

# LUBRIFICAZIONE E CONTAMINAZIONE

## *effetti sulla durata dei cuscinetti, parte 2*

La durata dei cuscinetti è influenzata da molti fattori, tra i quali molto importanti sono la lubrificazione e la contaminazione. Una migliore conoscenza dei meccanismi di riduzione di durata causata da questi ultimi consente di perfezionare la progettazione e il funzionamento dei cuscinetti stessi. In questa seconda parte dell'articolo è trattata la contaminazione.

**Nelle macchine l'impiego** di cuscinetti volventi consente di diminuire le perdite per attrito e di aumentare il rendimento globale dei sistemi, a patto però di ridurre in maniera adeguata i rischi dell'affaticamento. Le impronte provocate sulle piste da particelle estranee e dalla contaminazione possono provocare concentrazioni di sollecitazioni e aumentare il rischio di cedimenti per fatica. Tuttavia, sia il film lubrificante che si sviluppa in corrispondenza delle impronte sia le relative sollecitazioni superficiali hanno una loro significativa importanza nel modificare l'effetto dei meccanismi di innesco delle cricche. In questa seconda parte dell'articolo presentiamo una metodologia, che mette in relazione la durata a fatica dei cuscinetti volventi con il film lubrificante microelastoidrodinamico (micro-EHL) e con le relative sollecitazioni localizzate dovute alle impronte da contaminazione. Viene anche valutato il metodo applicato ai coefficienti di carico dinamico dei cuscinetti stessi. Un

confronto tra la durata di questi, ottenuta sperimentalmente, e quella prevedibile utilizzando la presente teoria evidenzia la capacità del modello presentato di descrivere l'effetto globale combinato delle condizioni di lubrificazione e contaminazione.

### 1. IL FATTORE DI CONTAMINAZIONE

Secondo Ioannides et al. [1] e la norma internazionale ISO 281:2007 [2], la durata di base modificata dei cuscinetti volventi (con un'affidabilità del 90%) è data dalla formula seguente:

$$L_{10m} = a_{skf} \left( \frac{C}{P} \right)^p \quad (1)$$

In tale formula  $C$  rappresenta il coefficiente di carico dinamico del cuscinetto,  $P$  è il carico equivalente e  $p$  un esponente (che vale 3 per i cuscinetti a sfere e 10/3 per quelli a rulli).  $a_{skf}$  è il fattore di correzione descritto in

[1] e [2], utilizzando la relazione seguente:

$$a_{skf} = \frac{1}{10} \left\{ 1 - \left( \eta \frac{P_u}{P} \right)^w \right\}^{-c/e} \quad (2)$$

Nella (2)  $P_u$  rappresenta il carico limite di fatica del cuscinetto,  $w$ ,  $c$  ed  $e$  sono costanti ed  $\eta$  è un fattore di penalizzazione del carico compreso nell'intervallo  $0 \leq \eta \leq 1$ . Tale fattore serve a tenere conto dello stato effettivo medio di sollecitazione reale del contatto volvente, in aggiunta alla sollecitazione hertziana ideale. Come spiegato in [3] e nella Parte 1 di questo articolo [4], il fattore di penalizzazione può essere definito come il prodotto di due quantità concomitanti, il fattore di lubrificazione  $\eta_b$  e il fattore di contaminazione  $\eta_c$ ; quindi si ha:  $0 \leq \eta_b \cdot \eta_c \leq 1$ .

Nel caso di piste lisce e ben lubrificate, con un lubrificante privo particelle contaminanti, possiamo teoricamente supporre  $\eta_b = 1$  e  $\eta_c = 1$ , e quindi non assegnare

alcuna penalizzazione alla durata del cuscinetto. Questa condizione sarà contrassegnata con l'annotazione *smooth* (superficie liscia) e con l'indice *s*.

In condizioni simili di funzionamento, ma con la presenza di particelle contaminanti nell'olio, si può supporre  $\eta_b = 1$  e  $\eta_c < 1$ , per tenere conto delle sollecitazioni localizzate aggiuntive originate dalle impronte sulle piste. Questa condizione sarà contrassegnata con l'annotazione *dented* (superficie con impronte) e con l'indice *d*.

Possiamo quindi riscrivere in questo modo il fattore di correzione per le condizioni *smooth* e *dented*:

$$a_{skf, smooth} = \frac{1}{10} \left( 1 - \left( \frac{P_u}{P} \right)^w \right)^{-c/e} \quad (3)$$

with  $\eta_b = 1; \eta_c = 1$

$$a_{skf, dented} = \frac{1}{10} \left( 1 - \left( \eta_c \frac{P_u}{P} \right)^w \right)^{-c/e} \quad (4)$$

with  $\eta_b = 1; \eta_c < 1$

La riduzione della durata a fatica, risultante dalle impronte presenti sulle piste, può esse-

re quantificata confrontando la durata teorica a fatica di un cuscinetto nelle condizioni *smooth* e *dented* mediante il seguente rapporto delle durate:

$$\frac{L_{10, d}}{L_{10, s}} = \frac{a_{skf, dented}}{a_{skf, smooth}} \quad (5)$$

Tale rapporto può essere valutato numericamente considerando le sollecitazioni e usando la formula della durata a fatica di Ioannides-Harris [5] applicata all'effettiva geometria del contatto volvente:

$$\ln \frac{1}{S} \approx A \cdot N^e \int_{V_R} \frac{\langle \tau_i - \tau_u \rangle^c}{z^h} dv \quad (6)$$

Nella (6) *S* rappresenta la probabilità di sopravvivenza del contatto volvente, *N* è il numero dei cicli di sollecitazione a fatica, *A* una costante di scala,  $\tau_i$  il criterio di affaticamento,  $\tau_u$  la sollecitazione limite di fatica al taglio,  $z^h$  la profondità media pesata sulla sollecitazione e  $V_R$  il volume sollecitato a rischio del contatto hertziano. Si noti, tuttavia, che la quantità rilevante della formula (6) che influisce sul rapporto di durata (5) è l'integrale della sollecitazione relativo al volume, dato dalla

$$I = \int_{V_R} \frac{\langle \tau_i - \tau_u \rangle^c}{z^h} dv \quad (7)$$

Con tale notazione, la durata a fatica di un contatto volvente (con *u* pari al numero di passaggi per giro), si può esprimere così:

$$L_{10} = \frac{N}{10^6 u} \approx \frac{1}{u} \cdot \left( \frac{\ln(1/S)}{A \cdot I} \right)^{1/e} \quad (8)$$

In tale formula, si può calcolare l'integrale (*I*) per un contatto con impronte (*dented*) e per uno teoricamente senza (*smooth*). Si può quindi usarlo per una stima dell'effetto prevedibile sulla durata del cuscinetto, come nel caso del rapporto delle durate della formula (5). In altre parole, vale quanto segue:

$$\frac{L_{10, d}}{L_{10, s}} = \frac{a_{skf, dented}}{a_{skf, smooth}} = \left( \frac{I_{smooth}}{I_{dented}} \right)^{1/e} \quad (9)$$

Inserendo le equazioni (3) e (4) nella (9) si può derivare la formula teorica che descrive il fattore di contaminazione  $\eta_c$  in condizioni effettive di sollecitazione di un contatto contaminato da particelle:

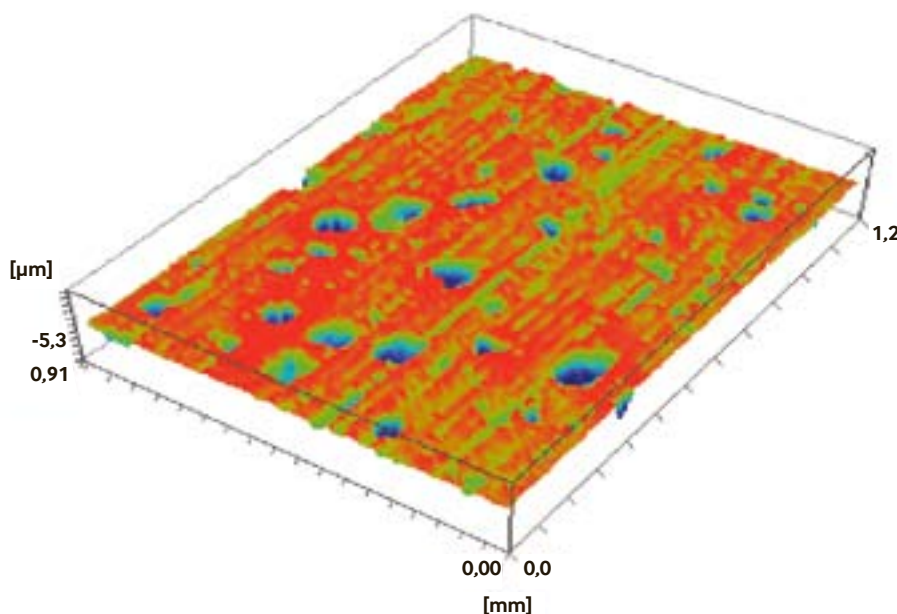


Fig. 1: Esempio di una normale mappa in 3D della pista di un cuscinetto con impronte da contaminazione.

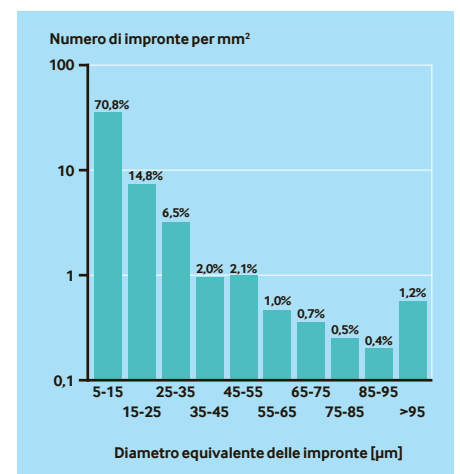
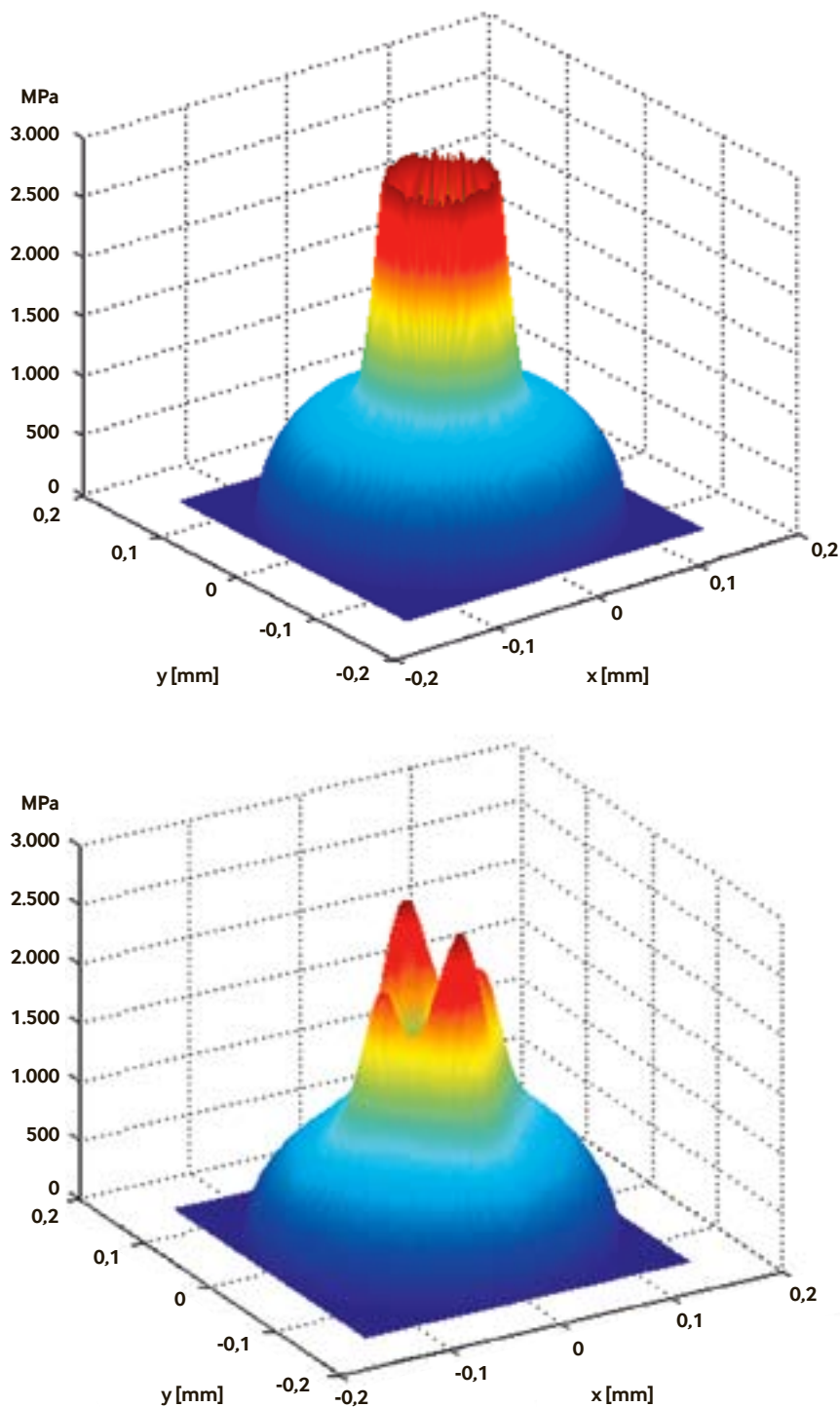


Fig. 2: Esempio di statistica della popolazione delle impronte ottenuta da mappe tridimensionali della pista di un cuscinetto volvente. Questo cuscinetto ha lavorato in condizioni di forte contaminazione paragonabili a quelle del codice di classificazione ISO 4406 nell'intervallo da -/19/16 a -/21/17.

$$\eta_c = \frac{P}{P_u} \left\langle 1 - \left\langle 1 - \left( \frac{P_u}{P} \right)^w \right\rangle \cdot \left( \frac{I_{smooth}}{I_{dented}} \right)^{-1/c} \right\rangle_w \quad (10)$$

Dalla (10), si possono valutare numericamente i valori di  $\eta_c$  partendo dal calcolo dell'integrale della sollecitazione a fatica relativo al volume, stimato in base alle diverse quantità di impronte da contaminazione. Essenzialmente, per rappresentare i cuscinetti esposti a lubrificanti con quantità diverse di particelle contaminanti, si valuta il rapporto delle durate della (9) utilizzando la metodologia micro-EHL descritta nella Parte 1 di questo articolo [4]. Per eseguire tale calcolo è necessario avere una misura della popolazione di impronte che si riscontra sulle normali piste dei cuscinetti esposte a lubrificanti con vari gradi di contaminazione da particelle. Misurazioni statistiche della popolazione di impronte riscontrata sulle piste dei cuscinetti (fig. 2) possono offrire una rappresentazione diretta dell'effetto della pulizia di un dato olio e delle relative condizioni di lavoro.

La valutazione delle condizioni di sollecitazione risultanti da vari tipi di distribuzione delle impronte può essere eseguita in vari modi: a) esplicitamente, usando un metodo diretto, partendo dalla mappatura 3D delle regioni delle piste caratterizzate da impronte (fig. 1) e procedendo come spiegato nella Parte 1 [4], nel caso che si calcoli l'integrale della sollecitazione riferito al fattore di lubrificazione, oppure b) implicitamente, calcolando l'integrale della sollecitazione per le diverse geometrie delle impronte (impronte di riferimento) e le relative condizioni di lubrificazione. Questi dati di base si possono quindi utilizzare per calcolare le effettive superfici con impronte sommando adeguatamente l'effetto dell'integrale della sollecitazione riferito al volume, descrivendo ciascun tipo specifico di popolazione di impronte riscontrata sulla data zona del cuscinetto. L'applicazione di tale metodo richiede il conteggio e la classificazione della popolazione di impronte sui campioni di superfici in 3D della pista. Un particolare tipo di metodo implicito è



**Fig. 3: Esempio di calcolo della pressione di contatto in una tipica impronta (diametro 150 e profondità 5 micron) nelle condizioni a secco e lubrificate. In alto: sollecitazione di contatto in assenza di film lubrificante (a secco). In basso: la stessa impronta, nella quale è evidente l'attenuazione della sollecitazione di contatto indotta da un film d'olio di 0,3 micron, presente nel contatto volvente. In entrambi i casi la pressione hertziana nominale è  $P_0 = 1,255 \text{ GPa}$ .**

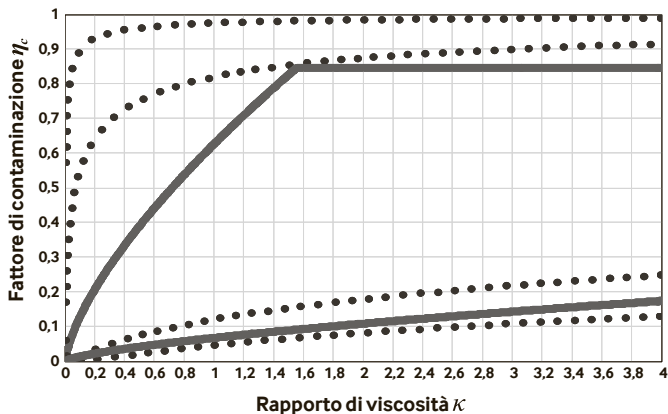


Fig. 4a: Confronto tra il fattore di contaminazione derivato numericamente (intervallo dei valori calcolato, indicato da una linea punteggiata) e il fattore di contaminazione ottenuto dalla formula (11) (linea continua). Cuscinetto con diametro medio  $d_m=50$  mm; lubrificazione con olio molto pulito (codice ISO 4406 -/13/10; curve superiori) e con condizioni di forte contaminazione (codice ISO 4406 -/19/16; curve inferiori).

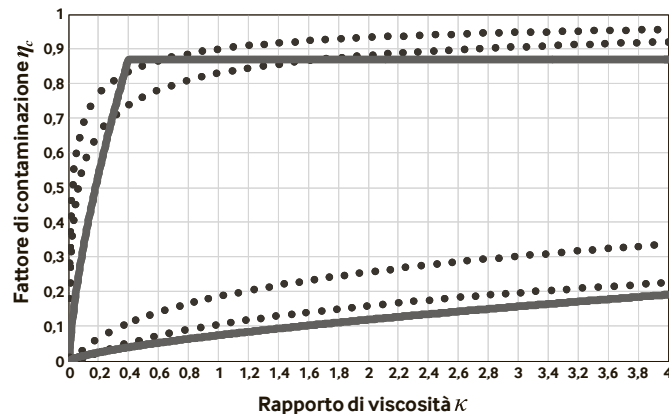


Fig. 4b: Confronto tra il fattore di contaminazione derivato numericamente (intervallo dei valori calcolato, indicato da una linea punteggiata) e il fattore di contaminazione ottenuto dalla formula (11) (linea continua). Cuscinetto con diametro medio  $d_m=25$  mm e livello di pulizia dell'olio ISO 4406 -/15/12 (curve superiori) e con diametro medio  $d_m=25$  mm e livello di pulizia dell'olio ISO 4406 -/17/14 (curve inferiori).

stato applicato utilizzando un sistema di conteggio e classificazione delle impronte elaborato in laboratorio. Ciò è necessario per caratterizzare le varie modalità con cui si presentano le impronte nelle applicazioni dei cuscinetti, le cui popolazioni si possono qualificare in relazione alle condizioni di lavoro dei cuscinetti stessi (fig. 2).

È noto che i cuscinetti che operano in condizioni simili possono presentare significative variazioni per quanto riguarda il modo in cui si presentano le impronte e la relativa popolazione. Questo fatto può essere dovuto a una differenza di portata locale dell'olio o alla configurazione geometrica dei cuscinetti stessi. Tuttavia in

generale ci si accorge se un cuscinetto ha lavorato in presenza di una forte contaminazione oppure in un ambiente molto pulito. Si possono anche rilevare casi intermedi e caratterizzarne il grado di pulizia con una semplice valutazione delle dimensioni delle particelle. Il metodo è pertanto idoneo per classificare la popolazione delle impronte rilevata sulla pista di un cuscinetto (fig. 2), abbinandola ad una corrispondente classificazione del lubrificante, espressa in un dato intervallo.

Per l'impiego della metodologia di cui sopra è stato eseguito l'integrale della sollecitazione riferito al volume di uno specifico gruppo di geometrie di impronte di rife-

rimento. Questo calcolo è stato esteso per includere l'effetto dello spessore del film d'olio (le condizioni di lubrificazione) sugli elementi risultanti che fanno aumentare la sollecitazione in corrispondenza dell'impronta.

Questa è una importante proprietà del presente modello, in quanto consente di tenere conto in modo esplicito degli effetti del film d'olio nella valutazione del fattore di contaminazione. Come mostrato nell'esempio di calcolo della fig. 3, l'effetto di riduzione della sollecitazione indotto dal film lubrificante può essere notevole e deve essere incluso nell'analisi. In tal modo l'effetto relativo al film lubrificante può essere

Tipi di cuscinetti	Appellativo	Carico – C/P	Lubrificazione – K
Radiali a sfere	6305, 6205, 6206, 6207, 6309, 6220	1 2,8 2,4 2,1 3,1 3,5 4 6	4 3,4 2,1 2 1
A rulli cilindrici	NU 207 E, NU 309 E	2,5 2,77 2,82	4 1 0,8
Orientabili a rulli	22220 E, 22220 CC	2,2 2,3 2,5 2,3 2,7 3 4,7	4 3,6 1,8 0,37 0,28
A rulli conici	331274, K-LM11749/10, K-HM89449/10, K-580/572	1 1,1 1,3 2,5 3,5	4 2,9 0,9

Tabella 1. Sintesi delle condizioni di lavoro previste nelle prove di durata dei cuscinetti

svincolato da quello della rugosità superficiale globale, permettendo così di porre  $\eta_b = 1$  nella valutazione del fattore di contaminazione della (10).

Come mostrato in fig. 3, l'entità e la distribuzione dell'incremento di sollecitazione in corrispondenza dell'impronta per una data geometria dell'impronta stessa sono fortemente influenzate dal film lubrificante presente nel contatto volvente. Un film lubrificante più spesso comporterà una riduzione (uno smorzamento) e una redistribuzione della sollecitazione di contatto originatasi nell'impronta, mentre un film di spessore trascurabile renderà più marcata la sollecitazione e ne porterà al massimo la concentrazione.

Per tenere conto di questo effetto, nella valutazione parametrica della distribuzione della pressione di contatto nell'impronta, è stato inserito lo smorzamento della sollecitazione relativo allo spessore del film, in accordo con i risultati calcolati numericamente [6], [7], [8] e [9]. Con tale approccio, l'attenuazione della sollecitazione è riferita al rapporto di viscosità  $\kappa$  del cuscinetto, nell'ipotesi che il film lubrificante medio nel contatto volvente sia proporzionale a tale parametro. Si noti che anche la variazione delle dimensioni del cuscinetto influenzerà il rapporto delle durate della (9) e il corrispondente valore di  $\eta_c$  della (10). I cuscinetti di grandi dimensioni presentano un corrispondente grande integrale della sollecitazione (*smooth*), il che ha un effetto predominante sull'integrale della sollecitazione riferito alle impronte da contaminazione (*dented*). Inoltre, la massima concentrazione di sollecitazione riferita alle impronte ha un limite superiore naturale dovuto alla massima dimensione delle particelle che possono essere trasportate nel flusso di lubrificante e quindi non dipenderà dalle dimensioni del cuscinetto, ma sarà solo influenzata dal grado di pulizia del lubrificante stesso. Quindi, rispetto ai cuscinetti di piccolo diametro, quelli di grande diametro hanno un vantaggio in termini di sensibilità agli effetti della contaminazione.

## 2. IL FATTORE DI CONTAMINAZIONE NELLA PRATICA

Come discusso in precedenza, la soluzione numerica della (10) fornisce una base teorica per la stima del fattore di contaminazione  $\eta_c$ , consentendone la valutazione parametrica per vari gradi di contaminazione da particelle e per varie condizioni di lubrificazione di cuscinetti di varie dimensioni.

I risultati di tale analisi possono essere confrontati con il modello tecnico di  $\eta_c$ , ottenuto dai diagrammi e dalle tabelle riportate in [1] e [2]. In [2] il fattore di contaminazione  $\eta_c$  viene dato in funzione del rapporto di viscosità  $\kappa$  per i diversi valori del diametro medio  $d_m$  del cuscinetto e vengono presentati dei grafici in funzione del punto in cui si posiziona il lubrificante nella classifica della pulizia. Essenzialmente il modello tecnico di  $\eta_c$  può essere descritto usando la seguente formula di base [2]:

$$\eta_c(\kappa, d)_{\beta_{cc}} = \min \left( c_1(\beta_{cc}) \kappa^{0.68} d_m^{0.55}, 1 \right) \cdot \left[ 1 - \left( c_2(\beta_{cc}) d_m^{-1/3} \right) \right] \quad (11)$$

in cui  $c_1$  e  $c_2$  sono costanti assegnate in funzione del grado di pulizia dell'olio, basato sulla scala ISO 4406 (o su una corrispondente scala di pulizia basata sulla qualità del sistema filtrante, ved. ISO 16899) [2]. Diversamente dal modello di  $\eta_b$ ,  $\eta_c$  dipende da tre parametri e quindi diventa complicato il confronto tra i suoi valori stimati numericamente, derivati dalla (10) e quelli ottenuti dalla (11). Per semplificare il confronto consideriamo due casi riferiti a sistemi di circolazione d'olio con sistema filtrante. I risultati del confronto sono mostrati nelle figg. 4a e 4b.

- Caso 1), riferito a un sistema a circolazione d'olio con filtrazione, in cui il diametro del cuscinetto è mantenuto costante e vengono valutati due valori estremi della classificazione del grado di pulizia dell'olio, (fig. 4a).
- Caso 2), riferito a un sistema a circola-

zione d'olio con filtrazione, con un livello intermedio di contaminazione, in cui viene valutato l'effetto della variazione del diametro del cuscinetto tra due valori estremi, (fig. 4b).

Per quanto riguarda la dipendenza funzionale di  $\eta_c$  dal parametro della qualità della lubrificazione  $\kappa$ , si può notare quanto segue: 1) per valori elevati di  $\kappa$  il modello tecnico, indicato con una linea continua nelle figg. 4a e 4b, presenta una buona correlazione con il valore teorico di  $\eta_c$  (intervallo indicato da una linea punteggiata), mentre, 2) per valori per valori bassi di  $\kappa$  il modello tecnico (11) è in alcuni casi più prudentiale.

In relazione a ciò va notato come in verità sia nella regione dei bassi  $\kappa$  che il modello teorico ha una maggiore incertezza, dato che si basa su uno spessore di film semplicemente nominale, mentre il meccanismo di cedimento è soprattutto un evento locale. Sembra pertanto giustificato l'approccio prudentiale adottato dal modello tecnico (11) il quale, in conclusione, è da considerarsi ragionevolmente accettabile per valutare il fattore di contaminazione da utilizzare nelle durate di base dei cuscinetti.

## 3. RISULTATI SPERIMENTALI

Le prove sperimentali di durata su cuscinetti sottoposti a date condizioni di contaminazione non sono un esercizio di semplice esecuzione [10]. Ci sono molte difficoltà nel simulare in un ambiente sperimentale il tipo e la distribuzione delle impronte da particelle contaminanti, prevedibile in una normale applicazione industriale, come ad esempio in un riduttore con un grado di pulizia dell'olio dato secondo la ISO 4406. Per esempio, il serbatoio dell'olio usato nelle prove sperimentali può essere molto più voluminoso che in una normale applicazione industriale. Inoltre il modo in cui l'olio viene fatto fluire attraverso il cuscinetto può essere molto diverso da quello che si ha in generale nella pratica. Quindi nell'impostare le condizioni di prova, bisogna prendere come riferimento della contaminazione l'effettivo numero totale di particelle che rag-

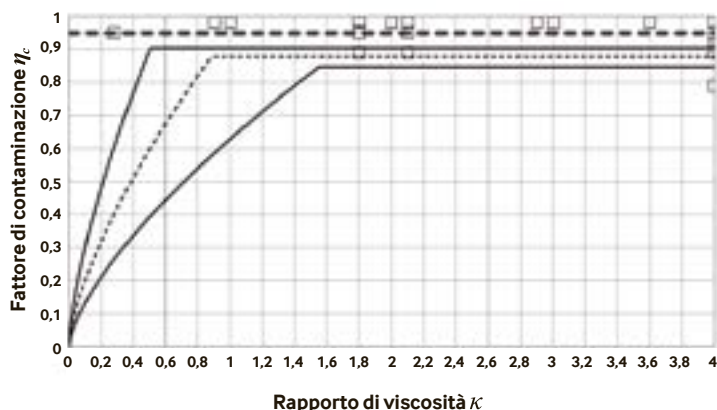


Fig. 5a: Confronto tra il fattore di contaminazione  $\eta_c$ , ottenuto da prove di durata dei cuscinetti (quadrati) e le corrispondenti curve  $\eta_c$  (linee continue) ottenute dalla (11), con cuscinetti aventi diametro medio  $d_m=50-200$  mm (curva inferiore e superiore). Prova di durata eseguita in condizioni di pulizia (riferibile a codici ISO 4406 -/13/10; -/14/11). La linea tratteggiata più marcata è la linea di tendenza (curva calcolata usando i valori intermedi dei punti dei dati sperimentali).

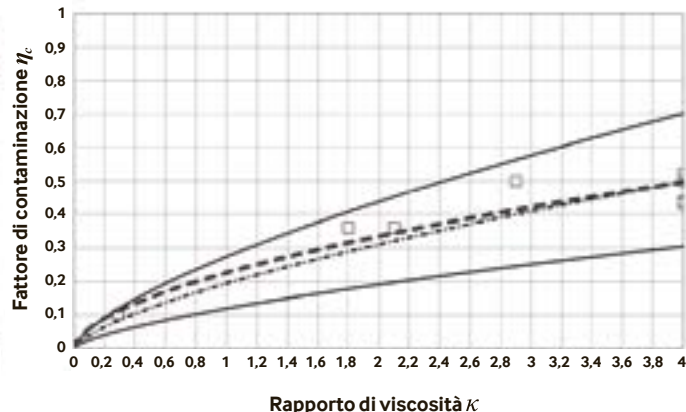


Fig. 5b: Confronto tra il fattore di contaminazione  $\eta_c$ , ottenuto da prove di durata dei cuscinetti (quadrati) e le corrispondenti curve  $\eta_c$  (linee continue) ottenute dalla (11), con cuscinetti aventi diametro medio  $d_m=30-100$  mm (curva inferiore e superiore). Prova di durata di cuscinetti con tenute filtranti (condizioni di leggera contaminazione: ISO 4406 -15/12; -/16/13). La linea tratteggiata più marcata è la linea di tendenza (curva calcolata usando i valori intermedi dei punti dei dati sperimentali e imponendo il passaggio per il punto d'origine). La linea a tratto e punto è il corrispondente modello tecnico con  $d_m=60$  mm.

giungeranno il cuscinetto in prova e saranno sottoposte a laminazione da rotolamento, questo per evitare un eccessivo danneggiamento da impronte, che darebbe un'idea errata delle condizioni tipiche delle applicazioni di cuscinetti volventi. Inoltre, il livello di contaminazione finale sarà il risultato del bilancio tra la sostanza contaminante originariamente presente nel sistema e le particelle che vengono generate e rimosse nell'olio circolante. Nel passato, tali difficoltà e altre ancora hanno ostacolato l'adozione di metodi puramente sperimentali nell'elaborazione di un fattore di contaminazione per la stima della durata dei cuscinetti volventi.

Ciononostante, nel passato sono state eseguite prove di durata con varie condizioni di lubrificazione e contaminazione, che hanno reso disponibile un notevole numero di risultati sperimentali [10]. È quindi ammissibile mettere a confronto la risposta del modello del fattore di contaminazione (11) con tali prove di durata. I risultati qui riportati si riferiscono a 172 campioni di popolazione di cuscinetti testati nel corso di alcuni anni. Considerando che ciascun campione è normalmente costituito da un gruppo di 30 cuscinetti, a questa serie di risultati sperimentali corrispondono molte migliaia di cuscinetti sottoposti a prove di durata. Nella tabella 1 è riportata una sintesi di alcu-

ne rilevanti informazioni riguardanti i tipi di cuscinetti e le condizioni di prova. Come si vede, si tratta di cuscinetti medio-piccoli, lubrificati con olio turbo avente tre gradi di viscosità ISO: VG 9, VG 32 e VG 68. Le prove sono state eseguite a varie velocità di rotazione, da 1.000 a 6.000 giri/min, facendo in modo da mantenere la temperatura dell'anello esterno entro limiti prefissati.

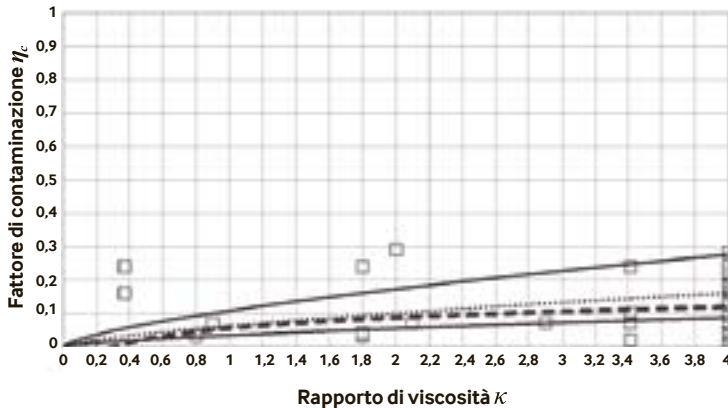
La valutazione del fattore di contaminazione si basa sul confronto diretto del fattore derivato dalla durata mediana  $L_{10}$  nelle prove di durata, utilizzando una procedura di calcolo all'inverso. I fattori di contaminazione derivati sperimentalmente sono poi stati confrontati con il modello tecnico di  $\eta_c$  secondo la (11). Il confronto è riportato nelle figg. 5a, 5b e 5c.

Essenzialmente, le condizioni di pulizia previste nelle prove di durata si possono suddividere in tre classi:

- con normale pulizia, fig. 5a. Le prove sono eseguite con una buona filtrazione dell'olio, assicurata da un sistema di filtraggio a passaggi multipli, ad alta efficienza, con  $\beta_{x(c)}=3$  (o migliore). Con tale filtrazione sono prevedibili codici ISO 4406 da -/13/10 a -/14/11. Tenendo conto che i cuscinetti sottoposti alle prove di durata sono di dimensioni medie, la previsione

per i valori del coefficiente di contaminazione  $\eta_c$  è tra 0,8 e 1, con un film lubrificante completamente formato.

- con tenute filtranti, fig. 5b. L'olio viene preventivamente contaminato con una quantità fissa di particelle metalliche dure (750 HV), normalmente aventi dimensioni da 25 a 50 micron. L'olio viene lasciato fluire attorno a un cuscinetto munito di guarnizioni di tenuta in gomma, le quali esercitano un'azione filtrante, tanto che solo una quantità limitata di particelle di piccole dimensioni riesce a penetrare nel cuscinetto stesso, contaminandolo. Questo tipo di prove viene classificato "con leggera contaminazione" (codici ISO 4406 per bagno d'olio da -/15/12 a -/16/13). In queste condizioni di prova è prevedibile un fattore  $\eta_c$  fra 0,3 e 0,5.
- con pre-contaminazione, fig. 5c. La prova inizia con un rodaggio di 30 minuti e con un sistema di circolazione d'olio che viene contaminato con una data quantità di particelle metalliche dure (~750 HV) (dimensioni da 25 a 50 micron). Dopo tale periodo di rodaggio il cuscinetto viene testato in condizioni di normale pulizia. Questa procedura si è dimostrata molto efficace nel produrre sulle piste una struttura ben definita e quindi ripetibile delle impronte. Questo tipo di prova viene clas-



**Fig. 5c: Confronto tra il fattore di contaminazione  $\eta_c$  ottenuto da prove di durata dei cuscinetti (quadrati) e le corrispondenti curve  $\eta_c$  (linee continue) ottenute dalla (11), con cuscinetti aventi diametro medio  $d_m=25-100$  mm (curva inferiore e superiore). Risultati delle prove di durata di cuscinetti rodati con contaminazione preventiva (contaminazione da normale a severa riferibile alla ISO 4406, codici da -/17/14 a -/19/15). La linea tratteggiata più marcata è la linea di tendenza (curva calcolata usando i valori intermedi dei punti dei dati sperimentali e imponendo il passaggio per il punto d'origine). La linea punteggiata leggera (appena sopra la linea di tendenza) è la corrispondente curva ottenuta dalla (11).**

sificato come “condizione di contaminazione da normale a severa” (codici ISO 4406 per bagno d’olio da -/17/14 a -/19/15). In questo caso il valore prevedibile di  $\eta_c$  può andare da 0,01 a 0,3.

Nelle fig. 5a, 5b e 5c si può notare come i punti dei dati sperimentali siano in numero limitato e pertanto non riescano a evidenziare un chiaro andamento che consenta di fare un confronto con il modello tecnico  $\eta_c$  della (11). Cionondimeno si può apprezzare una buona coincidenza tra i valori medi dei punti riferiti ai tre livelli di classificazione della pulizia, usati nelle prove di durata, e il fattore di contaminazione  $\eta_c$  ottenuto usando il semplice modello tecnico della (11). Infatti, la linea di tendenza ricavata dai punti dei dati sperimentali appare ben allineata con la corrispondente curva di  $\eta_c$  in tutti i tre casi esaminati. È anche chiaro che una valutazione dettagliata della risposta del modello basata solo su dati sperimentali sia difficile, a causa della dispersione inevitabile dei risultati delle prove di durata a fatica. Per lo sviluppo del modello tecnico semplificato di  $\eta_c$  nella (11) è quindi essenziale il supporto teorico ottenibile risolvendo la (10).

#### 4. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Abbiamo presentato la metodologia di base

per la derivazione del fattore di lubrificazione  $\eta_b$  e del fattore di contaminazione  $\eta_c$  usati per la stima della durata dei cuscinetti, dimostrando che per la valutazione di entrambi si può applicare una semplice teoria micro-EHL. La teoria si basa sull’applicazione di pressioni micro-EHL e sulla valutazione parametrica dell’integrale di Ioannides-Harris della sollecitazione riferita al volume nel caso di condizioni con e senza impronte da contaminazione delle superfici reali dei cuscinetti. La stima dell’integrale della sollecitazione a fatica riferito al volume si basa su uno schema di calcolo numerico [6], [7] con FFT delle sollecitazioni superficiali e sotto-superficiali del contatto volvente.

Il metodo è particolarmente idoneo a trattare i campi di sollecitazione di varia tipologia che si generano durante i passaggi dei corpi volventi sulle impronte superficiali dei cuscinetti. Una proprietà importante del calcolo delle sollecitazioni da contatto volvente è l’inclusione degli effetti del film lubrificante nella risposta elastica delle asperità superficiali durante il passaggio dei corpi volventi. Ciò porta a una previsione più realistica del campo delle sollecitazioni sotto-superficiali nel caso di variazione delle condizioni di lubrificazione nel contatto volvente. Usando lo schema di calcolo sopra

descritto viene eseguita una valutazione delle formule usate dalle norme per la stima dei fattori di lubrificazione e di contaminazione. Si possono allora trarre le seguenti conclusioni:

1. Come dimostrato dalle equazioni (4) e (10), l’effetto prevedibile della contaminazione sulla durata dei cuscinetti è dipendente dal carico. Questo diverge dai modelli disponibili nella letteratura corrente, ma è ben allineato con l’esperienza. I confronti tra il presente modello e gli esperimenti di cui alle figg. 5a, 5b e 5c convalida tale effetto.

2. La teoria di base del fattore di lubrificazione  $\eta_b$  e del fattore di contaminazione  $\eta_c$  dimostra chiaramente che la qualità del film d’olio e le condizioni di pulizia del lubrificante sono importanti per il buon funzionamento dei cuscinetti volventi. Per una previsione realistica della durata di questi è essenziale un’appropriata caratterizzazione di tali fattori. ■

Antonio Gabelli, Guillermo Morales-Espejel e Stathis Ioannides, SKF Engineering Research Centre, Nieuwegein, Olanda.

#### Bibliografia

- [1] Ioannides, E., Bergling, G., Gabelli, A., *An Analytical Formulation for the Life Rating of Rolling Bearings*, Acta Polytechnica Scandinavica, Mech. Eng. Series, 137, 1999.
- [2] International Standard: *Rolling Bearings – Dynamic load rating and rating life*, ISO 281: 2007.
- [3] Gabelli, A., Morales-Espejel, G.E., Ioannides, E., *Particle Damage in Hertzian Contacts and Life Ratings of Rolling Bearings*, Tribol. Trans., vol. 51, pagg. 428–445, 2008.
- [4] Morales-Espejel G.E., A. Gabelli, Ioannides E., *Lubrificazione e contaminazione, effetti sulla durata dei cuscinetti, parte 1 – SKF Evolution #2-2010*.
- [5] Ioannides, E., and Harris, T.A., *A New Fatigue Life Model for Rolling Bearings*, Trans. ASME, J. of Trib., 107, pagg. 367-378, 1985.
- [6] Morales-Espejel, G.E., Lugt, P.M., Van Kuilenburg, J., Tripp, J.H., *Effects of Surface Micro-Geometry on the Pressures and Internal Stresses of Pure Rolling EHL Contacts*, STLE Tribology Transaction Vol. 46, pagg. 260-272, 2003.
- [7] Tripp, J.H., Van Kuilenburg J., Morales-Espejel G.E., Lugt, P.M., *Frequency Response Functions and Rough Surface Stress Analysis*, STLE Tribology Transaction Vol. 46, pagg. 376-382, 2003.
- [8] Venner, C.H., and Lubrecht, A.A., *Multi-Level Methods in Lubrication*, Elsevier Science, 2000.
- [9] Greenwood, J.A., and Morales-Espejel, G.E., *The Behaviour of Transverse Roughness in EHL Contacts*, Proc. Instn. Mech. Engrs., part J, J. of Eng. Tribol., 208, pagg. 121-132, 1994.
- [10] Gabelli A., Kerrigan A.M., de Blic E., *HN treated rolling bearings for extended service life in: Progress in Heat Treatment and Surface Engineering, Proceedings of the fifth ASM Heat Treatment Conference, Mittemeijer, E.J. and Grosch, J., Ed., June 2000, Gothenburg, Sweden.*