

STRUMENTI SOFTWARE PER LA PROGETTAZIONE DI INGRANAGGI (II)

Caratteristiche generali dei programmi di calcolo sviluppati dalle aziende e basati su una normativa specifica, per rispondere alle esigenze dei clienti, o che fondono insieme più normative

I programmi (codici) di calcolo basati sulle normative operano sostanzialmente secondo l'approccio tradizionale. Alcuni di questi codici sono disponibili commercialmente, talvolta - con alcune limitazioni - come freeware. Varie aziende hanno sviluppato propri codici di questo tipo, che talvolta si limitano all'uso di una specifica normativa, imposta dalle esigenze dei propri clienti, oppure che cercano di fondere assieme più di una normativa.

Vediamo le caratteristiche generali di questo tipo di programmi.

GENERAZIONE AUTOMATICA DELLA GEOMETRIA DEI DENTI

Di regola viene richiesto all'utente di introdurre un insieme di dati sufficiente alla definizione dell'ingranaggio. Tipicamente ciò richiede di inserire:

- numero dei denti di ciascuna ruota componente l'ingranaggio,
- modulo normale,
- interasse di montaggio,

d) informazioni sul tipo di ingranaggio (dentature interne o esterne).

Per quanto riguarda l'uso di dentature corrette, è richiesto il valore della correzione sull'addendum. Le modifiche di profilo sono introdotte indicando se lo smusso viene praticato in testa o a piede dente e l'entità dello spessore di materiale asportato da tale modifica.

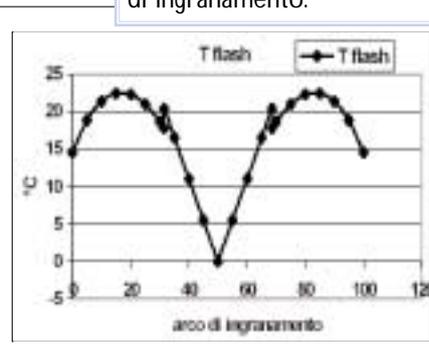
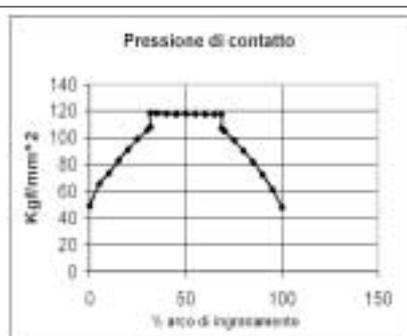
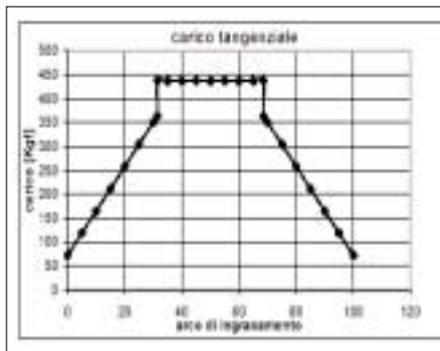
In uscita i programmi forniscono:

- geometria dettagliata della dentatura,
- andamento teorico del carico su tutto l'arco di ingranamento,
- sollecitazioni flessionali a base dente,
- sollecitazioni di compressione sul fianco del dente,
- le curve di progetto fissate dalle norme oppure tramite un'apposita banca di dati.

Sono inoltre usualmente forniti:

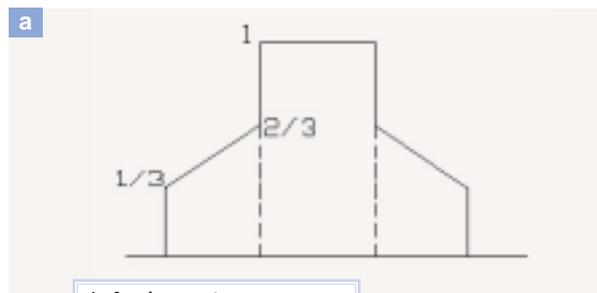
- sollecitazioni ammissibili a fatica,
- vita a fatica per rottura a flessione del dente,

5. Tipiche uscite di un codice basato sulle normative, da sinistra verso destra: andamento del carico, della pressione di contatto, della temperatura di "flash" in funzione dell'arco di ingranamento.

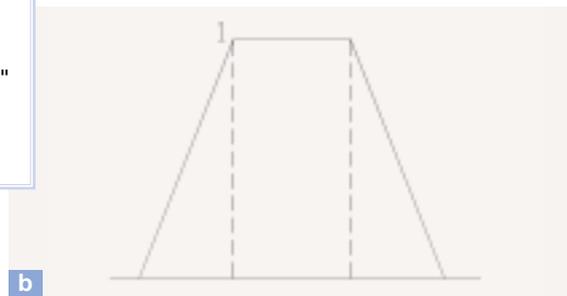


- vita a fatica per danneggiamento superficiale del fianco del dente. Indici di rischio dell'usura adesiva (la temperatura di "flash" o il fattore " \wedge " equivalente al rapporto tra lo spessore minimo del meato elastoidrodinamico e la rugosità media del fianco del dente).

Si riportano in figura 5 alcuni output grafici di questa tipologia di codici. Di seguito vengono illustrate le metodologie usate da tali codici per la



6. Andamento della ripartizione di carico in assenza di modifiche (a) e andamento "teorico" della ripartizione del carico per profilo con spoglia ottimale (b).



generazione degli output descritti in precedenza, iniziando proprio dalla generazione della geometria dettagliata del dente.

SCelta DEGLI UTENSILI

Il codice, in base alla geometria generale del dente, permette di individuare i parametri della geometria dell'utensile, almeno tramite la dentiera di riferimento. In vari codici è possibile caratterizzare più tipi di utensile quali: creatore (hob) standard, creatore con tagliente a protuberanza semplice, coltello circolare standard, coltello circolare con protuberanza semplice.

VALUTAZIONE DELLA RIPARTIZIONE DI CARICO

La valutazione della ripartizione di carico nell'arco di ingranamento dipende dall'entità delle modifiche apportate al profilo - nominalmente a evolvente - del fianco del dente. Le più comuni modifiche sono lo smusso di

testa (tip relief), destinato a compensare gli effetti della deformazione del dente in presa, e la bombatura (crowning), destinata a compensare gli effetti del disassamento.

In assenza di modifiche è assunta una ripartizione secondo figura 6.b mentre a una spoglia ottimale in rapporto alle condizioni di funzionamento può essere associata una ripartizione secondo quanto indicato in figura 6.a. In alcuni codici aziendali l'andamento della ripartizione assunto in ogni singolo caso è basato su di un'interpolazione lineare di questi due andamenti, in funzione delle modifiche imposte. Tipicamente si considera l'arco di ingranamento teorico.

Questa situazione può essere vicina alla realtà solo nel caso di dentature metalliche con carichi non troppo elevati.

SOLLECITAZIONE FLESSIONALE ALLA BASE DEL DENTE

La valutazione delle sollecitazioni flessionali avviene secondo quanto è stato descritto in precedenza. La sezione di riferimento per il calcolo della tensione massima può essere leggermente diversa a seconda che sia stabilita secondo il criterio della norma AGMA (parabola di uniforme resistenza alla Lewis) oppure secondo il criterio della norma Iso - Din.

Inoltre, il raccordo a piede dente, da cui dipende il coefficiente di concentrazione della tensione nella zona critica, può essere diverso a seconda della forma dell'utensile. In alcune applicazioni si preferisce infatti massimizzare il raggio di raccordo di fondo dente, usando ad esempio utensili con protuberanza di testa, capaci di

creare un raccordo ininterrotto (full fillet) sul fondo dei vani della dentatura.

Oltre alla definizione delle modifiche di profilo, della qualità di lavorazione e degli errori di disallineamento degli assi delle ruote, di regola questi codici forniscono all'utente la possibilità di definire quanto segue:

- dimensioni dello spessore del bordo (rim) della fascia dentata; infatti se questo è relativamente piccolo rispetto all'altezza del dente, la massima sollecitazione, che riguarda più il bordo del corpo ruota che la base del dente, è calcolata moltiplicando il valore ottenuto nel modo tradizionale per un ulteriore coefficiente di concentrazione, dedotto da analisi agli Elementi Finiti di casi analoghi;
- curve di fatica (curve di Wöhler) proprie del materiale se differenti da quelle date dalla normativa di riferimento; in alcuni codici è possibile suddividere queste curve in più segmenti, rettilinei sul piano bilogaritmico (es, tre segmenti), per una migliore valutazione della vita in condizioni di fatica con ridotto oppure elevato numeri di cicli.

FATICA SUPERFICIALE

Il calcolo della pressione di contatto avviene in tutti i punti di contatto del fianco del dente attivo, considerando due cilindri infiniti di curvatura equivalente a quella delle evolventi nei punti di contatto considerati. Non è di regola considerato l'effetto dello smusso, che oltre a modificare la curvatura locale può determinare discontinuità nella zona di passaggio del contatto tra il profilo ad evolvente e quello modificato.

Analogamente a quanto detto sopra, possono essere definite dall'utente curve di resistenza del materiale diverse da quelle assunte in base alla normative.

PARAMETRI PER LA VALUTAZIONE DEL PERICOLO DI GRIPPAGGIO O USURA

Di regola questi codici permettono il calcolo del massimo valore della temperatura sulla superficie del dente, secondo il modello di Blok (Tflash) oppure, in alternativa, un valore mediato, detta temperatura integrale di

"flash". Inoltre questi codici forniscono lo spessore del meato elastoidrodinamico di lubrificante nella zona di contatto, calcolato di regola con un modello bidimensionale, valido cioè per il caso di cilindri elastici, infinitamente lunghi.

L'utente deve introdurre in entrambi i casi sufficienti dati circa il lubrificante. Tipicamente è richiesto di fornire:

- viscosità dell'olio a due diverse temperature;
- temperatura di alimentazione del lubrificante;
- rugosità media della superficie del fianco dei denti.

Il calcolo della temperatura di "flash" è basato su alcune ipotesi semplificative circa il coefficiente di attrito, che di regola varia nell'arco dell'ingranamento di una coppia di denti. Ad esempio la norma Agma B88 prevede il calcolo di un coefficiente di attrito medio, secondo la seguente formula:

$$\mu_m = 0,06 \cdot 1,13 / (1,13 - R_a)$$

dove R_a è la rugosità media espressa in μm .

IL CODICE KISSOFT

Il codice KISSsoft è disponibile sia commercialmente sia in versione ridotta come freeware [15]. Già in questa versione presenta varie caratteristiche interessanti.

Nell'affrontare il calcolo degli ingranaggi, questo codice implementa i modelli analitici, di cui sopra, consentendo il calcolo secondo le seguenti norme:

- Iso 6336 (del 1996);
- Din 3990;
- Agma B88 e C95.

Il codice possiede una banca dati sui più diffusi materiali impiegati nella realizzazione degli ingranaggi, ma nella versione ridotta la scelta è possibile solo tra due di questi. Possono essere analizzati:

- ingranaggi cilindrici a denti dritti ed elicoidali, interni ed esterni, ad assi paralleli o sghembi;
- ingranaggi ipoidi;
- ingranaggi conici con denti dritti oppure a spirale;
- ingranaggi a vite, ruota elicoidale;
- rotismi epicicloidali.

Assieme al modulo di calcolo, è integrata un'interfaccia grafica che permette di visualizzare immediatamente la coppia di ruote dentate, sia in 2D sia in 3D (figura 7).

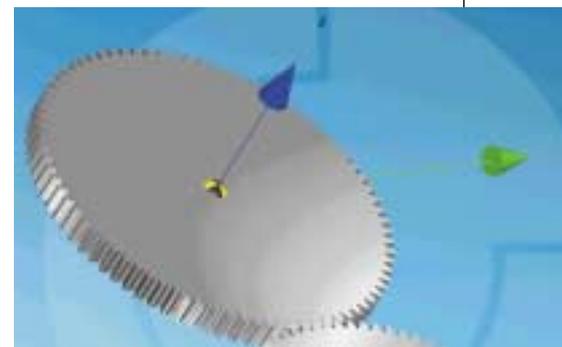
La forma del dente viene definita con un'accuratezza dell'ordine del centesimo di micron tramite la simulazione del processo di fabbricazione (involuppo dell'utensile).

Un aspetto assai importante del software è che esso permette di distinguere tra due tipi diversi di calcolo:

- dimensionamento: in questo caso il codice KISSsoft è in grado di eseguire, previa indicazione della potenza, del rapporto di trasmissione desiderato e delle sicurezze nominali, il dimensionamento completo di una coppia di ingranaggi (modulo, numero di denti, interasse, caratteristiche geometriche del primo ordine); per i parametri di ingresso sono pre-

visti degli intervalli, in base ai quali viene definito un ventaglio di soluzioni all'interno del quale il software suggerisce una considerata ottimale;

- ottimizzazione: il codice KISSsoft consente di ottimizzare in modo mirato un ingranaggio costituito da due sole ruote con condizioni marginali definite esattamente; ad esempio, si può intervenire sui parametri geometrici del secondo ordine (es.: entità dello spessore di spoglia) per controllare caratteristiche come l'errore di trasmissione, cioè la differenza tra la rotazione angolare che l'albero del-



7. Visualizzazione 3D dell'ingranaggio modellato secondo KISSsoft.

la ruota avrebbe se l'ingranaggio fosse perfetto, cioè senza errori o deformazioni, e la sua effettiva rotazione, la resistenza o il rumore di un ingranaggio, del quale il codice calcola un indice qualitativo, a parità degli altri parametri.

Accanto alla verifica classica e alle funzioni di ottimizzazione appena descritte, il codice KISSsoft presenta le seguenti possibilità di calcolo supplementari:

- in presenza di pressioni di contatto Hertziane, attraverso il calcolo della massima sollecitazione tangenziale subcorticale, viene suggerita una profondità del trattamento termico superficiale del fianco del dente, nel caso di acciai da cementazione e da nitrurazione;
- nelle ruote dentate in materiale sintetico o anche sinterizzato, si può modificare la forma del dente, tenendo conto del ritiro in fase di solidificazione e adattarla così alla fabbricazione di uno stampo ottimale;
- i calcoli per ingranaggi da utilizzarsi ad esempio nel settore automo-

Nella prima parte dell'articolo si esaminano gli approcci utilizzati per la progettazione a resistenza e a danno superficiale delle dentature. Nella seconda parte dell'articolo si descrivono alcuni strumenti software sviluppati a questo scopo. Si distinguono e analizzano in particolare quegli strumenti che si basano su approcci tradizionali, fatti propri e perfezionati dalle normative tecniche e i nuovi strumenti che, sfruttando metodi numerici assistiti dall'elaboratore,

consentono di descrivere in modo completo il fenomeno dell'ingranamento. Alcuni software che rientrano nella prima categoria sono accessibili in rete come freeware; uno di questi è stato realizzato dall'Università di Pisa a beneficio dei propri studenti in Ingegneria. Nella terza parte dell'articolo i vari software sono confrontati criticamente applicandoli a un caso particolare, oggetto presentemente di sperimentazione presso l'università di Pisa.

UN LAVORO ARTICOLATO

bilistico o della costruzione delle gru, possono essere eseguiti con collettivi di carico predefiniti o di libera scelta.

IL CODICE RHF - IPAR-IDIS

Questo codice, dovuto a uno dei maggiori esperti italiani in questo campo e ripetutamente perfezionato [16], è composto da due moduli:

- Ipar-Idis per il calcolo geometrico degli ingranaggi ad assi paralleli a dentatura dritta od elicoidale, esterna o interna, e per la presentazione grafica della configurazione progettata;
- RHF per il calcolo a norma della resistenza degli ingranaggi al pitting e alla rottura a base dente (bending). Il modulo Ipar - Idis è dedicato al progetto della geometria e quindi al-

scelta dell'utensile, propone all'utente alcune alternative in rapporto alla qualità dell'ingranaggio, al materiale, ecc., che necessitano comunque di un'adeguata conoscenza dei processi produttivi.

Il software permette di analizzare le conseguenze del taglio con creatore, quale ad esempio la verifica del semitopping3 ottenuto, oppure consente di progettare il creatore. I dati per i disegni esecutivi riportano parametri utili per il controllo geometrico delle dentature, quali la misura tra i rulli o sfere con relative tolleranze ed in generale definisce tutti i dati geometrici della dentatura. Il modulo RHF, invece, è dedicato al calcolo della resistenza a pressione Hertziana e la resistenza a flessione del dente. Il programma, analogo-

colore nella determinazione del fattore di concentrazione delle tensioni a fondo dente [17].

INTERFACCIA TRA I CODICI E UTENTE

Molto importante dal punto di vista dell'utente risulta essere l'interfaccia grafica che i codici appena descritti presentano. Spesso i codici sviluppati in ambito aziendale sono poco evoluti in tal senso. In alcuni casi l'utente deve inserire i dati di ingresso per l'analisi, sotto la forma di una matrice di numeri (es., preparazione di un file di tipo *.dat). Ogni elemento della matrice può rappresentare un dato geometrico e funzionale dell'ingranaggio.

È assolutamente necessario, quindi, specie se non si fa frequente uso del codice, fare riferimento costante al manuale per l'esatta allocazione degli ingressi.

Analoghi problemi si pongono se l'uscita dell'analisi viene fornita mediante un semplice file *.txt.

Invece il codice RHF versione 7, pur rivolgendosi ad utenti relativamente esperti, prevede scambi interattivi tra utente e codice con l'inserimento dati in modo sistematico, proponendo domande e scelte mediante schermate in ambiente MS-DOS. L'uscita avviene tramite la stampa di un rapporto formattato appositamente, previo controllo dei valori calcolati, che sono presentati in video.

Il codice KISSsoft tiene conto delle esigenze anche dell'utente meno specializzato nel campo della modellazione e dello studio degli ingranaggi. L'inserimento dati dell'ingranaggio viene fatto mediante schermate in ambiente Windows e i valori vengono verificati sistematicamente dal codice, fornendo avvisi di errore o scelte opportune per l'ottimizzazione funzionale dell'ingranaggio. Gli output dell'analisi sono sia di tipo grafico che tramite un file di report di tipo *.doc.

Si riportano a titolo di esempio in figura 8 alcune delle schermate fornite dal codice.



8. Interfaccia grafica del codice KISSsoft: è mostrata la schermata di inserimento dati della geometria, a sinistra, e il grafico della temperatura di "Flash" a destra.

la analisi della cinematica del funzionamento degli ingranaggi a evolvente ad assi paralleli, a denti dritti o elicoidali, esterni o interni. Il codice è concepito in modo da tener conto delle condizioni di costruzione delle dentature e della esperienza di realizzazione proprie di ogni azienda. Infatti il programma, nella fase di

mente per quanto visto per il codice KISSsoft, lascia al progettista la scelta tra due diverse metodologie di calcolo: Iso,AGMA o Din. Per quanto riguarda il calcolo delle sollecitazioni nominali, il software segue integralmente le indicazioni dall'una oppure dall'altra normativa, mentre si distacca da queste nella stima delle durate a pitting e a bending e in parti-

BIBLIOGRAFIA

[14] T.F. Conry, A. Seireg, *A Mathematical Programming Method for Design of Elastic Bodies in Contact*, Trans. ASME, J. of Applied Mechanics, June 1971, pp. 387-392

[15] Anon., *KISSsoft mit Hirnware - Short Introduction to Calculation Programs*, KISSsoft AG, Hombrechtikon CH, October 30, 2001 - www.kiss-soft.com

[16] G. Castellani, RHF & IPAR/IDIS - Manuale d'uso, Modena 2002

[17] D.W. Dudley e D.P. Townsend, *Manuale degli Ingranaggi*, Tecniche Nuove, Milano, (C) 1996, versione italiana del Dudley's Gear Handbook, cap. 11, *Calcolo della capacità di carico degli ingranaggi* a cura di G. Castellani

E. Manfredi, F. Presicce, C. Santus, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, Università degli Studi di Pisa.