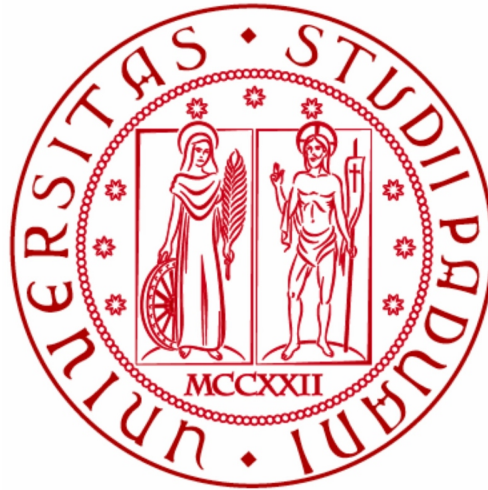


# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia Galileo Galilei



CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN FISICA

## PROPRIETÀ STATICHE E DIVISIONE DI GOCCE DI FERROGEL

Relatore : **Prof. GIAMPAOLO MISTURA**

Laureando : **GIOVANNI NEGRO**

ANNO ACCADEMICO 2017-2018

# Indice

<b>1</b>	<b>Stabilità e proprietà dei ferrofluidi</b>	<b>4</b>
1.1	Stabilità . . . . .	4
1.2	Zoologia dei ferrofluidi . . . . .	5
1.3	Superparamagnetismo . . . . .	7
1.4	Forze statiche e instabilità . . . . .	9
1.5	Superfici . . . . .	11
<b>2</b>	<b>Apparato sperimentale</b>	<b>13</b>
2.1	Banco di lavoro . . . . .	13
2.2	Superfici . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Misure e verifiche sperimentali</b>	<b>16</b>
3.1	Errori . . . . .	16
3.2	Statica . . . . .	19
3.3	Separazione di gocce . . . . .	22

# Introduzione

I fluidi magnetici o ferrofluidi sono materiali relativamente nuovi e in evoluzione che rispondono alla presenza di campi magnetici in diversi modi: possono modificare la loro configurazione nello spazio allungandosi, appiattendosi o addirittura dividendosi [1]. Negli anni si è visto un incremento notevole delle applicazioni e degli studi teorici e sperimentali su questi fluidi, dovuti anche ai bassi costi di produzione che richiedono.

Una delle applicazioni di maggior rilievo è il loro utilizzo negli hard disk dei computer o negli alberi rotanti delle automobili; in entrambi i casi formano una guarnizione liquida intorno agli assi rotanti. In questo modo è possibile ridurre notevolmente l'attrito tra le parti meccaniche prevenendo l'usura [2].

Nello studio dei ferrofluidi si possono indagare diversi aspetti. Uno degli approcci più convenienti in termini economici e teorici è isolare piccole quantità di questo fluido, delle gocce per l'appunto, e studiare il loro comportamento variando la forma e l'intensità del campo magnetico. Altre proprietà, come l'instabilità di Rosensweig o la formazione di particolari *maze* [3] richiedono l'utilizzo di campioni con volumi maggiori. L'instabilità di Rosensweig si presenta sulla superficie del liquido e porta alla formazione di numerose creste simili a quelle di un riccio. Nei *maze* il liquido assume appunto la forma di labirinti.

In questo elaborato di tesi si sono studiate le proprietà statiche e la separazione di gocce di ferrogel, particolari ferrofluidi a base di cobalto. Sono stati raccolti dati sul diametro delle gocce, sulle loro altezze e angoli di contatto, variando l'intensità del campo magnetico. Sono state usate diverse concentrazioni per osservare diversi regimi, con diverse superfici d'appoggio. La tesi va inoltre a confrontare i risultati ottenuti con altri lavori simili eseguiti con gocce di ferrofluido a base di composti ferrosi [4][5]. Questo confronto è importante per vedere se e in che modo il comportamento dei ferrogel differisce da quello dei normali ferrofluidi.

La tesi è composta da un primo capitolo, dove viene esposto brevemente lo stato dell'arte che spiega la dinamica alla base di questo fenomeno. Nel secondo capitolo viene descritto l'apparato strumentale. Un terzo capitolo espone i risultati raccolti e li confronta con quelli relativi ai ferrofluidi a base di composti ferrosi evidenziando le differenze e le analogie. Infine nelle conclusioni vengono raccolti brevemente i risultati del lavoro.

# Capitolo 1

## Stabilità e proprietà dei ferrofluidi

I ferrofluidi sono sospensioni colloidali di nanoparticelle ferromagnetiche. Sono sistemi colloidali in quanto le particelle sono finemente disperse. Queste poi hanno diametri tipici della scala dei nanometri, dunque sono dette nanoparticelle. Infine hanno magnetizzazione non nulla, in particolare risentono della presenza di campi magnetici, e per questo sono dette ferromagnetiche. Le nanoparticelle ferromagnetiche sono in sospensione grazie ai moti browniani. Tipicamente questi liquidi sono formati da un solvente organico e da composti ferrosi.

I ferrogel differiscono dai comuni ferrofluidi nelle particelle in sospensione: i composti del ferro vengono sostituiti da composti del cobalto. Questi sono sintetizzati dalla decomposizione termica del di-cobalto otta-carbonio [ $Co_2(CO)_8$ ]. Successivamente i composti del cobalto vengono trattati come i composti ferrosi nei ferrofluidi: sono rivestiti di un tensioattivo o caricati positivamente (negativamente) per evitare la formazione di agglomerati all'interno del fluido. Nel tempo, le proprietà di disgregazione possono venire meno, a causa del logoramento dello strato tensioattivo, e in questo caso i liquidi perdono la loro particolarità di ferrogel formando depositi di particelle magnetiche; tuttavia il fenomeno si osserva nella scala degli anni e ciò rende possibile l'utilizzo di questi particolari liquidi nell'ambito della ricerca, ma anche delle applicazioni, per diversi mesi.

In questo capitolo verrà trattata la stabilità dei ferrofluidi confrontando le varie forze che agiscono sulle nanoparticelle in sospensione. Verrà poi presentata la zoologia dei ferrofluidi, dividendoli in base alla forma e agli elementi che compongono le nanoparticelle magnetiche. Si spiegheranno le proprietà superparamagnetiche che questi fluidi presentano; le instabilità tipiche di piccole gocce e infine le proprietà generali delle superfici su cui si sono studiati i vari fenomeni.

### 1.1 Stabilità

Per determinare le dimensioni delle particelle magnetiche affinché il ferrofluido risulti stabile (ovvero non si verifichi la formazione di aggregati) basta rapportare i contributi delle energie in gioco; un primo confronto da considerare è quello tra energia termica, che tenderà a disgregare le particelle all'interno del solvente organico, ed energia magnetica, dovuta a un campo esterno che invece favorirà l'aggregazione delle particelle.

$$E_{thermal} = k_b T$$

$$W = - \int_H^0 \left( \mu_0 M \frac{dH}{ds} V \right) ds \approx \mu_0 M H V$$

dove l'integrale quantifica l'energia necessaria per rimuovere una particella magnetica da un punto del solvente dove il campo vale H ad un punto dove invece non risente di alcun campo (H=0). Il rapporto tra le due energie deve essere maggiore di uno e questo porta a:

$$\frac{\text{energia termica}}{\text{energia magnetica}} = \frac{k_b T}{\mu_0 M H V} \geq 1 \quad \Rightarrow \quad d \leq (6k_b T / \pi \mu_0 M H)^{1/3}$$

Svolgendo il calcolo si vede che le dimensioni delle particelle devono essere inferiori a 10nm [6]. La forza gravitazionale, che tende a formare depositi sul fondo del liquido, è dello stesso ordine dell'energia magnetica appena studiata e dunque il vicolo su L è il medesimo; con queste dimensioni le particelle non precipitano.

Dobbiamo infine considerare le forze di van der Waals, in particolare l'attrazione *dipolo istantaneo - dipolo indotto* nota come forza di dispersione di London. Per motivi di origine quantistica, si forma un momento di dipolo indotto istantaneo  $\vec{p}_1(t) \neq 0$  nella particella 1 che classicamente genera un campo  $|E| \propto \frac{1}{r^3}$  che polarizza la seconda particella con  $\vec{p}_2 \propto \vec{E}$ ; le due particelle tenderanno ad avvicinarsi concordamente con i dipoli. Queste forze non dipendono dalla dimensione della particella e per contrastarle si utilizza uno strato di tensioattivo che impedisce alle partielle di avvicinarsi oltre un certo raggio. Dato che l'energia delle forze di London scala come  $\frac{1}{r^6}$  scegliendo uno spessore di tensioattivo adeguato posso trascurare queste forze.

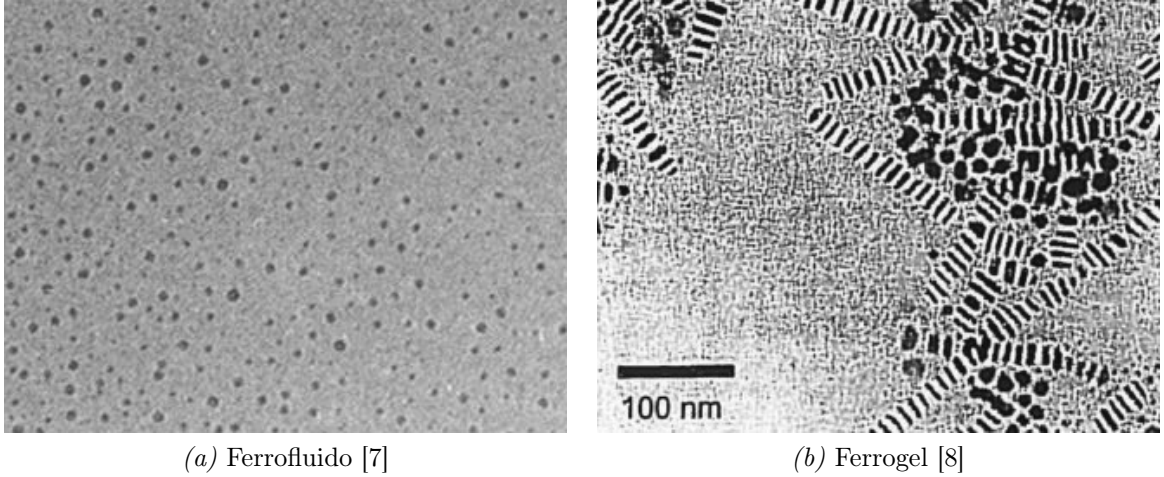
Dunque, detta L la dimensione caratteristica delle mie particelle, la condizione  $L < 10nm$  garantisce la stabilità della sospensione colloidale di particelle ferromagnetiche.

## 1.2 Zoologia dei ferrofluidi

Parleremo ora della "zoologia" dei ferrofluidi, ovvero di come si possono presentare le particelle in sospensione.

Nei ferrofluidi a base di ferro, le nanoparticelle hanno una forma circa sferica e si orientano con il campo magnetico esterno concordamente al loro momento di dipolo. In Figura 1a si vedono le nanoparticelle sospese, la barra nera è lunga 100 nm. Si nota chiaramente la forma sferica che presentano; il termine tecnico è *rock shape*. Questa non è l'unica forma che possono assumere le nanoparticelle, dato che il limite sulla loro lunghezza caratteristica L non vincola in alcun modo la loro geometria, almeno al primo ordine.

Nella Figura 1b si vedono dei ferrofluidi a base di cobalto. In particolare le nanoparticelle magnetiche in sospensione presentano una forma a disco e si nota la formazione di catene, tipico comportamento dei ferrogel. Si possono avere naturalmente anche ferrofluidi a base di cobalto *rock shape*, come quelli utilizzati come campioni in questa tesi.



*Figura 1: Confronto al microscopio elettronico tra due diversi ferrofluidi. In (a) è presentato un ferrofluido formato da composti ferrosi di forma circa sferica. In (b) è presentato un ferrogel composto di nanoparticelle magnetiche di forma discolare; in particolare si osserva la formazione di strutture all'interno del solvente.*

A prescindere dalla forma delle nanoparticelle in sospensione, il campo magnetico magnetizza il fluido proprio grazie a questi dipoli magnetici: si allineano concordamente alle linee di campo e si osserva una magnetizzazione non nulla del fluido. La caratteristica dei ferrogel, che li distingue dai ferrofluidi utilizzati fin'ora, è la formazione di particolari strutture all'interno del solvente. I momenti di dipolo magnetico nelle nanoparticelle a base di cobalto sono più intensi dei corrispettivi nei comuni ferrofluidi. Nei ferrogel non solo i dipoli si allineano seguendo le linee di campo, ma si attraggono tra di loro. Si formano così delle strutture simili a catene orientate sempre concordamente al campo magnetico.

Dal punto di vista fisico, la formazione di queste catene può portare a una differenza almeno quantitativa tra il comportamento dei ferrogel e quello dei ferrofluidi. Innanzitutto, nella statica di gocce di ferrogel ci si aspettano dei comportamenti quantitativamente diversi perchè la magnetizzazione che presenta il ferrogel, confrontata con quella dei ferrofluidi a base di composti del ferro, risulta essere più alta ad analoghe concentrazioni. Dunque il ferrogel potrebbe risentire di forze magnetiche maggiori rispetto ai normali ferrofluidi, ma la natura di tali forze e la loro fenomenologia dovrebbero essere simili.

Nello studio della dinamica il discorso è leggermente diverso. La formazione di catene all'interno del ferrogel può aumentare la sua viscosità, in quanto viene richiesta energia per rompere i legami tra le nanoparticelle magnetiche a base di cobalto. Queste catene possono in teoria modificare qualitativamente la dinamica della goccia e la sua separazione, fenomeno scoperto recentemente e riconducibile all'instabilità di Rosensweig.

Il parametro che quantifica l'interazione tra le particelle magnetiche presenti in un ferrofluido è dato da :

$$\lambda = \frac{\mu_o \cdot M_o^2 \cdot V^2}{4\pi \cdot d^3} \cdot \frac{1}{k_b \cdot T}$$

dove  $\mu_o$  rappresenta la permeabilità magnetica nel vuoto,  $M_o$  la magnetizzazione del materiale,  $V$  il volume dello stesso,  $d$  il diametro della particella magnetica,  $k_b$  la costante di

Boltzman e  $T$  la temperatura assoluta del liquido [9]. Questa formula vale per particelle magnetiche di forma sferica sospese in un solvente.

Nel momento in cui si applica lo strato di tensioattivo il coefficiente di accoppiamento subisce una leggera modifica :

$$\lambda^* = \lambda \left( \frac{d}{d + 2s} \right)^3$$

dove il termine  $s$  corrisponde allo spessore dello strato tensioattivo [8].

Infine, se si considerano particelle magnetiche in sospensione di forma non sferica, valgono ancora le formule scritte sopra a patto di sostituire a  $d$  il parametro  $L$ , la lunghezza caratteristica del sistema preso in esame.

### 1.3 Superparamagnetismo

Nei materiali suscettibili a campi magnetici si osservano diverse forme di magnetismo: il ferromagnetismo, il paramagnetismo e il superparamagnetismo. I ferrofluidi, pur essendo composti da particelle ferromagnetiche, nel loro complesso non si comportano come materiali ferromagnetici.

#### *Ferromagnetismo*

Introduciamo il vettore magnetizzazione  $\vec{M}$  che quantifica la densità del momento di dipolo magnetico complessivo del materiale. Se introduciamo un campo magnetico esterno  $\vec{B}$ , il materiale ferromagnetico inizialmente non magnetizzato, acquista una magnetizzazione in modulo non nulla. Questo comportamento può essere spiegato schematizzando i materiali come un insieme di domini magnetici, chiamati *domini di Weiss*, che si allineano concordamente alle linee di flusso del campo magnetico che attraversa il mezzo stesso. Una volta rimosso  $\vec{B}$ , permane nel materiale una magnetizzazione  $\vec{M}$  residua in quanto i domini di Weiss, non essendo liberi, tendono a mantenere la loro orientazione nel materiale solido; questo comporta che nel ferromagnetismo sia presente isteresi. Nei materiali ferromagnetici non vi è un relazione lineare tra  $\vec{M}$  e  $\vec{B}$ , ma a parità di campo magnetico esterno, la magnetizzazione è circa tre~quattro ordini superiore rispetto ai materiali paramagnetici.

#### *Paramagnetismo*

I materiali paramagnetici sono costituiti da molecole che hanno ciascuna momento di dipolo intrinseco; in assenza di campo le direzioni di questi dipoli elementari sono distribuite a caso così che non si osserva nessun effetto macroscopico. Il paramagnetismo, a differenza del ferromagnetismo, non presenta isteresi; questo si traduce nel fatto che, una volta tolto il campo magnetico esterno, i dipoli magnetici, non essendo vincolati, tornano a disporsi casualmente nel materiale portando la magnetizzazione complessiva residua nuovamente ad un valore nullo. Se  $\vec{B}$  è il campo esterno che va ad allineare i dipoli magnetici del materiale, allora posso scrivere  $\vec{M} = \frac{\chi_m}{\mu_0(1+\chi_m)} \vec{B}$ . Nel caso dei materiali paramagnetici  $\chi_m \ll 1$  e quindi il campo magnetico è proporzionale linearmente alla magnetizzazione:  $\vec{M} = \frac{\chi_m}{\mu_0} \vec{B} = \mu_r \vec{B}$

con  $\mu_r \geq 1$ .

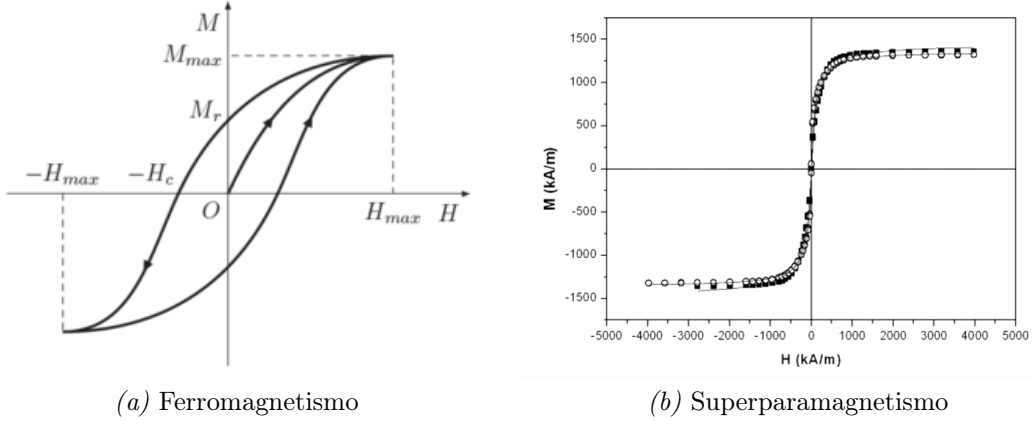


Figura 2: Confronto tra curve di magnetizzazione. In IV.b i dati sperimentali sono interpolati con l'approssimazione di Fröhlich-Kennelly, i quadrati pieni indicano il campione discolare, i cerchi vuoti il campione rock shape.

### Superparamagnetismo

Il superparamagnetismo, come il paramagnetismo, non presenta isteresi. La differenza tra i due tipi di materiale è data dal valore di  $\mu_r$ . Nei materiali superparamagnetici  $\mu_r \sim 10^3 - 10^4$ .

I ferrofluidi sono materiali che presentano superparamagnetismo. La grandezza caratteristica dei domini di Weiss è tra  $10 - 100 \mu m$  dunque è più grande delle dimensioni delle nanoparticelle nel ferrofluido. Questo ci permette di supporre che le nanoparticelle si comportino come singoli domini di Weiss con la differenza che sono libere di orientarsi in assenza di campo a causa dei moti browniani. La magnetizzazione di questi liquidi segue la legge di Langevin:

$$M = \rho\mu \left( \coth\left(\frac{\mu_r B}{k_B T}\right) - \frac{k_B T}{\mu_r B} \right)$$

A questa legge si preferisce l'approssimazione dovuta a Fröhlich-Kennelly in quanto abbassa i costi computazionali ed è indipendente dalla concentrazione del ferrofluido, in quanto le quantità espresse sono tutte normalizzate:

$$M = \frac{BM_s}{B + M_s/\chi}$$

dove  $M_s$  è la magnetizzazione di saturazione, ovvero la magnetizzazione raggiunta dal ferrofluido per  $B \rightarrow \infty$  mentre  $\chi = \chi_m \mu_0$  è la derivata di  $M$  rispetto al campo esterno per  $B \rightarrow 0$ .

In Figura 2 sono mostrate le differenze tra materiali ferromagnetici e superparamagnetici. I primi presentano il classico ciclo di isteresi, mentre i materiali superparamagnetici percorrono la curva di magnetizzazione in modo reversibile. In particolare nella Figura 2b sono confrontate le curve di magnetizzazione sperimentali per un campione di ferrofluido a base di composti di cobalto di forma sferica e di forma discolare. Si nota come la forma a disco favorisca la formazione di catene all'interno del liquido. Queste producono una maggiore



magnetizzazione nel ferrogel a parità di concentrazione e a parità di H.

## 1.4 Forze statiche e instabilità

In questo paragrafo parleremo delle forze agenti su gocce di ferrofluido, ovvero piccole quantità di liquido superparamagnetico, in presenza di campi magnetici e in condizioni statiche.

Il volume di queste gocce è limitato in modo da poter ipotizzare che la magnetizzazione interna non modifichi eccessivamente le linee del campo  $\vec{B}$ . Con queste condizioni possiamo assumere  $\vec{B}$  costante e uniforme nella direzione di  $\hat{z}$  mentre il suo gradiente  $\nabla\vec{B}$ , a sua volta costante e uniforme, è parallelo a  $\vec{B}$  ma in verso opposto. La goccia nel suo complesso risentirà di forze di volume e di superficie.

*Forze di volume :  $B_o$*

Le forze di volume sono due: la forza peso e la forza magnetica agente sulle particelle in sospensione.

$$\vec{F}_{volume} = M\nabla\vec{B} + \rho\vec{g}$$

Ma per la simmetria del problema, le due forze sono concordi e quindi nei fatti la goccia risente semplicemente di una forza per unità di volume rivolta verso il basso data in modulo da:

$$F = \rho g^* \quad \text{dove} \quad g^* = g + \frac{M\nabla B}{\rho}$$

Possiamo ora definire il numero di Bond magnetico  $B_o^*$  che quantifica il rapporto tra l'energia dovuta alle forze di volume e l'energia di tensione superficiale.

$$l = V^{1/3} \quad E_{vol} = \rho g^* l \quad E_{sup} = \gamma/l \quad B_o^* = \frac{\rho g^* V^{2/3}}{\gamma}$$

Questo numero governerà il comportamento della goccia nella prima transizione; la goccia tenderà ad appiattirsi portandosi in una nuova configurazione di equilibrio.

*Forze di superficie :  $S$*

Quantifichiamo la forza di superficie dovuta al campo magnetico agente sulla goccia di ferrofluido; questa è data da  $\vec{F} = -\mu_0 \vec{H}(\vec{\nabla} \cdot \vec{M})$  in cui possiamo sostituire al gradiente della magnetizzazione il termine  $-\vec{\nabla} \cdot \vec{H}$  in quanto siamo in assenza di correnti elettriche. Otteniamo così  $\vec{F} = \vec{B}(\vec{\nabla} \cdot \vec{H})$  che posso riscrivere in componenti per trovare il tensore degli sforzi dovuto alle forze magnetiche:

$$F_i = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial B_i B_j}{\partial x_j} - \frac{B_i}{\mu_0} \frac{\partial B_j}{\partial x_j} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial}{\partial x_j} (B_i B_j - \frac{1}{2} B^2 \delta_{ij})$$

e ricordando la definizione di tensore degli sforzi, troviamo il **tensore degli sforzi di Maxwell** che mi permette di quantificare le forze di taglio:

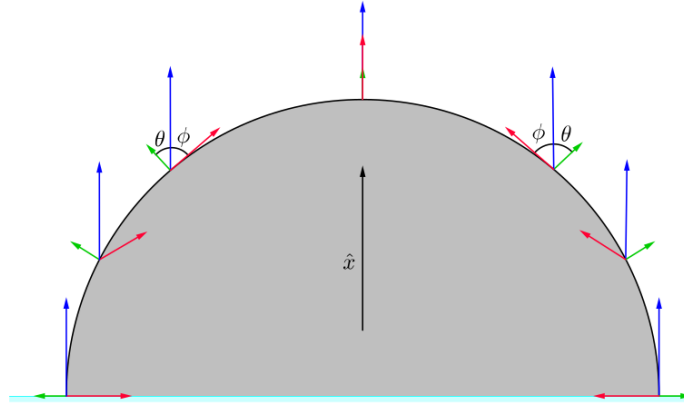


Figura 3: Schematizzazione delle forze di taglio agenti sulla goccia

$$\mathbf{T} = \frac{B_i B_j}{\mu_0} - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \delta_{ij}$$

Ora, ipotizziamo il campo magnetico verticale e studiamo il sistema in coordinate cilindriche con  $\hat{z}$  concorde a  $\vec{B}$ ; ovviamente non abbiamo dipendenza dall'angolo  $\theta$  e questo rende possibili studiare le forze considerando solo  $\hat{z}$  e  $\hat{\rho}$ . Scrivendo  $\vec{B} = (B_z \ 0 \ 0)$ :

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \frac{B^2}{2\mu_0} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{B^2}{2\mu_0} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{B^2}{2\mu_0} \end{pmatrix}$$

la normale uscente dalla superficie è data da  $\hat{n} = (\cos\psi \ \sin\psi \ 0)$  e dunque la forza magnetica agente sulla goccia è data da  $\vec{t} = T\hat{n} \propto (\cos\psi \ -\sin\psi \ 0)$ . Le conseguenze di ciò si possono vedere nella Figura 3: l'angolo tra la forza di trazione e il campo magnetico in ogni punto della superficie è uguale e opposto rispetto all'angolo tra la normale alla superficie e il campo magnetico ( $\theta = \phi$ ).

Le forze di trazione tendono in questo modo a restringere il diametro della goccia ed ad allungarla verso l'alto; il comportamento è opposto a quello visto per le forze di volume. Anche qui, analogamente al numero di Bond, possiamo definire il rapporto tra la forze magnetiche ( $T \propto B^2/\mu_0 = \mu_0 M^2$ ) e superficiali:

$$S = \frac{\mu_0 M^2 V^{1/3}}{\gamma}$$

### Instabilità

All'aumentare di  $M$  dunque, l'altezza della goccia cresce progressivamente. Tuttavia, sotto alcune condizioni, la goccia può dividersi in una o più gocce figlie [1].

Questa instabilità è riconducibile all'instabilità di Rosensweig [6] per grandi volumi di ferrofluido. Le forze di taglio che tendono ad aumentare l'altezza della goccia comportano una crescita dell'interfaccia aria-liquido; oltre una certa soglia, che dipenderà da vari fattori, come la molarità del campione, il suo volume, l'intensità del campo magnetico agente e la superficie

d'appoggio, la goccia si divide per minimizzare le energie in gioco. La goccia dapprima comincia ad abbassarsi deformandosi, poi si forma una valle che porta alla rottura della goccia.

Non essendoci un modello teorico che descrive questa instabilità su piccoli volumi, uno degli obiettivi di questa tesi è lo studio sperimentale della relativa fenomenologia.

## 1.5 Superfici

Nell'esperimento si sono analizzate le proprietà statiche di gocce di ferrofluido a base di cobalto su superfici omogenee, quindi verranno qui brevemente spiegati i concetti di angolo di contatto e isteresi.

### *Angolo di contatto*

Nel momento in cui si deposita una goccia di fluido su una superficie, questa si dispone formando un angolo di contatto  $\theta_c$ . L'angolo di contatto è definito come l'angolo tra la superficie d'appoggio e la tangente all'interfaccia liquido/aria della goccia nel punto di contatto tra aria, liquido e superficie, come si può notare in Figura 4 [5].

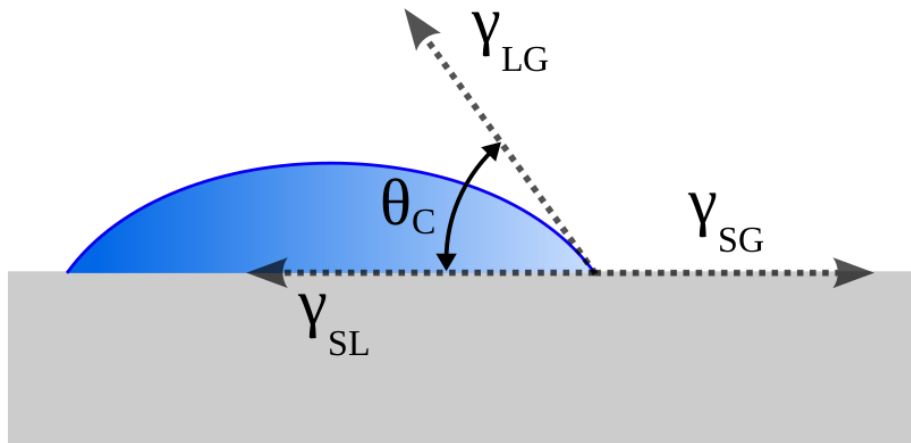


Figura 4: Schematizzazione di una goccia su superficie piana e omogenea

L'angolo di contatto si può ricavare da un semplice bilancio delle forze agenti sulla linea di contatto che mi restituisce:

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG} \cos\theta_c = 0$$

Da cui si ottiene la legge di Young:

$$\cos\theta_c = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}}$$

In base all'angolo di contatto e riferendosi ad una goccia d'acqua posso dividere qualitativamente le superfici in tre categorie:

Idrofile se  $\theta_c < 90^\circ$

Idrofobe se  $\theta_c > 90^\circ$

Superidrofove se  $\theta_c > 150^\circ$

*Isteresi dell'angolo di contatto*

Le superfici reali presentano, nella maggior parte dei casi, delle imperfezioni che portano ad un termine di *pinning*, ovvero l'angolo di contatto varia in un intervallo compreso tra l'angolo di recessione  $\theta_R$  e l'angolo di avanzamento  $\theta_A$ . In sostanza, la goccia può deformarsi all'interno di questo intervallo, senza spostare la sua linea di contatto. Questo porta ad un isteresi dell'angolo di contatto che dipende da come è stata depositata o dai movimenti precedenti della goccia; in particolare questo si nota in superfici che presentano irregolarità su scala micrometrica, come il teflon prodotto industrialmente per usi idraulici. L'isteresi di questi processi viene quantificata in gradi, e corrisponde alla differenza tra l'angolo di recessione e l'angolo di avanzamento.

# Capitolo 2

## Apparato sperimentale

In questo capitolo si andrà a mostrare l'apparato sperimentale utilizzato. Successivamente si confronteranno le varie superfici utilizzate come appoggio per le gocce.

### 2.1 Banco di lavoro

Il banco di lavoro utilizzato per l'esperimento è mostrato in Figura 5 e consiste di:

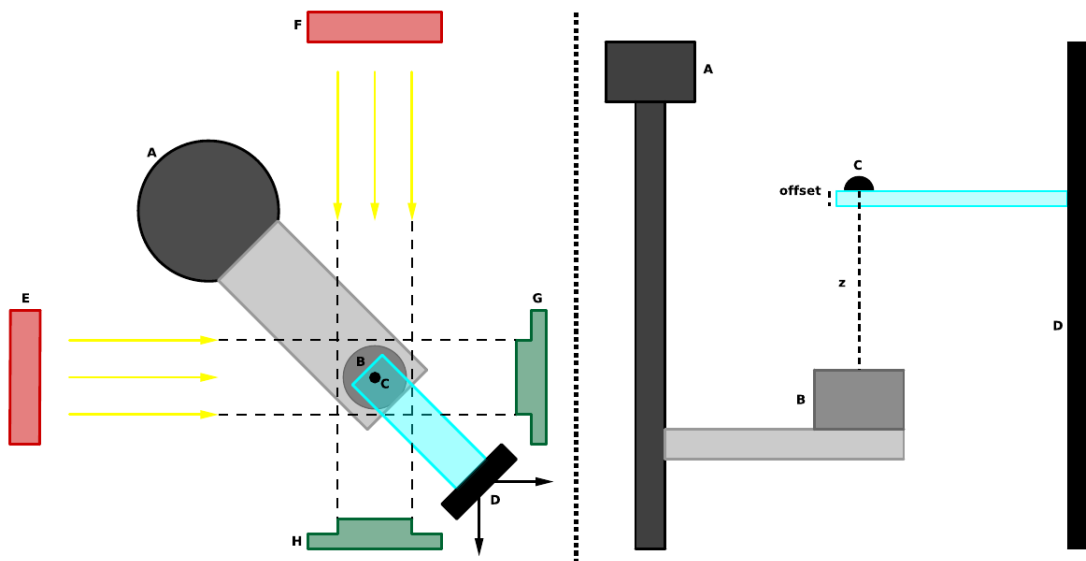


Figura 5: Apparato sperimentale. Sinistra: vista dall'alto. Destra: vista laterale.

A : Un braccio meccanico. Una vite di passo pari a  $0.5 \mu\text{m}$  controllata da computer permette di cambiare la posizione del magnete lungo l'asse verticale.

B : Un magnete di forma cilindrica, diametro  $4.5 \text{ cm}$ , altezza  $3.0 \text{ cm}$ . Genera un campo magnetico uniforme e normale alla superficie in prossimità del centro assiale la cui intensità dipende ovviamente dalla distanza del magnete.

C : Goccia di ferrogel. Al fine di ricadere nelle ipotesi richieste dalla trattazione teorica del capitolo uno, la goccia va posizionata lungo l'asse del magnete. Il supporto che la

sostiene è un vetrino dello spessore di 1 mm che verrà usato come *offset* sulle distanze nell'analisi dati. Sopra il vetrino verranno appoggiate diverse superfici (LIS, teflon, vetro) su cui verrà studiato il comportamento della goccia.

D : Un supporto montato sul banco di lavoro. Permette di posizionare il vetrino orizzontalmente in modo da compensare la forza di gravità e mantenere la simmetria cilindrica del problema. È possibile inoltre spostare il vetrino per ottimizzare il setting dell'apparato; due movimentatori micrometrici alla base permettono traslazioni di pochi millimetri per portare la goccia a distanza focale.

E,F : Due telecamere di acquisizione dati. Sono posizionate con un angolo di circa  $90^\circ$ ; questo permette di visualizzare la goccia da due diverse prospettive, utile soprattutto nella seconda transizione della seconda instabilità. Quando la goccia si rompe infatti, non rispetta più la simmetria cilindrica, ma si dividerà lungo una direzione.

G,H : Due fasci a LED collimati illuminano la goccia campione. Sono posizionati, rispetto alle camere, dietro la goccia; questa retroilluminazione fa sì che la goccia di liquido che si studia venga osservata come nera su sfondo bianco, in quanto la luce che attraversa il liquido viene deviata dalle interfacce.

Bisogna aggiungere che le gocce di ferrofluido tendono ad evaporare (evapora il solvente e dopo un tempo superiore alla mezz'ora, si può osservare il deposito delle particelle magnetiche dove era stata appoggiata la goccia). Dato che nella presa dati si utilizzano volumi che vanno da  $2\mu\text{L}$  a  $16\mu\text{L}$ , il tasso di evaporazione può modificare le condizioni di misura, infatti una singola goccia viene usata per qualche minuto come campione. Per ovviare a tale inconveniente, in prossimità del vetrino, viene posizionata della carta imbevuta d'acqua in modo da avvicinare localmente le condizioni di umidità dell'aria a quelle della goccia e quindi diminuire il tasso di evaporazione.

## 2.2 Superfici

Vediamo brevemente le tre superfici utilizzate per confrontare le proprietà dei ferrofluidi a base di cobalto con gli analoghi a base di composti ferrosi.

Vetro : Questa superficie consiste semplicemente in un coprivetrino da laboratorio pulito con acqua ed etanolo. Le proprietà di isteresi e l'angolo di contatto dipendono largamente dal grado di pulizia del vetrino stesso. Delle tre superfici utilizzate è la più idrofila.

Teflon : Il politetrafluoroetilene è un polimero con notevoli applicazioni. Le sue qualità più rilevanti, almeno per quello che concerne questa tesi, riguardano l'angolo di contatto e l'isteresi. Per quanto riguarda l'angolo di contatto, rifacendoci al Capitolo 1, il teflon è idrofobo ( $\theta_c \sim 120^\circ$ ) e infatti viene utilizzato in rivestimenti di antiaderenza. L'isteresi che presenta invece è molto alta e questo è dovuto alla rugosità superficiale.

LIS : È una superficie formata da una struttura impregnata di olio (*liquid impregnated surface*). Su un vetrino viene lasciato essiccare dell'olio siliconico, con viscosità 5cSt, che forma un pattern sulla superficie. Questo pattern viene ricoperto con olio siliconico

dello stesso tipo ma in forma liquida; la goccia che viene appoggiata sulla LIS sarà quindi sostenuta dallo strato di olio silconico liquido, che non presenta irregolarità. L'isteresi viene così ridotta al minimo. Per le proprietà interfaciali liquido-liquido, l'olio risale e "circonda" la goccia (effetto *cloaking*) formando un angolo di contatto molto più basso rispetto alle proprietà idrofile del materiale.

Nella Tabella 2.1 sono indicati i valori di angolo di contatto e di isteresi per le tre superfici [5].

*Tabella 2.1: Confronto superfici*

Superficie	$\theta_C$	Isteresi
LIS	100°	2°
Vetro	20°	5°
Teflon	120°	20°

# Capitolo 3

## Misure e verifiche sperimentali

In questo capitolo si andranno ad esporre i risultati dell'esperimento.

Il capitolo si divide in una prima parte, dove si stimano gli errori, e in due ampie sezioni. Nella prima sono presentati i risultati della statica di gocce di ferrogel con molarità comprese tra 0.05 M e 0.8 M. Si esaminano le forze di volume che agiscono sulla goccia di ferrofluido a base di cobalto utilizzando campioni di diversi volumi e con diverse superfici. Nella seconda sezione si analizza il comportamento di gocce di ferrogel con molarità comprese tra 5M e 8M. Sono state studiate entrambe le transizioni dovute alle forze di superficie; nella prima transizione la posizione di massima altezza raggiunta dalla goccia, nella seconda transizione la posizione in cui avviene la formazione di gocce figlie. Anche in questa parte sono confrontati diversi volumi e diverse superfici.

I risultati raccolti nella prima parte vengono confrontati con il lavoro [4] mentre quelli relativi alla seconda parte sono confrontati con [5]. Entrambi i lavori sono focalizzati su ferrofluidi a base di composti ferrosi.

L'analisi dati è stata fatta mediante programmi scritti con il linguaggio *C++* avvalendosi del programma di analisi di Root per l'interpolazione dei dati. I grafici sono ottenuti ovviamente mediante l'utilizzo di Root.

### 3.1 Errori

Prima di procedere alla presentazione e al confronto dei dati raccolti, vediamo alcune assunzioni sugli errori che possiamo fare nel trattare i dati.

Nella raccolta dati, si presentano tre diverse tipologie di errore:

A : Errori della strumentazione. In questa esperienza, possiamo riconoscere tre possibili errori legati alla strumentazione. Il primo errore riguarda l'incertezza sul volume delle gocce: la pipetta di precisione con cui sono state deposte le gocce ha una sensibilità di  $\Delta V = 0.05\mu L$ . Il secondo errore riguarda l'incertezza sulla posizione della goccia: il braccio meccanico ha un passo di  $0.1\mu m$ , tuttavia per settarlo alla posizione zero ho un'incertezza di  $0.1mm$ , dunque prendiamo quest'ultimo valore come incertezza sulla posizione. Infine un terzo errore deriva dall'utilizzo di due telecamere: la Manta A e la



Manta B acquistano immagini separatamente e dunque l'immagine data dalla Manta A e quella data dalla Manta B possono essere leggermente diverse.

B : Errori metodologici. Sono essenzialmente tre. Il primo riguarda il programma di preanalisi, che estrapola dalle immagini delle gocce le loro grandezze caratteristiche. Il secondo errore è legato alle condizioni di *wetting*: le superfici che considero sono reali e dunque, nonostante la legge di Young fissi l'angolo di contatto tra il liquido e la superficie d'appoggio, è presente isteresi. L'angolo di contatto varia leggermente a seconda di come la goccia viene depositata sulla superficie. Ma se varia l'angolo di contatto, a parità di volume, variano anche le altezze e i diametri misurati. Maggiore è l'isteresi della superficie, maggiori saranno le fluttuazioni. Il terzo errore metodologico riguarda la posizione del magnete: per studiare il sistema abbiamo ipotizzato che la goccia fosse centrata lungo l'asse del magnete. Se la goccia viene posizionata fuori asse si potrebbero avere delle fluttuazioni delle grandezze.

C : Errori statistici. Questi errori sono legati alle fluttuazioni dei fenomeni che si esaminano e sono intrinseci nei processi. Per stimarli si raccolgono nelle stesse condizioni diverse misure e vengono quantificati come la radice dello scarto quadratico medio.

Per poter capire quali siano gli errori dominanti in questo esperimento, si plottano in Figura 6 le medie di alcuni dati raccolti con i relativi errori. In particolare si analizzano i dati relativi alla Manta A e alla Manta B separatamente.

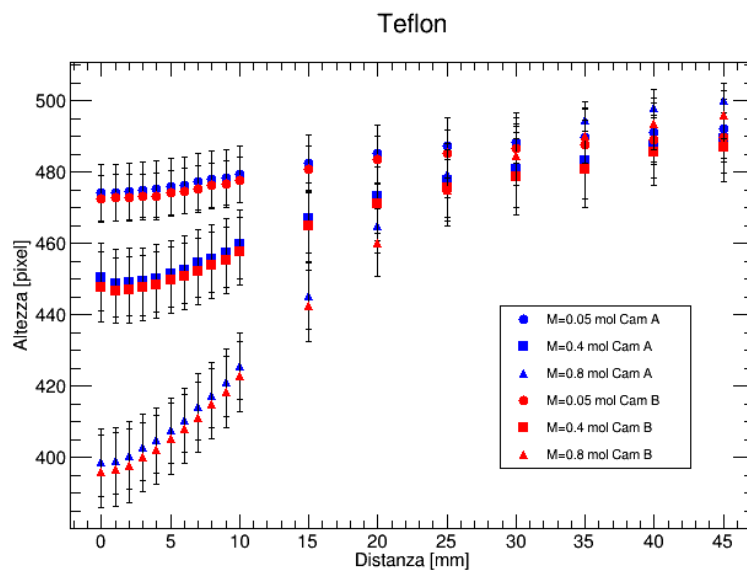


Figura 6: Altezza espressa in pixel in funzione della distanza. Sono plottati le medie dei dati delle due camere a diverse concentrazioni e le relative dispersioni.

Come si vede, le immagini delle due Mante sono praticamente uguali: in particolare si vede un errore di offset di circa 3 pixel. Possiamo eliminare questo errore mediando le grandezze registrate dalle due telecamere; comunque risulta circa un quinto rispetto alle barre di errore sulle medie. Per quanto riguarda l'incertezza sulla posizione non si riesce neppure a visualizzarla, quindi è totalmente trascurabile. Per l'incertezza sul volume, andiamo ad idealizzare la mia goccia come una calotta emisferica di raggio  $R$ . La differenza tra due volumi nominalmente uguali sarà al più:

$$V_1 - V_2 = \Delta V = \frac{2\pi}{3}(H_1^3 - H_2^3)$$

Svolgendo il calcolo, un errore di  $0.05\mu L$  nei volumi da noi utilizzati ( $V \geq 3\mu L$ ) comporta un errore nelle altezze inferiore ai 5 pixel. Aumentando i volumi, i contributi di questo errore ovviamente diminuiscono, quindi anche questo errore è trascurabile rispetto alle barre di errore legate alle medie dei dati.

Abbiamo così scartato, come possibili cause di errore, tutti gli errori legati alla strumentazione.

Notiamo che le barre di dispersione sono circa simili tra di loro a parità di condizioni (ovvero a parità di molarità, di volume e di superficie) e che le medie si dispongono lungo linee ben definite coerentemente. Se andiamo a plottare i dati raccolti nelle stesse condizioni sperimentali, come fatto in Figura 7, si vede che questo è causato da delle traslazioni lungo l'asse y dei miei dati.

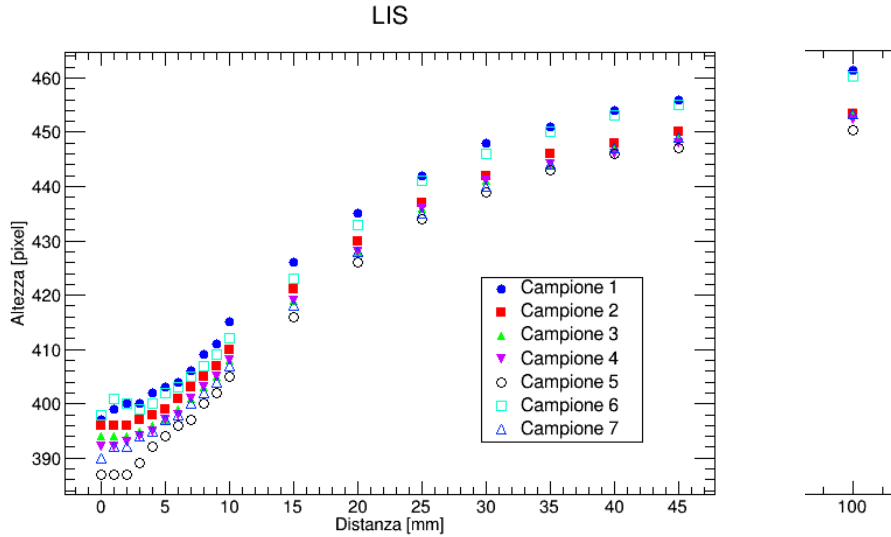


Figura 7: I dati relativi ai campioni di  $V = 3\mu L$  con molarità  $0.4mol$  su superficie LIS.

I dati dei diversi campioni si posizionano su curve analoghe ma traslate rispetto all'asse y: le barre di errore sono causate da questa dispersione dei campioni e per questo sono simili tra di loro. Questi errori non possono essere legati al magnete, in quanto si presentano analoghi a grandi distanze, in particolare a 10cm. Non possono essere legati al programma di preanalisi, in quanto si presentano uguali nelle due Mante e analizzando due diverse immagini dello stesso campione si ottengono le stesse dispersioni. Si vede che l'altezza subisce traslazioni costanti di circa 12 pixel, e plottando il medesimo grafico per campioni di stesso volume e stessa molarità ma studiati sul teflon, si vedono che le fluttuazioni aumentano. Non possono essere errori statistici, in quanto si presentano uguali in tutte le posizioni. Rimangono solo gli errori legati alle condizioni di *wetting* e per sincerarsene, in Figura 8 grafichiamo gli angoli di contatto misurati per gocce nelle stesse condizioni sperimentali (volume, molarità e superficie).

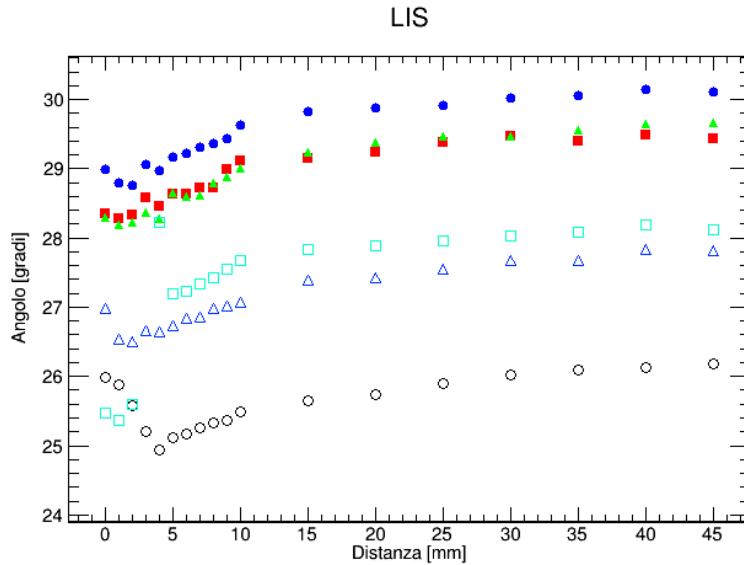


Figura 8: Angolo di contatto per gocce di ferrofluido a base di cobalto di volume  $3\mu\text{L}$  e molarità  $0.4\text{mol}$ .

Effettivamente, l'errore è legato alle condizioni di wetting: in particolare si nota un'isteresi di circa  $5^\circ$  nelle superfici LIS ( $20^\circ$  nel Teflon) che porta campioni con lo stesso volume ad avere altezze leggermente diverse. Abbiamo concluso che le barre di errore in Figura 6 sono dovute a condizioni di *wetting*. Tuttavia, fissate queste condizioni i vari campioni si comportano nello stesso modo, e dunque le variazioni relative di altezza, diametro e angolo di contatto sono le stesse. In particolare, se normalizzo i dati rispetto alle misure a grandi distanze del magnete e computo la media e lo deviazione standard di questi, vedo che l'errore statistico cala al 2% per il teflon e al 0.3% per la LIS.

Nell'analisi che segue i dati vengono normalizzati, e si predilige l'utilizzo della LIS nelle misure. Con queste condizioni posso trascurare l'errore.

Terminiamo questa sezione sottolineando l'importanza di quanto detto fin'ora. Sperimentalmente osserviamo che le gocce di ferrogel si comportano, in termini relativi, tutte nello stesso modo, non presentando grandi fluttuazioni legate al fenomeno. L'importanza di questo fatto è notevole. Potrebbe essere una caratteristica dei ferrogel: le catene che si formano all'interno del solvente potrebbero stabilizzare fortemente la goccia, diminuendo le fluttuazioni.

## 3.2 Statica

In questa sezione andiamo ad analizzare i dati relativi al comportamento statico di gocce di ferrogel. Si è cercato inoltre di confrontare i risultati ottenuti con un lavoro analogo. Tuttavia la regione di studio di questa tesi, come si vedrà, si concentra su bassi numeri di Bond, mentre il lavoro [4] ha spaziato su una gamma più ampia di valori, ma meno dettagliatamente. Potremo così fare un confronto solo qualitativo.

La fenomenologia che osservo in questa prima parte è mostrata in Figura 9:

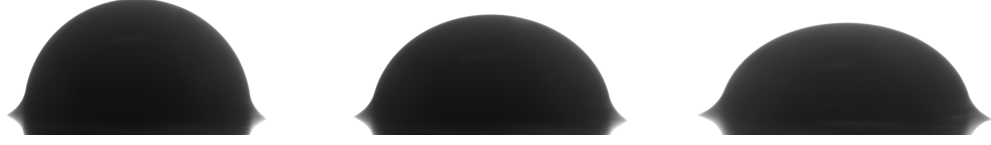


Figura 9: Immagine dei campioni usati su superficie LIS

la goccia di ferrogel, similmente ai ferrofluidi, a causa delle forze magnetiche di volume si appiattisce all'aumentare del campo magnetico. Raccolte le immagini, le si analizzano attraverso un programma per ottenere le altezze, i diametri e gli angoli di contatto.

Nella Figura 10 vediamo graficate le altezze e i diametri normalizzati di gocce di ferrogel di volume  $V = 3\mu L$  a tre diverse molarità. Come nei ferrofluidi, avvicinando il magnete e dunque aumentando l'intensità del campo, le gocce di ferrogel tendono ad appiattirsi. Infatti si vede chiaramente che l'altezza cala al calare della distanza mentre il diametro aumenta. In particolare, come del resto ci aspettavamo, all'aumentare delle molarità la goccia risente di forze più intense e dunque si osserva una variazione delle altezze e dei diametri più accentuata.

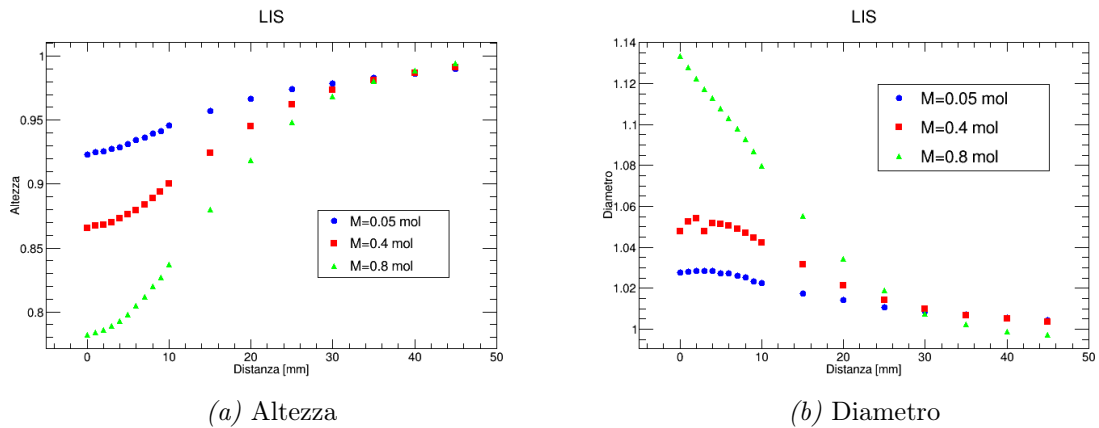


Figura 10: Le due principali grandezze studiate in questa sezione sono il diametro e l'altezza. Il comportamento è simile a quello dei ferrofluidi.

Dal punto di vista qualitativo sembrerebbe non esserci alcuna differenza tra ferrofluidi e ferrogel. Tuttavia già a questo livello si vede come i dati seguano delle curve che presentando una bassa dispersione, come fatto notare nella sezione precedente.

Andiamo allora a graficare le variazioni di altezza, diametro e angolo di contatto di gocce di ferrogel in funzione del numero di Bond, calcolato attraverso l'approssimazione di Fröhlich-Kennelly. Confrontiamoli inoltre con dati analoghi ottenuti con l'utilizzo di campioni di ferrofluido a base di ferro (Figura 11).

I campioni esaminati nel lavoro [4] spaziano su un range di numeri di Bond che va da 0 a 35. D'altra parte i campioni analizzati in questo elaborato di tesi arrivano a numeri di

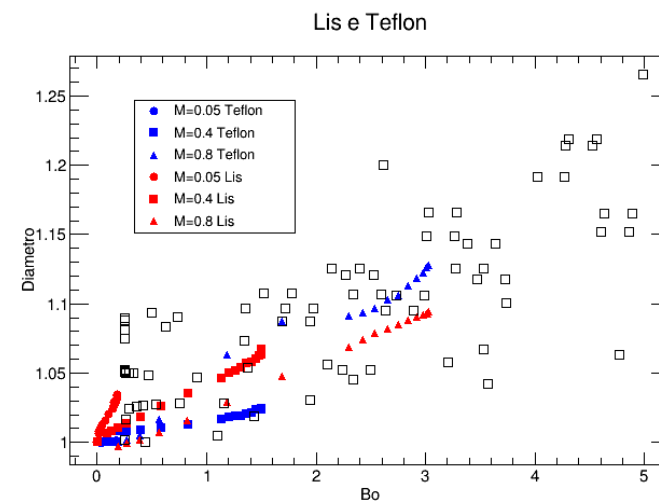
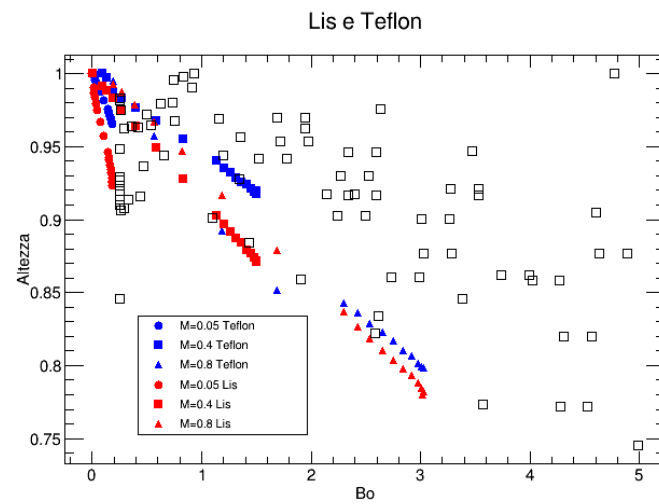
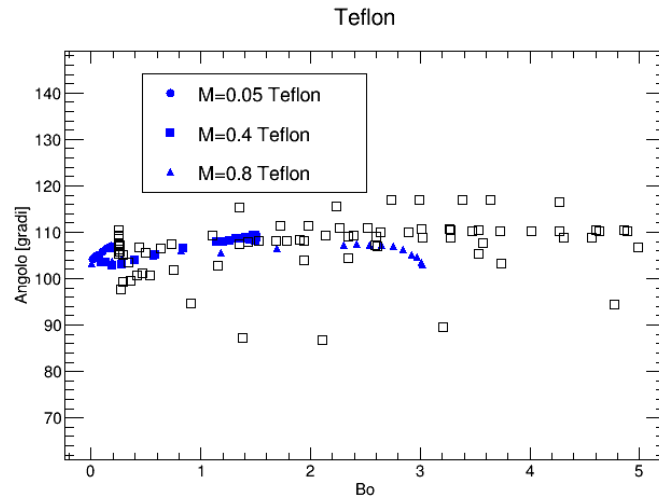


Figura 11: Grafico delle tre grandezze caratteristiche di gocce di ferrofluido in funzione del numero di Bond. In nero i dati relativi ai ferrofluidi a base di composti ferrosi, i dati colorati si riferiscono ai campioni di ferrogel.

Bond pari a 3. Se andiamo a confrontare i dati di [4] che cadono nel nostro range di studio, qualitativamente e quantitativamente, sulle grandi scale, non si riscontrano particolari differenze. L'altezza della goccia, a prescindere dalla molarità e dalla superficie d'appoggio, cala all'aumentare del numero di Bond, e l'opposto vale per il diametro. L'angolo di contatto invece risulta indipendente dal numero di Bond, esattamente come riscontrato nel lavoro sui ferrofluidi.

Se sulle grandi scale non si notano differenze, sulle piccole scale si vede che i dati relativi ai ferrogel si dispongono su linee ben definite. Tuttavia i dati relativi ai ferrofluidi in questo range sono troppo radi per poter affermare che questo comportamento non si verifichi anche nei ferrofluidi a base di composti ferrosi.

Concludiamo dunque osservando che il comportamento qualitativo e quantitativo tra ferrofluidi a base di cobalto e ferrofluidi a base di composti ferrosi è analogo nello studio della statica di gocce, rimandando a successivi lavori l'indagine riguardo questi particolari pattern che si sono riconosciuti nei ferrogel.

### 3.3 Separazione di gocce

In questa sezione si studierà la separazione di gocce di ferrogel e si confronteranno i dati con analoghi ottenuti da gocce di ferrofluido a base di composti ferrosi[5].

Per osservare la separazione di gocce si deve, a parità di volume e di campo magnetico agente, aumentare la concentrazione di nanoparticelle ferromagnetiche nel solvente. In questa parte verranno dunque studiate gocce di ferrogel di concentrazioni 5 mol, 6 mol, 7 mol e 8 mol. Con queste concentrazioni, e con volumi tra i  $4\mu L$  e i  $16\mu L$ , avvicinando il magnete al campione si possono osservare due transizioni.

#### *Prima Transizione*

Avvicinando il magnete al campione, si nota un progressivo aumento dell'altezza della goccia. Questa tende ad alzarsi, come visto nel Capitolo 1, a causa delle forze magnetiche agenti sulla sua superficie (Figura 12).

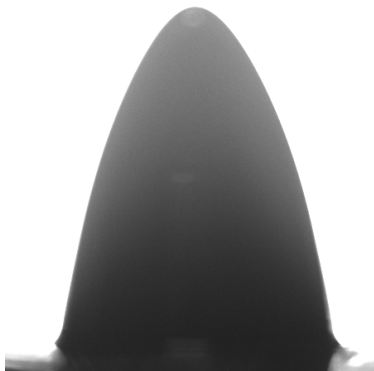


Figura 12: Immagine di un campione usato su superficie LIS

Oltre una distanza critica  $z_c$  dal magnete, la goccia, raggiunta la massima altezza, inizia ad abbassarsi progressivamente. A seconda dei materiali, della molarità e dei volumi dei campioni, il valore di  $z_c$  varia. In Tabella 3.1 sono mostrate le medie dei valori  $z_c$  espresse in millimetri con relativi errori.

Tabella 3.1: Molarità e Volumi

	4 $\mu L$	8 $\mu L$	16 $\mu L$
M5	40.1 $\pm$ 0.4	43.0 $\pm$ 0.7	44.1 $\pm$ 0.7
M6	40.2 $\pm$ 0.3	43.1 $\pm$ 0.4	44.2 $\pm$ 0.3
M7	40.5 $\pm$ 0.6	42.7 $\pm$ 0.8	44.6 $\pm$ 0.4
M8	41.4 $\pm$ 1.3	44.2 $\pm$ 0.7	46.1 $\pm$ 0.2

A queste molarità possiamo plottare il parametro S, che quantifica i contributi delle energie di superficie, in funzione del numero di Bond. Infatti S è proporzionale a  $M^2$  e B è proporzionale a  $M$ , dunque, avendo molarità che vanno da 5 mol a 8 mol, ora dobbiamo considerare anche S nella nostra analisi. Nella Figura 13 sono graficate le medie dei dati raccolti con campioni di Ferrogel (dati colorati) con i dati non mediati dal lavoro [5].

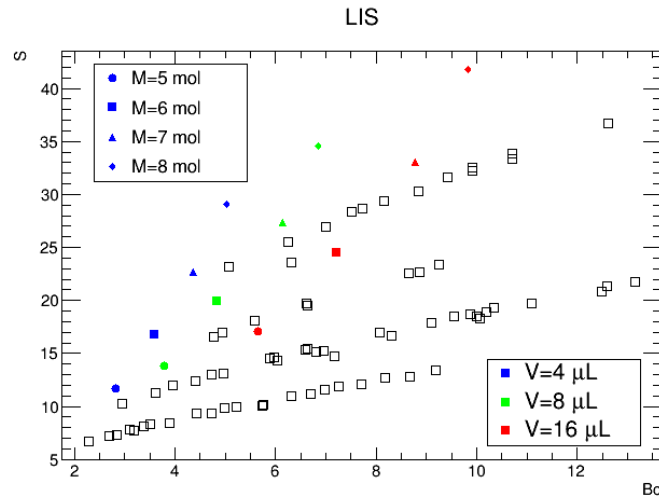


Figura 13: Grafico di S in funzione del numero di Bond per vari campioni a diverse distanze della prima transizione.

Come si vede la regione d'interesse è circa la stessa, dunque qui potremmo fare un confronto più dettagliato. Innanzi tutto notiamo che i dati si dispongono a formare un rombo schiacciato: aumentando il volume si spostano verso destra aumentando il numero di Bond (e in parte anche S: essendo legata alla superficie, aumentando il volume aumenta anche S) e verso l'alto aumentano la molarità. Andiamo a fittare i dati relativi alle stesse molarità in Figura 14:

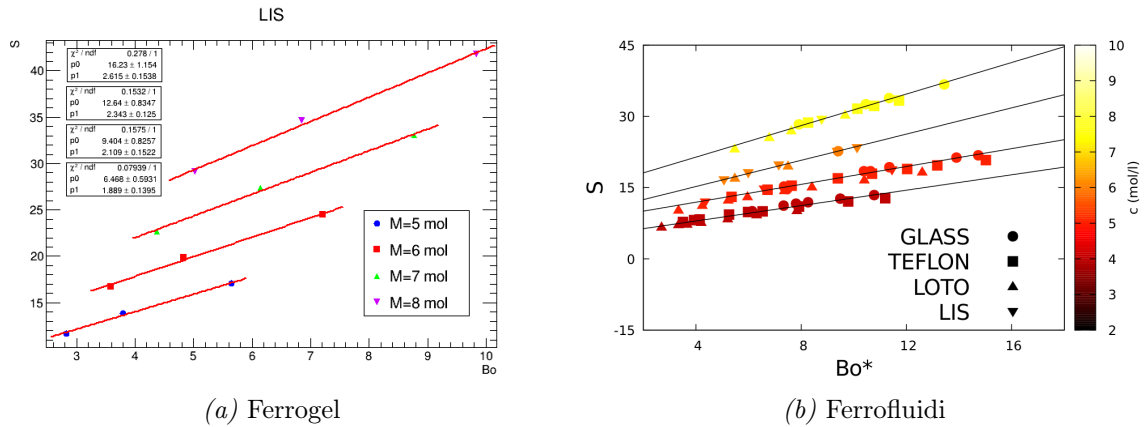


Figura 14: Gli andamenti di  $B$  e  $S$  in funzione della molarità. A sinistra il grafico per i ferrogel, a destra per i ferrofluidi. Lungo le rette sono dati con stessa molarità e diversi volumi

I ferrogel presentano delle pendenze decisamente più elevate rispetto ai ferrofluidi, come si nota. Pendenze ed intercette con relativi errori sono esposti in Tabella 3.2.

Tabella 3.2: Pendenze e intercette ferrogel

	Pendenza	Intercetta
M5	$1.9 \pm 0.1$	$6.5 \pm 0.6$
M6	$2.1 \pm 0.2$	$9.4 \pm 0.8$
M7	$2.3 \pm 0.1$	$12.6 \pm 0.8$
M8	$2.6 \pm 0.2$	$16 \pm 1$

Terminiamo questa parte confrontando le vere pendenze e intercette tra la Figura 15, relativa a campioni di ferrofluido e la Figura 16, con i dati del ferrogel.

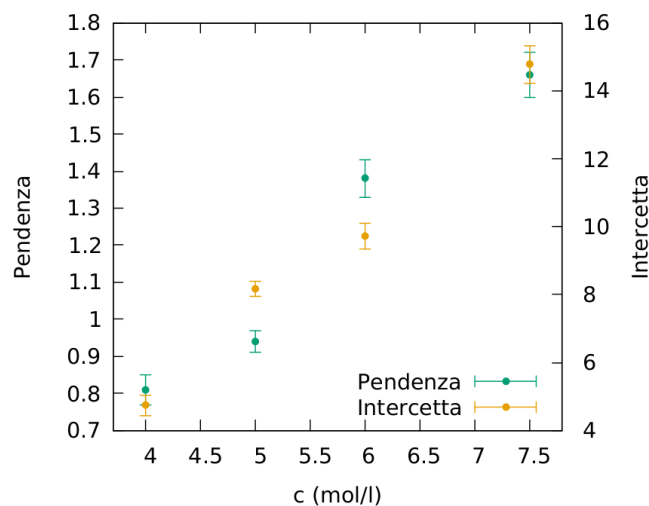


Figura 15: Pendenze e intercette ferrofluidi



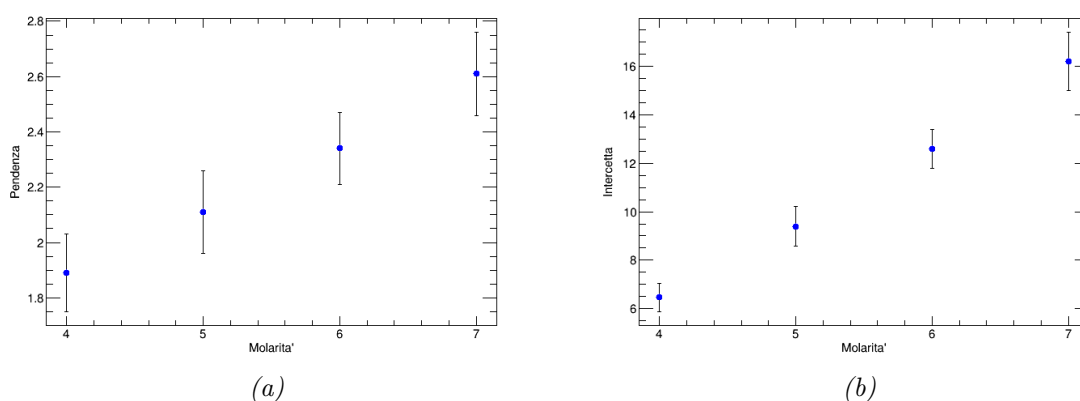


Figura 16: A sinistra le pendenze dei fit lineari a diverse molarità. A destra le intercette. I campioni sono gocce di ferrogel.

Si vede chiaramente che il comportamento qualitativo è lo stesso, ma che il ferrogel risente maggiormente della presenza di campi magnetici.

### Seconda Transizione

La seconda transizione si osserva, a parità di molarità e di volume, a intensità del campo magnetico maggiori. La fenomenologia è mostrata in Figura 17: le gocce di ferrogel, superata la prima transizione, si abbassano e assumono una forma leggermente deformata, come si nota nella prima immagine partendo da sinistra. Successivamente, aumentando ancora l'intensità del campo magnetico si osserva la formazione della valle di instabilità. In corrispondenza di questo evento si sono raccolte le misure relative alla distanza del magnete. Formata la valle di instabilità la goccia si separa velocemente in due, come si vede nell'ultima figura a destra.



Figura 17: Immagine dei campioni usati su superficie LIS

Nella tabella 3.3 sono mostrate le posizioni  $z_c$  in cui si osserva la formazione della valle di instabilità. I valori sono mediati e presentati con i relativi errori.

Tabella 3.3: Molarità e Volumi

	4 $\mu L$	8 $\mu L$	16 $\mu L$
M5	11 $\pm$ 2	18.5 $\pm$ 0.5	22.2 $\pm$ 0.3
M6	12.9 $\pm$ 0.3	18.7 $\pm$ 0.8	24.5 $\pm$ 0.7
M7	15.3 $\pm$ 0.4	20.0 $\pm$ 0.6	24.7 $\pm$ 0.5
M8	16.7 $\pm$ 0.5	21.3 $\pm$ 0.8	26.3 $\pm$ 0.4

Analogamente alla prima transizione, la seconda transizione si osserva ad una distanza maggiore se si aumentano le molarità o se si aumentano i volumi. In questo caso anzi la differenza è ancora più marcata, non presentando fluttuazioni: cambiando la molarità si vede che lo  $z_c$  si sposta di circa un millimetro.

Andiamo a graficare come prima il parametro  $S$  in funzione del numero di  $Bo$  (Figura 18).

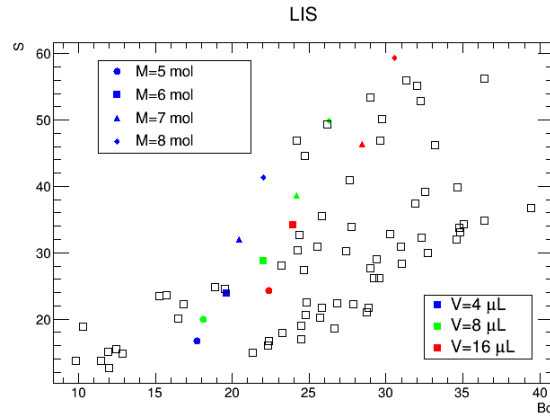


Figura 18: Confronto tra ferrogel e ferrofluidi per la seconda transizione

Come prima i dati si dispongono su delle rette a parità di molarità. Andiamo allora a fittare i dati relativi a campioni con la stessa molarità, analogamente a prima. In Figura 19 si vede che i dati sono più dispersi e seguono un andamento meno lineare.

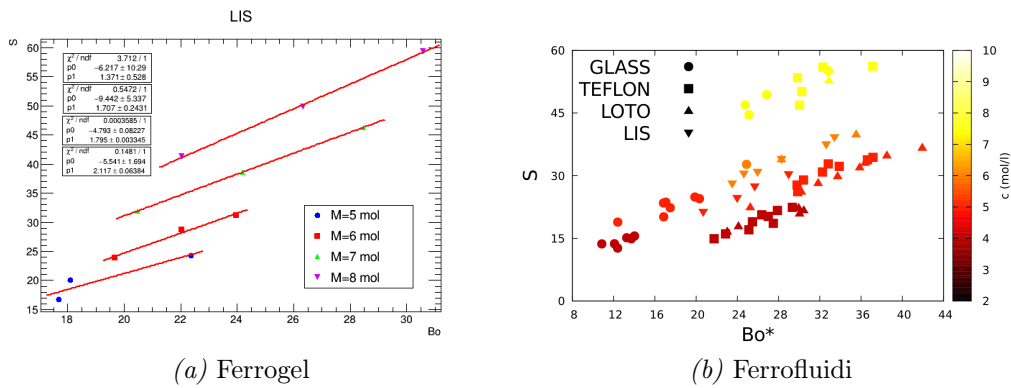


Figura 19: Gli andamenti di  $B$  e  $S$  in funzione della molarità. A sinistra il grafico per i ferrogel, a destra per i ferrofluidi. Lungo le rette sono dati con stessa molarità e diversi volumi

In entrambi i casi comunque, sia utilizzando i ferrofluidi sia utilizzando i ferrogel, le pendenze delle rette diminuiscono leggermente. Non vengono dati valori di pendenza e intercetta riguardo alla seconda transizione nel lavoro [5]. Presentiamo comunque in Tabella 3.4 i valori delle pendenze e delle intercette per campioni di ferrofluidi a base di cobalto con la medesima molarità.

Si vedono per le due molarità più basse, quelle relative ai campioni 5M e 6M, dei notevoli errori sulle pendenze e intercette.

*Tabella 3.4: Pendenze e intercette ferrogel*

	Pendenza	Intercetta
M5	$1.4 \pm 0.5$	$-6 \pm 10$
M6	$1.7 \pm 0.2$	$-9 \pm 5$
M7	$1.795 \pm 0.003$	$-4.79 \pm 0.08$
M8	$2.12 \pm 0.06$	$-5 \pm 2$

Possiamo concludere quindi che qualitativamente, sia nella prima transizione che nella seconda, i ferrofluidi a base di composti del ferro e i ferrogel non presentano differenze significative. Per quanto riguarda differenze quantitative, sicuramente nella prima transizione i ferrogel risentono maggiormente della presenza di campi magnetici. Nella seconda transizione, non potendo confrontare i valori delle pendenze e delle intercette, non si può affermare la stessa cosa.

# Conclusioni

In questo lavoro di tesi si sono raccolti ed analizzati dati riguardanti le proprietà statiche e di separazione di gocce di ferrogel. I ferrogel si distinguono dai ferrofluidi per le nanoparticelle in sospensione e dunque si sono andate a confrontare le proprietà dei primi con le analoghe proprietà dei ferrofluidi a base di composti ferrosi.

Nello studio statico di gocce in presenza di campi magnetici esterni, i ferrogel si comportano analogamente ai ferrofluidi, sia qualitativamente che quantitativamente. Il comportamento della goccia inoltre dipende dalla superficie d'appoggio.

Nello studio della separazione di gocce si sono viste due transizioni. In entrambi i casi le gocce di ferrogel si comportano in maniera simile ai ferrofluidi anche se gli effetti sembrano più pronunciati per i ferrogel. Nella seconda transizione i dati si disperdono, come già visto per i ferrofluidi, ma si possono fare comunque delle considerazioni analoghe alla prima transizione. In particolare la pendenza delle rette a pari molarità decresce leggermente, in maniera analoga ai ferrofluidi.

In conclusione, non sono state osservate differenze significative nel comportamento statico di ferrogel e ferrofluidi. È quindi interessante vedere se ci sono differenze a livello dinamico, ad esempio studiando il moto di gocce su superfici magneticamente strutturate.

# Bibliografia

- [1] V. I. Timonen, M. Latikka, L. Leibler, R. H. A. Ras, O. Ikkala, «Switchable static and dynamic self-assembly of magnetic droplets on superhydrophobic surfaces», *Science*, **341**, 253-257, 2013
- [2] C. Scherer, A. M. Figueiredo Neto, «Ferrofluid Properties and Application», *Brazilian Journal Physics*, **35**, 718-727, 2005
- [3] J. C. Bacri, R. Perzynski, D. Salin, «Magnetic liquids», *Endeavour*, **12**, 76-83, 1988
- [4] C. Rigoni, M. Pierno, G. Mistura, D. Talbot, R. Massart, J.C. Bacri, A. Abou-Hassan, «Static Magnetowetting of Ferrofluid Drops» *Langmuir*, **32**, 7639-7646, 2016
- [5] S. Bertoldo, «Divisione di gocce di ferrofluido tramite l'applicazione di un campo magnetico», tesi magistrale, Università di Padova
- [6] R. E. Rosensweig, «Ferrohydrodynamics», 34-39, Cambridge Press, Cambridge, 1985
- [7] K. Butter, P.H.H. Bomans, P.M. Frederik, G.J. Vroege, A.P. Philipse, «Direct observation of dipolar chains in iron ferrofluids by cryogenic electron microscopy», *Nature Materials*, **2**, 88-91, 2003
- [8] M. T. López-López, P. Kuzhir, G. Bossis, «Magnetorheology of fiber suspensions», *Journal of Rheology*, **53**, 115-118, 2009
- [9] S. Thurm, S. Odenbach, «Particle size distribution as key parameter for the flow behavior of ferrofluids», *Physics of Fluids*, **15**, 1658-1664, 2003