

Alessio Artoni – Meccanica Applicata alle Macchine

Ingranaggi: tipologie e tecnologie speciali



UNIVERSITÀ DI PISA
Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale (DICI)

Ingranaggi cilindrici con profili a evolvente di cerchio

Un po' di terminologia inglese

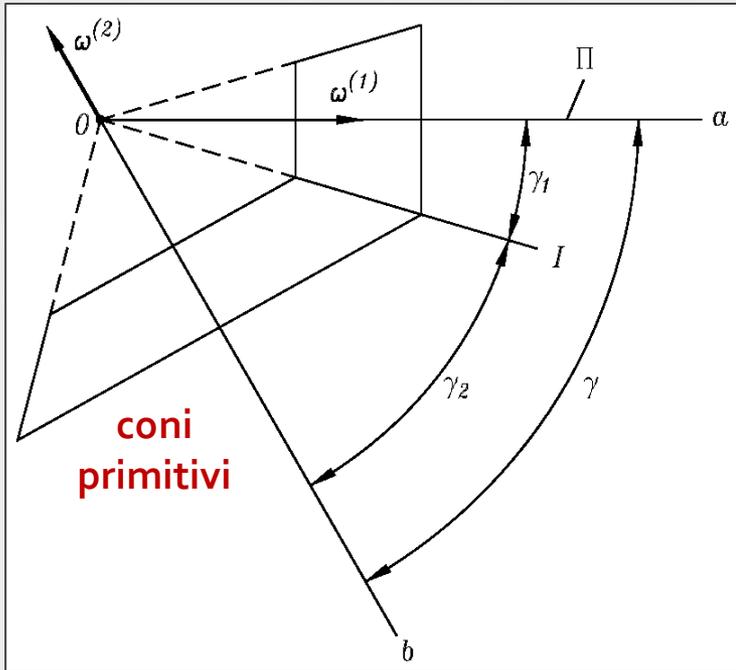
"Gears & Gear Manufacturing" by *Tooling U-SME*

https://www.youtube.com/watch?v=8s4zm_ajxAA

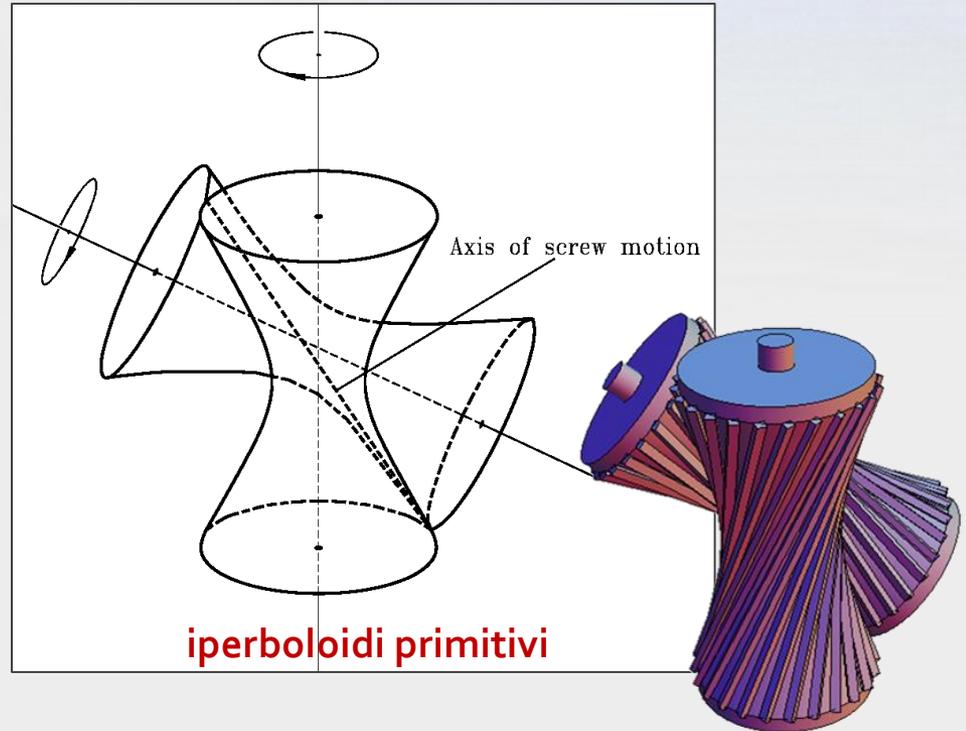
(link ai filmati incorporati nel video)

Superfici primitive (assoidi)

assi incidenti



assi sghembi



Ingranaggi spiroconici e ipoidi



coppia *spiroconica*
per assi incidenti
(*spiral bevel gears*)

I torniti dentati sono tronchi di cono costruiti 'attorno' ai coni primitivi.



coppia *ipoide* per
assi sghembi
(*hypoid gears*)

Gli iperboloidi primitivi si prestano male ad essere dentati: come torniti si usano tronchi di cono che 'approssimano localmente' le superfici assoidi.

Ruote iperboloidi

Tuttavia non sarebbe impossibile dentare gli iperboloidi primitivi:



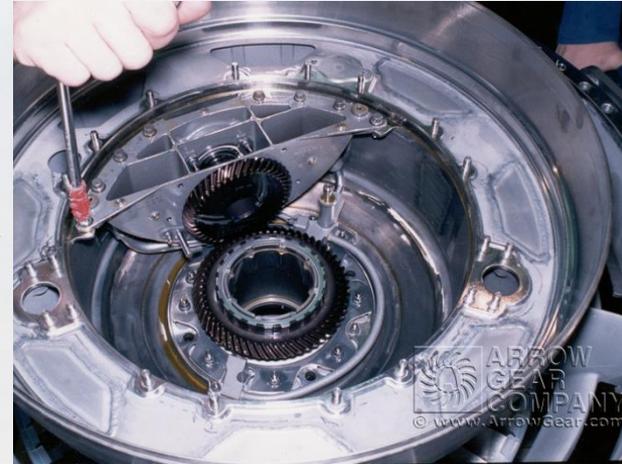
<https://www.youtube.com/watch?v=Vux-AUPHfLg>

Ingranaggi spiroconici e ipoidi



SPIROCONICI

applicazioni aeronautiche
e automotive (spinte: F1)



Modulo power take-off
(motore turbofan GE F404)



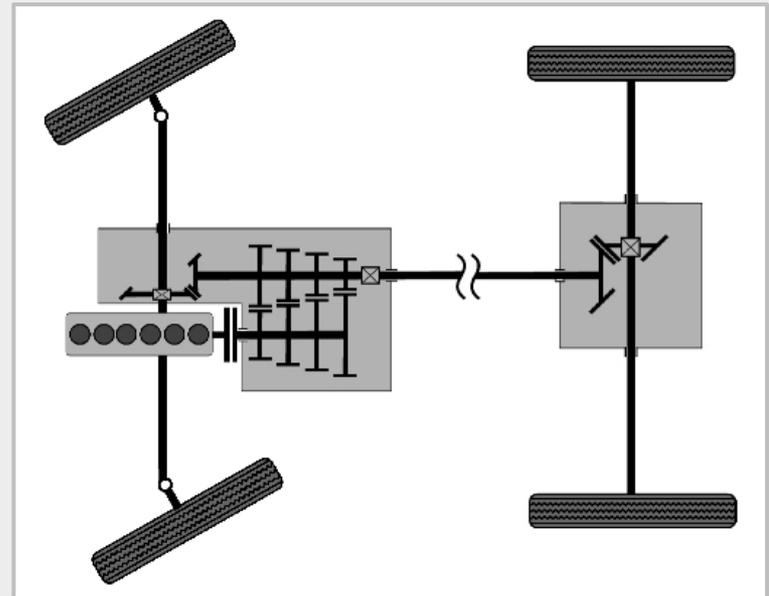
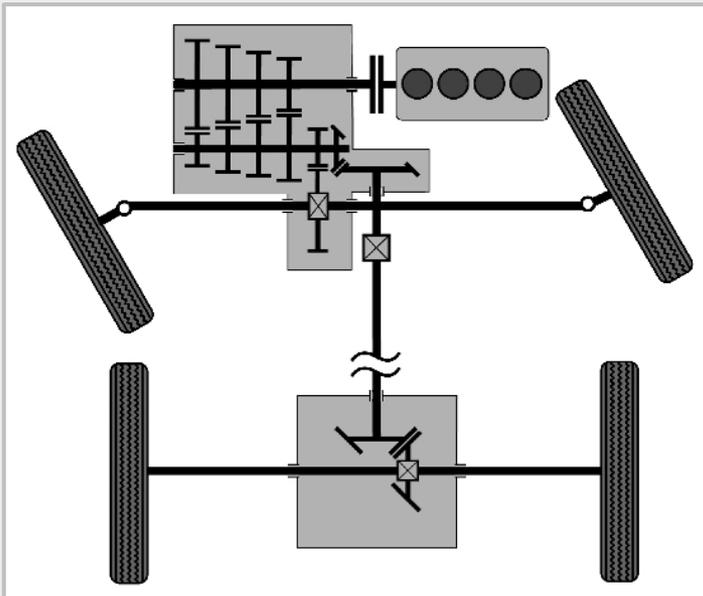
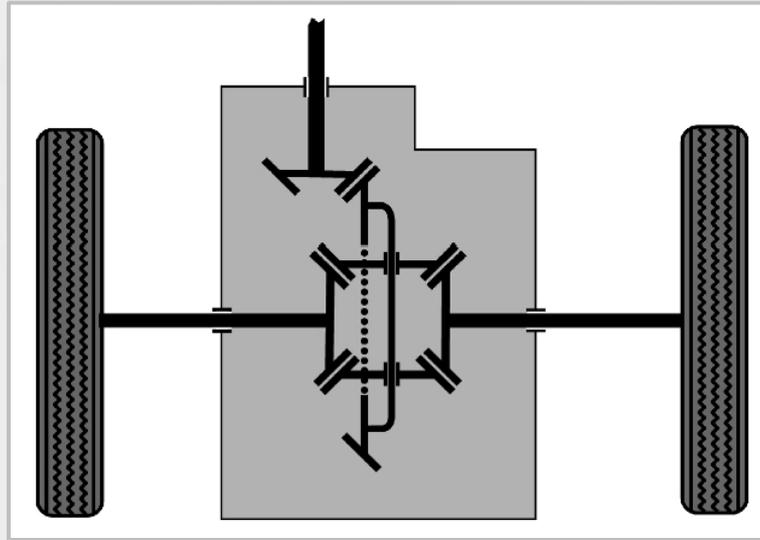
IPOIDI

applicazioni automotive

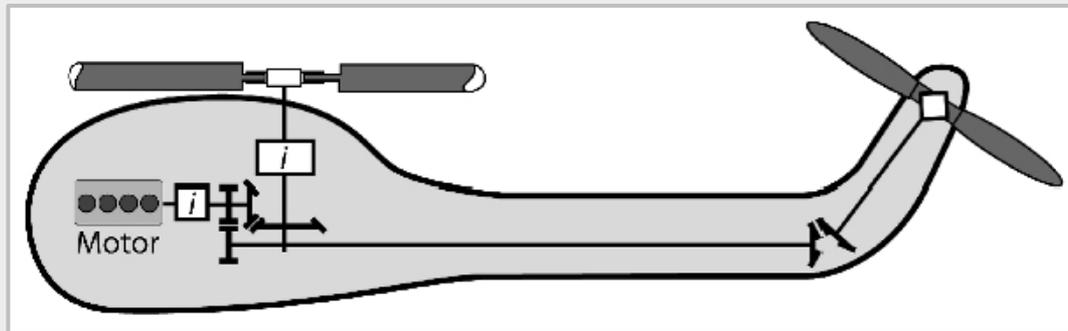
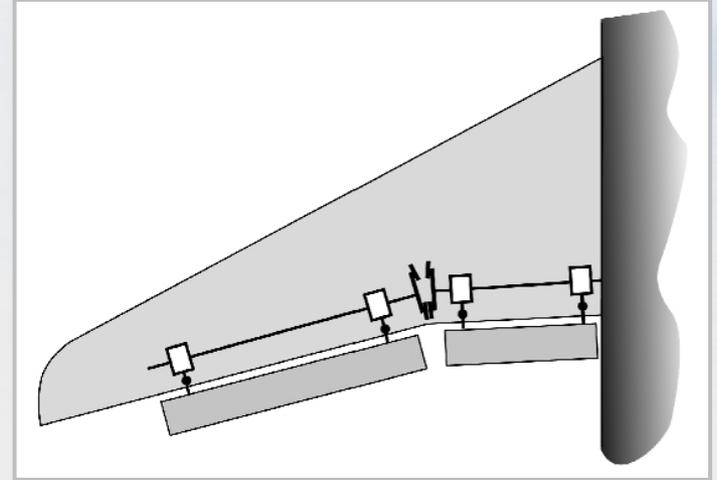
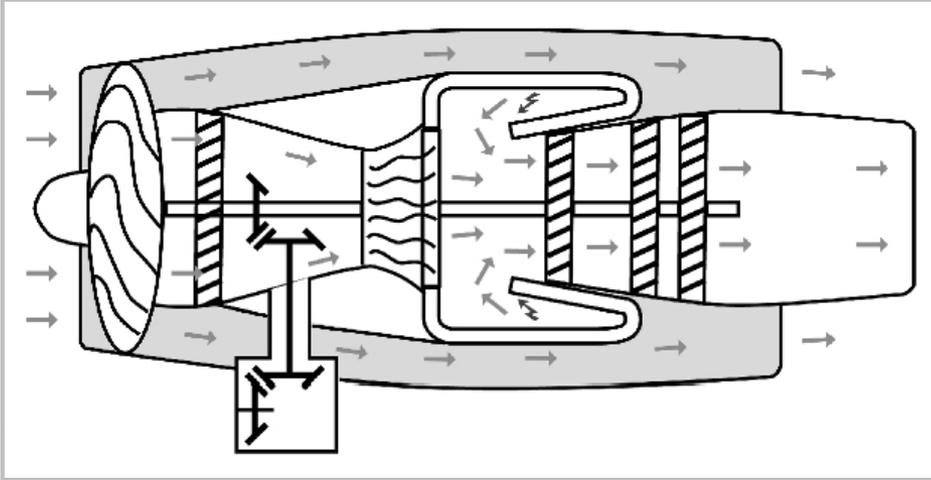


Differenziale posteriore
(BMW)

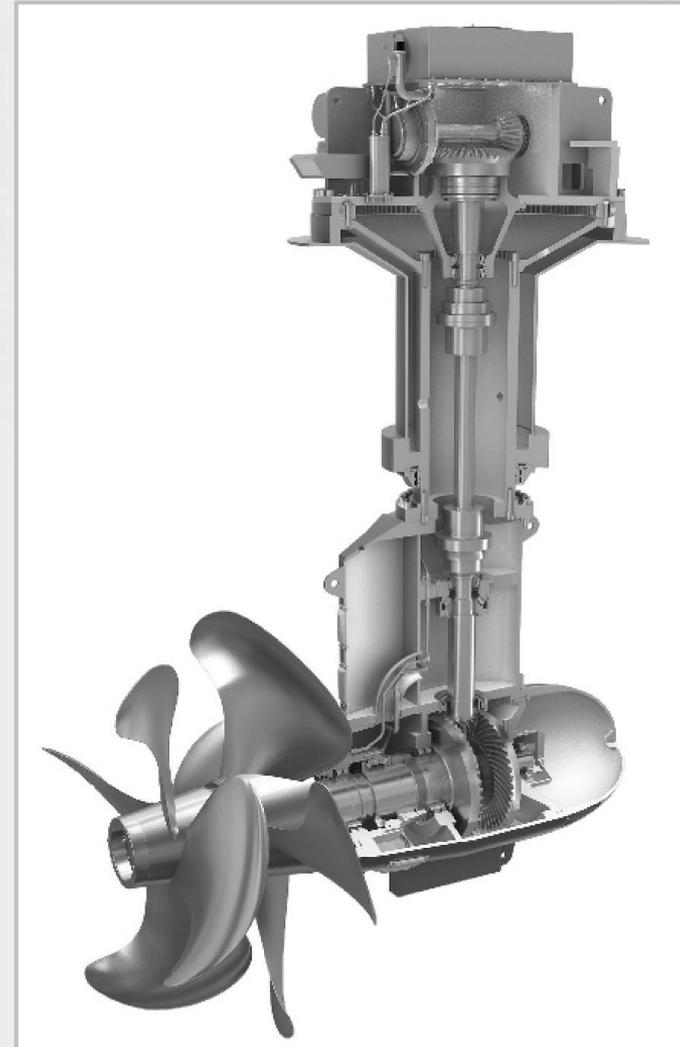
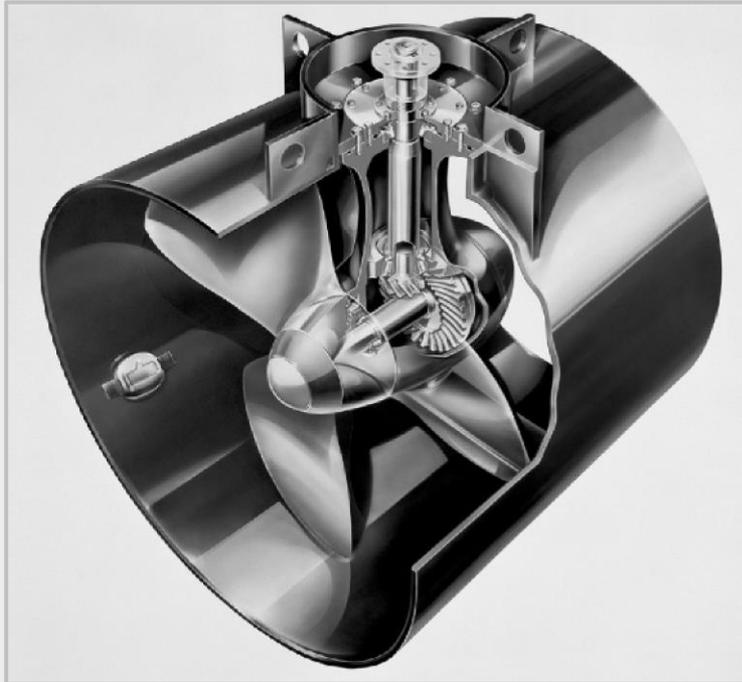
Ingranaggi spiroconici e ipoidi: applicazioni *automotive*



Ingranaggi spiroconici e ipoidi: applicazioni *aerospace*



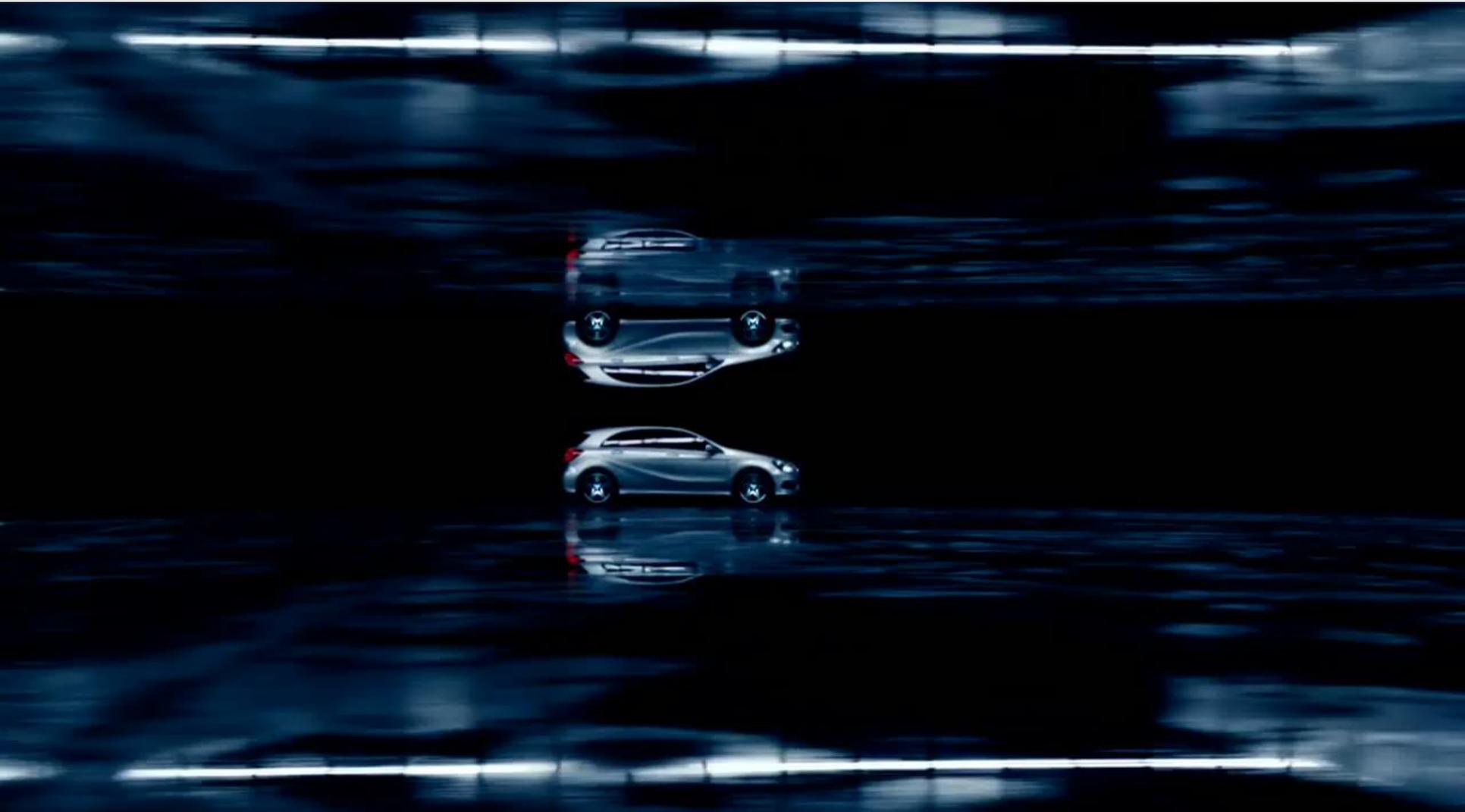
Ingranaggi spiroconici e ipoidi: applicazioni *marine*



Applicazioni aeronautiche

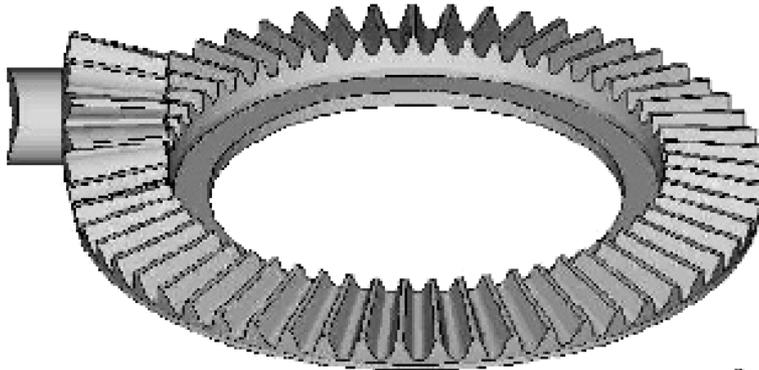
<https://www.youtube.com/watch?v=DUafG-zZrkk>

Applicazioni automotive

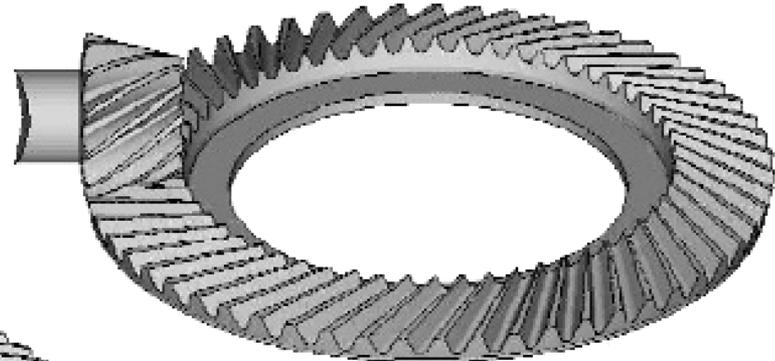


<https://www.youtube.com/watch?v=HSQk1JcgWgI>

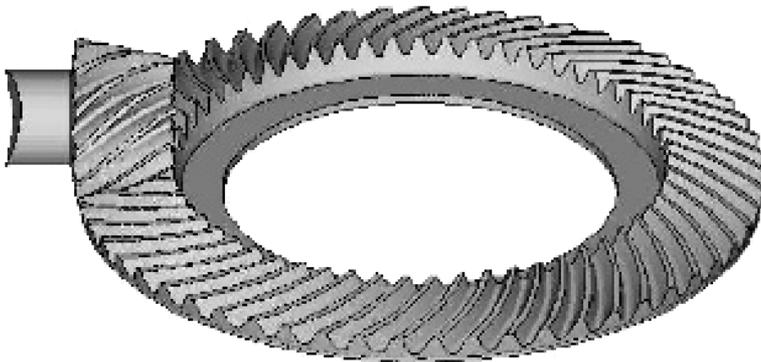
Pignoni ingrananti con ruote piano-coniche



a denti dritti
(*straight bevel gears*)

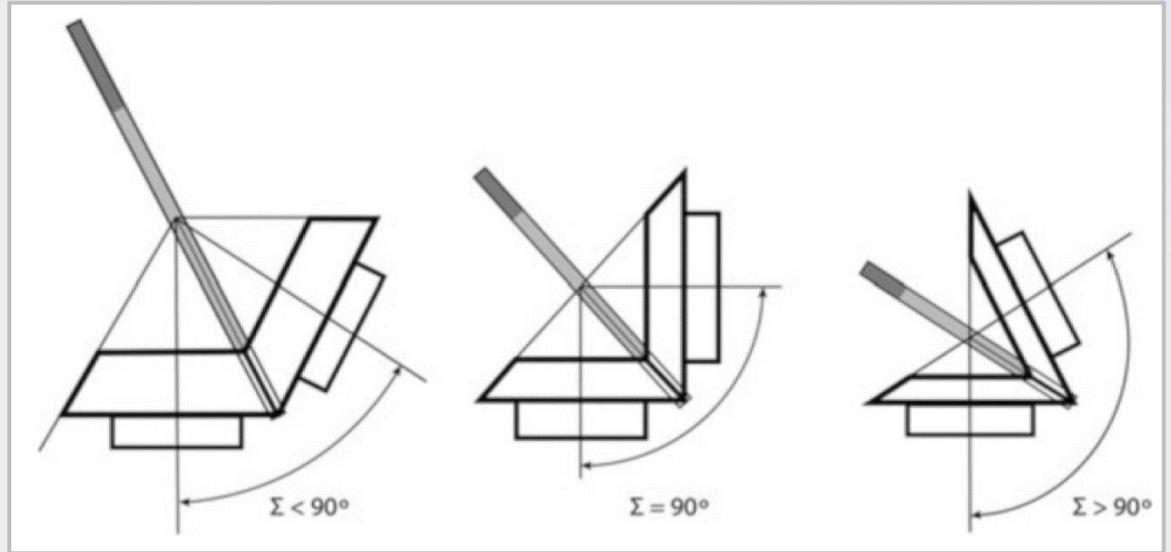


a denti obliqui
(*skew bevel gears*)



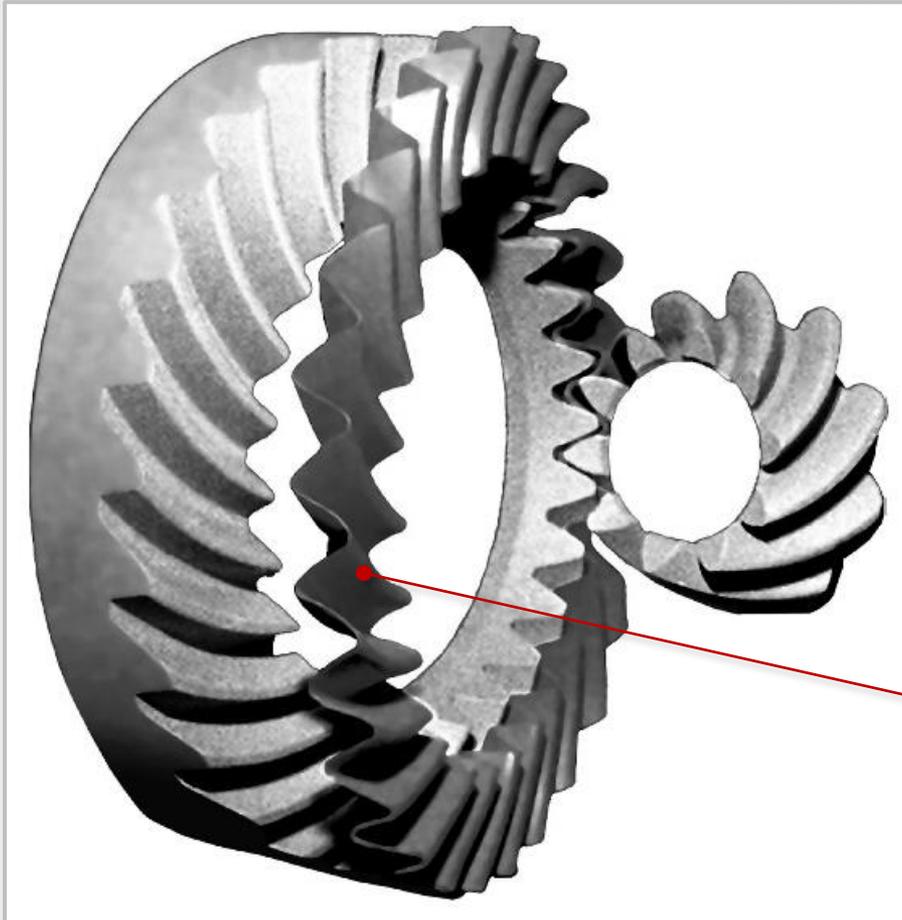
con denti a spirale
(*spiral bevel gears*)

Generazione ingranaggi conici con ruota pianoconica virtuale



Generazione per involuppo di pignone e corona
mediante **ruota pianoconica** (virtuale): profili di assortimento

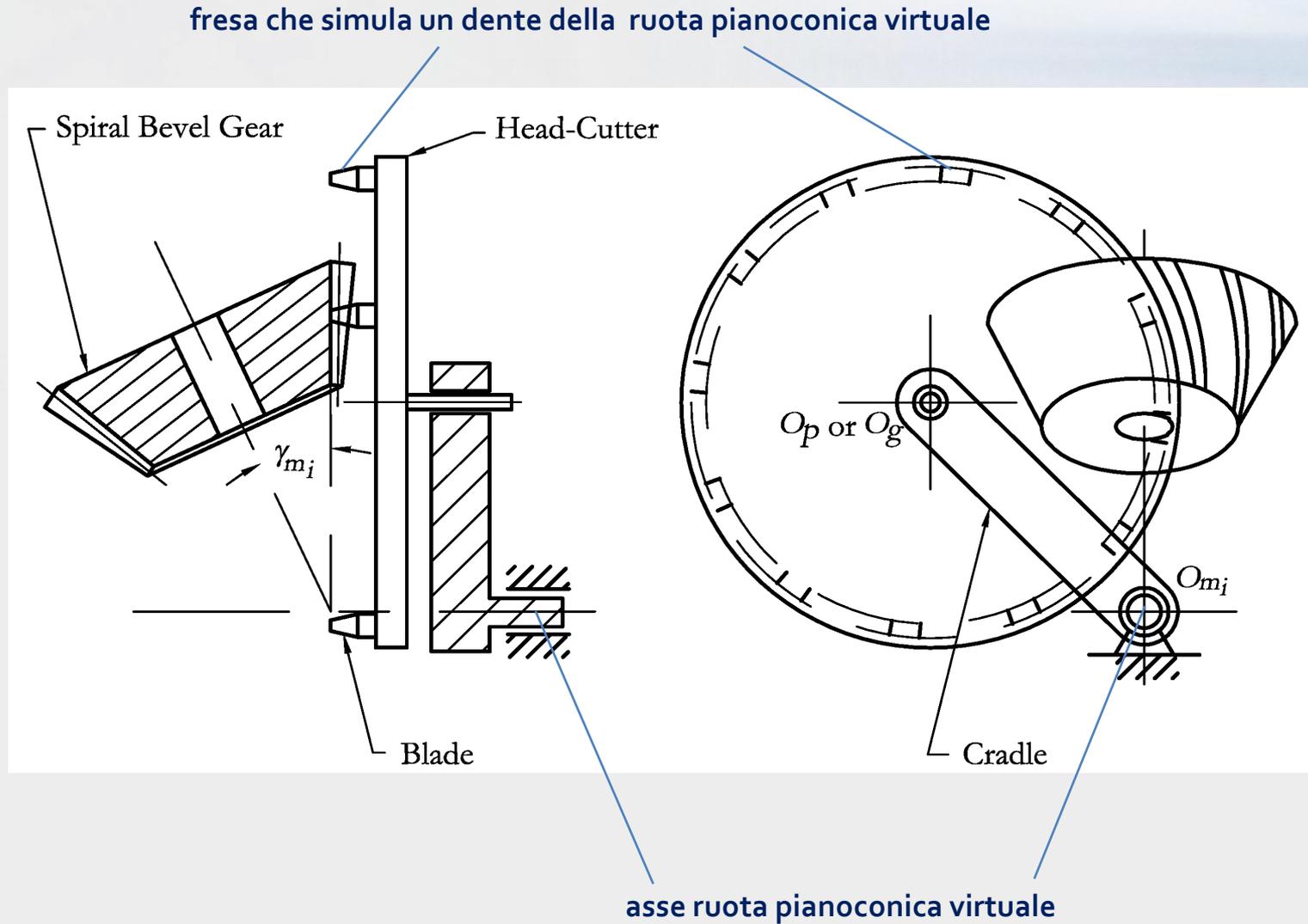
Generazione ingranaggi conici con ruota pianoconica virtuale



Durante il moto di generazione, la ruota pianoconica, il pignone e la corona si muovono solidali ai rispettivi assoidi

materializzata nella pratica da diverse tipologie di utensili

Tipico layout (Gleason) per taglio ingranaggi spiroconici/ipoidi

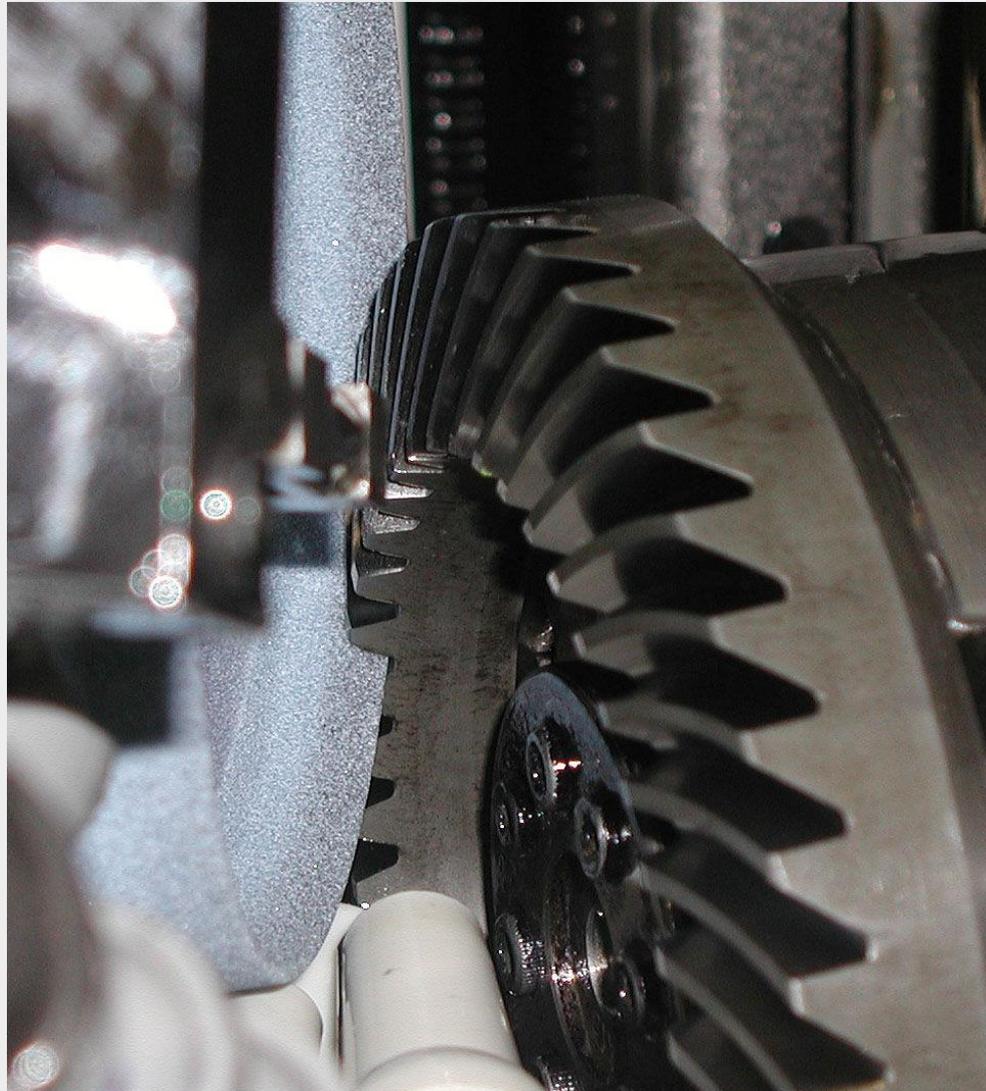


Metodo *face-milling* per taglio ingranaggi spiroconici/ipoidi

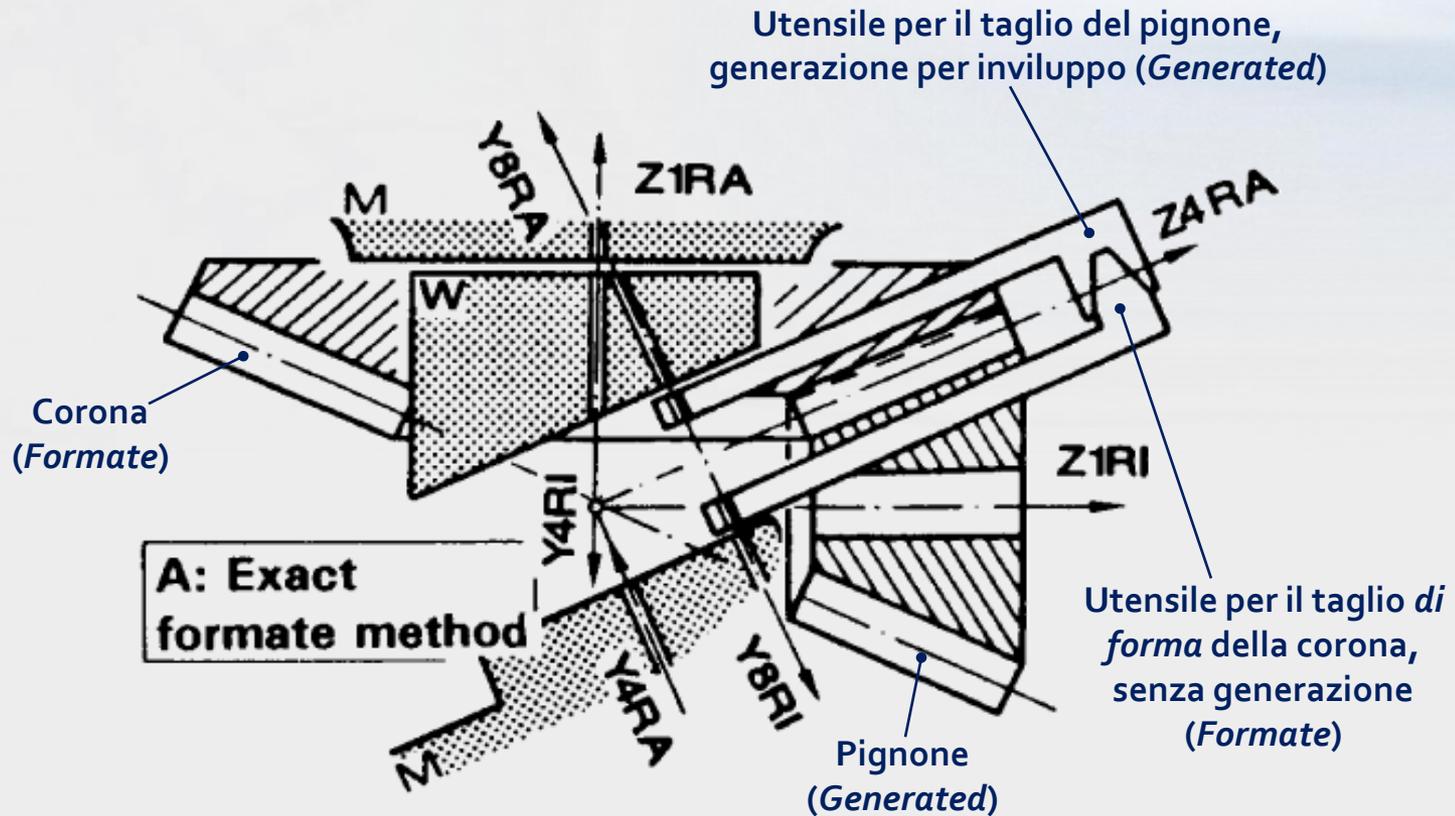


<https://www.youtube.com/watch?v=tNks3OdE-FE>

Metodo *face-milling* per rettifica ingranaggi spiroconici/ipoidi

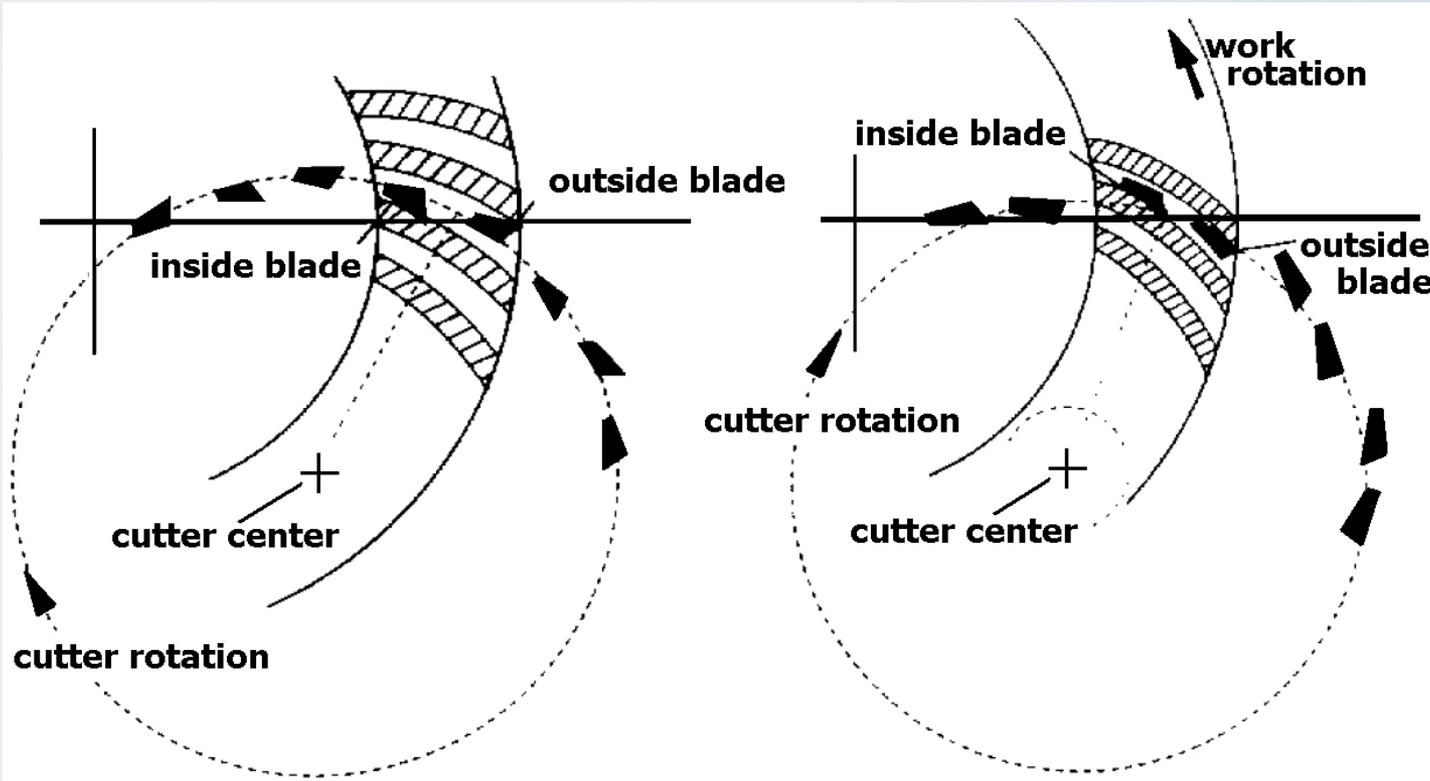


Schema concettuale per taglio *Formate*



L'utensile materializza un dente della corona:
il pignone è ottenuto per involuppo della corona stessa
(non viene utilizzata la ruota pianoconica)

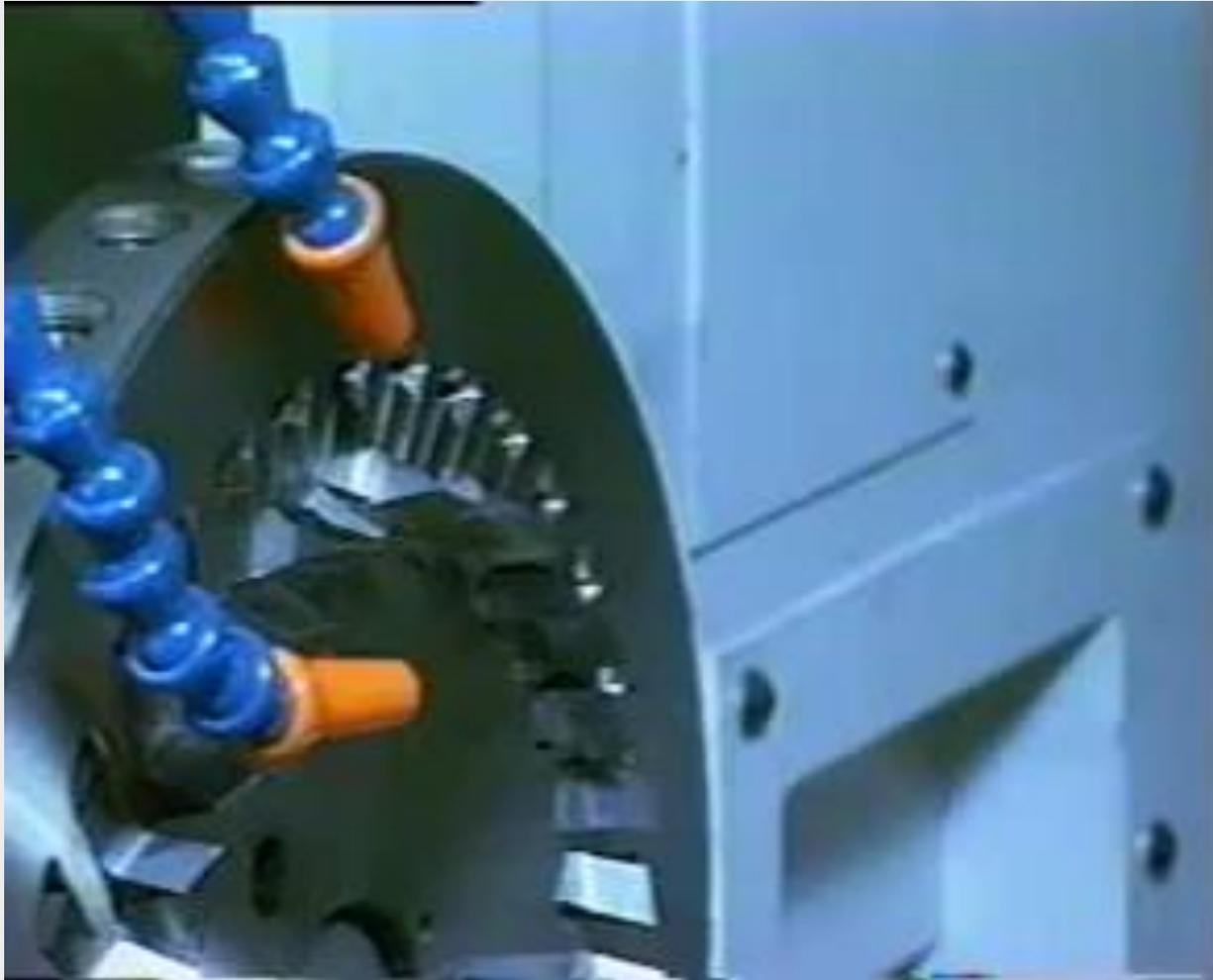
Principali metodi di taglio ingranaggi conici



Face-milling
(single indexing)

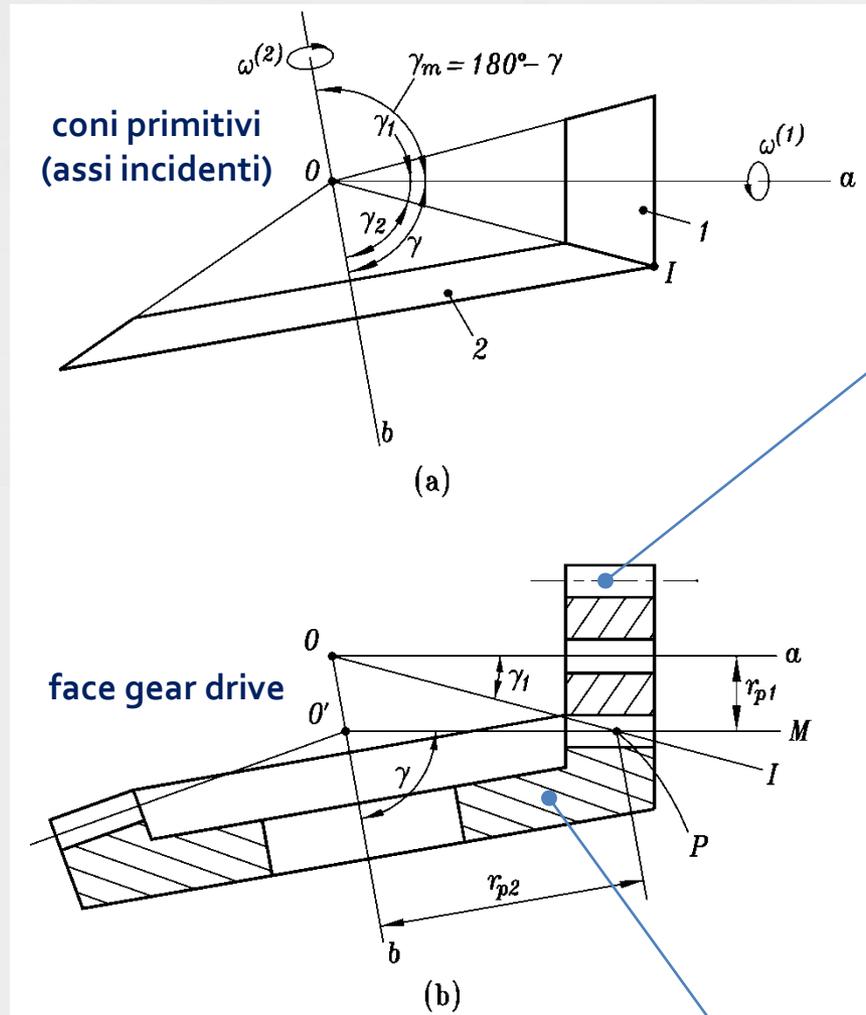
Face-hobbing
(continuous indexing)

Metodo *face-hobbing* per taglio ingranaggi spiroconici/ipoidi



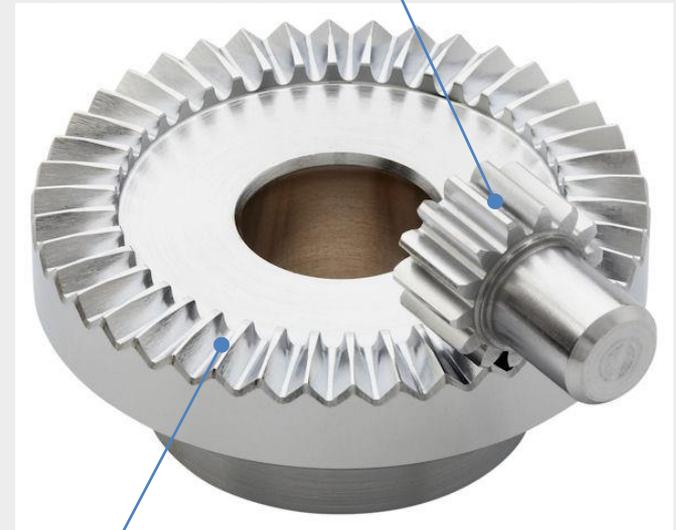
<https://www.youtube.com/watch?v=7paLPW3CjEs>

Ingranaggi frontali: *face gears*



Per assi incidenti (soprattutto) e sghembi

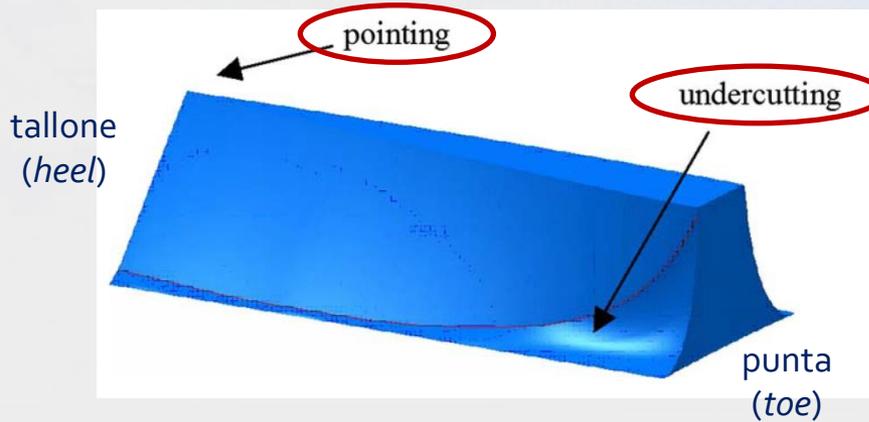
pignone cilindrico con denti a evolvente
(dritti o elicoidali)



corona *face*, ottenuta come *inviluppo del pignone*
(profili coniugati in contatto di linea)

Ingranaggi frontali: *face gears*

Limiti all'estensione del dente corona nel senso della fascia:



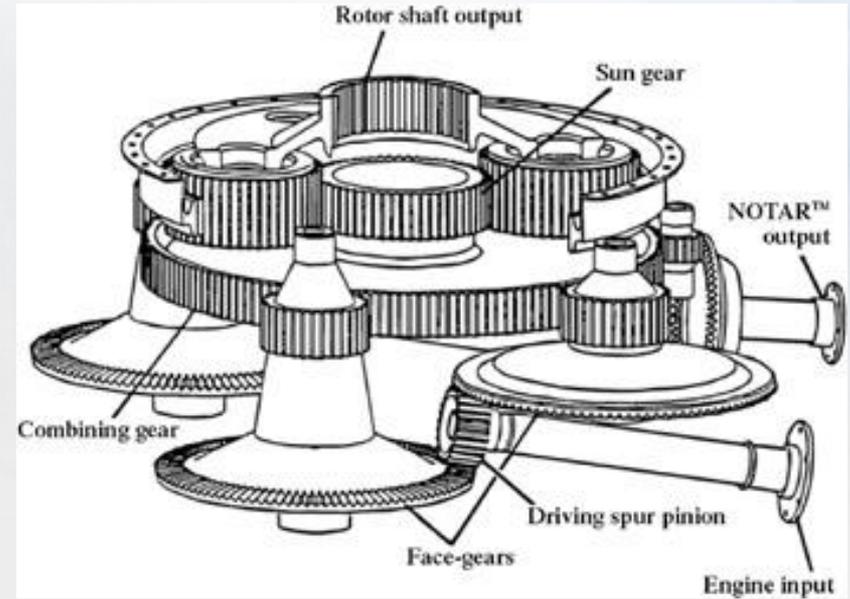
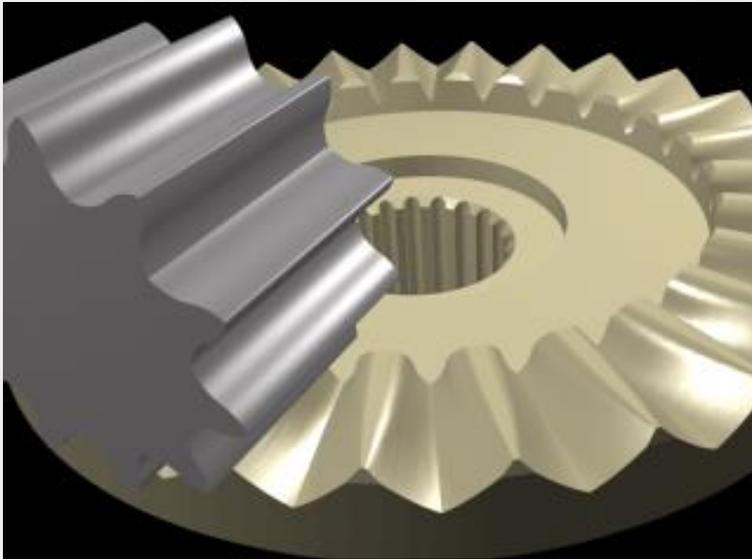
VANTAGGI dei face gear:

- il pignone può spostarsi assialmente senza alterare le proprietà geometriche d'ingranamento
- sono possibili ingranamenti multipli
- si possono ottenere forti rapporti di trasmissione

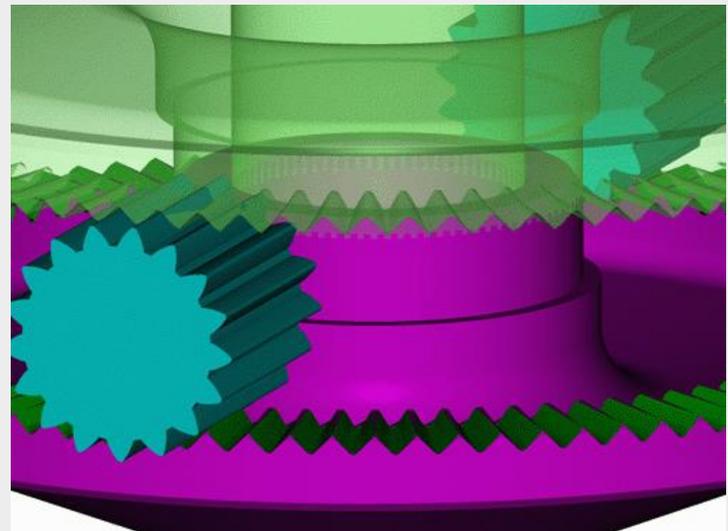
SVANTAGGI dei face gear:

- non è semplice rettificarli
- il pignone, cilindrico, si discosta dalla sua superficie primitiva (cono), peggiorando l'efficienza meccanica (spesso lievemente)

Ingranaggi frontali: *face gears*



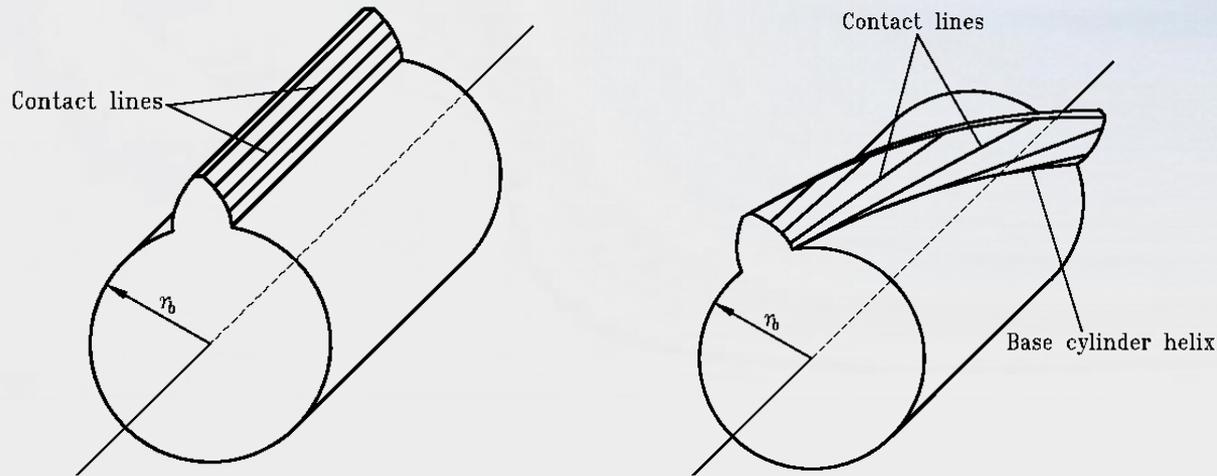
Architettura trasmissione elicoteristica



Un fatto

- ⇒ Nella quasi totalità delle ruote dentate usate nell'ambito della trasmissione di potenza, profili coniugati *puri* (ad es., evolvente per ruote cilindriche) **non esistono**.
- ⇒ In generale, la *micro-geometria* di tutti i tipi di ruote dentate nominalmente in contatto di linea viene modificata per avere contatto nominale di punto.

Perché le micro-correzioni?



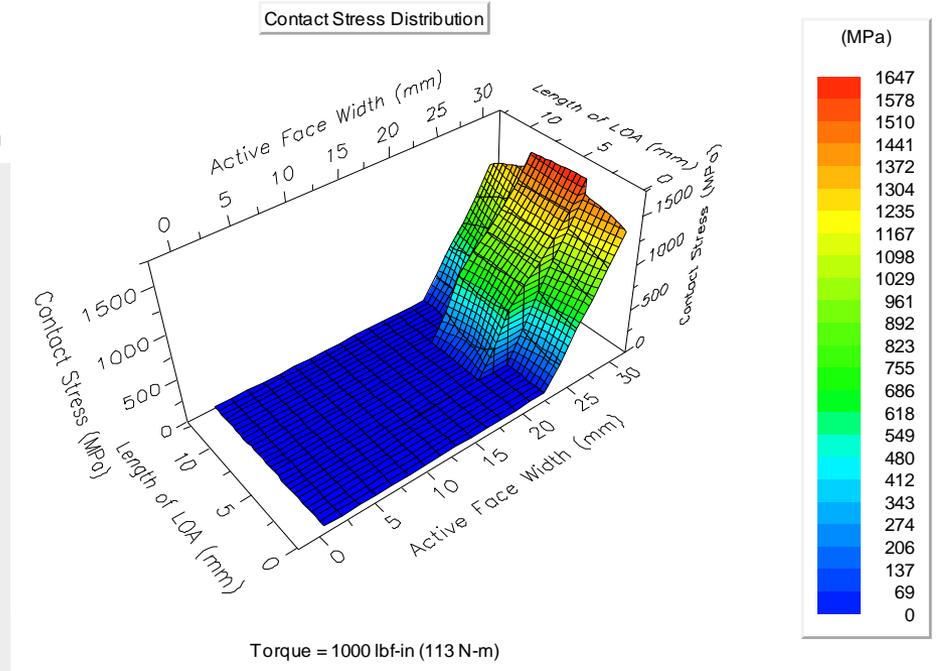
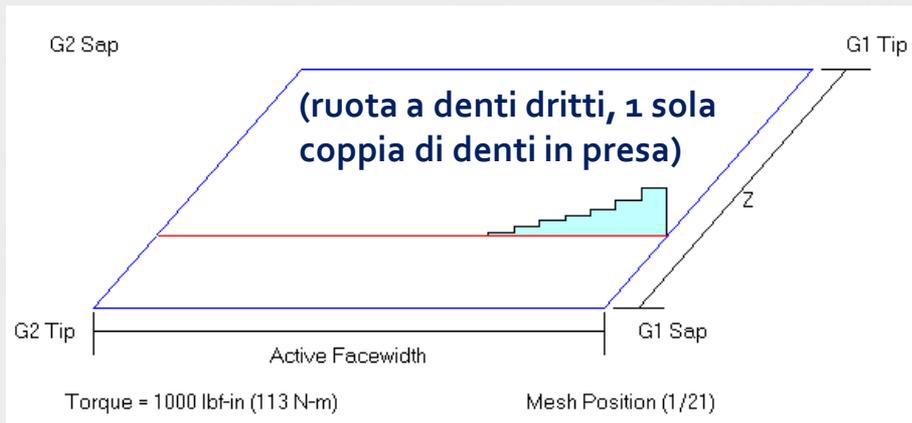
Linee di contatto nominali su denti dritti ed elicoidali (profili a evolvente)



Cosa accade in caso di **deformazioni elastiche dei denti** e **disallineamenti** (errori di montaggio, deformazioni elastiche sotto carico dei supporti, imperfezioni costruttive)?

Perché le micro-correzioni?

⇒ In caso di disallineamenti, il contatto potrebbe trasferirsi irrimediabilmente sugli spigoli del dente (**edge-contact**)



Bombatura del dente

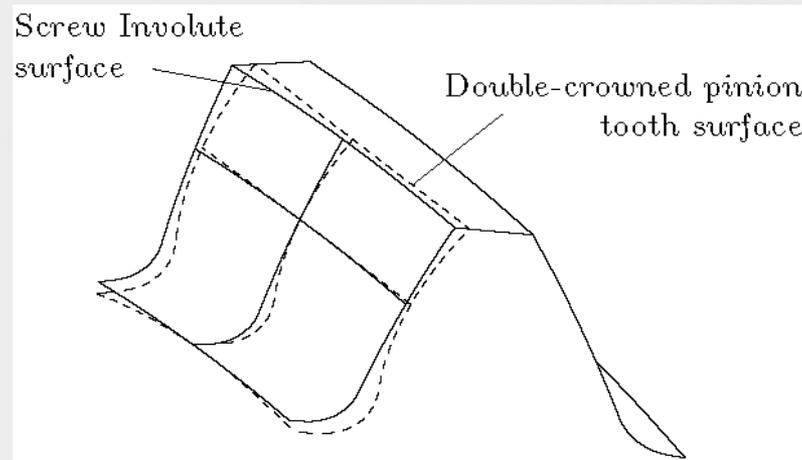
⇒ Un metodo molto usato per stabilizzare il contatto nelle ruote a denti dritti è la **bombatura** del dente (*lead crowning*)



Esempio di pignone con bombatura (esagerata)

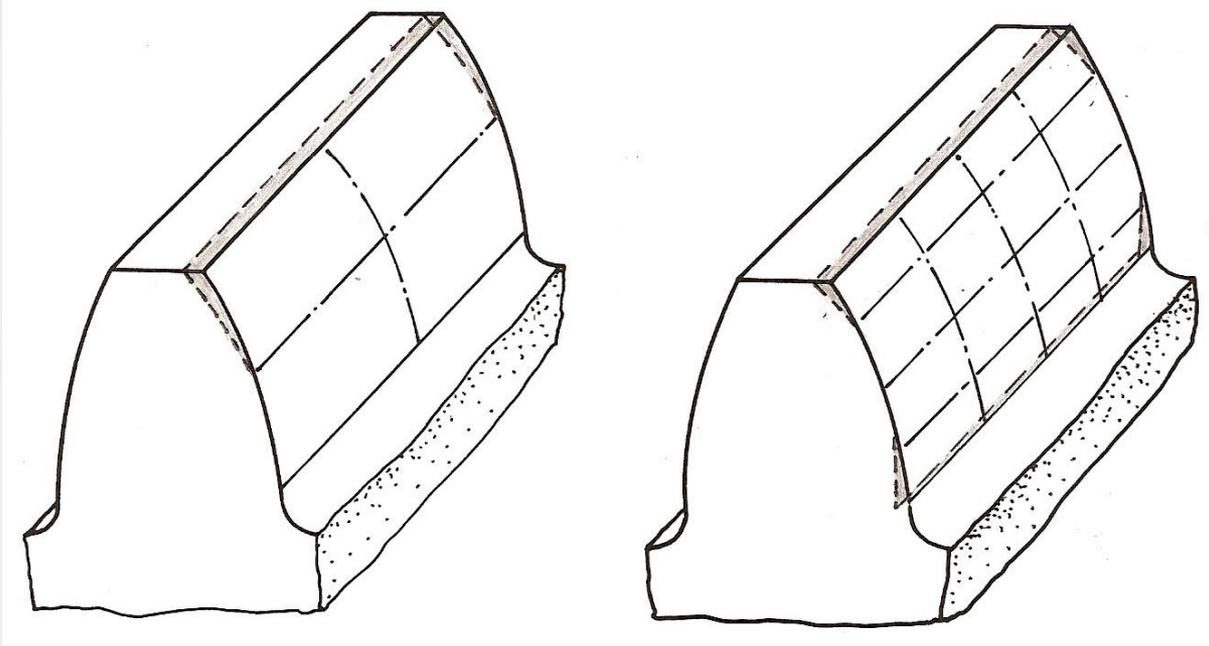
Bombatura del dente

⇒ Per la maggior parte delle ruote dentate, la bombatura è pressoché indispensabile sia lungo la fascia che lungo il profilo. Si parla quindi di **lead** (o **lengthwise**) **crowning** e **profile crowning**



⇒ Storicamente, profile crowning e lead crowning hanno avuto come obiettivo principale quello di tenere la zona dei contatti sufficientemente lontana dai bordi ed **evitare edge-contact**.

Spoglia del dente



Tip relief

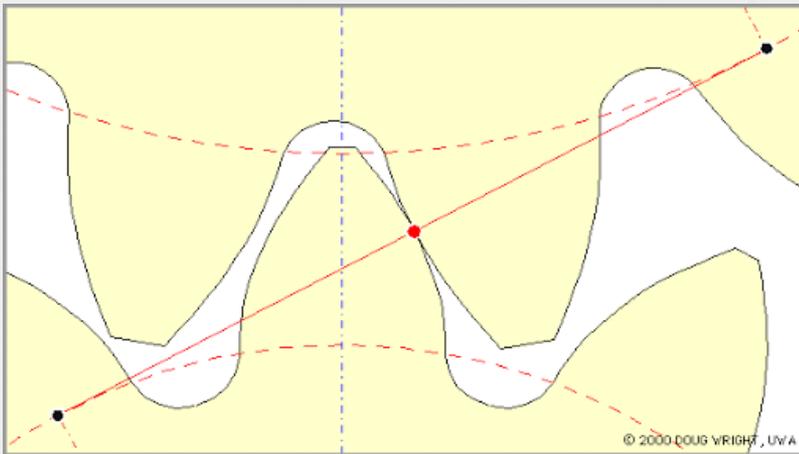
Tip relief e root relief



Scaricano le estremità del profilo del dente per evitare edge-contact e alleviare urti.

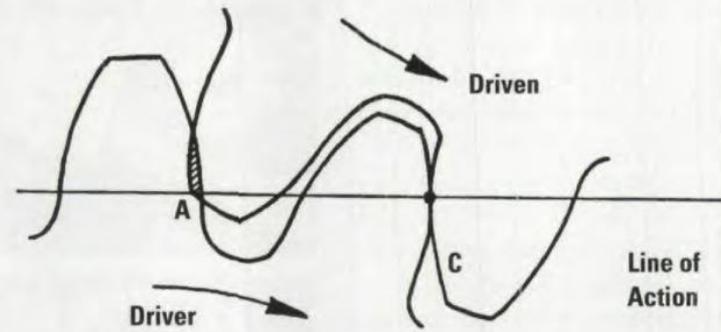
Spoglia del dente

Ruote ideali (corpi rigidi)

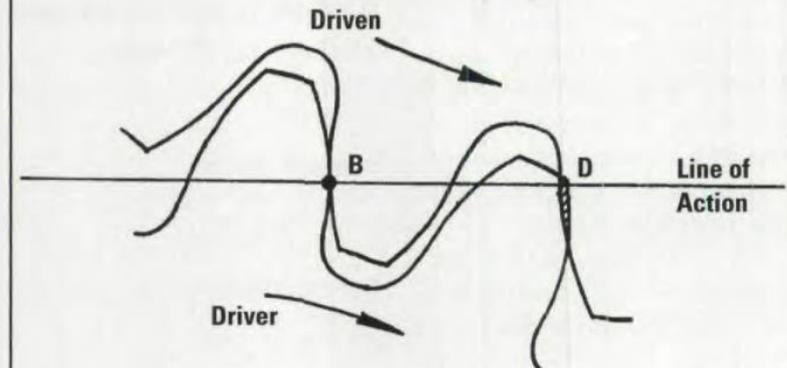


Ruote reali (deformabili)

Tip relief on driven gear prevents interference.



Tip relief on driving gear prevents interference.



Micro-correzioni per ingranaggi più silenziosi

⇒ Errori geometrici, disallineamenti, deformabilità, urti, ecc. causano **errori di trasmissione**, principale causa di **rumorosità e vibrazioni** delle ruote dentate.

$$e_t = \phi_p^{(r)} - \phi_p^{(th)} = \phi_p^{(r)} - \frac{z_c}{z_p} \phi_c$$



⇒ Tip relief, root relief, lead crowning e profile crowning possono essere usati efficacemente per minimizzare l'errore di trasmissione.

Oltre a questi tipi di modifiche micro-geometriche ne esistono altre, più sofisticate, dette di *ordine superiore*.

Importanza delle micro-correzioni

- ⇒ Consentono di distribuire il contatto in modo da sfruttare bene la fascia attiva del dente ed evitare edge-contact.
- ⇒ Consentono di localizzare il contatto in zone a minor strisciamento.
- ⇒ Consentono di minimizzare l'errore di trasmissione.
- ⇒ Alleviano l'entità degli urti durante la presa di contatto.
- ⇒ Consentono di ridurre lo sforzo di flessione a piede dente (*bending stress*).



- ⇒ Massimizzazione vita a fatica della coppia.
- ⇒ Minimizzazione rumorosità e vibrazioni.
- ⇒ Massimizzazione densità di potenza trasmissibile.
- ⇒ Massimizzazione rendimento meccanico.

Realizzazione pratica delle micro-correzioni

- ⇒ Moti macchina modificati (durante il taglio di generazione per involuppo).
- ⇒ Profilo utensile modificato (rispetto a quello necessario per tagliare denti a evolvente).
- ⇒ Le micro-correzioni prescritte (entità variabili tra 10 e 300 μm) risultano accurate solo se realizzate mediante rettifica.

Come si stabilisce l'entità delle micro-correzioni?

- ⇒ Non esistono formule.
- ⇒ L'entità delle correzioni è fissata tipicamente sulla base di esperienza individuale, know-how aziendale, trial and error.
- ⇒ Sono necessari strumenti di calcolo (ad es. FEM) in grado di stimare con accuratezza i parametri del contatto (pressioni di contatto, contact pattern, errori di trasmissione, ecc.)
- ⇒ È necessario formulare il problema in questione come un **problema di ottimizzazione**, con opportuni obiettivi, le cui variabili di progetto coincidano con le entità delle micro-correzioni da assegnare.

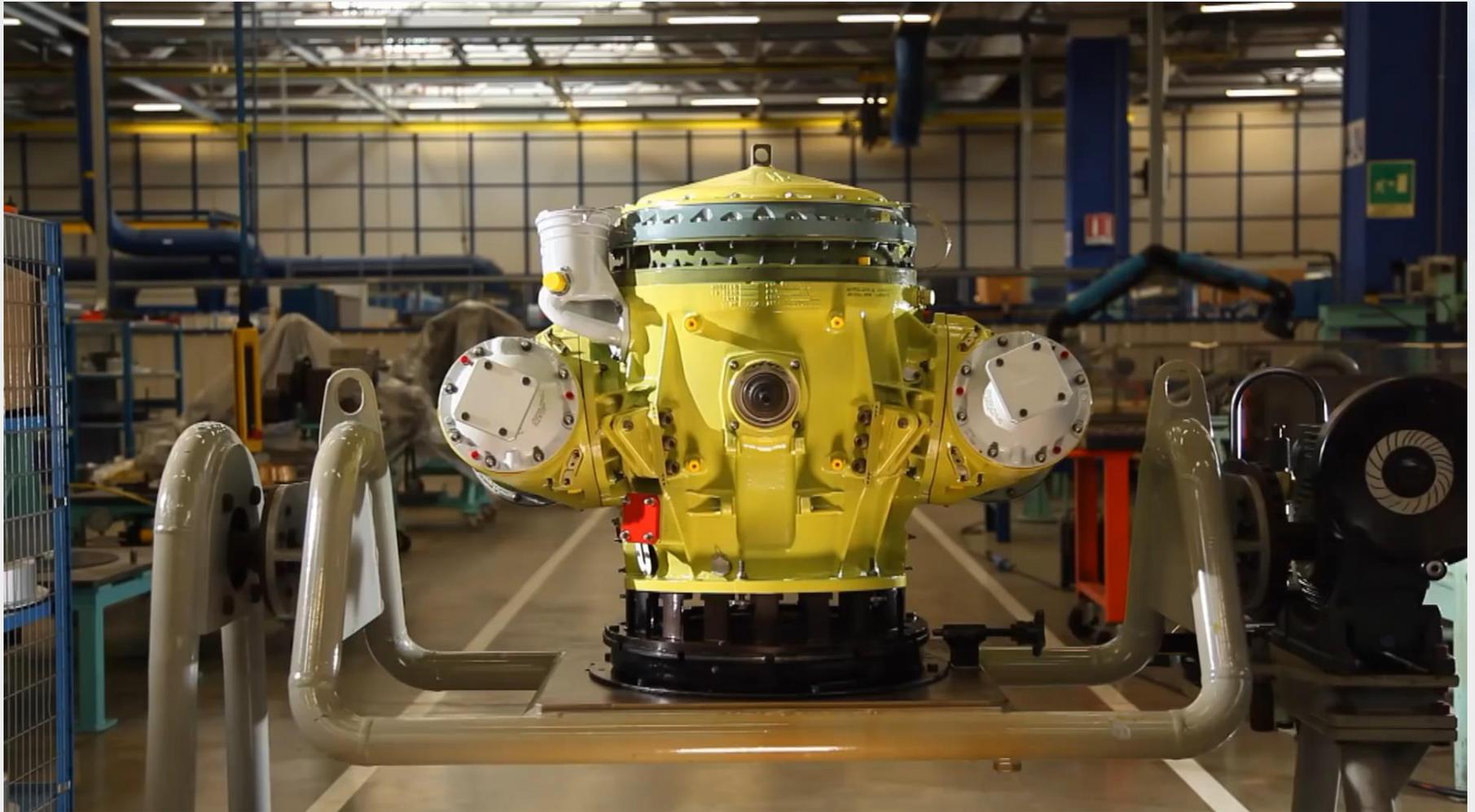
⇒ Ottimizzazione micro-geometria ingranaggi spiroconici per *transfer gearbox* (TGB) ed *inlet gearbox* (IGB) del motore turbofan *General Electric GEnx-1B*.



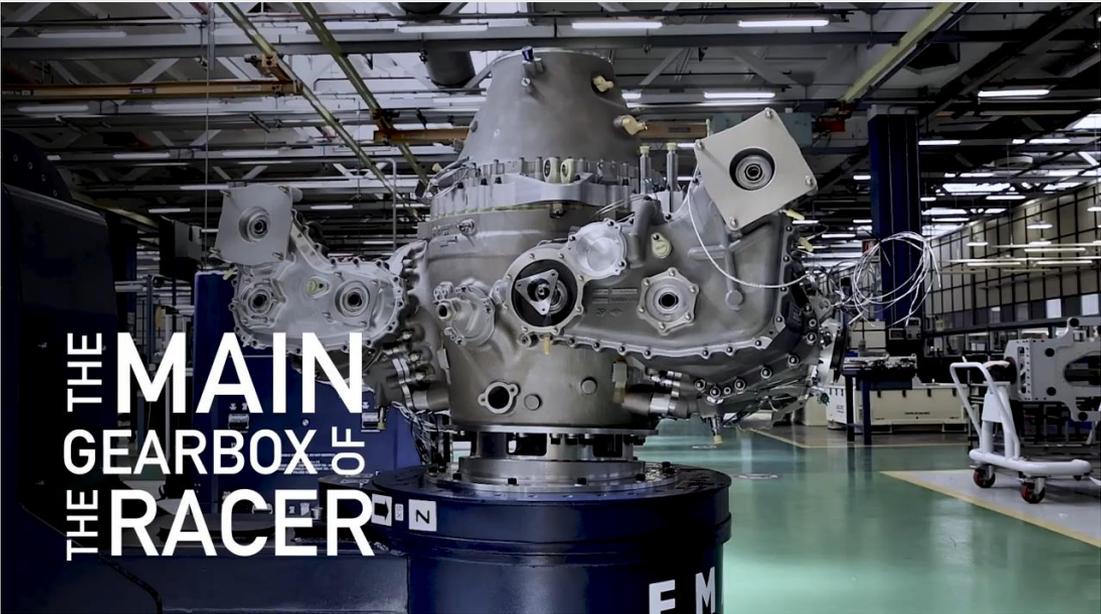
Principale applicazione:



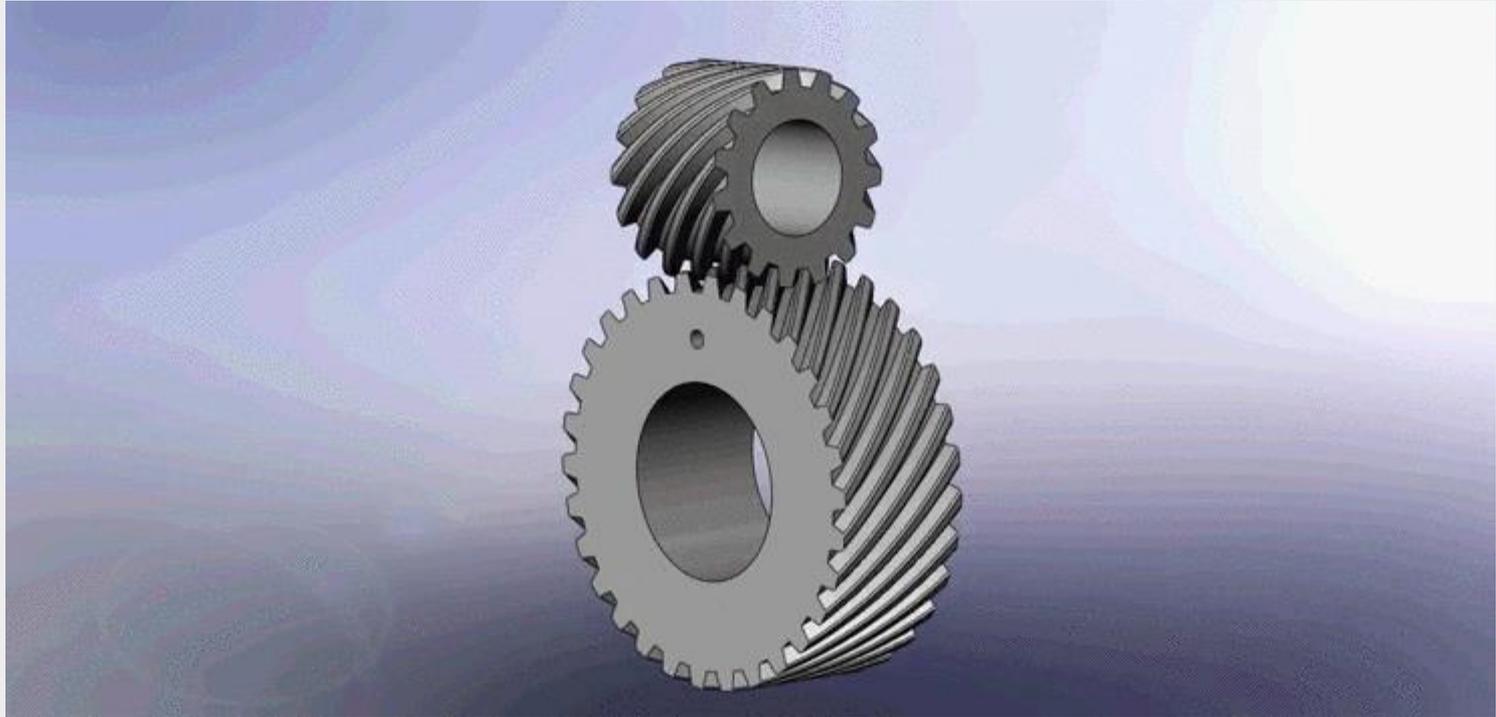
Boeing 787 Dreamliner



<https://www.youtube.com/watch?v=yBriY5dUnaQ>

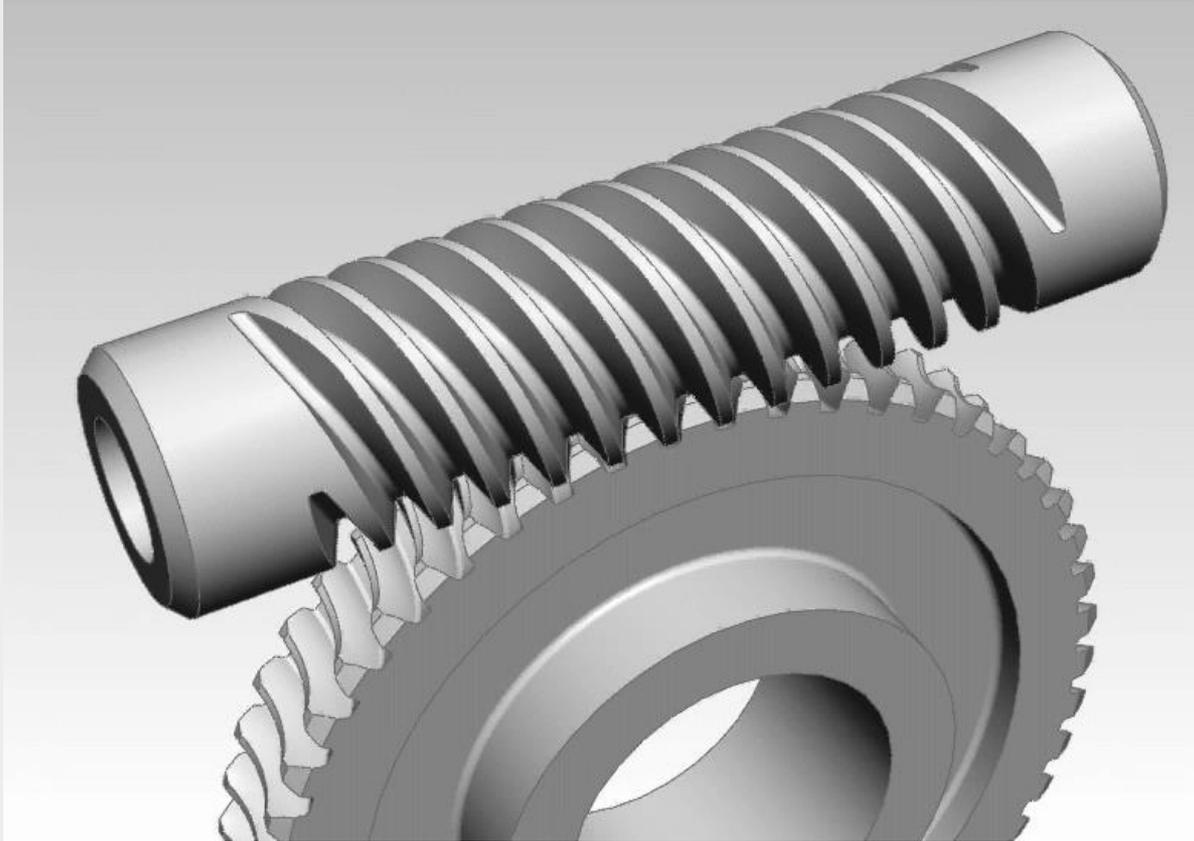


Ruote elicoidali per assi sghembi



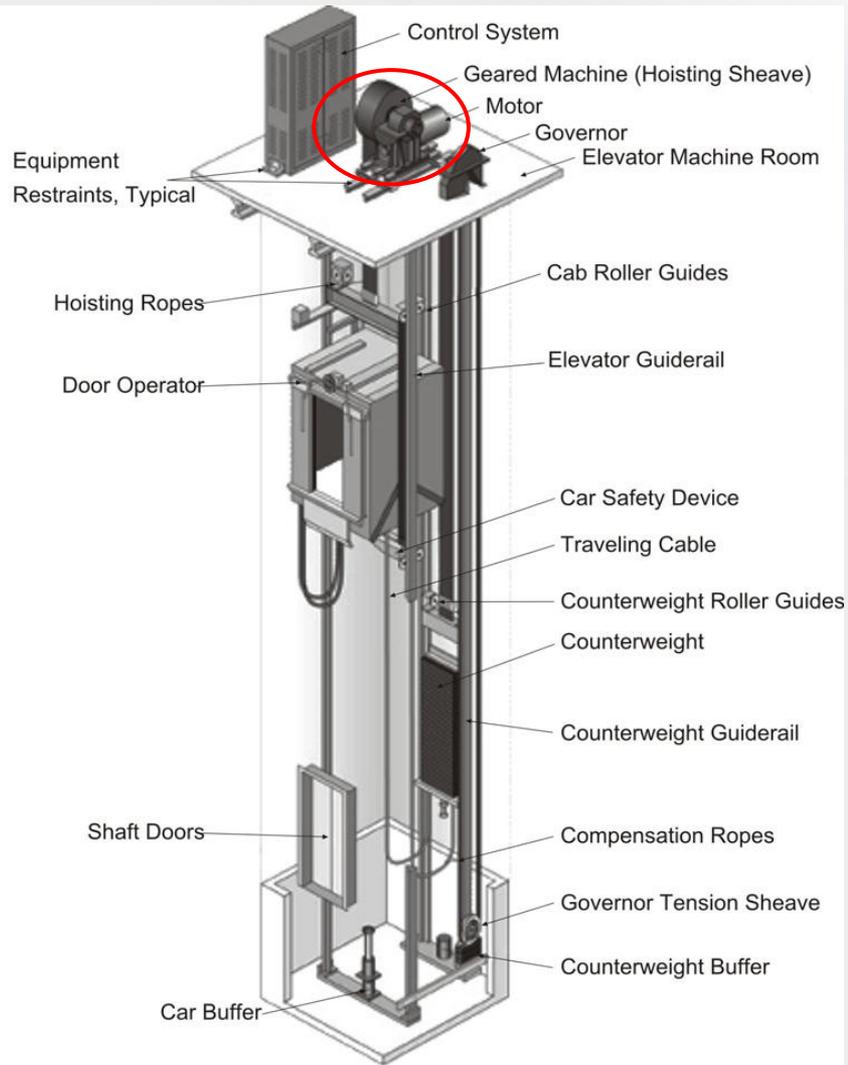
Ruote elicoidali per trasmissione moto tra assi sghembi (contatto di punto)

Ingranaggi a vite senza fine e ruota elicoidale (*worm gears*)



**Vite-ruota elicoidale per trasmissione moto tra assi sghembi
(elevati rapporti di trasmissione, bassa efficienza)**

Esempi applicativi di *worm gears*

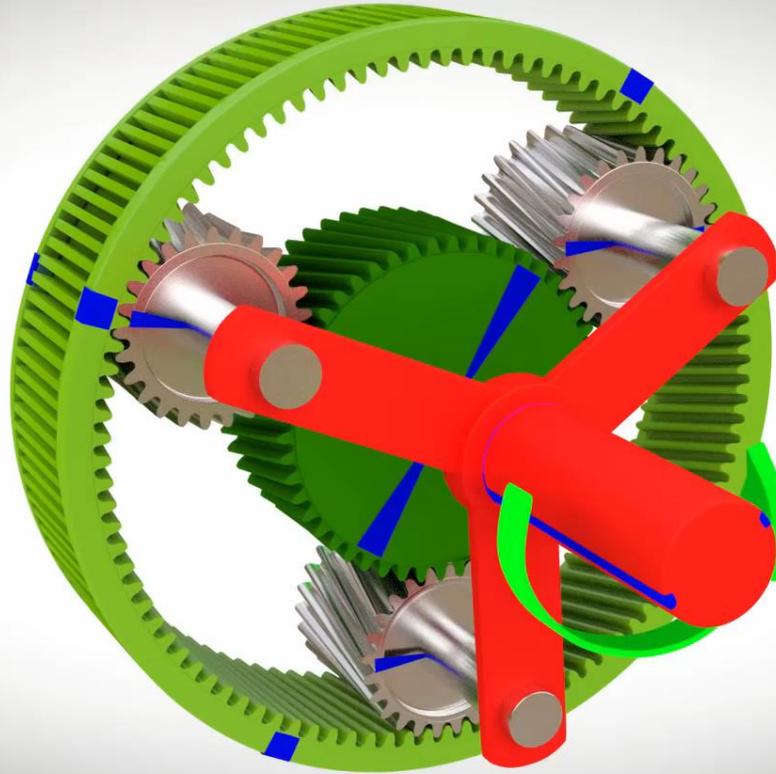


ascensore (geared)



meccaniche chitarra

Rotismi epicicloidali (*planetary gear sets*)



You Tube /LearnEngineering

Rotismi epicicloidali, per trasmissione moto tra alberi coassiali

<https://www.youtube.com/watch?v=ARd-Om2VyiE>

Fonti

- Litvin, Faydor L., and Alfonso Fuentes. Gear geometry and applied theory. Cambridge University Press, 2004.
- Klingelnberg, Jan. Kegelräder: Grundlagen, Anwendungen. Springer Science & Business Media, 2008.
- Stadtfeld, Hermann J. Handbook of bevel and hypoid gears: calculation, manufacturing and optimization. Rochester Institute of Technology, 1993.
- www.zakgear.com
- [altre fonti citate nelle singole slide]