

CARATTERIZZAZIONE DI FLUIDI MAGNETOREOLOGICI MEDIANTE GIOGO MAGNETICO

M. Minotti, R. Pucci, P. Salvini^a

^a *Università di Roma 'Tor Vergata', Dipartimento di Meccanica,
Via del Politecnico, 1 – 00133 Roma, e-mail: salvini@uniroma2.it.*

Sommario

Il lavoro ha come oggetto la caratterizzazione sperimentale di fluidi magnetoreologici utilizzando misure di forza applicate su un sistema che sfrutta il principio di un giogo magnetico. In particolare è stato progettato un apparato sperimentale modulare che consente la misura sia della curva di induzione, sia della curva propriamente magnetoreologica che pone in relazione il campo magnetico e lo sforzo di primo scorrimento.

Tale apparato è costituito da un giogo magnetico avente un traferro di misura a spessore controllato al cui interno è predisposto un meato di passaggio. Mediante una macchina di trazione, ed un semplice generatore di corrente controllabile, è possibile effettuare le misurazioni che consentono la caratterizzazione del fluido in prova.

Abstract

An experimental characterization of magnetorheological fluids is performed by the practical application of the principle of the magnetic yoke. In details, a measurement device is designed to evaluate the magnetic induction curve and the magnetorheological characteristic (the tangential stress vs. magnetic field curve).

This device is modular, it is made of a simple traction testing machine and an adjustable current generator. In detail, the device works by using a magnetic gap that can alternatively become a measurement chamber or a fluid flow gap.

Parole chiave: fluido magnetoreologico, misure sperimentali.

1. INTRODUZIONE

Nell'ambito dello studio dei fluidi magnetoreologici (MR), fondamentale importanza riveste la loro caratterizzazione[1]. È infatti necessario conoscere la permeabilità magnetica del fluido, il suo limite di saturazione e la relazione tra lo sforzo di scorrimento ottenibile ed il campo magnetico applicato.

Normalmente tali misurazioni vengono effettuate con apparati dedicati, l'isteresigrafo [2] per la prima e il magnetoreometro per la seconda. Tali apparati presentano sicuramente una precisione adeguata, tuttavia possiedono un'elevata barriera d'ingresso sia economica che tecnologica, in quanto richiedono tecniche specialistiche per il funzionamento ottimale. Inoltre, essendo i fluidi MR materiali con caratteristiche singolari, possono nascere difficoltà di interpretazione dei dati misurati (l'isteresigrafo infatti è dimensionato per materiali *bulk*). Da ultimo, l'elevata precisione andrebbe sempre commisurata con la dispersione dei dati sperimentali.

L'apparato sperimentale progettato si prefigge di ovviare a tali limiti, fondandosi sull'effetto del giogo magnetico e su ulteriori accorgimenti di natura pratica descritti nell'articolo.

2. MISURA DELLA CURVA DI INDUZIONE

Per la misura della curva di induzione è stato realizzato un circuito magnetico, avente un traferro di spessore controllato, in cui si introduce il fluido in prova. Il circuito è diviso in due parti, non solidamente connesse fra loro ma tenute assieme dal circuito magnetico stesso. Su una delle due (Fig. 1) è posto il generatore di forza magnetomotrice, costituito da un avvolgimento di 800 spire, capace di produrre nel circuito un campo d'induzione di 1.3 Tesla (considerando il traferro vuoto). Sull'altra, costituita da due L contrapposte inframezzate dal traferro ma rese non separabili, si chiude il circuito magnetico indotto.

La separazione delle parti anzidette, in corrispondenza della zona di apertura indicata in Fig. 1, richiede una forza proporzionale al quadrato del campo di induzione all'interno del giogo, che a sua volta dipende dalle caratteristiche geometriche e dei materiali che costituiscono il circuito magnetico. In questo modo si riesce ad avere una misurazione indiretta del flusso magnetico effettivamente circolante.

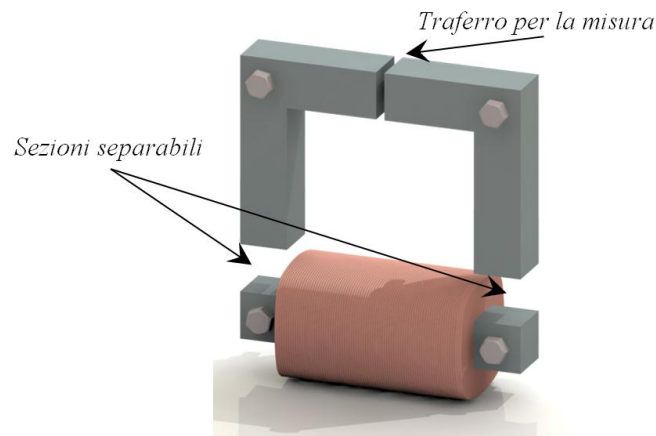


Figura 1. Rappresentazione del giogo magnetico

La forza espressa dal giogo magnetico, misurabile attraverso la massima forza esercitata nel distacco, è esprimibile mediante la:

$$F = \frac{B^2 S}{\mu_0} \quad (1)$$

Ove B è il campo d'induzione magnetica, S è la sezione di contatto di ciascuna delle due aree in separazione e μ_0 la permeabilità magnetica in aria (vuoto). Si ricava quindi il valore di B .

A questo punto risulta agevole il calcolo della permeabilità magnetica in corrispondenza del traferro attraverso la circuitazione completa del sistema magnetico:

$$\mu_0 \mu_{tr} = \frac{l_{tr}}{\frac{nI}{B} - \frac{l_{fe}}{\mu_0 \mu_{fe}} - \frac{l_{ar}}{\mu_0}} \quad (2)$$

Il campo magnetico che pertanto agisce nel traferro è dato dalla relazione:

$$H = \mu_0 \mu_{tr} B \quad (3)$$

Che consente la determinazione di un punto della curva di induzione magnetica.

Il procedimento di misura consta nell'applicazione di una corrente alla bobina, nella misurazione della forza di distacco ed il calcolo dei valori di B e di H . La prova viene ripetuta per diversi valori di corrente. La regressione lineare si effettua considerando tutti i punti misurati prima che venga

raggiunta la condizione di saturazione magnetica. È così possibile ricavare la legge $B(H)$ caratteristica del fluido che presenta una netta variazione della pendenza al raggiungimento della condizione di saturazione.

Tuttavia altri problemi insorgono nell'effettuazione della prova, che non prevede un flusso continuo. Infatti, le particelle tendono a migrare durante la prova e a ordinarsi secondo strutture pseudocolonnari che modificano le proprietà magnetiche del fluido rispetto a quelle possedute in condizione di moto continuo. Per evitare questo fenomeno si è pensato di incrementare la viscosità del fluido mantenendone tutte le proprietà che hanno effetto sul magnetismo.

Per riprodurre le condizioni operative del fluido, la sospensione colloidale è stata ottenuta aumentando la viscosità dell'olio portatore fino al punto da inibire il movimento delle particelle per mutua attrazione all'interno del portatore e "congelarne" la posizione in maniera casuale, come si avrebbe se il fluido fosse in movimento continuo. Infatti, in condizioni di funzionamento, in seno al fluido avvengono due fenomeni: creazione di strutture colonnari di particelle e distruzione di tali strutture in seguito al movimento del fluido che è sempre ortogonale alla direzione del campo magnetico (e quindi alle strutture colonnari succitate) [3]. Pertanto, in prima approssimazione, la disposizione delle particelle in seno al fluido risulta essere abbastanza casuale. Preliminarmente, è stato verificato che il portatore a viscosità maggiore avesse le medesime caratteristiche magnetiche del fluido normalmente utilizzato nelle applicazioni pratiche.

Sono state infine misurate le curve di induzione di provini a diversa percentuale di contenuto in polvere di ferro e i risultati ottenuti sono stati confrontati con un modello analitico validato sperimentalmente mediante isteresigrafo.

2.1 Progettazione dell'apparato sperimentale

I dati in ingresso al progetto sono il campo magnetico desiderato ($B_{target}=1.3 \text{ Tesla}$), la corrente e il potenziale massimo forniti dal generatore (5 A e 32 V nel caso in esame), e la geometria dei rami del circuito magnetico. Una difficoltà da non sottovalutare è legata al reperimento di un materiale con proprietà magnetiche rigorosamente note. La scelta più ovvia verso cui ci si è indirizzati è stata l'adozione di pacchi di lamine ferrose che sono normalmente utilizzati nei trasformatori, pacchi opportunamente tagliati ed adattati.

Si consideri un circuito magnetico elementare con traferro, come da Fig. 2:

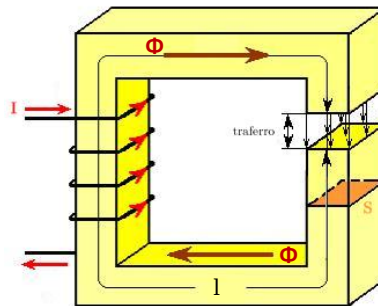


Figura 2: Circuito magnetico elementare

applicando la legge di Hopkinson si ottiene l'equazione del circuito magnetico:

$$nI_{max} = \Phi R = \Phi \sum_i \frac{1}{\mu_0 \mu_{R_i}} \frac{l_i}{S_i} \quad (4)$$

ove il flusso magnetico è rappresentato dalla:

$$\Phi = B_{target} S \quad (5)$$

essendo μ_i la permeabilità magnetica del materiale di cui è costituito il ramo i -esimo, l_i la lunghezza del ramo i -esimo, S_i la sezione del ramo i -esimo. Dal momento che la sezione è presa costante in tutto il circuito, l'equazione può essere semplificata nella:

$$nI_{max} = B_{target} \sum_i \frac{l_i}{\mu_0 \mu_i} \quad (6)$$

In tale equazione è tutto noto (poiché la geometria dei rami deriva, come detto, dalle dimensioni commerciali delle lamine per trasformatori disponibili di cui è nota la permeabilità magnetica), ad eccezione di n e della permeabilità magnetica relativa del fluido magnetoreologico. Il problema è facilmente aggirabile, considerando la presenza di aria nel traferro ($\mu_{aria}=1$), si ottiene infatti un flusso magnetico che risulterà leggermente sovradimensionato. Si può risolvere l'equazione ottenendo il numero di spire, 800 nel nostro caso. Il diametro del filo scelto è il massimo compatibile con le dimensioni dei rami del circuito magnetico, in particolare $d_{filo}=1$ mm. Infine si è verificato che il potenziale del generatore disponibile (32 V), fosse sufficiente a far circolare i 5 A necessari (ovvero che la resistenza dell'avvolgimento fosse inferiore a 6.4 Ω). Completato il progetto, è stato modellato il tutto in ambiente CAD tridimensionale per ottenere una valutazione sulle dimensioni disponibili per il montaggio sia della prova di permeabilità magnetica statica, sia per le prove di scorrimento del fluido magnetoreologico. L'andamento del flusso del campo magnetico è stato valutato al suo interno mediante analisi agli elementi finiti come illustrato in Fig. 3.

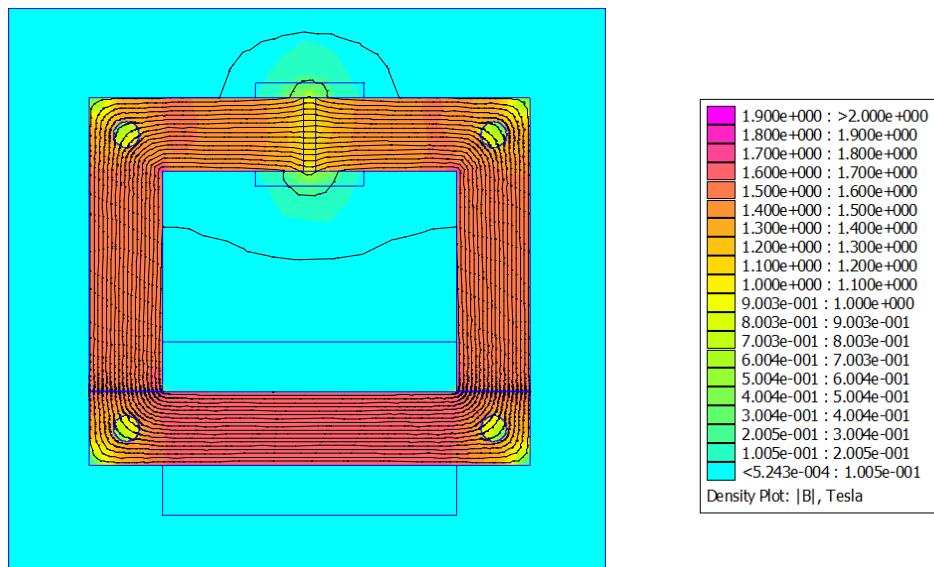


Figura 3: *Contour* del campo di induzione B all'interno dell'intero circuito magnetico

È risultato possibile, come auspicato, ottenere un campo di almeno 1.3 *Tesla* all'interno del traferro. Realizzato il sistema, il campo stesso dipenderà esclusivamente dalla corrente fornita alla bobina e dalla permeabilità magnetica risultante nel traferro che, in questo caso, si ritrova ad essere l'unica incognita, a patto di poter misurare il campo B .

La misurazione di B è effettuabile mediante la valutazione della forza di attrazione in una sezione qualsiasi del circuito magnetico (questo poiché tale circuito è stato progettato in modo tale da avere la medesima sezione in ogni punto, e quindi un campo B costante al suo interno, come da Fig. 3)

Il sistema completo e montato, pronto per gli afferraggi della macchina di trazione, è visibile in Fig. 4. In essa si vede rappresentata una seconda struttura chiusa che sovrasta il traferro. Si noti come tale struttura sia in alluminio per non variare il circuito magnetico in esame. Inoltre è stato necessario bloccare il traferro strutturalmente, sempre utilizzando lamine di alluminio, in modo da realizzare un giogo rigido alla trazione.

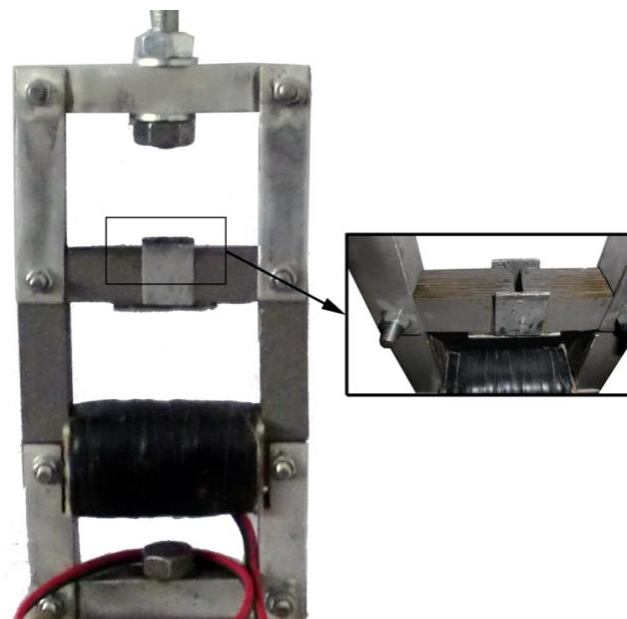


Figura 4: Montaggio del sistema per la trazione e dettaglio del traferro di misura

2.2 Misurazione delle curve d'induzione

Allo scopo di misurare la permeabilità magnetica dei fluidi magnetoreologici, evitando però la formazione di strutture colonnari, sono stati preparati dei campioni di fluido utilizzando le medesime proporzioni e granulometria delle particelle magnetiche presenti nei fluidi magnetoreologici, utilizzando come portatore (che sostituisce l'olio) una resina normalmente utilizzata in applicazioni odontoiatriche. Si sono così ottenute delle paste malleabili (poiché la presenza delle particelle di ferro impediva alle catene polimeriche di unirsi in modo completo), con cui si è occluso il traferro di misura.

Il procedimento di misurazione è finalizzato all'ottenimento di una tabella che correli la corrente imposta alla bobina con la forza massima esplicita dal giogo magnetico prima del distacco. Il metodo per ricavare ciascuna coppia di valori di forza e corrente è articolato nei seguenti passi:

1. Si portano a contatto i due tratti del giogo magnetico.
2. Si applica una prefissata intensità di corrente.
3. Si misura la forza massima esplicita dalla macchina di trazione fino all'avvenuto distacco del giogo.
4. Ripetizione della prova finché non sia raggiunta la saturazione magnetica sul circuito e la pendenza riprenda l'andamento tipico della permeabilità magnetica dell'aria.

Il risultato è la trascrizione dei dati in una curva $B(H)$ che transiterà per l'origine degli assi.

Il valore d'induzione magnetica raggiungibile con l'apparato (1.3 Tesla), permette di individuare il campo di saturazione; la zona delle curve per valori superiori dovrà quindi avere pendenza costante, e pari proprio alla permeabilità magnetica del vuoto. Nelle figure che seguono le rette post saturazione sono disegnate attraverso una semplice estrapolazione lineare.

Nella Fig. 5 sono rappresentate le curve di induzione magnetica misurate su cinque diversi fluidi magnetoreologici, ciascuno caratterizzato da una diversa composizione della sospensione ferrosa.

I fluidi in esame, tutti realizzati ad hoc, sono indicati dalle due lettere MR a cui segue la percentuale di sospensione ferrosa e il suffisso STD per indicare una dimensione media delle particelle di $5 \mu m$, suffisso B per dimensione media di $2 \mu m$.

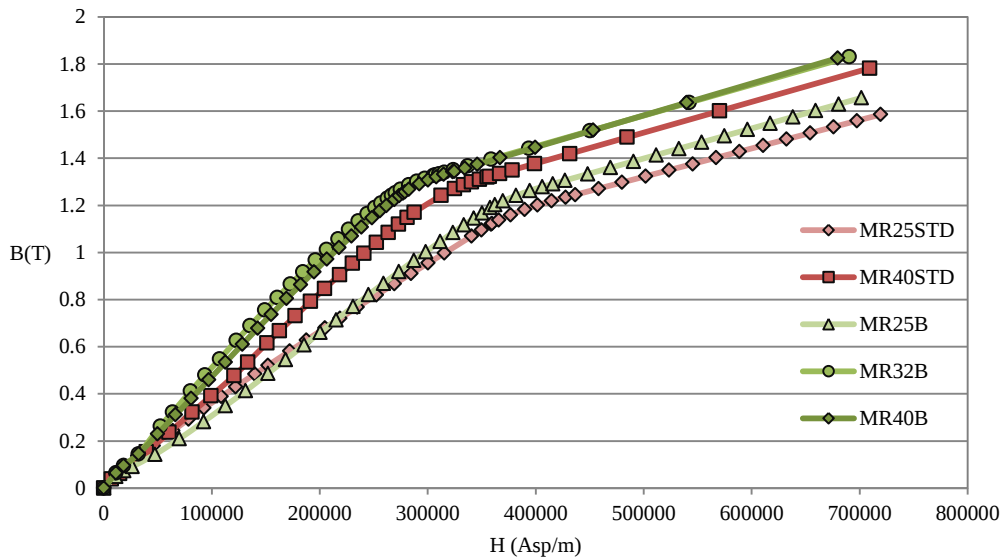


Figura 5: Curve di induzione per i campioni di fluido MR

La plausibilità delle curve si può evincere dal confronto con quelle tracciate con un modello teorico presentato in [4]. I fluidi prescelti per questo tipo di confronto sono gli MRXXSTD, più simili per composizione a quelli previsti dal modello.

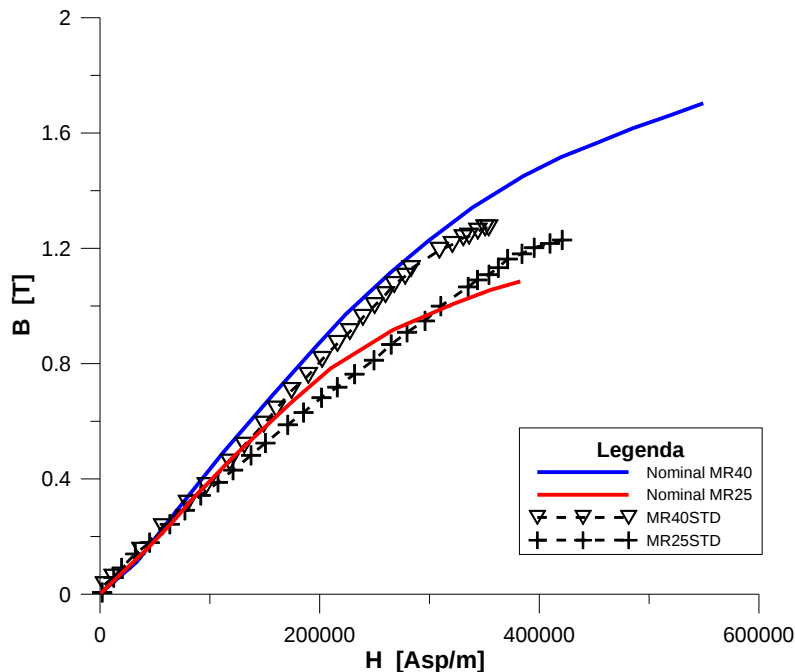


Figura 5: Confronto tra modello teorico (linee continue) e valori sperimentali (punti isolati)

Appare evidente che a parità di percentuale di ferro i valori sono assolutamente confrontabili; i leggeri scostamenti visibili sono ascrivibili al fatto che il modello prevede una perfetta equispaziatura delle particelle non realizzabile sperimentalmente. Scopo principale di queste prove è l'individuazione del punto di saturazione di ciascun fluido magnetoreologico, poiché è proprio questo valore che pone un limite al suo utilizzo. Ulteriori incrementi del campo magnetico oltre la saturazione, non determinano apprezzabili variazioni nello sforzo di scorrimento (e quindi nella viscosità effettiva), poiché la forza che tiene unite le sottostrutture di particelle rimane pressoché inalterata.

La valutazione della curva che pone in relazione lo sforzo di taglio al campo magnetico è l'argomento del prossimo paragrafo.

3. LA MISURA DELLA CURVA MAGNETOREOLOGICA

Avendo messo a punto un dispositivo capace di generare campi d'induzione di 1.3 *Tesla*, dal momento che tutti i fluidi esaminati hanno dimostrato di avere un punto di saturazione inferiore a tale valore, si è deciso di progettare un modulo apposito che convertisse il nostro apparato di misura della curva $B(H)$ in un magnetoreometro.

3.1 Progettazione dell'apparato sperimentale

Poiché i fluidi magnetoreologici sono per lo più utilizzati in modalità *Pressure Driven Flow* [5], si è scelto di ricreare le medesime condizioni per la misurazione delle proprietà magnetoreologiche durante il flusso del fluido. Una pompa a stantuffo, collegata alla macchina di trazione per ottenere un avanzamento a velocità costante, produce un flusso all'interno del traferro di misura.

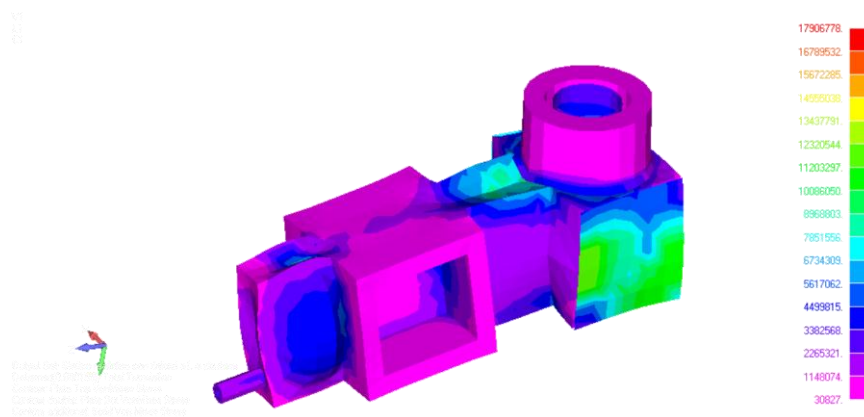


Figura 6: Analisi FEM del raccordo realizzato mediante stereolitografia

L'applicazione del campo magnetico, genera una resistenza al flusso che si traduce in un aumento di pressione nella pompa misurabile mediante un manometro (si potrebbe misurare anche con la macchina di trazione, ma il risultato conterrebbe un'aliquota non estrapolabile dovuta alla variazione di attrito delle tenute).

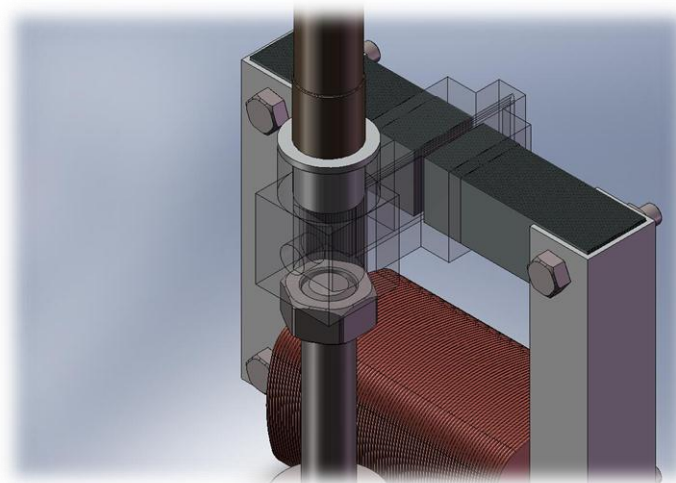


Figura 7: In trasparenza si nota il raccordo in ABS

Si è reso quindi necessaria la costruzione di un raccordo che collegasse la pompa al traferro di misura. Stante la complicazione del pezzo stesso, difficile da realizzare mediante lavorazioni meccaniche, si è scelta la strada della prototipazione rapida, o stereolitografia, che ha imposto un attento calcolo del raccordo in esame per sostenere le pressioni sperimentate. I macchinari per la prototipazione rapida

lavorano con plastiche di tipo ABS; si è quindi disegnato il pezzo che doveva fungere da raccordo mediante CAD, e si è successivamente proceduto ad una verifica mediante elementi finiti. Si passa quindi ad illustrare il procedimento di acquisizione dei dati e la loro analisi.

3.2 Misurazione curve $\tau(B)$ e $\tau(H)$

In questo caso il procedimento di misura è volto a ottenere, per ciascun fluido, una coppia di valori di pressione e corrente. Da queste si possono indirettamente dedurre le grandezze d'interesse, come di seguito illustrato.

Imponendo un dato valore di corrente alla bobina, nel circuito si instaura un flusso magnetico dipendente dalla permeabilità magnetica del fluido in esame. Tale flusso, cui corrisponde un campo magnetico scalato della sezione del circuito (che ricordiamo essere volutamente uguale in ogni posizione del circuito stesso), fa variare la resistenza del fluido e quindi la pressione interna al circuito idraulico della pompa.

Lo sforzo di scorrimento si ricava dalla pressione semplicemente mediante un fattore geometrico:

$$\tau = p \frac{h}{2L} \quad (7)$$

essendo p la pressione misurata, h lo spessore della zona magnetizzata ed L la sua lunghezza.



Figura 8: Magnetoreometro con *contour* del campo B sovrapposto

Per ricavare dalla corrente il valore di B e il valore di H , il quale si può calcolare nota la permeabilità magnetica di tutti i tratti del circuito, si potrebbe procedere per via analitica, ma ciò risulterebbe non preciso a causa del fenomeno della saturazione, che impone di tenere conto della non linearità del comportamento. Si è pertanto scelto di ricorrere ancora una volta a un calcolo numerico basato sulle differenze finite, che permette di importare le curve di permeabilità magnetica di ciascun olio e di calcolare sia il campo di induzione che il campo magnetico in funzione della corrente.

Il procedimento di misura, dopo aver riempito la pompa con un campione del fluido, prevede le seguenti azioni:

1. Movimentazione a bassa velocità (5 mm/min) della pompa; questo permette di effettuare una misura quasi statica riducendo così le perdite di carico dovute alla viscosità naturale che si manifesta nei cambi di sezione (stimate in $6.7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, e dunque del tutto trascurabili ai fini della misura in corso).

2. Regolazione del valore di corrente tenendo sotto controllo il valore della pressione; l'intensità di corrente è incrementata per step di 0.5 A . Essendo il manometro analogico e il generatore digitale, tale modo di procedere permette di ridurre gli errori di lettura (teoricamente nulli per il generatore, limitati al solo errore di parallasse nel caso del manometro).
3. Raggiunto il valore di corrente di saturazione, si procede in senso inverso, quindi scendendo di 0.5 A per step. In tal modo si ottengono due valori per configurazione di misura ma si può valutare anche la presenza di eventuali fenomeni di isteresi.



Figura 9: Efflusso di un fluido MR durante le prove

L'elaborazione dei dati ha condotto ai grafici di Figg. 10 e 11, che sono delle vere e proprie curve di progetto, in quanto forniscono la correlazione tra il campo magnetico introdotto (ossia l'intensità di corrente imposta) e lo sforzo tangenziale correlato al solo effetto megnetoreologico.

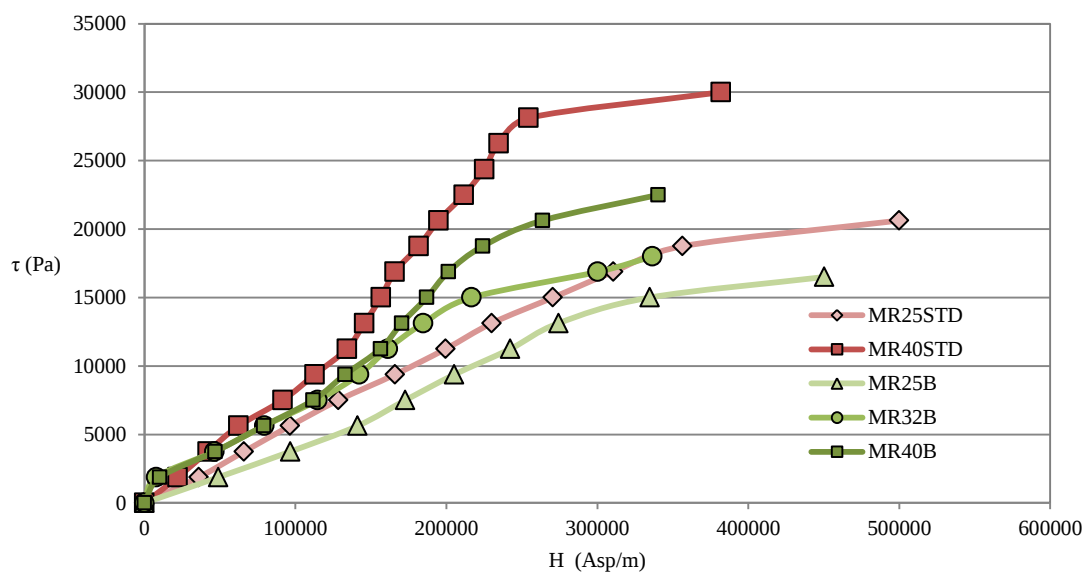


Figura 10: Sforzo di scorrimento in funzione del campo magnetico

La Fig. 10, ove l'ascissa è H ha un'immediata correlazione con l'intensità di corrente, la Fig. 11 è in funzione di B il cui valore dipende anche dall'intero circuito magnetico realizzato.

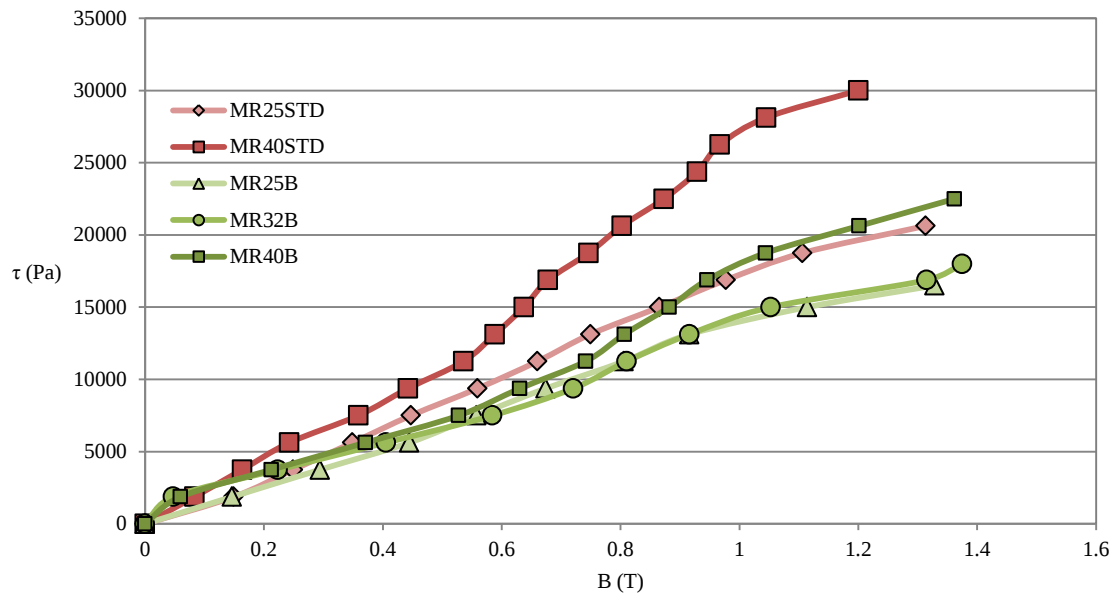


Figura 11: Sforzo di scorrimento in funzione del campo di induzione magnetica

4 CONCLUSIONI

In conclusione sono stati descritti due apparati sperimentali per la caratterizzazione delle proprietà magnetiche dei fluidi magnetoreologici, sia per quanto attiene la misura della permeabilità magnetica, sia per la misura della variazione della viscosità in funzione del campo d'induzione magnetica presente. Tali sistemi di misura hanno permesso di porre a confronto diverse combinazioni di miscelazione per fluidi con proprietà magnetoreologiche. In effetti, in fase di progettazione di uno smorzatore ad effetto magnetoreologico, si può intervenire sia sul circuito di induzione magnetica, sia sulle proprietà stesse del fluido facendo variare il dosaggio dei componenti.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Spaggiari, E. Dragoni, *Sistema di caratterizzazione per fluidi magnetoreologici: effetto della pressione in modalità scorrimento*, Atti XXXVIII Convegno AIAS, Torino, 2009.
- [2] Marconi Luca *Rilevazione elettronica del ciclo di isteresi magnetico: apparecchiatura e metodi*. Tesi di laurea Università degli Studi di Camerino, Facoltà di Scienze e Tecnologie, 2008.
- [3] A. Gómez-Ramírez, P. Kuzhir, M. T. López-López, G. Bossis, A. Meunier, and J. D. G. Durán, *Steady shear flow of magnetic fiber suspensions: Theory and comparison with experiments*, J. Rheol. **55**, 43, 2011.
- [4] Dixon John C. *The Shock Absorber Handbook*. SAE International, ISBN-10: 0768000505, 2007.
- [5] Mark R Jolly, J David Carlson and Beth C Muñoz, *A model of the behaviour of magnetorheological materials*, Smart Mater. Struct. **5**, 607, 1998.