

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"
Corso di Laurea in Fisica

TESI DI LAUREA

Dinamica di gocce di ferrofluido in un campo magnetico

Laureando:
Andrea Borghi

Relatore:
Prof. Giampaolo Mistura

Correlatore:
Dr. Davide Ferraro

A chi ha creduto in me

Abstract

In questa tesi viene studiato lo scivolamento su piano inclinato di gocce di ferrofluido in presenza di un campo magnetico orizzontale e trasversale al piano del moto. I ferrofluidi sono soluzioni colloidali che, grazie alla presenza di nanoparticelle ferromagnetiche in sospensione, si polarizzano fortemente in presenza di un campo magnetico esterno, rendendo possibili nuove tecniche di controllo delle proprietà delle gocce come forma, viscosità e moto. I substrati per questo studio sono formati da superfici porose impregnate con lubrificante grazie alle quali è stato possibile ridurre al minimo la resistenza al moto complessiva. La dinamica delle gocce è stata studiata a diverse intensità di campo grazie ad un elettromagnete usato per generarlo. Lo scopo finale dell'esperimento è verificare se la velocità di scivolamento delle gocce cambia al variare del campo magnetico presente.

La tesi è composta da un'introduzione dove vengono spiegati i concetti necessari, un capitolo dedicato a strumentazione e metodologia sperimentale utilizzate, un capitolo sui risultati sperimentali e le conclusioni.

Indice

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Introduzione | 1 |
| 1.1 | Ferrofluidi | 1 |
| 1.2 | Effetto Magnetoviscoso | 2 |
| 1.3 | Superficie Impregnata di Lubrificante LIS | 3 |
| 2 | Strumentazione e metodologia sperimentale | 5 |
| 2.1 | Elettromagnete | 5 |
| 2.2 | Preparazione LIS e caratterizzazione | 7 |
| 2.3 | Ferrofluido | 7 |
| 2.4 | Metodologia di misura | 8 |
| 3 | Risultati sperimentali | 9 |
| 3.1 | Scelta diluizione ferrofluido e volume gocce | 9 |
| 3.2 | Misure di velocità di scivolamento | 10 |

Elenco delle figure

| | |
|---|----|
| 1.2.2 TEM di agglomerati di nanoparticelle ed effetto magneto viscoso | 3 |
| 1.3.1 Esempio di goccia su LIS | 4 |
| 2.1.1 Sistema di riferimento e caratterizzazione campo magnetico . | 6 |
| 2.4.1 Schema apparati sperimentali | 8 |
| 3.1.1 Deformazione di gocce di ferrofluido nell'elettromagnete . . . | 10 |
| 3.2.1 Esempi di leggi orarie | 11 |
| 3.2.2 Velocità di scivolamento in funzione della corrente | 12 |

ELENCO DELLE FIGURE

Capitolo 1

Introduzione

In questo capitolo vengono illustrate brevemente le proprietà dei ferrofluidi e i loro comportamenti quando immersi in un campo magnetico esterno, per poi introdurre le Superfici Impregnate di Lubrificante (LIS) e le loro caratteristiche.

1.1 Ferrofluidi

I ferrofluidi sono sospensioni colloidali stabili di nanoparticelle ferromagnetiche di varie caratteristiche chimiche, forme e dimensioni che conferiscono al liquido complessivo proprietà superparamagnetiche, ossia presentano una magnetizzazione molto elevata. A differenza dei solidi ferromagnetici però, non presentano isteresi né magnetizzazione residua una volta rimosso il campo magnetico a causa dell'agitazione termica. Una sospensione colloidale è in generale una miscela tra un liquido macroscopico (matrice) e particelle solide di dimensioni submicrometriche (fase dispersa). Per la presenza di queste particelle il liquido si presenta di colore nero rendendo impossibile studiarne la dinamica interna tramite luce visibile. In assenza di campi magnetici esterni le particelle disperse si comportano come le molecole del liquido in cui sono sospese. Introducendo il campo magnetico, ogni particella si comporta come un piccolo magnete permanente rendendo possibile controllare le caratteristiche macroscopiche della goccia di ferrofluido come forma [1], viscosità [2], moto [3] ecc. Grazie a queste possibilità di controllo al variare del campo magnetico e ai bassi costi di produzione, i ferrofluidi sono utilizzati ampiamente nei dispositivi acustici e ottici, nell'inchiostro per stampanti, nella produzione di vernici capaci di assorbire radiazione elettromagnetica, nelle sospensioni dinamiche di alcune automobili. In figura 1.2.1.a si può osservare un agglomerato di nanoparticelle per un ferrofluido a base di ossido di ferro.

Perché tale sospensione risulti stabile è necessario stimare e rapportare le energie presenti nel sistema. Per semplificare la trattazione si considerano sferiche tutte le particelle del soluto ($V = \pi d^3/6$) con diametro medio d accettabilmente disperso attorno ad esso. Le forze presenti sono la gravità, l'agitazione termica, l'interazione tra campo e dipolo e la repulsione elettrostatica tra nanoparticelle ionizzate per ridurre la loro aggregazione. Per evitare che le nanoparticelle precipitino, è necessario che l'energia termica ($k_B T$) sia maggiore dell'energia tra campo e dipolo (BMV) il che si traduce su una condizione massima sul diametro delle particelle dell'ordine della decina di nanometri. Se non si opera a temperature estremamente basse, l'energia termica risulta sempre maggiore di quella gravitazionale contrastando la deposizione delle particelle verso il basso. Stimando l'energia di attrazione tra dipoli, che può essere ridotta ricoprendo le particelle con un tensioattivo o ionizzandole, e quella termica si ottiene un limite superiore per i diametri molto simile a quello trovato in precedenza. Possono essere considerati quindi stabili i ferrofluidi a temperatura ambiente con particelle disperse di dimensione non superiore ai 10 nm.

1.2 Effetto Magnetoviscoso

Per effetto magnetoviscoso si intende un cambiamento della viscosità di un ferrofluido dovuto al campo magnetico applicato. E' stato descritto per la prima volta nel 1961 [4] nel caso di una sospensione diluita di nanoparticelle di cobalto, per essere poi studiato ampiamente per l'utilizzo nell'industria meccanica.

La spiegazione teorica del cambiamento di viscosità è basata sull'opposizione alla rotazione libera delle particelle: in assenza di campo magnetico, i momenti di dipolo delle particelle sono disposti casualmente lasciandole libere di ruotare. Introducendo il campo e di conseguenza una direzione privilegiata nello spazio, le particelle allineano i loro momenti di dipolo parallelamente ad esso. L'agitazione termica e l'attrito viscoso causato dal moto applicano ad ogni particella un momento meccanico che tende a ruotarle. Tale rotazione risulta ostacolata dal momento torcente magnetico che si presenta quando i dipoli sono disallineati [5] portando macroscopicamente ad un cambiamento di viscosità del liquido. Questa spiegazione teorica risulta efficace solo per ferrofluidi con particelle grandi e molto diluiti in quanto non si considera l'interazione reciproca tra particelle. Per sospensioni più concentrate dove tale interazione non risulta più trascurabile, la variazione di viscosità viene attribuita alla formazione di agglomerati di nanoparticelle come si vede in figura 1.2.1.a-b [5]. L'effetto complessivo risulta quindi inversamente proporzionale allo *shear rate*, $\dot{\gamma} = u/h$ con u e h velocità e dimensione caratteristiche del sistema, in quanto l'elevato movimento sfavorisce la formazione di cluster. Come si vede nelle figure 1.2.1.c-d, dove

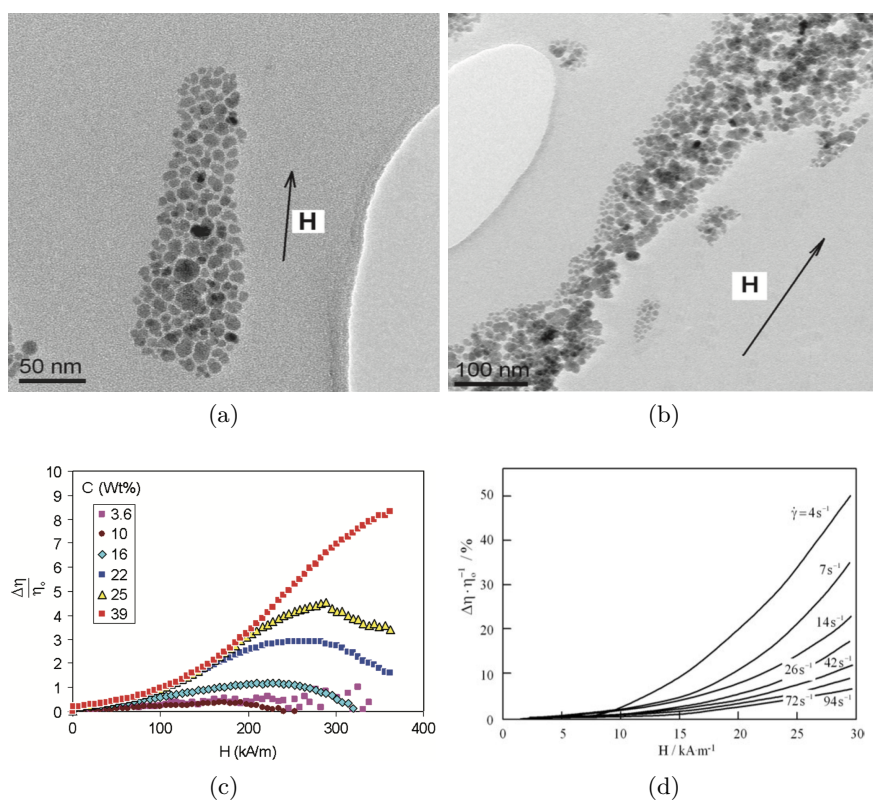


Figura 1.2.1

Figura 1.2.2: Sopra: Due esempi di agglomerati di nanoparticelle ottenute tramite microscopio elettronico a trasmissione (TEM) [6]. Sotto: Esempio di effetto magnetoviscoso per un ferrofluido a diverse concentrazioni (c) e *shear rates* (d) [6] [7].

è esposto il comportamento del ferrofluido a diverse concentrazioni e *shear rates*, il comportamento generale può essere molto vario: per basse concentrazioni l'effetto risulta molto debole, in altri casi può saturare o addirittura diminuire al crescere del campo magnetico, il tutto risulta inoltre mascherato parzialmente dal moto complessivo della goccia. Considerando come h la dimensione della goccia e u la loro velocità media si ottiene $\dot{\gamma} \sim 15 \text{ s}^{-1}$ che riduce significativamente il range di viscosità del ferrofluido.

1.3 Superficie Impregnata di Lubrificante LIS

Le superfici impregnate di lubrificante (LIS) consistono di due parti: una superficie porosa o con rugosità tali da accogliere un lubrificante che riempie lo spazio tra le imperfezioni in modo da rimanere stabilmente a

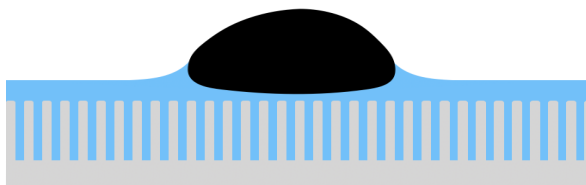


Figura 1.3.1: Esempio di goccia su LIS

contatto con lo strato solido. Questo tipo di superficie prende ispirazione in natura da una pianta carnivora (*Nepenthes*) che sfrutta una struttura di micro peli impregnata di soluzione oleosa per far scivolare gli insetti fino al fondo dell'ascide dove vengono poi assimilati dalla pianta. Il vantaggio di questo approccio è che una superficie liquida risulta priva di imperfezioni morfologiche e chimiche fino alla scala molecolare il che porta ad una drastica riduzione degli attriti presenti. Inoltre, in base al liquido scelto come impregnante si possono ottenere LIS capaci di interfacciarsi con praticamente qualsiasi altro liquido.

Su tali superfici le gocce iniziano il movimento per angoli di inclinazione molto piccoli, indipendentemente dalla densità superficiale delle rugosità [8]. Nella rappresentazione in figura 1.3.1 si può vedere come la goccia galleggi sull'impregnante senza toccare la superficie solida. La presenza di due interfacce (goccia-olio e olio-solido) complica molto la dinamica dello scivolamento delle gocce [9]. La dissipazione di natura viscosa avviene nella goccia, dovuta ai moti interni del liquido, nell'olio, che viene parzialmente spostato al passaggio della goccia e nel moto del menisco acqua-olio. La predominanza di un effetto rispetto all'altro dipende dal rapporto tra le viscosità di goccia η_g e olio η_o . Se, come nel nostro caso, $\eta_g < \eta_o$, la dissipazione ha luogo principalmente nell'olio, in particolare nello strato sottostante la goccia e nel menisco che la circonda e che si sposta con essa. In [9] è stato studiato questo regime ottenendo una formula per la velocità della goccia pari a $U \sim \frac{\sin^{3/2}(\alpha)}{\eta_o}$ con α angolo di inclinazione della superficie. Nel nostro esperimento il lubrificante è circa 5 volte più viscoso del ferrofluido in assenza di campo.

Risulta quindi possibile che il cambiamento di viscosità avvenga, ma che la variazione non sia abbastanza significativa per la transizione ad un regime dove $\eta'_g > \eta_o$ in cui la velocità di scivolamento risulta diversa $U \sim \frac{\sin(\alpha)}{\eta'_g}$. Scopo dell'esperimento è osservare se applicando un campo magnetico, si cambia il regime dinamico delle gocce a causa dell'aumento di viscosità del ferrofluido.

Capitolo 2

Strumentazione e metodologia sperimentale

L'apparato di misura è stato assemblato in modo da visualizzare il moto di scivolamento di gocce di ferrofluido su una superficie inclinata di 30° in di un campo magnetico orizzontale, perpendicolare alla direzione di moto delle gocce. Dato che l'elettromagnete presenta una magnetizzazione residua di circa 10 mT, sono stati allestiti due apparati gemelli, differenti solamente per la videocamera utilizzata e la sua posizione rispetto al moto delle gocce.

2.1 Elettromagnete

L'elettromagnete è composto da due espansioni polari cilindriche composte da un materiale ferromagnetico con bassa isteresi che terminano con due tronchi di cono. Le due espansioni sono circondate da spire dove può scorrere corrente per indurre il campo magnetico. Il generatore utilizzato può produrre fino a 20 A di corrente continua a cui corrisponde un campo magnetico di circa 1 T. Il campo generato è stato caratterizzato tramite misure sistematiche effettuate con un Gaussmetro preciso fino al centesimo di mT. La zona interessante risulta essere il cilindro compreso tra le due espansioni. Le misure di caratterizzazione sono state effettuate utilizzando dei movimentatori micrometrici per muovere il Gaussmetro. Dalle figure 2.1.1 si può vedere come lungo l'asse di simmetria (b) il campo presenti una piccola variazione minore dell'1%, mentre dai grafici (c) e (d) si può assumere valida l'ipotesi di simmetria cilindrica del campo, in quanto il valore misurato nella zona centrale è lo stesso misurato nelle due direzioni ortogonali. Dalle misure di caratterizzazione si può quindi considerare il campo magnetico uniforme in una zona centrale cilindrica di raggio circa 1cm.

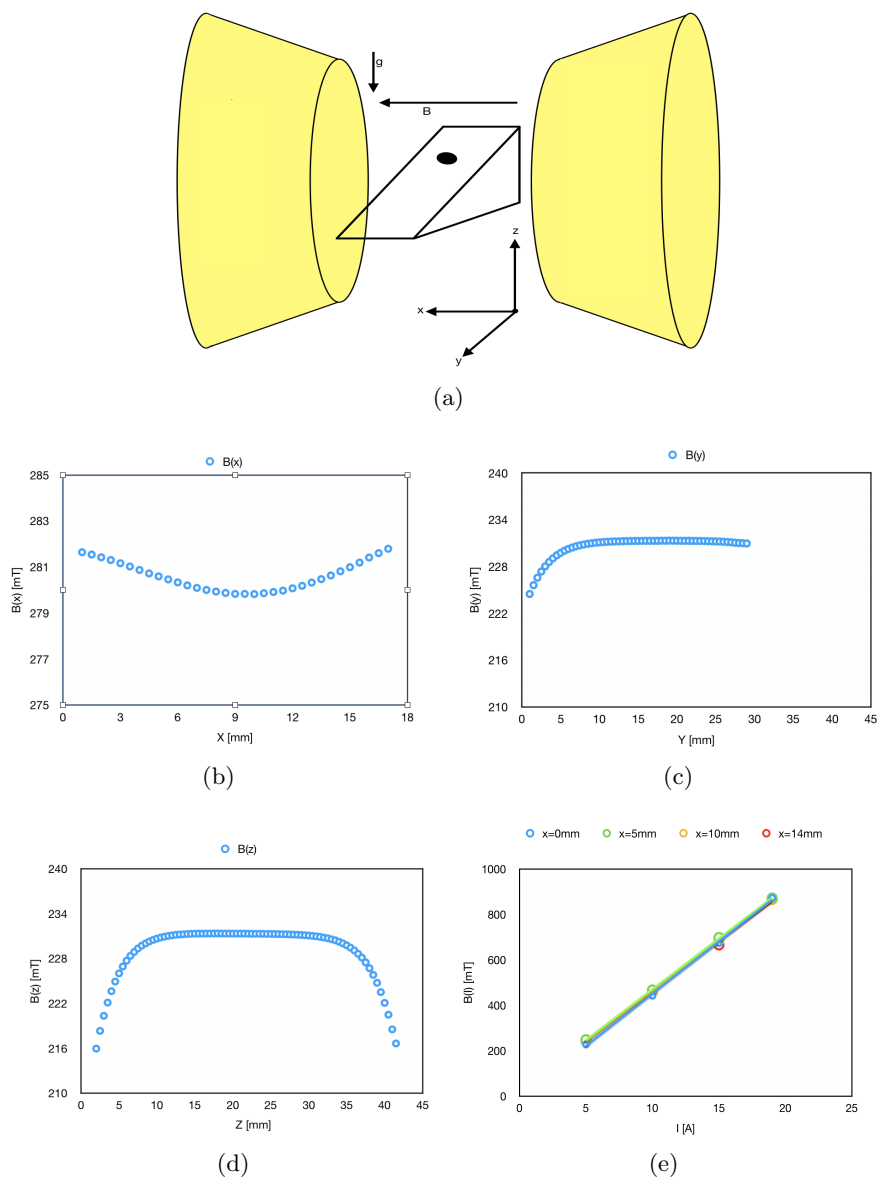


Figura 2.1.1: a) Schema dei magneti e del sistema di riferimento per la caratterizzazione del campo magnetico; b) andamento del campo lungo l'asse di simmetria del sistema ($I=10$ A); c-d) andamento del campo in direzione verticale e orizzontale ($I=5$ A); e) verifica della linearità del campo in funzione della corrente immessa nel circuito.

2.2 Preparazione LIS e caratterizzazione

La superficie su cui scorre la goccia di ferrofluido è costituito da un coprivetrino in vetro su cui è stata prodotta la LIS. Si è scelto tale tipo di superficie in quanto si è rivelata la migliore per lo scorrimento di gocce in generale. La produzione inizia tagliando i coprivetrini della forma desiderata. Dopo essere stati puliti con acetone e etanolo, vengono posati su una piastra preriscaldata. Una volta raggiunti i 300°C , si versa dell'olio siliconico (viscosità 5 cSt) sopra di essi in modo tale che rimangano completamente ricoperti. Passati 10 minuti vengono rimossi dalla piastra, lasciati raffreddare e puliti nuovamente con acetone e etanolo così da rimuovere ogni residuo di olio che non ha aderito alla superficie. In seguito, le superfici vengono impregnate con lo stesso olio usato in precedenza lasciandole 20 minuti in posizione orizzontale per favorire l'assorbimento e 10 in posizione verticale per rimuovere l'olio in eccesso. Successivamente, ogni LIS è stata caratterizzata attraverso misure di velocità ad angolo fissato di cinque gocce d'acqua da $2 \mu\text{L}$ ciascuna. In seguito è stata ripetuta tale procedura per LIS reimpregnate ottenendo risultati compatibili ai precedenti. In tabella 2.1 sono riportate le velocità medie ed errori relativi per diverse LIS utilizzate durante la caratterizzazione; l'asterisco indica che la LIS è stata reimpregnata.

| LIS | \bar{U} | $\bar{\sigma}$ |
|-----|-----------|----------------|
| 1 | 14 | 1 |
| 2 | 13 | 1 |
| 3 | 14,3 | 0,8 |
| 2* | 13 | 1 |

Tabella 2.1: Velocità medie in mm/s di gocce d'acqua su diverse LIS

2.3 Ferrofluido

Si è usato un ferrofluido a base di nanoparticelle di ferrite di Cobalto CoFe_2O_4 disperse in una matrice acquosa di Citrato di Sodio ($0,04 \text{ mol/L}$). Il diametro medio delle particelle non è noto. Per la diluizione è stata usata la stessa soluzione. Il ferrofluido presenta una concentrazione iniziale di ferro $8,87 \text{ mol/L}$ e una frazione di volume solido nella fase dispersa del 13,4%. Gli effetti di magnetizzazione saturano a $39,2 \text{ kA/m}$.

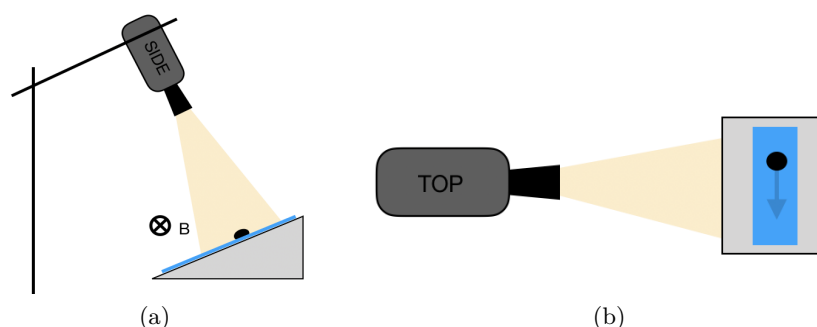


Figura 2.4.1: a) vista laterale di camera e superficie dell'apparato 1. b) vista verticale di camera e superficie dell'apparato 2.

2.4 Metodologia di misura

Per evitare che le espansioni polari dell'elettromagnete si sporchino, sono state coperte con Parafilm. Un cuneo in alluminio inclinato di 30° è stato posizionato tra esse così da fornire una base di appoggio per le LIS su cui vengono fatte scivolare le gocce. Le gocce di volume fissato vengono depositate tramite una micropipetta nella zona più alta del cuneo ma comunque interna alla zona di campo considerata uniforme. La dinamica delle varie gocce è stata acquisita tramite video a 180 fps grazie ad una videocamera montata in posizione perpendicolare al piano di scivolamento delle gocce. Per ottenere immagini definite si è illuminata la zona di interesse con un LED.

Per evitare l'effetto della magnetizzazione residua dell'elettromagnete a circuito aperto (circa 10 mT), un secondo apparato è stato allestito lontano da campi magnetici usando una fast camera Phantom v7.3 per l'acquisizione di video a 1000 fps ed una superficie inclinata di 30° così da paragonare i risultati con quelli ottenuti nell'elettromagnete. Nel secondo apparato la videocamera è stata montata in modo da riprendere le gocce lateralmente. In figura 2.4.1 sono schematizzate le posizioni di videocamere e superfici relative ai due diversi apparati.

I video ottenuti vengono in seguito convertiti in sequenza di immagini tramite il programma ImageJ per poi essere analizzate da un programma in LabVIEW che interpola il profilo della goccia e ne ricava la posizione per ogni immagine acquisita così da ottenere l'evoluzione temporale del fenomeno. Prima di ogni sessione di raccolta dati, le LIS utilizzate vengono pulite con acetone e etanolo per poi essere reimpregnate.

Capitolo 3

Risultati sperimentali

In questo capitolo, dopo aver mostrato i problemi relativi all'eccessiva interazione del ferrofluido con il campo magnetico, vengono illustrati e confrontati i risultati relativi alle velocità di scivolamento per gocce di acqua e ferrofluido a diverse concentrazioni al variare del campo magnetico.

3.1 Scelta diluizione ferrofluido e volume gocce

Per ridurre lo *shear rate* del sistema, favorendo la formazione di catene di particelle nel ferrofluido e quindi l'effetto magneto viscoso, è stato scelto come volume delle gocce $2 \mu L$.

Dalle prove di scivolamento effettuate in presenza di campo si è visto che il ferrofluido non diluito interagisce fortemente con il campo magnetico, causando la deformazione delle gocce e inducendo traiettorie non rettilinee, rendendo impossibile l'acquisizione dei dati. Si sono quindi preparate diluizioni di volume di ferrofluido in Citrato di Sodio $0,04 M$ al 20%, 50% e 80% inizialmente. Si è depositata una goccia per ogni concentrazione su una LIS orizzontale tra le due espansioni polari dell'elettromagnete per osservarne la deformazione. Dalle figure 3.1.1 si può notare come le gocce si allungano nella direzione del campo magnetico in modo proporzionale alla concentrazione e all'intensità del campo. Per poter paragonare le future misure di velocità è necessario che la superficie di contatto e la forma delle gocce di acqua e ferrofluido siano simili tra loro. Si è scelto quindi di utilizzare concentrazioni non superiori al 20% in quanto la deformazione risulta moderata.

Per poter stimare la forza peso relativa a diverse concentrazioni è stata misurata la densità del ferrofluido in funzione della concentrazione. Si sono pesati tramite una bilancia con precisione di $0,1 mg$ volumi da $5 \mu L$ di ferrofluido a diverse concentrazioni. Come previsto la densità cresce linearmente con la percentuale di particelle presenti in sospensione. Nel grafico 3.1.1.c sono riportate le misure di densità in funzione della concentrazione

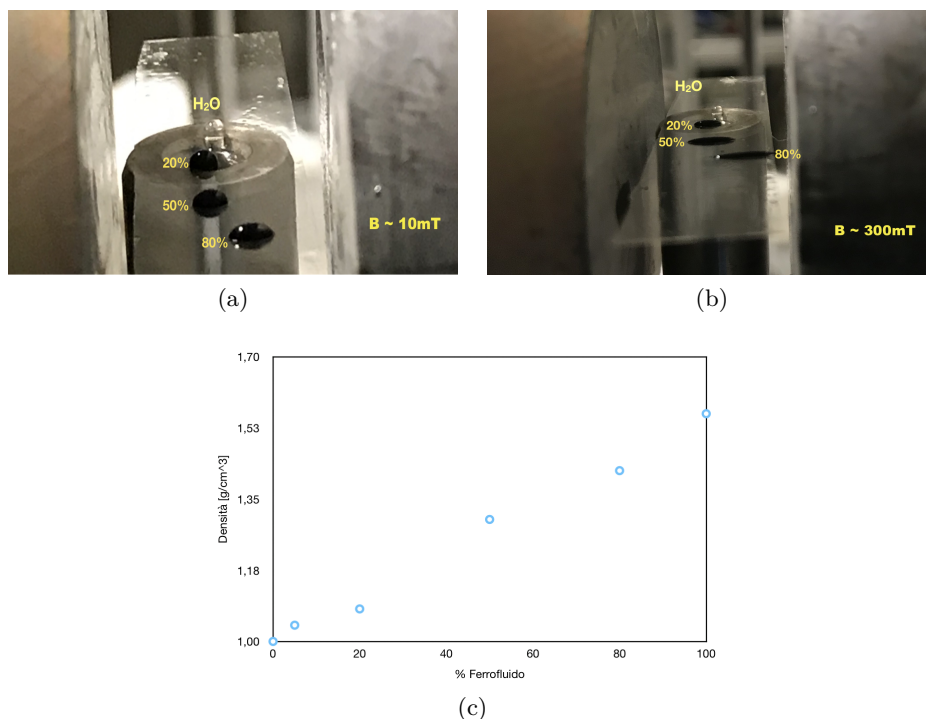


Figura 3.1.1: a) gocce d'acqua e di ferrofluido in diverse concentrazioni all'interno dell'elettromagnete a corrente nulla (campo residuo di circa 10 mT); b) gocce d'acqua e ferrofluido a diverse concentrazioni all'interno dell'elettromagnete alimentato con 5 A di corrente ($B \sim 300\text{ mT}$); c) Densità del ferrofluido a diverse concentrazioni.

in volume del ferrofluido. Le gocce di ferrofluido alle concentrazioni usate in questo esperimento risultano quindi leggermente più pesanti rispetto alle gocce d'acqua ($\rho_{FF}^{max} = 1,08\text{ g/cm}^3$).

3.2 Misure di velocità di scivolamento

In questo paragrafo vengono riportati e commentati i dati relativi alle velocità di scivolamento per il ferrofluido con concentrazione 5% e 20% in presenza e in assenza di campo magnetico.

Come prima cosa si è studiato il comportamento del ferrofluido a diverse intensità di campo. Il grafico 3.2.1 illustra delle tipiche leggi orarie per concentrazioni e campi magnetici diversi, mostrando in tutti i casi un moto rettilineo uniforme dominato dall'attrito viscoso.

Convertendo i coefficienti angolari delle rette tramite una trasformazione legata alla frequenza di acquisizione dei video e all'ingrandimento usato,

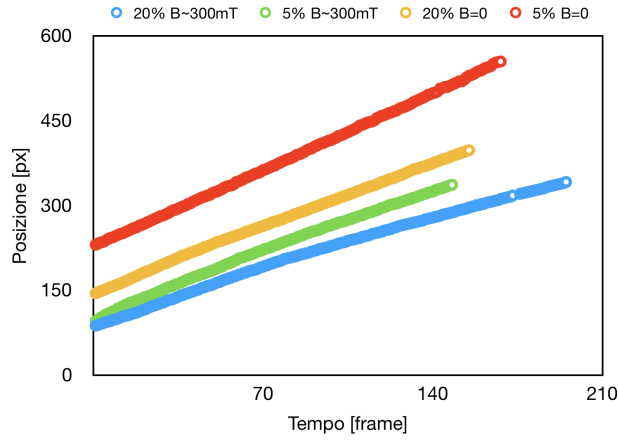


Figura 3.2.1: leggi orarie lineari per gocce d'acqua e ferrofluido a diverse concentrazioni e diverse intensità di campo.

si ottengono le velocità di scivolamento in mm/s . I valori medi di velocità \bar{U} di scivolamento si riferiscono alla media di almeno cinque gocce con dinamica nominalmente uguale. I dati ottenuti sono riportati in tabella 3.1 ed esposti nel grafico 3.2.2. L'intervallo di corrente per il ferrofluido più concentrato è stato ridotto in quanto l'eccessiva interazione con il campo ha portato le gocce a seguire traiettorie non rettilinee, accelerando e complicando quindi l'acquisizione dati.

| | I | \bar{U} | $\bar{\sigma}$ |
|--------|-----|-----------|----------------|
| FF 5% | 0 | 10,3 | 0,2 |
| | 2 | 10,1 | 0,7 |
| | 5 | 9,5 | 0,2 |
| | 7 | 9,9 | 0,3 |
| | 10 | 10,5 | 0,2 |
| FF 20% | 0 | 12,6 | 0,4 |
| | 2 | 11,9 | 0,4 |
| | 4 | 10 | 1 |
| | 6 | 12 | 1 |

Tabella 3.1: Velocità medie in mm/s e relativo errore medio per acqua e ferrofluidi al variare della corrente.

Dal grafico si nota che entro l'errore sperimentale, le velocità non dipendono dalla corrente presente nell'elettromagnete. Questo le rende com-

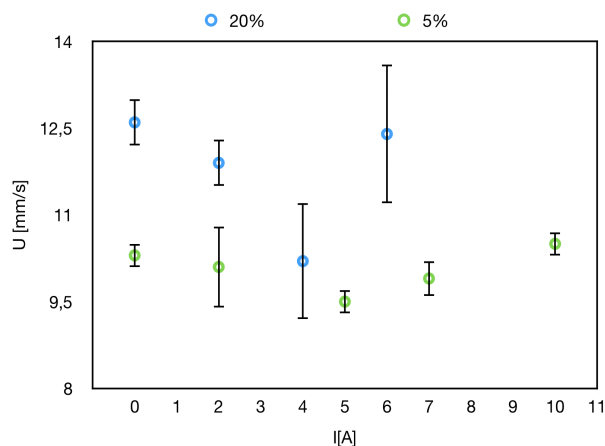


Figura 3.2.2: Velocità media in mm/s per il ferrofluido a due diverse concentrazioni in funzione della corrente presente nell'elettromagnete.

patibili con una distribuzione delle velocità costante attorno ad un valor medio di circa $10 mm/s$ e $12 mm/s$ rispettivamente. La differenza di velocità osservata può essere legata alla maggior densità della soluzione più concentrata che quindi subisce una forza peso maggiore.

Entro la sensibilità di queste misure non è possibile affermare la presenza di effetto magnetoviscoso.

Di conseguenza è stato semplificato l'esperimento: si è considerato solamente il ferrofluido concentrato al 20%, in quanto più propenso a manifestare effetto magnetoviscoso, e si sono effettuate misure di velocità di scivolamento solamente in due casi: in assenza di campo tramite l'apparato 2, e in presenza di campo relativo a $5 A$ di corrente immessa nel circuito nell'apparato 1. La velocità media di scivolamento passa da $(10,1 \pm 0,6) mm/s$ in assenza di campo, a $(9 \pm 1) mm/s$ in presenza di campo, risultando ancora compatibili con una velocità di scivolamento costante indipendente dal campo magnetico presente. L'effetto non risulta apprezzabile con questo tipo di apparato.

L'esperimento non fornisce quindi informazioni relative al cambio di viscosità del ferrofluido in quanto l'effetto magnetoviscoso risulta mascherato da vari effetti. L'olio con cui sono state impregnate le LIS risulta maggiore della viscosità del ferrofluido a tutte le intensità di campo studiate, questo porta ad una dissipazione dominata dall'olio e quindi ad un valore costante delle velocità di scivolamento indipendente dalla variazione di viscosità del ferrofluido. Lo *shear rate* del sistema $\dot{\gamma} \sim 15 s^{-1}$ e la diluizione del ferrofluido riducono ancora il range di viscosità che esso può presentare per effetto magnetoviscoso. Infine, il campo magnetico, e quindi l'orientazione delle catene di nanoparticelle, risulta parallela alla vorticità del sistema, riducen-

do sensibilmente gli effetti magnetoviscosi rispetto al caso in cui il campo risulti perpendicolare, dove le catene possono partecipare più attivamente al momento d'inerzia complessivo della goccia. Tale situazione non è stata approfondita in quanto anche una piccola variazione di campo lungo la direzione di moto delle gocce avrebbe generato una forza su di esse portando ad un moto non uniforme.

Conclusioni

In questa tesi si sono effettuate misure di velocità di scivolamento per gocce di volume fissato di un ferrofluido a base di Cobalto, su piano inclinato in presenza di un campo magnetico uniforme, generato da un elettromagnete, trasversale alla direzione di moto. Le misure sono state effettuate per diverse concentrazioni e diverse intensità di campo. Le gocce sono state fatte scivolare su una Superficie Impregnata di un Lubrificante (LIS) oleoso avente viscosità pari a circa cinque volte quella del ferrofluido in assenza di campo. Nella prima fase è stato studiato il comportamento di due diverse concentrazioni di ferrofluido, 5% e 20% rispetto alla concentrazione iniziale, in un campo magnetico di intensità compresa tra 10 e 500 mT . Nella seconda fase si è considerata solamente la concentrazione più elevata e una sola intensità di campo di 300 mT per poi confrontare i risultati con quelli ottenuti in assenza di campo. In entrambi i casi non è stata osservata una variazione di velocità di scivolamento indotta da un cambiamento della viscosità del ferrofluido probabilmente perché la dinamica è dominata dalla viscosità del lubrificante

Questo studio preliminare può essere seguito da ulteriori misure per meglio caratterizzare il fenomeno. Ad esempio, diminuendo le velocità delle gocce, quindi l'angolo di discesa e il volume, e ruotando di 90° la direzione del campo rispetto a quella di scivolamento, l'effetto magneto viscoso dovrebbe essere più presente. Usando un impregnante per la LIS di viscosità più vicina a quella del ferrofluido, si dovrebbe osservare una transizione da un regime di velocità dominato dall'olio ad uno dominato dalle dissipazioni interne del ferrofluido. In alternativa si può usare un ferrofluido con proprietà magneto reologiche più pronunciate, rischiando però di incontrare problemi relativi alla traiettoria delle gocce. Infine, sarebbe molto utile effettuare delle misure di magnetoviscosità tramite un magneto-reometro, strumenti ancora poco diffusi, in modo da conoscere l'intervallo di viscosità del ferrofluido e scegliere di conseguenza i fluidi più adatti all'esperimento.

Bibliografia

- [1] C. Rigoni, S. Bertoldo, M. Pierno, D. Talbot, A. Abou-Hassan, and G. Mistura, “Division of ferrofluid drops induced by a magnetic field,” *Langmuir*, vol. 34, no. 33, pp. 9762–9767, 2018. PMID: 30060659.
- [2] S. Odenbach, “Ferrofluids - magnetically controlled suspensions,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 217, pp. 171–178, 04 2003.
- [3] T. Ody, M. Panth, A. D. Sommers, and K. F. Eid, “Controlling the motion of ferrofluid droplets using surface tension gradients and magnetoviscous pinning,” *Langmuir*, vol. 32, no. 27, pp. 6967–6976, 2016. PMID: 27269182.
- [4] J. P. McTague, “Magnetoviscosity of magnetic colloids,” *The Journal of Chemical Physics*, vol. 51, no. 1, pp. 133–136, 1969.
- [5] L. M. Pop and S. Odenbach, “Investigation of the microscopic reason for the magnetoviscous effect in ferrofluids studied by small angle neutron scattering,” *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 18, pp. S2785–S2802, sep 2006.
- [6] E. Ghasemi, A. Mirhabibi, and M. Edrissi, “Magnetoviscous effect in a maghemite ferrofluid,” *Journal of nanoscience and nanotechnology*, vol. 11, pp. 5285–91, 06 2011.
- [7] S. Odenbach, “Magnetic fluids - suspensions of magnetic dipoles and their magnetic control,” *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 15, pp. S1497–S1508, apr 2003.
- [8] G. Mistura and M. Pierno, “Drop mobility on chemically heterogeneous and lubricant-impregnated surfaces,” *Advances in Physics: X*, vol. 2, no. 3, pp. 591–607, 2017.
- [9] A. Keiser, L. Keiser, C. Clanet, and D. Quéré, “Drop friction on liquid-infused materials,” *Soft Matter*, vol. 13, pp. 6981–6987, 2017.