



## **L'INSTABILITA' DEI CUSCINETTI A FILM D'OLIO**

I cuscinetti a film d'olio (lisci o a strisciamento) agiscono come elementi attivi sul comportamento dinamico delle linee d'asse, in particolare sulle velocità critiche e sulla loro stabilità

I cuscinetti a film d'olio possono essere suddivisi in due grandi categorie in relazione alle loro caratteristiche idrodinamiche e funzionali:

**Idrodinamici** per i quali la portanza dell'albero è assicurata solamente se le superfici sono in movimento e il film d'olio è convergente;

**Idrostatici** per i quali il film d'olio è pressurizzato da apposite pompe (pressione o portata costanti) ed a macchina ferma non c'è contatto tra le superfici.

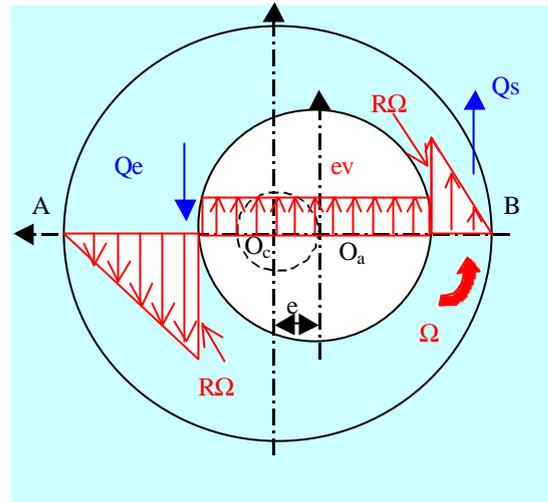
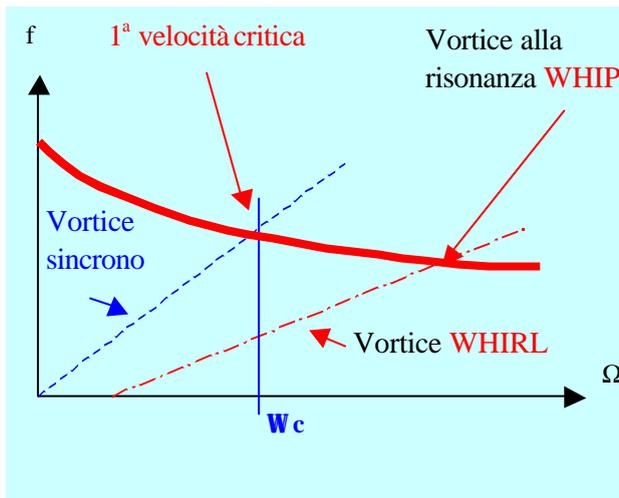
Una analisi rigorosa del sistema rotore-cuscinetto richiede la risoluzione simultanea delle equazioni relative al movimento del rotore e delle equazioni relative al comportamento idrodinamico di ciascun cuscinetto della linea d'asse.

I cuscinetti a film d'olio possono essere sede di instabilità - moti vorticosi del flusso circonferenziale - chiamati vortici:

- Il **vortice sincrono (whirl sincrono)**. Si produce ad un valore qualsiasi di velocità di rotazione ed ha una frequenza uguale a quella di rotazione dell'albero. Esso è presente in tutte le macchine rotanti. In questo caso il cuscinetto agisce favorevolmente poiché, grazie alla sua azione smorzante esercitata sul sistema, riduce l'ampiezza delle oscillazioni durante il passaggio sulle velocità critiche dell'albero.
- Il **vortice non sincrono (whirl)**. Il cuscinetto gioca un ruolo nefasto poiché è esso stesso a generare il vortice. Il vortice persiste fino a che la sua frequenza resta inferiore alla prima  
*Nota: Nel caso di un rotore verticale (o orizzontale ma poco caricato) guidato da cuscinetti cilindrici, questi sono sempre generatori d'instabilità e la frequenza del vortice è vicina alla metà della frequenza di rotazione.*
- Il **vortice alla risonanza (whip)**. Si produce sotto forma d'impulsi, o frustate, di ampiezza assai elevata quando la frequenza del vortice raggiunge la prima frequenza critica flessionale del rotore. Questa categoria di vortici è la più pericolosa poiché può portare alla distruzione del cuscinetto.

Assumendo alcune ipotesi semplificative, è possibile dimostrare che la frequenza del vortice non sincrono (whirl) è uguale a  $\Omega/2$  (dove  $\Omega$  = frequenza di rotazione).

Consideriamo dunque un cuscinetto infinitamente lungo, non caricato e con uno **strato fluido laminare**, supponiamo che per una ragione qualsiasi (brusca variazione del carico o qualche fenomeno transitorio), il centro dell'albero  $O_a$  si sposti di una quantità  $e$  dalla sua posizione d'equilibrio  $O_c$  e che la conseguente variazione di pressione non modifichi in misura apprezzabile il campo delle velocità del film d'olio.



La legge di conservazione della portata attraverso la sezione **AB** impone che l'albero abbia una velocità  $ev$  ortogonale alla linea **AB** tale che:

$$2R \cdot ev = \frac{R\dot{U}}{2} (C + e) - \frac{R\dot{U}}{2} (C - e) \quad \text{sia } v = \frac{\dot{U}}{2}$$

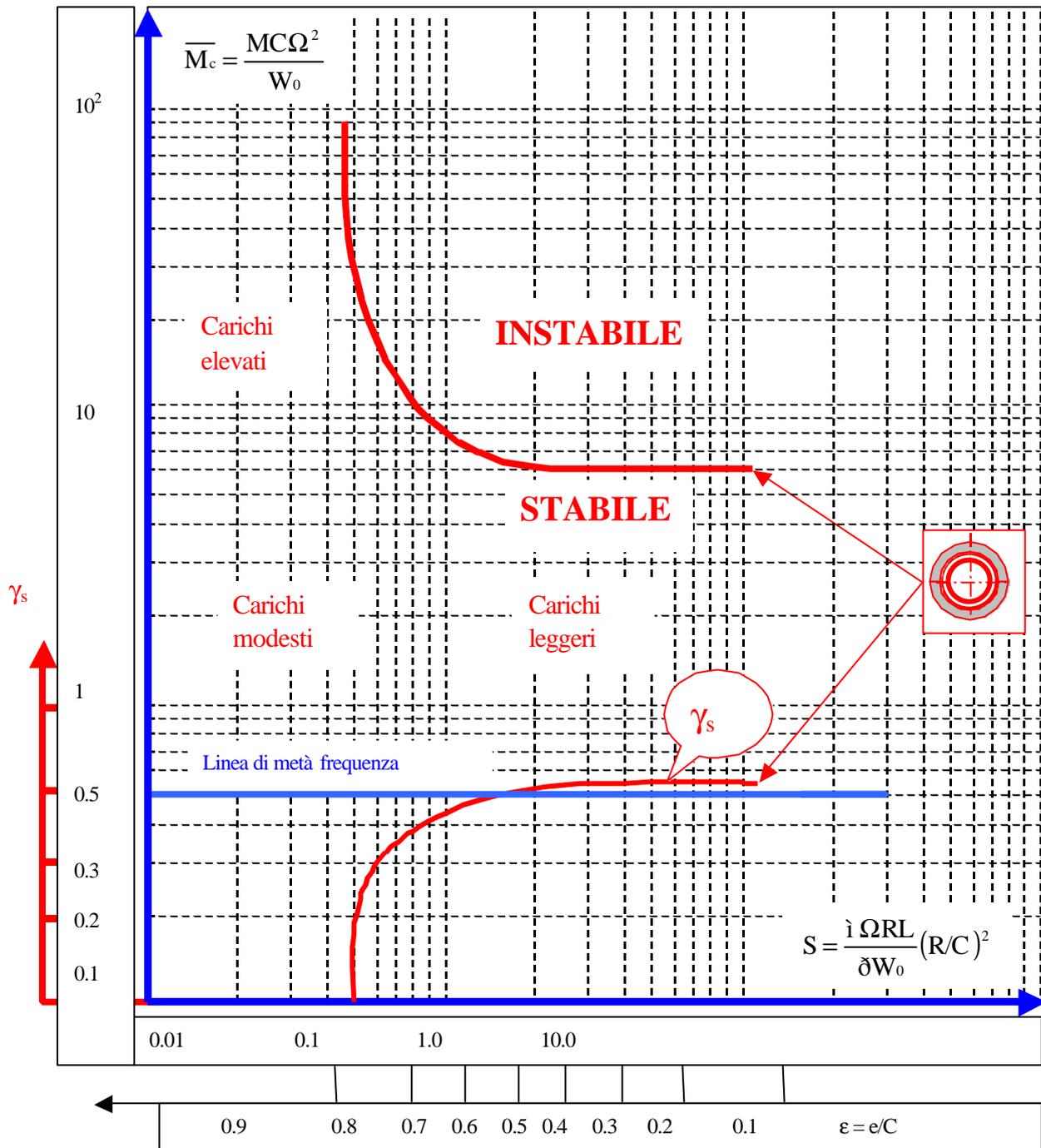
dove :

- $\mu$  = viscosità dinamica dell'olio riferita ad una data temperatura media
- $W$  = velocità di rotazione
- $R$  = raggio del rotore
- $L$  = lunghezza del cuscinetto
- $W_0$  = carico ( $M \cdot g$ , nell'ipotesi che il carico sia dovuto unicamente al peso del rotore)
- $C$  = gioco al raggio
- $e$  = eccentricità del centro del rotore
- $e$  = eccentricità relativa =  $e/C$
- $g_s$  = frequenza del vortice adimensionale ( $\gamma/\Omega$ ).

In assenza del carico esterno, il centro dell'albero descrive sempre un'orbita circolare (precessione) con velocità uguale alla velocità media dell'olio nel cuscinetto, ovvero circa  $\Omega/2$ .

Nel caso reale (carico esterno) il cuscinetto può essere, o non, sede di instabilità e la frequenza del vortice variabile può essere leggermente superiore  $\Omega/2$ .

Il diagramma seguente rappresenta la carta di stabilità e l'andamento della frequenza del vortice per un cuscinetto cilindrico.



$S$  numero di Sommerfeld,  $M_c$  massa critica (adimensionale)

Il numero di **SOMMERFELD** è funzione delle condizioni operative della macchina (carico, velocità di rotazione) e delle proprietà fisiche del lubrificante (viscosità dinamica, temperatura). La carta di stabilità (disponibile per diverse tipologie di cuscinetti) permette di ricavare il numero di Sommerfeld partendo da una misura d'eccentricità (*diagramma polare X-Y delle posizioni medie dell'albero*).

Nota questo numero si potrà dedurre il valore della massa critica  $M_c$  e, nell'ipotesi che il carico sia dovuto unicamente al peso del rotore, si potrà determinare il valore della *velocità di rotazione limite* oltre il quale si avrà instabilità del film d'olio.

Quando un cuscinetto di una macchina rotante ad alta velocità è **poco caricato** ed il perno all'interno di esso si dispone con una **eccentricità piccola**, può verificarsi un fenomeno di instabilità (**oil whirl**). Esso consiste in un moto orbitale di ampiezza elevata e velocità pari a poco meno di metà della velocità di rotazione (corrispondente alla velocità media del moto rotatorio del "cuneo" d'olio all'interno del cuscinetto) che andrà a sovrapporsi al moto orbitale esistente.

Il fenomeno può assumere proporzioni ancora più gravi (**oil whip**) nel caso in cui, come detto in precedenza, la frequenza di oscillazione (dipendente dalla velocità di rotazione) sia prossima ad una delle pulsazioni proprie del rotore ossia quando, a regime o in transitorio, la velocità di rotazione è vicina (di poco superiore) al doppio di una velocità critica flessionale. In tal caso, la vibrazione si sintonizza sulla frequenza critica del rotore (si noti che ciascun tronco d'albero costituente la linea d'asse del rotore, possiede le sue peculiari frequenze critiche che vengono eccitate durante il transitorio di velocità), con la deformata dinamica che le è propria e un'ampiezza molto elevata; l'instabilità, una volta innescata, si "autosostiene" e non dipende più dalla velocità di rotazione e persiste anche a velocità superiori.

Nella carta di stabilità della pagina precedente si osserva che per andare verso una **maggiore stabilità** del cuscinetto occorre **diminuire il numero di Sommerfeld S** ovvero, più semplicemente, occorre **aumentare l'eccentricità relativa  $e = e/C$** .

Ciò si ottiene adottando una delle seguenti misure:

- diminuzione della viscosità  $\mu$  dell'olio (incremento della sua temperatura);
- aumento della pressione dell'olio del cuscinetto, ovvero aumento del rapporto fra il carico gravante su di esso e la sua superficie  $W_0$ ; ciò può essere ottenuto in diversi modi:
  - riduzione della superficie portante mediante esecuzione di scanalature o mediante una riduzione della sua lunghezza assiale,
  - ritocco dell'allineamento verticale fra i cuscinetti con un innalzamento del cuscinetto interessato, o un abbassamento di quello ad esso contiguo, in modo da aumentare il peso gravante su di esso (spesso è proprio un difetto d'allineamento in direzione verticale -catenaria non ottimale della linea d'asse- ad innescare l'instabilità a causa di uno o più cuscinetti poco caricati);
- aumento del gioco radiale  $C$  del cuscinetto.

Le tecnologie costruttive delle moderne macchine rotanti - velocità di rotazione elevate e linee d'asse complesse (es. turboalternatori) – nell'intento di ridurre le instabilità anzidette, ricorrono in modo sempre più esteso all'utilizzo di cuscinetti con geometria non circolare dove tale flusso viene disturbato e rallentato (come avviene nei cuscinetti a lobi); in casi particolarmente critici, l'utilizzo di cuscinetti a pattini oscillanti risolve completamente il problema.

## I CUSCINETTI A LOBI

I cuscinetti a lobi presentano minori rischi d'instabilità rispetto ai cuscinetti cilindrici. I fattori stabilizzanti sono: la **discontinuità e la precarica geometrica**; essi agiscono come una successione di spazi convergenti/divergenti distribuiti attorno all'albero tali da creare, ciascuno, dei segmenti di film d'olio pressurizzati che oppongono una certa resistenza agli spostamenti accidentali dell'albero (causa d'innescò d'instabilità).

*La **precarica geometrica** è la distanza tra il centro del cuscinetto e il centro di curvatura del lobo considerato (se il carico è nullo, il cuscinetto diventa un cuscinetto cilindrico con  $n$  scanalature assiali).*

### Caratteristiche statiche :

Le posizioni d'equilibrio dell'albero nel cuscinetto, per un dato carico, dipendono dalle caratteristiche tecniche del cuscinetto stesso. Ecco qualche elemento utile alla comprensione dei movimenti dell'albero nei cuscinetti durante la variazione d'eccentricità (variazione del carico):

- la posizione d'equilibrio dell'albero (retta congiungente il centro del cuscinetto  $O_c$  con il centro dell'albero  $O_a$ ) per un cuscinetto a 2 lobi asimmetrici è praticamente allineata alla direzione del carico: infatti l'angolo di calettamento (angolo fra la posizione d'equilibrio e la direzione verticale) è assai modesto,
- nei cuscinetti a 3 o 4 lobi simmetrici i valori delle posizioni d'equilibrio sono assai vicini fra loro e quindi le loro caratteristiche sono similari,
- in generale, l'angolo di calettamento di un cuscinetto a lobi asimmetrici è più piccolo di quello di un cuscinetto a lobi simmetrici (ovviamente a parità di numero di lobi).

### Caratteristiche dinamiche :

I **cuscinetti a 2 lobi (simmetrici o asimmetrici)** presentano forti anisotropie in termini di rigidità e di smorzamento; ciò implica che l'ampiezza dello spostamento determinato dall'azione di una forza perturbatrice (forza dovuta allo sbilanciamento per esempio) dipenderà dalla direzione in cui essa agisce. Al contrario, i **cuscinetti a 3 o 4 lobi**, se debolmente caricati, sono isotropi e **l'orbita dell'albero è sostanzialmente circolare**.

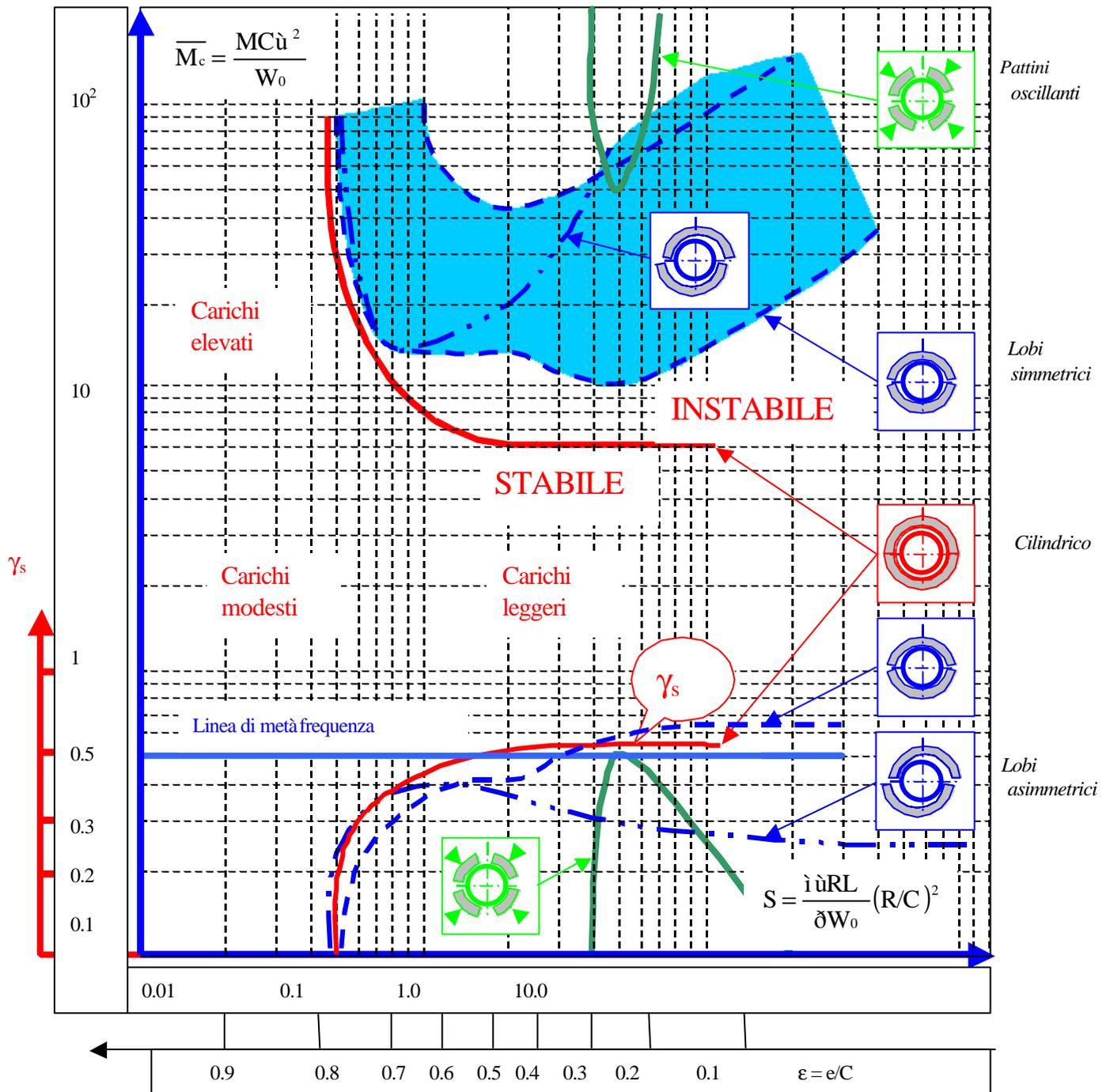
Ai fini di una corretta sorveglianza e diagnosi delle vibrazioni, è importante avere una precisa conoscenza delle caratteristiche geometriche dei cuscinetti. *Attenzione però che un'orbita molto schiacciata non è sempre indice di un disallineamento o di un impedimento.*

Inoltre, occorre conoscere i **coefficienti dinamici di rigidità e di smorzamento del cuscinetto e sapere che essi non dipendono dall'eccentricità dell'albero**. Quest'ultima gioca un ruolo importante nella determinazione dell'ampiezza delle orbite dell'albero quando questo viene sottoposto, per esempio, a delle forze di squilibrio.

Pertanto, la sorveglianza degli sbilanciamenti nel corso del tempo, richiede il rilievo sistematico delle **posizioni medie** dell'albero.

## Stabilità

La seguente carta di stabilità dei cuscinetti a lobi evidenzia che i cuscinetti a 2 lobi asimmetrici sono i più stabili. I meno stabili sono invece i cuscinetti a 2 lobi simmetrici se lavorano a carichi leggeri.



$S$  numero di SOMMERFELD,  $Mc$  massa critica (adimensionale)

Le curve  $g_s = f(\epsilon)$  – funzione dell'eccentricità relativa  $\epsilon = e/C$  – forniscono, per i diversi tipi di cuscinetti, il valore della frequenza del vortice in corrispondenza dell'instabilità del cuscinetto. Si può constatare che per carichi leggeri (modeste eccentricità, elevate velocità per

esempio), la frequenza del vortice tende al valore di  $0.25W$  per un cuscinetto a 2 lobi asimmetrici e al valore di  $0.63W$  per un cuscinetto a 2 lobi simmetrici.

Per i cuscinetti a 3 e 4 lobi (simmetrici o non), la curva della frequenza del vortice è monotona e tende ad un valore massimo prossimo a  $0.48W$ .

## I CUSCINETTI A PATTINI OSCILLANTI

Un cuscinetto a pattini oscillanti è composto da  $n$  pattini, non necessariamente identici, liberi di muoversi attorno a dei perni.

In regime dinamico, i pattini seguono il movimento dell'albero; questa è la principale ragione della loro elevata stabilità.

### Caratteristiche statiche :

Quando i pattini hanno caratteristiche uniformi e i perni sono distribuiti simmetricamente rispetto alla linea del carico, l'angolo di calettamento è nullo e lo spostamento dell'albero è allineato alla direzione del carico.

### Caratteristiche dinamiche e stabilità :

Se l'inerzia  $I$  dei pattini è trascurabile ( $M_p = I/R_p^2$ ,  $M_p$  massa equivalente del pattino,  $R_p$  raggio di curvatura del pattino), ciascun pattino segue perfettamente l'albero nel suo movimento e il cuscinetto è altamente stabile.

Nel caso contrario, ossia quando c'è uno sfasamento tra il movimento del pattino e il movimento dell'albero, esiste un **rischio d'instabilità**. Viene definita massa critica del pattino  $M_{pc}$ , il valore oltre il quale esso non può più seguire il movimento dell'albero. La curva di stabilità del cuscinetto a 4 pattini oscillanti si riferisce a  $M_{pc} = 0,1$ .

Per un cuscinetto a 4 pattini, i coefficienti dinamici di rigidezza e smorzamento sono uguali lungo gli assi X e Y, mentre ciò non è vero per i cuscinetti a 3 e 5 pattini (geometria disuniforme). A carichi leggeri, questi ultimi possiedono dei coefficienti dinamici inferiori ai precedenti.

La linea di stabilità tende verso quella corrispondente ad un cuscinetto a lobi fissi quando la massa equivalente del pattino è elevata.

La frequenza del vortice è vicina a  $0.5W$ .

In altri termini, quando si verifica un fenomeno di instabilità su di un cuscinetto a pattini oscillanti caricato, è molto probabile che ci sia un problema di usura dei perni.

