

Modena, 1995

NOTE SULL'APPLICAZIONE DEL SOFTWARE RHF
PER INGRANAGGI CONICI CON DATI DA ICON:
DIFFERENZE TRA DIN 3990/1987 E DIN 3991/1988

OSSERVAZIONI GENERALI

L'impostazione generale della norma DIN 3991, sulle ruote cilindriche virtuali equivalenti alle sezioni di mezzzeria delle ruote coniche, a mio parere è opportuna, ed è la stessa che personalmente adottato da anni.

Ma sembra che gli estensori della norma non abbiano voluto impegnarsi troppo sulla responsabilità dei risultati del calcolo: evitano infatti che valutazioni di alta resistenza siano attribuibili alla norma. Danno il calcolo soltanto per il limite di fatica, sia per il pitting che per la rottura (Dauerfestigkeit, resistenza illimitata), evitando quel fattore di durata che nella norma 3990 entra soltanto quando è migliorativo. Prescrivono di considerare prudentemente una larghezza di fascia efficace inferiore a quella reale (v. appresso - normalmente assunta pari all'85% della larghezza di disegno). E' vero che poi, per la resistenza al pitting, introducono un fattore migliorativo Z_K , potenzialmente anche più importante della riduzione di larghezza, ma lo lasciano all'arbitrio del progettista, in altri termini scaricano sul progettista la responsabilità del risultato. Adottano sommariamente forti valori per i fattori di distribuzione del carico.

E' singolare, ma tipicamente tedesco, che introducono certe dettagliate valutazioni, ad esempio per il fattore dinamico, per il quale si scostano alquanto dalla norma degli ingranaggi cilindrici, con differenze magari di poche unità per cento; o per il fattore $KH\alpha$ met. B; mentre poi con l'assunzione sommaria della larghezza efficace, con l'arbitrarietà lasciata per Z_K e con le sommarietà dell'assunzione del fattore $KH\beta$ si possono avere differenze di valutazione dell'ordine di qualche decina per cento. Anche del 100%, a volte, se si considera il disallineamento reale, e conseguente fattore $KH\beta$, e lo si confronta col valore $KH\beta$ -D suggerito sommariamente dalla norma.

CARICHI

La norma DIN 3991 considera la sezione di mezzzeria delle dentature coniche (a differenza da quanto, formalmente, fa l'AGMA). Il software ICON-RHF concorda. In particolare, da ICON proviene il diametro medio del pignone $Dm1$ per il calcolo automatico del carico tangenziale F_t dal momento torcente. (Nell'output il carico è indicato F_t' che per le ruote coniche è uguale a F_t .) Il diametro primitivo di funzionamento virtuale $D1'$ è calcolato automaticamente per dedurne la curvatura dei profili nel calcolo della resistenza al pitting.

SOVRACCARICHI

Per il fattore dinamico K_v il metodo C secondo DIN 3991 è impostato in maniera analoga a quello della norma 3990 delle ruote cilindriche, con qualche

differenza di dettaglio che non porta a grandi differenze di valore nel campo delle ruote coniche cementate abbastanza precise, di diametro medio o piccolo e ben caricate.

Per la distribuzione del carico, il software RHF, assumendo globalmente K_m con input diretto, permette di far fronte a eventuali specifiche del cliente in merito ai fattori di distribuzione longitudinale e trasversale, v. note alla norma 3990. Vediamo se si possa prendere alla lettera la norma 3991.

La norma nomina ma non definisce metodi A e B di $KH\beta$. Compie invece una prima assunzione sommaria $KH\beta-C = 1,5$ per il solo motivo che considera di regola le dentature coniche rastremate sia longitudinalmente che radialmente ("crowning" più spoglie di profilo), ossia $KH\beta-C$ è giustificato dal fatto in sé che le dentature (scariche) avrebbero contatto puntiforme. L'assunto, come valore, è abbastanza singolare, se si considera ad es. che per ruote cilindriche un leggero crowning è ritenuto favorevole e dovrebbe far diminuire $KH\beta$ piuttosto che dargli un valore elevato.

Tale valore di $KH\beta-C$ varrebbe quale $KH\beta$ per dentature prive di errori e assi indeformati. Poiché in pratica ciò non è, $KH\beta-C$ diviene soltanto un gradino intermedio per giungere a un fattore $KH\beta-D$ che tenga conto del disallineamento. In alternativa la norma ammette una riduzione della "larghezza efficace" beH , v. parte 1 pag.11.

(Non è chiaro per quale motivo si debba tener conto delle peculiarità delle ruote coniche separatamente attraverso i valori della larghezza efficace, " beH ", e di $KH\beta$, che riguardano un unico problema. Si può pensare ad es. che la norma abbia voluto considerare una situazione prossima alla realtà del carico per mm di fascia nel calcolo di K_v . Il che significa anche che gli estensori hanno preso sul serio la propria valutazione di K_v .)

In pratica la norma 3991 assume dunque come valido un fattore $KH\beta-D$ che rimane pari a $KH\beta-C$ soltanto se si riduce beH . Viene suggerito di mantenere beH pari all'85% della larghezza di fascia reale (v. appresso) e di calcolare $KH\beta-D$ moltiplicando $KH\beta-C$ (ossia 1,5) per un valore $KH\beta_{be}$ dedotto dalla tab.5.1 della pag.11. Il fattore $KF\beta-D$ della resistenza a rottura viene assunto = $KH\beta-D$ (stesso criterio di RHF che prende K_m comune per RH e RF). Nella tabella 5.1, per $KH\beta_{be}$ come coefficiente per $KH\beta-D$, le distinzioni si basano sulla categoria di applicazione (aerei, o veicoli con identici valori, o industria e marina) e sul montaggio fra i cuscinetti o di sbalzo. Per applicazioni industriali con pignone e ruota ambedue di sbalzo risulta così $KH\beta-D = 1,5 \times 1,5 = 2,25$.

(Si ricordi che il concetto del fattore porta a ritenere triangolare la distribuzione del carico se $KH\beta = 2$. Un valore maggiore significa dunque ritenere la zona di portata più ristretta di quell'85% che viene mantenuto formalmente come larghezza efficace. Da notare che se, invece di considerare una larghezza ridotta, tutto il problema del disallineamento venisse affrontato attraverso $KH\beta$, si avrebbe $KH\beta = 2,25/0,85 = 2,65$ nel caso citato!).

Inoltre, $KH\beta$ deve essere ulteriormente moltiplicato per $KH\alpha$. Qui, solita osservazione: per il "metodo B" del fattore si eseguono calcoli sofisticati per ottenere piccolissime differenze percentuali. Con "metodo C", $KH\alpha$ può essere dedotto dalla tabella 6.1 di pag.13, parte 1. Per cementati con gradi di precisione DIN 8, sarebbe $KH\alpha = 1,4$, quindi $K_m = KH\beta KH\alpha = 3,7$ nel caso citato!

RESISTENZA AL PITTING

Le differenze sostanziali dal metodo delle ruote cilindriche sono (v. parte 2, pag.2) le seguenti.

- Come accennato, si considera una larghezza efficace beH , normalmente assunta

= 0,85 Bu (per la precisione: la norma misura la larghezza reale al piede anziché sulla primitiva). (NB: il termine tedesco è "effektive", effettiva, ma mi sembra più ragionevole tradurlo come se fosse l'inglese "effective", efficace.)

- Viene introdotto un fattore ZK nel calcolo della pressione.

Normalmente è $ZK < 1$. Viene indicato un valore minimo $ZK = 0,85$, migliorativo della valutazione della resistenza (in quanto, riducendo la pressione calcolata, conduce a un incremento del fattore di sicurezza SH , o della durata se implementiamo il metodo DIN col relativo calcolo). Detto valore minimo è ammesso per denti con profilo trasversale opportunamente spogliato ("Höhenballigkeit", bombatura nel senso dell'altezza del dente). In tal caso, però, bisogna tener presente che ZK influisce al quadrato sul carico, mentre la larghezza influisce direttamente, per cui in complesso avremmo un vantaggio (incremento non di SH , ma di SH^2 ossia del carico trasmissibile) $= 0,85/(0,85)^2 = 1,176$. Per $ZK = 0,92$, beH e ZK si compensano. Peraltro il fattore ZK non dipende solo dalle spoglie di profilo, anzi, come concetto, ha essenzialmente il compito di considerare che il profilo della dentatura conica non è esattamente una evolvente, ed è alquanto più favorevole dell'evolvente per la resistenza al pitting. In conclusione, in condizioni di realizzazione medie si può ammettere grosso modo che sia $ZK = 0,92$ e che beH e ZK si compensino.

Con l'impostazione RHF, è facile implementare la norma col calcolo di durata, che, come accennato, manca nella 3991 (mentre nella 3990 è inserito solo nel campo della resistenza a tempo per numero di cicli inferiore a quello del vertice della curva, per cui può condurre ad ammettere un carico maggiore del limite di fatica). Per l'impostazione del calcolo di durata, generalizzato anche al caso degli alti numeri di cicli, non c'è che rimandare al Gear Handbook.

RESISTENZA A ROTTURA

L'impostazione basilare del software RHF equivale a quella della norma DIN 3991: ambedue tengono conto che esiste un coefficiente di spostamento di addendum e un coefficiente di spessore. Differisce solo l'approccio formale. I grafici ottenibili con RHF evidenziano la razionalità dell'impostazione.

La differenza sostanziale della norma 3991 rispetto alla 3990 è che, anche per la resistenza a rottura, si considera una larghezza di fascia efficace beF , che viene assunta sommariamente $= beH$, ossia $=$ all'85% della larghezza reale misurata sulla generatrice di piede.

Nel software RHF non c'è problema se si vuol corrispondere esattamente alla norma 3991, in quanto per la resistenza a rottura, metodi ISO-DIN, è richiesto l'input locale della larghezza resistente, distinto per le due dentature. (Ricordiamo che per le dentature cilindriche ciò serve per assegnare la larghezza reale anche a quella dentatura che sia effettivamente più larga, anziché la larghezza utile Bu di sovrapposizione.)

Non trovo altre differenze sostanziali. (C'è ad es. una piccola differenza nel fattore delle dimensioni YX , ma riguarda dentature indurite in superficie con modulo superiore a 25!).

Per il calcolo di durata, stesse osservazioni come per la resistenza al pitting.

PROCEDURA E INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI RHF PER L'ACCORDO CON DIN 3991 E CHIARIMENTI

- Si può seguire la procedura usuale.
- Per il fattore dinamico K_v eventualmente si assuma per prudenza un valore leggermente maggiore; un criterio è di calcolarlo come se la precisione fosse di un gradino peggiore di quella che è. Ciò può essere chiarito al cliente, se lo chiede.
- Per il fattore di distribuzione del carico K_m , o relativi fattori $K_H\beta$ $K_H\alpha$, volendo seguire la norma 3991 si dovrebbe adottare $K_H\beta = K_H\beta\text{-D}$ ottenuto moltiplicando 1,5 per un fattore correttivo, detto $K_H\beta_{be}$ nella norma. Per ruote ambedue di sbalzo è indicato $K_H\beta_{be} = 1,25$ per veicoli, $K_H\beta_{be} = 1,5$ per applicazioni industriali. Si ha poi $K_H\alpha$ met. C dalla tab.6.1 di pag.13, parte 1: ad es., per grado di precisione DIN 7, $K_H\alpha = 1,2$ (1,1 per denti diritti). Il valore $K_m = K_H\beta \cdot K_H\alpha$ che ne consegue appare esageratamente elevato, pur tenendo conto che il problema della distribuzione non uniforme del carico esiste. In alternativa, per un valore ragionevolmente inferiore, non c'è che cercare un accordo col cliente. A mio parere, anche per esperienza industriale d'ingranaggi conici, K_m potrebbe essere scelto con gli stessi criteri come per le ruote cilindriche: pertanto, valori abbastanza bassi presuppongono alberi non troppo elastici, sufficienti campate fra i cuscinetti e corretto montaggio, specie nel caso dei denti a spirale. Si tenga conto tuttavia che il montaggio di sbalzo comporta inevitabilmente disallineamento, non foss'altro che per i cedimenti elastici dei cuscinetti, anche se precaricati. Pertanto in linea generale K_m sarà di un gradino superiore a quello per ruote cilindriche.
- Per la resistenza al pitting, a mio parere si può asserire che beH e ZK , pur non comparando esplicitamente, si compensano, ritenendo
 $beH = 0,85 Bu$ e $ZK = 0,92$.
- (NB: la norma 3991, introducendo direttamente beH in luogo di Bu , porta anche a una sottovalutazione del rapporto di ricoprimento di fascia $\epsilon\beta$, che influisce leggermente sul calcolo del fattore dinamico, tuttavia nel senso di abbassarlo, e in quello di $K_H\alpha$, per chi volesse seguirne il metodo B. Altre piuttosto insignificanti differenze potrebbero introdursi altrove se risultasse $\epsilon\beta < 1$, cosa che di solito non sarà per le ruote coniche a spirale, dato il forte angolo d'elica.)
- Per la resistenza a rottura basta chiarire che i valori "BF" di RHF debbono intendersi quali "beF", ovviamente introducendo in input, per ogni dentatura, l'85% della larghezza reale (secondo norma, misurata al piede). Inoltre potrà occorrere chiarire che si tien conto sia del coefficiente di spostamento di addendum che delle ulteriori correzioni di spessore, pur in diverso modo formale (lo scopo è ottenuto mediante addendum di utensile fittizi).