. Come variare la velocità di rotazione***

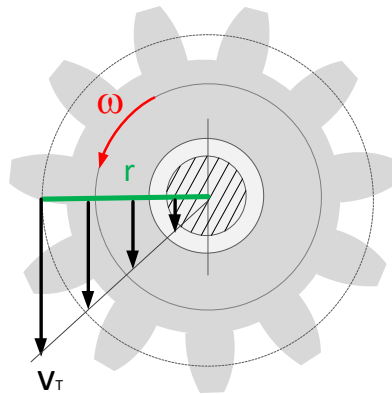
Con i dispositivi che abbiamo visto finora è possibile trasmettere il moto da un albero motore ad un albero condotto facendolo ruotare nello stesso senso o in senso opposto alla stessa velocità.

In questo paragrafo vedremo come è possibile cambiare la velocità di rotazione al fine di rallentare o accelerare l'albero condotto.

Il funzionamento di un riduttore (che rallenta l'albero condotto) o di un moltiplicatore (che accelera l'albero condotto) si basa sul principio che più un ingranaggio è grande più gira lentamente, più un ingranaggio è piccolo più gira velocemente.

Per capire questo concetto osserviamo che la ruota in rotazione possiede due velocità:

- La **VELOCITÀ ANGOLARE**  $\omega$ , ovvero quanti giri compie la ruota in un certo tempo. Questa velocità viene espressa in fisica in  $\frac{rad}{s}$  ma nelle applicazioni tecniche si preferisce parlare di giri al minuto (RPM). Questa velocità è uguale per tutti i punti della ruota dentata.
- La **VELOCITÀ TANGENZIALE**  $v_T$ , ovvero la velocità che un punto della ruota avrebbe se potesse muoversi in linea retta. Questa velocità varia da punto a punto e aumenta man mano che aumenta il raggio  $r$  della ruota.

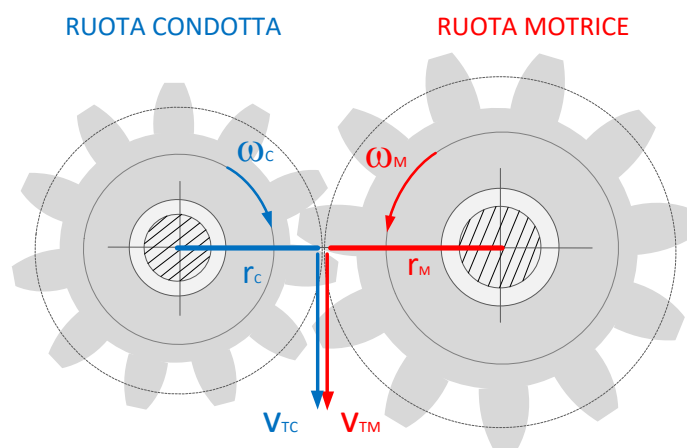


La formula che lega queste due velocità è la seguente:

$$v_T = \omega \cdot r$$

Quando una ruota ne spinge un'altra, il punto di contatto si trova una circonferenza che nell'immagine è rappresentata con una linea tratteggiata. Come raggio della ruota consideriamo la distanza tra i punti che stanno su questa circonferenza e il centro della ruota. Più la ruota è grande e più il raggio  $r$  aumenta.

Ora mettiamo questa ruota, che supponiamo sia motrice e abbia raggio  $r_M$ , in contatto con un'altra ruota che da essa riceve il moto e ha raggio  $r_C$ . La ruota più piccola viene chiamata **PIGNONE**, mentre la ruota più grande è chiamata **CORONA**.



La ruota motrice ha formula:

$$v_{TM} = \omega_M \cdot r_M$$

La ruota condotta ha formula:

$$v_{TC} = \omega_C \cdot r_C$$

Le due velocità tangenziali sono uguali poiché la ruota motrice passa proprio questa velocità alla ruota condotta. Possiamo quindi togliere il pedice dalla velocità tangenziali e mettere le formule in un sistema:

$$\begin{cases} v_T = \omega_M \cdot r_M \\ v_T = \omega_C \cdot r_C \end{cases}$$

Poiché il primo membro è uguale per le due formule, possiamo scriverne una sola:

$$\omega_M \cdot r_M = \omega_C \cdot r_C$$

Questa formula può essere anche scritta come:

$$\omega_C = \frac{r_M}{r_C} \cdot \omega_M$$

Il rapporto tra i raggi viene spesso indicato con la lettera  $t$  ed è chiamato **RAPPORTO DI TRASMISSIONE**.

$$\omega_C = \frac{r_M}{r_C} \cdot \omega_M$$

Possono capitare tre situazioni:

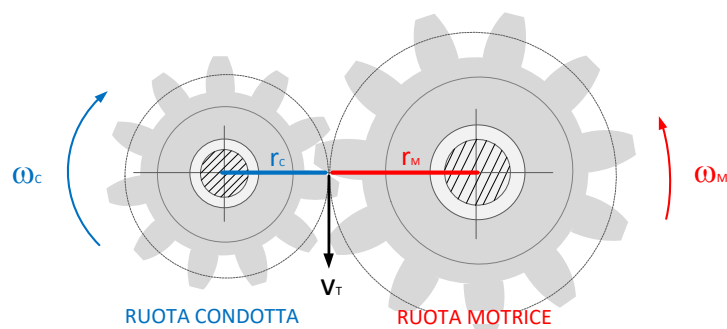
- $r_M = r_C$  ovvero le due ruote hanno la stessa grandezza. Se i due raggi sono uguali il rapporto di trasmissione è pari a 1 e quindi le due velocità angolari risultano uguali:

$$t = \frac{r_M}{r_C} = 1 \quad \rightarrow \quad \omega_C = 1 \cdot \omega_M \quad \rightarrow \quad \omega_C = \omega_M$$

- $r_M > r_C$  ovvero la ruota motrice è più grande della ruota condotta. In questo caso il rapporto di trasmissione risulta maggiore di 1. Moltiplicando la velocità angolare della ruota motrice per un numero  $t$  maggiore di 1, vediamo che la velocità angolare della ruota condotta aumenta:

$$t = \frac{r_M}{r_C} > 1 \quad \rightarrow \quad \omega_C = t \cdot \omega_M \quad \rightarrow \quad \omega_C > \omega_M$$

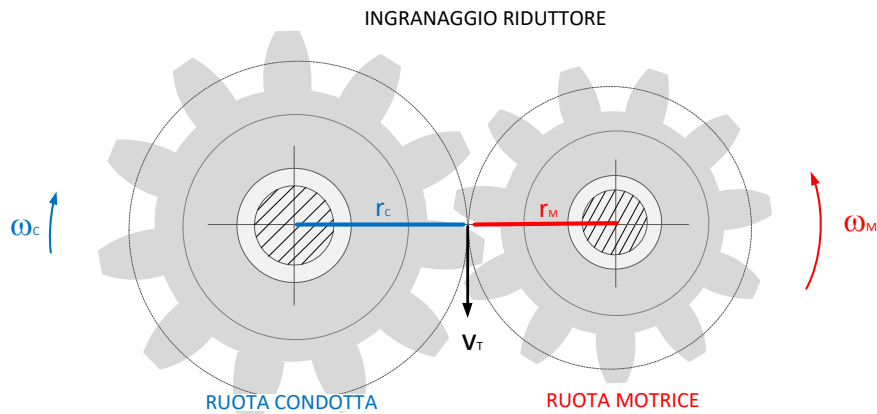
INGRANAGGIO MOLTIPLICATORE



- $r_M < r_C$  ovvero la ruota motrice è più piccola della ruota condotta. In questo caso il rapporto di trasmissione risulta minore di 1. Moltiplicando la velocità angolare della ruota motrice per un numero  $t$  minore di 1, vediamo che la velocità angolare della ruota condotta diminuisce:

$$t = \frac{r_M}{r_C} < 1 \quad \rightarrow \quad \omega_C = t \cdot \omega_M \quad \rightarrow \quad \omega_C < \omega_M$$



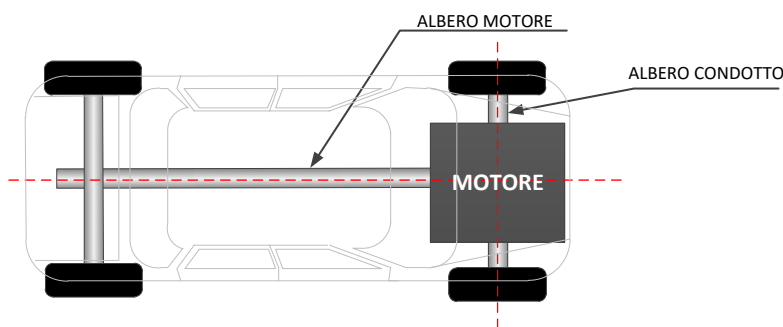


Lo stesso principio vale se il moto viene trasmesso tramite cinghie o catene. La catena trasmette la velocità angolare della ruota motrice alla ruota condotta e di conseguenza, al variare del raggio della ruota condotta, varia la sua velocità di angolare.

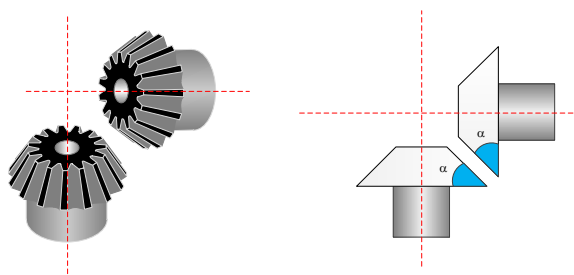
### 1.3. *Variare la direzione del moto*

Nei casi che abbiamo analizzato nel precedente paragrafo, gli alberi delle due ruote erano paralleli. Un esempio di alberi paralleli si trova nel motore a pistoncini: l'albero motore e l'albero a camme sono paralleli l'uno all'altro e quindi il moto può essere trasferito tramite una catena o una cinghia.

A volte però l'albero che deve essere trascinato non è parallelo a quello motore. Consideriamo ad esempio le ruote dell'automobile. L'albero motore corre longitudinalmente al veicolo; invece l'albero a cui sono collegate le ruote è trasversale al veicolo:

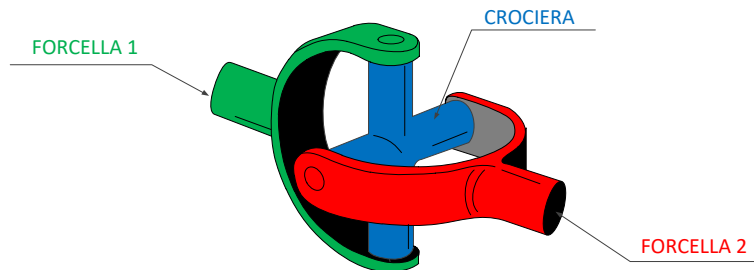


Il dispositivo più semplice per collegare due alberi non paralleli è la coppia conica. Si tratta di due ruote dentate che hanno la forma di un tronco di cono. I denti della ruota sono ricavati sulla superficie laterale del cono. Se le superfici laterali sono inclinate di  $45^\circ$ , i due alberi risultano perpendicolari:

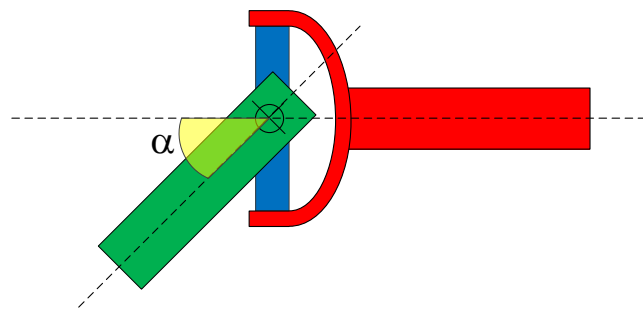


Cambiando gli angoli della superficie conica, cambia l'angolo con cui gli alberi sono sfalsati l'uno rispetto all'altro. Se l'angolo non è fisso ed è necessario cambiarlo durante l'utilizzo, è possibile usare un dispositivo chiamato giunto cardanico o, più semplicemente, cardano.

Nella sua forma più elementare è costituito da una **CROCIERA** (due tubi uniti a forma di croce) alle cui estremità sono collegate due **FORCELLE** che giacciono in due piani perpendicolari.



La rotazione di una forcella viene trasmessa all'altra forcella mantenendo lo stesso verso di rotazione. Il vantaggio di questo sistema è che le forcelle possono essere collegate con un angolo qualunque:



## 1.4. *Il riduttore*

In questo paragrafo cercheremo di capire cosa succede quando viene ridotto il numero di giri di un dispositivo.

Il numero di giri (espresso dalla velocità angolare  $\omega$ ) è legato alla potenza e alla coppia dalla formula seguente:

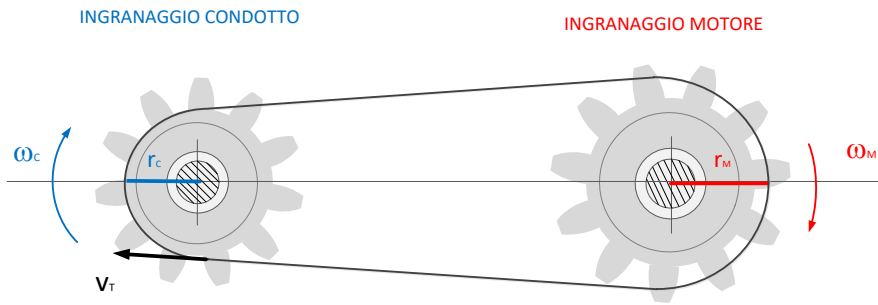
$$P = \omega \cdot C$$

A sua volta la coppia è legata all'accelerazione: possiamo infatti vederla come una forza applicata ad una certa distanza dal centro di rotazione e sappiamo che l'applicazione di una forza crea un'accelerazione. Dunque, **PIÙ COPPIA SIGNIFICA PIÙ ACCELERAZIONE**, cioè aumento di velocità.

Per capire questo concetto, consideriamo come funziona la trasmissione del moto in una bicicletta dotata di cambio anteriore e posteriore.

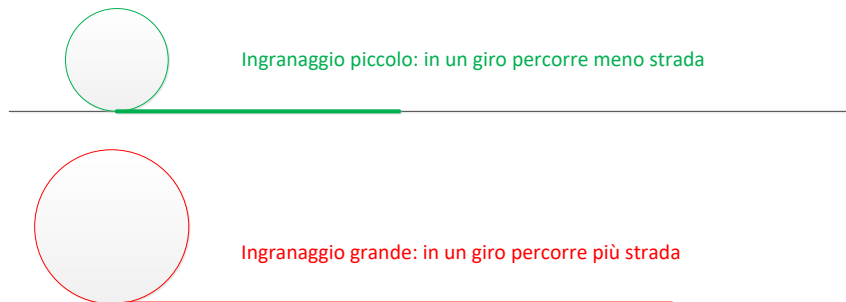
I pedali della bicicletta sono fissati sull'ingranaggio anteriore (posto sotto al sellino). Quella è la ruota motrice del nostro sistema. La chiameremo ingranaggio motore per evitare di confonderla con le ruote

della bicicletta. All'ingranaggio motore anteriore è collegato, tramite una catena, l'ingranaggio condotto posteriore che è fisso sulla ruota posteriore della bicicletta.



L'ingranaggio motore prende il moto dal ciclista: per far fare un giro completo all'ingranaggio, il ciclista deve dare alla bicicletta una certa quantità di potenza che dipende da quanta strada deve percorrere la bicicletta in un giro.

Ad ogni giro, un ingranaggio motore piccolo deve fare meno strada rispetto ad un ingranaggio grande:



Questo significa che più l'ingranaggio motore è piccolo, meno strada si percorre e meno potenza serve.

Per questo motivo gli ingranaggi motore piccoli vengono usati in partenza o in salita. Quando la velocità angolare aumenta, è però necessario aumentare anche la dimensione dell'ingranaggio perché, ipotizzando che il ciclista pedali alla sua massima potenza, all'aumentare della potenza si riduce la coppia e quindi la bicicletta non accelera più:

$$P = \omega \uparrow \cdot C \downarrow$$

Gli ingranaggi condotti invece funzionano esattamente al contrario. Essi infatti prendono la potenza fornita dal ciclista e la trasmettono alla bicicletta.

Essendo l'ingranaggio condotto più piccolo di quello motore, ad ogni giro completo dell'ingranaggio motore corrispondono più giri dell'ingranaggio condotto.

### 1.4.1. Il riduttore aeronautico

Le estremità delle pale di un'elica aeronautica hanno una velocità tangenziale elevata, soprattutto se sono lunghe. Il numero di giri di un motore aeronautico a pistoni non è molto elevato, ma quando si utilizza un elica con un motore a turbina (turboelica) si hanno velocità di rotazione all'albero motore di 6000 giri al minuto. Questa velocità è decisamente troppo alta per l'elica ed è quindi necessario utilizzare un riduttore di giri.

Analizziamo cosa succede all'elica quando si varia il numero di giri.

Per prima cosa osserviamo che l'elica riceve potenza dal motore e la trasforma in trazione per l'aeromobile.



La potenza ricevuta dal motore ha l'espressione di una coppia:

$$P = \omega \cdot C$$

Invece la potenza che l'elica fornisce come trazione ha espressione:

$$P = T \cdot v$$

Mettendo a rapporto queste espressioni possiamo ricavare il rendimento:

$$\eta = \frac{P_U}{P_I} = \frac{T \cdot v}{\omega \cdot C}$$

In questa formula compaiono la trazione e la coppia. Queste due grandezze variano durante il volo non solo in base al numero di giri dell'elica, ma anche a caratteristiche tipiche dell'aria in cui l'elica si muove, come la densità. E' quindi utile esplicitare le grandezze da cui esse dipendono tramite delle formule, chiamate formule di Renard:

$$T = \tau \rho \omega^2 R^4$$

$$C = \chi \rho \omega^2 R^5$$

In queste formule compaiono due nuove grandezze che ci consentono di confrontare eliche differenti poiché sono adimensionali:

- $\tau$  (lettera greca minuscola che si legge "tau") è il coefficiente di trazione. Esso indica quanta trazione l'elica è in grado di fornire.
- $\chi$  (lettera greca minuscola che si legge "chi") è il coefficiente di coppia. Esso indica quanta coppia l'elica assorbe dal motore.

Sostituendo le formule di Renard in quella del rendimento si ottiene:

$$\eta = \frac{P_U}{P_I} = \frac{T \cdot v}{\omega \cdot C} = \frac{\tau \rho \omega^2 R^4 \cdot v}{\omega \cdot \chi \rho \omega^2 R^5}$$

Semplificando dove possibile otteniamo:

$$\eta = \frac{\tau v}{\chi \omega R}$$

Separando i due coefficienti adimensionali dal resto dell'espressione si ottiene:

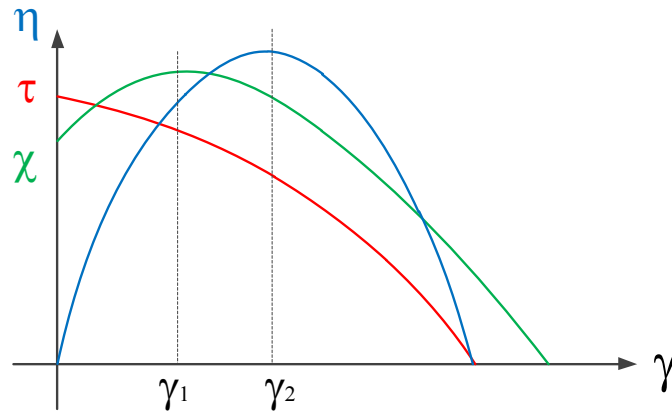
$$\eta = \frac{\tau}{\chi} \frac{v}{\omega R}$$

Il secondo pezzo dell'espressione viene indicato con la lettera  $\gamma$  e prende il nome di rapporto di funzionamento:

$$\gamma = \frac{v}{\omega R} \quad \eta = \frac{\tau}{\chi} \gamma$$

Questo parametro indica proprio il regime di funzionamento dell'elica, perché tiene in considerazione la velocità dell'aeromobile (che è anche la velocità di avanzamento dell'elica), il raggio delle pale e il numero di giri.

Il **COEFFICIENTE DI TRAZIONE  $\tau$** , il **COEFFICIENTE DI COPPIA  $\chi$**  e il **RENDIMENTO  $\eta$** , vengono descritti spesso in funzione del **RAPPORTO DI FUNZIONAMENTO  $\gamma$** :



Come si può vedere dal grafico, il regime di coppia massima  $\gamma_1$  non coincide con il regime massimo rendimento  $\gamma_2$ . Si tratta di due differenti regimi di funzionamento. La massima coppia è quella che consente di avere la migliore accelerazione e si usa soprattutto in salita.

Variando il numero di giri  $\omega$  varia anche il parametro  $\gamma$  e questo spiega perché durante il volo può essere utile variare il numero di giri per adattare l'elica alle esigenze delle varie fasi del volo.