



WITTENSTEIN

# Riduttori di precisione

Seminario – ITS Bologna  
30 Giugno 2017

Edoardo Pizzolato  
*Area Manager & Engineering*



## Trasmissione meccanica

La **trasmissione meccanica** è l'insieme di organi che servono alla trasmissione della potenza in un sistema meccanico.

Alcuni degli organi presenti nella trasmissione trasmettono la potenza senza variarne il numero di giri :

- Giunti
- Alberi
- etc ...



Altri organi trasmettono la potenza variando le velocità di rotazione in modo fisso oppure variabile realizzando quello che viene definito un **rapporto di trasmissione**.

In questa famiglia rientrano i *riduttori meccanici*.



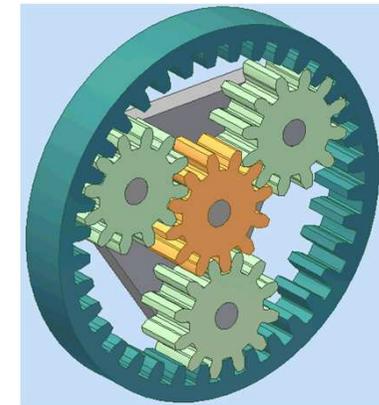
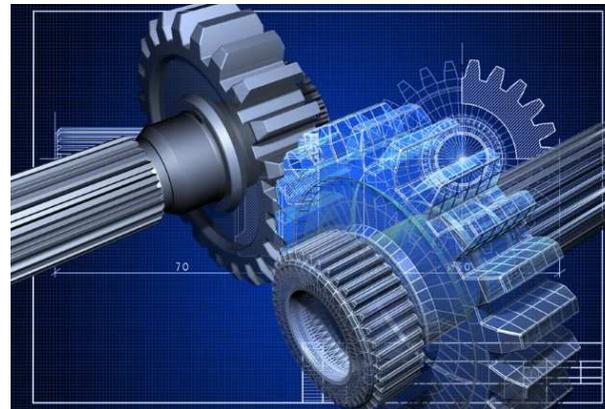
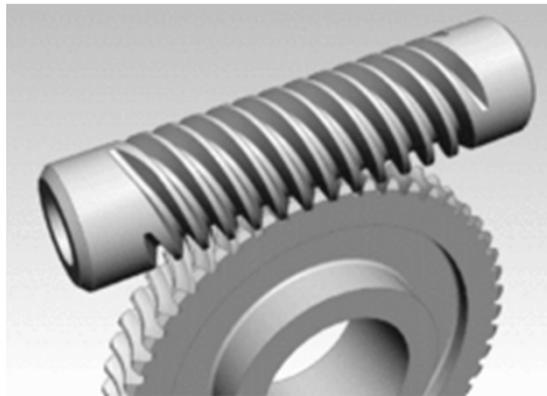


WITTENSTEIN

## Cos'è un riduttore meccanico ?



Il riduttore meccanico è essenzialmente una «scatola» che contiene ingranaggi.



A seconda della tipologia di ingranaggi che lo compongono, il riduttore viene chiamato in diversi modi.



WITTENSTEIN



## A cosa serve un riduttore meccanico ?



**Ridurre  
la velocità motore**

La velocità di rotazione ottimale di un motore è solitamente tra i 1.000 e i 3.000 rpm ; difficilmente le macchine che compiono qualche processo vanno a questi regimi e quindi è necessario ridurre la velocità ad un valore consono con i processi di trasformazione da compiere.



**Aumentare  
la coppia motore**

Grazie alle ruote dentate, il riduttore meccanico moltiplica la coppia del motore rendendo quest'ultimo in grado di movimentare applicazioni con masse ed inerzie importanti. In caso contrario si dovrebbe usare un motore di dimensioni molto più grandi con inutile spreco di energia e problemi di ingombro.



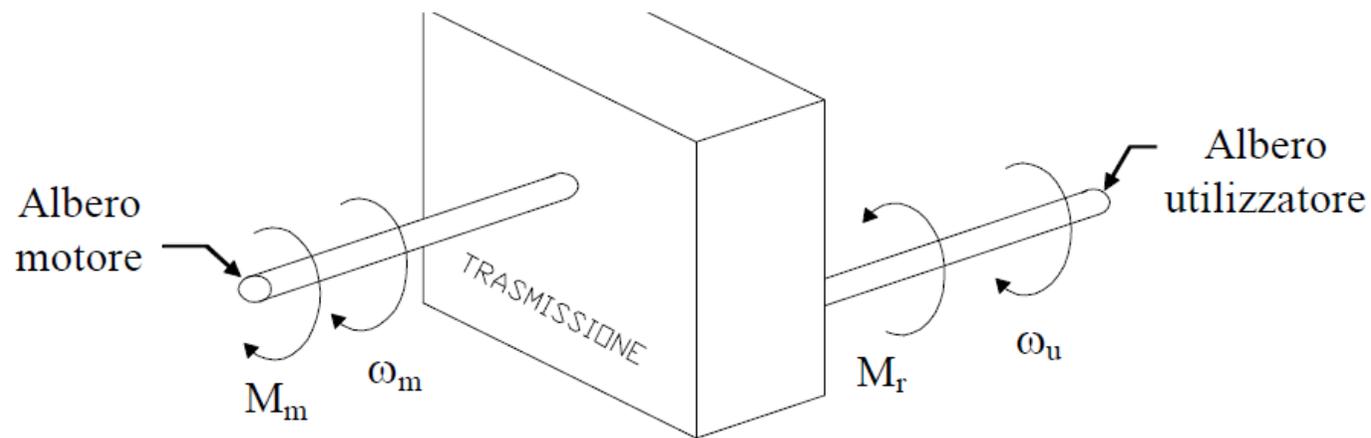
WITTENSTEIN



## Dove si trova il riduttore su un macchinario industriale [macchina automatica]?



SCHEMA DI UNA TRASMISSIONE

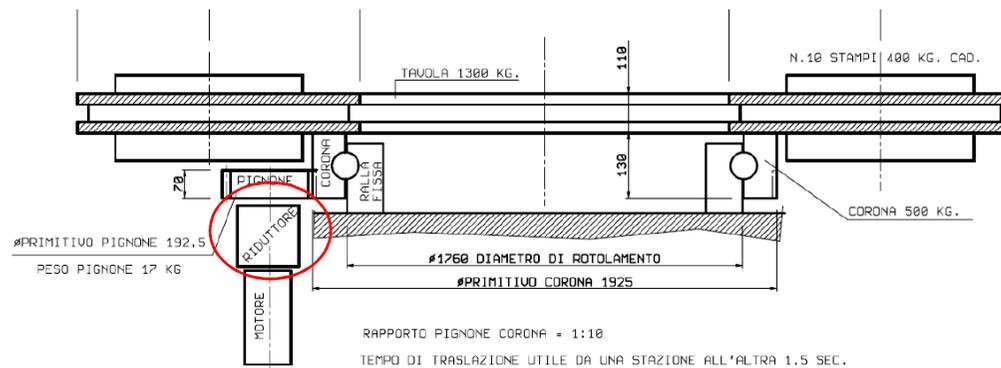




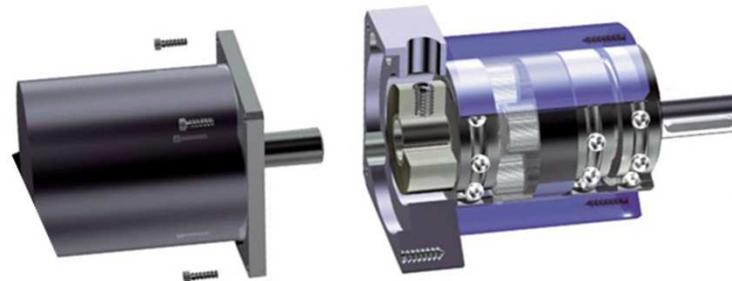
WITTENSTEIN

## Dove si trova il riduttore su una macchina automatica ?

Il riduttore è posizionato sempre dopo il motore e prima dell'applicazione da movimentare;



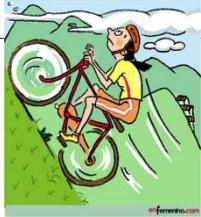
*Tavola rotante*



*Robot Delta*



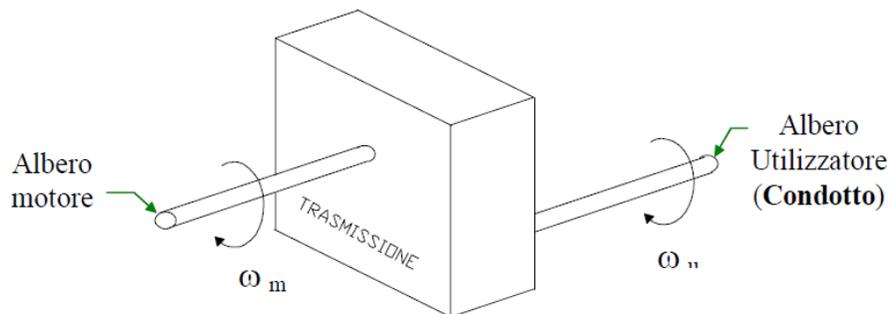
WITTENSTEIN



## Il rapporto di trasmissione

Il rapporto di trasmissione viene definito come il rapporto tra la velocità in ingresso e in uscita:

$$\text{Rapporto di trasmissione} = \frac{\text{velocità angolare albero motore}}{\text{velocità angolare albero condotto}}$$



A secondo del risultato di questo rapporto possiamo avere:

$i > 1 \rightarrow$  trasmissione *con riduzione*

$i = 1 \rightarrow$  trasmissione senza variazione

$i < 1 \rightarrow$  trasmissione *con moltiplicazione*



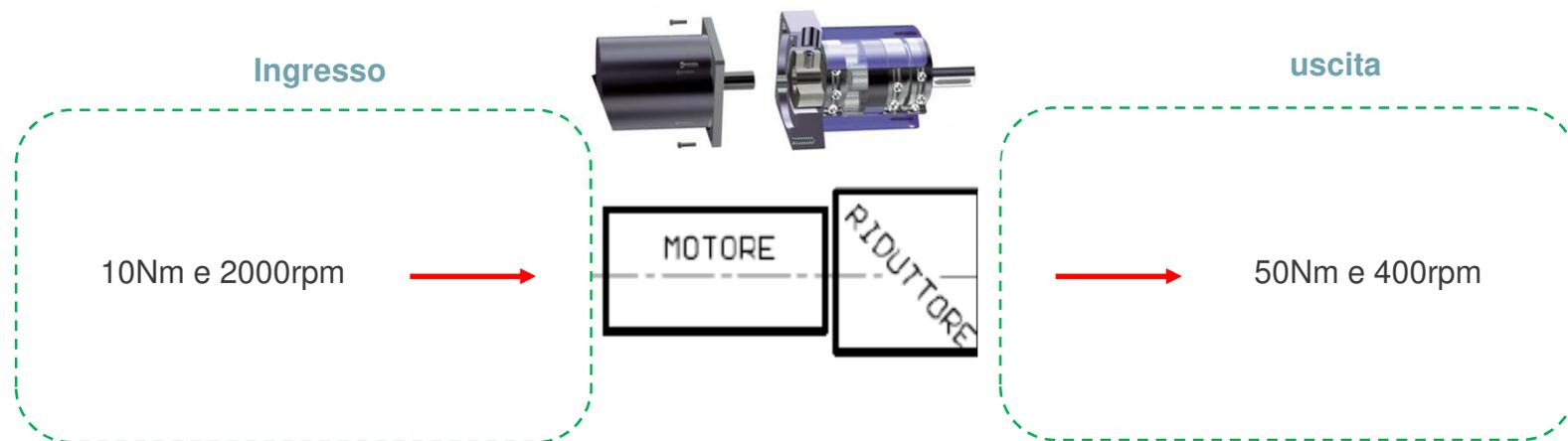
WITTENSTEIN

## Il rapporto di riduzione

La caratteristica principale di un riduttore è il **rapporto di riduzione**. Esso esprime quanto un riduttore riduce la velocità e al tempo stesso moltiplica la coppia.

Esempio:

Supponiamo di avere un riduttore con rapporto  $i=5$   
Il motore gira a 2000 rpm ed eroga una coppia di 10 Nm





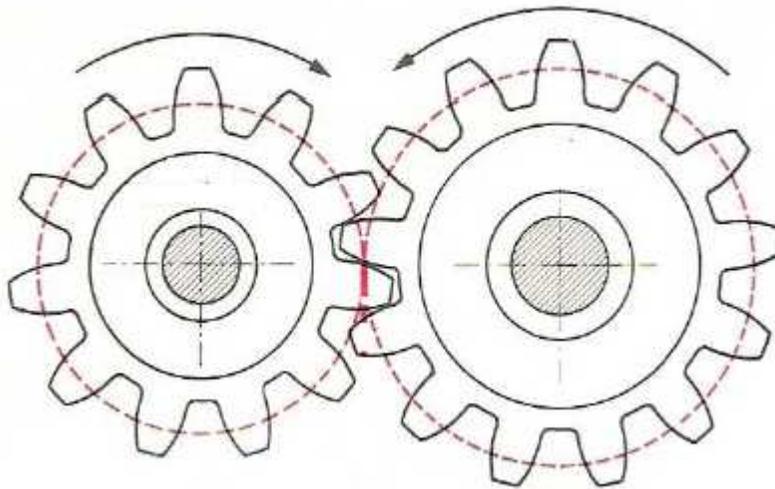
WITTENSTEIN



## ...come si calcola?



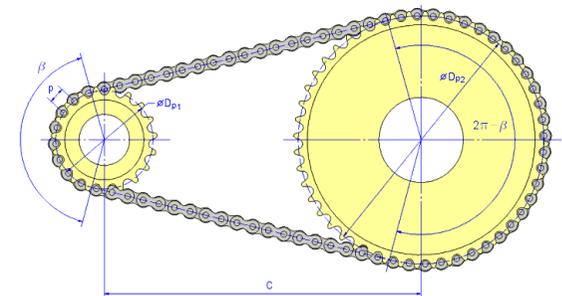
Il **rapporto di riduzione** di due ruote dentate è dato dal rapporto tra i numeri di denti di quest'ultime:

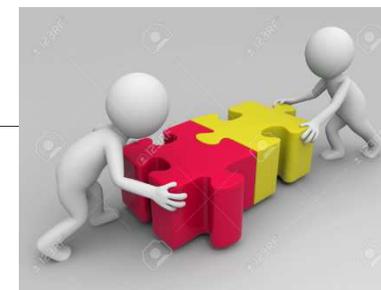


$Z_2$  = numero denti ruota condotta

$Z_1$  = numero denti ruota motrice

$$i = \frac{Z_2}{Z_1}$$





## Il rapporto di riduzione ... come si combina

Quando abbiamo due riduttori in serie si ottiene un rapporto di riduzione finale dato dalla **moltiplicazione** dei singoli rapporti di riduzione.



+



=



5

×

5

=

**25**



WITTENSTEIN

---

## Gli stadi di riduzione

Con «stadi di riduzione» si intende il numero di ingranaggi che compiono la riduzione all'interno del riduttore:

MONOSTADIO = è presente un singolo stadio di riduzione

BISTADIO = sono presenti due stadi di riduzione

TRISTADIO

... etc ...





WITTENSTEIN

## Che aspetto hanno i riduttori meccanici ?





WITTENSTEIN

## Tipologie di riduttori di precisione

In commercio esistono diverse tipologie di riduttori che sfruttano principi tecnologici differenti. Quando tuttavia si parla di riduttori di precisione, nel campo dell'automazione, l'offerta si può ridurre a:



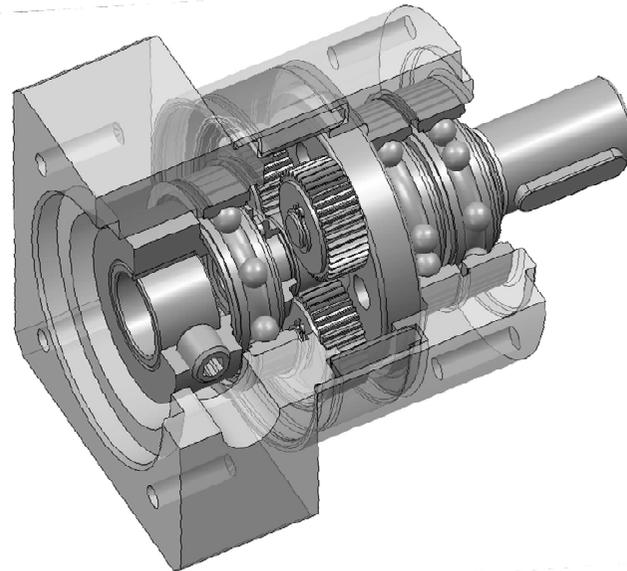


WITTENSTEIN

---

## Riduttore Epicycloidale

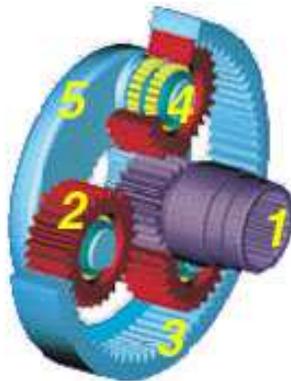
E' la tipologia di riduttore maggiormente commercializzato in quanto offre il miglior compromesso [tecnico / economico] nella maggior parte delle applicazioni.





WITTENSTEIN

## Riduttore epicicloidale – il principio



- 1) Pignone solare
- 2) Planetari
- 3) Corona
- 4) Perno planetari con cuscinetto
- 5) Porta-planetari

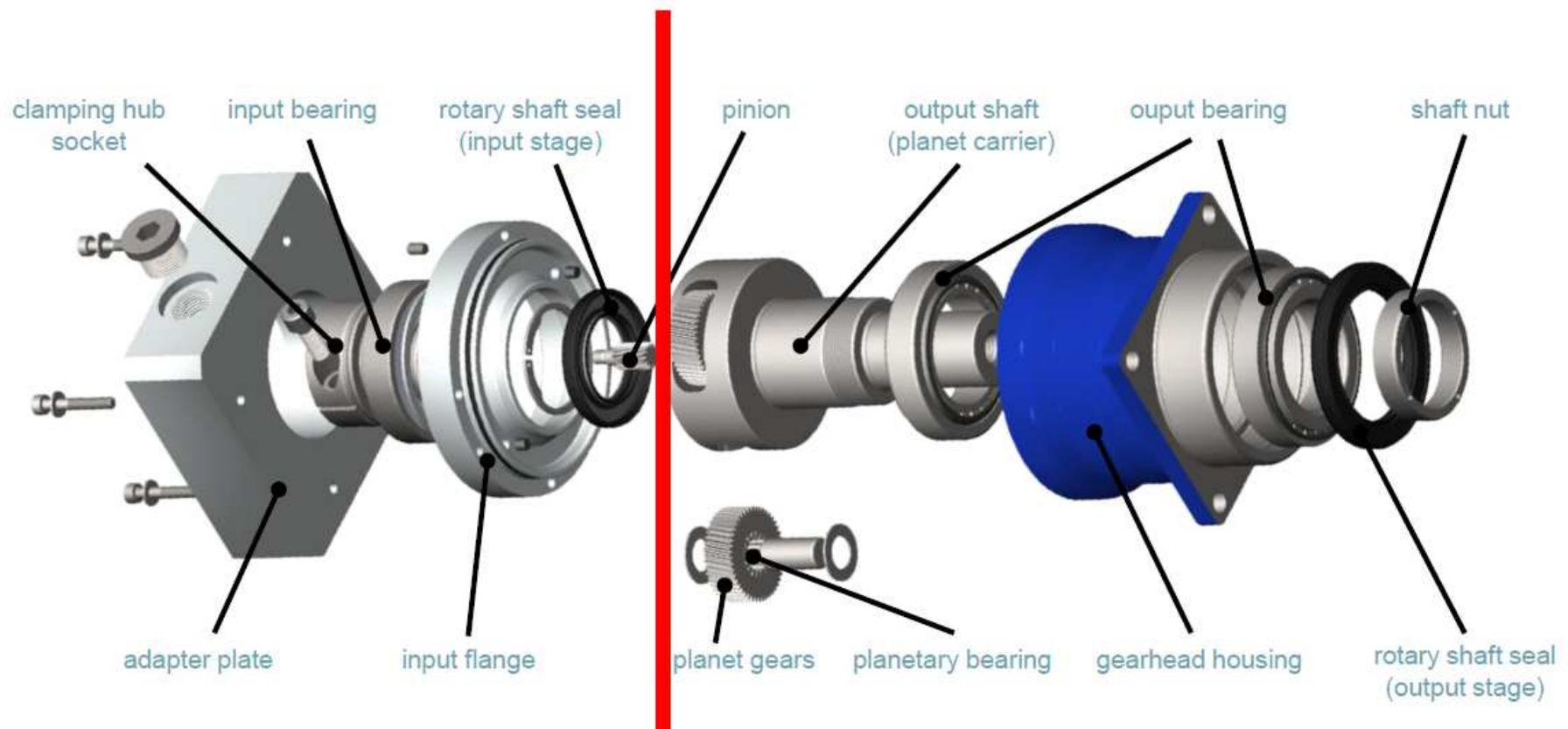
Gli ingranaggi epicicloidali sono costituiti da un sistema di uno o più ingranaggi chiamati **planetari**, montati su un organo porta-planetari che ruotano intorno ad un pignone centrale detto **solare**; il tutto è posto all'interno di una ruota dentata detta **corona**. L'asse di rotazione del porta-planetari e del solare coincidono. Nei riduttori viene mantenuta fissa la corona e quindi l'ingresso è l'1 mentre l'uscita è il 5.

Al fine della riduzione sarebbe sufficiente un solo planetario; se ne mettono da tre in su solo per una questione di distribuzione degli sforzi.



WITTENSTEIN

## Riduttore epicicloidale – costituzione



## Riduttore epicicloidale – costituzione



**Flangia di adattamento al motore** = è l'elemento di collegamento tra riduttore e motore



**Flangia di ingresso** = fa da centraggio per i cuscinetti in ingresso e ha la sede per l'alloggiamento della guarnizione in ingresso



WITTENSTEIN

---

## Riduttore epicicloidale – costituzione



**Anello calettatore** = serve per calettare l'albero motore, sul suo corpo hanno anche sede il centraggio dei cuscinetti e la superficie di scorrimento della guarnizione in ingresso.

Alla sua estremità viene piantato il pignone solare.



**Cuscinetto in ingresso**



**Guarnizione in ingresso** = senza labbro para-polvere



WITTENSTEIN

## Riduttore epicicloidale – costituzione



**Porta-planetari** = ha le sedi per il montaggio dei planetari e la filettatura per il precarico dei cuscinetti



**Cuscinetti d'uscita** = più performanti di quelli in ingresso, ne esistono a sfere, a rulli...



**Carcassa** = ha al suo interno la dentatura su cui ruotano i satelliti

## Riduttore epicicloidale – elementi di valutazione

La macro caratteristica che permette di classificare i riduttori in due grosse famiglie è la tipologie di dentatura degli ingranaggi:

### DENTATURA DRITTA



- + Nessuna forza di ribaltamento sui cuscinetti dei planetari
- + Possibilità di montare cuscinetti più piccoli
- + Gli allungamenti dell'albero motore dovuti alla temperatura possono essere compensati facilmente
- + Soluzione più economica
- Minor capacità di trasmissione della coppia
- Minor rigidezza
- Maggior rumorosità
- Minor uniformità di rotazione



WITTENSTEIN

---

## Riduttore epicicloidale – elementi di valutazione

### DENTATURA INCLINATA



- + Minor rumorosità [coi nostri riduttori la riduzione è da 6 ad 8 dB[A]
- + Maggior numero di denti in contatto
- + Maggior capacità di trasmissione della coppia
- + Maggior rigidità
- + Miglior uniformità di rotazione
- Planetari sottoposti a forze di ribaltamento
- Necessità di cuscinetti maggiorati nei planetari
- Gli allungamenti dell'albero motore devono essere compensati dal calettatore
- Maggiori frizioni



WITTENSTEIN

## Riduttore epicicloidale – elementi di valutazione

La scelta della tipologia di lubrificante è fondamentale per la durata e le prestazioni di un riduttore.

Critero di analisi	Olio	Grasso	Spiegazione
Efficienza dell'ingranaggio	+	-	Si evitano le perdite per effetto densità del grasso
Temperatura ingranaggio	+	-	Miglior efficienza raffreddamento
Vita	+	-	L'olio è una sostanza omogenea e quindi con caratteristiche costanti
Eliminazione delle limature da usura	+	-	Possibile grazie ai magneti
Esistenza di un film lubrificante	+	-	Definito a livello matematico
Supporto del lubrificante	+	-	Nessun effetto di cristallizzazione
Cuscinetti a gabbia	+	-	Migliore lubrificazione dei cuscinetti
Perdite	-	+	Il grasso trafila più difficilmente
Costo	-	+	Progetto più economico
Usura delle guarnizioni	-	+	Non è necessaria una guarnizione sull'albero



WITTENSTEIN

---

## Riduttore epicicloidale – elementi di valutazione

Diverse soluzioni esistono anche per quanto riguarda la scelta dei cuscinetti per i planetari; soluzioni che si differenziano per prestazioni e tempi necessari all'assemblaggio.

### CUSCINETTI A RULLI IN GABBIA

- + Facilità di montaggio
- + Risparmio di tempo e di costi
- Minor capacità di carico
- Difficoltà di lubrificazione
- Facilmente danneggiabile se sottoposto a coppia di ribaltamento



### CUSCINETTI A RULLI PIENI

- + Elevata resistenza a carichi di ribaltamento
- + Elevata capacità di sopportare carichi
- Difficoltà di montaggio
- Costi elevati





---

## Riduttore epicicloidale – elementi di valutazione

I **cuscinetti in uscita** di un riduttore hanno un duplice scopo; oltre a sopportare i carichi esterni derivanti dall'applicazione devono anche supportare i carichi intrinseci derivanti dal precarico in fase di montaggio.

Il precarico dei cuscinetti in uscita è un elemento essenziale per minimizzare le oscillazioni radiali e controbilanciare le forze radiali sull'albero in uscita.

L'assenza di questa caratteristica genera una deformazione del porta-planetari con conseguente danneggiamento dell'anello dentato. Il precarico richiede di avere dei cuscinetti in grado di supportare un carico aggiuntivo; i cuscinetti a sfere con singola pista non sono adatti a questi impieghi

In applicazioni con specifiche elevate, soltanto con una coppia di **cuscinetti a rulli conici** è possibile avere un precarico sufficiente per stabilizzare il porta-planetari con il ribaltamento

## Riduttore epicicloidale – elementi di valutazione



Il materiale della carcassa viene realizzato principalmente in tre modi:

- **Acciaio inossidabile**
- **Acciaio stampato**
- **Ghisa**

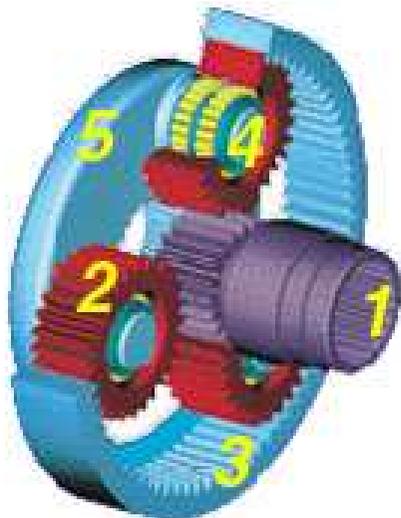
L'acciaio inossidabile è molto tenero e può essere indurito solo attraverso una nitrurazione; le superfici nitrurate sono tuttavia difficilmente lubrificabili.

La ghisa ha caratteristiche meccaniche e resistenza ai picchi di coppia inferiori rispetto all'acciaio stampato

## Riduttore epicicloidale

### CALCOLO DEL RAPPORTO DI TRASMISSIONE :

Nel riduttore epicicloidale il calcolo del rapporto di riduzione mette in relazione le velocità assolute delle ruote e nello specifico :



$$\tau_{51} = \frac{\omega_5}{\omega_1}$$



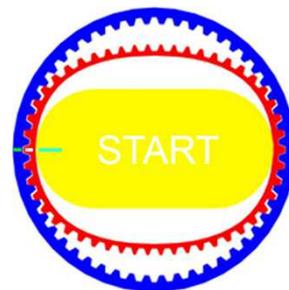
WITTENSTEIN

## Riduttore armonico

È composto di tre elementi: una corona dentata internamente che solitamente è fissa a telaio; una corona d'acciaio flessibile e un generatore d'onda.



La corona flessibile è di diametro leggermente inferiore alla corona rigida ed ha solitamente due denti in meno sulla circonferenza esterna. Essendo elastica può deformarsi. E' tenuta in forma ellittica dal generatore d'onda e i suoi denti ingranano sui denti della corona rigida lungo l'asse maggiore dell'ellisse. Ogni giro completo del generatore d'onda, la corona flessibile rimane indietro di due denti realizzando quindi la riduzione di velocità.





WITTENSTEIN

---

## Riduttore armonico

### CALCOLO DEL RAPPORTO DI RIDUZIONE :

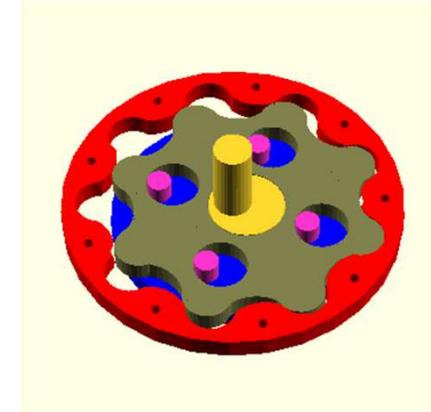
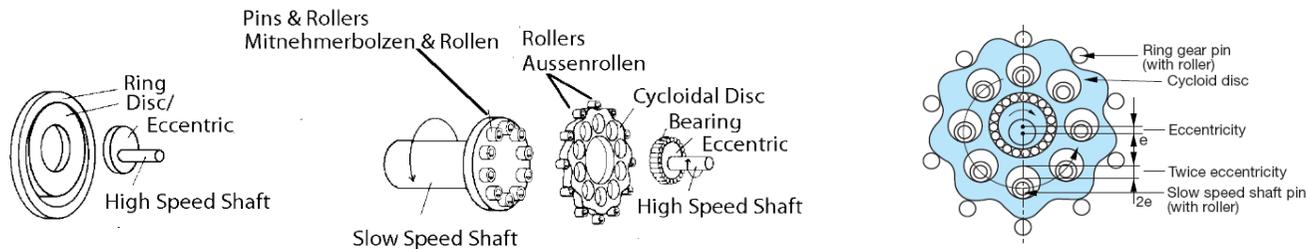
$$\tau = -\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2}$$

dove Z1 e Z2 sono rispettivamente il numero di denti della corona flessibile e quelli della corona rigida esterna.



WITTENSTEIN

## Riduttore cicloide



Il riduttore cicloide è costituito da due parti :

- L'assieme di un disco planetario e di un ingranaggio solare fisso. Il primo ha dei denti con forma cicloidale mentre il secondo a forma di perno
- Un eccentrico

Quando l'eccentrico gira, mette in moto il disco cicloide rispetto alla dentatura interna della carcassa. I denti del disco cicloide ingranano con i perni dell'ingranaggio fisso.

Il planetario ruotando mette in moto attraverso i suoi fori i perni dell'albero lento che ruotano in essi [Il diametro dei fori meno il diametro dei perni dell'albero lento è pari a due volte l'eccentricità dell'albero]

La riduzione si ottiene dotando il planetario di almeno un dente in meno rispetto al numero dei perni sul solare.



WITTENSTEIN

---

## Riduttore cicloide

### CALCOLO DEL RAPPORTO DI RIDUZIONE :

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = 1 - \frac{S}{P} = - \frac{S-P}{P}$$

S = numero ingranaggi sulla carcassa [perni]

P = numero ingranaggi sul disco planetario [cicloidi]

S è solitamente più grande di 1 o 2 di P e quindi:

$$S - P = 1 \quad \Rightarrow \quad \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1}{P}$$

$$S - P = 2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{2}{P}$$



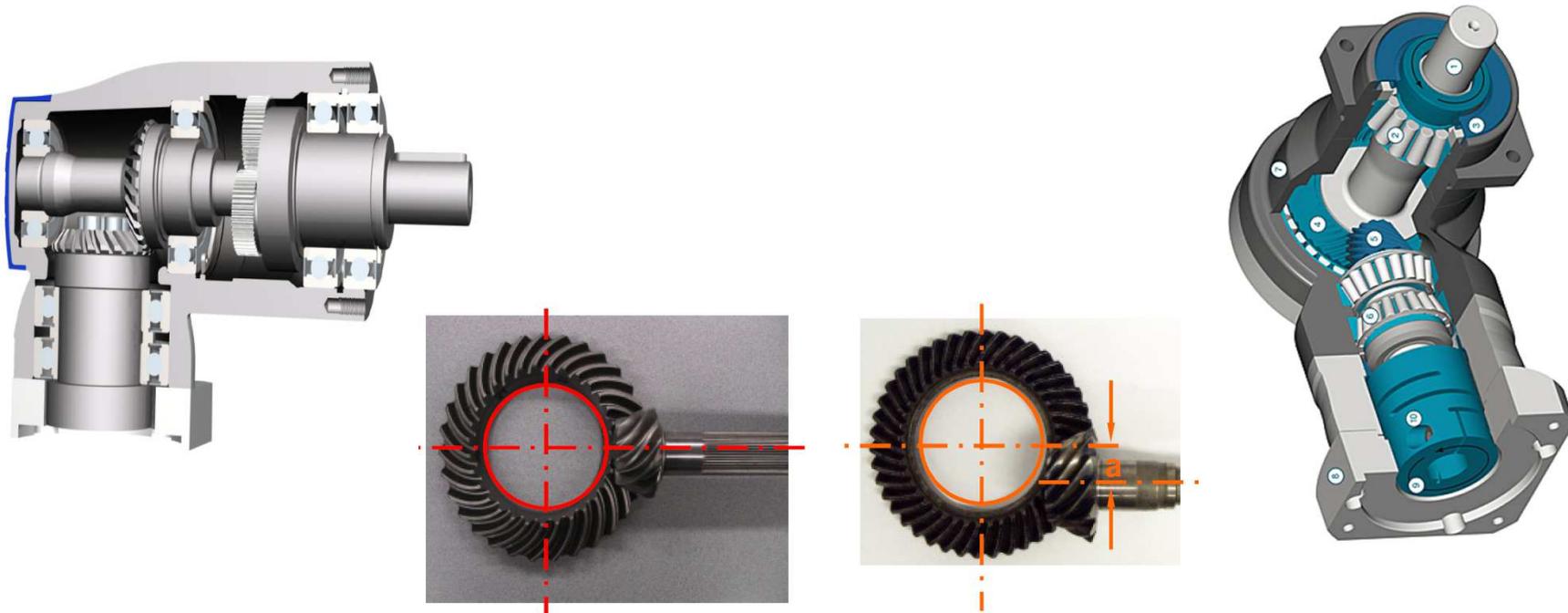
## Comparazione tra i principi coassiali

Elemento	Armonico	Cicloide	Epicycloidale	Considerazioni
Compattezza	+	+	-	Il riduttore armonico e il cicloide sono più compatti rispetto agli epicycloidali
Gioco	+	+	-	Gioco zero [attenzione a perdita di posizione per rigidità in 0]
Rapporto nel monostadio	+	+	-	Rapporti elevati in un solo stadio
Ampiezza dei rapporti	-	-	+	L'armonico non ha rapporti inferiori al 30; il cicloide non ne ha inferiori a 59 [nella versione «fine»]
Efficienza	-	-	+	Armonico ha un'efficienza <80% Cicloide ha un'efficienza <65%
Inerzia propria	-	-	+	Il riduttore armonico e il cicloide hanno un'inerzia propria molto elevata.
Vita	-	-	+	Il riduttore armonico e il cicloide hanno una vita inferiore;
Comportamento in moto	-	-	+	Il riduttore armonico e il cicloide generano delle vibrazioni che a basse velocità genera forti risonanze. Maggiori variazioni del sincronismo di rotazione
Rigidità	-	-	+	L'epicycloidale ha una rigidità torsionale maggiore



WITTENSTEIN

## Coppia conica e coppia ipoidale



La coppia conica, nell'ambito dei riduttori di precisione, è la tecnologia economicamente più vantaggiosa per avere una trasmissione a 90°. La coppia Ipoide è un «derivato» della coppia conica che si ottiene sfalsando l'asse del pignone dalla corona.

## Coppia conica

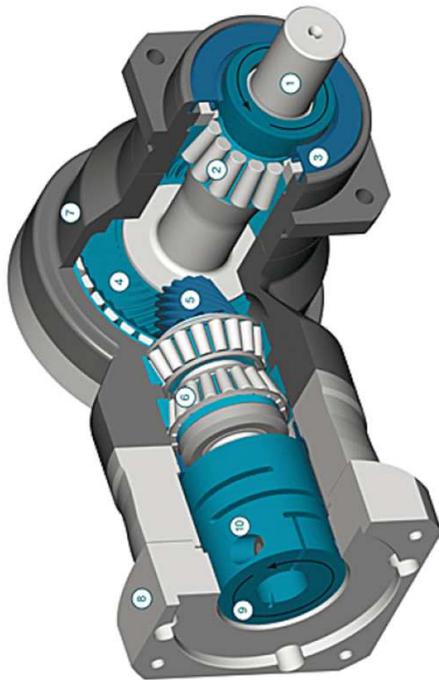
La coppia conica può presentare due tipologie di dentature con relativi vantaggi e svantaggi:

	Dentatura cilindrica	Dentatura spiroidale
		
<b>Pro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geometria semplice</li> <li>• Basse forze assiali</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bassa rumorosità</li> <li>• Maggiore capacità di trasmissione di potenza</li> </ul>
<b>Contro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rumorosità</li> <li>• Non adatto ad alte velocità</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presenza di forze assiali</li> </ul>

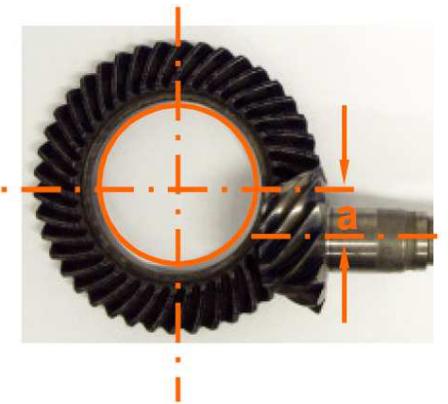
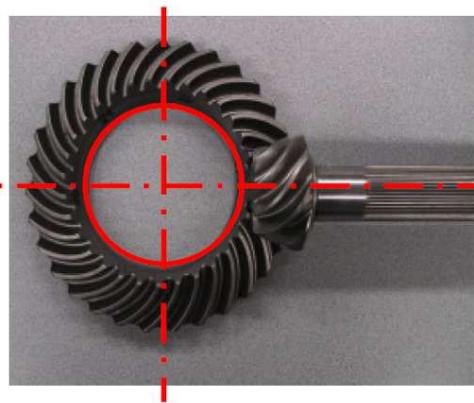


WITTENSTEIN

## Coppia ipoidale



La coppia Ipoide è un «derivato» della coppia conica che si ottiene sfalsando l'asse del pignone dalla corona.

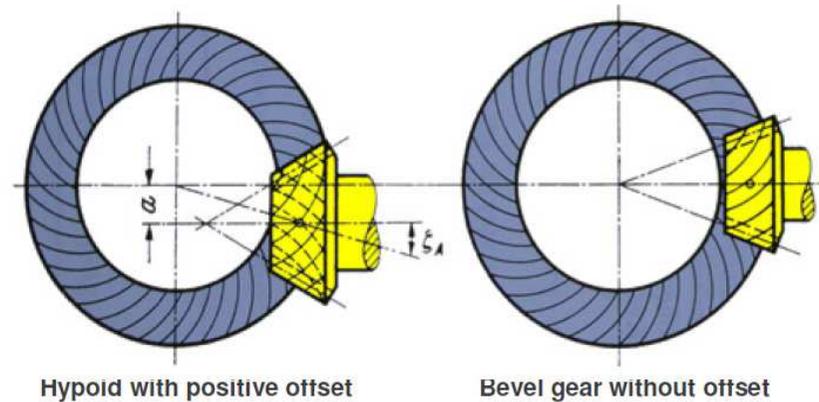




WITTENSTEIN

## Coppia ipoidale

Grazie allo spostamento dell'asse si possono costruire pignoni più grossi con conseguente maggiore capacità di trasmissione della coppia.

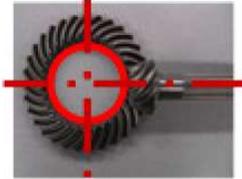
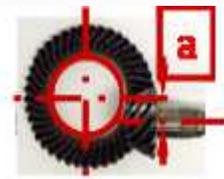


Il maggior fattore di ricoprimento e la morbidezza di funzionamento permettono di avere rumorosità inferiori alla coppia conica.



WITTENSTEIN

## Il confronto tra coppia conica e coppia ipoidale

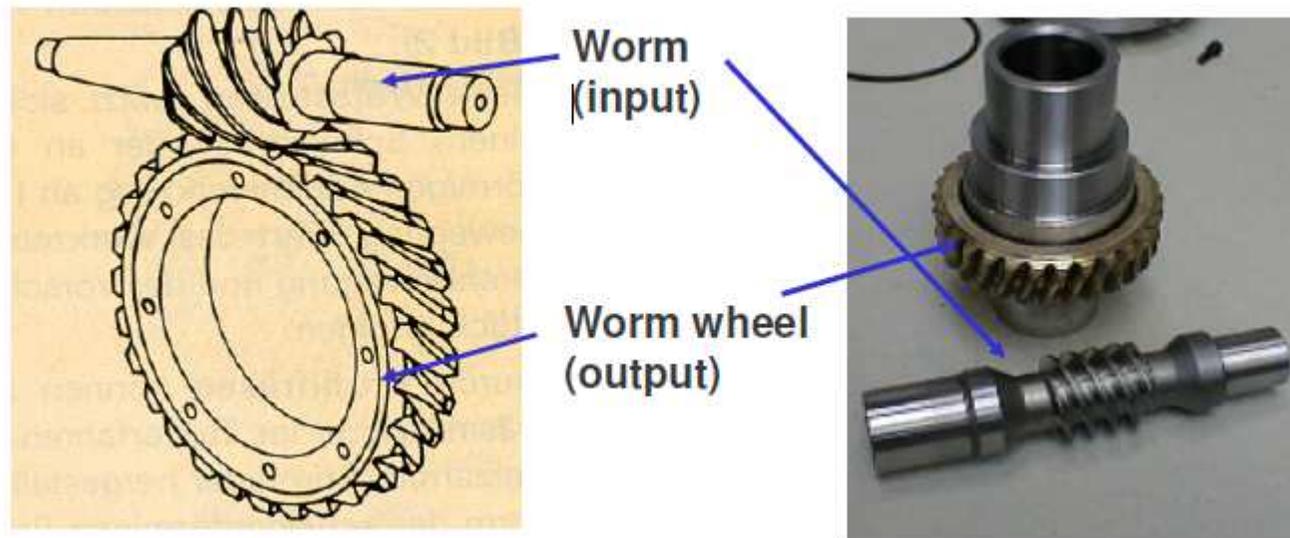
	Coppia conica	Coppia Ipoidale
		
<b>Pro</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Possibili bassi rapporti di riduzione</li><li>• Basse forze assiali</li><li>• Elevate efficienza all'avvio</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rapporti di riduzione elevati in uno stadio</li><li>• Morbidezza di funzionamento</li><li>• Elevata capacità di trasmissione di coppia</li></ul>
<b>Contro</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rumorosità</li><li>• Alti rapporti di riduzione non possibili</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Forze assiali aggiuntive</li><li>• Maggiori frizioni</li></ul>



WITTENSTEIN

## Vite senza fine

Il vite senza fine è un particolare riduttore angolare che può raggiungere elevatissimi rapporti di riduzione in un solo stadio. Poiché inoltre è composto essenzialmente da due parti è una soluzione molto robusta.



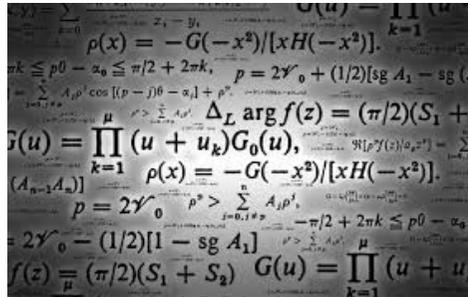


## Il confronto tra vite senza fine e coppia ipoidale

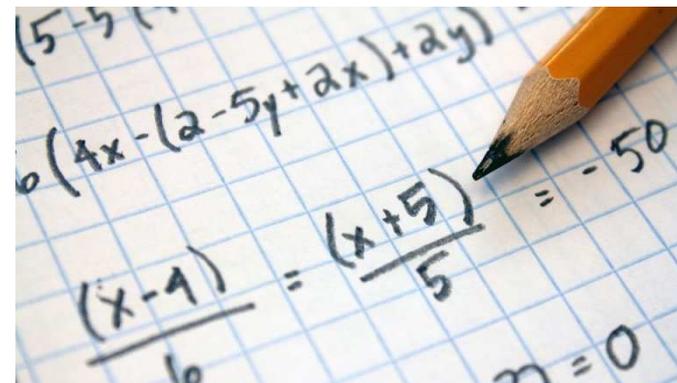
	Vite senza fine	Coppia Ipoidale
		
<b>Pro</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rapporti di riduzione elevatissimi in uno stadio</li><li>• Molto resistente a shock e vibrazioni</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rapporti di riduzione elevati in uno stadio</li><li>• Morbidezza di funzionamento</li><li>• Elevata capacità di trasmissione di coppia</li></ul>
<b>Contro</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Usura</li><li>• Bassa efficienza a bassa velocità</li><li>• Efficienza inversamente proporzionale al rapporto di riduzione</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Forze assiali aggiuntive</li><li>• Maggiori frizioni</li></ul>



WITTENSTEIN



## Elementi di dimensionamento





WITTENSTEIN

---

## La coppia massima

Uno degli elementi di valutazione caratteristici del riduttore è la coppia che questo è in grado di sopportare. Nel catalogo vengono suddivise in T2B, T2N e T2<sub>not</sub> ... sembrano molto simili ma in realtà esprimono aspetti molto diversi.

T2N = **Coppia nominale in uscita** = valore di coppia che posso applicare in modo continuativo all'uscita del riduttore per un intervallo di tempo prolungato.

T2B = **Coppia massima in uscita** = valore di coppia massima applicabile all'uscita del riduttore; chiaramente si può esercitare questo valore di coppia solo in modo alternato e non continuativo.

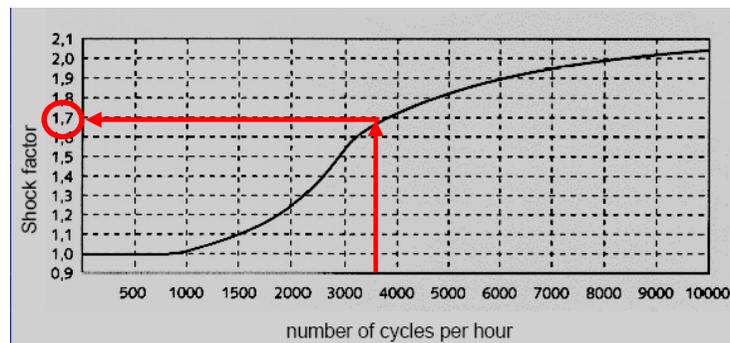
Caratteristica comune di questi due valori è che possono essere applicati al riduttore senza ridurne la durata. Sono quindi posizionati al di sotto della curva di fatica.



WITTENSTEIN

## Il fattore di shock

La coppia di accelerazione massima riportata a catalogo fa riferimento ad una ciclica che non superi i 1.000 cicli / ora. Quando si eccede questa frequenza, è necessario introdurre un fattore di degradamento delle prestazioni del riduttore chiamato **Fattore di Shock**.



Partendo dal numero di cicli / ora determino dal grafico il valore del fattore di shock; moltiplicando questo per la coppia massima ottengo la coppia massima «effettiva» che dovrà essere minore della coppia massima riportata a catalogo.

*Esempio:*

*Coppia di picco 50 Nm*

*Ciclica 3800 cicli/ora →  $f_s = 1,7$*

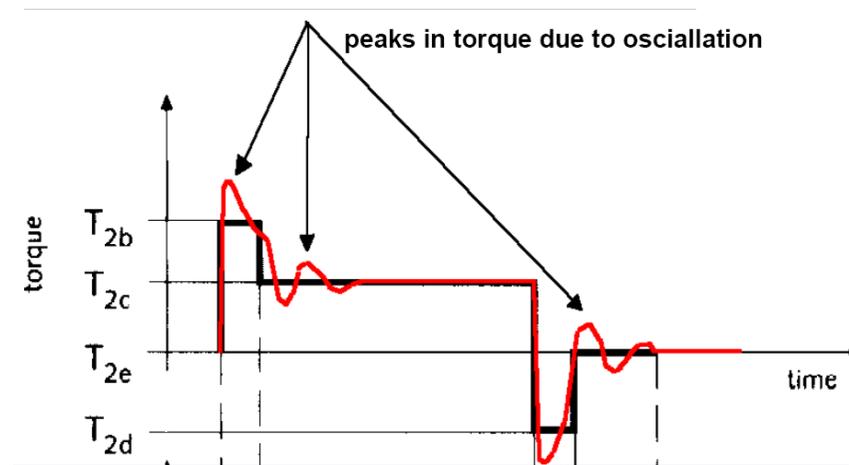
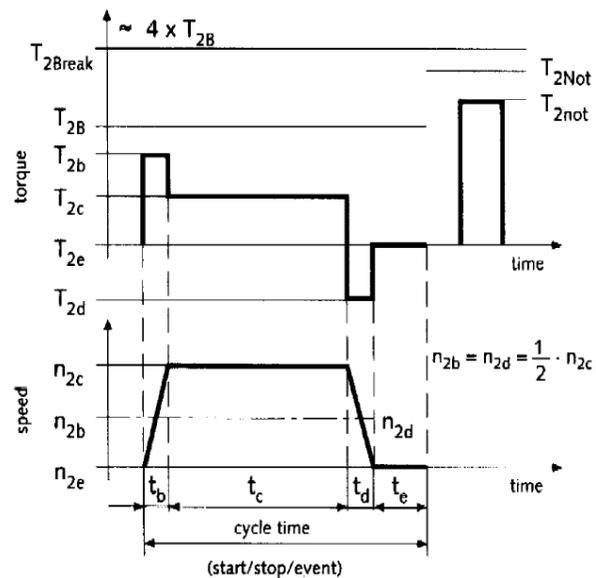
*$T2B[\text{catalogo}] > 50 \text{ Nm} \times 1,7 = 85 \text{ Nm}$*



WITTENSTEIN

## Il fattore di shock

Da dove deriva il fattore di shock?



Serve per compensare i carichi reali derivanti da picchi di corrente e vibrazioni.

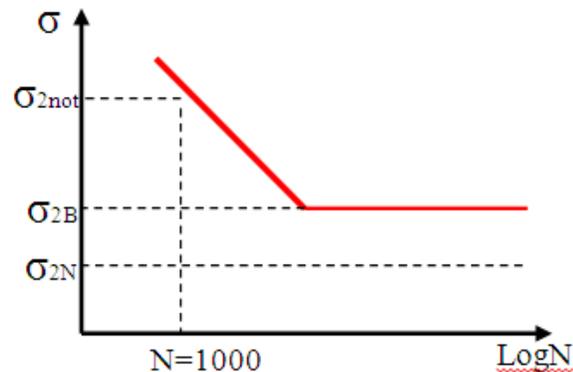


WITTENSTEIN

## La coppia di emergenza

$T_{2not}$  = **Coppia di emergenza** = coppia che posso applicare al massimo 1.000 volte nella vita del riduttore.

Essa determina uno sforzo [definito con  $\sigma$ ] superiore alla curva asintotica di fatica che va a degradare poco alla volta la capacità di resistenza del riduttore. Continuando ad applicarla, statisticamente, si ha la rottura dopo 1.000 cicli.



La coppia di emergenza non ha nulla a che vedere con la coppia di rottura che invece è quella in grado, statisticamente, di rompere il riduttore dopo una singola applicazione [1 colpo].



WITTENSTEIN

## Velocità nominale e massima

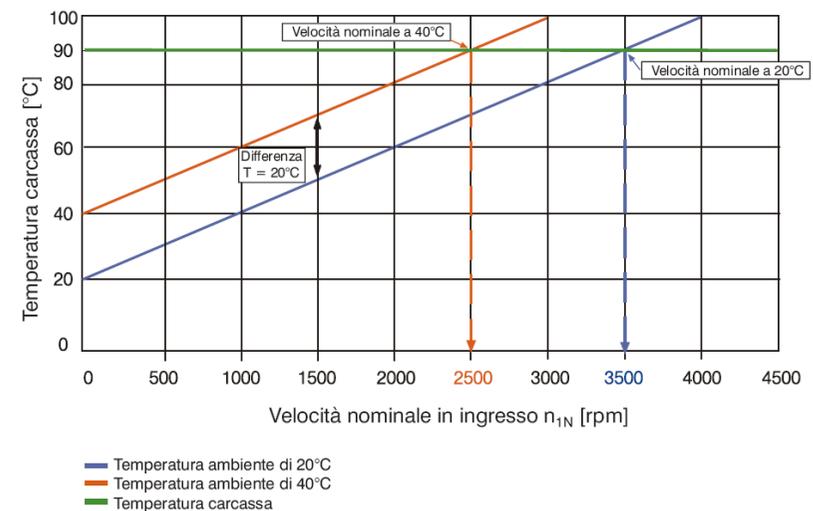
Le due velocità rilevanti nel dimensionamento del riduttore sono quella massima e quella nominale in ingresso.

- La **velocità massima**  $n_{1max}$  non può essere mai superata in quanto è legata alla resistenza fisica del cuscinetto e determina i limiti del *funzionamento ciclico*.
- La **velocità nominale**  $n_{1N}$  non può mai essere superata nel *funzionamento continuativo* ed è limitata dalla temperatura della carcassa che non deve mai essere superiore a 90 °C.

La temperatura ambientale ha influenza sulla velocità nominale che, per convenzione, viene calcolata con una temperatura ambiente di 20°C.

Nel caso di temperatura esterna superiore, il limite massimo di 90° viene raggiunto prima [quindi a velocità minori]; questo vuol dire che occorre ridurre la velocità nominale in ingresso. Il calcolo della riduzione viene fatto considerando, con buona approssimazione, la caratteristica della relazione tra velocità e temperatura di tipo lineare.

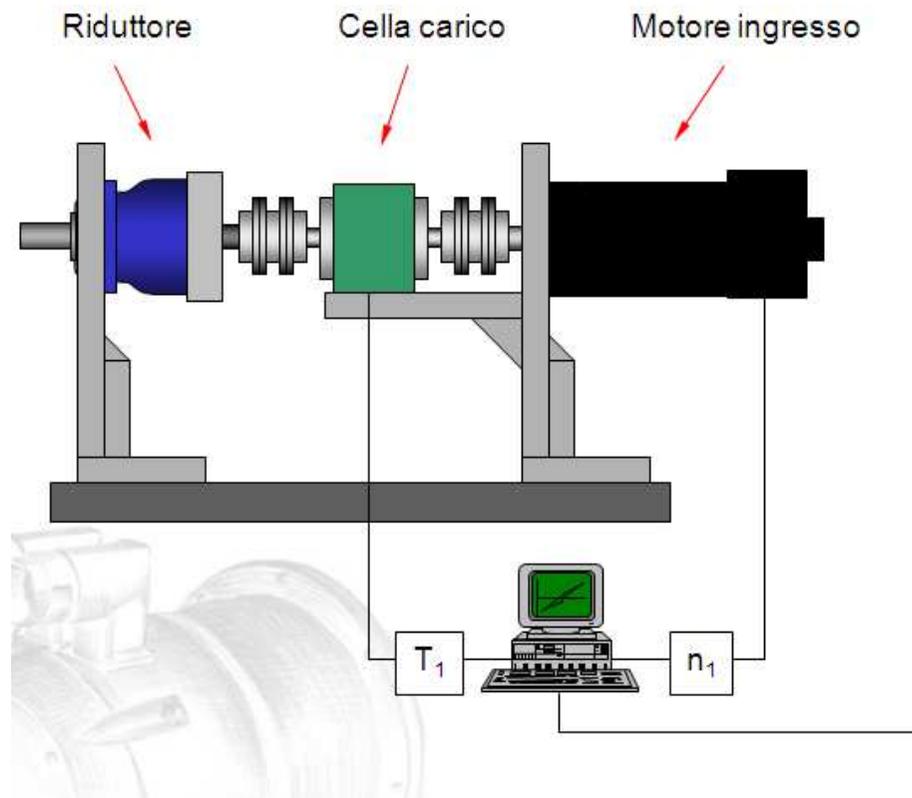
Esempio:





WITTENSTEIN

## La coppia senza carico

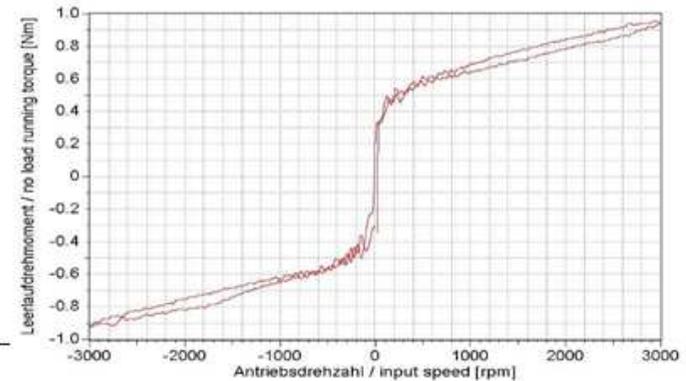


Determinazione della coppia a vuoto in funzione del numero di giri.

### Dati Tecnici

Coppia torcente ( $T_1$ ):  $\pm 20$  Nm  
N. di giri ( $n_1$ ):  $\pm 3000$  rpm

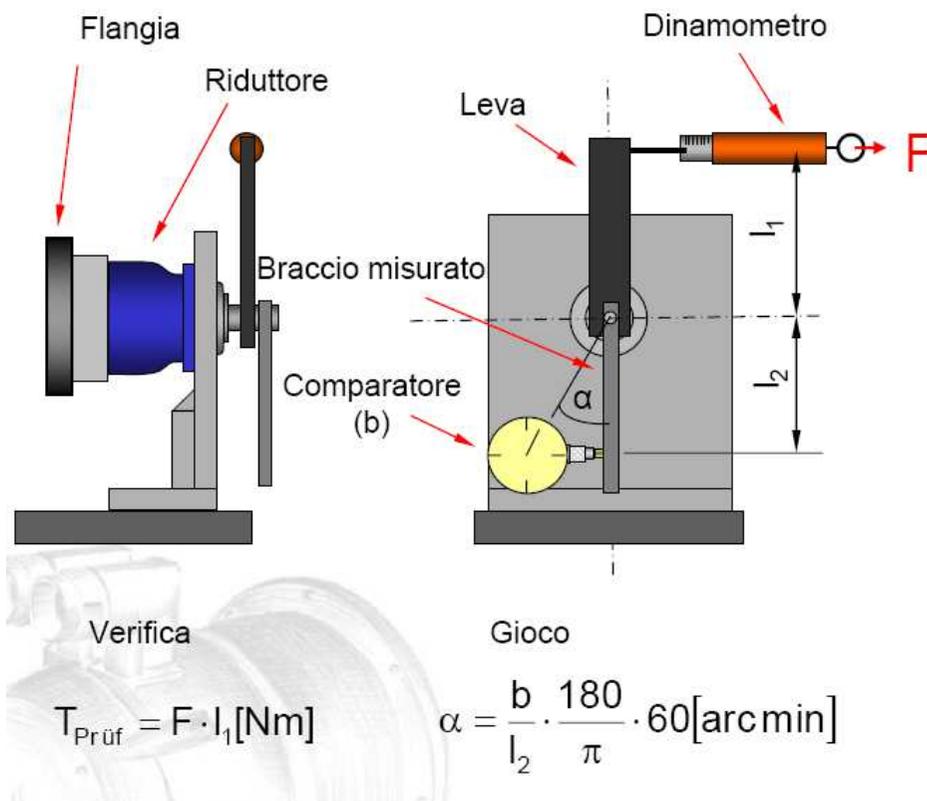
Coppia a vuoto – curva caratteristica





WITTENSTEIN

## Il gioco

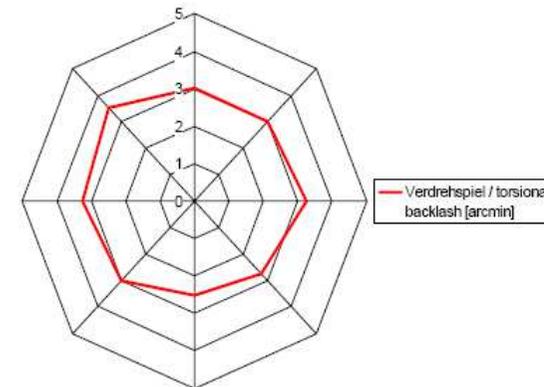


Determinazione del gioco torsionale in **12 punti** diversi

### Dati tecnici

Coppia applicata

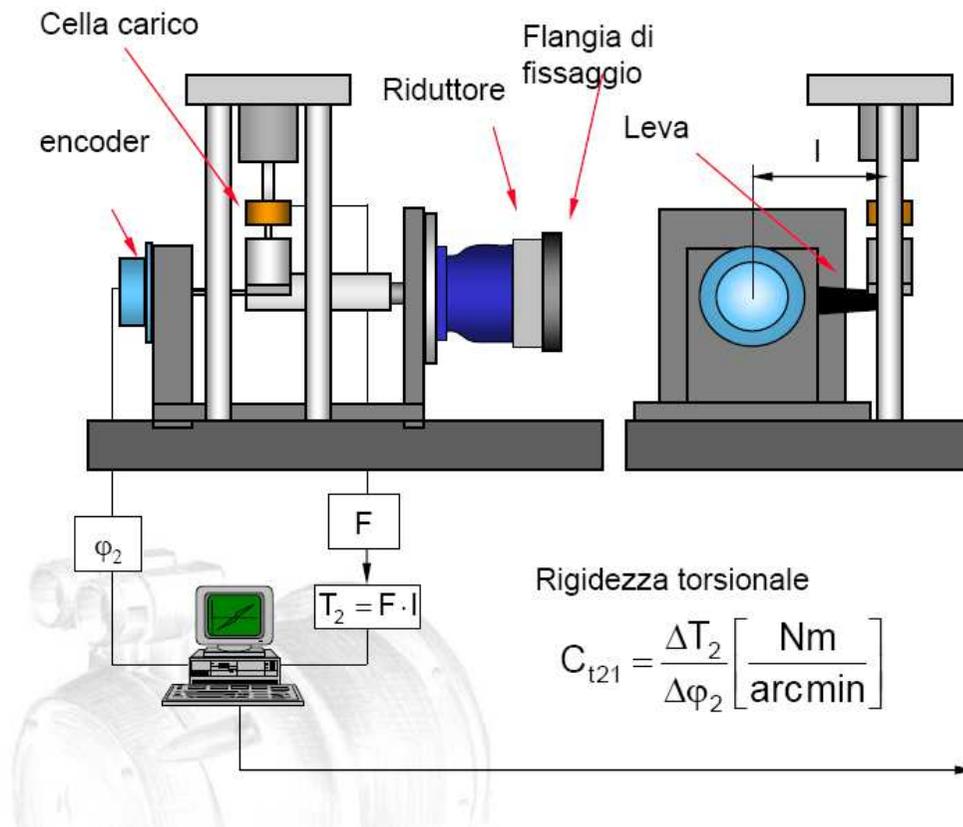
Gioco torsionale in uscita





WITTENSTEIN

## Rigidezza torsionale



Determinazione dell'angolo torsionale in relazione alla coppia applicata

### Dati tecnici

Coppia di carico ( $T_2$ ):  $\pm 1000\text{Nm}$

Curva isteresi





---

## L'errore totale

L'errore totale di un riduttore è dato dalla somma di due componenti :

- il gioco angolare naturale
- l'errore dovuto alla rigidità del riduttore

Il primo è il valore che viene riportato sul catalogo e viene misurato applicando una coppia pari al 2% di quella nominale.

Il secondo è determinato dall'attitudine che ha il riduttore a deformarsi quando viene sottoposto ad una coppia torcente; Quest'ultima è indicata sui nostri cataloghi come *rigidità torsionale*  $C_{t21}$  e viene espressa in [Nm / arcmin].



WITTENSTEIN

---

## Errore totale: esempio di calcolo

*Esempio:*

Utilizzando un riduttore TP+050 monostadio, rapporto  $i=7$ , la rigidezza torsionale  $C_{t21}$  è pari a 560 Nm / arcmin. Ipotizzando l'uso al 100% della coppia massima di accelerazione di tale riduttore [ $T_{app}=T_{2B}=700\text{Nm}$ ], si avrà una deviazione angolare complessiva:

$$\varepsilon = \frac{T_{app}}{C_{t21}} + j_t = \frac{700}{560} + 1 = 2.25 \text{ arc min} \quad j_t = \text{gioco naturale}$$

Pertanto, si avrà dinamicamente un errore totale di 2.25 arcmin di cui 1.25 arcmin dovuti alla torsione del riduttore e presenti solo quando il riduttore è caricato.

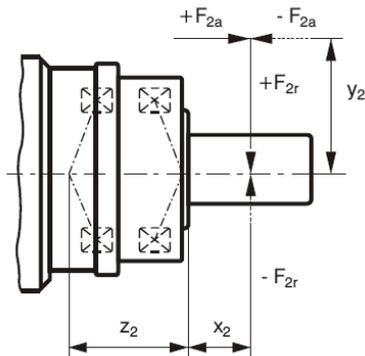


WITTENSTEIN

## Forze sui cuscinetti

Contrariamente a quanto si può pensare, non sono solo le coppie torcenti e le velocità a determinare la taglia del riduttore più idoneo per un' applicazione, ma spesso anche le forze radiali, che vanno a sollecitare i cuscinetti ed influiscono sulla loro durata.

La forza radiale [ $F_{2r}$ ] agente sull'albero sollecita i cuscinetti in due modi: attraverso un carico radiale e attraverso un momento → **la coppia di ribaltamento:**



$$Crib = F_{2r} \times [X_2 + Z_2]$$

Mentre  $Z_2$  è fisso in quanto dipende dalla geometria del riduttore,  $X_2$  varia in funzione dell'applicazione [per esempio nel caso in cui si monti una puleggia a sbalzo].

E' sempre necessario verificare che la coppia di ribaltamento sviluppata nell'applicazione sia inferiore a quella massima supportabile dal riduttore.



---

## Rapporto inerziale

Il rapporto inerziale è definito come il rapporto tra le inerzie relative al carico e quelle relative al motore:

$$\lambda = \frac{J_{\text{esterno}}}{J_{\text{interno}}}$$

$\lambda = 1$  = l'inerzia del motore è pari a quella del carico: si ha un controllo molto semplice.

$\lambda > 1$  = All'aumentare dell'inerzia esterna a sfavore di quella interna del motore, il controllo diventa sempre più difficile in quanto la prima può aumentare in modo incontrollato. A seconda delle applicazioni, esistono dei limiti entro i quali il sistema può considerarsi controllabile

$\lambda < 1$  = Se si aumenta l'inerzia interna rispetto a quella esterna ci troviamo in una condizione in cui il controllo è molto agevole in quanto il sistema non tende ad oscillare; in questo modo tuttavia molta della coppia motore viene utilizzata per accelerare il motore stesso.



WITTENSTEIN

## Rapporto inerziale

Nelle trasmissioni meccaniche il controllo è migliorato anche dall'utilizzo del **riduttore** che, oltre ad avere influenza sulla variazione della velocità e della coppia, agisce anche sull'inerzia dell'applicazione che si riflette sul motore riducendola del quadrato del rapporto di riduzione:

$$J_{ridotta} = \frac{J}{i^2}$$

Il rapporto di inerzia del sistema considerando la presenza del riduttore diventa:

$$\lambda = \frac{J_{carico} \cdot \frac{1}{i^2} + J_{parte\_1^\circ\_riduttore}}{J_{motore} + J_{cannotto\_calettatore} + J_{pignone}}$$



WITTENSTEIN

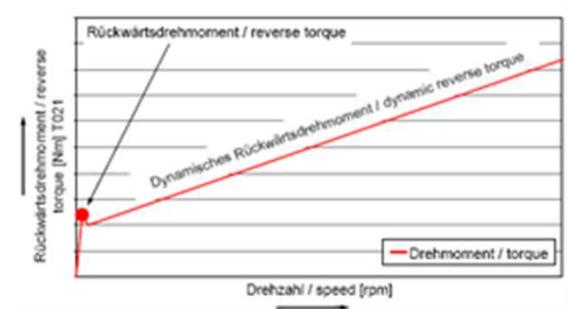
## Coppia di reversibilità

Tutti i riduttori, anche i migliori, sono soggetti a dissipazioni di energia. Le cause possono essere molteplici: sfregamento dente su dente, attrito delle guarnizioni, perdite idrodinamiche, etc

In una condizione ideale [senza perdite energetiche] applicando una coppia in ingresso al riduttore si avrà all'uscita la stessa coppia moltiplicata per il coefficiente di riduzione. Nella realtà, però, non è così perché la coppia in uscita è sempre inferiore a questo valore teorico.

Definiamo **coppia senza carico**  $T_{012}$  la coppia che deve essere applicata al riduttore per poter superare gli attriti interni.

$$C_{uscita} \approx C_{entrata} - C_{senza\ carico}$$



La **coppia di reversibilità** è la coppia che si deve applicare all'uscita per far ruotare l'ingresso ed è direttamente collegata alla coppia senza carico attraverso il rapporto di riduzione:

$$C_{reversibilità} \approx C_{senza\ carico} \times i$$

La coppia senza carico e la coppia di reversibilità variano in funzione della velocità di rotazione. Tuttavia, per convenzione, si indica il valore che viene calcolato a 3.000 rpm.



WITTENSTEIN

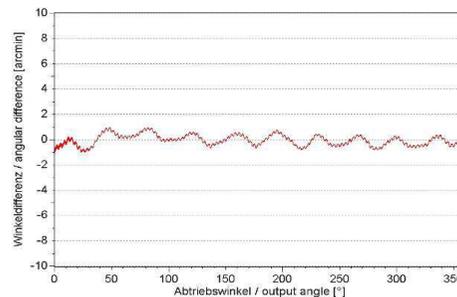
## Uniformità di rotazione / deviazione di sincronismo

L'**uniformità di rotazione** è una misura dello scostamento angolare che si registra sull'albero di uscita del riduttore a seguito di una rotazione completa dell'albero di ingresso.

Per avere un'idea più chiara dello scostamento consideriamo un riduttore con rapporto di riduzione  $i=10$

In teoria se l'albero di ingresso compie  $360^\circ$ , l'albero di uscita deve compiere  $36^\circ$  esatti.

Nella realtà, a causa delle tolleranze di lavorazione degli ingranaggi, dei cuscinetti e di tutti gli altri componenti del riduttore, in uscita si registrerà un valore pari a circa  $36^\circ$ . La differenza tra il valore teorico e quello misurato determina l'errore di uniformità che, posto su un grafico, è rappresentato come qui sotto.



Lo stesso discorso può essere esteso alla velocità di rotazione:

ad una velocità di ingresso di 10 rpm dovrebbe corrispondere una velocità di uscita di 1rpm, ma il valore misurato sarà circa 1 rpm.

La differenza tra valore teorico e valore misurato è detto **deviazione di sincronismo**.



**WITTENSTEIN**

---

**Grazie per la vostra attenzione !**

**[www.wittenstein.it](http://www.wittenstein.it)**

**Tutt'uno con il futuro**