

SISTEMA DI CARATTERIZZAZIONE PER FLUIDI MAGNETOREOLOGICI: EFFETTO DELLA PRESSIONE IN MODALITA' SCORRIMENTO

A. Spaggiari^a, E. Dragoni^a

^a *Università di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Scienze e Metodi dell'Ingegneria, via Amendola,2 – 42100 Reggio Emilia, e-mail: andrea.spaggiari@unimore.it*

Sommario

Il presente lavoro descrive l'apparecchiatura sperimentale per la caratterizzazione di fluidi magnetoreologici (MR) in modalità scorrimento, sottoposti a pressione. Lavori di letteratura riportano indicazioni sull'effetto della pressione sui fluidi MR a taglio, ma poiché molti dispositivi commerciali lavorano in modalità scorrimento è interessante investigare questo aspetto. La progettazione del sistema è sviluppata in tre fasi: progetto del sistema meccanico, progetto del circuito magnetico, progetto della campagna sperimentale. L'attrezzatura effettua la misura della tensione di snervamento apparente del fluido MR in funzione di pressione, campo magnetico e velocità del fluido. Il circuito magnetico, progettato con un software FEM è stato verificato con un gaussmetro, evidenziando un ottimo accordo numerico-sperimentale. Il sistema sviluppato si pone come strumento per valutare se la pressione del fluido MR possa essere usata come strumento per potenziare gli attuali sistemi semiattivi basati su fluidi MR, come smorzatori e dissipatori lineari.

Abstract

The paper shows the experimental set-up designed in order to characterize the behaviour of magnetorheological (MR) fluids in flow mode under pressure, called squeeze strengthen effect. Other works, retrieved in literature, shows this effect in shear mode, but a lot of MR fluid based devices works in flow mode and this behaviour is worth investigating. The system design is articulated in three steps: mechanical and hydraulic system design, magnetic circuit design and design of experiment. The experimental apparatus measures the MR fluid yield stress as a function of pressure, magnetic field and shear rate. The magnetic circuit, design with the aid of a FE software is tested against experimental and shows a very good agreement. The proposed apparatus may be used a valid tool to assess whether the pressure may be used to enhance the current semi active MR fluid system, such as controllable linear dampers.

Parole chiave: fluidi magnetoreologici, modalità scorrimento, pressione, design of experiments.

1. INTRODUZIONE

I fluidi magnetoreologici (MR) sono sospensioni non colloidali bifase di particelle ferromagnetiche disperse in un liquido non magnetico. Tipicamente, un fluido MR è composto da carburi di ferro polarizzabili di dimensioni dell'ordine del micron (20÷40%) in sospensione in un liquido trasportatore omogeneo come olio minerale, olio sintetico, acqua o glicole [1].

In stato di quiete le particelle sono disperse casualmente nel liquido (Fig. 1-a). L'applicazione di un campo magnetico esterno orienta le particelle ferrose, che si comportano come dipoli magnetici, secondo la direzione delle linee di flusso del campo. Si generano pertanto delle forze attrattive tra le particelle che provocano la formazione di strutture reticolari orientate secondo la direzione delle linee di flusso del campo magnetico. Per campi magnetici elevati le particelle formano vere e proprie colonne lungo le linee di flusso (fig. 2-a) che ostacolano il moto del fluido.

Sottoponendo il fluido ad uno sforzo di taglio, ortogonale alle linee del campo magnetico, le catene si oppongono al movimento fino al raggiungimento di una tensione di taglio limite τ_y . Al superamento della tensione limite le catene si disgregano e il fluido si comporta in prima approssimazione secondo il modello di Newton (Fig 1-c, curva tratteggiata). Il modello più semplice del comportamento del fluido MR, proposto da Bingham [2] è riportato in Fig 1-c, curva continua. Finchè non si raggiunge un determinato valore di tensione di scorrimento nel fluido detto τ_y , il sistema non scorre. Superato tale valore, il sistema si comporta in maniera newtoniana. La τ_y aumenta all'aumentare dell'intensità del campo magnetico, prima con un andamento quasi lineare e poi raggiungendo un plateau per campi magnetici elevati a causa di fenomeni di saturazione [3].

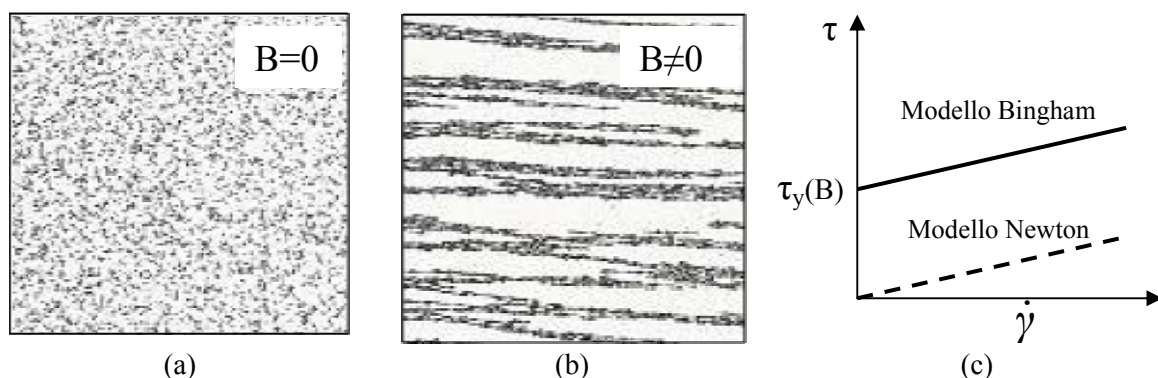


Figura 1 – Fluidi MR: comportamento in assenza di campo magnetico (a), formazione di colonne di particelle lungo le linee di flusso (b), modello di Newton e Bingham (c)

Le applicazioni dei fluidi MR sono molteplici, principalmente nel campo di dissipatori di energia come smorzatori variabili, freni o frizioni. La versatilità di questi sistemi, dovuta alla controllabilità degli stessi in funzione del campo magnetico è notevole e li rende adatti ad applicazioni di taglie molto diverse: dal campo civile anti-sismico, al campo meccatronico con sistemi di force-feedback per volanti steer by wire.

I fluidi MR sono normalmente usati in tre diverse modalità, mostrate in Fig. 2: scorrimento, taglio e compressione. La modalità di utilizzo scorrimento (Fig. 2-a) si applica al fluido MR confinato tra due pareti fisse e in presenza di un salto di pressione che forza il movimento del fluido nel meato. La modalità di utilizzo taglio (Fig. 2-b) si applica quando il fluido è confinato tra una parete fissa e una in movimento che trascina con se il fluido MR. Per queste prime due modalità d'uso il campo magnetico è sempre ortogonale alla direzione del moto. La modalità di utilizzo a compressione (Figura 2-c), meno diffusa delle prime due, si ha quando le superfici parallele che delimitano il meato del fluido si avvicinano tra loro e il campo è parallelo alla direzione del moto.

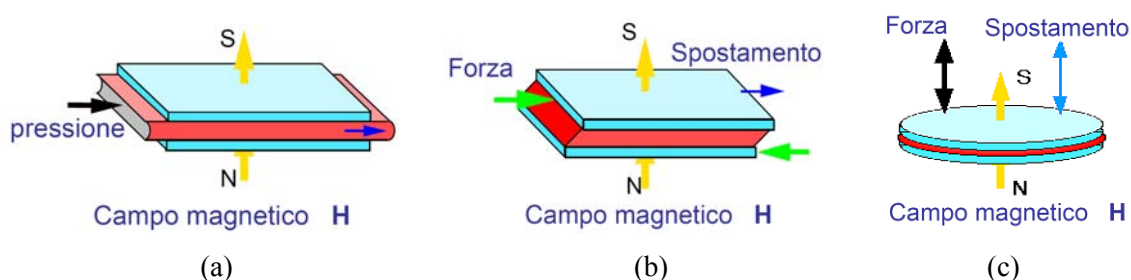


Figura 2 – Modalità d'uso dei fluidi MR: Scorrimento (a), taglio (b), compressione (c)

Il limite di questi sistemi risiede nei valori massimi di τ_y che si riescono ad ottenere con i fluidi attualmente in commercio. I valori si attestano su 5÷60 kPa per campi magnetici al limite della saturazione [4]. Dall'analisi dello stato dell'arte si nota in [5-6] che i fluidi MR in modalità taglio aumentano le loro proprietà meccaniche a seguito di una maggiore pressione del fluido. Il sistema proposto è abbastanza complesso e consente la verifica di questa influenza piezo-viscosa solo a taglio. Questo lavoro ha come obiettivo verificare l'influenza della pressione sulle proprietà meccaniche, in primo luogo la τ_y , dei fluidi MR, in modalità scorrimento. Si intende valutare se e quanto la pressione

del fluido influenzi il valore di τ_y . Maggiore il valore di τ_y , maggiore è la forza dissipativa specifica che il sistema può assorbire.

Per verificare l'influenza della pressione in modalità scorrimento si è progettato un sistema ad hoc, basato su componenti commerciali per oleodinamica. Il sistema non presenta pompe classiche (a ingranaggi, a lobi, etc) in quanto i fluidi MR intasano in breve tempo il sistema pompante. Le particelle in sospensione non possono essere filtrate pena la perdita dell'effetto magnetoreologico. Inoltre si è inserita una sezione all'interno della quale sia possibile iniettare il campo magnetico senza che esso venga deviato dal rinforzo ferromagnetico dei tubi commerciali.

Comprendere quale influenza abbia la pressione in modalità scorrimento è significativo perché questa modalità d'uso si ritrova frequentemente in smorzatori e dissipatori lineari. Questi sono tra i dispositivi MR più diffusi e quindi il loro potenziamento potrebbe essere di immediato interesse industriale [7].

La struttura del lavoro è organizzata secondo i passi seguiti per la realizzazione del circuito e delle progettazioni prove sperimentali.

Il primo passo è la progettazione del sistema meccanico-idraulico che comporta problematiche specifiche per quanto riguarda la compatibilità del sistema con i fluidi MR soprattutto per la movimentazione e le tenute idrauliche.

In seguito si descrive il sistema di applicazione del campo magnetico che deve essere dimensionato in maniera da consentire di verificare l'effetto della pressione nel campo di lavoro normale per i fluidi MR. Poiché la descrizione di sistemi MR è complessa dal punto di vista magnetico il circuito magnetico è stato progettato mediante l'uso di un software agli elementi finiti in ambito elettromagnetico. Infine si sono pianificate le prove sperimentali seguendo le prescrizioni del Design of Experiment (DoE) per effettuare una valutazione statisticamente rilevante dell'effetto della pressione sul comportamento dei fluidi MR. In particolare si intende ricavare una funzione di risposta del comportamento della risposta del sistema in termini di τ_y in funzione del campo applicato e del valore di pressione imposto.

Il sistema di sperimentazione per valutare le proprietà reologiche dei fluidi MR in pressione è quindi progettato e costruito, impostando anche la metodologia sperimentale per l'esecuzione delle prove. Il circuito magnetico progettato mediante analisi FEM è validato sperimentalmente confrontando i risultati della rilevazione mediante gaussmetro in aria con quelli forniti dal software e trovando un buon accordo numerico sperimentale.

2. MATERIALI E METODI

2.1. Progetto del sistema meccanico

Il sistema meccanico per l'analisi del comportamento in pressione dei fluidi MR è stato progettato ad hoc tenendo in considerazione le limitazioni e i vincoli imposti dalla natura dei fluidi impiegati e la necessità di un campo di misura sufficientemente ampio per la caratterizzazione del sistema.

In primo luogo si è affrontato il problema della movimentazione del fluido MR. Test preliminari hanno evidenziato l'impossibilità di usare pompe tradizionali (ingranaggi, pistoni, etc) che vengono rese inservibili dalle micro particelle ferrose nei fluidi MR. Questi fluidi possono essere considerati al pari di oli siliconici [4] molto sporchi per i quali non è possibile filtrare il circuito pena la scomparsa dell'effetto magnetoreologico.

Queste considerazioni hanno portato alla scelta di un sistema a cilindro pompante a circuito chiuso, per evitare serbatoi di fluido dal quale sarebbe stato difficile aspirare correttamente il fluido.

L'azionamento del cilindro pompante è gestito da una macchina di servo idraulica MTS Bionix 858 da 25 kN per prove meccaniche.

Lo spazio di lavoro della macchina limita le dimensioni del sistema che deve essere progettato in maniera da consentire la compatibilità con gli afferraggi e la cella di carico della stessa.

Il sistema, volto alla massima semplicità costruttiva, è rappresentato schematicamente in Figura 3a mentre la Figura 3b si riporta il risultato della progettazione effettuata usando il cad 3D Solidworks. In particolare si notano tre elementi chiave, numerati come segue in Fig. 3a:

1. il cilindro pompante a stelo passante

2. un manicotto di alluminio
3. strozzatore variabile

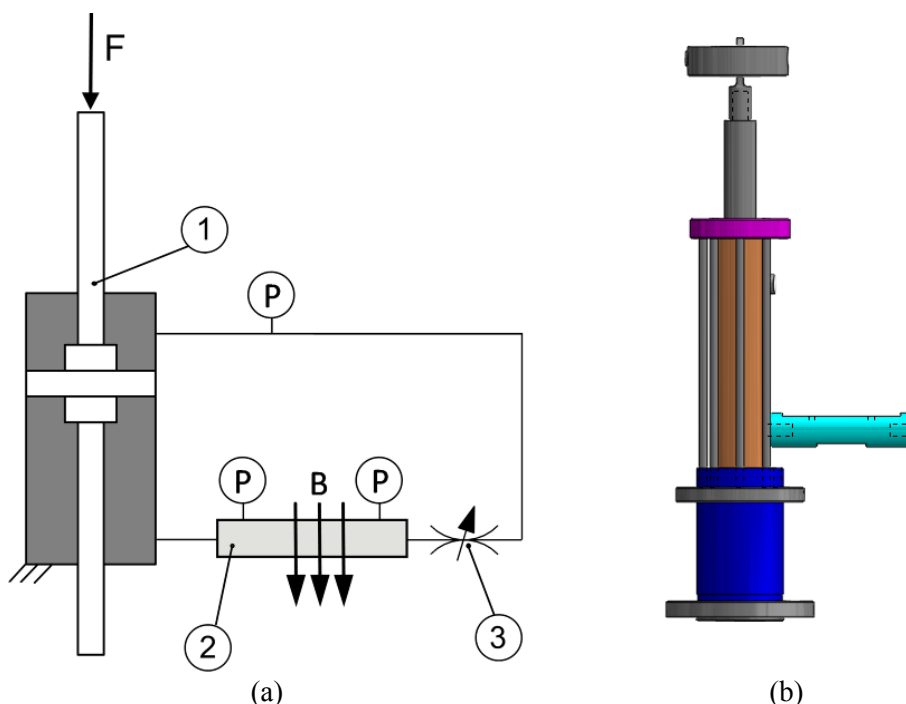


Figura 3 – Schema funzionale del circuito (a) – Modello 3D del sistema (b)

La scelta del cilindro a stelo passante (elemento 1 di Figura 3a) è dettata dalla necessità di mantenere costante il volume di fluido travasato dal sistema. Infatti l'uso di un classico cilindro oleodinamico senza stelo passante comporterebbe la necessaria introduzione di un sistema di compensazione del volume dello stelo del cilindro per evitare la cavitazione. Sistemi di compensazione sono stati presi in considerazione ma non sono risultati compatibili con i fluidi MR.

Il manicotto di alluminio (elemento 2 di Figura 3a) invece si rende necessario in quanto i tubi idraulici commerciali per pressioni medio-alte hanno una rete metallica di rinforzo interna. Essa, essendo in materiale ferromagnetico, scherma il fluido MR deviando nel tubo, su un percorso a bassa riluttanza, il campo applicato rendendo di fatto inesistente l'effetto magnetoreologico. Si rende necessario usare un componente di alluminio amagnetico che consenta l'applicazione del campo in maniera corretta.

Lo strozzatore variabile (elemento 3 di Figura 3a) inserito nel circuito svolge una duplice funzione. In primo luogo è necessario al fine di ottenere perdite di carico tali da innalzare al valore voluto la pressione nel ramo a monte del punto di applicazione del campo magnetico. In secondo luogo è utile al fine di riempire correttamente il circuito con il fluido MR. Infatti chiudendo completamente lo strozzatore e azionando lo stelo è possibile separare due tratti di circuito e riempirli uno alla volta. Il riempimento avviene immettendo il fluido attraverso i tre attacchi rapidi per oleodinamica dove si andranno a posizionare le tre prese di pressione.

Unitamente allo strozzatore variabile si utilizza una valvola di spurgo dei gas per evitare di comprimere eventuali bolle d'aria durante le prove sperimentali perdendo così parte dell'influenza della pressione sul comportamento dei fluidi MR. Grazie ad un raccordo a T la valvola può essere posizionata in una qualunque presa di pressione (P in Figura 3a) al fine di ottenere lo spurgo dell'aria nel circuito nel ramo desiderato.

Le due prese di pressione sul manicotto (elemento 2 di Figura 3a) sono necessarie alla stima della τ_y che dipende, secondo [8] dal campo magnetico e dalla geometria del condotto. Il moto di un fluido MR in un condotto cilindrico si può ricavare integrando l'equazione di Navier-Stokes. Si ottiene che per un condotto di raggio r e un giogo magnetico di larghezza l si ha:

$$\tau_y = -\Delta p_y \frac{l}{r} \quad (1)$$

2.2. Progetto del circuito magnetico

La progettazione del circuito magnetico è un passaggio fondamentale nei sistemi basati su fluidi MR. Le prestazioni dell'intero sistema sono fortemente influenzate da intensità e orientamento del campo magnetico applicato. Come si nota in Figura 4a, nel circuito è presente un manicotto di alluminio (particolare 2 di Figura 4a), necessario per poter creare un opportuno campo magnetico nel fluido tra le due prese di pressione (particolare 3 di Figura 4a), come spiegato nella sezione precedente.

Il progetto mira ad ottenere la configurazione più semplice ed economica per raggiungere alti flussi nel fluido MR. La scelta è ricaduta su una configurazione con nucleo magnetico con forma a "C" di acciaio a basso tenore di carbonio C10 che forma un giogo magnetico con il manicotto di alluminio nel traferro. Questo nucleo ferroso è la base per il sistema di applicazione del campo che può essere ottenuto o con un avvolgimento elettrico o usando magneti permanenti. Da un lato l'avvolgimento presenta il vantaggio di poter variare la corrente nelle spire in maniera continua, che significa una regolazione proporzionale del campo magnetico. Dall'altro lato però comporta costi maggiori di avvolgimento spire e alimentazione se si intende raggiungere campi massimi dell'ordine di 0.5 T. Per contro i magneti permanenti in terre rare (NdFeB) riescono a garantire un campo magnetico molto intenso e costante a fronte di ingombri ridottissimi e costi molto bassi. Unitamente a ciò, data la natura "discreta" dei livelli del piano fattoriale sperimentale il circuito con avvolgimento sarebbe stato inutilmente sovradimensionato. Il circuito magnetico realizzato è descritto in Figura 4, in cui si nota che i magneti permanenti (particolare 4 di Figura 4a) sono anche utilizzati come elemento di collegamento di tre semplici elementi prismatici di acciaio (particolare 1 di Figura 4) a formare il circuito magnetico che abbraccia il manicotto.

Le proprietà dei magneti permanenti (MP) e dell'acciaio usati sono riportate sinteticamente in Tab. 1. I livelli di campo magnetico desiderati e la forma delle linee di flusso sono state progettate e verificate usando il software di simulazione magnetica agli elementi finiti FEMM 4.0 [9]. Combinando opportunamente in serie e in parallelo magneti permanenti si è ottenuti i livelli di campo magnetico desiderati all'interno del fluido MR.

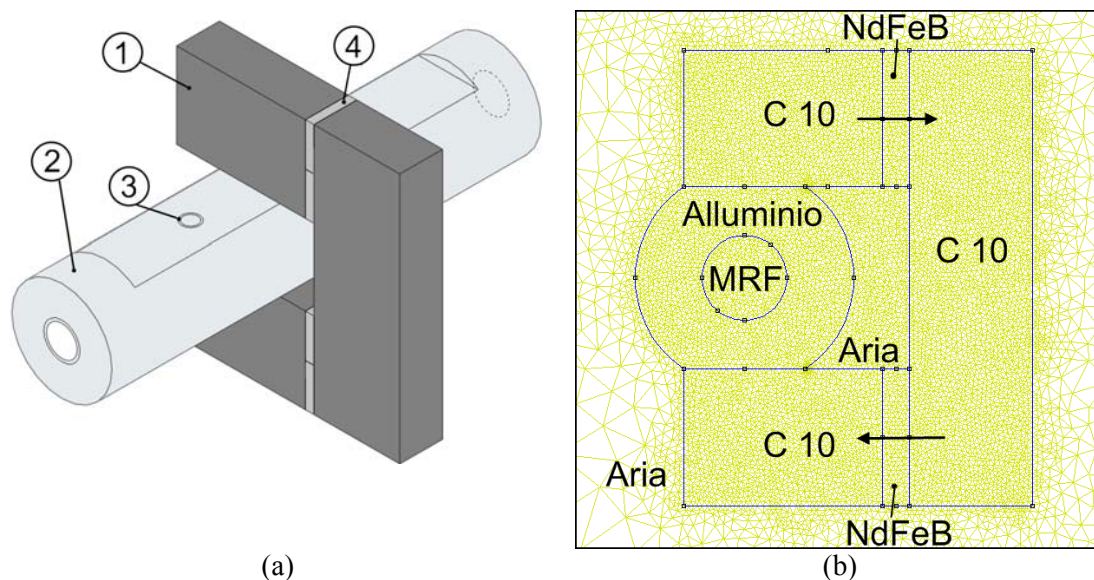


Figura 4 – Modello del circuito magnetico (a), Mesh del circuito magnetico (b)

2.3. Progetto della campagna sperimentale

Al fine ottimizzare lo sforzo sperimentale si sceglie di adottare la metodologia del Design of Experiment (DoE) [10]. In particolare le variabili che si intende controllare sono la pressione agente sul fluido MR, l'intensità del campo di induzione magnetica (B) normale al senso di moto del fluido e

la portata di fluido MR forzata a scorrere nel condotto. Per ottenere informazioni rilevanti nel normale campo di utilizzo dei fluidi MR si è adottata una procedura “General Factorial” con 5 livelli per variabile. La risposta del sistema è data dalla τ_y del fluido MR, calcolata in maniera analitica secondo la procedura descritta in [8] a partire dai salti di pressione misurati sperimentalmente

Tabella 1: Caratteristiche sistema di prova

Elemento	Materiale	μ_r	Valori nominali
Manicotto	Alluminio 2020	1	$\varnothing_{est}=40\text{mm}$ $\varnothing_{int}=12\text{mm}$ $L=200\text{mm}$
Fluido MR	Lord MR 140 CG	~5	Volume = 260 cc
Tubi idraulici	Gomma Rete di rinforzo in acciaio	1 1000	Diametro nominale ½ pollice, pressione massima 100 Bar
Circuito Magnetico	Acciaio C10	2000	Vedi Figura 4
Magneti permanenti	Sinterizzati NdFeB	1.05	Magnetizzazione N45, Rimanenza 1.3T

I dati di ingresso per il calcolo sono i parametri geometrici del sistema e il salto di pressione misurato sperimentalmente tra le due prese di pressione sul manicotto di alluminio e la portata del fluido MR. La Tabella 2 riporta i valori adottati nel piano sperimentale. Per ogni livello di prova si effettuano 3 ripetizioni per limitare l’influenza di errori sperimentali di misura, per un totale di 375 prove. L’esecuzione delle prove è randomizzata usando il software Design Expert [XX].

Tabella 2: Variabili del piano sperimentale

Livelli		Variabili piano sperimentale				
		↓↓	↓	0	↑	↑↑
Pressione	MPa	0	1	2	4	8
Campo Magnetico	mT	0 (no MP)	100 (2 MP)	200 (4 MP)	300 (8 MP)	400 (16 MP)
Portata in volume	l/min	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6

L’esecuzione delle prove prevede una prima fase di taratura del sistema per valutare quale sia la l’influenza della componentistica circuitale sulla misura delle grandezze caratteristiche del fluido MR. In primo luogo è opportuno valutare la pressione interna al sistema in base all’analisi fluidodinamica del circuito.

Considerando l’equazione di Bernoulli del moto del fluido MR nel condotto è possibile trascurare il termine gravitazionale e quello cinetico e in prima approssimazione si ha quindi che:

$$\frac{\Delta p}{\rho} = R \quad (2)$$

Le perdite nel circuito sono dovute alla somma delle perdite concentrate e quelle distribuite. Le perdite concentrate sono imputabili alle curve nel circuito e allo strozzatore variabile, mentre quelle distribuite sono approssimate come se i restanti tratti di circuiti siano presi rettilinei, quindi sia ha:

$$R = R_c + R_d \quad (3)$$

Le perdite concentrate sono esprimibili come:

$$R_c = \beta \frac{W^2}{2} \quad (4)$$

Dove β è il fattore d’attrito dipende dalla geometria. In questo caso si hanno due curve a gomito con raggio tre volte il diametro da mezzo pollice del tubo, le perdite sul cilindro e la perdita della valvola, quindi:

Perdita imbocco cilindro = 0.5

Perdita sbocco cilindro = 1

Perdita curve a 90° = 0.3 + 0.3 = 0.6

Perdita dovuta allo strozzatore variabile in posizione “tutto aperto” = 0.4

Totale = 2.5

Le perdite distribuite invece sono esprimibili come:

$$R_d = \frac{L}{d} \zeta \frac{W^2}{2} \quad (5)$$

Il supporto inferiore del cilindro è realizzato mediante un tubo su cui sono saldate due flange, quella inferiore utile per accoppiarsi con la macchina di prova e quella superiore di supporto al circuito. Il tubo presenta una tornitura interna per accoppiarsi con il corpo del cilindro.

Il sistema presenta un supporto di legno per evitare che il peso del manicotto di alluminio si scarichi completamente sull'attacco filettato del cilindro. Il supporto è collegato alla flangia superiore saldata sul tubo. Il cilindro è mantenuto in posizione sfruttando 7 tiranti filettati M8 che guidano un coperchio che ingabbia il cilindro idraulico e lo mantiene in posizione. Lo stelo del cilindro termina con un codolo filettato accoppiato con una testa a snodo sferica. Questo sistema consente l'applicazione del carico mediante una spina cilindrica calibrata per sposarsi con l'adattatore da montare sulla estremità del cilindro di prova.

La testa a snodo consente di applicare il carico evitando disassamenti e spinte laterali che potrebbero dare luogo a impuntamenti della coppia pistone-cilindro.

In Figura 5 si nota come il tratto di tubo idraulico sia molto ridotto e come, grazie all'uso di raccordi, si riesca ad ottenere una curvatura ampia utile a contenere le perdite di carico nel circuito.

Nel circuito sono presenti tre prese di pressione, due sul manicotto ed una sul raccordo a T sul quale si innesta il tubo idraulico, su ognuna di esse può essere rilevata la pressione mediante un manometro ad attacco rapido.

Un ulteriore raccordo T è inserito nel circuito sul manicotto per alloggiarvi la valvola di spurgo dell'aria necessaria per un corretto riempimento del sistema.

L'apparato di applicazione del campo magnetico è invece mostrato in Figura 6a nella configurazione con campo stimato nel fluido di circa 100mT, ottenuta sfruttando due magneti permanenti.

L'analisi magnetostatica agli elementi finiti è verificata mediante la misura del campo magnetico in aria, effettuata con un gaussmetro Hirst GM05 con sensore ad effetto hall, mostrato in Figura 6b.

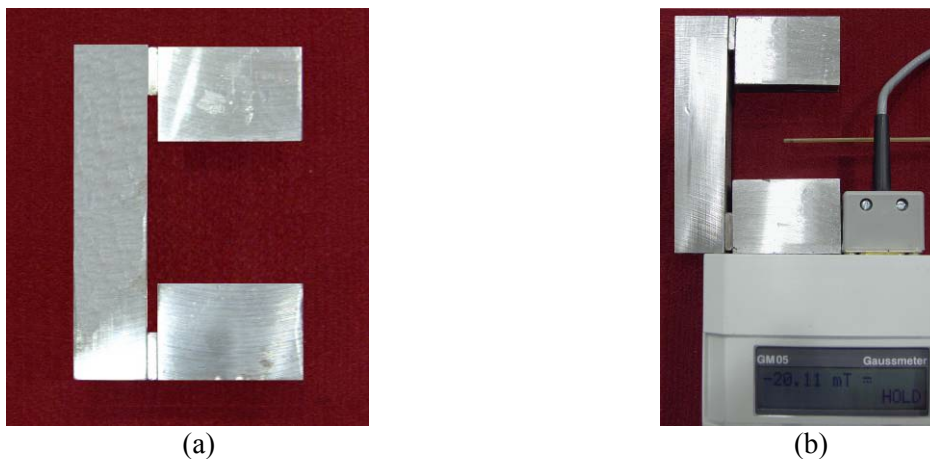


Figura 6 Circuito magnetico a magneti permanenti (a) e misura campo magnetico con gauss metro (b)

In Figura 7 sono riportati i risultati delle analisi con FEMM 4.0 rispettivamente per campi di 100 mT (Figura 7a), 200 mT (Figura 7b), 300 mT, (Figura 7c) e 400 mT (Figura 7d).

L'andamento del campo lungo il diametro del manicotto (linea rossa dal punto A al punto B in Figura 7a-b-c-d) è riportato in Figura 7e mentre la scala è riportata in Figura 7f.

Al fine di valutare l'accuratezza di questa analisi si riporta in Tabella 3 la media sul diametro dei valori stimati mediante analisi FEM, la varianza del valore di campo lungo il diametro scalata rispetto al valor medio, i valori misurati sperimentalmente e i relativi errori sperimentali.

Poiché il campo è misurato usando il gaussmetro, quindi in aria e le analisi FEM sono condotte considerando per il fluido MR il valore di permeabilità magnetica di 5 (Tabella 1) si riporta in Tabella 3 il confronto con le analisi FEM scalate di tale valore.

4. DISCUSSIONE

Il sistema sviluppato presenta alcuni vantaggi che lo rendono interessante rispetto a sistemi di letteratura che valutano l'influenza della pressione sulle proprietà dei fluidi MR a taglio.

Il sistema proposto è economico, può essere utilizzato su macchine di prova standard, non necessita di alimentazione esterna e consente di valutare le proprietà in modalità scorrimento, la più usata nei dispositivi commerciali basati su fluidi MR. Il sistema presenta qualche complicazione operativa solamente in fase di riempimento del circuito, ma una volta espulsa tutta l'aria, grazie al fatto di operare in circuito chiuso, è molto robusto e stabile nelle prestazioni.

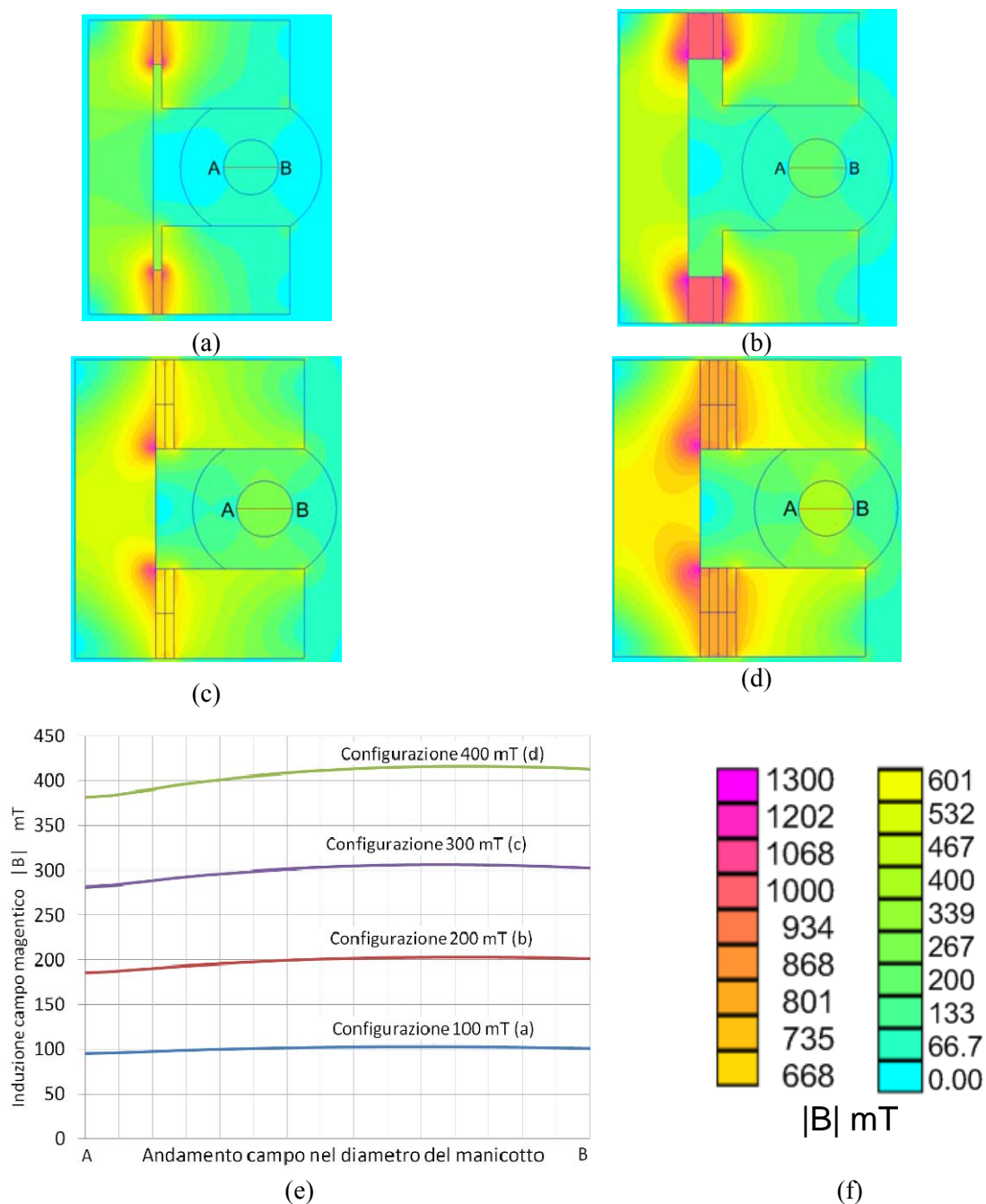


Figura 7 Analisi FEM delle quattro configurazioni di campo: configurazione a 2 magneti (a), configurazione a 4 magneti (b), configurazione a 8 magneti (c), configurazione a 16 magneti (d) Campo all'interno del manicotto (e) Scala di misura (f)

La misura della tensione di scorrimento è indiretta, ricavata mediante le equazioni descritte nella sezione materiali e metodi, ma basandosi su modelli già verificati in letteratura [8], si ritiene possa essere sufficientemente precisa.

La pressione di prova che deve essere variata mediante lo strozzatore posto in serie al manicotto deve essere tarata valutando a vuoto la relazione tra grado di apertura dello strozzatore, perdita di carico del

sistema e pressione interna al manicotto di alluminio. Questa procedura di taratura però è necessaria solo all'inizio della campagna di prove e non complica l'acquisizione sperimentale.

Tabella 3: Confronto numerico sperimentale del campo magnetico

Configurazione		Modulo del campo di induzione magnetica $ B $ (mT)				
Livello DoE	Magneti permanenti	Media Analisi FEM	Varianza % Analisi FEM	Misura con gaussmetro	Stima sperimentale nel fluido MR	Errore percentuale
↓↓	0	0	0	0	0	0
↓ (a)	2	101	2.27%	21	105	-5.23
0 (b)	4	199	2.62%	37	185	7.03
↑ (c)	8	300	2.45%	56	280	6.61
↑↑ (d)	16	407	2.65%	75	375	7.86

La metodologia sfruttata del design of experiment consente di avere una superficie di risposta statisticamente significativa a fronte di un numero di prove non elevatissimo, soprattutto grazie al fatto che ogni prova è molto veloce e la procedura di elaborazione dei dati è facilmente automatizzabile. La progettazione del circuito di applicazione del campo magnetico dimostra che l'uso di software ad elementi finiti FEMM 4.0 produce buona accuratezza nella stima del campo magnetostatico avendo errori sempre inferiori al 10% rispetto ai dati misurati sul campo. Il circuito magnetico si dimostra essere efficiente dal punto di vista della distribuzione spaziale del campo magnetico come si nota dal valore di varianza del campo magnetico (inferiore al 8%, Tabella 3) riscontrato mediante FEMM 4.0.

5. CONCLUSIONI

Il lavoro mostra una apparecchiatura sperimentale per la caratterizzazione di fluidi magnetoreologici in modalità scorrimento sottoposti a pressione. La progettazione del sistema è sviluppata in tre fasi: progetto del sistema meccanico, progetto del circuito magnetico, progetto della campagna sperimentale. L'attrezzatura realizzata è caratterizzata dalla semplicità della componentistica usata e dalla robustezza intrinseca, necessaria per la compatibilità con i fluidi magnetoreologici. Il circuito magnetico progettato mediante analisi FEM è stato validato sperimentalmente e ha evidenziato un'ottima risposta sia come valore medio (errori inferiori al 8%), sia come distribuzione spaziale nel condotto. Il sistema sviluppato si pone come strumento per valutare se l'influenza della pressione possa essere usata come strumento per potenziare gli attuali sistemi basati su fluidi MR.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Jolly, M. R., Bender, J. W., and Carlson, J. D., "Properties and applications of commercial magnetorheological fluids" J. Int. Mat. Sys. Struct., Vol. 10, No. 1, p.5, 1999.
- [2] E. C. Bingham "Fluidity and Plasticity" McGraw-Hill, (1922) New York.
- [3] Jolly, M. R., Carlson, J. D., Munoz, B. C., "A Model of the Behavior of Magnetorheological Materials," Smart Materials and Structures, Vol. 5, p. 607-614, 1996.
- [4] Lord corporation MR 140-CG datasheet.
- [5] X. Z. Zhang, X. L. Gong, and P. Q. Zhang "Study on the mechanism of the squeeze-strengthen effect in magnetorheological fluids" J. of Applied Physics Vol. 66, p. 2359-2364, 1999
- [6] X. Tang, X. Zhang, R. Tao, "Structure-enhanced yield stress of magnetorheological fluids" J. App Phys. 87, 2634 (2000).
- [7] Q. Nguyen, Y. Han, S. Choi and N. Wereley "Geometry optimization of MR valves constrained in a specific volume using the finite element method" Smart Mater. Struct. 16 (2007) 2242-2252.
- [8] U. Lange, L. Richter and L. Zipser "Flow of Magnetorheological Fluids" J. of Intelligent Material Systems and Structures Vol 12; p.161 (2001).
- [9] Finite element Magnetism FEMM 4.0 <http://femm.foster-miller.net/wiki/HomePage>.
- [10] Anderson, M. J. and Whitcomb, P.J "DOE Simplified", (2000), Productivity Press.