

Alessio Artoni – *Meccanica Applicata alle Macchine* (6/5/2026)

---

## Ingranaggi, tecnologie di produzione, applicazioni

---



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

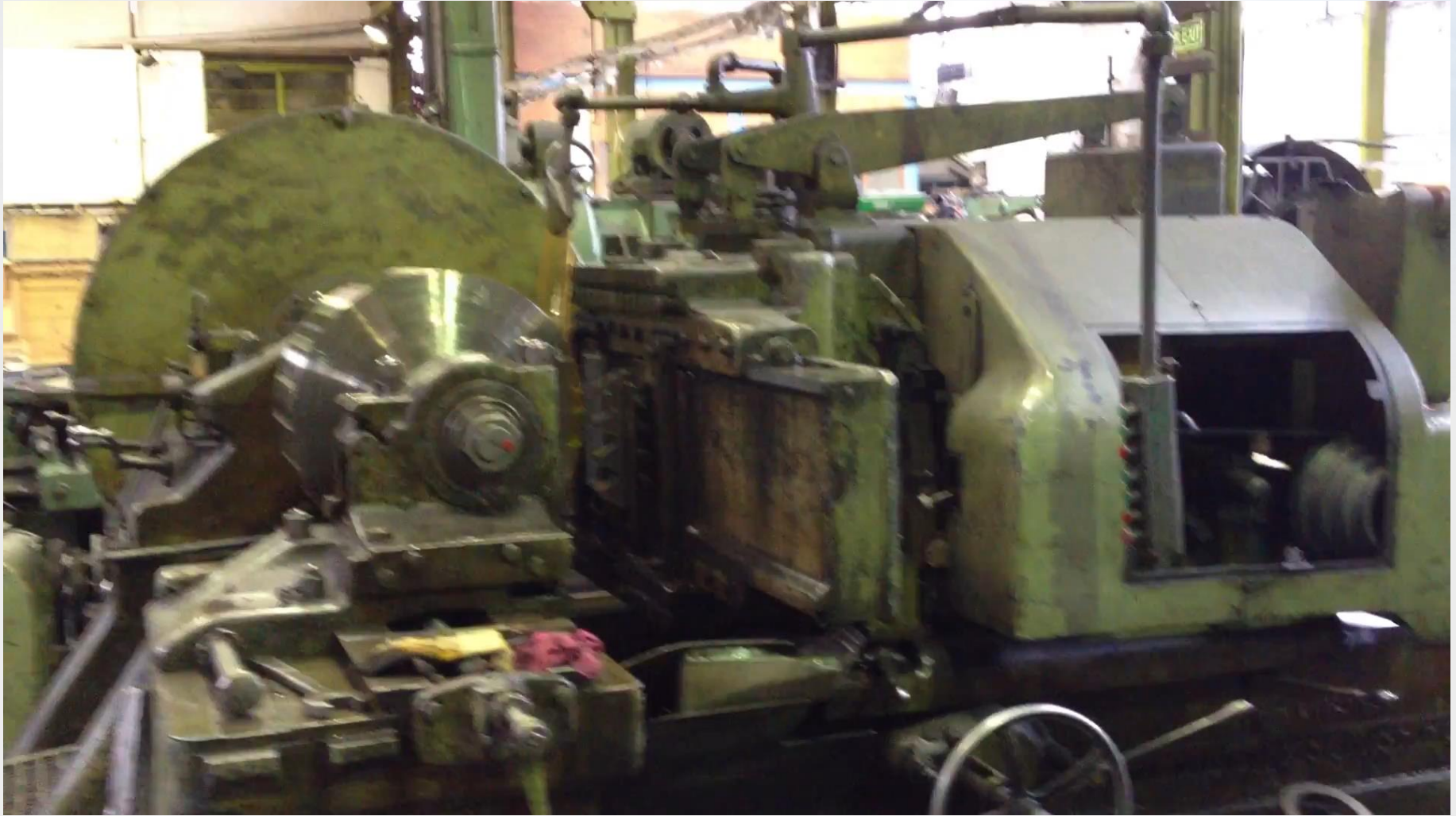
# Ingranaggi cilindrici con profili a evolvente di cerchio



<https://www.youtube.com/watch?v=nrsCoQN6V4M>

Video di **Gergely Bencsik**: *Involute Gears Explained* (questo), *Involute Gears 2*, *Involute Gears 3*

## Taglio ingranaggi cilindrici: piallatura con dentiera (*planing*)



<https://www.youtube.com/watch?v=W4XHs5-KMWg>

Metodo obsoleto (storicamente usato su grandi moduli).

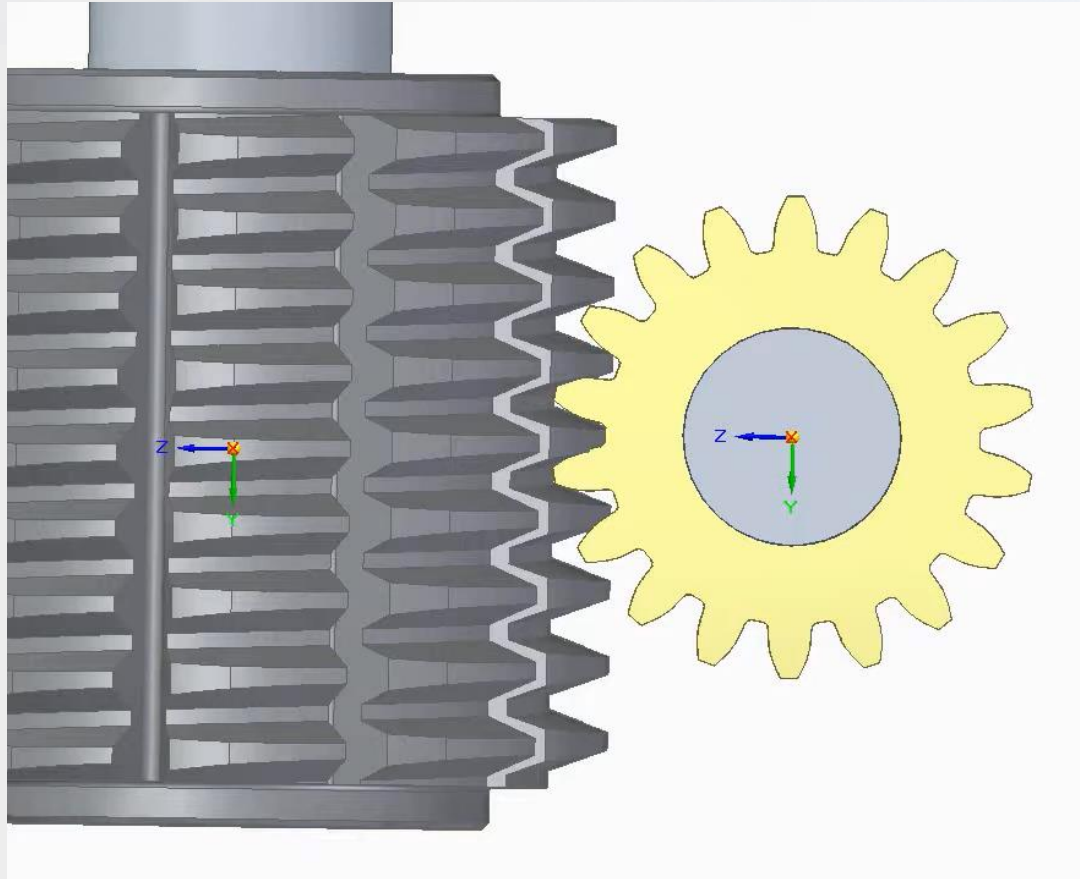
# Taglio ingranaggi cilindrici: stozzatura (*shaping*) con coltello Fellows



<https://www.youtube.com/watch?v=fUo1NIP-dNI>

Per dentature sia esterne che interne (anche profili scanalati), adatto anche in vicinanza di spallamenti.

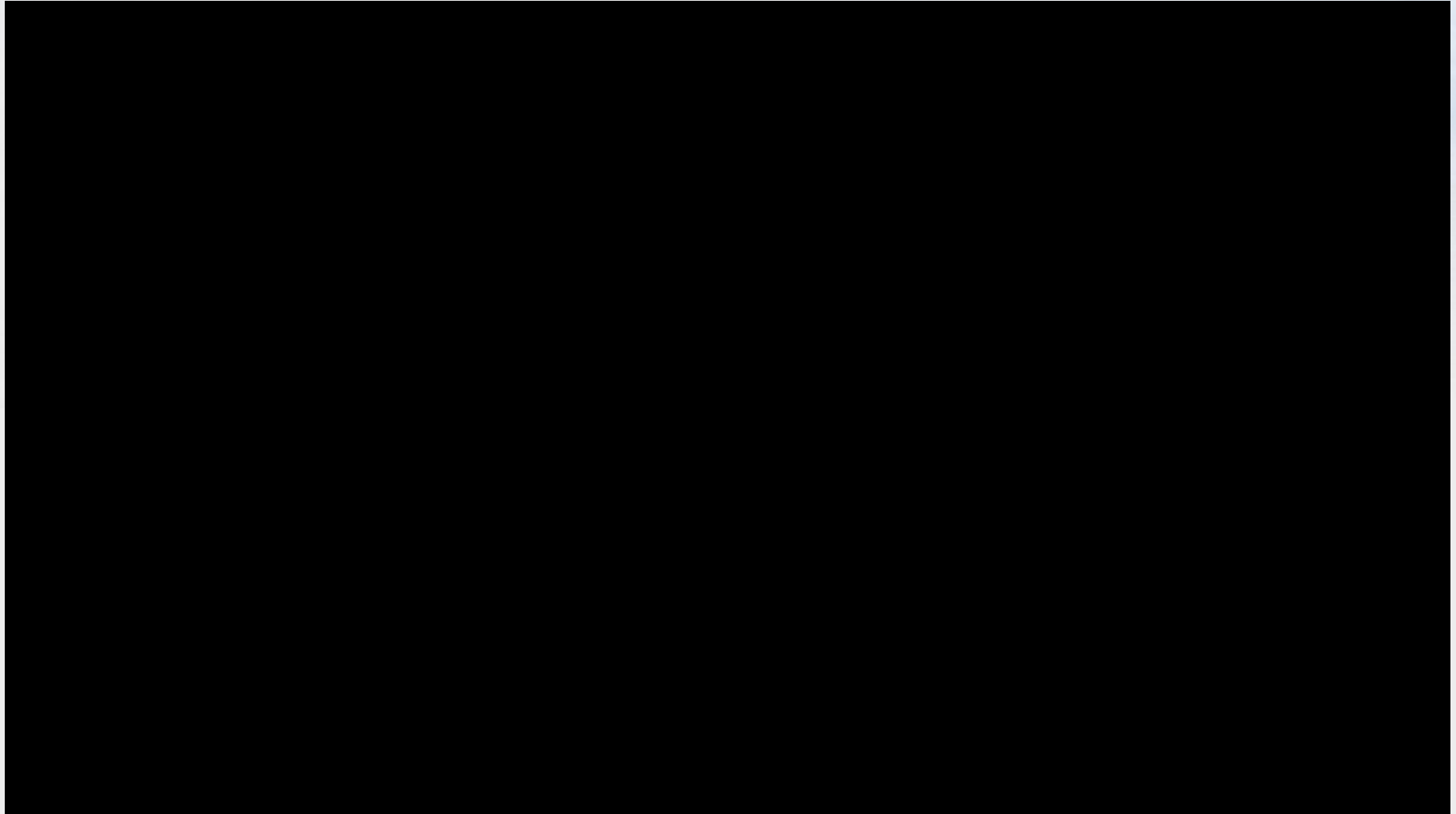
# Taglio ingranaggi cilindrici: creatore (*hobbing*)



<https://www.youtube.com/watch?v=SD45azoV4S8>

Per dentature esterne, produzione di serie, alta produttività.

# Taglio ingranaggi cilindrici: creatore (*hobbing*)



<https://www.youtube.com/watch?v=uqgz-P3J6rg>

Per dentature esterne, produzione di serie, alta produttività.

# Taglio ingranaggi cilindrici: *power skiving*



[https://www.youtube.com/watch?v=967v\\_mGXJoI](https://www.youtube.com/watch?v=967v_mGXJoI)

Per dentature sia esterne che interne (anche profili scanalati), fino a 10 volte più rapido della stozzatura.

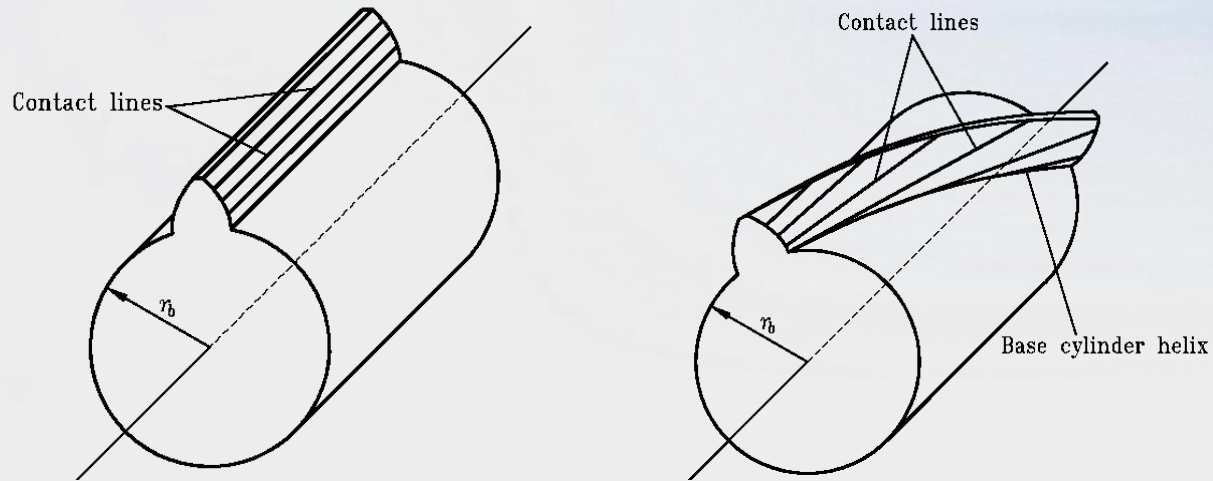
# Taglio ingranaggi cilindrici: altri processi

- **Brocciatura:** per dentature interne e scanalati, grandi lotti; utensile costoso.
- **Fresatura CNC 5 assi:** prototipazione, ricambi.
- **Taglio wire-EDM:** prototipazione, micro-ingranaggi.
- Per qualità elevate (applicazioni automotive, EV, aeronautiche) il taglio è seguito da indurimento superficiale e da un processo di **rettifica**:

# 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 (di poche decine di micron) per avere contatto nominale di punto.

# Perché le micro-correzioni?



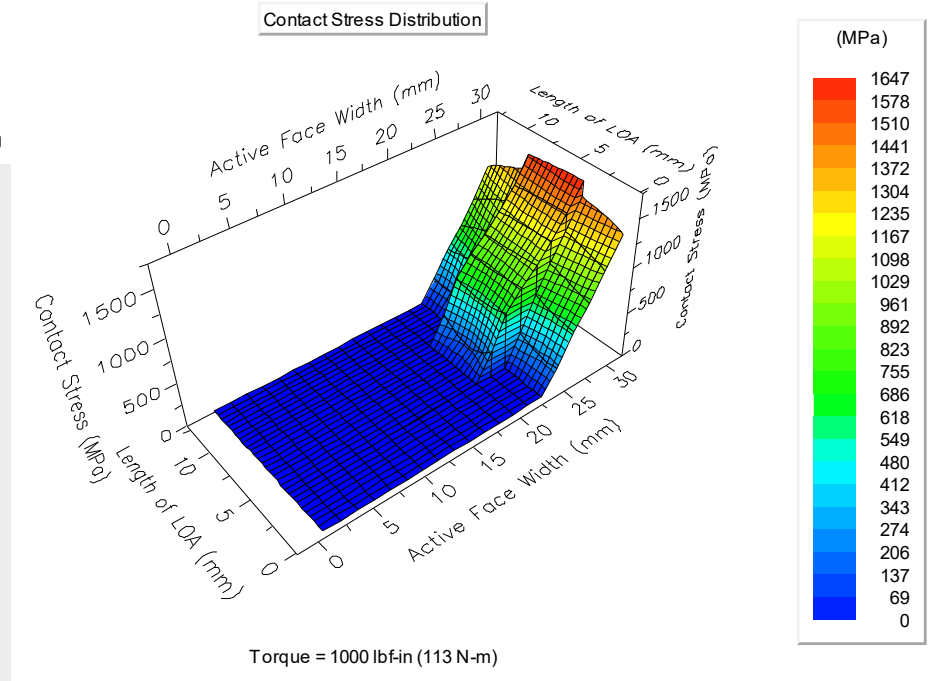
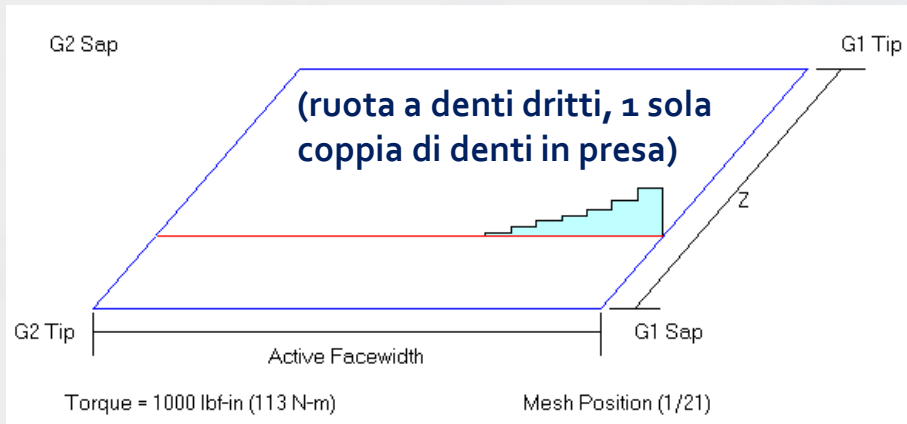
Linee di contatto nominali su denti dritti ed elicoidali (profili a evolvente)



Cosa accade in caso di **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

⇒ Una modifica micro-geometrica molto usata per stabilizzare il contatto nelle ruote cilindriche è la **bombatura** del dente (*lead crowning*)

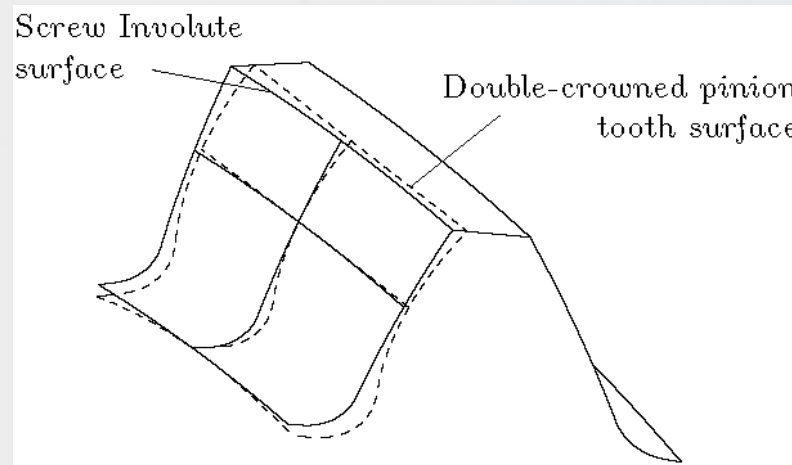


Esempio di pignone con bombatura (estremizzata)

# Spoglia (*crowning*)

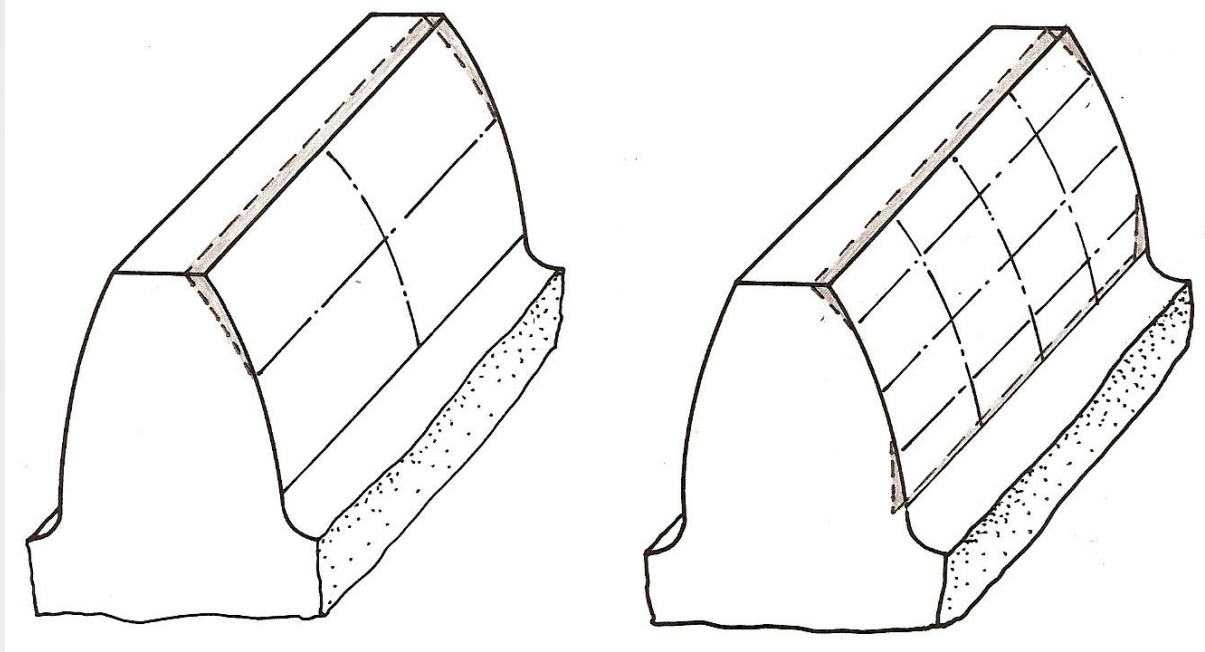


Per la maggior parte delle ruote dentate, la bombatura è molto utilizzata sia lungo la fascia che lungo il profilo. Si parla quindi di ***lead*** (o ***lengthwise***) ***crowning*** e ***profile crowning***



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 (*tip-root relief*)



*Tip relief*

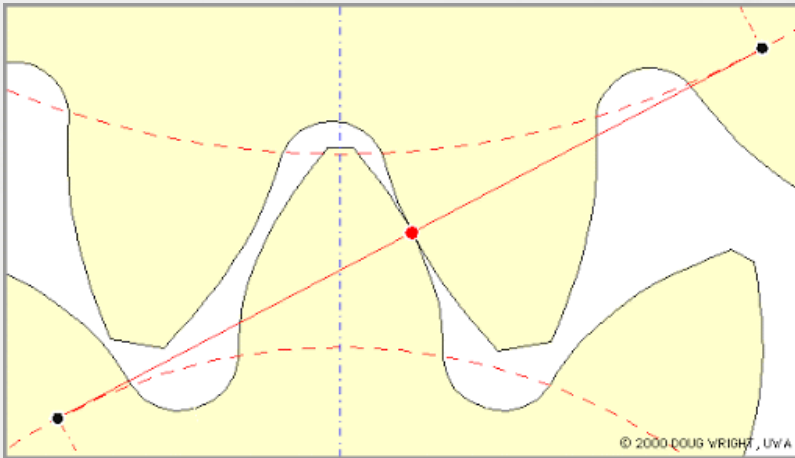
*Tip relief e root relief*



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

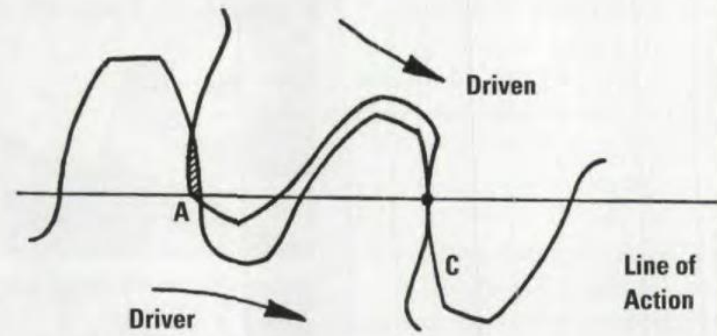
# Spoglia (*tip-root relief*)

Ruote ideali (corpi rigidi)

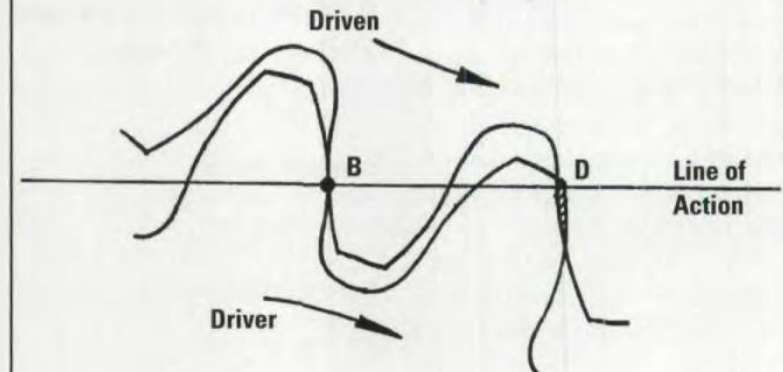


Ruote reali (deformabili)

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, ma anche *crowning* e *relief* inappropriati causano **errori di trasmissione**, principale causa di **rumorosità** e **vibrazioni** delle ruote dentate.

$$e_t = \phi_p^{(r)} - \phi_p^{(th)} = \phi_p^{(r)} - \frac{Z_c}{Z_p} \phi_c$$



⇒ Le modifiche micro-geometriche possono essere usate per minimizzare efficacemente 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*).



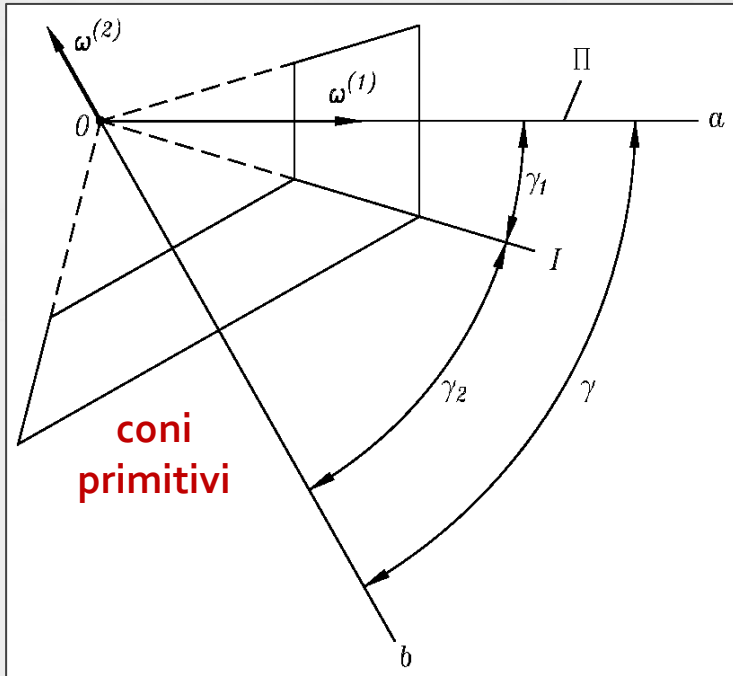
- ⇒ Massimizzazione vita a fatica della coppia.
- ⇒ Minimizzazione rumorosità e vibrazioni.
- ⇒ Massimizzazione densità di potenza trasmissibile.
- ⇒ Massimizzazione rendimento meccanico.

# Realizzazione pratica delle micro-correzioni

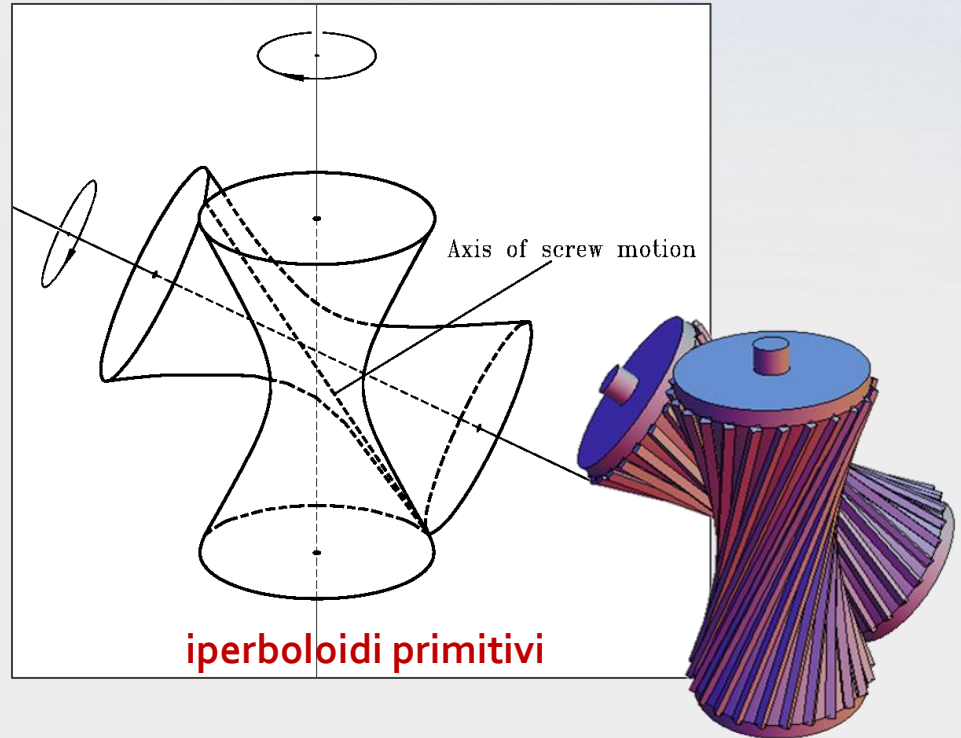
- ⇒ Moti macchina modificati (durante il taglio di generazione per involuppo).
- ⇒ Profilo utensile modificato (rispetto a quello necessario per tagliare denti a evolvente).
- ⇒ Le micro-correzioni prescritte (entità variabili tra 10 e 300  $\mu\text{m}$ ) risultano accurate solo se realizzate mediante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

# 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:



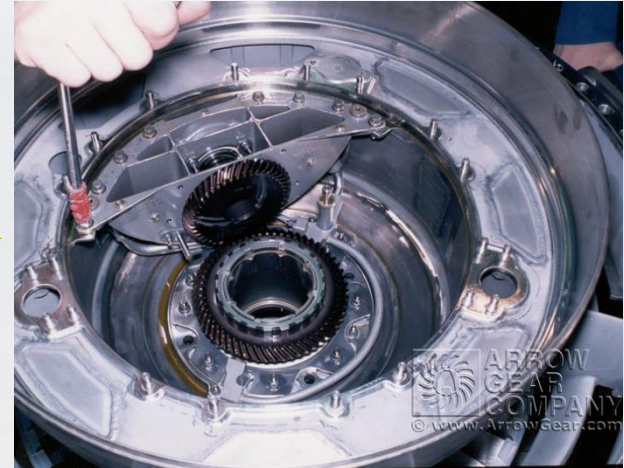
<https://www.youtube.com/watch?v=Vux-AUPHfLg>

# Ingranaggi spiroconici e ipoidi



## SPIROCONICI

applicazioni aeronautiche  
e automotive (spinte: F1)



Modulo power take-off  
(motore turbofan GE F404)



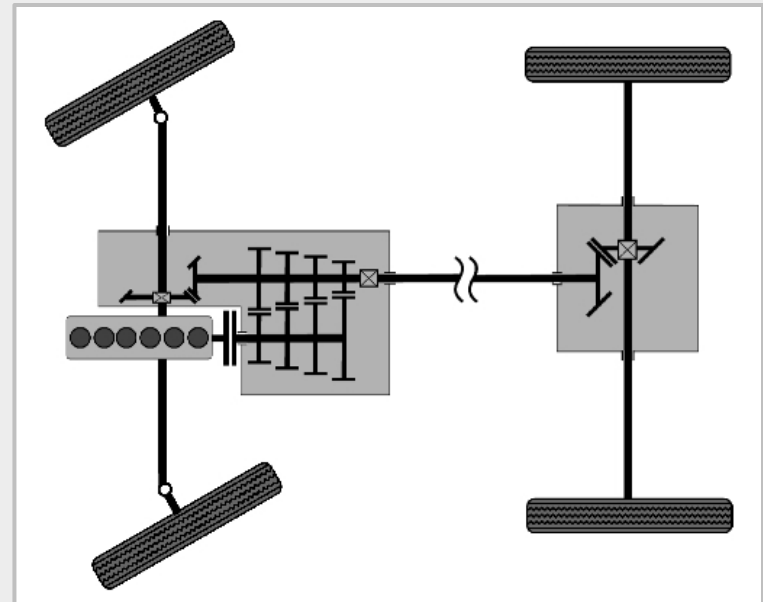
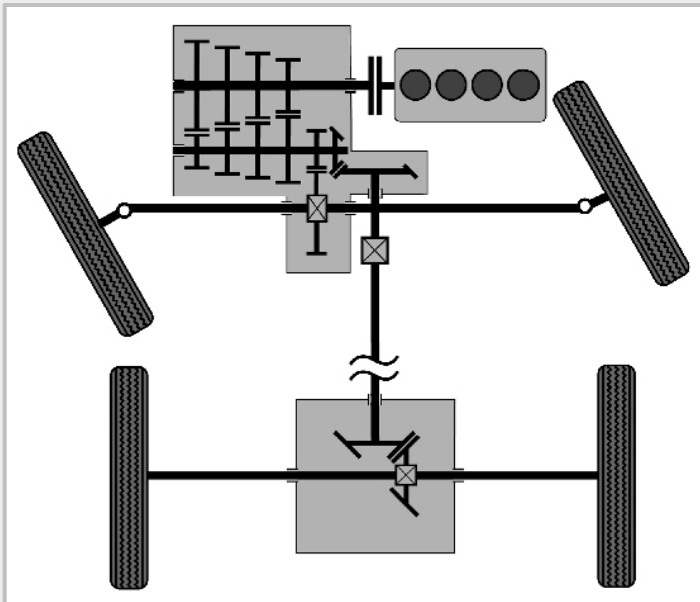
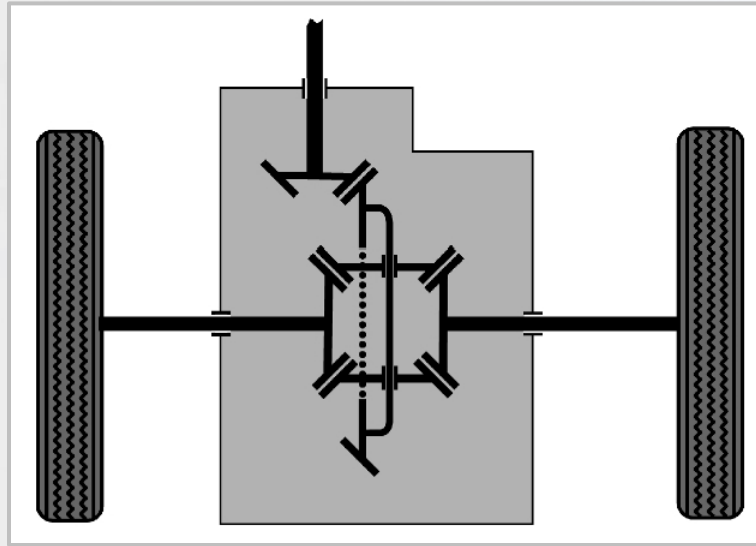
## IPOIDI

applicazioni automotive

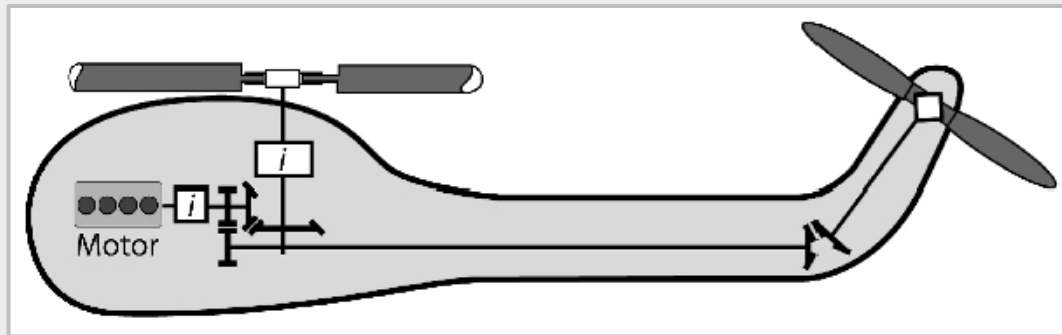
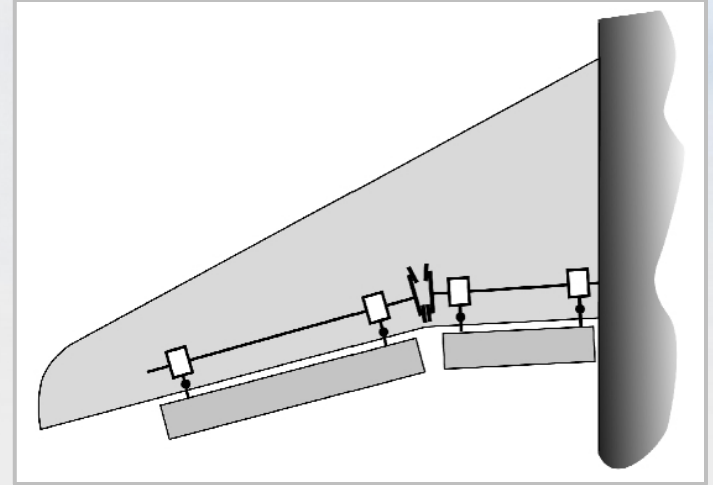
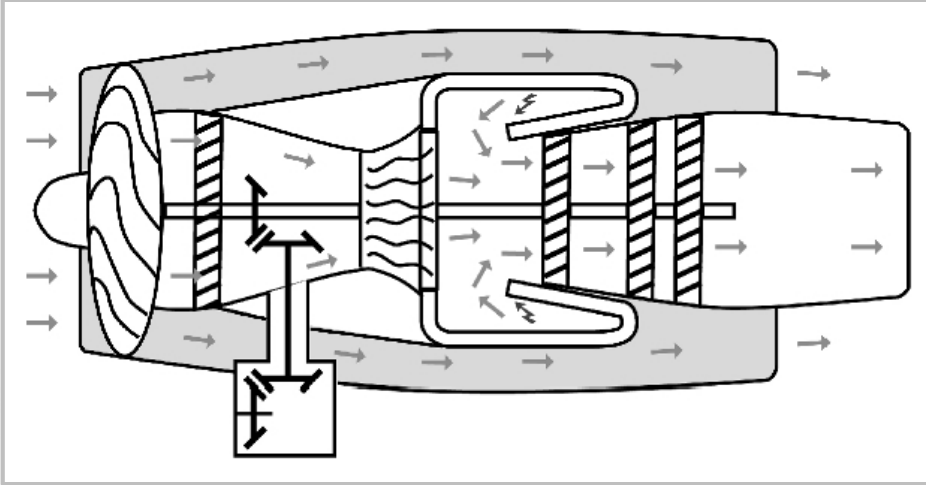


Differenziale posteriore  
(BMW)

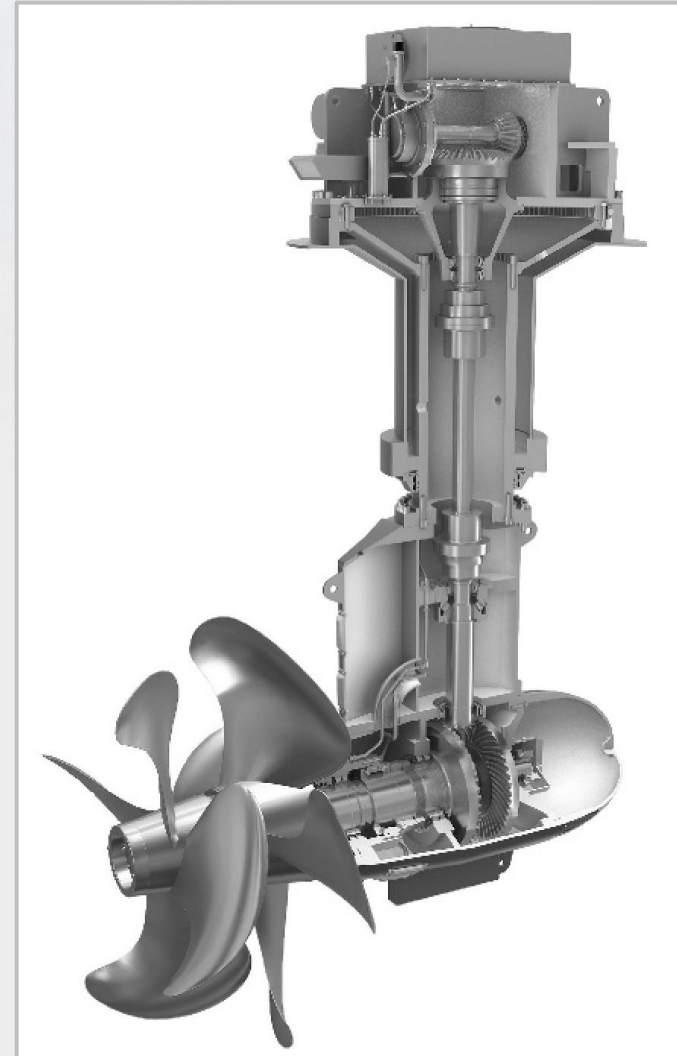
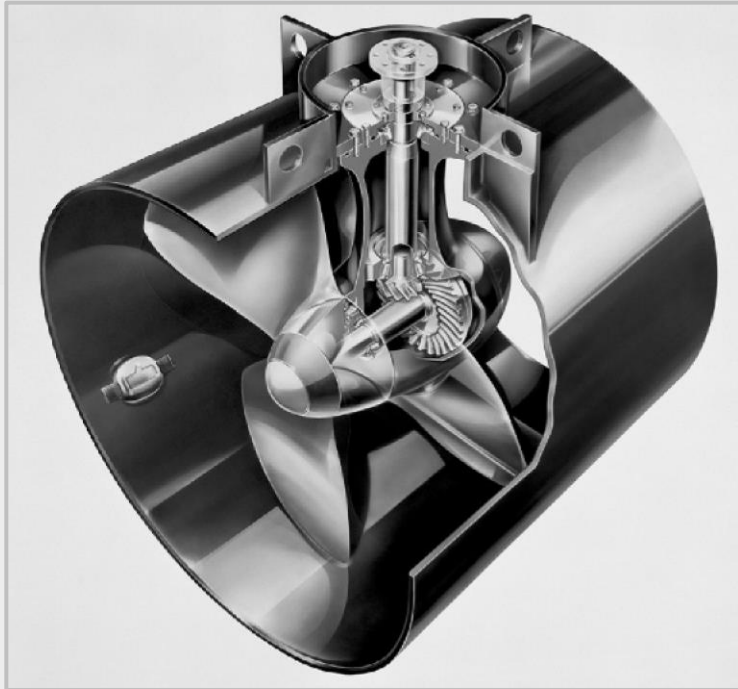
# Ingranaggi spiroconici e ipoidi: applicazioni *automotive*



# Ingranaggi spiroconici: applicazioni *aerospace*



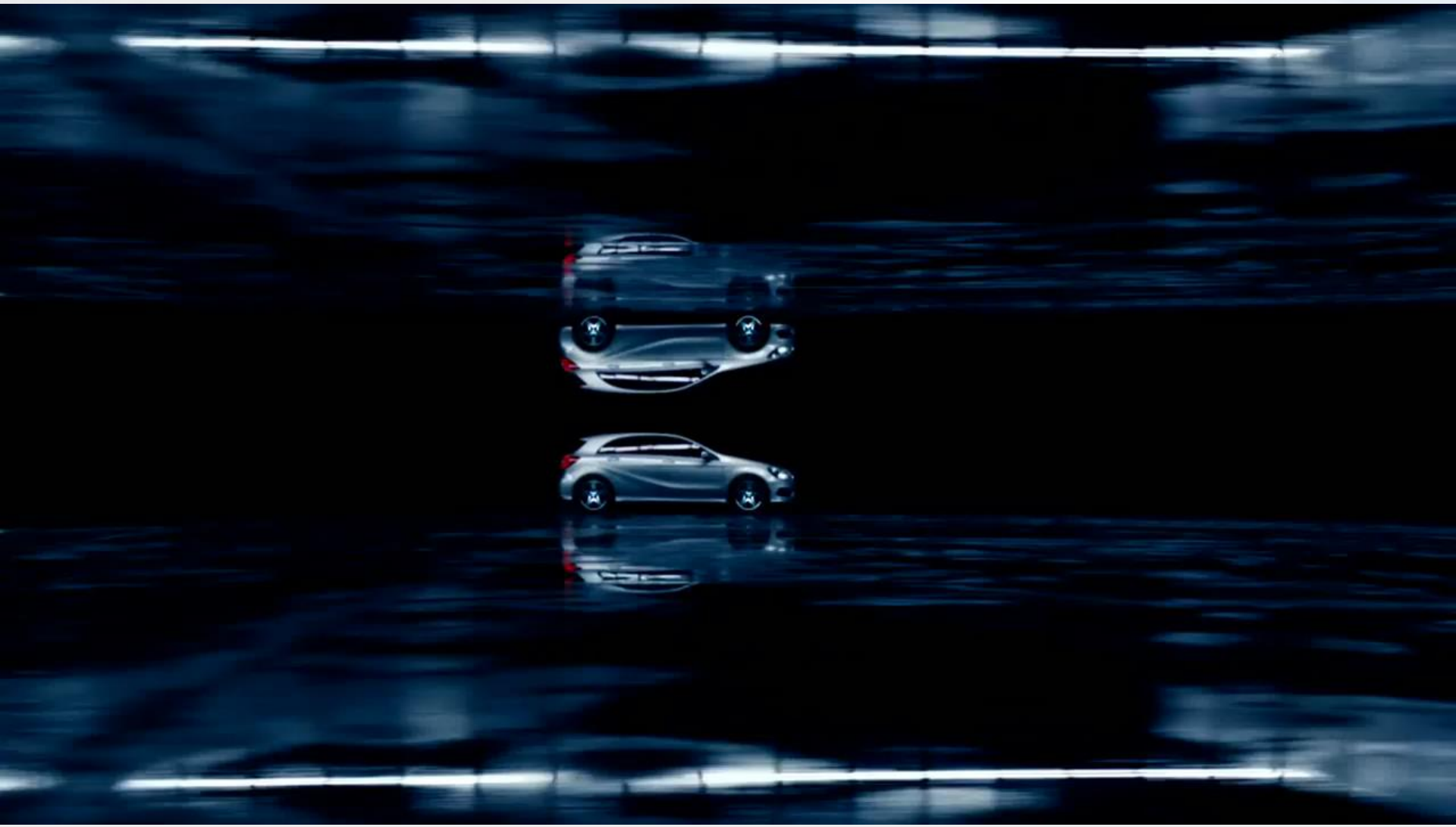
# Ingranaggi spiroconici e ipoidi: applicazioni *marine*



# Applicazioni aeronautiche

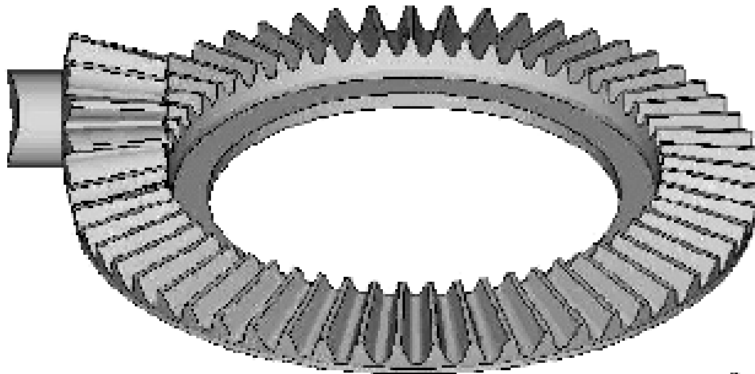
<https://www.youtube.com/watch?v=DUafG-zZrkk>

# Applicazioni automotive

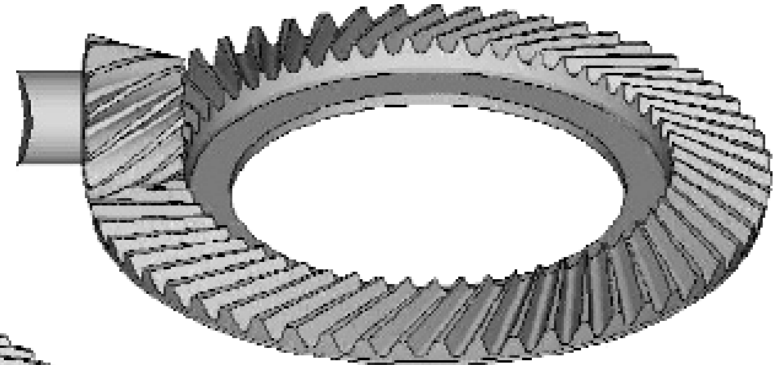


<https://www.youtube.com/watch?v=HSQk1JcgWgI>

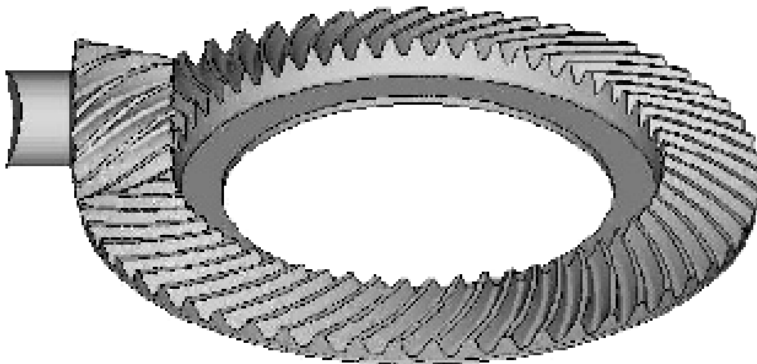
# Pignoni ingrananti con ruote piano-coniche



a denti dritti  
(*straight bevel gears*)

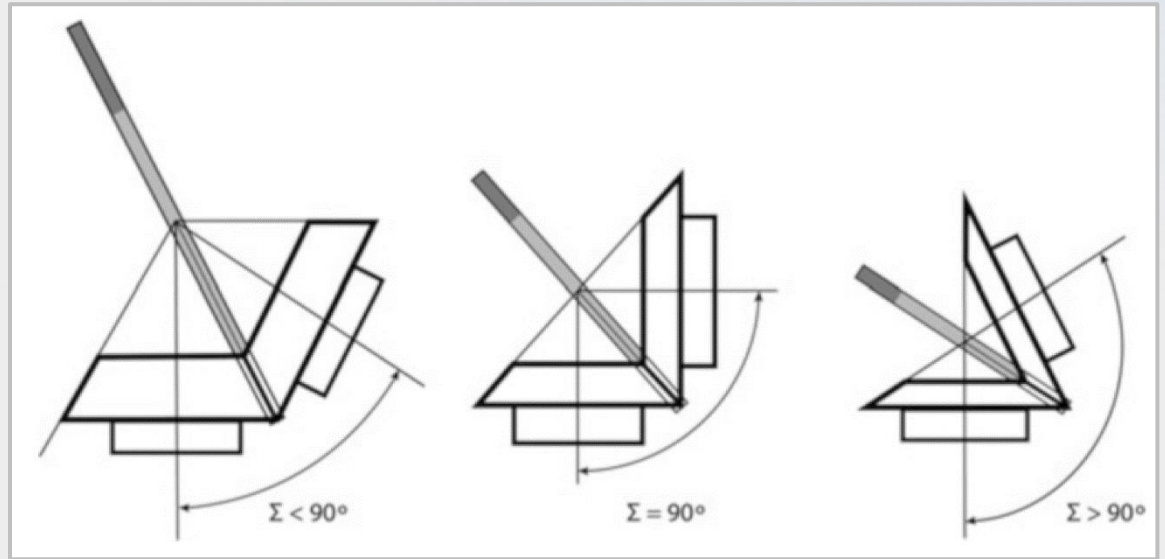


a denti obliqui  
(*skew bevel gears*)



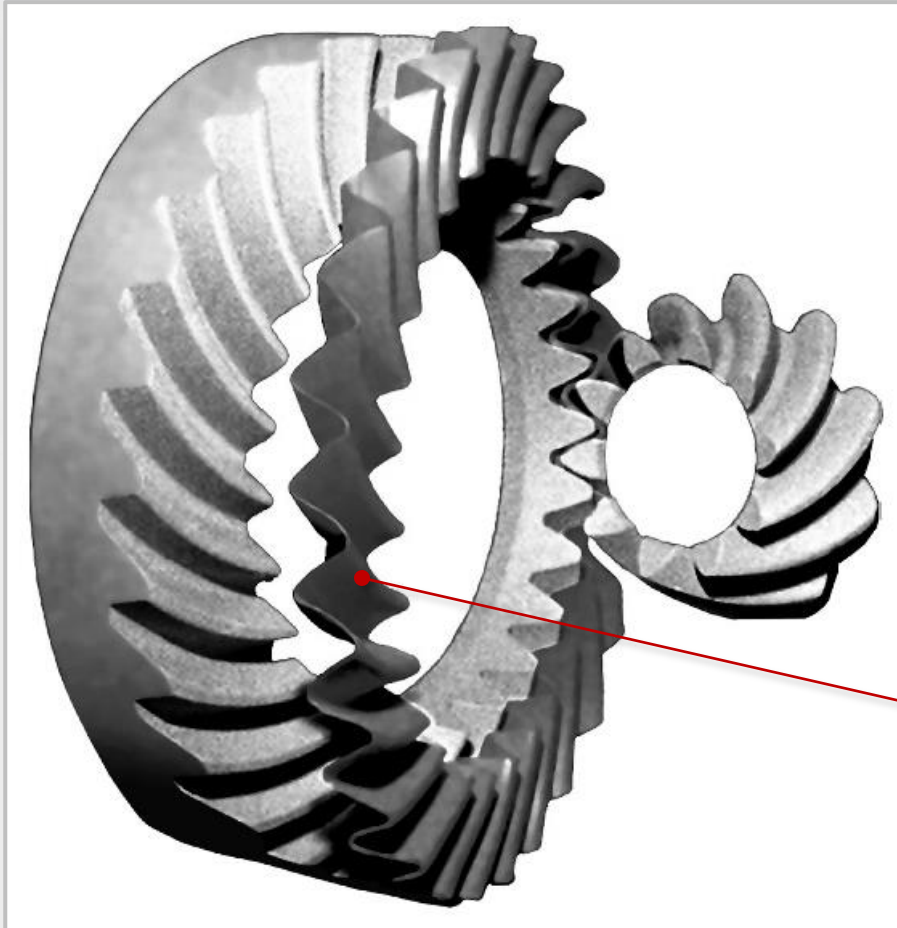
con denti a spirale  
(*spiral bevel gears*)

# Generazione ingranaggi conici con ruota pianoconica virtuale



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

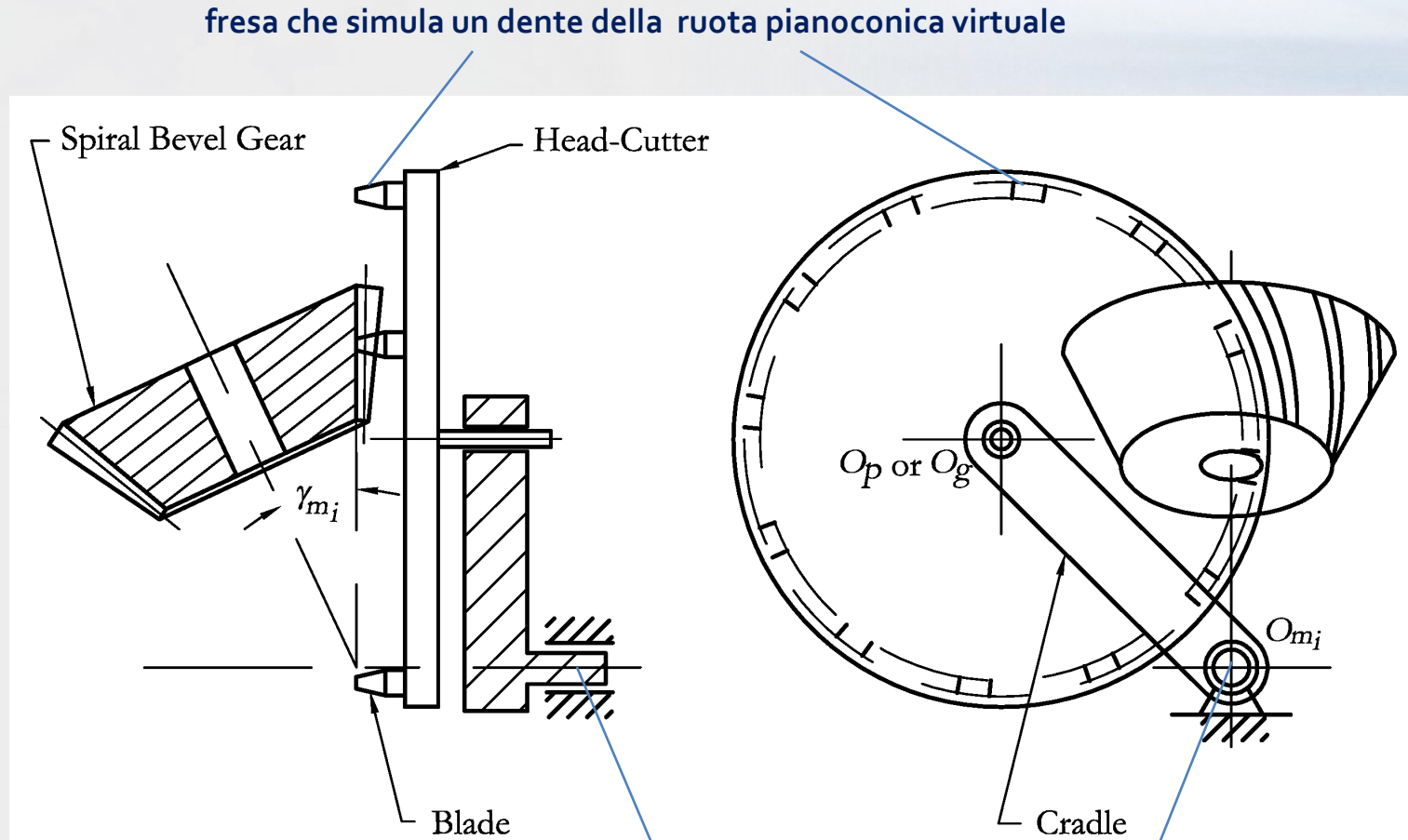
# Generazione ingranaggi conici con ruota pianoconica virtuale



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



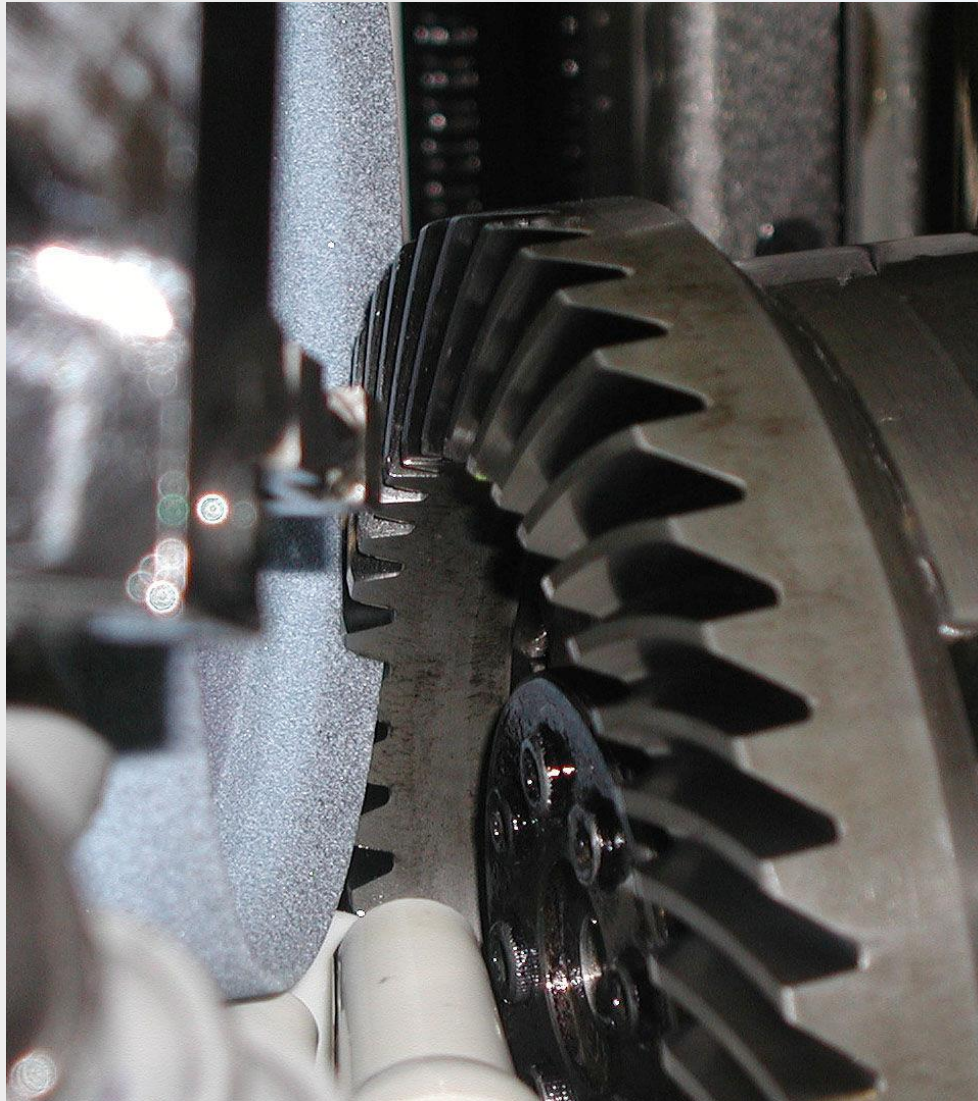
asse ruota pianoconica virtuale

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

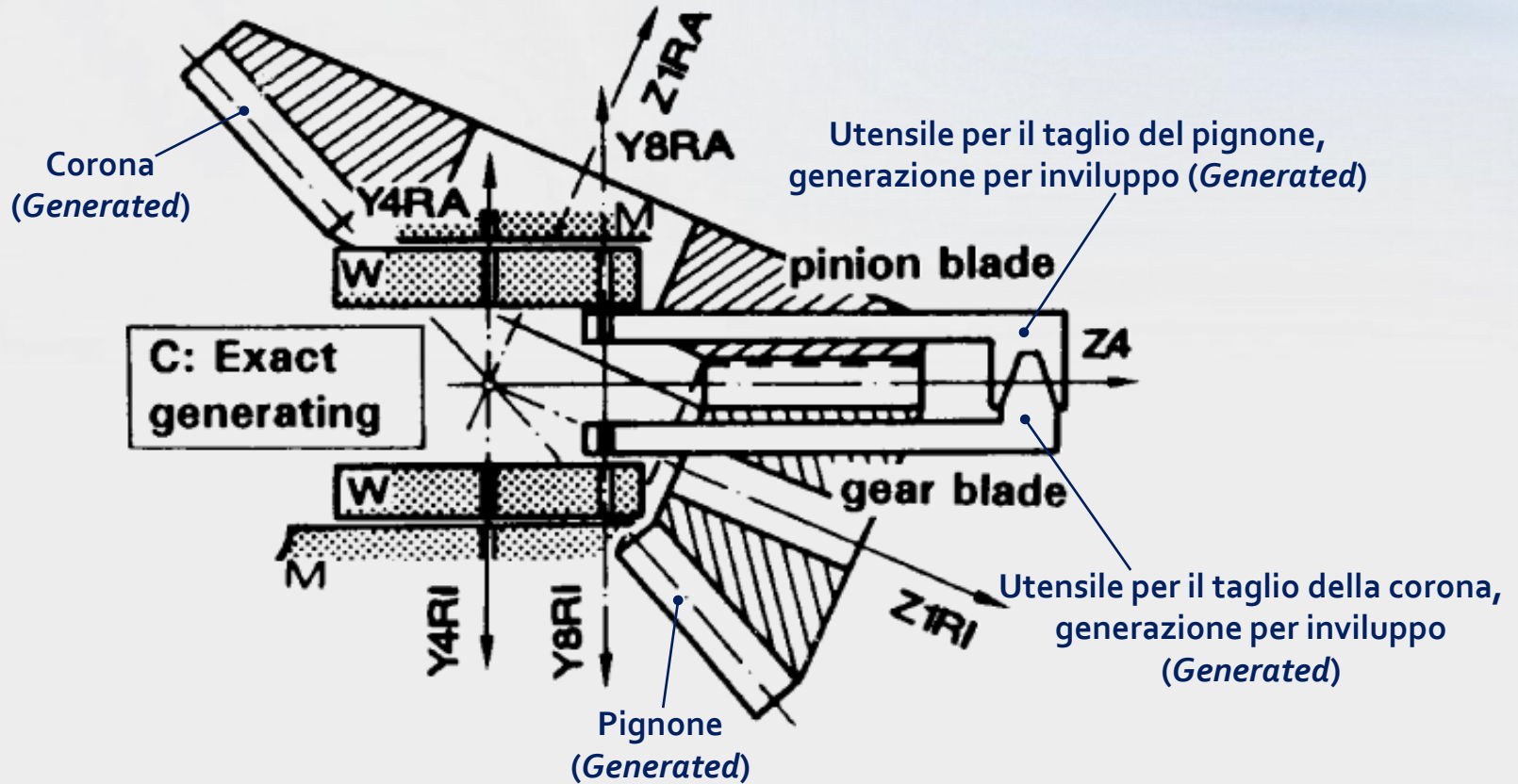


<https://www.youtube.com/watch?v=tNks3OdE-FE>

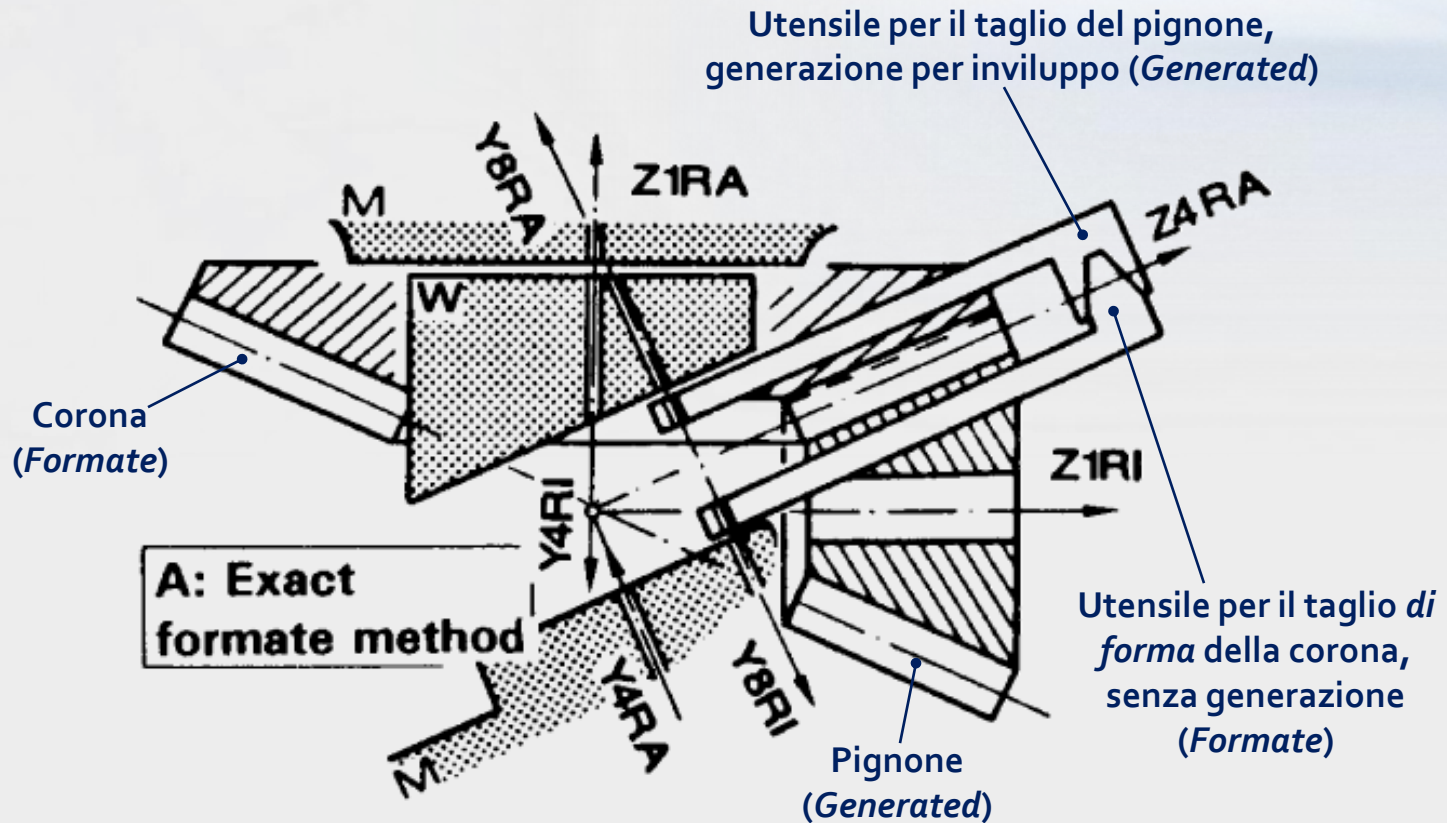
## Metodo *face-milling* per rettifica ingranaggi spiroconici/ipoidi



# Schema concettuale per taglio *Generated*

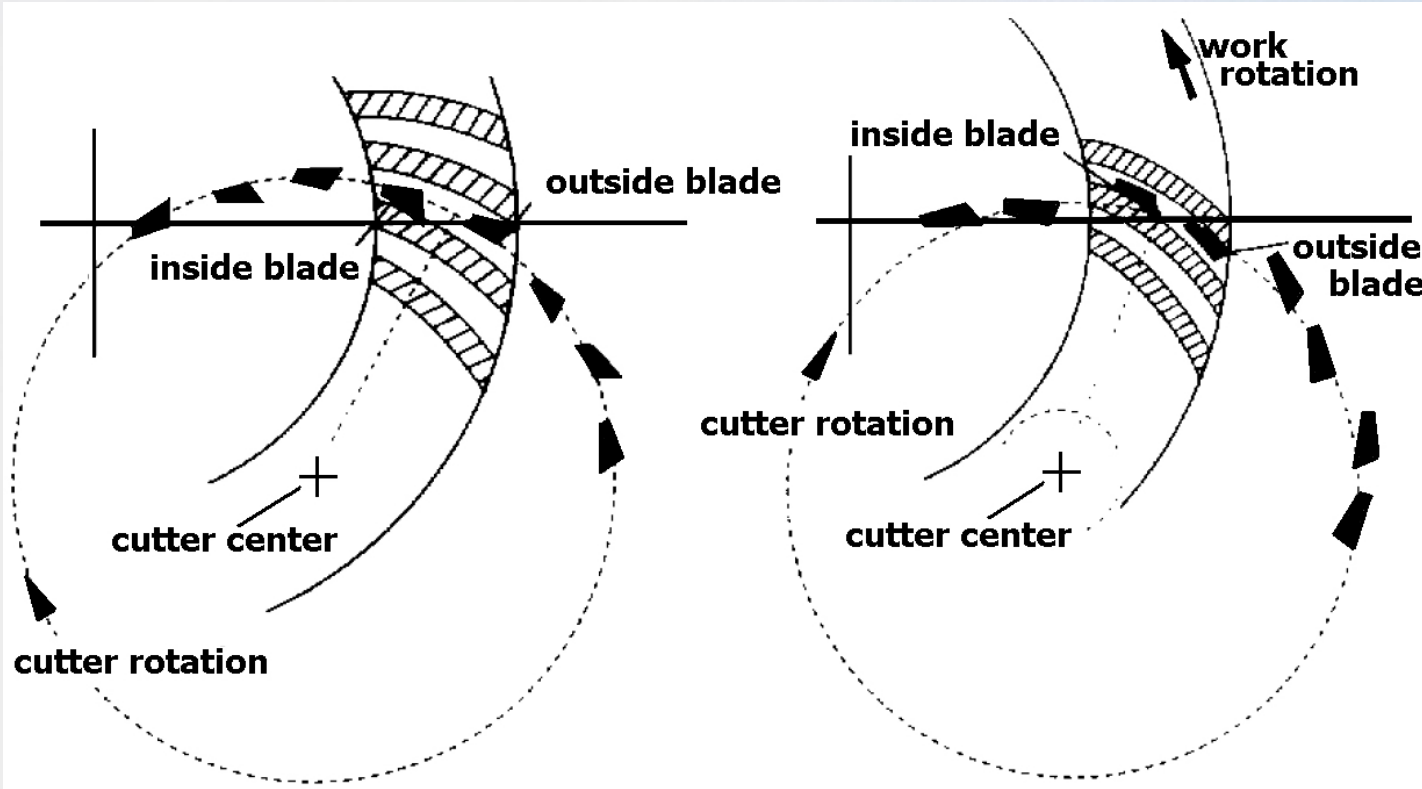


# Schema concettuale per taglio *Formate*



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)

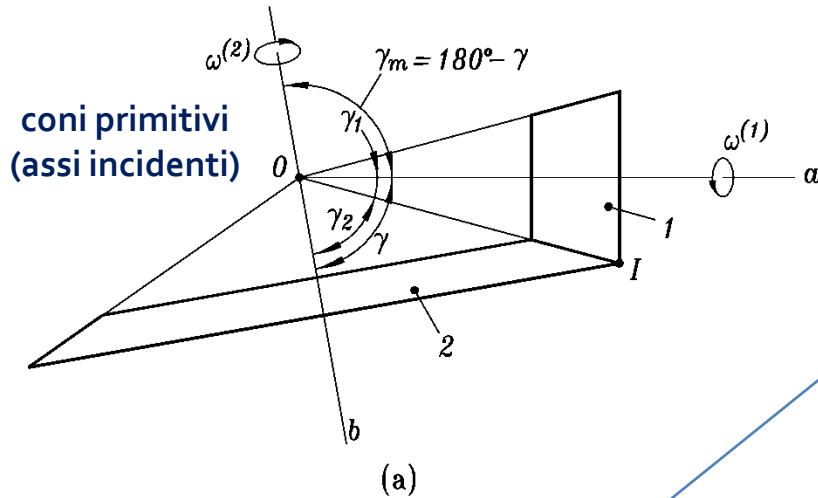
Face-hobbing  
(continuous indexing)

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



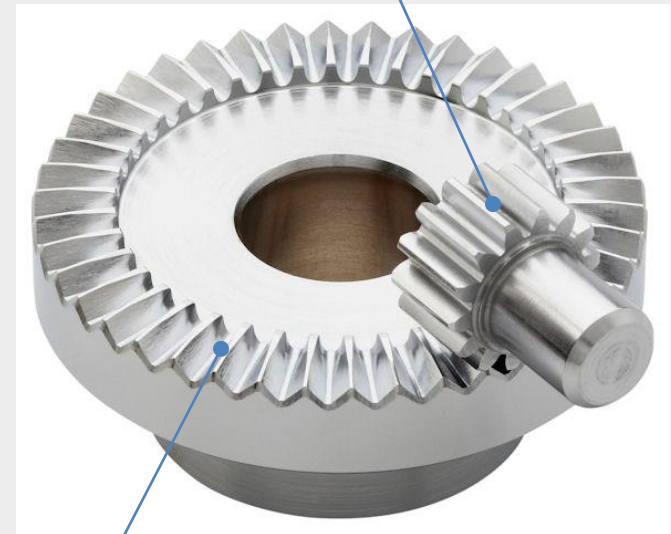
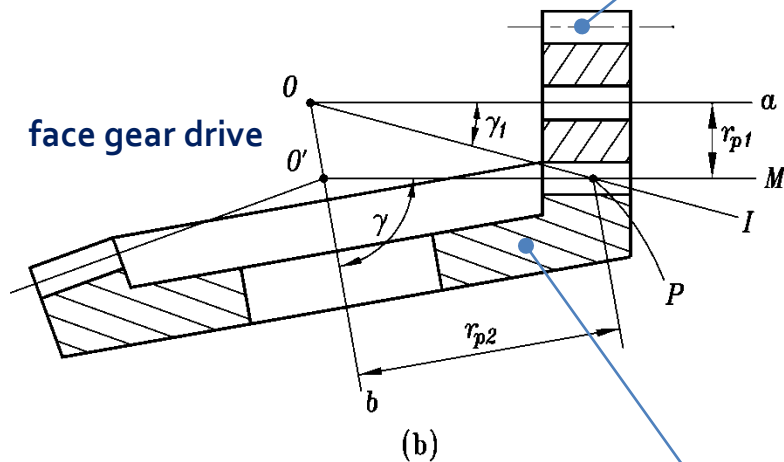
<https://www.youtube.com/watch?v=7paLPW3CjEs>

# Face gear



Per assi incidenti (soprattutto) e sghembi

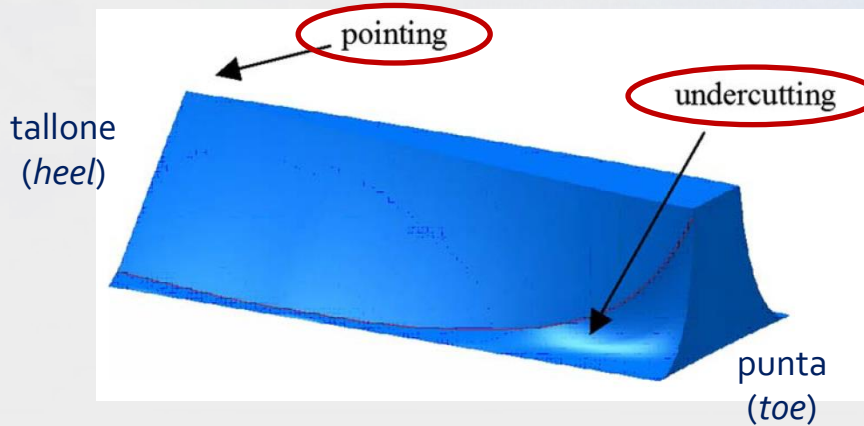
pignone cilindrico con denti a evolvente  
(dritti o elicoidali)



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

# Ingranaggi frontali: *face gears*

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



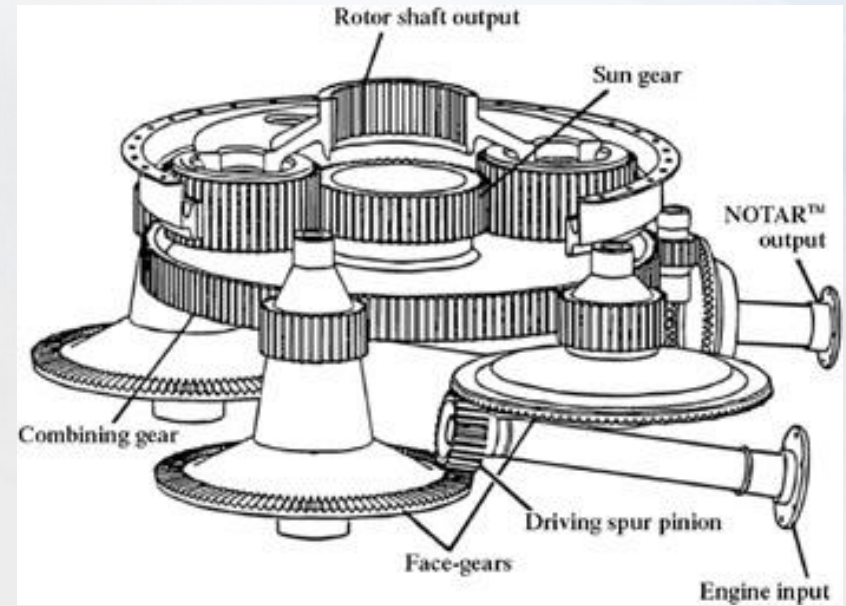
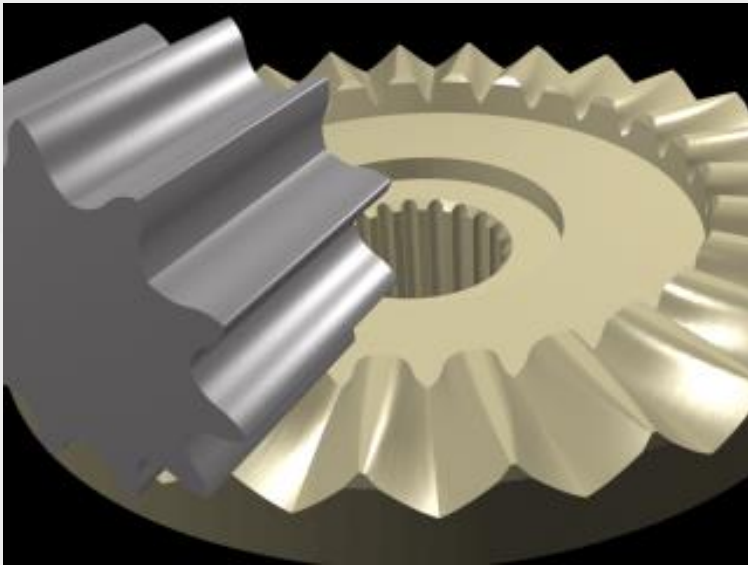
VANTAGGI dei face gear:

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

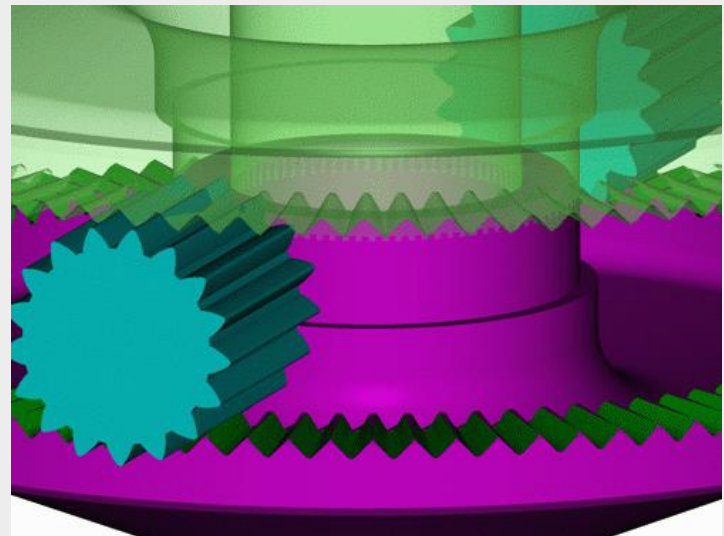
SVANTAGGI dei face gear:

- 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 elicotteristica



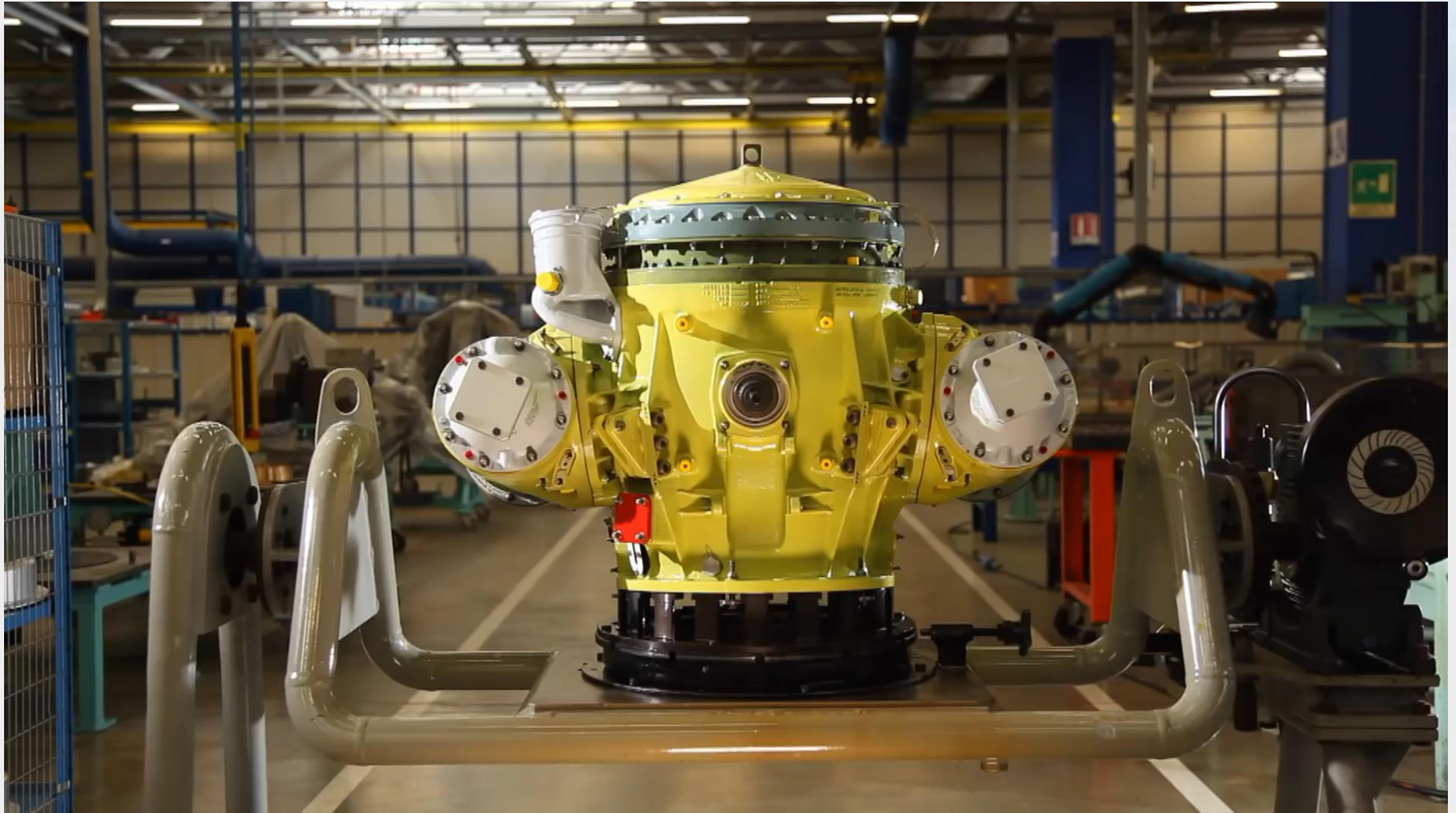
⇒ Ottimizzazione micro-geometria ingranaggi spiroconici per *transfer gearbox* (TGB) ed *inlet gearbox* (IGB) del motore turbofan *General Electric GEnx-1B*.



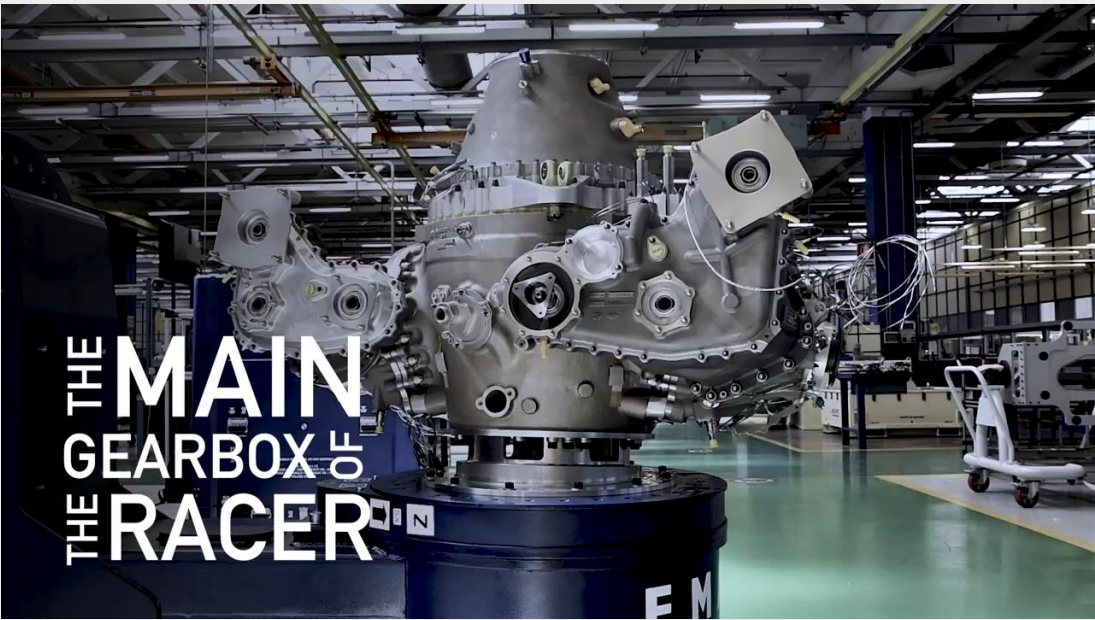
Principale applicazione:



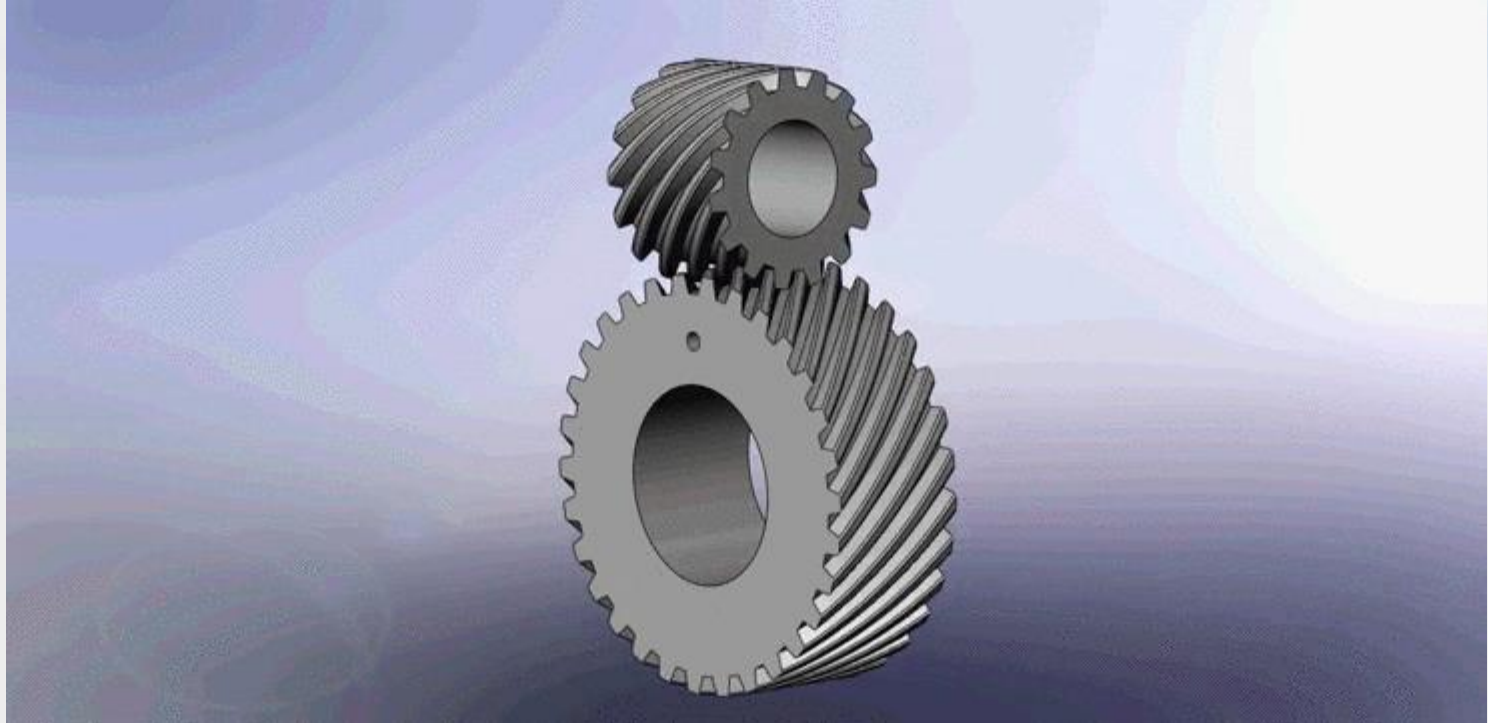
**Boeing 787 Dreamliner**



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

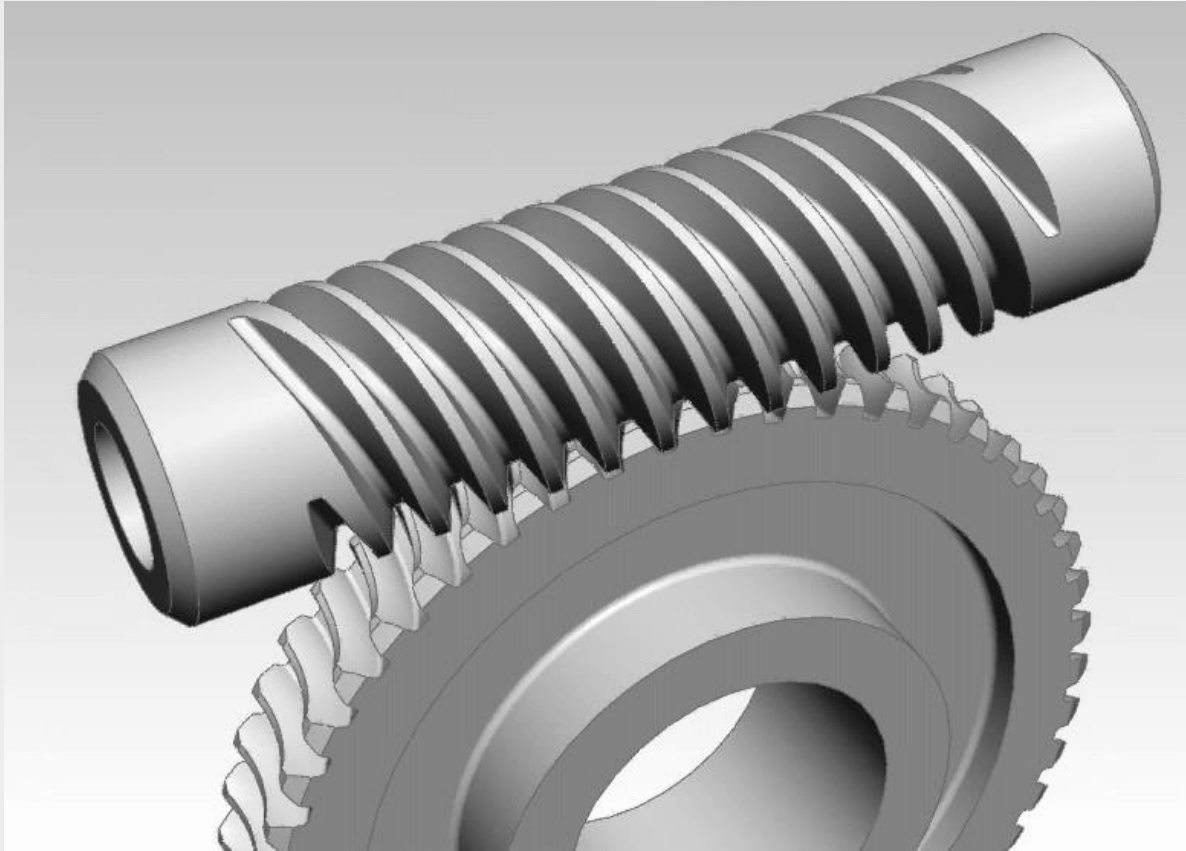


# Ruote elicoidali per assi sghembi



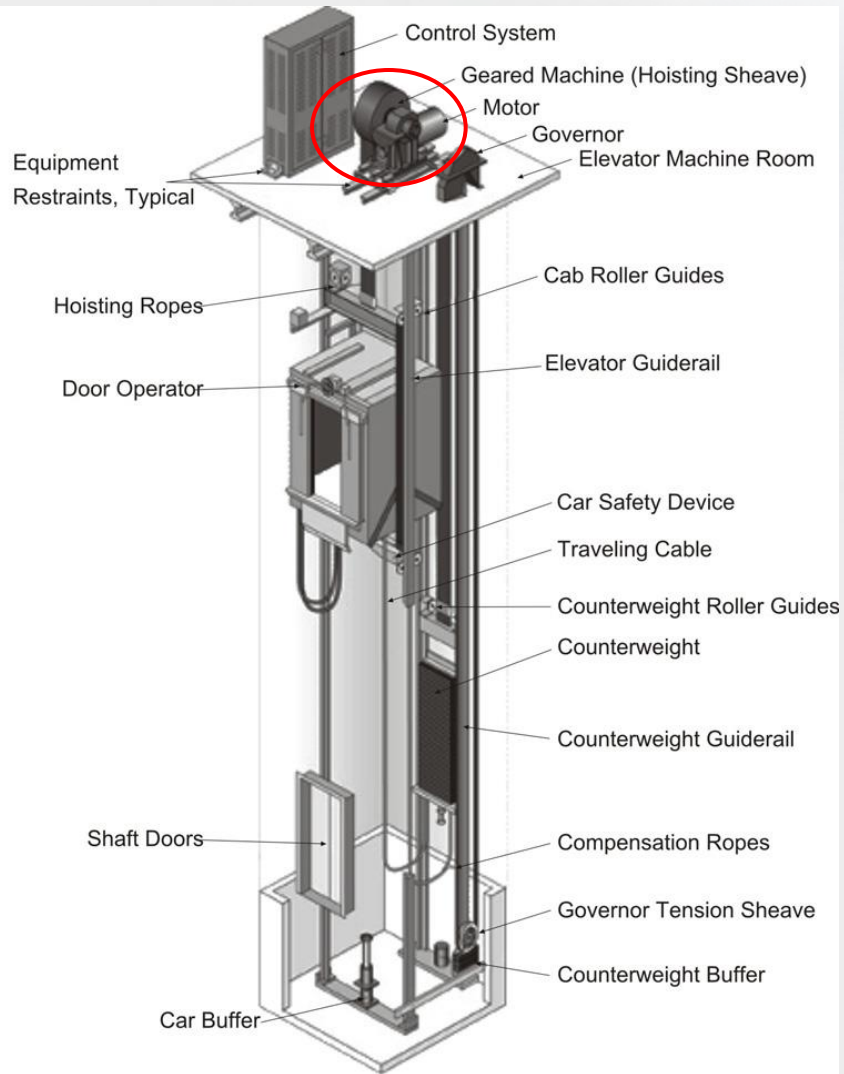
Ruote elicoidali per trasmissione moto tra assi sghembi (contatto di punto)

# 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*

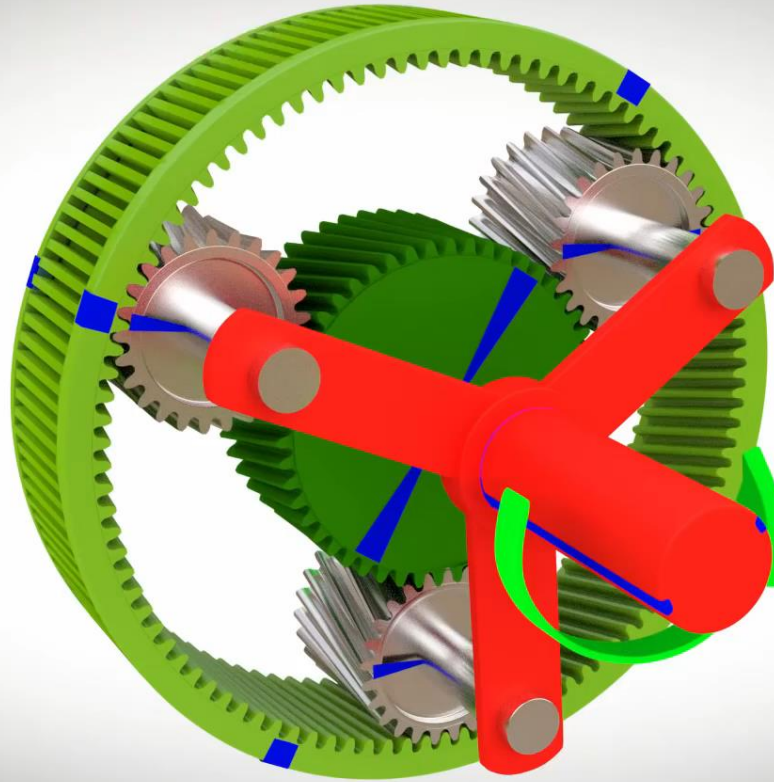


**ascensore (geared)**



**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](http://www.zakgear.com)
- [altre fonti citate nelle singole slide]