



**Università degli Studi di Padova**

---

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA

*Corso di Laurea in Fisica*

**Scivolamento di gocce di ferrofluido su  
superfici magnetiche**

*Laureando*

**Leonardo Tosini**

*Relatore*

**Prof. Giampaolo Mistura**

---

ANNO ACCADEMICO 2014/2015

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>1 Cenni teorici</b>	<b>5</b>
1.1 Statica e scivolamento di gocce . . . . .	5
1.2 Ferrofluidi . . . . .	6
<b>2 Sistema per misure di scivolamento</b>	<b>11</b>
2.1 Apparato sperimentale . . . . .	11
<b>3 Metodo di misura e analisi dati</b>	<b>17</b>
3.1 Acquisizione delle misure . . . . .	17
3.2 Analisi Dati . . . . .	18
3.3 Risultati . . . . .	20
3.3.1 Misure statiche . . . . .	20
3.3.2 Misure dinamiche . . . . .	21
<b>Conclusioni</b>	<b>29</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>32</b>



# Introduzione

Il controllo magnetico dei ferrofluidi è un settore in rapida espansione per le sue importanti applicazioni mediche, chimiche, biologiche, industriali, ingegneristiche ed elettroniche. Basti pensare che tramite l'applicazione di un campo magnetico di  $30kA/m$  si può aumentare la viscosità di questi fluidi anche del 100% [8] oppure è possibile controllarne il moto ed utilizzarli come vettori per il trasporto di farmaci all'interno del corpo umano[1].

I ferrofluidi sono soluzioni colloidali che presentano delle particelle magnetiche nanometriche in sospensione, isolate le une dalle altre grazie all'utilizzo di tensioattivi. Le particelle magnetiche consistono solitamente in maghemite, ematite, o ioni del ferro e, in presenza di campo, tali particelle si polarizzano e rendono il liquido paramagnetico[6]. L'utilizzo di campi magnetici consente una manipolazione attiva delle gocce e si accosta ad altri metodi di controllo, quali i gradienti termici, l'elettrowetting, le onde acustiche, le vibrazioni e i gradienti di energia superficiale.

Nonostante il grande interesse trasversale a vari campi scientifici differenti, in letteratura le ricerche condotte sulle proprietà interfacciali dei ferrofluidi, sia statiche che dinamiche, sono davvero poche. Per questo motivo il seguente elaborato intende presentare alcune preliminari misure e considerazioni sulla dinamica dei ferrofluidi. Dopo alcuni cenni teorici sulla statica e lo scivolamento di gocce, si descriverà nel dettaglio il lavoro svolto in laboratorio,

spiegando la struttura dell'apparato sperimentale ed i metodi utilizzati per l'analisi delle velocità delle gocce. Infine si presenteranno le prime misure statiche e dinamiche e si cercherà di stabilire collegamenti con altri lavori per provarne la consistenza.

# Capitolo 1

## Cenni teorici

Si riportano alcuni richiami teorici riguardo alla statica e alla dinamica di gocce. In seguito si introdurranno alcune nozioni sulle gocce di ferrofluido in condizioni statiche e dinamiche.

### 1.1 Statica e scivolamento di gocce

Le proprietà statiche di una goccia di liquido sono determinate dall'equilibrio meccanico tra forze di superficie e forze di volume agenti su di essa[5]. In particolare, definendo numero di Bond il rapporto tra forza di gravità (di volume) e tensione superficiale,

$$B_O = \frac{\rho g l^2}{\gamma}$$

si può intuire che a numeri di Bond molto maggiori di 1 sia la forza di gravità a dominare rispetto alla tensione superficiale. Inoltre ponendo  $B_O = 1$  si può ricavare la cosiddetta lunghezza capillare, dimensione caratteristica della goccia per cui le due forze hanno simile entità.

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho g}}$$

Immaginiamo ora di inclinare il piano su cui è deposta la goccia. Superato un certo angolo di inclinazione  $\beta_S$ , detto di scivolamento, la goccia inizierà a scendere. Le forze in gioco nello scivolamento sono la forza di gravità, la tensione superficiale e la forza viscosa del fluido. La prima chiaramente tende a far scendere la goccia mentre le altre due tendono a frenarla. Il corrispondente angolo di contatto anteriore è detto angolo di avanzamento  $\theta_a$ , mentre quello posteriore viene chiamato angolo di ritiro  $\theta_r$ .

Definiamo infine il numero di capillarità  $C_a$ , un altro utile numero adimensionale:

$$C_a = \frac{\mu U}{\gamma}$$

Tale numero assieme a quello di Bond rende possibile il confronto della dinamica di gocce di liquidi diversi: in effetti il numero di Bond dipende dall'accelerazione di gravità che, all'aumentare dell'angolo  $\alpha$  di inclinazione del piano, ha come componente dominante  $g \sin \alpha$ , mentre il numero di capillarità dipende dalla velocità.

## 1.2 Ferrofluidi

I ferrofluidi sono soluzioni di particelle magnetiche disciolte in un liquido: la loro dimensione massima si attesta attorno ai  $10nm$ [6]. Le proprietà magnetiche possedute dalle nanoparticelle tenderebbero a farle agglomerare, dunque, per mantenere la stabilità di queste soluzioni si utilizzano dei tensioattivi[8], ossia molecole organiche che si legano alla superficie delle nanoparticelle per mantenerne la separazione in un solvente.

La presenza di campo magnetico tende ad aumentare le proprietà di bagnabilità delle gocce di ferrofluido[3] a seguito di uno schiacciamento della goccia[7]. Per gocce di fluidi come l'ossigeno liquido[10][9], debolmente para-



**Figura 1.1:** Ferrofluido attratto da un magnete

magnetici rispetto ai ferrofluidi, la forza magnetica esercitata su una goccia è data da

$$F_M = \frac{\chi}{2\mu_0} \nabla(B^2)$$

A seguito dello schiacciamento l'area di contatto avrà un raggio  $r$  (Figura 1.2) legato all'abbassamento del centro di massa della goccia di altezza  $\delta$  e al raggio iniziale  $R = \sqrt[3]{3V/4\pi}$  della goccia non deformata[7]

$$r^2 \sim R\delta$$

In particolare, ricorrendo al numero adimensionale di Bond magnetico:

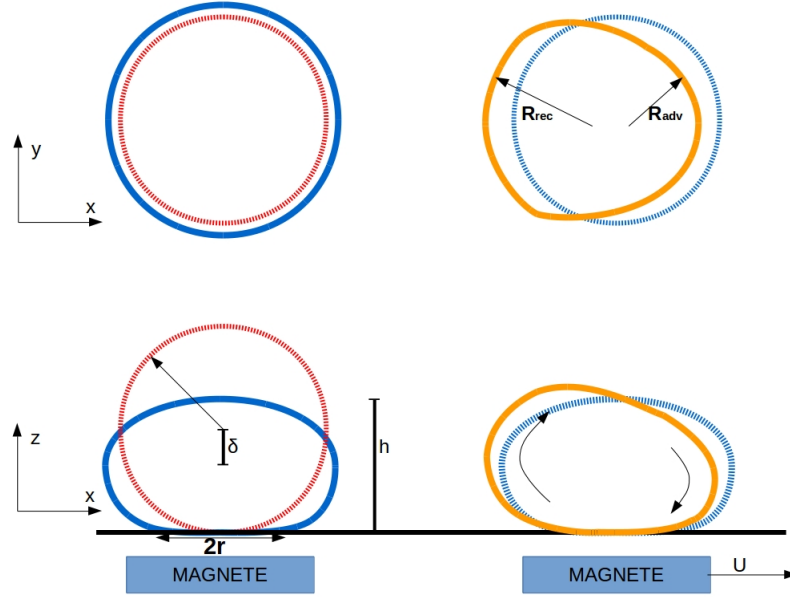
$$B_O^M = \frac{RMB}{\gamma}$$

dove  $M$ ,  $B$  e  $\gamma$  sono la magnetizzazione del ferrofluido, il campo applicato e la tensione superficiale, si può legare il raggio di contatto al campo

$$r \sim R\sqrt[4]{B_O^M}$$

Tale relazione vale quando il campo applicato genera una forza molto maggiore della forza di gravità sulla goccia, ossia quando  $B \gg B_{crit} = \sqrt{\frac{\rho g \gamma}{M}}$ . Altre leggi di scala per l'altezza della goccia sono riportate nell'articolo [7].





**Figura 1.2:** Goccia attratta da un magnete. A sinistra in condizioni statiche: in rosso la goccia non deformata e in blu quella deformata dalla presenza del magnete. A destra in condizioni dinamiche in blu la goccia in condizioni statiche e in arancio la goccia deformata che si sposta con il magnete a velocità  $U$ .

Nel caso in cui un magnete permanente si muova con una velocità lineare  $U$  lungo un asse  $x$  (Figura 1.2) al di sopra di una superficie liofoba perpendicolare a  $z$ , si vede che una goccia di ferrofluido procede nella stessa direzione e con la stessa velocità[7]. Il moto ha una componente di scivolamento ed una di rotolamento. La goccia si deforma ed il raggio di curvatura di avanzamento ( $R_{adv}$  anteriore) diviene più piccolo di quello di ritiro ( $R_{rec}$  posteriore). Considerando la goccia come un canale liscio di lunghezza  $2r \gg h$  cioè in cui il diametro di contatto è molto maggiore dell'altezza della goccia si può stimare che la differenza di pressione che permette il moto, approssimato laminare (con numero di Reynolds  $Re < 1$ ), sia

$$\Delta P \sim \mu \frac{2l}{h^2} U \sim \gamma C$$

Nell'ultima si è utilizzata la legge di Laplace in cui

$$C = \left( \frac{1}{R_{adv}} - \frac{1}{R_{rec}} \right)_{xy} + \left( \frac{1}{R_{adv}} - \frac{1}{R_{rec}} \right)_{xz}$$

rappresenta il fattore di curvatura.[7]



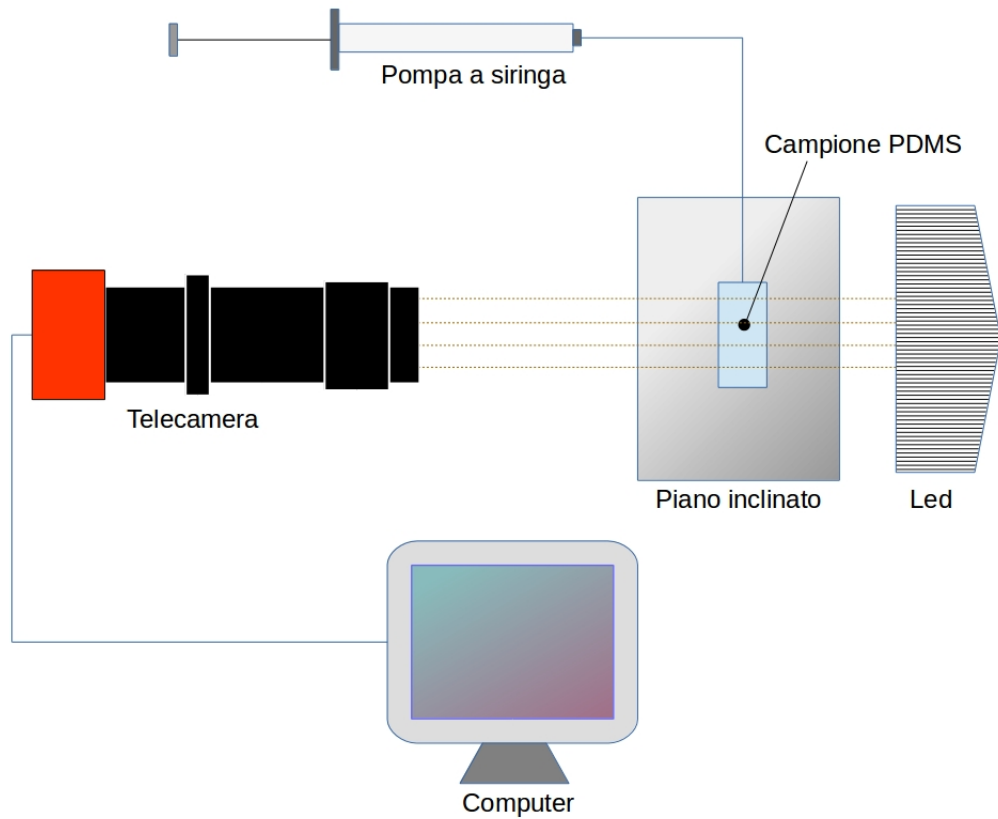
# Capitolo 2

## Sistema per misure di scivolamento

In questo capitolo si riportano le caratteristiche dell'apparato sperimentale utilizzato per le misure di scivolamento.

### 2.1 Apparato sperimentale

In Figura 2.1 si può vedere l'apparato schematizzato nella sua vista dall'alto. Innanzitutto si utilizza un piano che può essere inclinato a piacere con l'ausilio di un motorino. Il piano è illuminato lateralmente da una luce a LED collimata (Phlox) e, di fronte a questa sorgente, è posizionata una telecamera CMOS MV-D1024E Camera Link ad alta velocità con obiettivo Navitar 7000 provvisto di Zoom ottico e di un otturatore che è utile per impostare la luminosità desiderata. Questa telecamera permette ad un programma LabVIEW (ambiente di sviluppo integrato prodotto dalla National Instruments) di acquisire immagini delle gocce poste sul piano inclinato con un certo frame rate, ossia scegliendo per le varie inclinazioni (e dunque in relazione alla



**Figura 2.1:** Schema dell'apparato sperimentale

rapidità di discesa della goccia) il numero di foto da scattare al secondo. I frame rate utilizzati in questa esperienza sono compresi tra 14fps e 90fps.

Le gocce vengono deposte sul piano con l'ausilio di una pompa sulla quale viene montata una siringa. La pompa viene gestita tramite il MicroSyringe Pump Controller Micro4 prodotto dalla World Precision Instruments che permette di impostare il volume delle gocce deposte. Sul piano inclinato viene posto per alcune misure anche un magnete permanente con le caratteristiche qui riportate.

Materiale	Neodimio
Rivestimento	Nickel (Ni-Cu-Ni)
Direzione magnetizzazione	assiale
Spessore S	$3,0 \pm 0,1mm$
Base B	$75,0 \pm 0,1mm$
Altezza H	$100,0 \pm 0,1mm$
Forza di adesione	$20kg$
Ritentività $B_r$	$1,26 \div 1,29T$

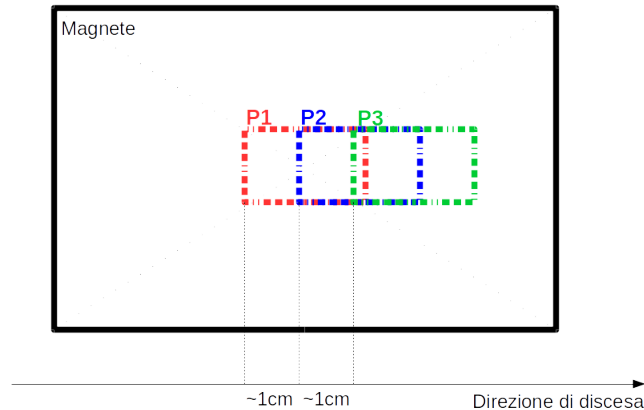
Utilizzando un gaussmetro Hirts GM04 con sonda Transverse Hall Probe PT1205, si è misurato il campo magnetico al centro del magnete permanente direttamente sulla sua superficie ( $B_s$ ) e poi sopra lo spessore di un vetrino al PDMS ( $B_v$ ) si trova:

$$B_s = 0,038 \pm 0,001T$$

$$B_v = 0,036 \pm 0,001T$$

Le gocce di ferrofluido vengono depositate su un vetrino ricoperto di PDMS (Polidimetilsilossano) appoggiato sulla superficie del magnete[4]. Poiché il campo generato dal magnete può essere approssimato uniforme solo nel centro dello stesso, si è pensato di acquisire misure per tre posizioni distinte del vetrino sul magnete:

- posizione 1: il vetrino è posto simmetricamente rispetto al centro del magnete;
- posizione 2: il vetrino è posto circa 1cm più in basso del caso precedente, in modo che la goccia parta con il suo scivolamento dal centro del magnete;



**Figura 2.2:** Posizioni sul magnete

- posizione 3: in vetrino è posto circa 1cm più in basso della posizione 2, in modo che la goccia parta con il suo scivolamento 1cm più in basso del centro del magnete.

Chiaramente la posizione 1 è quella per cui la goccia attraverserà una zona con campo approssimativamente uniforme più ampia. Le altre posizioni serviranno ad osservare gli effetti generati dal bordo inferiore del magnete che tende ad attrarre le gocce.

Ogni goccia di ferrofluido utilizzata nello scivolamento ha volume di  $40\mu l$  tale per cui la forza predominante sulla goccia è la gravità che tende a farla scivolare verso il basso. Per le misure è stata utilizzata una soluzione con concentrazione di maghemite ( $\gamma - Fe_2O_3$ ) di  $0,645 mol/l$  ottenuta diluendo dieci volte il ferrofluido prodotto dal dott. Alì Abou-Hassan dell'Università Pierre & Marie Curie di Parigi. La diluizione è stata effettuata poiché altrimenti l'alta concentrazione unitamente alla rapida evaporazione avrebbero

portato all'otturazione dell'ago della siringa. Per la diluizione si è utilizzato acido nitrico  $10^{-2}mol/l$ .





# Capitolo 3

## Metodo di misura e analisi dati

### 3.1 Acquisizione delle misure

L'esperienza consiste nel confronto tra la dinamica delle gocce di ferrofluido in assenza e presenza di campo magnetico su di un piano inclinato. Verranno confrontati quattro campioni di misure:

- misure in assenza di campo magnetico,
- misure in presenza di campo magnetico in posizione P1,
- misure in presenza di campo magnetico in posizione P2,
- misure in presenza di campo magnetico in posizione P3.

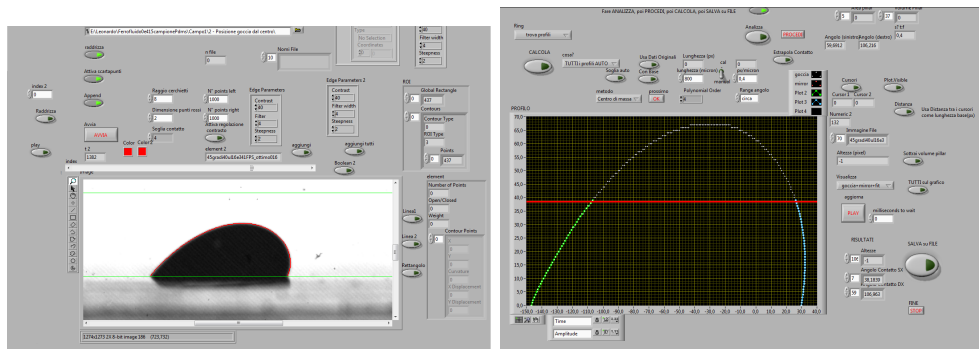
Si ricorda che la posizione P1 si ottiene con il vetrino simmetrico rispetto al centro del magnete, la P2 con il vetrino messo in modo che la goccia parta dal centro del magnete, la P3 con il vetrino posto circa  $1\text{cm}$  più in basso del centro del magnete. Per ogni campione poi si sono realizzate misure a differenti inclinazioni nel range  $35^\circ$ - $60^\circ$  variando l'angolo di  $2^\circ$  o  $3^\circ$  alla volta. Gli angoli limite sono imposti dalle condizioni sperimentali: al di sotto

dei  $35^\circ$  la goccia di ferrofluido subisce una discesa lentissima o addirittura rimane in quiete, mentre già a partire dai  $50^\circ$  ci sono grossi problemi nel controllo del volume delle gocce; queste infatti, a causa della componente della gravità parallela al piano e a causa del piccolo spessore dell'ago della siringa, tendono a rompersi in due parti, una delle quali rimane sull'ago. In future ricerche quindi si suggerisce di utilizzare aghi più spessi in modo da facilitare l'indagine al di sopra dei  $60^\circ$ .

### 3.2 Analisi Dati

L'analisi delle foto delle gocce acquisite viene compiuta mediante un programma LabVIEW che, analizzando tutti i fotogrammi relativi alla discesa di una singola goccia, individua il suo profilo grazie ad un algoritmo che controlla le variazioni di tono in scala di grigi.

Il programma interpola poi i punti anteriori e posteriori trovati con poli-



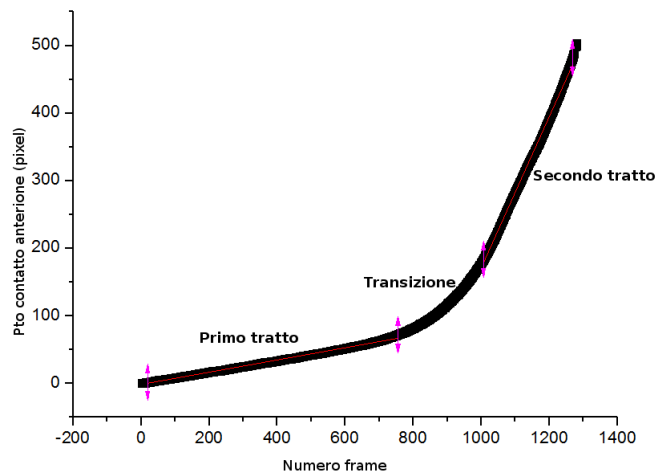
**Figura 3.1:** (a) Individuazione dei profili (b) fit polinomiali dei punti anteriori e posteriori

nomi di grado impostabile. I polinomi usati per l'esperienza sono di grado 4. Infine salva in un file i valori degli angoli di contatto e della posizione dei punti di contatto anteriore e posteriore in pixel, nonché la lunghezza della

goccia e la sua altezza.

Per convertire le posizioni dei punti di contatto anteriore e posteriore da pixel a millimetri è necessario fotografare un oggetto di dimensione nota: l'operazione va compiuta ogni qualvolta viene impostato un nuovo ingrandimento. In questo caso si è scelto di utilizzare un bullone di diametro  $9,90 \pm 0,05\text{mm}$ , dimensione che poi viene messa in rapporto con la stessa misurata in pixel direttamente sull'immagine con il software ImageJ. Questo rapporto è la conversione pixel $\rightarrow$ mm.

I risultati sono graficati in OriginLab. La Figura 3.2 mostra la posizione del punto di contatto anteriore al variare del numero del frame. Come si è



**Figura 3.2:** Classico grafico del punto di contatto anteriore in funzione del numero del frame

detto ogni ripresa dello scivolamento di una goccia viene fatta ad un frame rate fissato e ciò significa che le foto vengono scattate ad intervalli di tempo regolari. Quindi il grafico riportato di fatto rappresenta una posizione rispetto ad un tempo, motivo per il quale la sua derivata prima offre la velocità della goccia (in pixel/numero del frame). Come si può vedere inoltre

vi sono due tratti circa lineari in cui la velocità si potrebbe approssimare ad una costante: chiameremo questi primo e secondo tratto con riferimento alla figura. L'analisi si basa proprio su questi tratti lineari che vengono fittati con delle rette il cui coefficiente angolare rappresenta appunto la velocità. Per la conversione della velocità infine si opera una moltiplicazione per il frame rate e per la conversione pixel $\rightarrow$ mm. A questo punto le velocità trovate saranno in  $mm/s$ .

Inoltre, osservando in fase sperimentale un'impresione sugli  $0^\circ$  di inclinazione del piano, si è deciso di determinare le inclinazioni a posteriori per evitare errori sistematici, utilizzando il programma di analisi dei fotogrammi.

### 3.3 Risultati

Di seguito si riportano tutti i risultati dell'analisi, sia per alcune misure statiche, sia per quelle dinamiche descritte in precedenza.

#### 3.3.1 Misure statiche

Si sono in questa fase misurati gli angoli di contatto di gocce di ferrofluido su di un piano orizzontale.

Il volume delle gocce è, come per le misure dinamiche,  $40\mu l$ .

Il piano d'appoggio è un vetrino ricoperto di PDMS.

Le misure sono state divise nel seguente modo:

- misure in assenza di campo magnetico;

- misure in presenza di campo magnetico con goccia depositata al centro del magnete;
- misure in presenza di campo magnetico con goccia depositata a circa  $1\text{cm}$  dal centro del magnete.

Le posizioni di deposizione delle gocce rispetto al magnete sono le stesse delle misure dinamiche.

Il campo magnetico è stato generato grazie al magnete permanente caratterizzato nel Capitolo 2, sopra il quale è stato appoggiato il vetrino. Per ognuno di questi campioni sono state compiute 15 misure posizionando la goccia in diversi punti del vetrino e fotografando sia l'angolo destro che l'angolo sinistro. Infine facendo una media per ogni campione:

*in assenza di campo magnetico*

$$\theta_c^{B=0} = (107 \pm 4)^\circ$$

*in presenza di campo magnetico e al centro del magnete*

$$\theta_c^{B \neq 0} = (107 \pm 2)^\circ$$

*in presenza di campo magnetico e ad  $1\text{cm}$  dal centro del magnete*

$$\theta_c^{B \neq 0} = (106 \pm 3)^\circ$$

Le misure sono tutte compatibili tra loro: a quanto pare dunque le modificazioni della bagnabilità della superficie indotte dal campo sono trascurabili per gocce come queste di  $40\mu\text{l}$  sulle quali la forza predominante è la gravità. Infatti il campo è poco intenso, essendo sul vetrino al centro del magnete  $B_v = 0,036 \pm 0,001\text{T}$ .

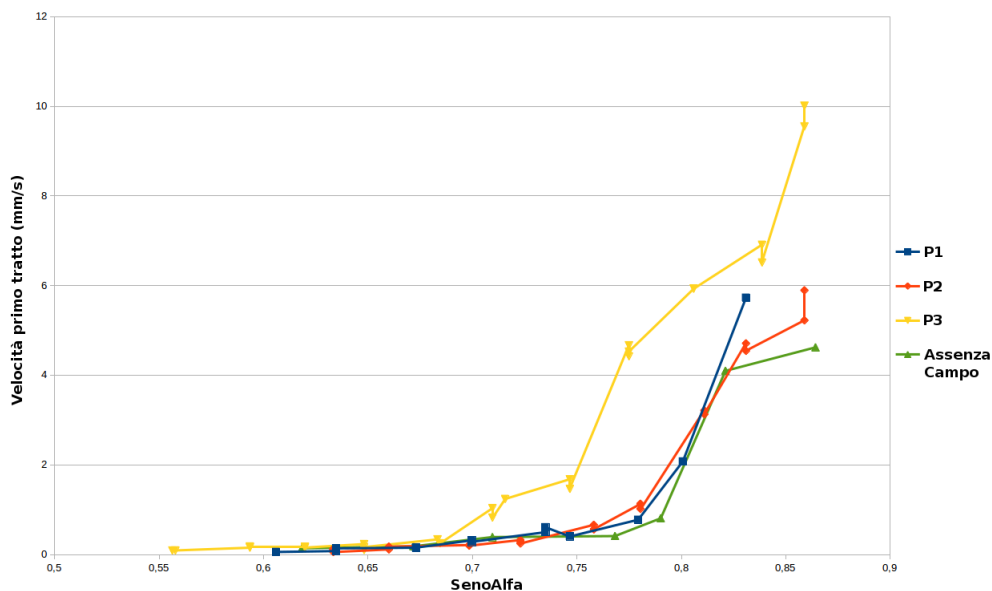
### 3.3.2 Misure dinamiche

Ricordiamo che ogni goccia procede ad una velocità circa costante in un primo tratto; successivamente vi è un tratto di transizione in cui essa accelera per

arrivare ad una velocità limite costante nel secondo tratto (Figura 3.2). La lunghezza di questi tratti è molto variabile ma all'incirca il primo tratto è di  $4 \div 5mm$ , la transizione di velocità occupa circa  $7 \div 8mm$ , mentre il secondo tratto è di circa  $10 \div 12mm$ .

### Primo tratto

In Figura 3.3 si vedono le velocità misurate nel primo tratto lineare percorso dalle gocce rispetto al seno dell'angolo di inclinazione della superficie di PDMS. Come si vede dalla figura i campioni in assenza di campo magnetico,



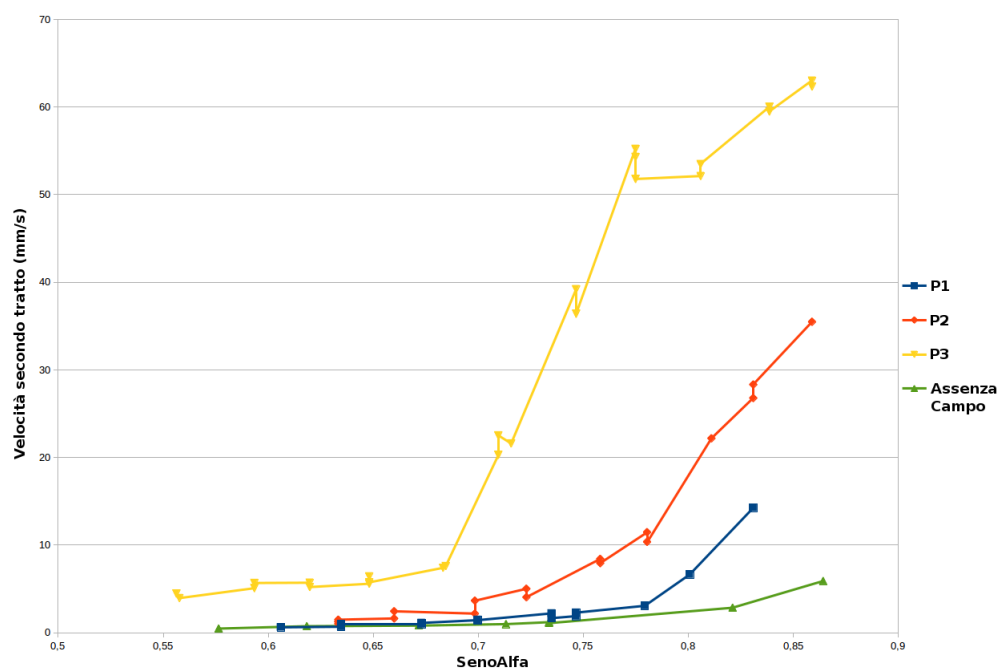
**Figura 3.3:** Velocità nel primo tratto percorso dalle gocce di ferrofluido al variare del seno dell'angolo di inclinazione della superficie

e quelli in presenza di campo magnetico P1, e P2 hanno un andamento molto simile. La deviazione osservata nel campione P3 è dovuta molto probabilmente all'effetto di bordo del magnete. L'andamento trovato è consistente con l'osservazione fatta nella parte dedicata alle misure statiche: infatti sembra che il campo ha effetti trascurabili sulla goccia di ferrofluido; le cause

sono la sua scarsa intensità (ricordiamo che sul vetrino al centro del magnete si misura  $B_v = 0,036 \pm 0,001T$ ) e la bassa concentrazione del ferrofluido ( $0,645mol/l$ ).

### Secondo tratto

In Figura 3.4 si vedono le velocità misurate nel secondo tratto lineare percorso dalle gocce rispetto al seno dell'angolo di inclinazione della superficie di PDMS. Come si può vedere vi è una deviazione tra i campioni P1, P2 e



**Figura 3.4:** Velocità nel secondo tratto percorso dalle gocce di ferrofluido al variare del seno dell'angolo di inclinazione della superficie

P3 dovuta senz'altro all'effetto di bordo del magnete, che ricordiamo essere sempre lo stesso. Il campione ritenuto meno perturbato dalla presenza del bordo del magnete è P1 che presenta un andamento simile al campione in



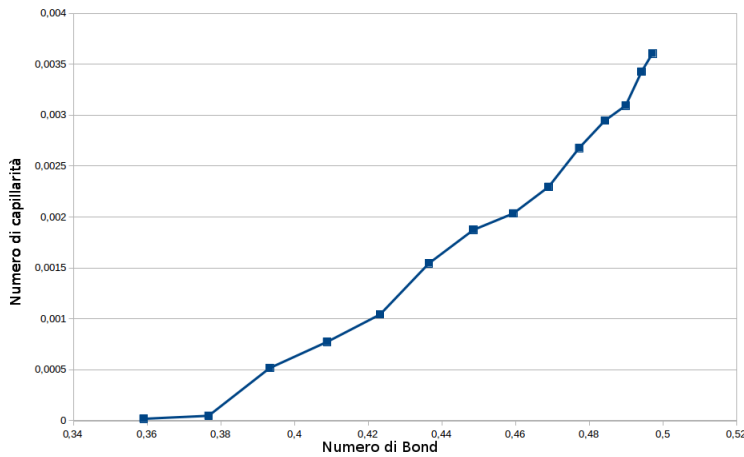
assenza di campo magnetico almeno fino ai  $50^\circ$ . Per angoli più grandi si riscontra una grossa difficoltà nel deporre la goccia senza romperla (avendo un ago sottile), e quindi probabilmente la deviazione osservata tra il campione senza campo ed il campione P1 in presenza di campo per angoli superiori ai  $50^\circ$  è dovuta al peggioramento del controllo del volume unitamente all'effetto di bordo del magnete. Infatti seguendo le osservazioni compiute nel caso statico e per le velocità del primo tratto ci si aspetterebbe che anche qui il campo avesse un'influenza trascurabile sulla dinamica delle gocce, cosa che si vede fino ai  $50^\circ$ .

Gli effetti magnetici del bordo sui campioni P2 e P3 sono notevoli sebbene il campo sia poco intenso (centesimi di tesla). Grazie a queste misure è possibile stabilire che la zona della superficie del magnete adatta a misure di scivolamento si estende per circa  $1\text{cm}$  dal centro e dunque è di circa  $2\text{cm}$ . Si ricorda che il magnete ha una lunghezza di  $10\text{cm}$ .

Confrontiamo ora il moto delle gocce di ferrofluido in assenza di campo con il moto di gocce d'acqua sulla superficie di un vetrino silanizzato con un triclorosilano in fase vapore. Su questa superficie liofoba l'angolo di contatto delle gocce d'acqua è di circa  $115^\circ$ . Il volume delle gocce utilizzate nello scivolamento è di  $30\mu l$ . Le caratteristiche dell'acqua a  $20^\circ C$  sono le seguenti:

$$\begin{array}{l|l} \text{Viscosità } \eta_{H_2O} & 1,00 \pm 0,05cP \\ \text{Densità } \rho_{H_2O} & \sim 1000kg/m^3 \\ \text{Tensione superficiale } \gamma_{H_2O} & \sim 72,8g/s^2 \end{array}$$

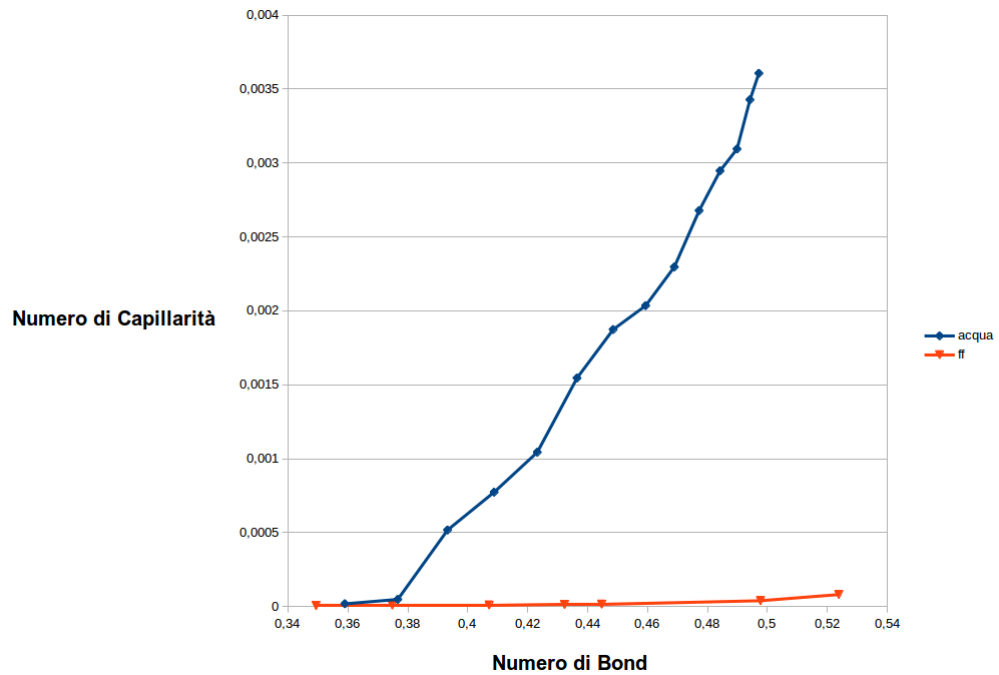
Purtroppo non si conoscono le specifiche del ferrofluido utilizzato. Tuttavia visto che esso risulta molto diluito si può supporre che la sua tensione superficiale sia  $\gamma_{FF} \simeq \gamma_{H_2O}$ . La densità e la viscosità saranno invece superiori rispetto alle stesse per l'acqua. Il grafico dell'andamento del numero di capillarità (legato alla velocità) rispetto al numero di Bond (legato all'inclinazione del piano di scivolamento) per l'acqua su vetrino silanizzato è in Figura 3.5. Il range di inclinazioni coperto da queste misure di scivolamento va da  $45^\circ$



**Figura 3.5:** Numero di capillarità rispetto al numero di Bond per gocce d'acqua su silano ad  $85^\circ$ . Nel caso del ferrofluido studiato nell'elaborato invece il range delle

misure di scivolamento va da  $35^\circ$  a  $60^\circ$  al massimo, tenendo conto, come già osservato, delle difficoltà di controllo del volume ad inclinazioni superiori a  $50^\circ$ .

Assumiamo che la densità e la viscosità del ferrofluido usato  $\rho_{FF}$  e  $\mu_{H_2O}$  siano simili a  $\rho_{H_2O}$  e  $\mu_{H_2O}$  vista la notevole diluizione. Nei seguenti [11][2][7] sono riportate alcune informazioni sulla viscosità dei ferrofluidi. Si ottiene il grafico in Figura 3.6. Conoscendo le specifiche del ferrofluido si potrà stabilire



**Figura 3.6:** Numero di capillarità rispetto al numero di Bond per gocce d'acqua su vetrino silanizzato e di ferrofluido su PDMS

un rapporto più diretto tra i due liquidi. I grafici saranno shiftati orizzontalmente poiché gli angoli di scivolamento per l'acqua e per il ferrofluido sono differenti. Sia chiaro che senza dati precisi relativi a densità, tensione superficiale e viscosità del ferrofluido non si può approfondire questo confronto.

Va tenuto anche in considerazione che le superfici in uso con il ferrofluido sono diverse da quelle utilizzate con l'acqua.



# Conclusioni

Il lavoro condotto per questo elaborato era finalizzato allo studio preliminare della dinamica delle gocce di ferrofluido su superfici liofobe in PDMS. Si è misurato l'angolo di contatto in assenza e in presenza di campo magnetico prodotto da un magnete permanente di forma rettangolare di dimensioni  $10\text{cm} \times 7,5\text{cm}$ . Nessuna differenza è stata notata, probabilmente perché il campo è poco intenso essendo al centro  $B_v = 0,036 \pm 0,001T$ . Misure di scivolamento compiute inclinando di un certo angolo la superficie mostrano invece significative variazioni a seconda di dove si muove la goccia. Già ad un paio di centimetri dal centro gli effetti di bordo del magnete cominciano a manifestarsi attraverso un aumento della velocità di scivolamento. Per sviluppi futuri è quindi necessario utilizzare magneti più estesi e più intensi concentrando le misure solo al loro centro. Inoltre l'indagine dovrà essere estesa ad angoli di inclinazione del piano più grandi utilizzando aghi più spessi per la siringa, allo scopo di deporre le gocce senza romperle.

Si è cercato inoltre di confrontare la dinamica delle gocce di ferrofluido in assenza di campo con la dinamica di gocce d'acqua su vetrino silanizzato con un triclorosilano in fase vapore; tale confronto non è profondo poiché non si conoscono le specifiche del ferrofluido.

Utilizzando un ferrofluido a bassa concentrazione con un campo magnetico di bassa intensità si poteva intuire a priori che non si sarebbero osservate grosse

differenze tra il comportamento delle gocce in presenza e in assenza di campo. Tuttavia si è visto che la parte utile per compiere misure di scivolamento, per magneti di bassa intensità come quello utilizzato, è circa il 20% della lunghezza totale del magnete.

# Bibliografia

- [1] P. C. A. C. B. Andreas S. Lübbe, M.D. Clinical applications of magnetic drug targeting. *Journal of Surgical Research*, 95(2):200–206, 2001.
- [2] H. Asakura, A. Nakajima, M. Sakai, S. Suzuki, Y. Kameshima, and K. Okada. Deformation and motion by gravity and magnetic field of a droplet of water-based magnetic fluid on a hydrophobic surface. *Applied Surface Science*, 253(6):3098–3102, 2007.
- [3] A. Faggiani. *Magnetowetting e fabbricazione di una superficie magneticamente microstrutturata*. PhD thesis, Università degli studi di Padova, 2014.
- [4] M. Khorasani, H. Mirzadeh, and Z. Kermani. Wettability of porous polydimethylsiloxane surface: morphology study. *Applied Surface Science*, 242(3):339–345, 2005.
- [5] P. K. Kundu and Cohen. *Fluid mechanics*. Academic Press, 2015.
- [6] N. Nam-Trung. Micro-magnetofluidics: interactions between magnetism and fluid flow on the microscale. *Microfluidics and Nanofluidics*, 12(1-4):1–16, 2012.
- [7] N. Nam-Trung. Deformation of ferrofluid marbles in the presence of a permanent magnet. *Langmuir*, 29(45):13982–13989, 2013.



- [8] S. Odenbach. Recent progress in magnetic fluid research. *Journal of physics: condensed matter*, 16(32):R1135, 2004.
- [9] K. Piroird, C. Clanet, and D. Quere. Magnetic control of leidenfrost drops. *Physical Review E*, 85(5), 2012. Times Cited: 5 2 5.
- [10] K. Piroird, B. D. Texier, C. Clanet, and D. Quere. Reshaping and capturing leidenfrost drops with a magnet. *Physics of Fluids*, 25(3), 2013.
- [11] A. Sartori. *Metodi di caratterizzazione di nanoparticelle magnetiche per applicazioni di Magneto Fluido Ipertermia*. PhD thesis, Università degli studi di Padova, 2013.