

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale***  
***RUOTE DENTATE A DENTATURA ELICOIDALE:***  
***IMPIEGHI E PROCEDURE DI DIMENSIONAMENTO SECONDO***  
***NORMATIVA***

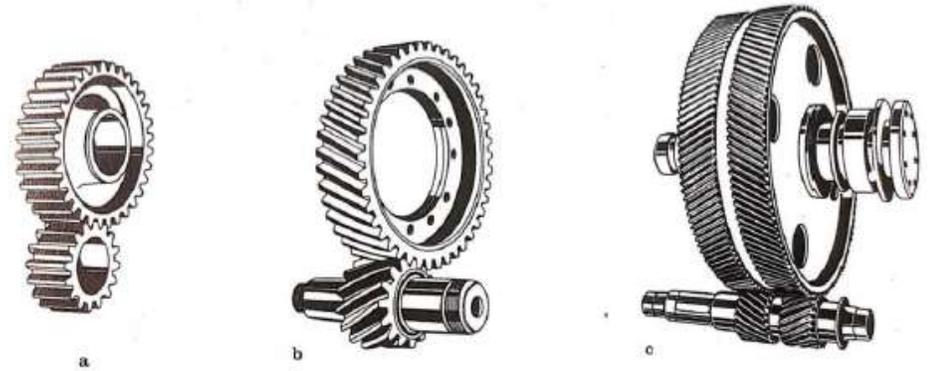
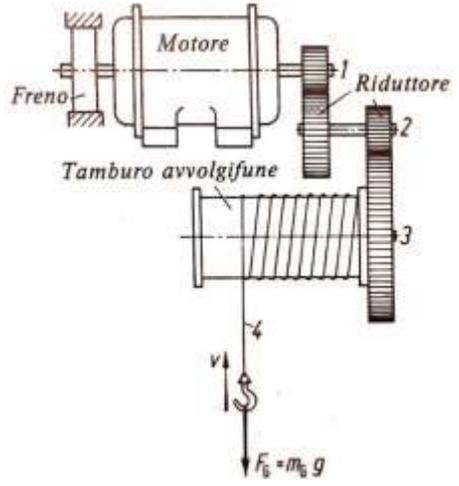
Tutor universitario: Prof. Alberto Campagnolo

Laureando: *Giacomo Meneghetti*

Padova, 16/09/2022

- Le ruote dentate sono organi meccanici destinati a trascinare o ad essere trascinati da altre ruote dentate per azione di denti successivamente in contatto (accoppiamento di forma).
- Le ruote dentate sono l'organo meccanico più diffuso per la trasmissione della coppia e della potenza riducendo o aumentando la velocità di rotazione dell'ingranaggio da un albero in ingresso ad un albero in uscita.

Esempio applicativo →



Ruote dentate cilindriche, assi paralleli

- Esistono varie tipologie di ruote dentate in base alla trasmissione della potenza tra assi paralleli, incidenti o sghembi.



Assi incidenti

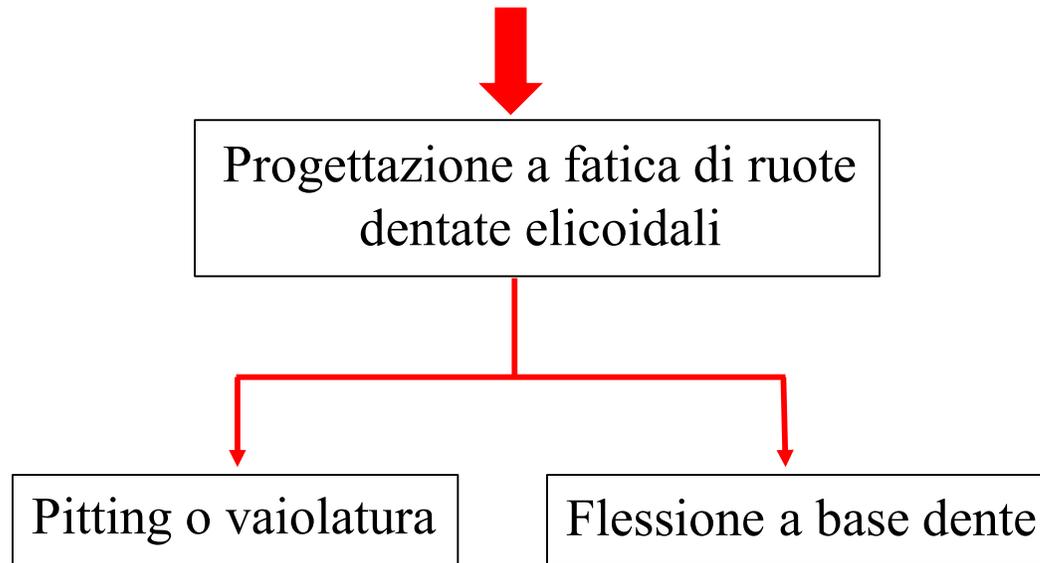


Assi sghembi

## Obiettivi:

- Introdurre la geometria e i parametri principali delle ruote dentate cilindriche a dentatura elicoidale
- Mostrare il metodo proposto dalla normativa ISO 6336:2019 in merito al dimensionamento di ingranaggi cilindrici elicoidali

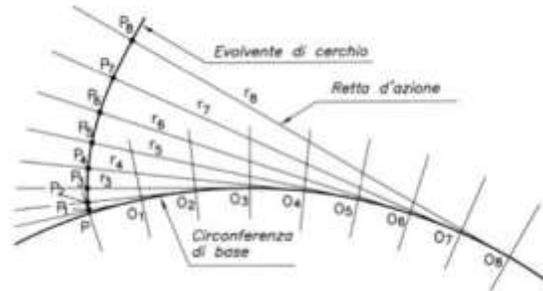
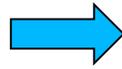
→ Scopo della progettazione



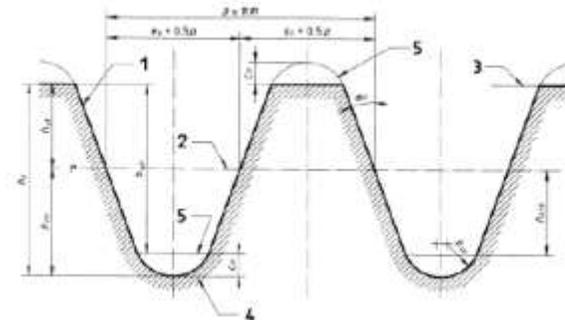
- Diminuzione del peso
- Diminuzione dei costi
- Facilità di costruzione
- Aumento della resistenza strutturale
- Affidabilità

- La maggior parte dei profili dei denti degli ingranaggi in commercio hanno un profilo ad evolvente di cerchio.
- Il profilo ad evolvente è la traiettoria di un punto appartenente ad una retta che rotola senza strisciare sulla circonferenza di base dell'ingranaggio

## Profilo del dente



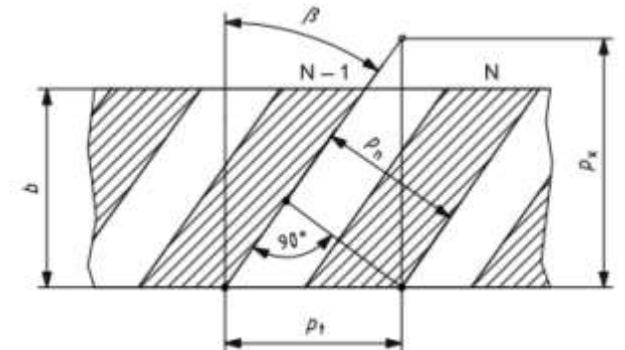
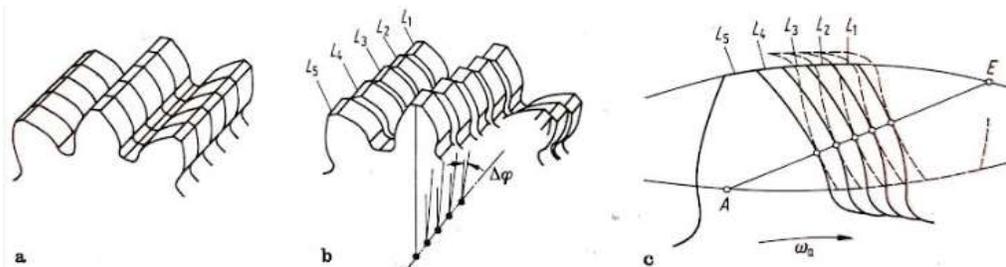
Profilo ad evolvente di cerchio



Dentatura standard

- Le ruote cilindriche a denti elicoidale si differenziano dalle ruote cilindriche a denti dritti per l'inclinazione dei denti di un certo angolo rispetto l'asse della ruota.

## Geometria dell'ingranaggio



I vantaggi e svantaggi delle ruote dentate cilindriche a dentatura elicoidale sottoelencati vengono comparati con le ruote dentate cilindriche a denti dritti.

Vantaggi:

- Più silenziose
- Meno vibrazioni
- Velocità di rotazioni elevate
- Trasmettono carichi più elevati

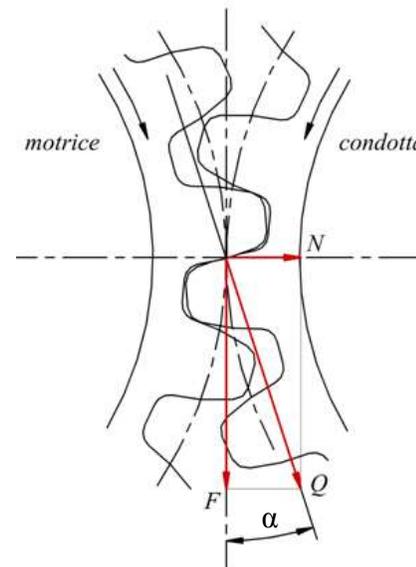


L'inclinazione del dente conferisce un ingranamento graduale

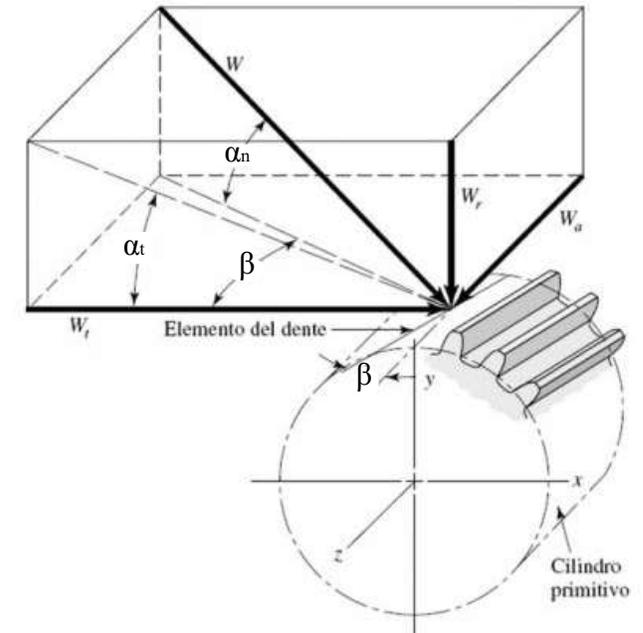
Svantaggi:

- Presenza di spinte assiali
- Costo elevato di realizzazione

Le spinte assiali possono essere bilanciate utilizzando ruote elicoidali a dentatura doppia



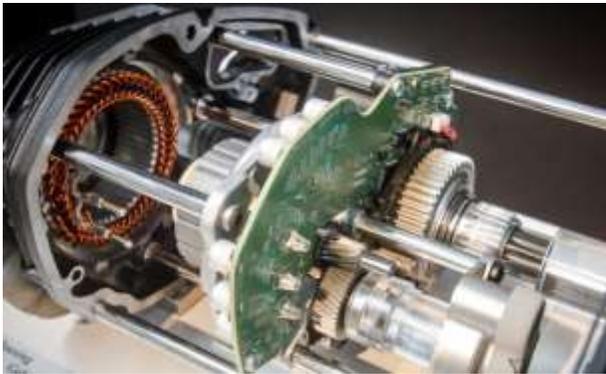
Spinte su ruote dentate a denti dritti



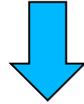
Spinte su ruote dentate a denti elicoidali

# Ruote dentate cilindriche a dentatura elicoidale

Mezzi di trasporto



Settore aeronautico

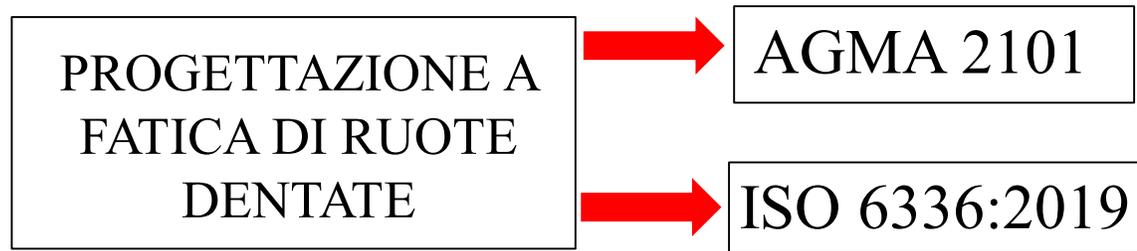
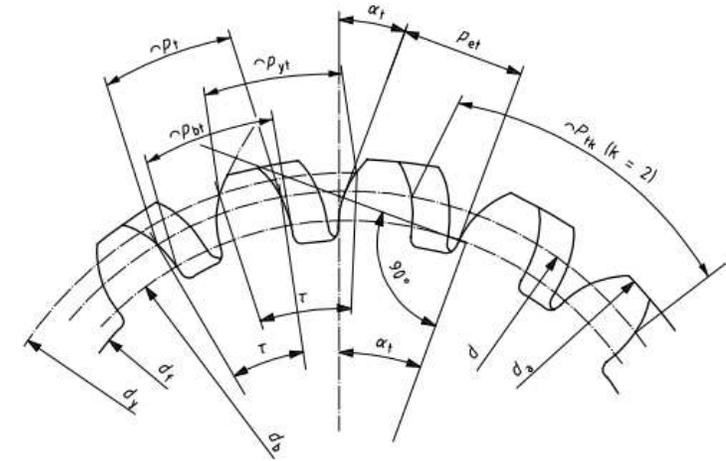
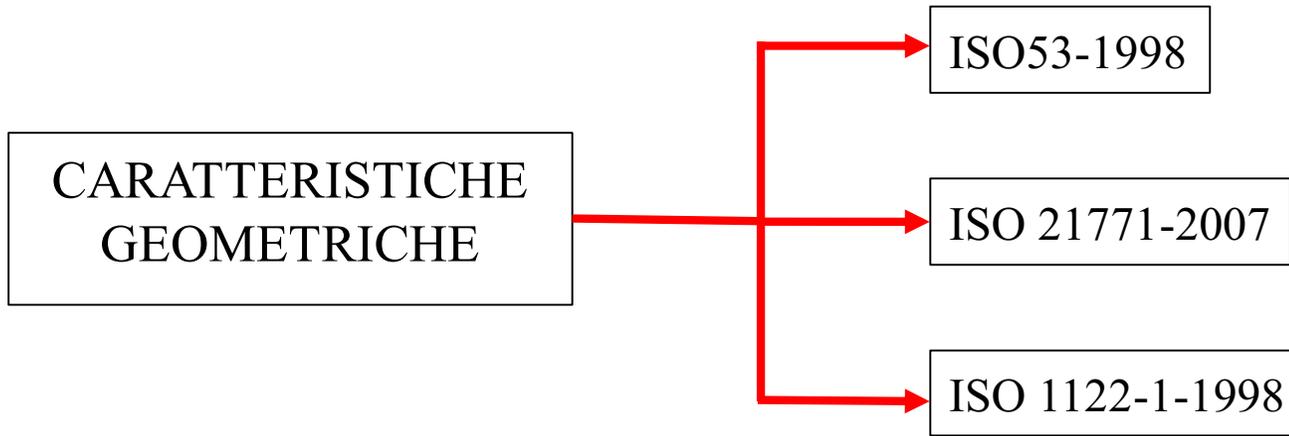


Macchinari  
industriali

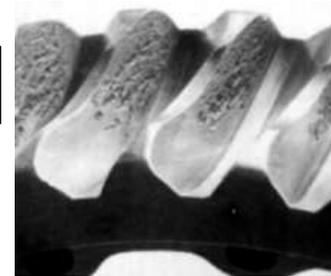
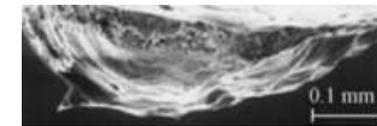


Strumentazioni  
e altro

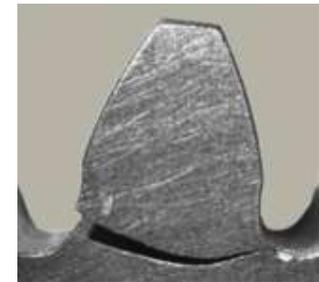




Progettazione a fatica - pitting

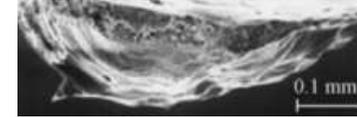


Progettazione a fatica - flessione a base dente



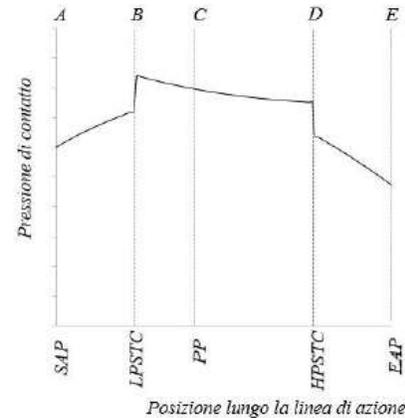
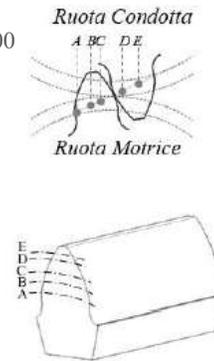
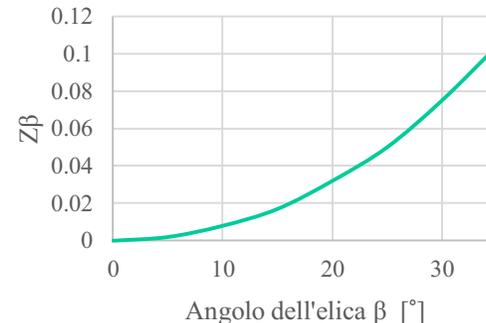
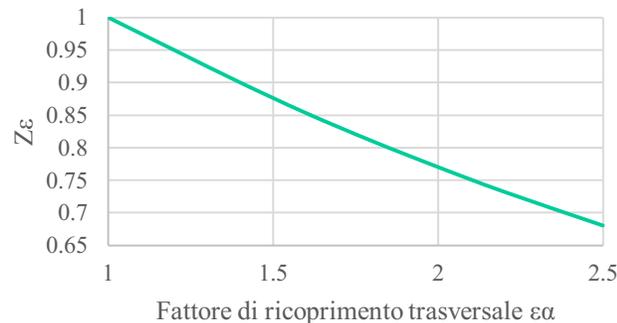
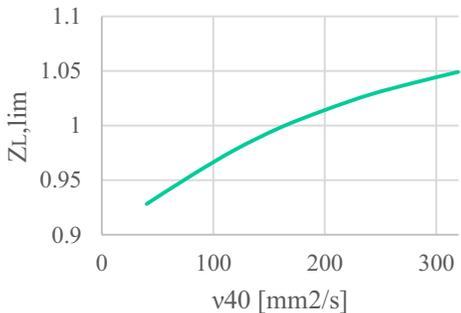
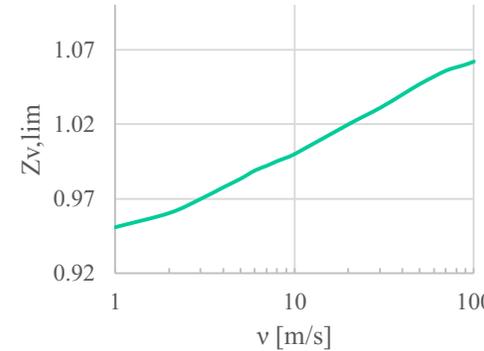
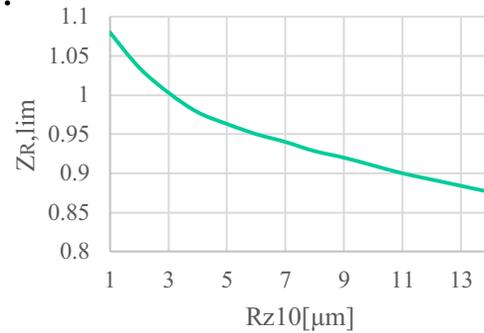
Non si applica a casi di deterioramento diversi dal pitting superficiale e rottura a flessione quali la deformazione plastica del dente o la presenza di vibrazioni che possono causare un'improvvisa rottura.

- Il pitting è un fenomeno di affaticamento superficiale che si verifica sul fianco del dente quando le pressioni di contatto sono molto elevate per un elevato numero di cicli.
- Il fenomeno si verifica quando una piccola crepa si forma vicino alla superficie di contatto.
- La crepa si sviluppa fino a che una piccola porzione di materiale non si stacca dalla superficie del dente creando delle fossette generando vibrazioni e perdita di efficienza.

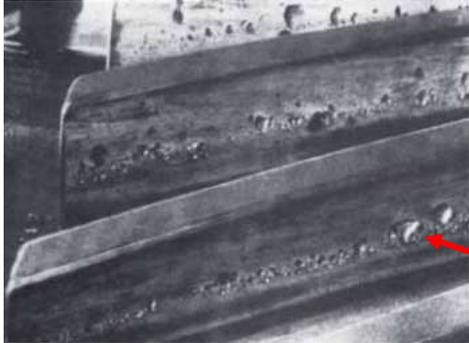


I fattori che influenzano il pitting sono:

- Geometria della ruota
- Finitura superficiale
- Materiale e trattamento termico
- Lubrificazione
- Distribuzione della pressione



## VERIFICA A FATICA - PITTING

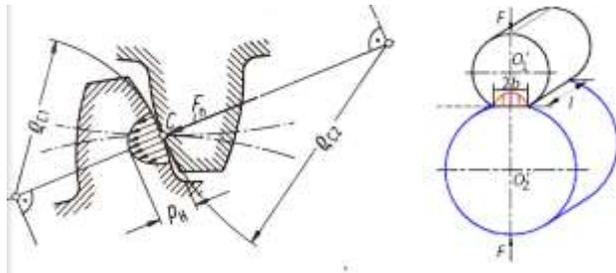


**Vaiolatura o pitting**

$$\sigma_H \leq \sigma_{HP}$$

Pressione Herziana:

$$P_H(max) = \sqrt{\frac{F \cdot \rho \cdot E_{eq}}{2B\pi}}$$



Pressione di contatto:

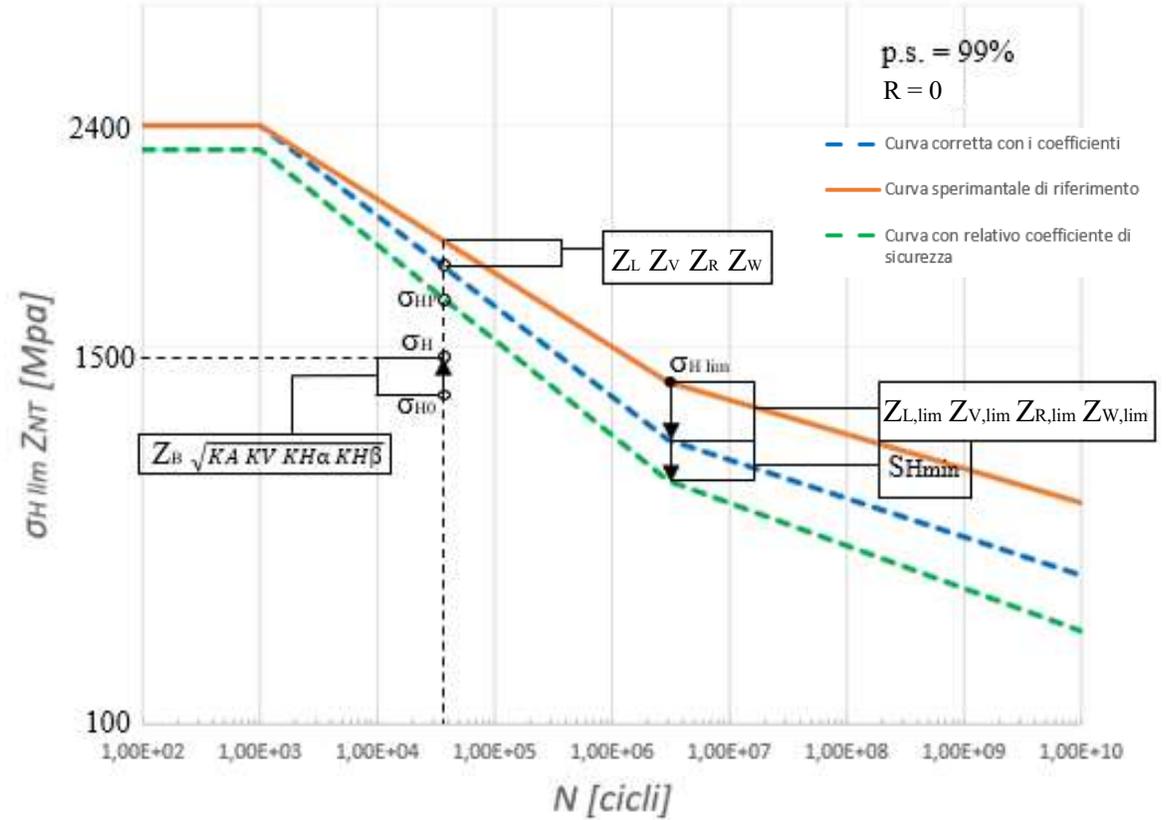
$$\sigma_{H0} = Z_H \cdot Z_E \cdot Z_\epsilon \cdot Z_\beta \cdot \sqrt{\frac{F_t \cdot u + 1}{d_1 b \cdot u}}$$

Pressione massima di contatto:

$$\sigma_H = Z_B \cdot \sigma_{H0} \cdot \sqrt{K_A \cdot K_V \cdot K_{H\beta} \cdot K_{H\alpha}}$$

Pressione di contatto ammissibile:

$$\sigma_{HP} = \frac{\sigma_{H \lim} Z_{NT}}{S_{H \min}} Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V \cdot Z_W$$

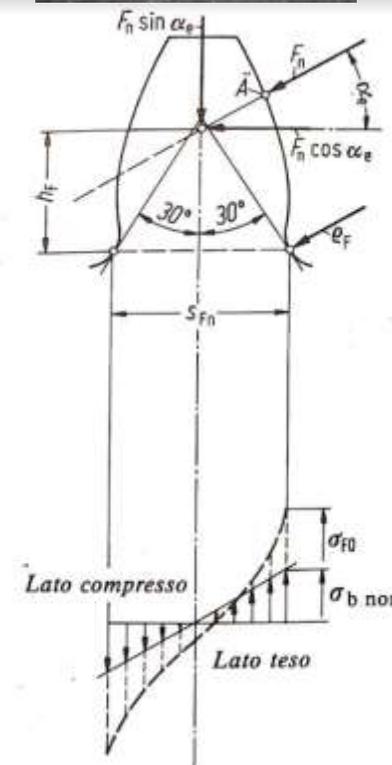
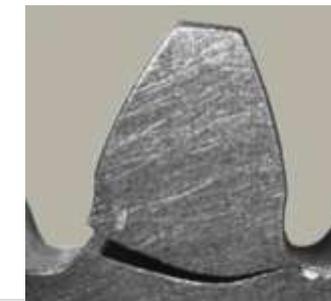
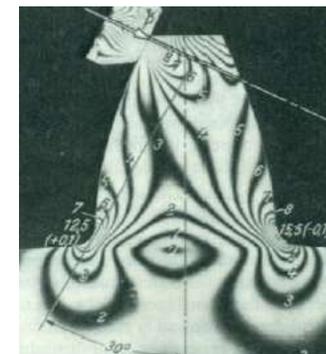
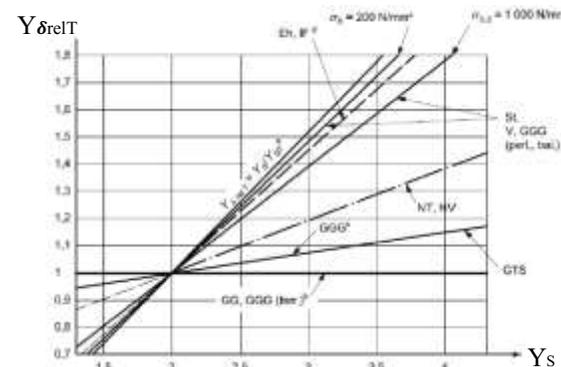
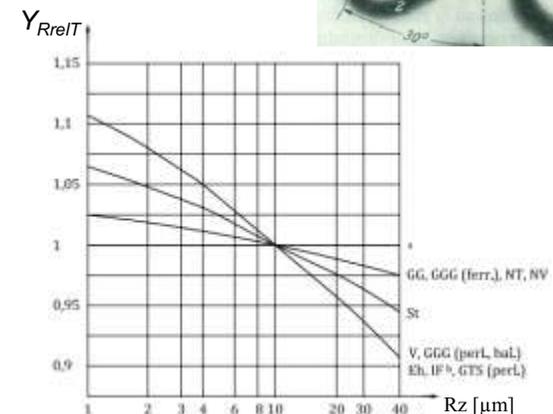
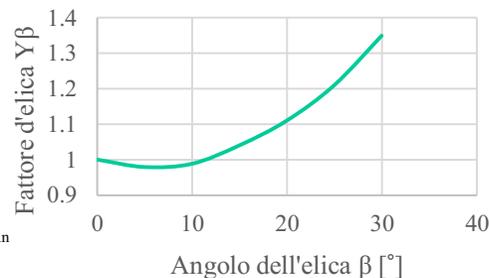
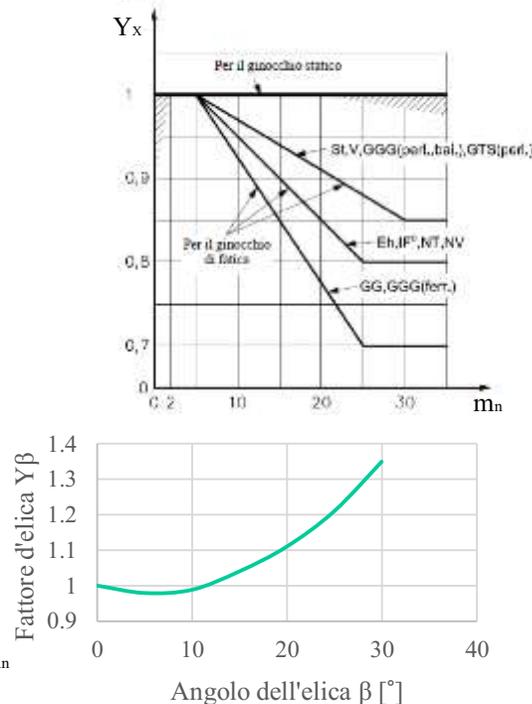
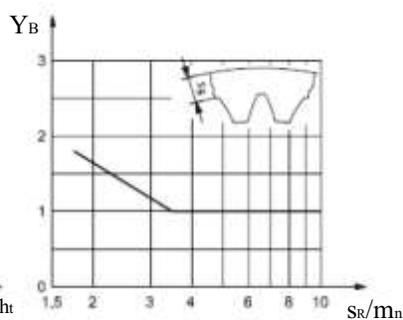
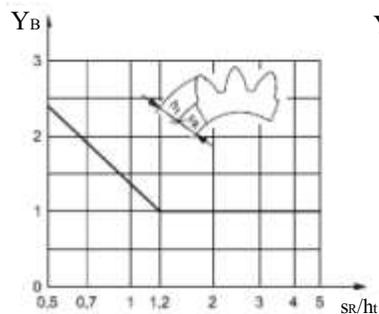


Schema per la verifica a fatica a pitting di ruote dentate

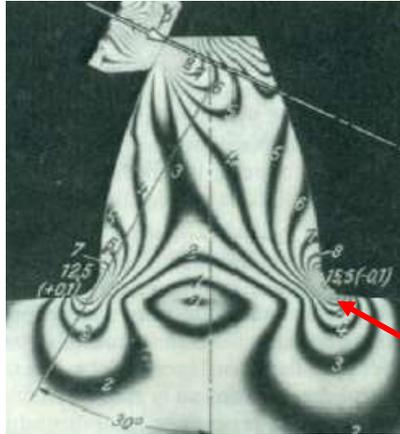
- La fatica a flessione a base del dente è un fenomeno di affaticamento dovuto alla componente tangenziale della forza trasmessa che sollecita ripetutamente la sezione con un momento flettente ciclico.
- Le concentrazioni delle tensioni a base dente porteranno all'innescò e alla propagazione della cricca fino alla rottura del dente.

I fattori che influenzano la fatica flessionale sono:

- Geometria della ruota
- Finitura superficiale
- Materiale e trattamento termico
- Qualità realizzativa
- Rapporto di ciclo



## VERIFICA A FATICA – FLESSIONE A BASE DEL DENTE



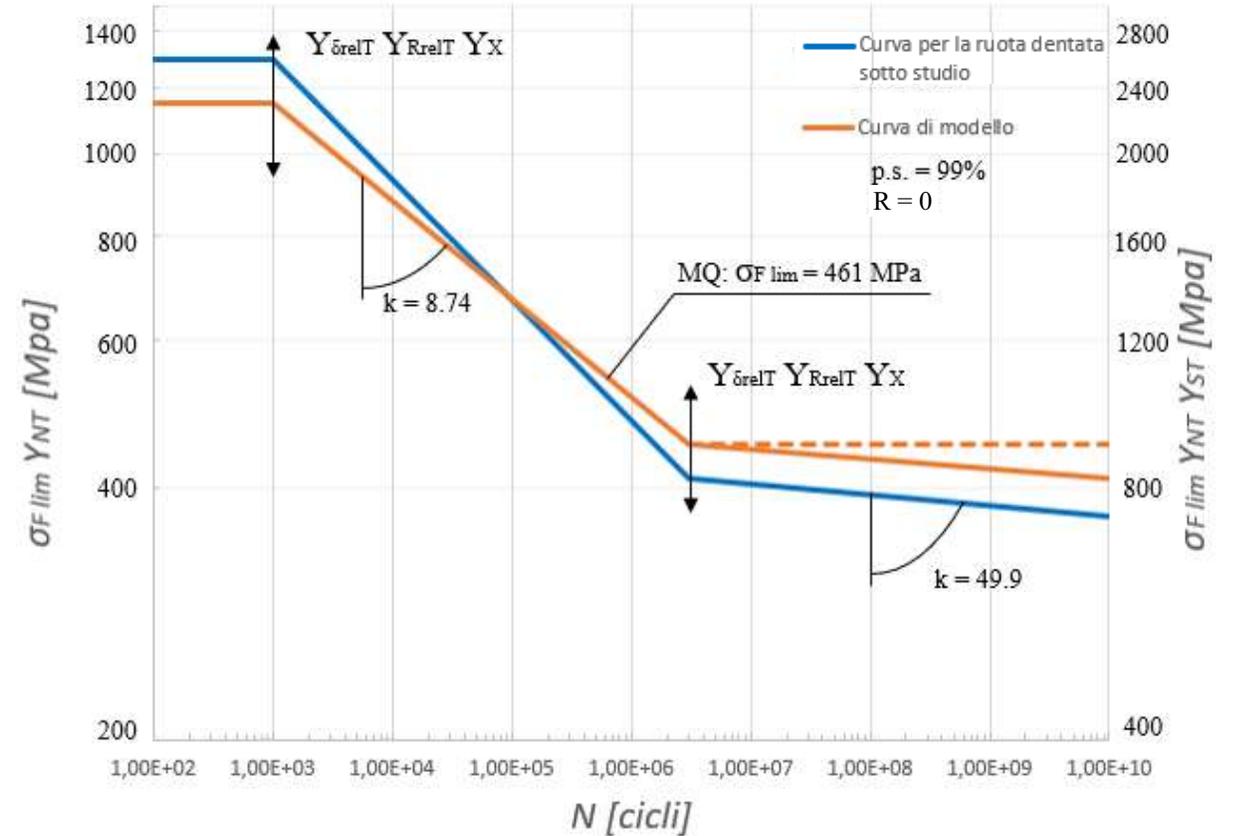
$$\sigma_F \leq \sigma_{FP}$$

**Concentrazione  
delle tensioni**

Tensione di picco elastica:  $\sigma_{F0} = \sigma_{Fnom} Y_S Y_\beta Y_B Y_{DT}$

Tensione reale di picco elastica:  $\sigma_F = \sigma_{F0} K_A K_v K_{F\beta} K_{F\alpha}$

Tensione ammissibile:  $\sigma_{FP} = \frac{\sigma_{Flim} Y_{NT} Y_{ST}}{S_{Fmin}} Y_{\delta relT} Y_{RrelT} Y_X Y_M$



Curve di fatica: curva di modello modificata con i coefficienti correttivi

## Considerazioni sulla progettazione dell'ingranaggio:

- **Importanza del materiale dell'ingranaggio:** gli acciai con tenore di C inferiore al 0,25% senza un trattamento termico non sono consigliati per l'impiego di ingranaggi. Una ruota temprata o nitrurata ( $HRC > 50$ ) leviga i fianchi dei denti di una ruota coniugata bonificata, eliminando gli scostamenti di forma, aumentando quindi la resistenza a pitting. Importante è il tipo di fusione con cui vengono realizzati gli ingranaggi e quindi il grado di purezza, le inclusioni e segregazioni influiscono notevolmente sul limite a fatica.
- **Importanza del trattamento termico:** si può aumentare la durezza superficiale del dente tramite per esempio carbocementazione e nitrurazione, aumentando di conseguenza la vita a fatica per pitting e flessione. Aumentando la durezza si possono realizzare ingranaggi più piccoli a parità di potenza.  
Tuttavia aumentano notevolmente i costi. Il limite a fatica per vaiolatura aumenta fino a durezza di 58 HRC poi si arresta. Per acciai carbocementati si consigliano acciai di partenza a basso tenore di carbonio in modo da garantire tenacità al cuore (16MnCr5)
- **Qualità realizzativa dell'ingranaggio, rugosità, tolleranze geometriche:** tolleranze inferiori a ISO  $\leq 4$  (secondo ISO 1328) e rugosità superficiali ( $R_a$ ) inferiori a 2  $\mu m$  sul lato del dente e sul raccordo comportano ad un miglioramento della vita a fatica per flessione e pitting.
- **Importanza della lubrificazione:** una buona lubrificazione mantiene coefficienti d'attrito e temperature basse aumentando la vita dell'ingranaggio.

- **Importanza dell'angolo dell'elica:** una diminuzione dell'angolo dell'elica comporta ad una diminuzione delle spinte assiali, di contro diminuisce la gradualità dell'ingranamento.
- **Ridurre la fatica per pitting:** un numero elevato di denti (quindi modulo piccolo, ossia rapporto di contatto trasversale più alto), e nessuna zona di forte curvatura sul lato di contatto del dente diminuiscono il fenomeno del pitting. La resistenza alla vai olatura aumenta sensibilmente aumentando la durezza superficiale del dente, in quanto indurendo superficialmente il dente la capacità di carico aumenta al quadrato.
- **Ridurre la fatica flessionale a base dente:** sono favorevoli grandi moduli (quindi pochi denti), indurimento superficiale (compreso il raccordo di base del dente), grande raccordo di base senza scanalature per ridurre l'effetto d'intaglio.
- **Coefficiente di sicurezza:** i coefficienti variano in base al campo di applicazione. Si consiglia di utilizzare coefficienti di sicurezza maggiori nel caso della flessione rispetto al pitting perché la rottura del dente per flessione comporta un arresto improvviso del macchinario e può essere pericoloso se si considera per esempio l'impiego dell'ingranaggio nel settore aeronautico, mentre il fenomeno del pitting non comporta l'immediato arresto della macchina, sebbene dia luogo a vibrazioni, rumore e perdite di efficienza gli ingranaggi possono continuare a lavorare per diverse ore.