

CONTROLLO VIBRAZIONALE SEMI-ATTIVO DI UN ROTORE FLESSIBILE TRAMITE SMORZATORE A SQUEEZE-FILM MAGNETOREOLOGICO

C. Carmignani^a, P. Forte^a, E. Rustighi^a

^a Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, Università di Pisa, Via Diotisalvi 2 - 56126 Pisa (PI), e-mail: carmi@ing.unipi.it, p.forte@ing.unipi.it, e.rustighi@ing.unipi.it

SOMMARIO

Dopo uno studio analitico e numerico è stato progettato e realizzato uno smorzatore a “squeeze-film” magnetoreologico (MR), montato sul rotore di un piccolo banco prova. Esperienze su fluidi differenti hanno permesso di individuare il fluido ottimale. Le esperienze condotte mostrano come sia possibile minimizzare l’orbita descritta dal rotore su cui agisce lo smorzatore. È stata infine effettuata un’analisi preliminare per individuare un algoritmo di controllo semi-attivo automatico del dispositivo in esame.

ABSTRACT

After an analytical and numerical study, a magnetorheological (MR) squeeze-film damper has been designed and set up on a reduced scale rotor test-rig. By testing different fluids, an optimal fluid has been singled out. Tests conducted on the selected fluid show that the orbit of the damped rotor can be reduced. A preliminary analysis has been carried out to find a suitable automatic semi-active control algorithm for the studied device.

1. INTRODUZIONE

Il problema delle vibrazioni nella dinamica dei rotori è comunemente affrontato con smorzatori a “squeeze-film”, passivi o ad elastomeri [1], la cui efficacia sfortunatamente varia con la velocità del rotore. Evidenze sperimentali mostrano che per dissipare energia in corrispondenza delle velocità critiche del rotore gli spostamenti della sezione di applicazione dello smorzatore devono essere significativi, ovvero la viscosità del fluido deve avere un valore moderato. Al contrario lontano dalle soglie critiche sono richiesti valori di viscosità più elevati [2]. Per ottenere queste caratteristiche si sta affermando una nuova generazione di smorzatori “intelligenti”, tra i quali i più promettenti per un utilizzo industriale risultano essere quelli che utilizzano fluidi magnetoreologici (MR) in quanto permettono variazioni di configurazione in tempi brevi assorbendo poca potenza. Questi fluidi, costituiti da sospensioni di microscopiche particelle ferromagnetiche, se sottoposti ad un campo magnetico, vanno

incontro a radicali cambiamenti delle loro caratteristiche meccaniche, della viscosità in particolare.

Sebbene in letteratura i fluidi MR siano stati trattati con una certa estensione per quanto riguarda aspetti e applicazioni generali [3, 4], e siano stati impiegati con successo in valvole, smorzatori e freni, solo recentemente sono stati pubblicati lavori sulla loro applicazione al controllo della dinamica dei rotori [5, 6]. Un campo in cui gli smorzatori a fluido MR si stanno affermando in particolare è quello del controllo semi-attivo di edifici civili [7, 8]. Attualmente notevoli sforzi sono intrapresi da molti centri di ricerca al fine di elaborare una strategia di controllo efficace per questo tipo di smorzatori. Sebbene esistano molte analogie con il lavoro descritto in questo articolo, tali smorzatori sono esclusivamente realizzati in configurazione lineare. Ciò comporta una semplificazione non solo della modellazione del sistema meccanico ma anche della caratterizzazione dello smorzatore [9].

Nel seguente lavoro è stato progettato uno smorzatore a squeeze film che prevede l'uso di un fluido MR. A tal fine è stato costruito un modello matematico quasi-statico del sistema rotore/smorzatore utilizzando il modello di fluido di Bingham per il fluido. Lo smorzatore è dunque stato realizzato ed è stata indagata la fattibilità di un controllo semiattivo.

2. SIMBOLOGIA

a	Distanza smorzatore dal supporto	μ_0	Permeabilità magnetica nel vuoto
β	Sfasamento tra gli spostamenti delle due masse	μ_r	Permeabilità magnetica relativa
B_{MR}	Campo magnetico nel fluido MR	p	Pressione
c	Gioco radiale	q	Portata volumetrica assiale
d	Diametro albero flessibile	θ	Coordinata angolare (x/R)
δ	Distanza dello sbilanciamento dall'asse	R, R_o, R_i	Raggio dello smorzatore, raggi interno e esterno
e	Eccentricità	τ	Tensione di taglio
ε	Eccentricità relativa	τ_0	Tensione di taglio di soglia
h	Altezza del meato	u, v, w	Velocità del fluido in direzione x, y, z
J_S	Densità di corrente negli avvolgimenti	ω	Velocità di rotazione
k_{11}, k_{12}, k_{22}	Rigidezze dell'albero	x	Coordinata in direzione dello scorrimento
K_{sc}	Rigidezza radiale della gabbia di scoiattolo e delle guarnizioni	X_1, Y_1	Sistema di riferimento al disco
l	Lunghezza dell'albero	X_2, Y_2	Sistema di riferimento allo smorzatore
L	Lunghezza assiale smorzatore	y	Coordinata in direzione radiale
M_1	Massa centrale	z	Coordinata ortogonale a x, y
M_2	Massa dello smorzatore	ζ	Posizione della massa centrale
μ	Viscosità	$()^*$	Quantità adimensionale

3. IL MODELLO DEL FLUIDO MAGNETOREOLOGICO

In presenza di un campo magnetico il comportamento del fluido è solitamente descritto con il modello plastico di Bingham [2], cioè il fluido si comporta come un solido elastico se la tensione applicata è inferiore al valore di soglia, τ_0 , mentre si comporta come un fluido newtoniano se la tensione applicata eccede tale valore. Ciò può essere espresso analiticamente come segue:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial y} &= 0 & \text{for } |\tau| \leq |\tau_0| \\ \tau &= \mu \frac{\partial u}{\partial y} \pm \tau_0 & \text{for } |\tau| > |\tau_0| \end{aligned} \quad (1)$$

Si ipotizza di essere nelle condizioni unidimensionali, illustrate in Figura 1, tali che $u \gg v$, $\partial/\partial x \gg \partial/\partial y$ e $w = \partial/\partial z = 0$. Considerando l'espressione analitica dello spessore del meato rispetto ad un sistema rotante a velocità costante ω (velocità di rotazione dell'albero) si ottiene l'espressione dell'equazione di Reynolds per ogni valore non nullo della tensione di soglia:

$$\left(h \frac{dp}{dx} \right)^3 + 3 \left(\frac{dp}{dx} \right)^2 \left[4\mu(\omega Rh + q) \pm h^2 \tau_0 \right] - (\pm 4\tau_0)^3 = 0 \quad (2)$$

L'equazione (2) permette di ricavare una soluzione analitica del gradiente di pressione. Integrando quest'ultimo, e adattando la portata in maniera tale da soddisfare la periodicità della pressione, è possibile ottenere la distribuzione della pressione e di conseguenza le forze radiale e tangenziale complessive.

La Figura 2 mostra alcuni andamenti tipici dei profili di velocità per vari valori della tensione di soglia. Si vede chiaramente come all'incremento della tensione di soglia corrisponda un ispessimento del nucleo solido interno al meato.

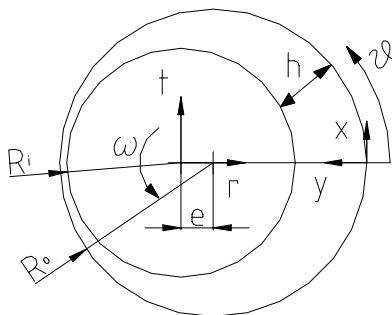


Figura 1 – Schema della sezione dello smorzatore

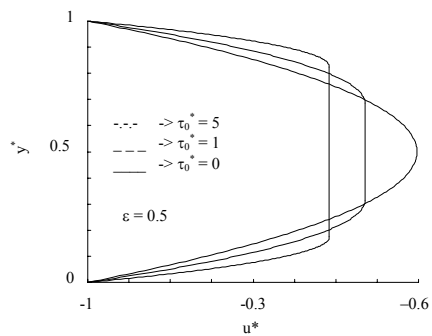


Figura 2 – Tipici profili di velocità

In Tabella 1 sono riportati i valori dei parametri adottati nel modellare il sistema. Come si può notare il rapporto tra spessore del meato e diametro dell'albero, adottato per i motivi che verranno esposti in seguito, è ben superiore a quello ipotizzato nella teoria di Reynolds. D'altra parte questo modello risulta il più semplice e adatto ad un'analisi preliminare di questo tipo.

Tabella 1 – Valori numerici adottati per i calcoli analitici

L	c	R	μ
20 mm	2.5 mm	3.2 cm	0.18 Pa sec

4. MODELLO QUASI-STATICO DEL SISTEMA ROTORE/SMORZATORE

La Figura 3 rappresenta in maniera schematica il sistema costituito dal rotore flessibile, dal disco e dallo smorzatore MR. Il modello utilizzato considera il rotore come un elemento elastico al quale sono calettate due masse concentrate, quella in corrispondenza del disco centrale (M_1) e quella in corrispondenza dello smorzatore (M_2). Sono stati dunque definiti due sistemi di riferimento rotanti a velocità di rotazione ω in corrispondenza delle due masse. Il baricentro del disco è spostato rispetto all'asse dell'albero di una distanza δ a causa della massa sbilanciante. L'angolo β descrive lo sfasamento tra gli spostamenti circolari delle due masse.

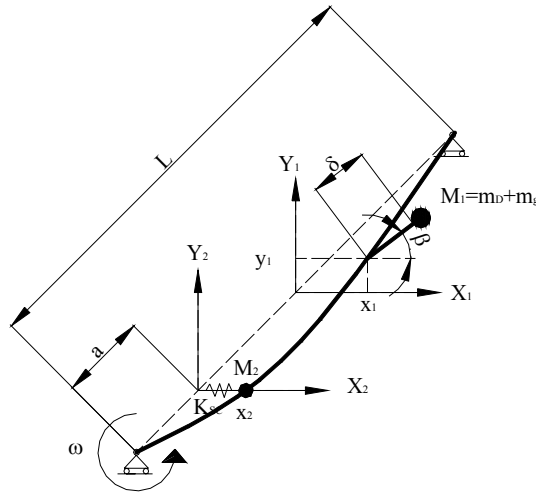


Figura 3 – Modello schematico a masse concentrate del sistema rotore/smorzatore

La forza tangenziale generata dallo smorzatore agisce lungo Y_2 mentre quella radiale lungo X_2 . La rigidità radiale K_{sc} è stata introdotta al fine di tenere conto di una eventuale gabbia di scoiattolo o della rigidità delle guarnizioni. I valori incogniti x_1 , y_1 , x_2 e β si ricavano risolvendo, per vari valori di velocità di rotazione e tensione di soglia, il seguente sistema di equazioni:

$$\begin{cases} k_{11}x_1 + k_{12}x_2 = M_1\omega^2(x_1 + \delta \cos \beta) \\ k_{11}y_1 = M_1\omega^2(y_1 + \delta \sin \beta) \\ k_{12}x_1 + k_{22}x_2 + k_{sc}x_2 + F_r(\omega, \tau_0) = M_2\omega^2x_2 \\ k_{12}y_1 + F_t(\omega, \tau_0) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

dove con k_{11} , k_{12} , k_{22} si sono indicate le rigidità dell'albero tra i punti di calettamento delle masse. Occorre notare che il modello non è applicabile quando le forze centrifughe dovute allo sbilanciamento non sono sufficienti a spezzare la struttura colonnare del fluido MR e lo smorzatore agisce semplicemente come un incastro. I valori numerici utilizzati per le simulazioni sono riportati in Tabella 2.

I limiti dei calcoli eseguiti in fase progettuale sono dovuti anche al fatto che non considerano né l'effetto del campo magnetico sulla parte mobile dello smorzatore, né gli effetti dovuti a eventuali transitori. D'altra parte questo studio aveva il solo scopo di dare delle indicazioni progettuali.

Tabella 2 – Valori numerici adottati nella simulazione

l	a	k_{11}	k_{12}	k_{22}	k_{sc}	M_1	δ	M_2
420 mm	110 mm	452140 N/m	-539820 N/m	756200 N/m	174000 N/m	0.807 Kg	$2.625 \cdot 10^{-4}$ m	0.400 Kg

In Figura 4 sono riportati gli andamenti del raggio dell'orbita della massa del disco al variare della velocità di rotazione per alcuni valori della tensione di soglia ovvero del campo magnetico. I risultati ottenuti mostrano la possibilità di limitare le oscillazioni flessionali dell'albero con una procedura on-off che consiste nell'attivare il campo magnetico quando il rotore sta attraversando la velocità critica, e di disattivarlo appena l'ampiezza dell'orbita comincia nuovamente a crescere. In questo modo si sposterebbe la velocità critica del rotore irrigidendo temporaneamente l'albero, utilizzando lo smorzatore come supporto aggiuntivo. Ciò significa però non sfruttare la possibilità di regolare la sua capacità smorzante.

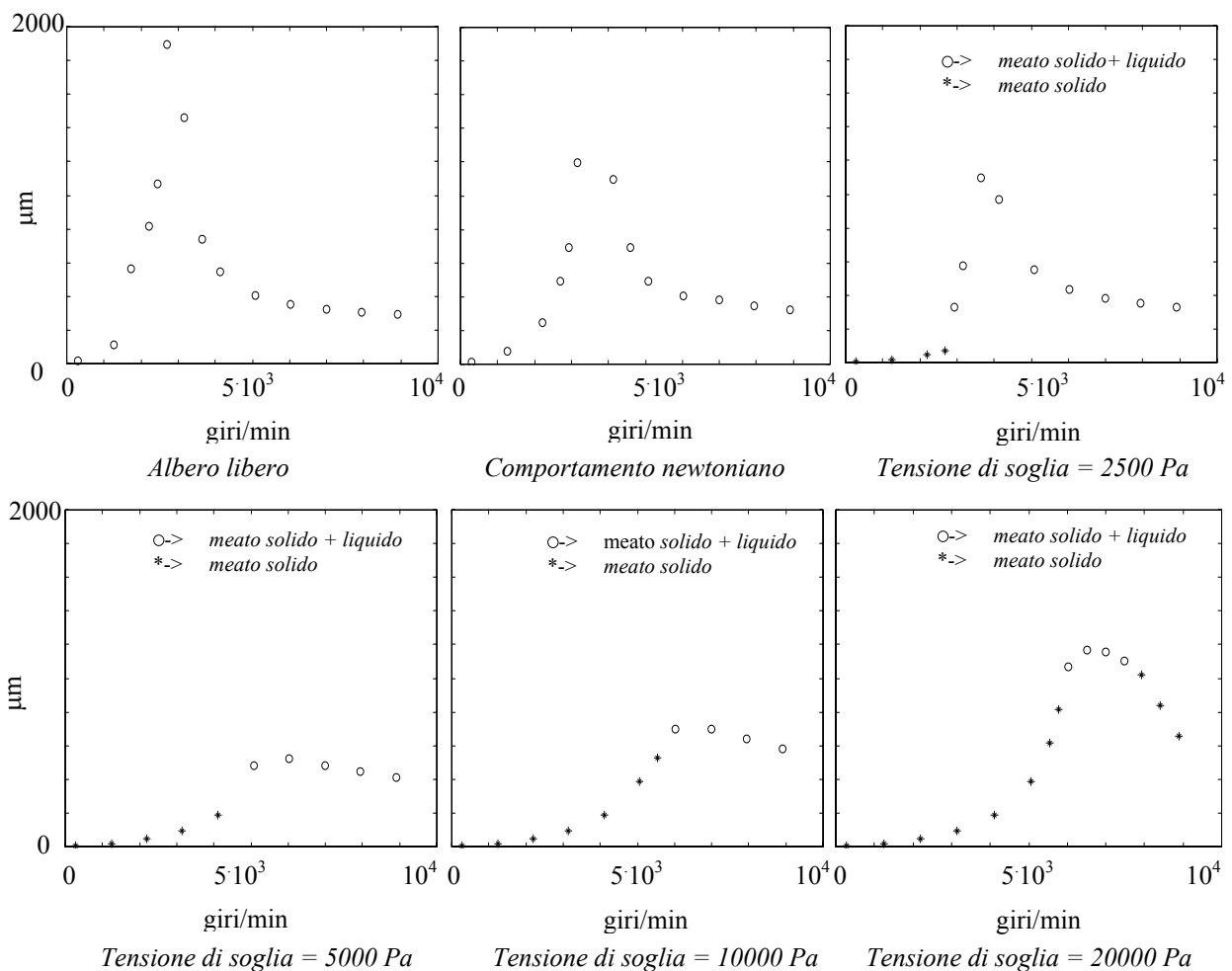


Figura 4 – Effetto del campo magnetico sul comportamento quasi statico del rotore: raggio dell'orbita della massa calettata al variare della velocità per diverse tensioni di soglia

5. LO SMORZATORE MAGNETOREOLOGICO A “SQUEEZE-FILM”

5.1 Il progetto del dispositivo

In Figura 5 è riportato il disegno costruttivo del cuscinetto MR a “squeeze-film” realizzato presso Dipartimento di Ingegneria Meccanica Nucleare e della Produzione dell'Università di

Pisa. Una tale configurazione risulta innovativa rispetto a quelle presenti in letteratura [5], e permette di rispettare maggiormente le ipotesi di unidimensionalità adottate nel modello teorico. La configurazione prevede la presenza di un unico meato e di due avvolgimenti ottenuti da 240 spire da 0.63mm di sezione, capaci di sopportare una corrente da 1A a regime, e picchi di 2A. Il collegamento tra i due avvolgimenti è effettuato in maniera tale che gli avvolgimenti siano percorsi dalla corrente in verso opposto. Tutti i particolari rappresentati in figura sono stati realizzati con acciaio C40 poiché caratterizzato da una elevata permeabilità magnetica. La bussola di calettamento sull'albero flessibile e la bussola tra lo smorzatore e il cuscinetto a sfere sono state invece realizzate in alluminio per schermare ed indirizzare il campo magnetico. Non si è ritenuto necessario utilizzare una gabbia di scoiattolo per vincolare alla rotazione l'anello interno dello smorzatore perché le guarnizioni, che contengono assialmente il meato, hanno mostrato una sufficiente rigidità torsionale. Quest'ultime, costituite da corone circolari piane di resina vulcanica, di spessore di 0.4mm, sono state dimensionate per avere rigidità radiale trascurabile sulla dinamica del rotore.

Le dimensioni dello smorzatore sono quelle riportate in Tabella 1. Considerazioni particolari devono essere fatte circa la scelta del gioco radiale. È stato scelto di adottare un valore di 2.5mm, perché innanzi tutto con un meato troppo sottile si può incorrere nel rischio che gli anelli interno ed esterno dello smorzatore, magnetizzati, vengano a contatto, aderiscano e si blocchino. Inoltre la regolazione fine della viscosità con l'intensità di corrente è molto più difficile con un meato sottile, che produce di per sé un elevato effetto smorzante anche con valori modesti della tensione di soglia e comunque, a causa delle piccole dimensioni del banco prova su cui lo smorzatore è stato montato (Bently Nevada Rotor Kit[®]), non è possibile generare forze centrifughe tali da far superare la tensione di soglia nel fluido con spessori di meato minori.

5.2 Lo studio del campo magnetico

Dal punto di vista elettromagnetico la struttura dello smorzatore può essere considerata come un circuito magnetico che deve incanalare il campo magnetico generato dagli avvolgimenti e guidarlo nel meato dove è presente il fluido MR. Tale circuito è stato realizzato in modo tale da minimizzare le perdite e da avere un campo magnetico nel meato il più uniforme possibile. Il campo magnetico è stato analizzato ricorrendo al codice FEM commerciale ANSYS[®], ricavando così il legame tra l'intensità di corrente circolante negli avvolgimenti e l'intensità di campo magnetico a cui è soggetto il fluido. In Figura 6 è riportato il valore del campo magnetico ottenuto imponendo una densità di corrente negli avvolgimenti di 7A/mm² corrispondenti a 2A per filo, ovvero il massimo amperaggio sostenibile dagli avvolgimenti elettrici. Dato che lo scopo dell'analisi era solo quello di ottimizzare la geometria del dispositivo dal punto di vista elettromagnetico, il dispositivo è stato schematizzato ricorrendo ad un modello assialsimmetrico ovvero ipotizzando che lo spostamento dell'anello interno dello smorzatore non influenzi eccessivamente la situazione osservabile con l'anello in posizione di riposo. Nel modello si sono considerate per i vari materiali delle proprietà magnetiche lineari, cioè per ciascun materiale si è considerato un valore della permeabilità magnetica costante, in particolare si è considerato un valore di 2000 per l'acciaio e 5 per il fluido magnetoreologico. La permeabilità magnetica del cuscinetto a sfere è stata trascurata a causa della sua struttura discontinua difficilmente caratterizzabile.

La relazione lineare tra la densità di corrente degli avvolgimenti (J_s misurata in A/mm²) e il campo magnetico a cui è soggetto il fluido MR (B_{MR} misurato in Tesla) è risultata essere data dunque da:

$$B_{MR} = 7.86 \cdot 10^{-2} J_s \quad (4)$$

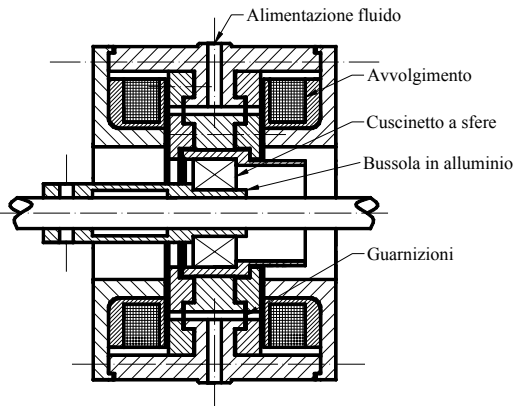


Figura 5 – Schema meccanico dello smorzatore magnetoreologico

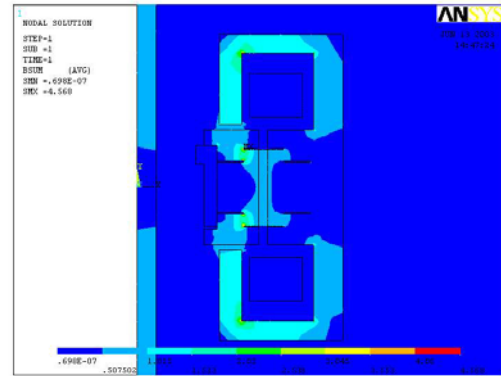


Figura 6 – Studio agli elementi finiti del campo magnetico; valori in Tesla

5.3 L'attrezzatura sperimentale

Lo smorzatore realizzato è stato installato sul Rotor Kit[®] della Bently Nevada (Figura 7). Il rotore è un albero in acciaio dal diametro di 10mm e lungo 560mm. Uno o due dischi, della massa di 0.8kg ciascuno, possono essere calettati sull'albero in maniera tale da rappresentare una o due masse concentrate. Questi dischi hanno una corona di fori circolare al raggio di 30mm in cui possono essere inseriti dei grani pesati in maniera tale da ottenere lo sbilanciamento desiderato. L'albero è stato vincolato al basamento tramite supporti con cuscinetti a sfere orientabili appositamente realizzati.

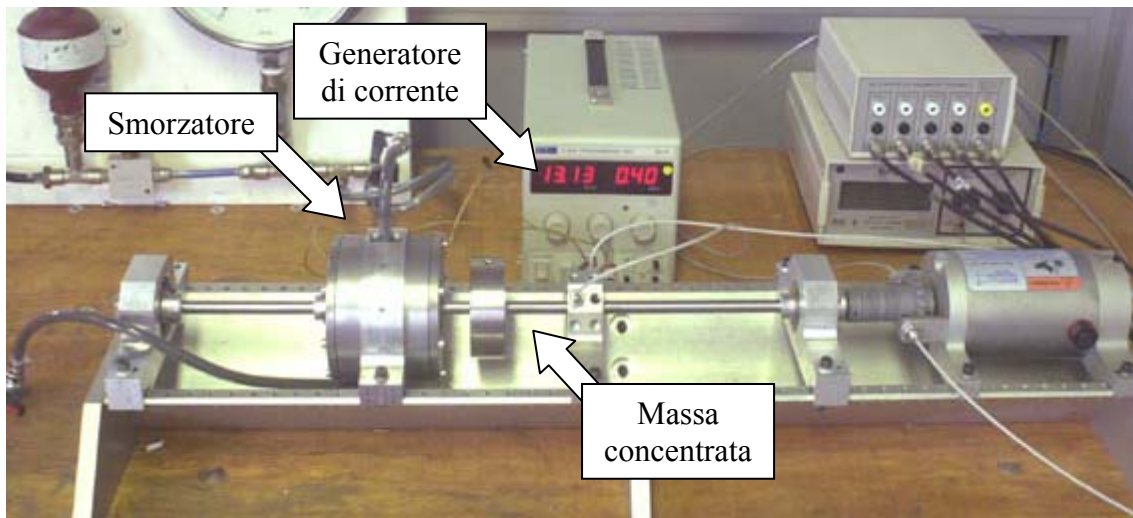


Figura 7 – L'attrezzatura sperimentale

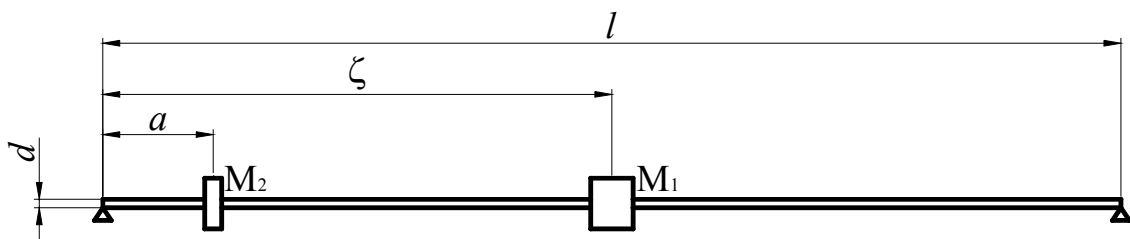


Figura 8 – Schema della configurazione delle esperienze ($l=500\text{mm}$; $\zeta=250\text{mm}$; $a=180\text{mm}$; $d=10\text{mm}$; $M_1=0.8\text{kg}$; $M_2=0.2\text{kg}$; sbilanciamento 1.5g)

La velocità dell'albero è controllabile e raggiunge il valore massimo di 10000 giri/minuto. Il Rotor Kit è inoltre equipaggiato con una serie di sensori di spostamento a induzione che permettono di misurare lo spostamento di due sezioni dell'albero contemporaneamente.

Gli avvolgimenti dello smorzatore sono stati collegati ad un alimentatore di corrente programmabile in remoto. Questo è stato collegato ad un PC corredato di scheda DAQ della National Instrument PCI-MIO-16E-4, comandata da programmi LabViewTM appositamente compilati.

6. ESPERIENZE PRELIMINARI

Le esperienze sono state condotte con la configurazione riportata in Figura 8. La prima serie di esperienze ha previsto di analizzare gli effetti dello smorzatore, in assenza di qualsiasi campo magnetico applicato, e di valutare la fattibilità alla realizzazione di un controllo. Prima di tutto si è confrontata la risposta del sistema senza lo smorzatore e con questo montato ma vuoto. Si è riscontrato che la risposta rimane la stessa, dando conferma della influenza irrilevante delle guarnizioni.

Successivamente si è analizzato il comportamento dello smorzatore riempito con fluidi di differente viscosità. In Figura 9 sono riportate le risposte del rotore quando lo smorzatore viene riempito con differenti fluidi. Si è utilizzato l'olio idraulico Enerpac HF95Y che ha una viscosità dinamica di 0.025Pa·sec a 40°C. Si sono poi utilizzati due fluidi MR. Il primo è il fluido MRF-122-2ED della RheoneticTM (Lord Corporation) che ha una viscosità di 0.07Pa·sec a 40°C (misura ottenuta tra i valori di velocità di scorrimento di taglio di 500sec⁻¹ e 800sec⁻¹). Il secondo è il fluido MRHBS4 della Liquids Research Limited che presenta una viscosità di 0.013Pa·sec ad una temperatura di 40°C (misura ottenuta ad una velocità di scorrimento di taglio di circa 680sec⁻¹).

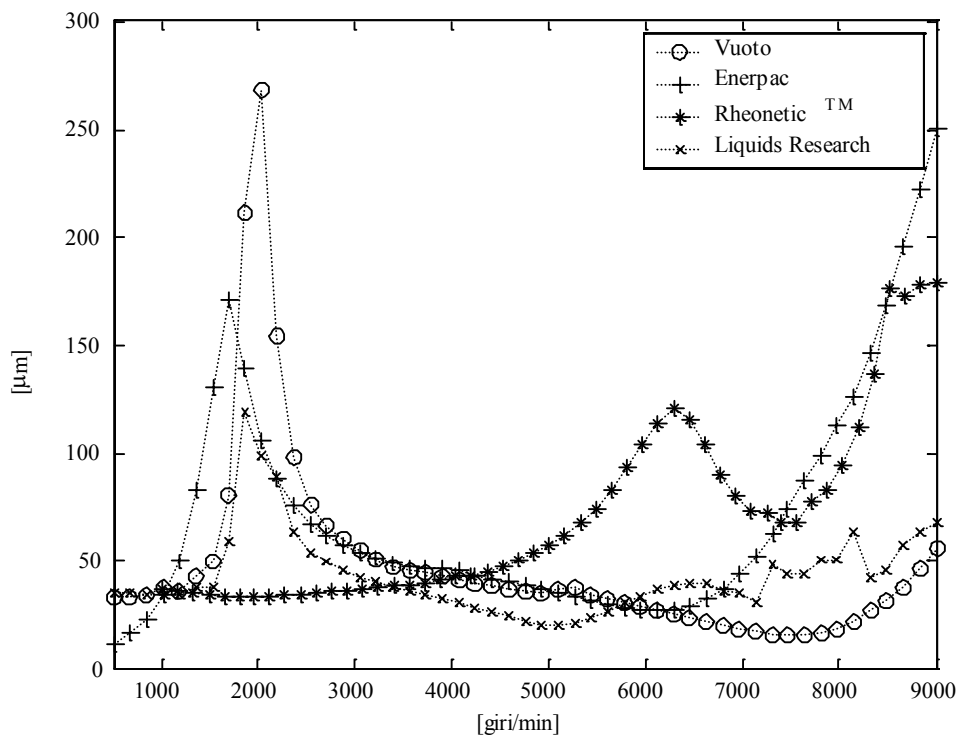


Figura 9 – Effetto del fluido posto all'interno del meato sul comportamento del rotore

Come si evince dalla figura il fluido della RheoneticTM ha una viscosità troppo elevata che porta quasi al bloccaggio della massa M_2 con conseguente incremento della pulsazione

naturale. Con questo fluido non risulta dunque possibile variare molto le caratteristiche di risposta al variare del campo magnetico. Il fluido della Liquids Research Limited è stato dunque oggetto di indagini più approfondite. In Figura 10 sono riportati i risultati di tale analisi.

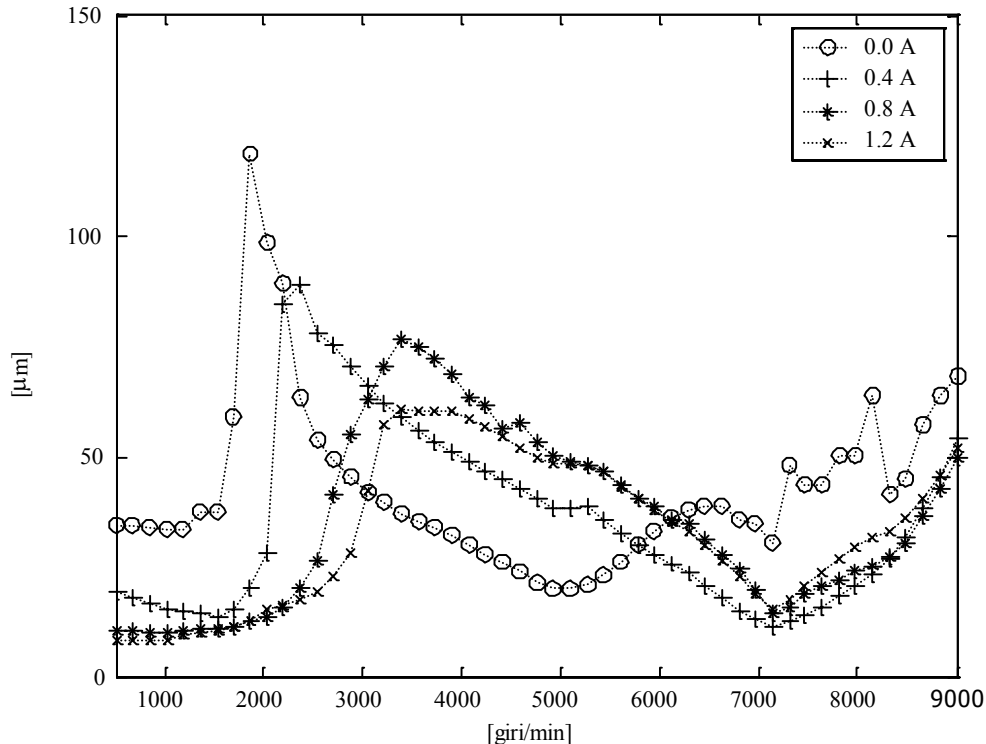


Figura 10 – Effetto del campo magnetico sul comportamento del rotore con smorzatore riempito col fluido magnetoreologico della Liquids Research Limited MRHCCS4

Si vede chiaramente come è possibile ottenere uno spostamento nella pulsazione naturale da 2000 a 3500 giri/min semplicemente ed in maniera continua incrementando la corrente negli avvolgimenti da 0 a 1.2A. L'incremento del campo magnetico ha prodotto oltre ad un aumento del coefficiente di viscosità anche un aumento della rigidità dello smorzatore, sia a causa dell'incremento della tensione di soglia del fluido MR sia a causa della forza magnetica che tende a bloccare l'anello interno.

7. IL CONTROLLO AUTOMATICO DEL DISPOSITIVO

Contemporaneamente alla progettazione, alla costruzione e all'analisi sperimentale del dispositivo è stata intrapresa la modellazione in Matlab[®] del sistema rotore/smorzatore in un sistema di riferimento fisso, al fine di poter progettare e simulare il funzionamento di un controllore. Si è supposto di poter modellare lo smorzatore con matrici di smorzamento e di rigidità piene 2x2, che accoppiano spostamenti orizzontali e verticali, variabili con continuità al variare della corrente negli avvolgimenti. In attesa di una identificazione sperimentale gli sono stati dati dei valori di tentativo.

Questo modello, a differenza del modello quasi-statico descritto al Par.4, permette di simulare i transitori e quindi di progettare un controllore off-line. Per un'analisi preliminare sono stati implementati, in ambiente Simulink[®] di Matlab[®], due tipi di controllo classici per il controllo semiattivo delle sospensioni di autoveicoli (sky-hook ed ground-hook). Tali controllori però non hanno mostrato un comportamento soddisfacente probabilmente perché ideati per

problemi di tipo unidimensionale mentre nel caso in esame gli spostamenti trasversali orizzontali e verticali dell'albero sono accoppiati.

Attualmente è in corso lo sviluppo di un controllore di tipo fuzzy i cui ingressi sono costituiti dalle variazioni del raggio dell'orbita e dell'intensità di corrente. I problemi principali di questo tipo di controllo sono nella scelta delle regole da inserire e del ritardo di intervento più conveniente.

8. CONCLUSIONI

E' stato realizzato un prototipo di smorzatore MR sulla base dei risultati di uno studio analitico su un modello semplificato e di uno studio agli elementi finiti del campo magnetico generato. Le prime esperienze hanno mostrato come sia possibile variare le caratteristiche smorzanti del cuscinetto a squeeze-film in maniera continua variando la corrente di alimentazione degli avvolgimenti permettendo così di impostare la condizione di funzionamento ottimo per ogni regime di rotazione e condizione di lavoro.

Data l'estrema facilità con cui è possibile variare le proprietà dello smorzatore si sta valutando una possibile strategia di controllo automatico, utilizzando un modello numerico del sistema dinamico implementato in Simulink[®]. Tecniche classiche come lo sky-hook ed il ground-hook si sono rivelate non idonee perché non tengono conto della bidimensionalità del problema. Una logica fuzzy appare più appropriata in quanto permette di tradurre facilmente delle regole empiriche in un algoritmo di controllo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] R. Holmes, "Rotor vibration control using squeeze-film dampers", presented at IFTOMM - Fifth International Conference on Rotor Dynamics, Darmstadt, University of Technology, Germany, 1998.
- [2] J. A. Tichy, "Behavior of a squeeze film damper with electrorheological fluid", *STLE Tribology Transactions*, vol. 36, pp. 127-133, 1993.
- [3] M. R. Jolly and J. D. Carlson, "Controllable squeeze film damping using magnetorheological fluid", presented at 5th International Conference on New Actuators, Bremen, Germany, 1996.
- [4] M. R. Jolly, J. W. Bender and J. D. Carlson, "Properties and applications of commercial magnetorheological fluids", presented at Spie 5th Annual Int. Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA, 1998.
- [5] C. Zhu, D. A. Robb and D. J. Ewins, "Dynamics of an over-hung rotor with a disc-type magneto-rheological fluid damper", presented at IFToMM Sixth International Conference on Rotor Dynamics, University of New South Wales, Sydney, Australia, 2002.
- [6] P. Forte, M. Paternò and E. Rustighi, "A magnetorheological fluid damper for rotor applications", presented at IFToMM Sixth International Conference on Rotor Dynamics, University of New South Wales, Sydney, Australia, 2002.
- [7] S. J. Dyke, B. F. Spencer, M. K. Sain and J. D. Carlson, "Modeling and control of magnetorheological dampers for seismic response reduction", *Smart Materials and Structures*, vol. 5, pp. 565-575, 1996.
- [8] L. M. Jansen and S. J. Dyke, "Semiactive control strategies for MR dampers: Comparative study", *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 126, pp. 795-803, 2000.
- [9] B. F. Spencer Jr., S. J. Dyke, M. K. Sain and J. D. Carlson, "Phenomenological model for a magnetorheological damper", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, vol. 123, pp. 230, 1997.