

Jordi Lladós Armengol

**Anàlisi experimental de la deposició de partícules
magnètiques en les parets de microcanals**

Treball Fi de Màster

dirigit pel Dr. Jordi Pallarés Curto

i per la Dra. Sylvana Verónica Varela Ballesta

Màster en Enginyeria Industrial



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2018

Jordi Lladós Armengol

**Anàlisi experimental de la deposició de partícules
magnètiques en les parets de microcanals**

DOCUMENT I: Índex general



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

**Tarragona
2018**

Índex general

Document II: Memòria

1	Introducció.....	1
2	Part teòrica	2
2.1	Balanç de forces en una partícula magnètica	2
2.2	Susceptibilitat magnètica	2
2.3	Magnetització.....	3
2.4	Camp magnètic.....	3
3	Part experimental	5
3.1	Material i instruments utilitzats	5
3.1.1	Imant permanent.....	5
3.1.2	Teslàmetre	5
3.1.3	Microcanals o capil·lars.....	5
3.1.4	Partícules	6
3.1.5	Microscopi	6
3.1.6	Bomba dosificadora.....	6
3.1.7	Xeringa	6
3.1.8	Micropipeta	6
3.2	Procediment experimental.....	6
3.2.1	Acumulació de partícules als microcanals	6
3.2.2	Determinació la magnetització	7
3.2.3	Susceptibilitat magnètica	8
3.3	Experiments.....	9
3.4	Anàlisi d'imatge	10
3.4.1	Generació de la matriu	10
3.4.2	Càlcul i anàlisi de l'àrea.....	11
3.4.3	Càlcul i anàlisi de la simetria de l'àrea	12
4	Resultats.....	13
4.1	Àrea.....	13
4.1.1	Experiment NS-I5-P1-C3-QB	13
4.1.2	Experiment NS-I5-P1-C3-QM.....	14
4.1.3	Experiment NS-I5-P1-C3-QA	15
4.1.4	Experiment N-I5-P1-C3-QB	15
4.1.5	Experiment N-I5-P1-C3-QM	16
4.1.6	Experiment N-I5-P1-C3-QA	17
4.1.7	Experiment N-I3-P1-C3-QM	17

4.1.8 Experiment N-I3-P4-C3-QM	18
4.1.9 Experiment N-I5-P4-C3-QB	19
4.1.10 Experiment N-I5-P4-C3-QM	19
4.1.11 Experiment N-I5-P4-C3-QA	20
4.1.12 Experiment N-I5-P4-C6-QB	21
4.2 Simetria de l'àrea	22
4.2.1 Experiment NS-I5-P1-C3-QB	22
4.2.2 Experiment NS-I5-P1-C3-QM	23
4.2.3 Experiment NS-I5-P1-C3-QA	24
4.2.4 Experiment N-I5-P1-C3-QB	24
4.2.5 Experiment N-I5-P1-C3-QM	25
4.2.6 Experiment N-I5-P1-C3-QA	26
4.2.7 Experiment N-I3-P1-C3-QM	26
4.2.8 Experiment N-I3-P4-C3-QM	27
4.2.9 Experiment N-I5-P4-C3-QB	28
4.2.10 Experiment N-I5-P4-C3-QM	29
4.2.11 Experiment N-I5-P4-C3-QA	31
4.2.12 Experiment N-I5-P4-C6-QB	32
4.3 Magnetització	34
4.4 Susceptibilitat magnètica	35
5 Conclusions	37
6 Referències	39

Document III: Annexos

A Evolució dels experiments	1
A.1 Experiment NS-I5-P1-C3-QB	1
A.2 Experiment NS-I5-P1-C3-QM	4
A.3 Experiment NS-I5-P1-C3-QA	6
A.4 Experiment N-I5-P1-C3-QB	9
A.5 Experiment N-I5-P1-C3-QM	12
A.6 Experiment N-I5-P1-C3-QA	15
A.7 Experiment N-I3-P1-C3-QM	18
A.8 Experiment N-I3-P4-C3-QM	22
A.9 Experiment N-I5-P4-C3-QB	24
A.10 Experiment N-I5-P4-C3-QM	27

A.11	Experiment N-I5-P4-C3-QA	30
A.12	Experiment N-I5-P4-C6-QB	33
B	Codi de Matlab	37
B.1	Generació de la matriu.....	37
B.2	Càlcul i anàlisi de l'àrea	38
B.3	Càlcul i anàlisi de la simetria de l'àrea.....	40
C	Mesures realitzades amb el teslàmetre.....	42
D	Susceptibilitat magnètica	43

Jordi Lladós Armengol

**Anàlisi experimental de la deposició de partícules
magnètiques en les parets de microcanals**

DOCUMENT II: Memòria



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

**Tarragona
2018**

Índex

1	Introducció.....	1
2	Part teòrica	2
2.1	Balanç de forces en una partícula magnètica	2
2.2	Susceptibilitat magnètica	2
2.3	Magnetització.....	3
2.4	Camp magnètic.....	3
3	Part experimental	5
3.1	Material i instruments utilitzats	5
3.1.1	Imant permanent.....	5
3.1.2	Teslàmetre	5
3.1.3	Microcanals o capil·lars.....	5
3.1.4	Partícules	6
3.1.5	Microscopi.....	6
3.1.6	Bomba dosificadora.....	6
3.1.7	Xeringa.....	6
3.1.8	Micropipeta	6
3.2	Procediment experimental.....	6
3.2.1	Acumulació de partícules als microcanals	6
3.2.2	Determinació la magnetització	7
3.2.3	Susceptibilitat magnètica	8
3.3	Experiments.....	9
3.4	Anàlisi d'imatge	10
3.4.1	Generació de la matriu	10
3.4.2	Càlcul i anàlisi de l'àrea.....	11
3.4.3	Càlcul i anàlisi de la simetria de l'àrea	12
4	Resultats.....	13
4.1	Àrea.....	13
4.1.1	Experiment NS-I5-P1-C3-QB	13
4.1.2	Experiment NS-I5-P1-C3-QM.....	14
4.1.3	Experiment NS-I5-P1-C3-QA	15
4.1.4	Experiment N-I5-P1-C3-QB	15
4.1.5	Experiment N-I5-P1-C3-QM	16

4.1.6	Experiment N-I5-P1-C3-QA	17
4.1.7	Experiment N-I3-P1-C3-QM	17
4.1.8	Experiment N-I3-P4-C3-QM	18
4.1.9	Experiment N-I5-P4-C3-QB	19
4.1.10	Experiment N-I5-P4-C3-QM	19
4.1.11	Experiment N-I5-P4-C3-QA.....	20
4.1.12	Experiment N-I5-P4-C6-QB.....	21
4.2	Simetria de l'àrea	22
4.2.1	Experiment NS-I5-P1-C3-QB	22
4.2.2	Experiment NS-I5-P1-C3-QM.....	23
4.2.3	Experiment NS-I5-P1-C3-QA	24
4.2.4	Experiment N-I5-P1-C3-QB	24
4.2.5	Experiment N-I5-P1-C3-QM	25
4.2.6	Experiment N-I5-P1-C3-QA	26
4.2.7	Experiment N-I3-P1-C3-QM	26
4.2.8	Experiment N-I3-P4-C3-QM	27
4.2.9	Experiment N-I5-P4-C3-QB	28
4.2.10	Experiment N-I5-P4-C3-QM	29
4.2.11	Experiment N-I5-P4-C3-QA.....	31
4.2.12	Experiment N-I5-P4-C6-QB.....	32
4.3	Magnetització.....	34
4.4	Susceptibilitat magnètica	35
5	Conclusions	37
6	Referències	39

1 Introducció

Aquest treball de fi de màster estudia i analitza la deposició de les partícules magnètiques a les parets dels microcanals per la presència d'un imant permanent.

Aquest és una continuació de diferents treballs i articles [1], [2] i [3]. El coneixement d'aquest s'ha utilitzat de base a l'hora de realitzar aquest treball.

El principal objectiu d'aquest treball és realitzar diferents experiments variant la mida de les partícules, la mida i l'orientació d'un imant cúbic, el diàmetre intern d'un capil·lar (microcanal) quadrat i el cabal de solució.

Posteriorment, es realitza un anàlisi quantitatiu a partir de les imatges adquirides durant els experiments. Per fer-ho s'han realitzat diversos codis amb Matlab que ens permeten binaritzar les imatges per poder-ne calcular l'àrea de partícules dipositades i la simetria d'aquesta envers l'imatge.

Amb l'ajuda d'un teslàmetre, s'ha mesurat el flux magnètic dels imants. Això ha permès determinar la seva magnetització.

A més a més, s'ha buscat determinar la susceptibilitat magnètica de les partícules d'una manera senzilla, per fer-ho es tindrà en compte l'equilibri de forces en una partícula.

Amb aquest treball es pretén conèixer millor la interacció de les partícules magnètiques que es troben dins d'un microcanal on s'aplica un camp magnètic generat per un imant permanent. D'aquesta manera es pretén conèixer millor el comportament d'aquestes partícules.

Els resultats experimentals es compararan amb les simulacions numèriques i en un futur pròxim permetran modificar aquestes simulacions perquè s'ajustin més a la realitat.

Una de les aplicacions de les partícules magnètiques és que puguin ser recobertes per molècules biològiques com enzims o fragments d'ADN, aquestes poden ser fàcilment mogudes cap a ubicacions concretes o objectius biològics. S'utilitza per aplicacions in vitro (biodiagnòstics i bioreconeixaments) i recentment per aplicacions in vivo com el tractament de càncer. Les aplicacions més comunes utilitzen mides de partícules entre els 5 nm i el 6 μm .

2 Part teòrica

En aquest apartat s'introduirà alguns conceptes claus per tal d'entendre el funcionament d'aquests experiments. Aquests conceptes són el balanç de forces que actuen sobre la partícula, la susceptibilitat magnètica d'aquesta i el camp magnètic.

2.1 Balanç de forces en una partícula magnètica

Es treballa amb el capil·lar vertical, amb l'agulla de la bomba a la part superior d'aquest i l'imant tocant la paret lateral (veure figura 2.1.1). A la part superior del capil·lar és col·loca l'agulla de la xeringa que impulsarà el flux.

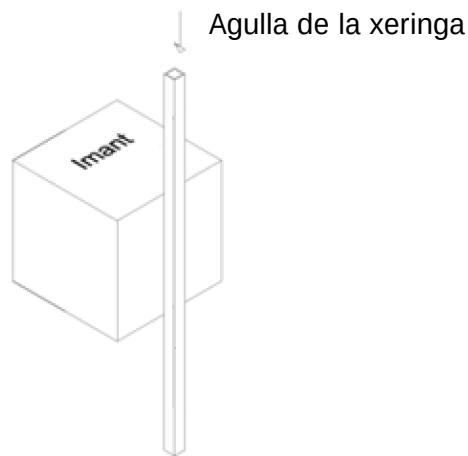


Figura 2.1.1. Posició del microcanal respecte l'imant.

Les forces que es generen a la partícula quan es fa passar un cabal pel microcanal són les següents:

1. La força magnètica és la que fa el camp magnètic de l'imant i que provoca la deposició de partícules a la paret capil·lar.
2. La força d'arrossegament, que s'origina quan la partícula i el fluid van a velocitats diferents. L'arrossegament dificulta la deposició de partícules.
3. La força de gravetat, la qual actua a l'eix vertical i fa desplaçar la partícula cap a terra.

A continuació, s'observa la equació que descriu el balanç de forces d'una partícula:

$$\frac{dv_p}{dz} = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \cdot \vec{g} + \frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p} \cdot (\vec{v}_f - \vec{v}_p) + \chi \frac{V_{mp}}{V_p} \frac{\mu_0 M_s^2}{(4\pi)^2 \rho_p L} (\vec{B}^* \cdot \vec{\nabla}^*) \cdot \vec{B}_z^* \quad (2.1.1.)$$

Com es va concloure al [1], la força de gravetat és el motiu pel qual l'experiment es duu a terme verticalment, ja que d'aquesta manera és pretén reduir els efectes de la gravetat als experiments.

2.2 Susceptibilitat magnètica

La susceptibilitat magnètica es pot definir com la relació de la intensitat del magnetisme induïda en una substància per a la força magnetitzant o la intensitat del camp a la qual està subjecte [4].

En aquests experiments, tindrà gran importància la susceptibilitat de les partícules utilitzades. Es calcularà la susceptibilitat magnètica a partir de les següents equacions, per fer-ho es necessitarà conèixer la zona d'equilibri de les partícules magnètiques (z), la magnetització (M_z) i el costat de l'imant (L).

$$z^* = \frac{z}{l} \quad (2.2.1)$$

$$a = \sqrt{1 + 2z^*} \quad (2.2.2)$$

$$b = \sqrt{3 + 4z^* + 2z^{*2}} \quad (2.2.3)$$

$$(\vec{B}^* \cdot \vec{\nabla}^*)B_z^* = - \frac{32(a-5b-8z^*b+4z^{*2}\{a-b\})(\tan^{-1}\frac{1}{2\sqrt{2}az^*} - \tan^{-1}\frac{1}{2\sqrt{2}b(z^*+1)})}{b(5+8z^*+24z^{*2}+32z^{*3}+16z^{*4})\left(\sqrt{z^{*2}+\frac{1}{2}}\right)} \quad (2.2.4)$$

$$M = \frac{\mu_0 M_s^2}{(4\pi)^2 L g (\rho_p - \rho_f)} \quad (2.2.5)$$

$$1 - \left(\chi \frac{V_{mp}}{V_p}\right) M(\vec{B}^* \cdot \vec{\nabla}^*)B_z^* = 0 \quad (2.2.6)$$

2.3 Magnetització

La magnetització o imantació d'un material és la densitat de moments dipolars magnètics que són magnetitzats per metall. En la majoria dels materials, la magnetització apareix quan s'aplica un camp magnètic a un cos. En uns pocs materials, principalment els ferromagnètics, la magnetització pot tenir valors alts i existir en absència d'un camp extern [5].

2.4 Camp magnètic

El camp magnètic és una magnitud vectorial. Pot estar produït per una càrrega puntual en moviment o per un conjunt de càrregues en moviment, és a dir, per un corrent elèctric [6].

En aquest cas, el camp magnètic vindrà generat per un imant permanent.

Cal tenir present que als imants permanents el camp magnètic es distribueix com a la figura 2.3.1. Cal tenir-la present a l'hora de realitzar els experiments, ja que l'acció del camp magnètic variarà amb l'orientació de l'imant.

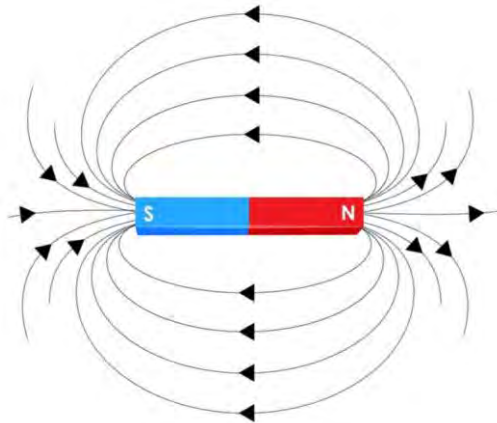


Figura 2.3.1 Camp magnètic creat per un imant permanent [7].

En la figura 2.3.1. s'ha observat la descripció del camp magnètic per mitjà de línies de camp. Per una millor interpretació cal conèixer les següents caracteritzen [8]:

- Les línies de camp magnètic mai es creuen.
- Les línies de camp magnètic s'amunteguen de forma natural a les regions on el camp és més intens. Això vol dir que la densitat de línies de camp indica la intensitat d'aquest.
- Les línies de camp magnètic no comencen ni acaben en algun lloc, sempre formen corbes tancades i continuen dins d'un material magnètic (encara que no sempre les dibuixem d'aquesta manera).
- Es necessita una manera d'indicar la direcció del camp. Per això, sovint es dibuixen fletxes sobre les línies. En cas de no utilitzar fletxes, la convenció és etiquetar una regió com "nord" i una altra com "sud" i dibuixar només les línies que van d'un a un altre pol, i es suposa que les línies van de nord a sud.
- En el món real, podem visualitzar les línies de camp de forma senzilla. Normalment es fa amb llimadura escampada al voltant d'una superfície propera a alguna cosa magnètica. Cada partícula de la llimadura es comporta com un petit imant amb un pol nord i un pol sud. Les partícules de llimadura naturalment se separen unes de les altres perquè els pols similars és repel·leixen. El resultat és un patró semblant a les línies de camp. Mentre que el patró general sempre serà el mateix, la posició exacta i la densitat de les línies de llimadura depenen de com cauen les seves partícules, la mida i les seves propietats magnètiques.

3 Part experimental

3.1 Material i instruments utilitzats

A continuació, es comenten els principals materials i instruments utilitzats per dur a terme la part experimental del treball.

3.1.1 Imant permanent

Un imant permanent és un material que pot ser imantat i que genera un camp magnètic persistent. És una propietat que poden conservar durant molt de temps però que pot ser malmesa per factors externs, com una temperatura extrema. Es caracteritzen per tenir una cara nord i una cara sud.

A continuació, es mostra una classificació dels principals materials que formen els imants permanents [10]:

- ALNICO: Fabricats per fusió o sinterització i estan compostos per un 8% d'Alumini, un 14% de Níquel, un 24% de Cobalt, un 51% de Ferro i un 3% de Coure. Són el que presenten millor comportament a temperatures elevades, tot i que són susceptibles de desmagnetització. Tenen l'avantatge de posseir un bon preu, tot i que no tenen molta força.
- Ceràmics o de Ferrita: fabricats amb Bari i Estronci. Estan compostos d'aproximadament un 80% d'Òxid de Ferro i d'un 20% d'Òxid d'Estronci (òxids ceràmics). Són resistents a moltes substàncies químiques, dissolvents i àcids.
- Amb terres rares: són metàl·lics, amb una força de 6 a 10 vegades superior als materials magnètics tradicionals, i amb temperatures de treball que varien segons el material. Els més coneguts són els de Neodimi i els de Samari-Cobalt,

Pels experiments s'ha utilitzat 2 imants cúbics de 3 i 5 mm, una magnetització de N45 i N42 respectivament. Això suposa una força de subjecció de 1.1 kg per l'imat més gran i de 0.29 kg pe l'imat més petits. Ambdós són del tipus de Neodini (NdFeB) amb un recobrimet de níquel (Ni-Cu-Ni) i tenen una temperatura màxima de treball de 80 °C.

3.1.2 Teslàmetre

El teslàmetre ens permet detectar la densitat d'un camp magnètic (B), en aquest cas el generat per l'imat permanent. El teslàmetre permet detectar la cara nord. Aquesta és la cara que ens dona un valor positiu de densitat més gran, la cara oposada aquesta serà la sud i tindrà un valor negatiu.

Hi ha dos tipus de sondes, fet que permet al teslàmetre mesura connectat a una sonda axial o a una sonda transversal segons convingui. En aquest cas, es va provar de fer les mesures als imants amb les dues sondes. Es va escollir la sonda transversal, ja que tenia un sensor més petit que els imants, fet que permetia que fos més útil per treballar amb aquests.

3.1.3 Microcanals o capil·lars

S'han utilitzat dos tipus de microcanals per realitzar els experiments, aquests tenen un orifici quadrat de 300 i 600 μm de costat, respectivament, i una llargada de 10 cm. Aquests estan fabricats de vidre de borosilcats [11].

3.1.4 Partícules

Les partícules utilitzades són magnètiques i carboxiliques. Aquestes venen en una solució aquosa amb 2.5% p/v. Es preparen 200 µL de dita solució es barrejarà amb 4800 µL d'aigua, que correspon a una concentració de $8.16 \cdot 10^7$ partícules/ml. Les partícules utilitzades són de 1.14 i 4.37 µm de diàmetre promig. És poden trobar partícules amb diàmetres lleugerament superiors o inferiors als esmentats [12].

3.1.5 Microscopi

S'ha utilitzat per dur a terme els experiments un microscopi *Motic Microscopic Model AE31E TRI*. Aquest incorpora una càmera, la qual està connectada a l'ordinador i que permet visualitzar i guardar les imatges de l'experiment a l'ordinador mitjançant el programa *Motic Images Devices*. El microscopi conté diversos objectius d'augment. Per realitzar aquest treball s'ha incorporat un objectiu amb un augment de 2X, per tal de poder observar millor l'experiment. Anteriorment [1], l'objectiu més petit era de 4X augment, fet que impedia la visualització completa de l'imant.

3.1.6 Bomba dosificadora

S'ha emprat una bomba dosificadora de la marca Fusion 710. Aquesta pot treballar amb diferents models d'agulla, de volums diferents i el cabal desitjat. Les diferents dades introduïdes a la bomba dosificadora permetran que aquesta mogui l'èmbol de la xeringa per aconseguir el cabal desitjat.

3.1.7 Xeringa

Com en el treball anterior, s'ha utilitzat una xeringa Hamilton amb una capacitat 1 mL. Aquest model de xeringa és compatible per treballar amb la bomba dosificadora que tenim, fet que permet utilitzar-la amb el cabal desitjat. La xeringa ens permetrà agafar la dissolució de partícules i facilitarà que aquesta sigui introduïda el capil·lar.

3.1.8 Micropipeta

Cal diluir la solució de partícules que es té per tal d'aconseguir una concentració menor d'aquestes. Per poder aconseguir la concentració desitjada cal utilitzar una micropipeta. La que s'ha emprat al laboratori pot treballar entre un volum de 100 i 1000 µL.

3.2 Procediment experimental

3.2.1 Acumulació de partícules als microcanals

Per tal de dur a terme els experiments d'acumulació de partícules als microcanals s'ha seguit un procediment igual en tots els casos per fer que les condicions dels experiments fossin el més semblants possible.

Per preparar la solució amb partícules magnètiques, cal agafar la pipeta i fer una mescla que contingui 4800 μL d'aigua i 200 μL de partícules magnètiques. D'aquesta manera s'aconseguirà una solució amb la concentració proposada desitjada per dur a terme els experiments.

S'omple la xeringa i s'hi uneix el capil·lar, per fer-ho es ficarà Tefló entre l'agulla de la xeringa i un tub de plàstic i entre aquest i el capil·lar per tal d'impedir que el líquid pugui sortir pel tub que uneix l'agulla amb el capil·lar. En el cas d'utilitzar el capil·lar de 600 μm s'ha d'usar un tub més gran, fet que provoca que hi quedi més aire i s'hi formin bombolles d'aire, per tant, caldrà utilitzar una quantitat major de tefló.

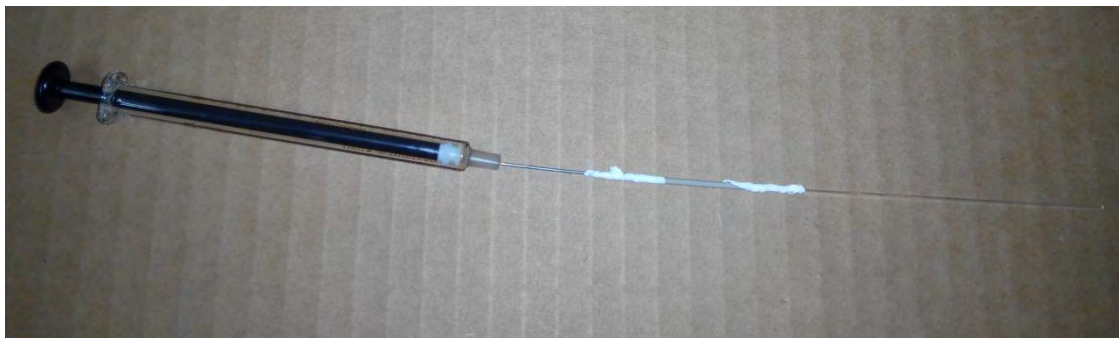


Figura 3.2.1.1. Xeringa unida al microcanal mitjançant un tub de plàstic i tefló.

Cal col·locar la xeringa a la bomba per tal que el capil·lar quedi introduït al seu suport, per permetre que la cara del capil·lar quedin paral·lel a la càmera i aquest perpendicular al terra, es pot utilitzar l'opció de ficar quadrícula al programa *Motic Images Devices*. També és important regular la llum i enfocar l'objectiu del microscopi perquè la visió del microscopi sigui la millor. És important fer-ho amb la major rapidesa possible per evitar que les partícules precipitin.

Després, es realitzarà una captura per tal de mesurar la distància observable de capil·lar per comprovar que el valor llegit es proper al teòric.

Al programa *Motic Images Plus 2.0* cal especificar cada quant temps volem que guardi les captures automàtiques, el temps entre captures serà de 2, 1 o 0.5 segons depèn si el cabal amb el qual es treballa es 0.03, 0.06 o 0.12 ml/min, respectivament. D'aquesta manera, s'aconsegueix que l'última captura, la 999, coincideixi en el moment en que la xeringa s'ha buidat.

Aquestes imatges es retallen amb el programa *Motion Studio* per de reduir el nombre de píxels i per tant el seu temps de tractament amb el Matlab.

Com s'explica a l'apartat 3.4, aquestes imatges es carregaran amb el programa Matlab per tractar-les i analitzar-les.

Aquest procediment es va repetir diverses vegades abans de començar els experiments amb microcanals usats, amb això es volia agafar pràctica en realitzar dit procediment i poder tenir una bona repetibilitat.

3.2.2 Determinació la magnetització

Tal com s'ha comentat per mesurar la densitat del camp magnètic dels imants s'utilitza el teslametre, es va fer una peça de plàstic amb la impressora 3D per poder aguantar l'imant. La sonda transversal es va lligar a una part d'una estructura que permetia el moviment d'aquesta, de tal manera que la peça amb l'imant es col·locaven a la part inferior i la sonda es podia desplaçar a diferent distàncies de l'imant. Aquesta estructura contenia un

regle que permetia saber la distància que hi havia entre la sonda transversal i l'imant en tot moment.

Amb l'ajuda del full de càlcul del fabricant d'imants obtenim els valors teòrics de la densitat del flux magnètic pels diferents valors de z (vegeu a la figura 3.2.2.1) i es comparen amb els mesurats pels teslametre, d'aquesta manera es vol comprovar que per una mateixa distància z , s'obtingui valors de densitats de flux magnètic similars.

Un cop comprovat que els valors teòrics i mesurats són similars, es realitza mesures a l'imant cúbic de 5 mm de costat, ja que al ser un imant més antic no es coneix la seva magnetitzacions. Es realitzen diferents mesures per valors de z entre 0 i 5 i es comparen amb valors teòrics de diferents magnetització. Es troba que la magnetització d'aquest imant és del tipus N42. Aquests valors es poden veure a l'annex C.

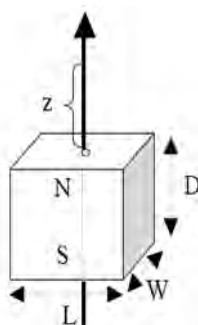


Figura 3.2.2.1 Eix z respecte l'imant.

3.2.3 Susceptibilitat magnètica

Es vol trobar una manera ràpida de calcular la susceptibilitat magnètica de les partícules. Per fer-ho es decideix mantenir un capil·lar ple de la solució de partícules magnètiques. Aquest estarà disposat verticalment i a la part superior s'hi situarà un imant, de tal manera que sobre les partícules actuïn dues forces, la de gravetat que farà sedimentar les partícules i la magnètica que les farà pujar cap a l'imant. Es creu que algunes partícules quedaran quietes perquè estaran en equilibri, és a dir, la força de gravetat i la força magnètica que rebran seran iguals. Per tant, la distància de l'imant a la qual es forma l'equilibri es podrà relacionar amb la susceptibilitat.

Per poder a dur a terme els experiments s'han imprès dues estructures amb la impressora 3D per poder subjectar el capil·lar, una serà per utilitzar-la amb la càmera de fotografia i l'altre per utilitzar-ho amb el microscopi.

Tots els experiments relacionats amb la susceptibilitat magnètica s'han realitzat amb el capil·lar de 600 μm de costat i l'imant cúbic de 5 mm de costat.

Inicialment, s'ha decidit observar l'experiment amb la càmera de fotografia. S'ha provat omplir el microcanal per capil·laritat, però només s'ha pogut omplir la meitat. S'ha decidit fer-ho amb l'agulla i tapar la part inferior amb *Blu-tack*. A més a més, s'ha ficat la fotocòpia d'un regle darrere el capil·lar per saber la distància a la qual es formava l'equilibri.

Tot i que semblava que s'aconseguia que el microcanal no perdés aigua, només es mantenia estanc durant uns minuts. Per tant, s'ha provat diferents maneres de tapar-ho: mina de llapis, cinta adhesiva, tefló, etc. Després de fer diversos experiments s'ha vist que el millor mètode per evitar que l'aigua surtis del capil·lar era ficant silicona calenta a la part inferior d'aquest.

S'ha observat que als primers minuts l'equilibri es formava entre 1 i 1.5 cm de l'ímant, però es necessitava que passés més temps per veure el lloc exacte de l'equilibri. Malgrat tot, quan es duia terme durant bastantes hores, el capil·lar perdia una part de la solució. Es va concloure que això es devia al fet que l'aigua s'evaporava i es va decidir tapar els dos extrems del capil·lar amb silicona per evitar-ho.

Es va tornar fer uns quants cops l'experiment. Aquest cop el capil·lar no es buidava però a mesura que passaven les hores les partícules es movien cap a l'ímant o el terra. Això feia que no es pogués observar cap equilibri.

Pel fet que les velocitats de les partícules properes l'equilibri eren molt lentes, es va decidir observar l'experiment amb el microscopi. A l'estructura que subjecta el capil·lar se li va afegir paper mil·limetrat transparent i es va marcar en vermell a 1 i 1.5 cm de l'ímant. D'aquesta manera quan s'observa l'experiment es pot saber en tot moment la posició que es visualitza.

3.3 Experiments

S'ha realitzat un total de 12 experiments en els quals es varia la mida de microcanal i les partícules, la mida i la magnetització de l'ímant, l'orientació de l'ímant i el cabal de la solució amb partícules. A la taula 3.3.1 es mostra cadascun dels 12 experiments i les diferents variables que s'han utilitzat.

Taula 3.3.1. Variables de cadascun dels experiments realitzats.

Experiments	Orientació	Imant (mm)	Diàmetre de les partícules (µm)	Costat del capil·lar (µm)	Cabal (ml/min)
NS-I5-P1-C3-QB	N-S (lateral)	5	1.14	300	0.03
NS-I5-P1-C3-QM					0.06
NS-I5-P1-C3-QA					0.12
N-I5-P1-C3-QB	N(cara Nord)				0.03
N-I5-P1-C3-QM					0.06
N-I5-P1-C3-QA					0.12
N-I3-P1-C3-QM		3	0.06		
N-I3-P4-C3-QM			0.06		
N-I5-P4-C3-QB		5	4.37		0.03
N-I5-P4-C3-QM					0.06
N-I5-P4-C3-QA					0.12
N-I5-P4-C6-QB				600	0.03

Per entendre com s'ha variat l'orientació de l'ímant es mostra dos dibuixos on es mostren les dos orientacions usades. L'orientació N es produeix quan la cara nord de l'ímant toca el capil·lar (figura 3.3.1)

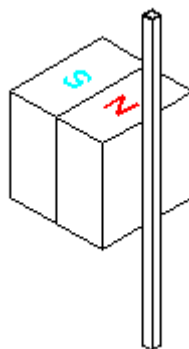


Figura 3.3.1. Imant orientat amb la cara nord cap al capil·lar.

En canvi, l'orientació lateral (N-S) es basa a què el microcanal estigui al mig dels dos pols, tal com s'observa a la figura 3.3.2.

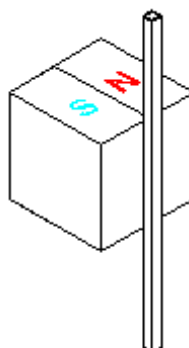


Figura 3.3.2. Imant orientat de manera lateral cap al capil·lar.

3.4 Anàlisis d'imatge

Per fer un bon anàlisi dels experiments s'ha utilitzat un codi de Matlab per tal de carregar i binaritzar les 999 fotografies que s'obtenen per cada experiment. Un cop cada fotografia s'ha binaritzat, és molt més senzills poder tractar-les. En aquest cas, s'ha volgut calcular l'àrea de microcanal que s'han acumulat partícules i la simetria d'aquesta acumulació en diferents posicions de l'ímant.

3.4.1 Generació de la matriu

A causa de la quantitat d'imatges i que aquestes ocupaven bastant, el Matlab a vegades tardava molt a executar-se. Per evitar aquest problema es va crear un arxiu que agafa les fotografies desitjades i les binaritza, és a dir, les converteix en una matriu de dos dimensions (altura i amplada) formada per 0 i 1. Totes aquestes matrius conformen una matriu de tres dimensions, la qual un cop s'ha generat es guarda com un arxiu per tal d'evitar recalcular-la. El codi d'aquest arxiu es pot visualitzar a l'annex B.1.

A l'hora de generar aquesta matriu cal tenir present que a la funció *imbinarize* s'ha d'ajustar un paràmetre numèric que va entre 0 i 1. Quan aquest valor és proper a 0 la majoria de grisos es consideren blanc mentre que quan el valor s'acosta a 1 els considera negres. En la majoria d'experiments aquest valor es mou al voltant de 0.1 però cal ajustar-lo manualment fins a comprovar que les imatges binaritzades són representatives. Això es deu

al fet que depenen del nivell de llum les diferents parts de la fotografia es veuen més o menys fosques. A continuació, es mostra un exemple d'imatge binaritzada.

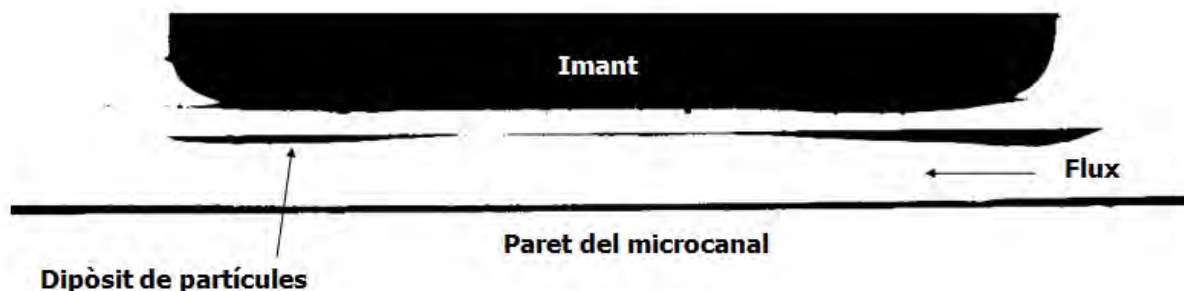


Figura 3.4.1.1 Binarització de la fotografia 40 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

3.4.2 Càlcul i anàlisi de l'àrea

L'arxiu utilitzat per l'anàlisi de l'àrea és carrega la matriu generada i guardada anteriorment.

A partir d'aquí es realitza un bucle on a la primera imatge se li va restant les diferents imatges on apareix el microcanal amb les partícules magnètiques. S'acaba obtenint una matriu formada per les diferents imatges de les partícules acumulades. Per poder calcular aquesta àrea s'utilitzen dos funcions *bwarea* i *regionsprops*, cadascuna d'aquestes funcions calcula l'àrea d'una manera diferent, fet que pot fer que en alguns casos s'obtinguin resultats lleugerament diferents. Al calcular l'àrea de dues maneres diferents permet donar més consistència aquest càlcul.



Figura 3.4.2.1 Partícules acumulades de la fotografia 40 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.



Figura 3.4.2.2 Negatiu de les partícules acumulades, resta entre la fotografia 1 i la 40 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB,

Al principi, abans de calcular l'àrea s'utilitzava la funció *bwareaopen*, la qual permet eliminar els objectes més petits de les imatges binaries. Es va deixar de fer servir, ja que, al contrari del que s'esperava, distorsionava el càlcul i creava grans fluctuacions en l'àrea calculada. A més a més, augmentava moltíssim el temps de càlcul.

Tal com es veu a l'annex B.2. s'ha passat de píxels a àrea. Per fer-ho es divideix el nombre de píxels de l'amplada del capil·lar, els quals es mesuren a les captures de l'experiment, per la distància real mesurada en aquests capil·lars.

Inicialment, la representació d'aquest resultats es feia a una gràfica on l'eix d'abscisses representava cadascuna de les fotografies i l'eix de les ordenades l'àrea. Es va decidir

canviar los per un factor de temps i àrea adimensional respectivament, d'aquesta manera es volia facilitar la comparació entre els diferents experiments. També s'han fixat els valors màxims dels eixos per tal que tots tinguin la mateixa dimensió. Aquest s'han fixat a $4.5 \cdot 10^4$ per l'eix de les abscisses i de 1.5 pel de les ordenades.

3.4.3 Càlcul i anàlisis de la simetria de l'àrea

Pel que fa a, l'arxiu que ens analitza la distribució de l'àrea anterior, es torna a carregar la matriu guardada. En aquest cas es realitzen 3 bucles, un per cada punt que es vol analitzar i es realitza la resta entre la primera imatge i les de les partícules acumulades. Els punts analitzar són al primer quart de l'imant, a la meitat i al tercer quart d'imant, tal com es mostra a la figura 3.4.3.1. Així es vol conèixer si es produeix certa simetria respecte el centre de l'imant.

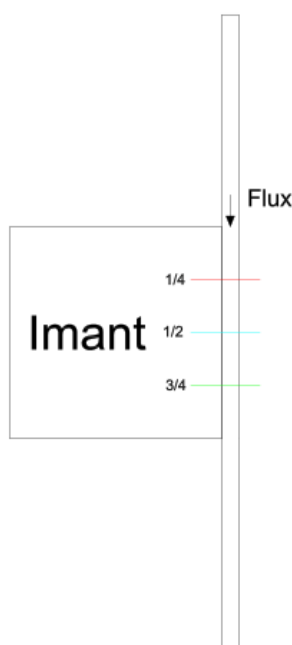


Figura 3.4.3.1 Distribució de les 3 posicions estudiades de l'imant.

Per saber l'altura de partícules en cadascun dels punts anteriors, s'utilitza la funció *bwarea*, com s'agafa la regió amb una amplada de 1 píxel, el valor d'àrea obtingut serà el mateix que el de l'altura de les partícules. En aquest cas, s'ha passat el nombre de píxels a distància.

A l'hora de representar els resultats, s'utilitzarà el mateix eix d'abscisses que en el cas anterior. Pel que fa a l'eix d'ordenades, el qual representa l'altura de partícules, es mostrarà com una longitud adimensional. En aquest cas, s'ha tornat a limitar l'eix de les x a $4.5 \cdot 10^4$, mentre que el de les y s'ha fixat a 1.2

Tant els gràfics que representen l'àrea com els que presenten la simetria d'aquesta s'ha dibuixat una recta vertical al moment al partir del qual no s'observa totes les partícules acumulades. Els experiments on no hi hagi aquesta recta voldrà dir que s'han pogut observar totes les partícules acumulades durant el temps transcorregut.

4 Resultats

En aquest apartat es presenten els resultats obtinguts de l'anàlisi de l'àrea i la distribució d'aquesta respecte diferents punts de l'imant. Els resultats dels diferents experiments es compararan entre ells per tal de poder extraure'n algunes conclusions.

4.1 Àrea

A continuació es mostren a les gràfiques obtingudes a partir de la representació de la variació de l'àrea al llarg experiment. Com s'ha esmentat anteriorment, aquesta àrea s'ha calculat amb dos mètodes diferents, els asteriscs vermells representen l'àrea calculada amb la funció *bwarea* i els rombes blaus l'àrea trobada amb la funció *regionprops* (veure en annex B). Per evitar una representació molt atapeïda només s'ha dibuixat un punt per cada 10 captures.

Cal tenir present que els eixos d'aquests diagrames són adimensionals, el de les abscisses s'ha calculat amb l'equació (4.1.1).

$$t^* = \frac{t \cdot n \cdot v}{H} \quad (4.1.1)$$

on:

- t : representa l'interval de temps entre les fotografies (s)
- n : el nombre d'imatges
- v : la velocitat mitjana del fluid (mm/s)
- H : diàmetre intern del capil·lar (mm)

Mentre que el eix de les ordenades s'ha calculat l'àrea mitjançant la fórmula següent:

$$A^* = \frac{A}{L \cdot H} \quad (4.1.2)$$

on:

- A : és l'àrea calculada (en mm²)
- L : és la dimensió del costat de l'imant (mm)

També es pot veure que els dos mètodes per calcular l'àrea acostumen a coincidir o adonar valors similars.

Es pot veure que alguns gràfics tenen una recta vertical de color rosa al mig de la representació. Aquesta recta indica el punt a partir del qual no s'observa tota l'àrea acumulada de partícules.

4.1.1 Experiment NS-I5-P1-C3-QB

El primer experiment s'ha realitzat utilitzant el capil·lar de 300 µm quadrat de costat, l'imant cúbic de 5 mm de costat orientat lateralment (N-S), les partícules de 1.14 µm de diàmetre mitjà i un cabal de 0.03 ml/min.

A continuació es mostra el gràfic de les partícules acumulades en aquest experiment. Cal tenir present que només s'observa tota les partícules durant el primer quart d'experiment. Aquest fet ens fa pensar que l'àrea s'estabilitzaria més tard, ja que no es veu tot el creixement de l'àrea. Això fa, que el resultat del final de l'experiment no sigui gaire fiable i l'estudi es centrarà amb el començament.

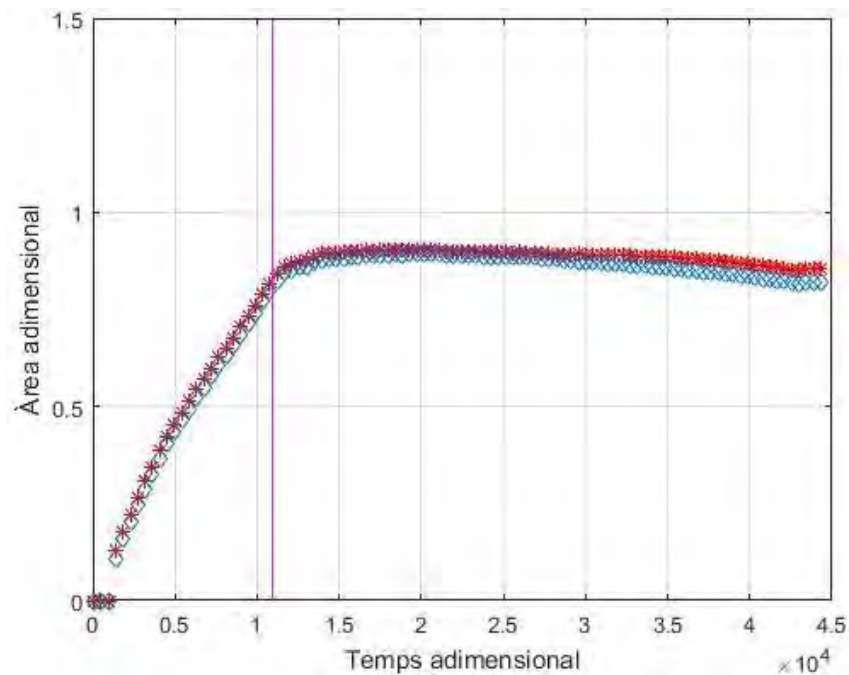


Figura 4.1.1.1 Àrea de partícules acumulades durant l'experiment NS-I5-P1-C3-QB

4.1.2 Experiment NS-I5-P1-C3-QM

Aquest experiment duplica el cabal utilitzat anteriorment, és a dir, es realitza un cabal de 0.06 ml/min mentre que la resta de paràmetres es mantenen igual.

Aquest cop es pot observar tota l'àrea sencera fins una mica més del primer terç d'experiment. També es denota que la pendent es més petita que la de l'experiment anterior, ja que en aquest cas el cabal és més gran.

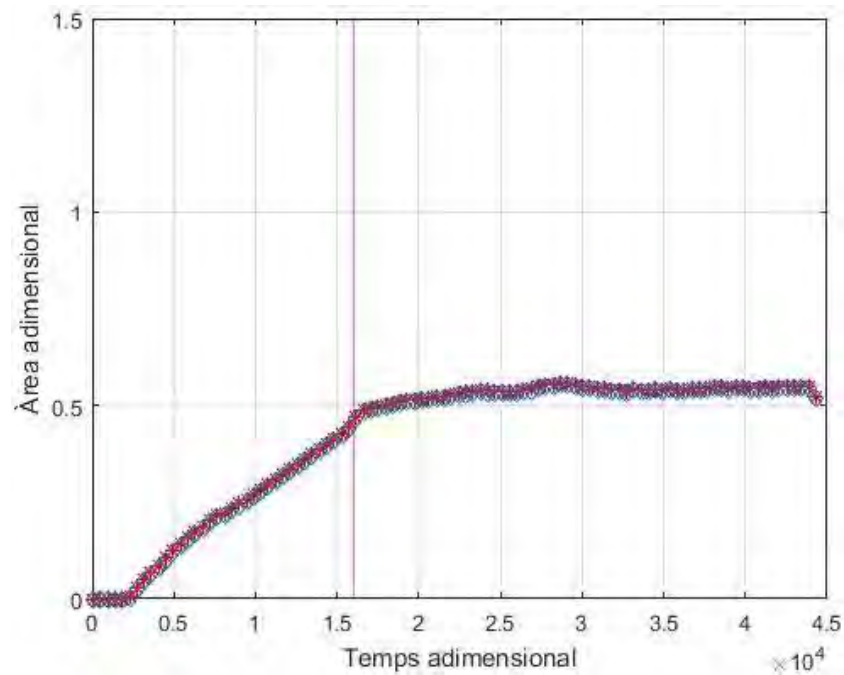


Figura 4.1.2.1 Àrea de partícules acumulades durant l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.

4.1.3 Experiment NS-I5-P1-C3-QA

Com els dos experiments anteriors, s'ha mantingut tots els paràmetres excepte el cabal, el qual és de 0.12 ml/min, tornant a duplicar el cabal utilitzat anteriorment. Aquest experiment serà l'últim que es realitzarà utilitzant l'ímant orientat lateralment (N-S).

A la figura 4.1.2.3 es pot veure com en aquest cas es van poder visualitzar totes les partícules acumulades al capil·lar durant tot l'experiment.

L'àrea acumulada ha anat creixent al llarg de l'experiment però no arribat a estabilitzar-se. Com el cas anterior, l'augment de cabal provoca que el pendent de creixement sigui més petita.

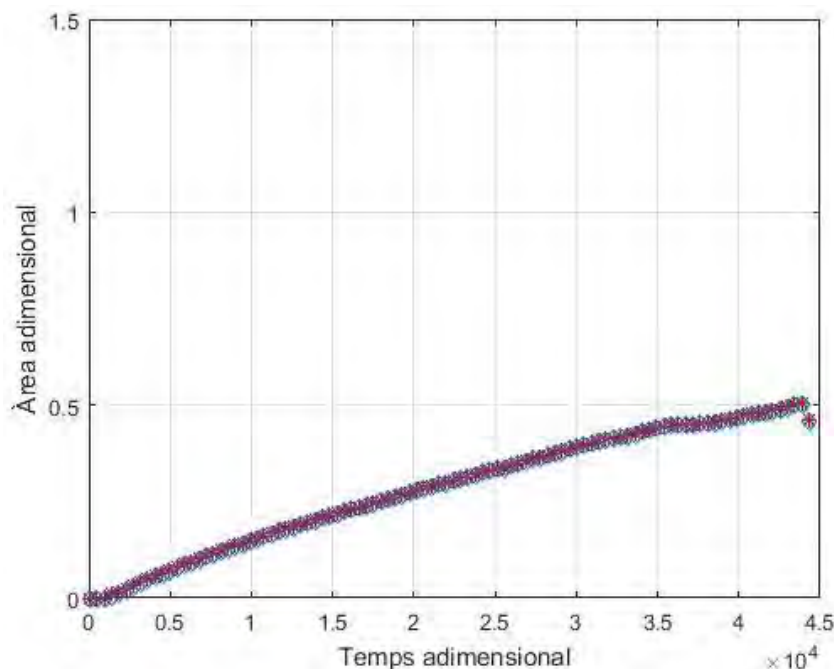


Figura 4.1.3.1 Àrea de partícules acumulades durant l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

4.1.4 Experiment N-I5-P1-C3-QB

L'experiment realitzat en aquest apartat s'ha fet amb un capil·lar quadrat de 300 μm de costat, l'ímant cúbic de 5 mm de costat orientat a la cara nord, les partícules de 1.14 μm de diàmetre mitjà i un cabal de 0.03 ml/min. Aquest experiment es diferencia del primer en la posició de l'ímant.

Com que la cara nord té una densitat de flux magnètic superior a la cara lateral, el pendent i l'acumulació d'àrea és més gran. Això fa que durant la gran part de l'experiment una part de l'àrea acumulada quedi fora de la nostra visió.

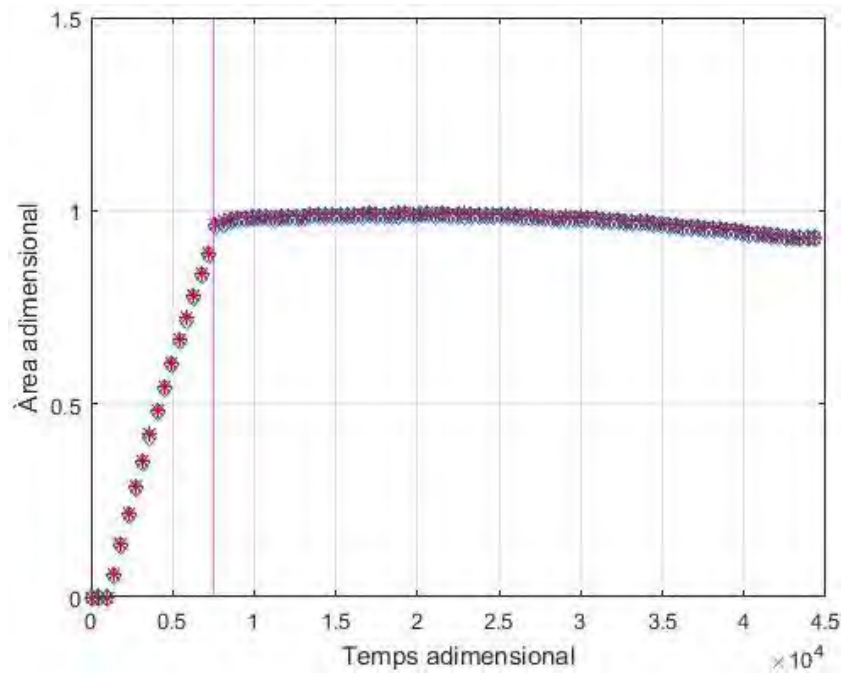


Figura 4.1.4.1 Àrea de partícules acumulades durant l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

4.1.5 Experiment N-I5-P1-C3-QM

Aquest experiment és similar a l'anterior, ja que s'han mantingut totes les variables excepte el cabal que s'ha augmentat fins a 0.06 ml/min. També és comparable amb l'experiment NS-I5-P1-C3-QM, del qual es diferencia per l'orientació de l'imant, ja que en aquest cas està orientat a la cara nord al capil·lar.

Si es compara amb el gràfic anterior, es pot veure com es redueix el pendent de creixement degut a que augmenta el cabal. Si es compara amb el gràfic 4.1.2.2. és visualitza que hi ha més àrea en aquest, ja que està orientat per la cara nord, la qual té més densitat de flux magnètic.

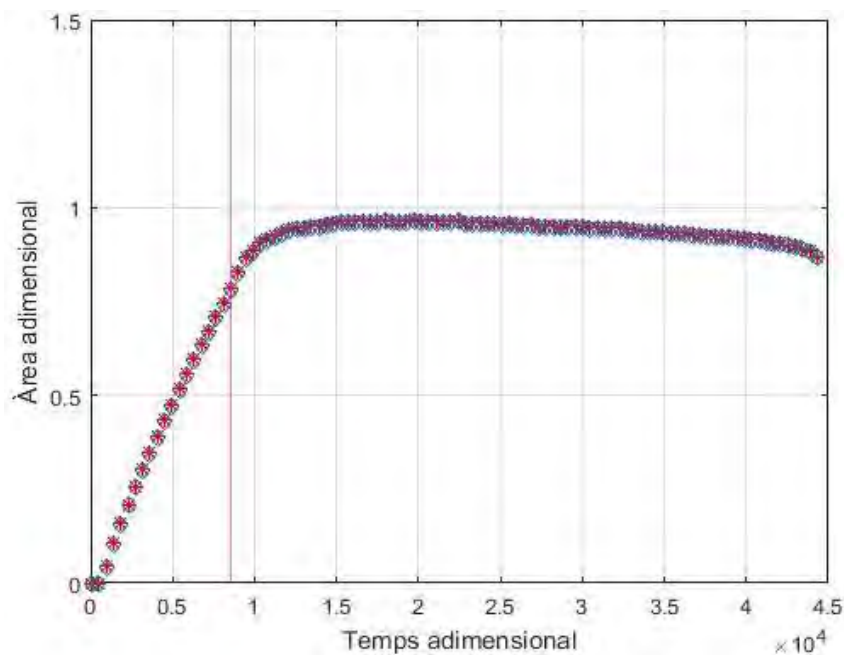


Figura 4.1.5.1 Àrea de partícules acumulades durant l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

4.1.6 Experiment N-I5-P1-C3-QA

L'experiment N-I5-P1-C3-QA manté els paràmetres dels dos experiments anteriors i s'utilitza un cabal de 0.12 m/min. També és comparable a l'experiment NS-I5-P1-C3-QA, que com els casos anteriors, es diferencia per l'orientació de l'imant.

S'observa que com més gran sigui el cabal hi haurà més fotografies on s'observi totes les partícules acumulades. A més a més, com els gràfics esmentant anteriorment, l'augment de cabal provoca que el pendent sigui més petit, mentre que treballa amb l'imant orientat a la cara nord al capil·lar, ajuda al fet que augmenti el nombre de partícules acumulades i la velocitat d'acumulació d'aquestes.

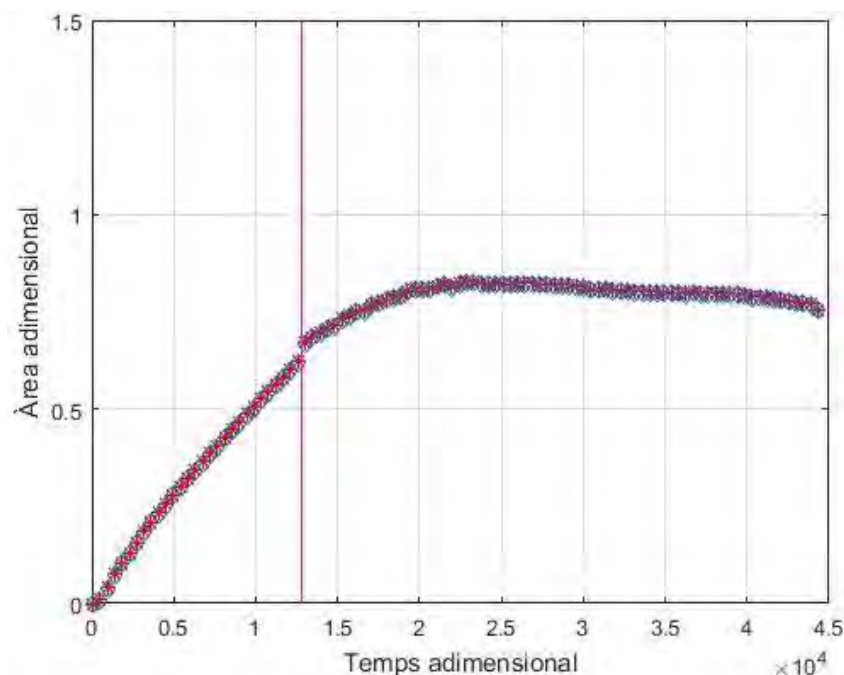


Figura 4.1.6.1 Àrea de partícules acumulades durant l'experiment N-I5-P1-C3-QA.

4.1.7 Experiment N-I3-P1-C3-QM

Com que a la majoria d'experiments no es podia observar el final de l'acumulació de partícules, ja que ens quedaven fora l'objectiu del microscopi, es va provar fer experiments amb un imant més petit. En aquest cas, s'ha utilitzat l'imant cúbic de 3mm de costat i s'ha orientat la cara nord d'aquest al capil·lar quadrat de 300 μm de costat. A més a més, s'ha utilitzat partícules amb un diàmetre mitjà d'1.14 μm i un cabal de 0.06 ml/min.

Es pot visualitzar que hi ha una gran fluctuació de partícules, aquesta fluctuació la genera la pròpia velocitat del flux. S'ha observat que la part més fluctuant és la que es troba a la part final de l'acumulació, fet que explicaria que els experimentats observats anteriorment no mostrin aquest fenomen.

Si es comparà amb l'experiment N-I5-P1-C3-QM, el qual es diferencia per la mida de l'imant, es pot veure com el pendent a l'inici de l'experiment és bastant semblant.

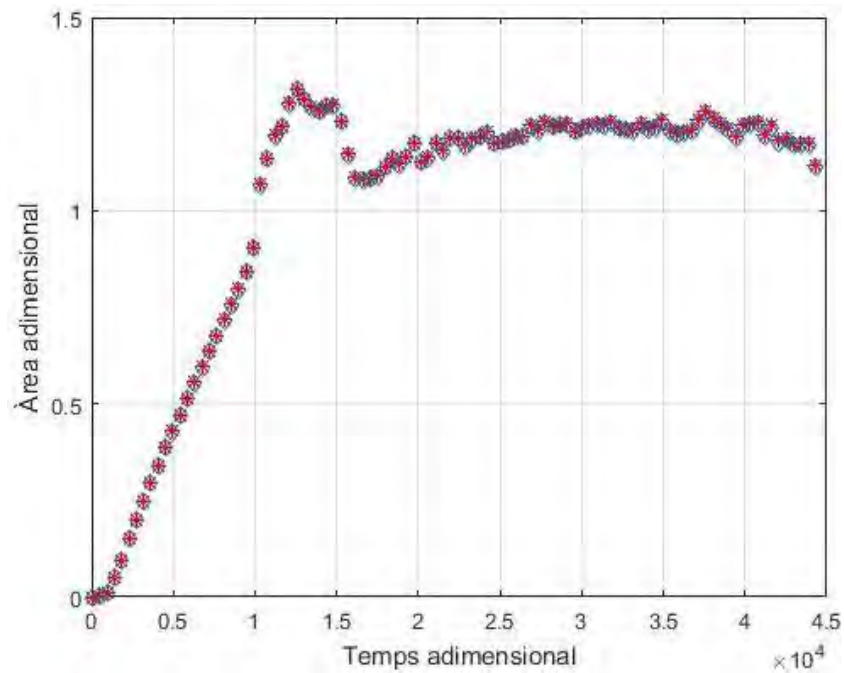


Figura 4.1.7.1 Àrea de partícules acumulades durant l'experiment N-I3-P1-C3-QM.

4.1.8 Experiment N-I3-P4-C3-QM

Aquest és l'altre experiment que s'ha realitzat amb l'imant cúbic de 3 mm de costat però ara s'ha realitzat amb partícules de $4.37 \mu\text{m}$ de diàmetre mitjà.

La principal diferència amb l'experiment anterior, és que a l'usar partícules més grans, el pendent i l'àrea acumulada és major. També es pot veure com l'àrea s'estabilitza però a la part final de l'experiment aquesta comença a reduir.

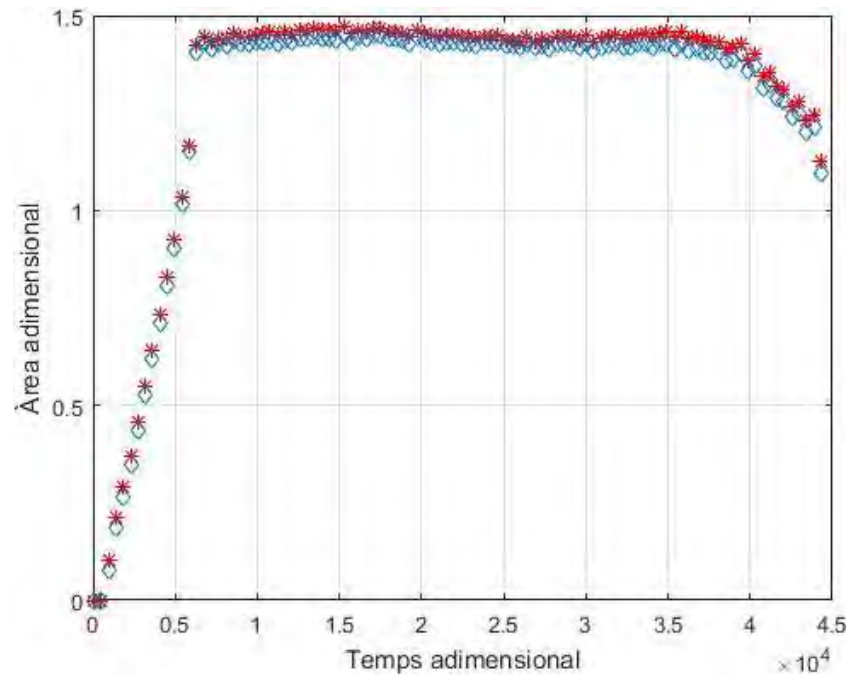


Figura 4.1.8.1 Àrea de partícules acumulades durant l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

4.1.9 Experiment N-I5-P4-C3-QB

Es decideix realitzar un experiment amb l'imant cúbic de 5 mm de costat amb la cara nord orientada al capil·lar quadrat de 300 μm de costat, pel qual s'hi fa passar 0.03 ml/min de la solució de partícules amb un diàmetre mitjà de 4.37 μm .

L'experiment es pot comparar amb l'experiment N-I5-P1-C3-QB, ja que varia la mida de les partícules i es manté la resta de condicions. S'observa un pendent i una àrea lleugerament superior però com que només es veu totes les partícules acumulades el primer 20% de l'experiment, no es pot conèixer com actuaran les partícules més allunyades de l'imant.

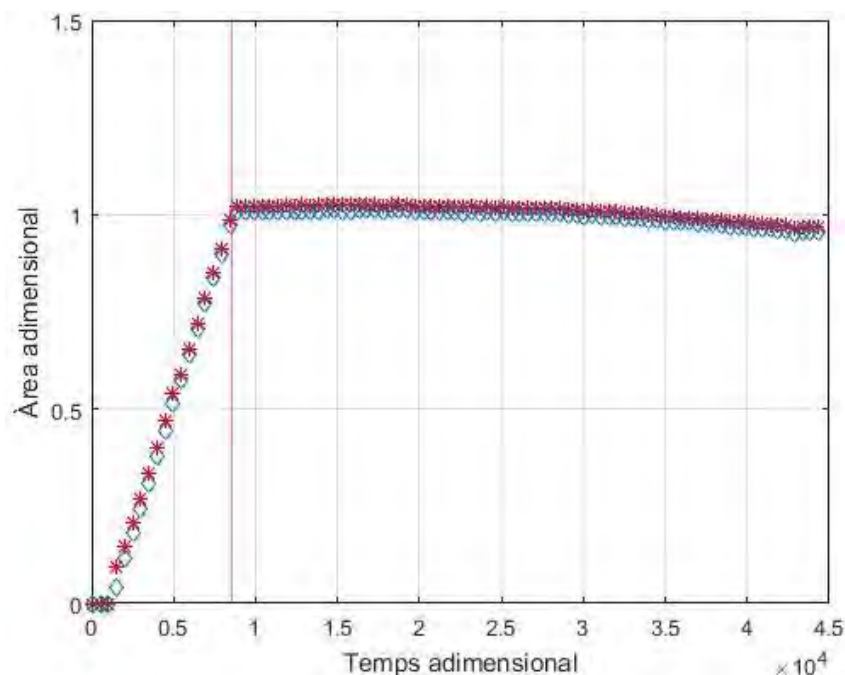


Figura 4.1.9.1 Àrea de partícules acumulades durant l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

4.1.10 Experiment N-I5-P4-C3-QM

L'experiment N-I5-P4-C3-QM manté els paràmetres fixats excepte el cabal, el qual serà de 0.06 ml/min.

Si es compara amb l'experiment anterior, no s'observa que la pendent pateixi gaires variacions tot i que l'àrea de partícules acumulades es deixa de veure abans que en el cas anterior. En canvi, si es compara amb l'experiment N-I5-P1-C3-QM, amb el qual comparteix tots els paràmetres excepte la mida de partícula, es comprova que el pendent i l'acumulació augmenten, tot i que no es pot veure com variaria l'àrea a partir del temps $0.635 \cdot 10^4$.

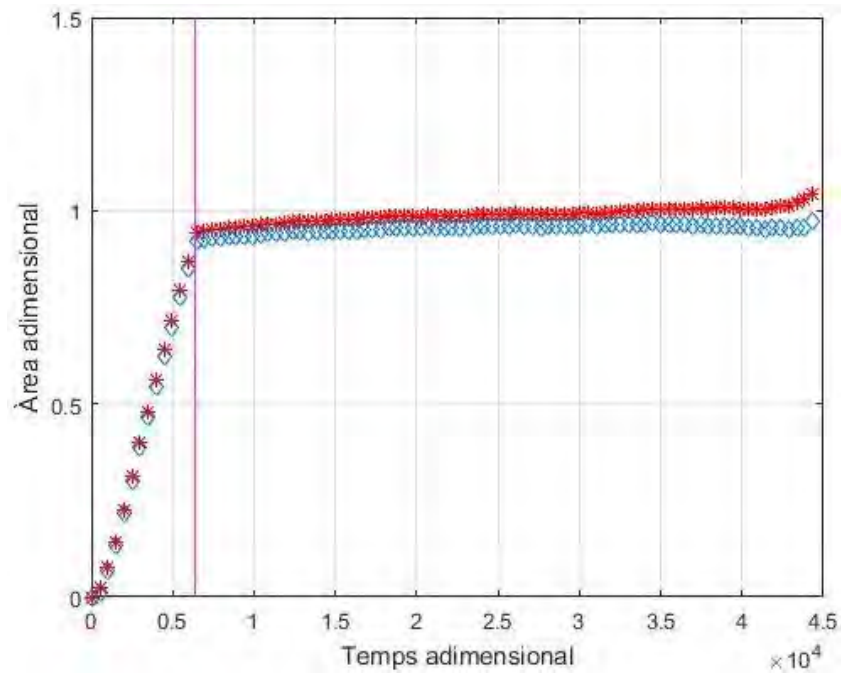


Figura 4.1.10.1 Àrea de partícules acumulades durant l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

4.1.11 Experiment N-I5-P4-C3-QA

S'utilitza les mateixes condicions que els casos anteriors, però aquest cop es treballa amb un cabal de 0.12 ml/min.

Comparat amb l'experiment anterior es pot veure com la pendent i l'àrea acumulada es redueixen lleugerament. Si s'observa el mateix experiment realitzat amb les partícules petites (experiment N-I5-P1-C3-QA), si que es pot veure una major pendent i àrea acumulada.

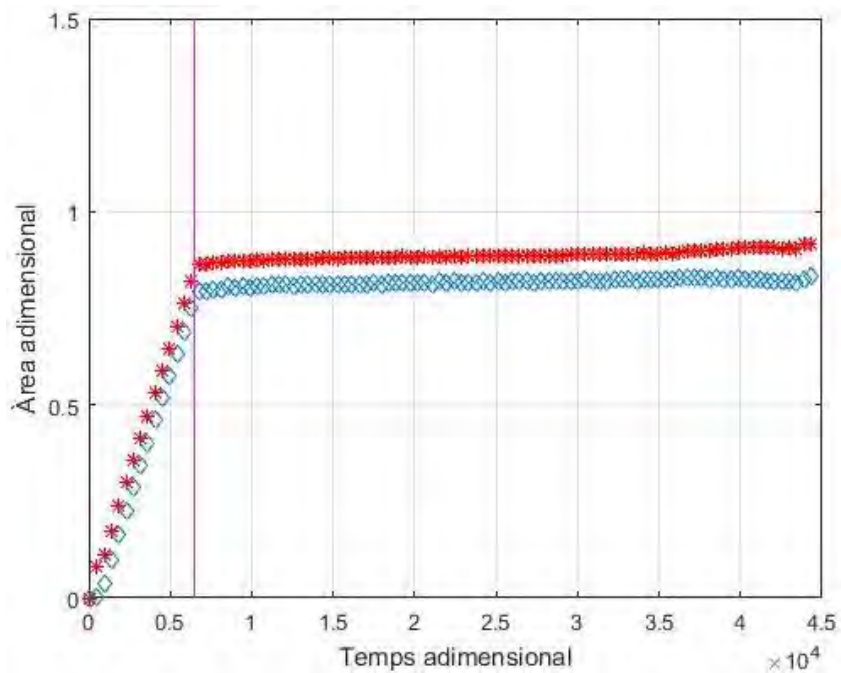


Figura 4.1.11.1 Àrea de partícules acumulades durant l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

4.1.12 Experiment N-I5-P4-C6-QB

L'experiment N-I5-P4-C6-QB ha sigut l'únic que s'ha realitzat amb el capil·lar quadrat de 600 µm de costat, a part s'ha utilitzat l'imant cúbic de 5 mm de costat orientat amb la cara nord al capil·lar, partícules de 4.37 µm de diàmetre mitjà i un cabal 0.03 ml/min. Com s'ha utilitza un cabal baix i un capil·lar gran, el temps adimensional i la velocitat han sigut més petits que la resta d'experiments.

Si es compara amb l'experiment N-I5-P4-C3-QB, el qual es diferencia amb aquest per la mida del capil·lar, es visualitza que aquest experiment té una pendent molt més pronunciada i una acumulació de partícules bastant més gran. Això es produeix perquè la velocitat és 4 cops més petita, i la gran part de partícules que entren es queden dipositades al capil·lar.

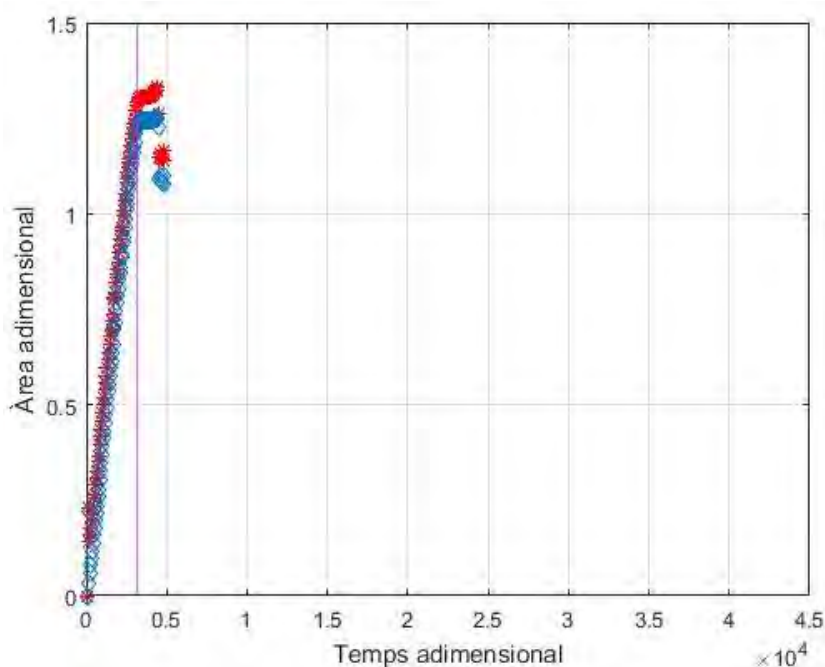


Figura 4.1.12.1 Àrea de partícules acumulades durant l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

Finalment, a la taula 4.1.12.1, es pot veure la inclinació de la pendent dels diferents experiments realitzats

Taula 4.1.12.1 Pendent de creixement dels experiments realitzats.

Experiments	Pendent (bwarea)	Pendent (Regionprops)
NS-I5-P1-C3-QB	$7.15 \cdot 10^{-5}$	$7.14 \cdot 10^{-5}$
NS-I5-P1-C3-QM	$3.05 \cdot 10^{-5}$	$3.05 \cdot 10^{-5}$
NS-I5-P1-C3-QA	$1.13 \cdot 10^{-5}$	$1.13 \cdot 10^{-5}$
N-I5-P1-C3-QB	$1.41 \cdot 10^{-4}$	$1.41 \cdot 10^{-4}$
N-I5-P1-C3-QM	$9.58 \cdot 10^{-5}$	$9.58 \cdot 10^{-5}$
N-I5-P1-C3-QA	$4.90 \cdot 10^{-5}$	$4.90 \cdot 10^{-5}$
N-I3-P1-C3-QM	$9.74 \cdot 10^{-5}$	$9.73 \cdot 10^{-5}$
N-I3-P4-C3-QM	$2.15 \cdot 10^{-4}$	$2.16 \cdot 10^{-4}$
N-I5-P4-C3-QB	$1.29 \cdot 10^{-4}$	$1.32 \cdot 10^{-4}$
N-I5-P4-C3-QM	$1.61 \cdot 10^{-4}$	$1.59 \cdot 10^{-4}$
N-I5-P4-C3-QA	$1.31 \cdot 10^{-4}$	$1.32 \cdot 10^{-4}$
N-I5-P4-C6-QB	$3.96 \cdot 10^{-4}$	$4.08 \cdot 10^{-4}$

A partir dels pendents de la taula 4.1.12.1 es pot observar la velocitat d'acumulació de partícules de cadascun dels experiments, com major sigui el pendent més ràpidament s'acumulen les partícules al microcanal. Cal tenir present, que només els experiments NS-I5-P1-C3-QA, N-I3-P1-C3-QM i N-I3-P4-C3-QM s'observa el pendent de creixement en la seva totalitat.

També cal tenir en compte que els experiments realitzats amb imants cúbics de 3 mm de costats, donen una acumulació més ràpida que els mateixos experiments realitzats amb l'imant de 5 mm cúbics, això potser perquè els imants de 3 mm de costats tenen una magnetització major.

4.2 Simetria de l'àrea

S'analitza els gràfics que mostren la distribució de l'àrea acumulada sota l'imant. S'han estudiat l'acumulació de partícules a tres posicions de l'imant, aquestes es poden observar a la figura 3.4.3.1.

L'eix de les abscisses és el mateix que l'usat anteriorment però el de les ordenades serà amb longitud adimensional en comptes de l'àrea.

$$l^* = \frac{l}{H} \quad (4.1.2)$$

on:

- l : és la longitud de partícules (mm)
- H : diàmetre intern del capil·lar (mm)

En aquestes representacions també s'hi mostra una recta vertical per tal d'identificar el moment on les imatges no mostren tota l'àrea acumulada. Cal tenir present, que en aquest cas, això no interfereix en la interpretació dels resultats.

En alguns experiments, es mostren els resultats en dos gràfics per tal de facilitar la visualització del començament d'aquest.

4.2.1 Experiment NS-I5-P1-C3-QB

L'experiment NS-I5-P1-C3-QB, es caracteritza per haver-se realitzat amb l'imant cúbic de 5 mm de costat orientat lateralment cap al capil·lar de 300 μm . A més a més, cal recordar que s'ha utilitzat partícules de 1.14 μm de diàmetre i un cabal de 0.03 ml/min.

Es confirma el que s'havia simulat numèricament, que per un imant orientat lateralment i partícules de 1.14 μm , les partícules es comencen a acumular al centre de l'imant i de manera simètrica als dos costats.

A mesura que transcorre el temps, el fluid provoca l'erosió de les primeres partícules que troba, fent que aquestes s'acumulin a la part final de l'imant.

Durant la realització de l'experiment es va observar que les partícules sedimentaven dins la xeringa, és a dir, la concentració no és constant. Aquest efecte és més rellevant pels cabals petits, ja que es tarda més a buidar tota la xeringa.

Això podria explicar que a mesura que transcorre el temps l'erosió a les primeres partícules augmenta. Ja que com el fluid té una concentració menor de partícules desplaça més partícules de les que diposita.

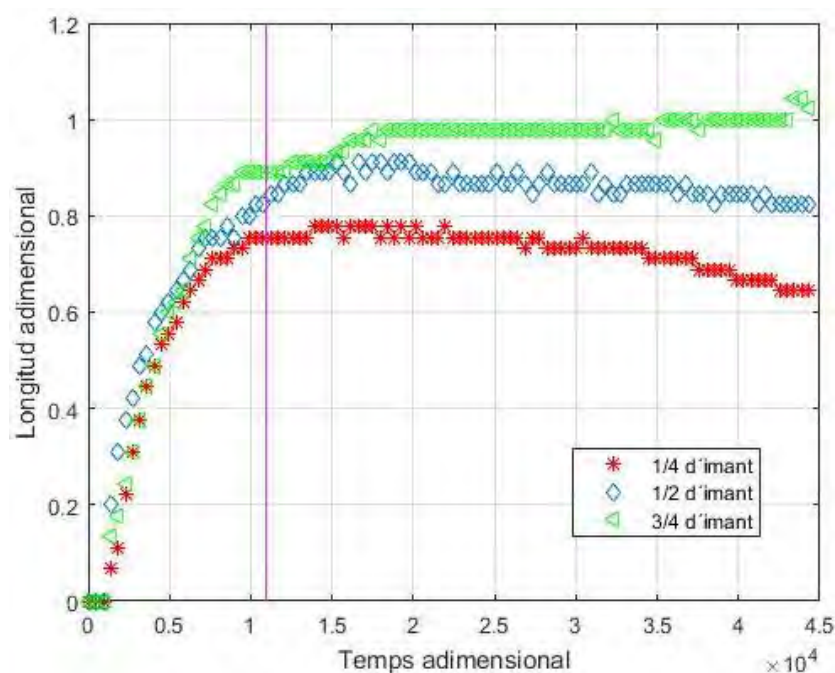


Figura 4.2.1.1 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB

4.2.2 Experiment NS-I5-P1-C3-QM

En aquest cas, s'ha realitzat el mateix experiment però utilitzant el doble de cabal (0.06 ml/min).

El començament és semblant a l'esmentat anteriorment, ja que no s'han modificat l'orientació de l'imatge ni la mida de les partícules. En canvi, s'observa que l'acumulació total és menor que en el cas anterior.

També s'observa que en aquest cas, no es produeix tanta erosió com l'anterior, això podria ser al fet que no han sedimentat tantes partícules i la concentració és menys variable.

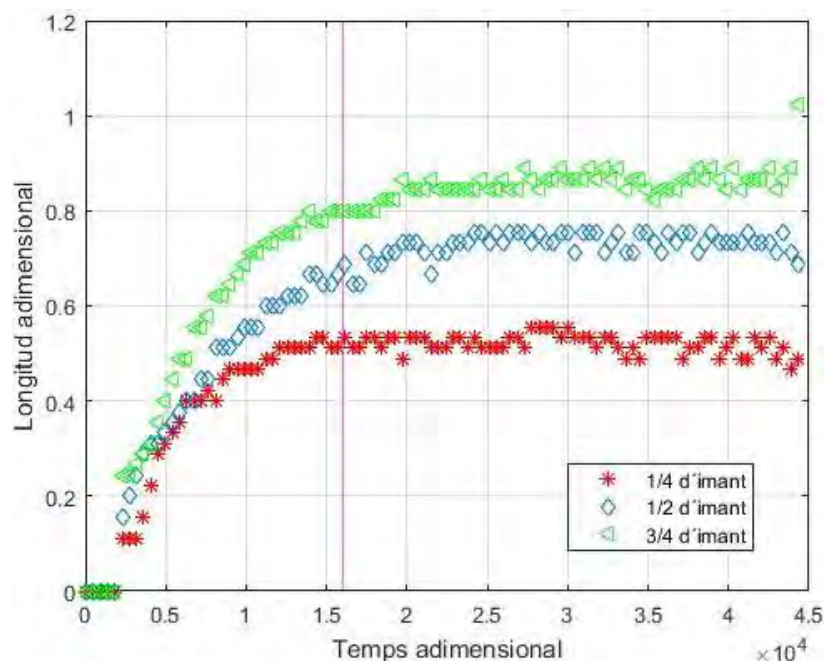


Figura 4.2.2.1 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.

4.2.3 Experiment NS-I5-P1-C3-QA

L'experiment NS-I5-P1-C3-QA s'ha realitzat com els experiments anteriors però aquest cop utilitzant un cabal de 0.12 ml/min.

L'inici es manté l'acumulació pel centre de l'imant i a mesura que transcorre l'experiment la part amb més partícules és a 3/4 de l'imant.

Un cop l'experiment s'estabilitza, s'observa que la quantitat de partícules acumulades i erosionades és molt semblant a la produïda a l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.

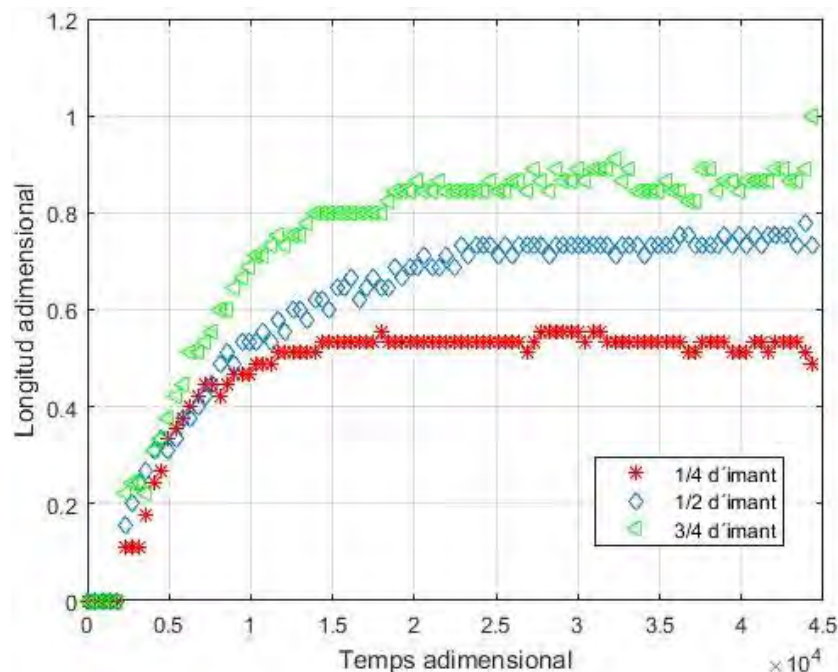


Figura 4.2.3.1 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

4.2.4 Experiment N-I5-P1-C3-QB

Com s'ha esmentat l'experiment N-I5-P1-C3-QB s'ha fet amb el capil·lar quadrat de 300 μm de costat, l'imant cúbic de 5 mm de costat i amb l'orientació nord, les partícules d'1.14 μm de diàmetre mitjà i un cabal de 0.03 ml/min.

Quan l'imant es troba orientat amb la cara nord al capil·lar, les simulacions ens indiquen que les partícules es comencen a dipositar a les puntes d'aquest.

Veient les representacions, es pot comprovar que això es compleix. Poc després de començar l'experiment, s'observa com el creixement del primer quart és superior al del tercer quart.

Tal com passava als experiments anteriors, a mesura que transcorre l'experiment, es redueix el nombre de partícules al primer quart d'imant mentre que augmentant al tercer quart. Tot i això, a l'experiment NS-I5-P1-C3-QB la diferència entre les tres posicions era més notable que en aquest gràfic, és a dir, l'àrea d'aquest experiment és molt més constant que el visualitzat abans.

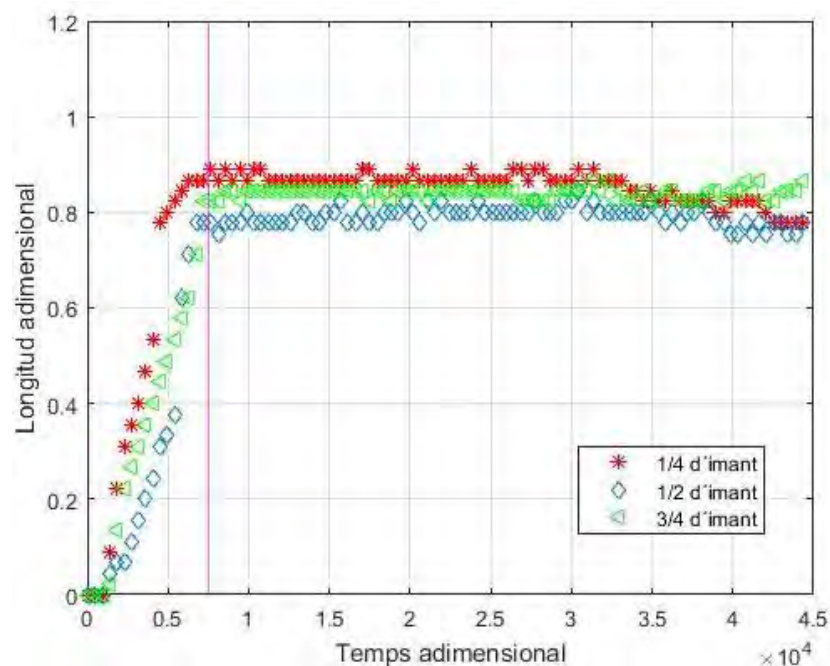


Figura 4.2.4.1 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

4.2.5 Experiment N-I5-P1-C3-QM

Aquest experiment és com l'experiment N-I5-P1-C3-QB amb un cabal de 0.06 ml/min o com l'experiment NS-I5-P1-C3-QM amb l'imatge orientat amb la cara nord cap al capil·lar.

Com el cas anterior, el creixement comença pels costats de manera molt semblant, i a la meitat del pendent comença a créixer més pel primer quart que pel tercer.

S'observa com les tres posicions estan molt properes comparades amb l'experiment NS-I5-P1-C3-QM. i com l'erosió del primer quart és inferior a la que es produeix en l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

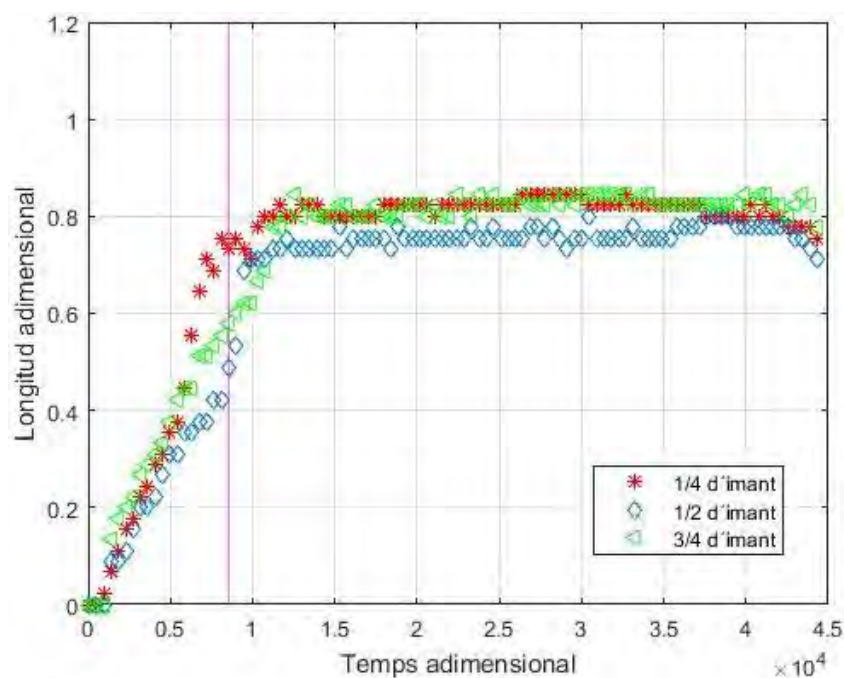


Figura 4.2.5.1 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

4.2.6 Experiment N-I5-P1-C3-QA

L'experiment N-I5-P1-C3-QA és anàleg al IV i V però amb un cabal de 0.12 ml/min. També es comparable a l'experiment NS-I5-P1-C3-QA però amb l'imant orientat amb la cara nord al capil·lar.

El creixement entre el primer i tercer quart és molt semblant a l'inici, després sembla que creixi més el tercer quart, però cap al final de la recta, augmenta la velocitat de creixement del primer quart de l'imant.

Un cop estabilitzat l'experiment es mostra les tres posicions molt properes, al contrari del que passa a l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

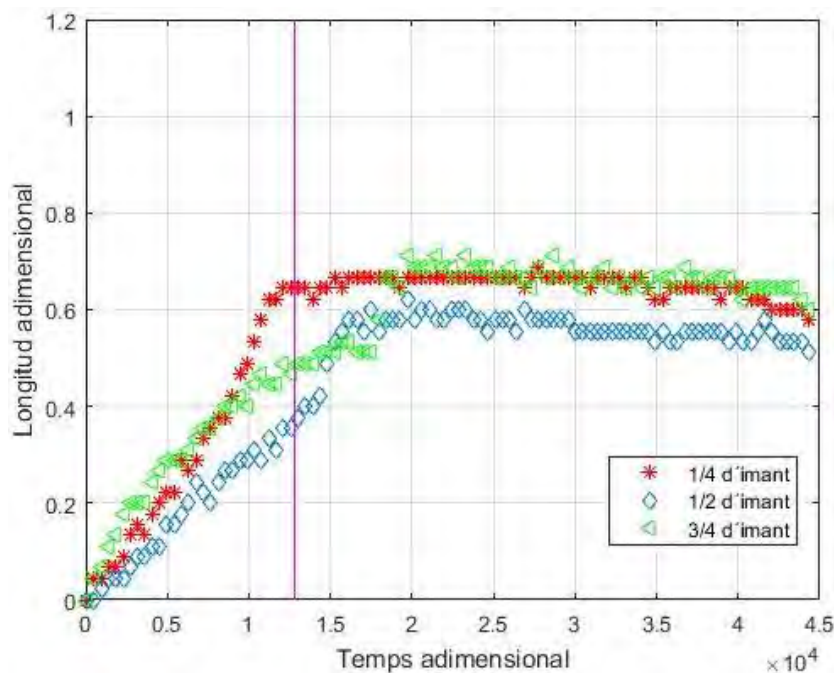


Figura 4.2.6.1 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I5-P1-C3-QA.

4.2.7 Experiment N-I3-P1-C3-QM

L'experiment N-I3-P1-C3-QM s'ha dut a terme amb un imant cúbic de 3 mm de costat orientat amb la cara nord a un capil·lar quadrat de 300 μm de costat. Per aquest es fa passar un cabal de 0.06 ml/min amb partícules de 1.14 μm de diàmetre mitjà.

A l'inici de l'experiment, com la resta de casos amb l'imant orientat amb la cara nord al capil·lar, augmenta primer pels extrems de l'imant i al final de el pendent, el creixement del primer quart és superior al del tercer.

Comparant-ho amb l'experiment N-I5-P1-C3-QM amb el qual es diferencia per la mida de l'imant, es pot veure que són bastant similars. L'àrea acumulada en les tres parts és molt propera entre elles però la quantitat de cadascun d'aquest és inferior a la de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

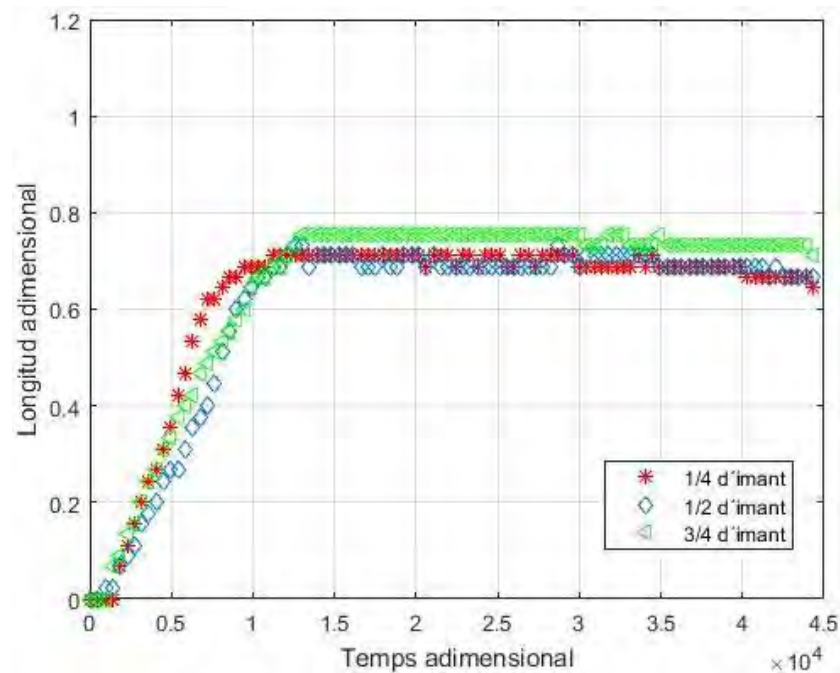


Figura 4.2.7.1 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I3-P1-C3-QM.

4.2.8 Experiment N-I3-P4-C3-QM

S'ha realitzat l'experiment N-I3-P4-C3-QM amb els mateixos paràmetres que l'anterior, però aquest cop s'ha utilitzat partícules de $4.37 \mu\text{m}$ de diàmetre mitjà.

Comparat amb l'experiment anterior, s'observa com el creixement és molt més ràpid. Degut això no es pot veure bé el pendent del creixement, per tant a la figura 4.2.8.2 s'ha ampliat aquest. Un cop s'estabilitza, evoluciona de manera molt semblant a l'experiment anterior però amb un lleuger augment de l'àrea acumulada.

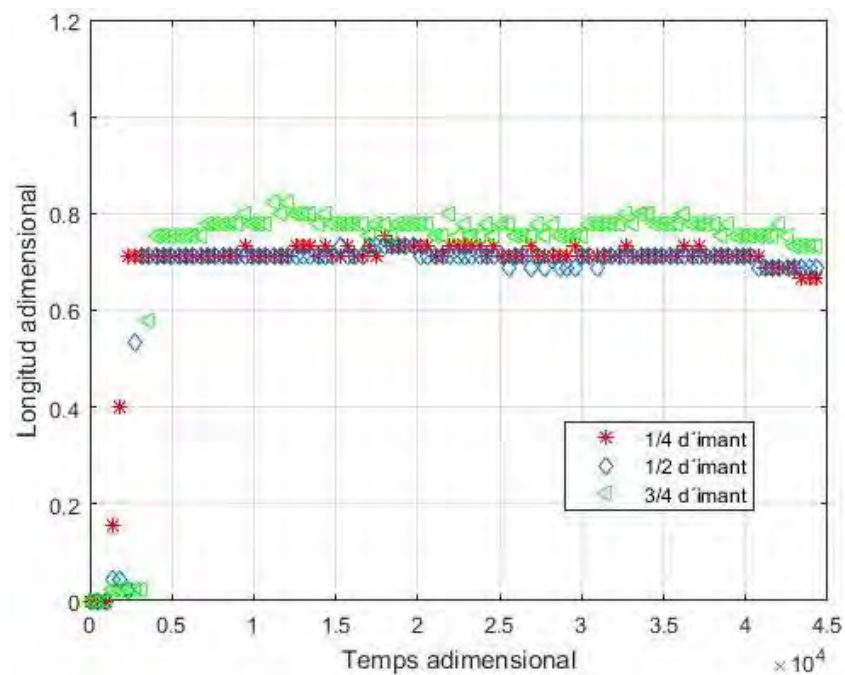


Figura 4.2.8.1 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

A la figura 4.2.8.2 s'ha ampliat el començament de la figura 4.2.8.1 i s'ha augmentat el nombre de punts representats. Es pot veure que en utilitzar les partícules més grans, l'acumulació creix de forma gradual començant pel primer quart. És a dir, en utilitzar partícules més grans i l'ímant orientat amb la cara nord al capil·lar, l'acumulació comença d'una manera diferent de l'ha vista fins ara. Això es pot deure que les partícules més grans tenen més material magnètic.

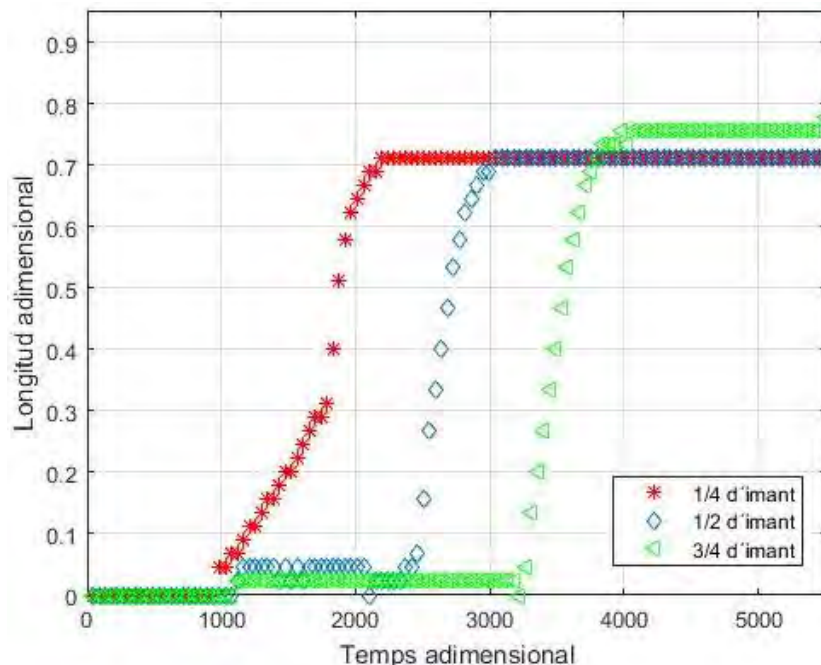


Figura 4.2.8.2 Començament de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

4.2.9 Experiment N-I5-P4-C3-QB

L'experiment N-I5-P4-C3-QB s'ha dut a terme amb l'ímant cúbic de 5 mm de costat orientat amb la cara nord al capil·lar de 300 μm . Per aquest microcanal s'hi ha fet passar un cabal de 0.03 ml/min amb partícules de 4.37 μm de diàmetre mitjà.

Comparat amb l'experiment N-I5-P1-C3-QB, el qual s'ha fet utilitzant les partícules més petites, l'experiment s'inicia de manera diferent, fet que fa que quan l'acumulació deixa d'augmentar, la part amb més acumulació d'aquest experiment estigui al tercer quart tot mentre que la part amb menys partícules sigui la inicial. Pel que fa a l'acumulació de partícules en la meitat i el tercer quart, es superior quan s'utilitza partícules més grans.

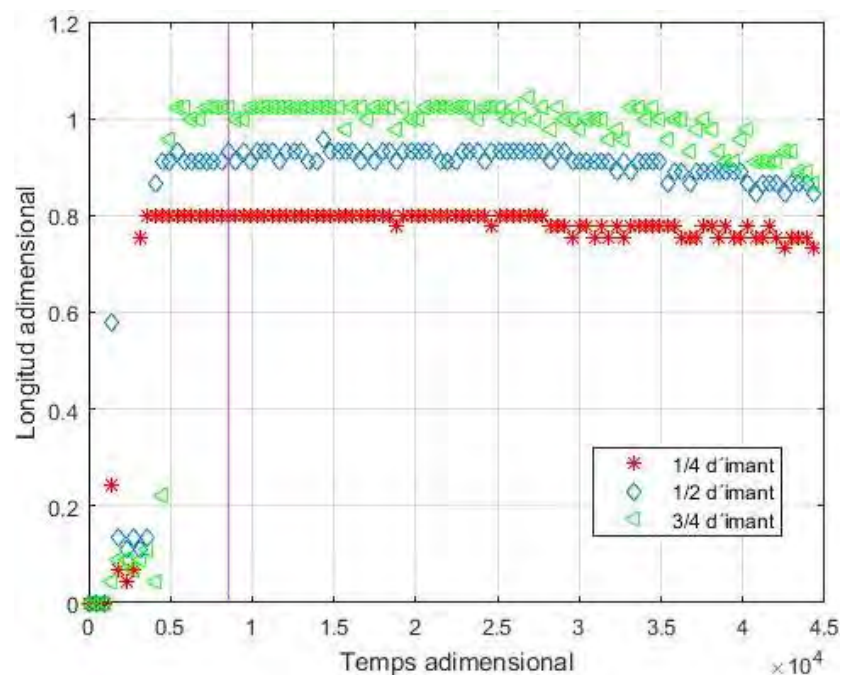


Figura 4.2.9.1 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

Si ampliem l'inici de l'experiment i s'augmenten el nombre de punts representats, s'observa que les partícules s'acumulen de la mateixa manera que el cas anterior.

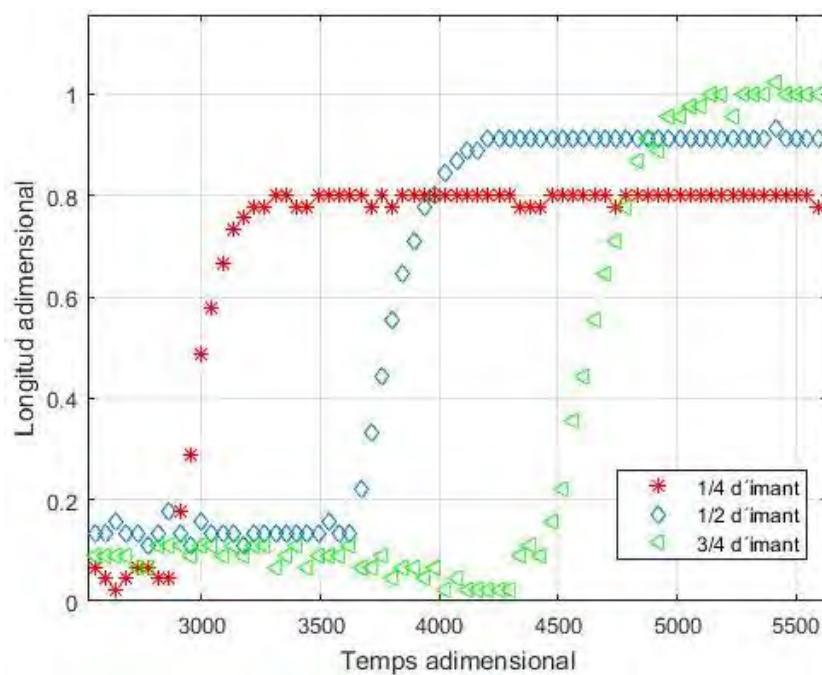


Figura 4.2.9.2 Començament de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

4.2.10 Experiment N-I5-P4-C3-QM

Aquest experiment es realitza amb els mateixos paràmetres del punt anterior però amb el doble de cabal, és a dir, 0.06 ml/min. També és anàleg a l'experiment N-I3-P4-C3-QM però aquest cop usant l'imat de 5 mm de costat.

L'acumulació de partícules es produeix ràpidament com els altres casos on s'ha utilitzat partícules de 4.37 μm de diàmetre mitjà.

Al llarg de l'experiment l'acumulació de partícules dels 3 llocs estudiats varia i fluctua més que als experiments N-I3-P4-C3-QM i N-I5-P4-C3-QB, tot i que les tres posicions tenen acumulacions semblants. Tot i això, comparant els diferents experiments no s'ha pogut observar que segueixi cap patró.

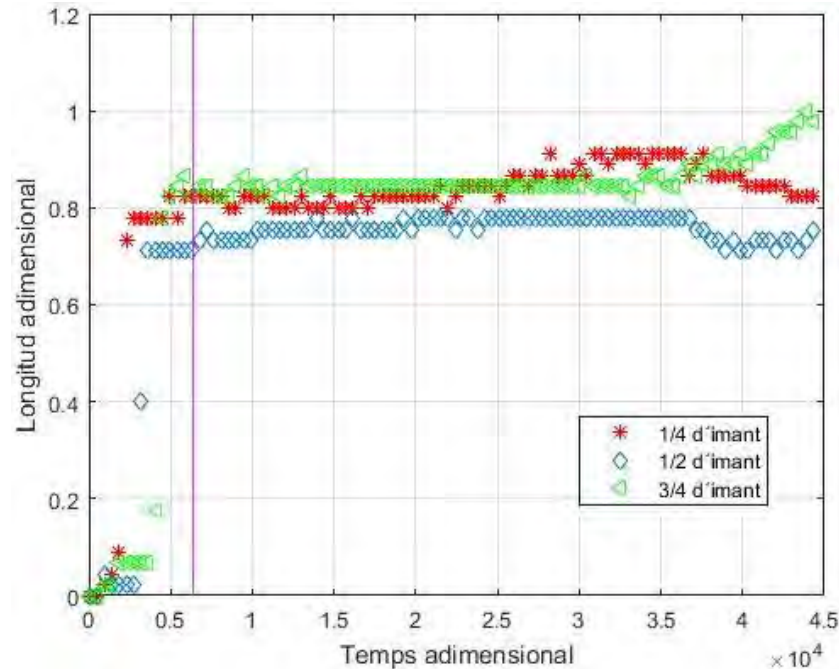


Figura 4.2.10.1 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

Es pot veure que creix de la mateixa manera que els dos casos anteriors, tot i que ara ho fa lleugerament més ràpid.

Com s'ha esmentat anteriorment, es pot veure que la longitud adimensional en la qual s'estabilitza l'experiment dista amb els altres dos casos. Això podria ser a què observen un experiment de tres dimensions amb dues dimensions.

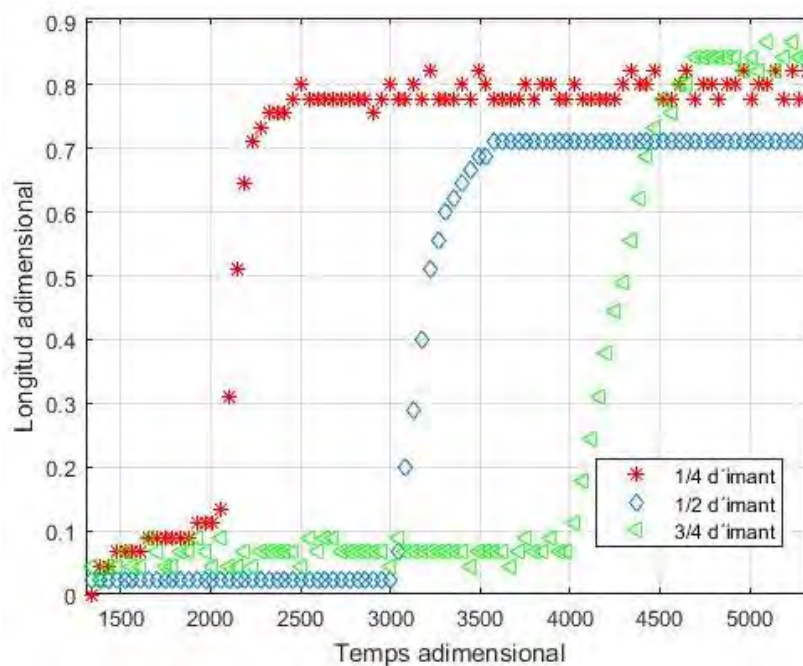


Figura 4.2.10.2 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

4.2.11 Experiment N-I5-P4-C3-QA

Per realitzar aquest experiment s'han mantingut les variables dels experiments N-I5-P4-C3-QB i N-I5-P4-C3-QM excepte el cabal, que ha sigut de 0.12 ml/min.

Com anteriorment, es visualitza una ràpida acumulació de partícules que s'estabilitza de manera semblant als 3 punts. Aquest cas, l'acumulació de partícules en els 3 punts és inferior a l'observada a l'experiment N-I5-P4-C3-QB i N-I5-P4-C3-QM.

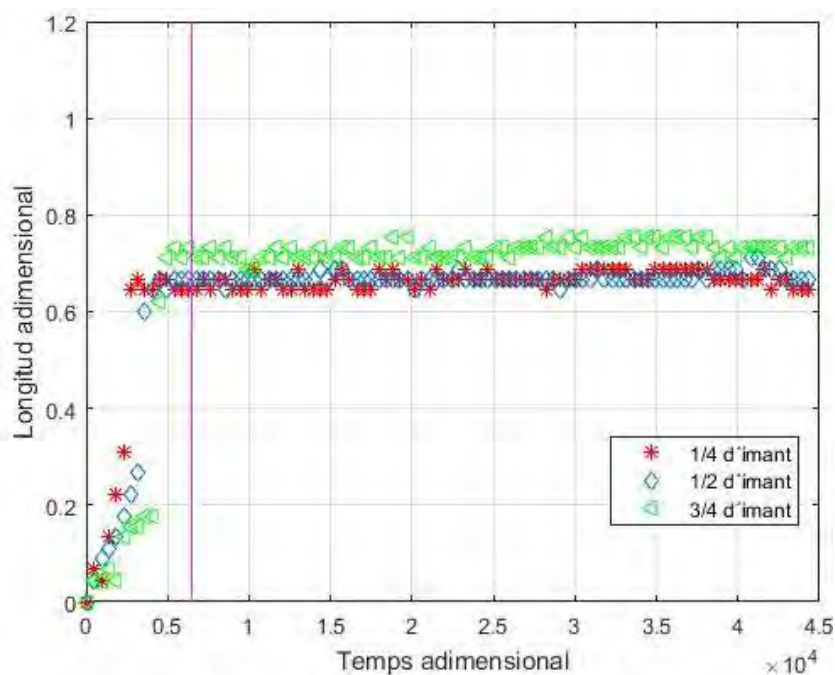


Figura 4.2.11.1 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

En un inici es pot veure que s'acumulen partícules sota tot l'imant, a mesura que augmenta el nombre partícules acumulades, s'observa que aquestes tornen a seguir la tendència vista en els experiments anteriors, on les partícules comencen acumular-se al primer quart i creix en direcció al tercer quart. Això es pot deure que aquest cop s'utilitza una velocitat més alta.

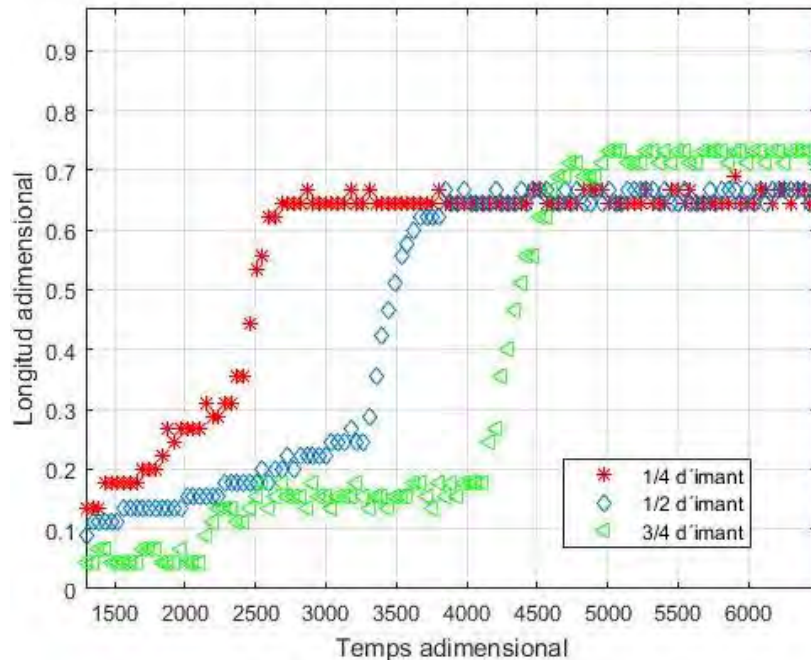


Figura 4.2.11.2 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

4.2.12 Experiment N-I5-P4-C6-QB

S'ha volgut realitzar un experiment utilitzant el capil·lar de 600 μm de costat. Les altres variables utilitzades ha sigut l'imant cúbic de 5 mm de costat orientat amb la cara nord al capil·lar pel qual passa les partícules de 4.37 μm de diàmetre mitjà i un cabal de 0.03 ml/min.

Aquest experiment es diferencia de l'experiment N-I5-P4-C3-QB en la mida del capil·lar. El fet d'utilitzar un capil·lar amb 4 cops més àrea és que la velocitat serà inferior pel mateix cabal. Degut això, el temps adimensional que tarda tot l'experiment, és bastant més petit que els altres cops.

Es pot veure com es l'experiment, en on s'ha acumulat més partícules en cadascun d'aquests punts, fet que ve facilitat per la baixa velocitat del fluid. També s'observa que els tres punts analitzats s'hi acumula una quantitat de partícules molt semblants

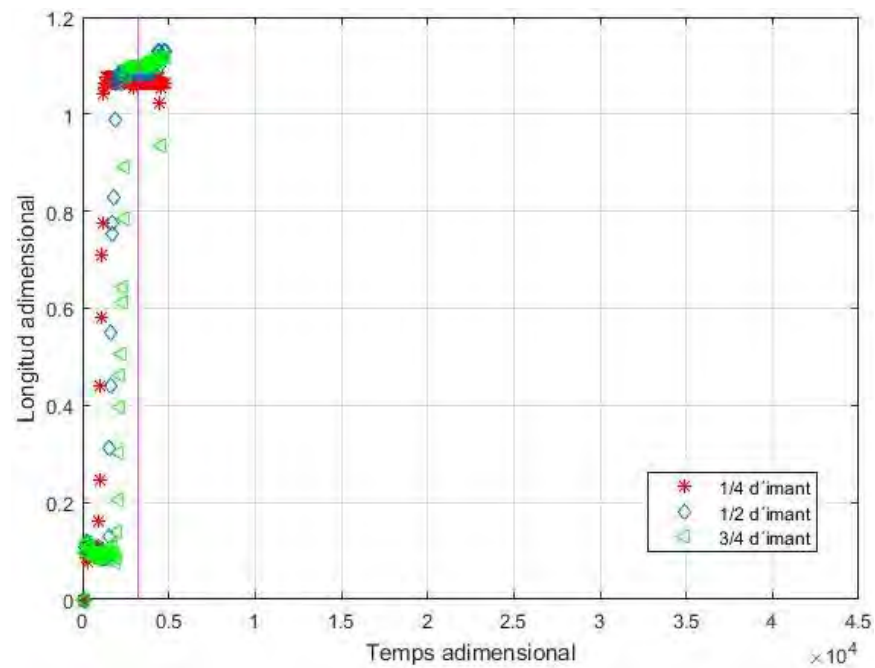


Figura 4.2.12.1 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

S'ha ampliat el començament del gràfic anterior per tal de visualitzar correctament el començament. Es pot observar que segueix la tendència esperada, tot i que creix més ràpidament que els experiments anteriors.

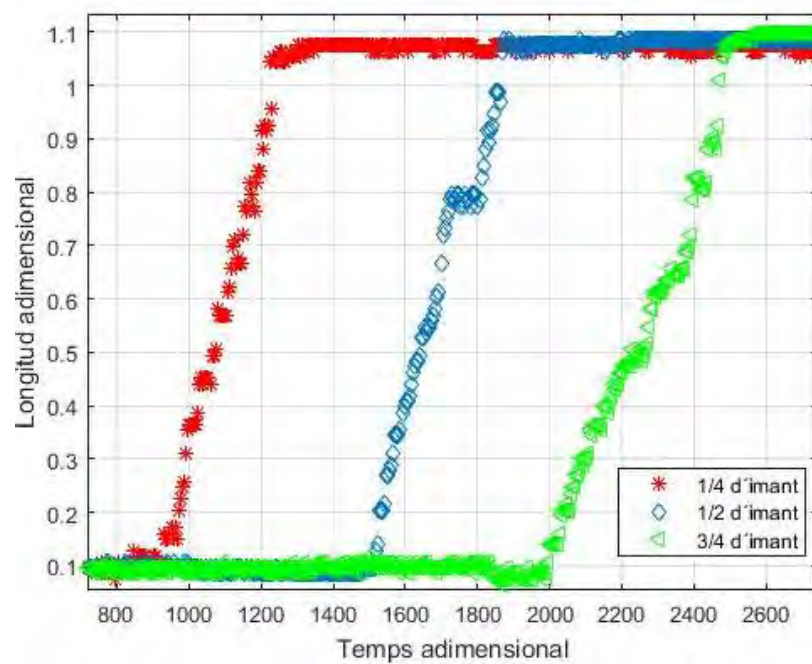


Figura 4.2.12.2 Longitud de l'acumulació de partícules de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

4.3 Magnetització

S'ha utilitzat la densitat del flux magnètic (B) a diferents z per trobar la magnetització. Això s'ha fet amb la següent equació [2]:

$$B_z = M_S \cdot 4 \cdot 10^{-7} \cdot \left[\operatorname{atan} \left(\frac{L^2}{4 \cdot \left(-\frac{L}{2} + z \right) \cdot \sqrt{\frac{L^2}{2} + \left(-\frac{L}{2} + z \right)^2}} \right) - \operatorname{atan} \left(\frac{L^2}{4 \cdot \left(\frac{L}{2} + z \right) \cdot \sqrt{\frac{L^2}{2} + \left(\frac{L}{2} + z \right)^2}} \right) \right] \quad (4.3.1)$$

Cal tenir present, que aquesta equació s'utilitza quan $x=0$ i $y=0$ i l'imant és quadrat. També, s'ha de tenir en compte que en aquest cas, z comença al centre de l'imant.

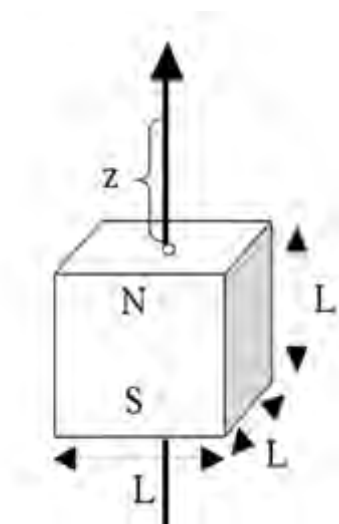


Figura 4.3.1. Sistema de referència.

Aquesta equació, es pot escriure com:

$$B_z = M_S \cdot F \quad (4.3.2)$$

Així doncs, el pendent de la recta que sortirà de representar F a l'eix de les x i B_z al de les y . S'ha utilitzat la densitat del flux magnètic de l'imant cúbic de 5mm del tipus N42, és a dir, l'imant utilitzat a la majoria d'experiments. A la figura 4.3.2. es pot veure aquesta representació.

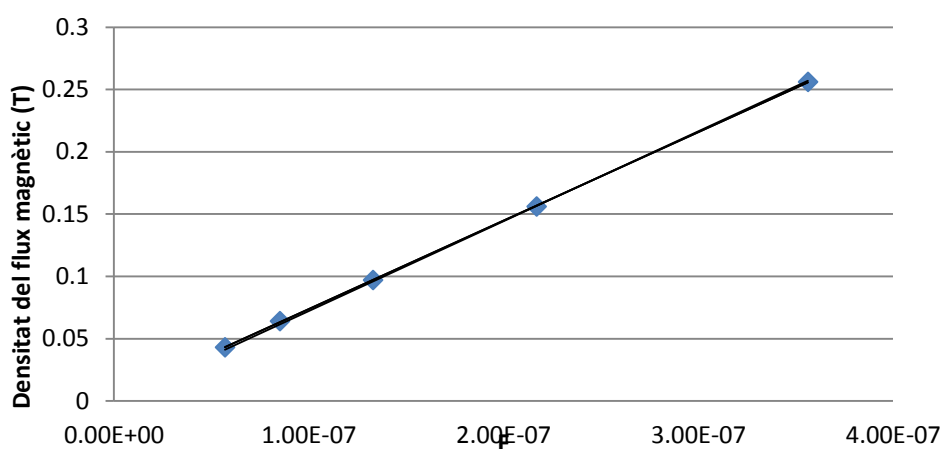


Figura 4.3.2. Representació de la magnetització a partir de F i B_z .

Es troba que el pendent, és a dir, la magnetització és de $7.21 \cdot 10^5$ A/m.

4.4 Suszeptibilitat magnètica

Amb el microscopi, s'ha pogut observar com es mouen les partícules cap a terra i a l'imat, i s'ha vist la zona on hi hauria l'equilibri. A l'annex D es pot alguna de les captures realitzades durant l'experiment.

A partir d'aquestes imatges s'ha vist, que al contrari del que es pensava, la gran majoria de partícules interactuen entre ells i formen cadenes. Aquest podria ser un dels motius pels quals no s'observa cap línia de partícules a l'equilibri.

La figura 4.4.1. s'ha realitzat a partir de la susceptibilitat que proporciona el fabricant de partícules magnètiques. S'observa que el sumatori de forces és 0 a una distància (z) de 1.265 cm de l'imat.

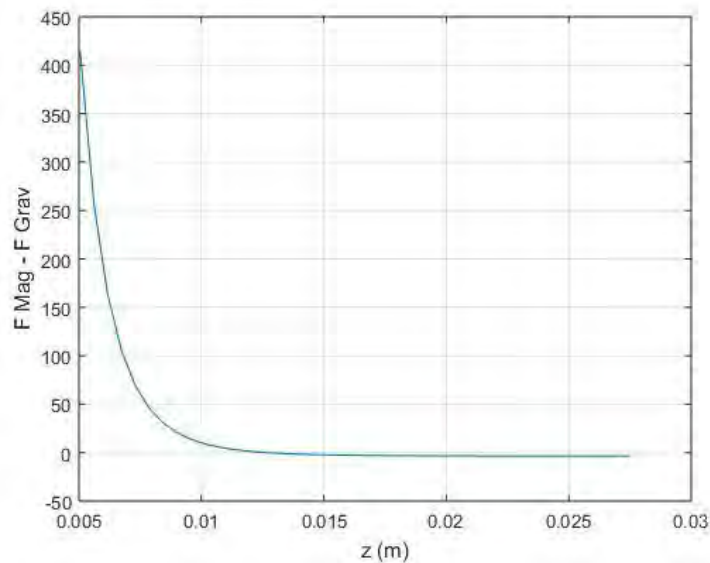
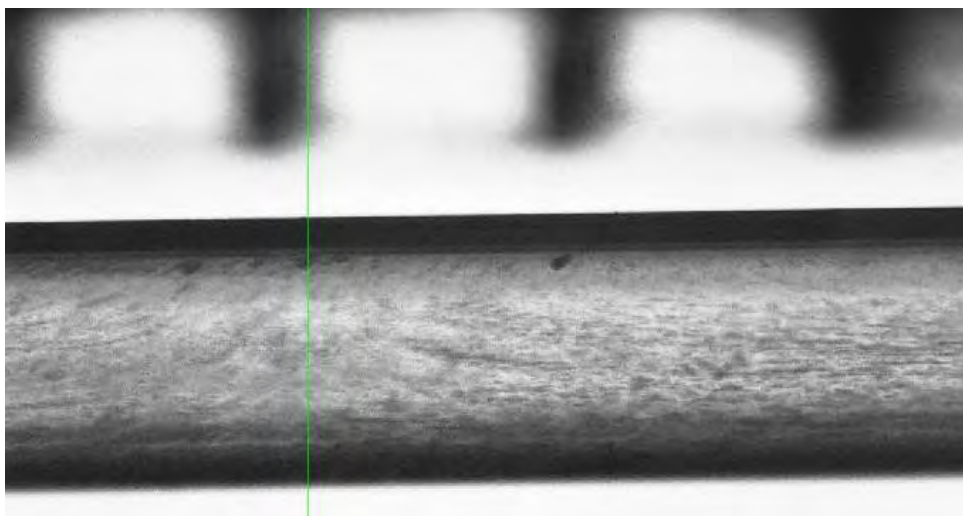


Figura 4.4.1. Sumatori de forces de la partícula per a diferents valors de z.

En canvi, experimentalment s'ha observat que la zona d'equilibri està a 1.193 cm de l'imat.



Taula 4.4.2. La recta verda mostra l'equilibri entre les partícules que sedimenten i les que es veuen atretes per l'imat.

S'ha utilitzat les equacions de l'apartat 2.2 per calcular la susceptibilitat a partir d'un valor de $z=1.193\text{cm}$. Cal tenir present, que L és el costat de l'imatge (5 mm) i z és 0 a la cara d'aquest. També s'ha utilitzat el valor de M_s trobat a l'apartat anterior.

S'obté que la susceptibilitat té un valor de 0.93, això es deu que un petit canvi a z té un efecte important sobre la susceptibilitat. Es pot com una variació del 5.3% del valor de z suposa un error del 28,5% de la susceptibilitat calculada respecte a la teòrica.

5 Conclusions

Un cop analitzats i comparats els resultats obtinguts a partir dels diferents experiments s'ha obtingut diverses conclusions.

S'ha trobat un mètode per poder calcular la susceptibilitat de les partícules de manera aproximada, ràpida i barata. A més a més, s'ha observat que quan les partícules estan a baixes velocitats aquestes interactuen entre elles formant cadenes.

Com s'ha esmentat anteriorment, en la gran part dels experiments no s'ha pogut observar tota l'acumulació de partícules. Això fa que l'estudi s'ha centrat en el començament de l'acumulació de partícules.

Els inicis dels experiments es poden classificar en tres tipus diferents segons la manera en què es comencen acumular les partícules:

1. L'acumulació comença pel centre quan s'utilitzen partícules de $1.14\text{ }\mu\text{m}$ de diàmetre mitjà i l'imant orientat lateralment amb la paret del capil·lar.
2. Les partícules es comencen a dipositar pels dos extrems de l'imant. Això succeeix en utilitzar partícules de $1.14\text{ }\mu\text{m}$ de diàmetre mitjà i l'imant orientat amb la cara nord cap al capil·lar.
3. Les partícules es comencen acumular el primer extrem de l'imant i van desplaçant-se cap al centre i l'extrem més allunyat. Això succeeix en utilitzar l'orientació anterior i partícules de $4.37\text{ }\mu\text{m}$ de diàmetre mitjà. Ens aquests casos, també s'ha observat, que per cabals de 0.12 ml/min es genera una fina capa de partícules sota tot l'imant, just abans de començar l'acumulació descrita.

Aquestes situacions són semblants a les que descriuen els models teòrics.

Com més baix sigui el cabal o més gran sigui l'àrea de pas, més baixa serà la velocitat. Per tant, com més baixi la velocitat més partícules es dipositen al capil·lar, ja que la força d'arrossegament és inferior. Això fa que l'experiment amb l'acumulació més ràpida de partícules és el realitzat amb el capil·lar quadrat més gran, el qual té $600\text{ }\mu\text{m}$ de costat.

Quan la cara nord de l'imant esta en contacte amb la paret del capil·lar s'obté una pendent més gran, és a dir, una velocitat major d'acumulació de partícules que quan l'imant s'orienta lateralment.

Independent ment de l'orientació de l'imant, es pot veure que quan s'utilitzen partícules de $1.14\text{ }\mu\text{m}$ de diàmetre mitjà, la velocitat d'acumulació de partícules és major per cabals baixos. Tanmateix, quan les partícules utilitzades són de $4.37\text{ }\mu\text{m}$ de diàmetre mitjà, la velocitat de l'acumulació de partícules no s'observa l'esmentat anteriorment.

Com menys partícules es dipositin més en sortiran per la part inferior del capil·lar, això s'ha verificat observant els experiments, ja que l'aigua que sortia del capil·lar tenia un marró més intens (més quantitat de partícules) a velocitats altes.

També s'ha pogut observar que quan s'utilitza partícules més grans augmenta el creixement de l'àrea. Això és a causa de dos motius, com més gran són les partícules més àrea ocupen i més part magnètica tenen.

S'ha observat que durant els experiments les partícules sedimenten més ràpid del que es pensava. Això ens porta a afirmar, que al contrari del que es creia, la concentració no és constant al llarg del temps, ja que per a la sedimentació d'aquestes hi ha més partícules a l'inici que al final. Això pot influir en què les partícules acumulades no arribin a un estat estacionari.

Finalment s'ha detectat que en alguns casos el capil·lar es veu totalment tapat de partícules. Per tant, ens fa pensar que el fluid va per la part més central del capil·lar apartant les partícules a la paret d'aquest. Això és difícil d'estudiar, ja que l'experiment és en 3 dimensions però només s'observa un pla de dos dimensions. Aquest fet pot provocar confusió a l'hora d'estudiar algunes de les parts de l'experiment i cal tenir-la present quan s'interpretin els resultats.

6 Referències

- [1] A. Rivas (2017), " Visualització i mesura de la deposició de partícules magnètiques en els parets microcanals", Treball de final de màster d'enginyeria Industrial, Universitat Rovira i Virgili.
- [2] Pallares J. (2016), "A Criterion for the Complemente Deposition of Magnetic Beads on the Walls of Microchannels", *PLOS ONE* 11(3): e0151053.
- [3] Pallares J. (2018), " Numerical simulation of the magnetic particle deposition on the walls of a microchannel", The 16th International Heat Transfer Conference, Beijing, China, 10-15, August.
- [4] Sherwood Scientific, Available: <http://www.sherwood-scientific.com/msb/msbindex.html#def>.
- [5] Educalingo, Available: <https://educalingo.com/es/dic-es/magnetizacion>.
- [6] Universidad politécnica de Madrid (UPM), Available: <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/magnet/campomag.html>.
- [7] Live Science, Available: <https://www.livescience.com/53509-faradays-law-induction.html>.
- [8] Khanacademy, Available: <https://es.khanacademy.org/science/physics/magnetic-forces-and-magnetic-fields/magnetic-field-current-carrying-wire/a/what-are-magnetic-fields>.
- [9] Rodríguez J.J (2015), "Uso de nanopartículas magnéticas y biología molecular para la mejora del diagnóstico microbiológico", Tesis doctoral, Universidad de Santiago de Compostela.
- [10] «TINET,» [En línia]. Available: <http://usuaris.tinet.cat/sje/iman.es.htm>.
- [11] «CMscientific,» Available: <https://www.cmscientific.com/>.
- [12] «Spherotech,» Available: <http://www.spherotech.com/>.
- [13] MATLAB, Available: <https://es.mathworks.com/help/>.
- [14] Tpmequipos, Available: http://tpmequipos.com/994785_Gaussimetro-F-W-Bell-5170-5180.html.
- [15] Jiri Kudr, Yazan Haddad , Lukas Richtera, Zbynek Heger, Mirko Cernak, Vojtech Adam and Ondrej Zitka (2017), "Magnetic Nanoparticles: From Design and Synthesis to Real World Applications", *Nanomaterials*, 7, 243.
- [16] Thomas Rheinlender, Roman Kötitz, Werner Weitschies and Wolfhard Semmler (2000), "Magnetic fluids: Biomedical applications and magnetic fractionation", *Magnetic and Electrical Separation*, Vol. 10, pp. 179-19.

Jordi Lladós Armengol

**Anàlisi experimental de la deposició de partícules
magnètiques en les parets de microcanals**

DOCUMENT III: Annexos



UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI

Tarragona

2018

Índice

A	Evolució dels experiments.....	1
A.1	Experiment NS-I5-P1-C3-QB.....	1
A.2	Experiment NS-I5-P1-C3-QM	4
A.3	Experiment NS-I5-P1-C3-QA.....	6
A.4	Experiment N-I5-P1-C3-QB	9
A.5	Experiment N-I5-P1-C3-QM.....	12
A.6	Experiment N-I5-P1-C3-QA	15
A.7	Experiment N-I3-P1-C3-QM.....	18
A.8	Experiment N-I3-P4-C3-QM.....	22
A.9	Experiment N-I5-P4-C3-QB	24
A.10	Experiment N-I5-P4-C3-QM.....	27
A.11	Experiment N-I5-P4-C3-QA	30
A.12	Experiment N-I5-P4-C6-QB	33
B	Codi de Matlab	37
B.1	Generació de la matriu.....	37
B.2	Càlcul i anàlisi de l'àrea	38
B.3	Càlcul i anàlisi de la simetria de l'àrea.....	40
C	Mesures realitzades amb el teslàmetre.....	42
D	Susceptibilitat magnètica.....	43

A Evolució dels experiments

En aquest annex s'hi mostra 12 subapartats, un per cadascun dels experiments. Per facilitar la comprensió i visualització dels experiments s'adjunten 11 imatges captades al llarg de cadascun d'aquests.

A.1 Experiment NS-I5-P1-C3-QB

A continuació, es mostra les fotografies de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB, el qual s'ha realitzat amb els paràmetres de la taula A.1.1

Taula A.1.1 Paràmetres utilitzats a l'experiment NS-I5-P1-C3-QB

Experiment	Orientació	Imant (mm)	Diàmetre de les partícules (μm)	Costat del capil·lar (μm)	Cabal (ml/min)
NS-I5-P1-C3-QB	N-S (lateral)	5	1.14	300	0.03

A la següent taula, es mostra un resum de la informació rellevant de les imatges mostrades en aquest apartat, per poder conèixer el temps i el volum transcorregut d'experiment.

Taula A.1.2 Resum de les diferents imatges adjuntades de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB.

Numero de fotografia	Temps real (s)	Temps adimensional	Volum aproximat (ml)	Figura
1	2	$4.47 \cdot 10^1$	0.00	A.1.1
100	200	$4.47 \cdot 10^3$	0.10	A.1.2
200	400	$8.95 \cdot 10^3$	0.20	A.1.3
300	600	$1.34 \cdot 10^4$	0.30	A.1.4
400	800	$1.79 \cdot 10^4$	0.40	A.1.5
500	1000	$2.24 \cdot 10^4$	0.50	A.1.6
600	1200	$2.68 \cdot 10^4$	0.60	A.1.7
700	1400	$3.13 \cdot 10^4$	0.70	A.1.8
800	1600	$3.58 \cdot 10^4$	0.80	A.1.9
900	1800	$4.03 \cdot 10^4$	0.90	A.1.10
999	1998	$4.47 \cdot 10^4$	1.00	A.1.11

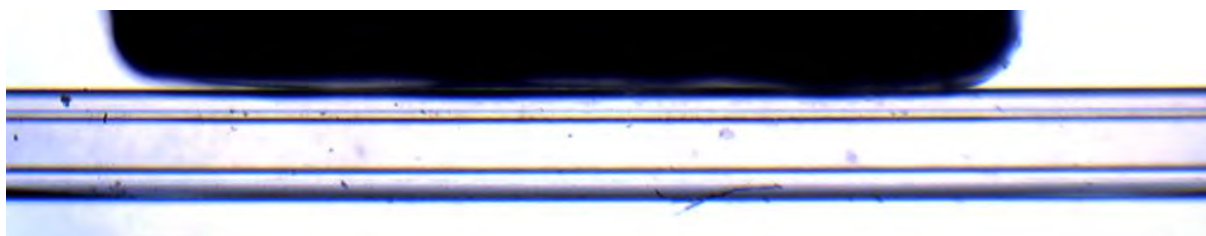


Figura A.1.1 Fotografia 1 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB.

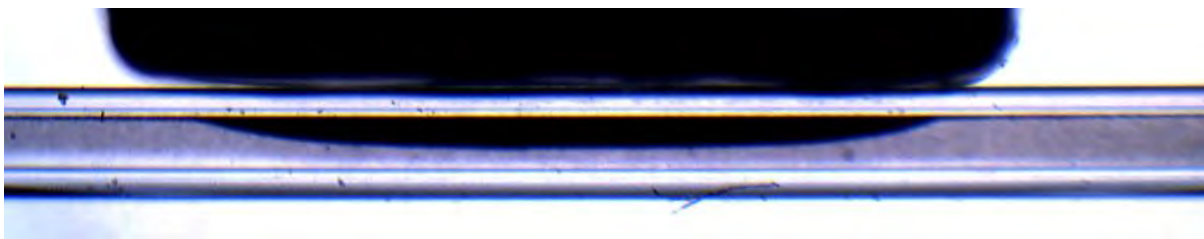


Figura A.1.2 Fotografia 2 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB.



Figura A.1.3 Fotografia 3 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB.



Figura A.1.4 Fotografia 4 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB.

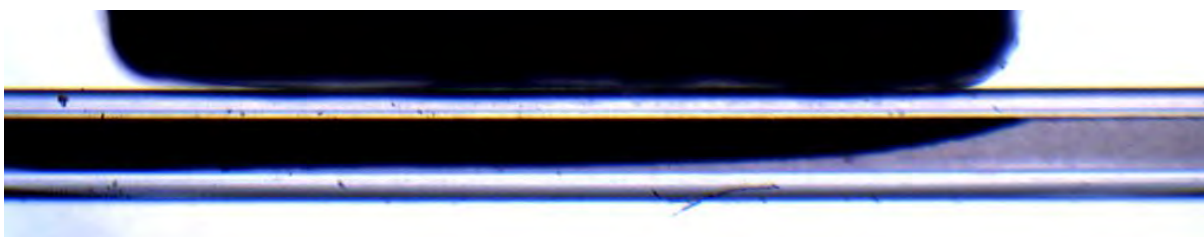


Figura A.1.5 Fotografia 5 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB.



Figura A.1.6 Fotografia 6 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB.



Figura A.1.7 Fotografia 7 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB.



Figura A.1.8 Fotografia 8 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB.



Figura A.1.9 Fotografia 9 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB.

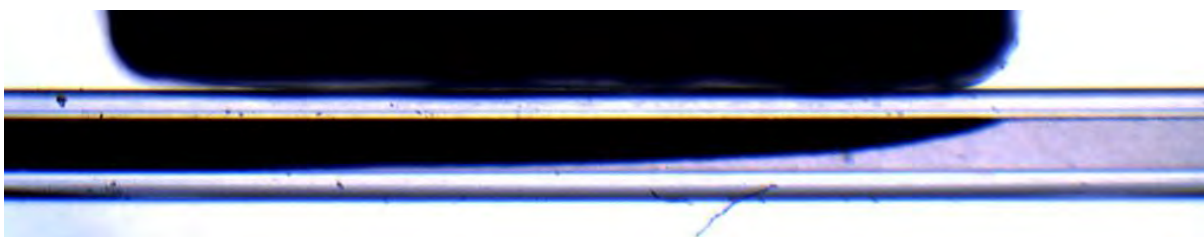


Figura A.1.10 Fotografia 10 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB.

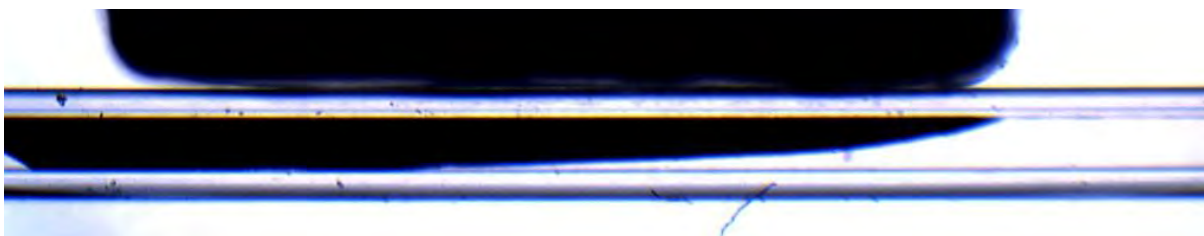


Figura A.1.11 Fotografia 11 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QB.

A.2 Experiment NS-I5-P1-C3-QM

Els diferents paràmetres utilitzats per a l'hora de realitzar l'experiment NS-I5-P1-C3-QM es mostren a la taula A.2.1.

Taula A.2.1 Paràmetres utilitzats a l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.

Experiment	Orientació	Imant (mm)	Diàmetre de les partícules (μm)	Costat del capil·lar (μm)	Cabal (ml/min)
NS-I5-P1-C3-QM	N-S (lateral)	5	1.14	300	0.06

La taula A.2.2, permet conèixer la diferent informació sobre les fotografies escollides de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.

Taula A.2.2 Resum de les diferents imatges adjuntades de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.

Numero de fotografia	Temps real (s)	Temps adimensional	Volum aproximat (ml)	Figura
1	1	$4.47 \cdot 10^1$	0.00	A.2.1
100	100	$4.47 \cdot 10^3$	0.10	A.2.2
200	200	$8.95 \cdot 10^3$	0.20	A.2.3
300	300	$1.34 \cdot 10^4$	0.30	A.2.4
400	400	$1.79 \cdot 10^4$	0.40	A.2.5
500	500	$2.24 \cdot 10^4$	0.50	A.2.6
600	600	$2.68 \cdot 10^4$	0.60	A.2.7
700	700	$3.13 \cdot 10^4$	0.70	A.2.8
800	800	$3.58 \cdot 10^4$	0.80	A.2.9
900	900	$4.03 \cdot 10^4$	0.90	A.2.10
999	999	$4.47 \cdot 10^4$	1.00	A.2.11

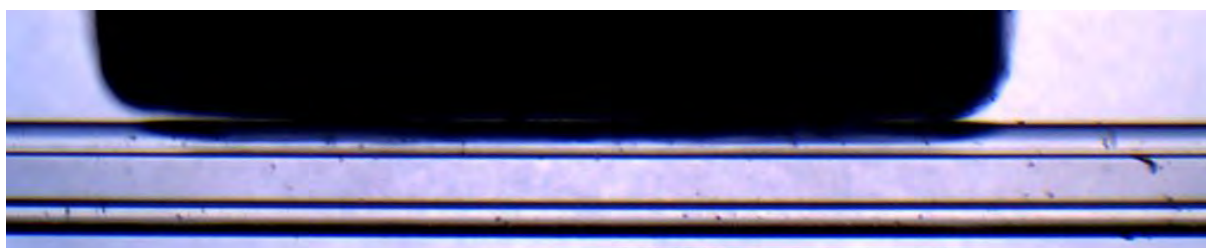


Figura A.2.1 Fotografia 1 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.



Figura A.2.2 Fotografia 2 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.



Figura A.2.3 Fotografia 3 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.



Figura A.2.4 Fotografia 4 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.

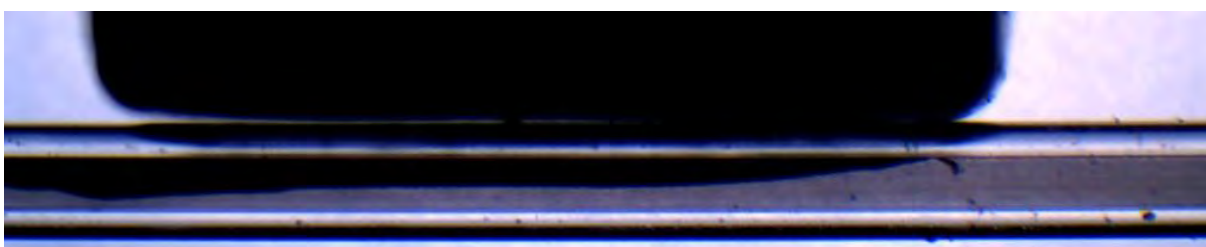


Figura A.2.5 Fotografia 5 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.



Figura A.2.6 Fotografia 6 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.



Figura A.2.7 Fotografia 7 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.



Figura A.2.8 Fotografia 8 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.



Figura A.2.9 Fotografia 9 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.



Figura A.2.10 Fotografia 10 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.



Figura A.2.11 Fotografia 11 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QM.

A.3 Experiment NS-I5-P1-C3-QA

A continuació, es mostra una taula amb els paràmetres utilitzats per l'últim experiment amb l'imant orientat lateralment

Taula A.3.1 Paràmetres utilitzats a l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

Experiment	Orientació	Imant (mm)	Diàmetre de les partícules (μm)	Costat del capil·lar (μm)	Cabal (ml/min)
NS-I5-P1-C3-QA	N-S (lateral)	5	1.14	300	0.12

En aquest cas al tenir un cabal més gran les fotografies s'han realitzat en períodes de temps més curts, això es pot observar a la taula A.3.2.

Taula A.3.2 Resum de les diferents imatges adjuntades de l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

Numero de fotografia	Temps real (s)	Temps adimensional	Volum aproximat (ml)	Figura
1	0.5	$4.47 \cdot 10^1$	0.00	A.3.1
100	50	$4.47 \cdot 10^3$	0.10	A.3.2
200	100	$8.95 \cdot 10^3$	0.20	A.3.3
300	150	$1.34 \cdot 10^4$	0.30	A.3.4
400	200	$1.79 \cdot 10^4$	0.40	A.3.5
500	250	$2.24 \cdot 10^4$	0.50	A.3.6
600	300	$2.68 \cdot 10^4$	0.60	A.3.7
700	350	$3.13 \cdot 10^4$	0.70	A.3.8
800	400	$3.58 \cdot 10^4$	0.80	A.3.9
900	450	$4.03 \cdot 10^4$	0.90	A.3.10
999	500	$4.47 \cdot 10^4$	1.00	A.3.11

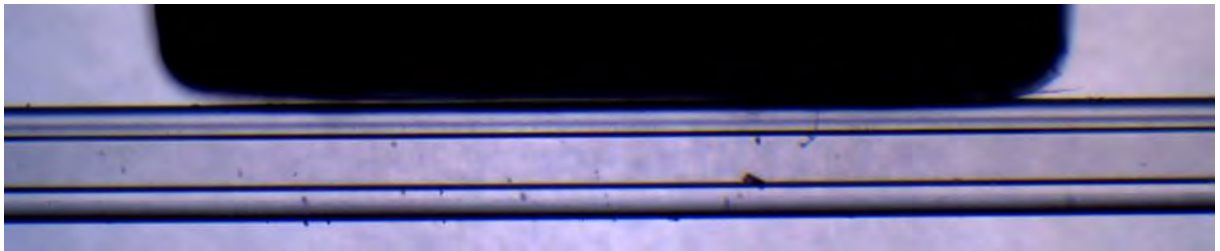


Figura A.3.1 Fotografia 1 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

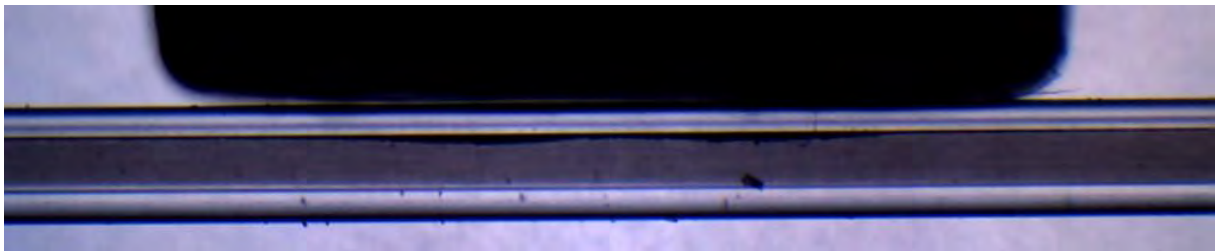


Figura A.3.2 Fotografia 2 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

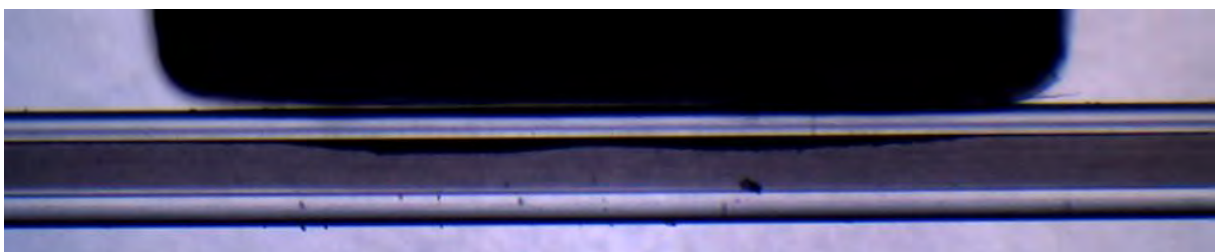


Figura A.3.3 Fotografia 3 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

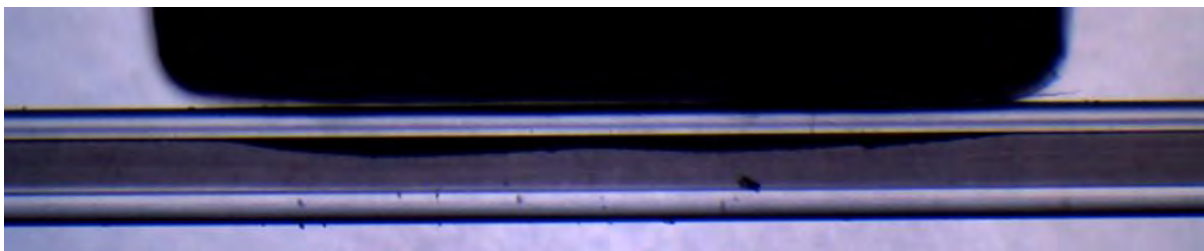


Figura A.3.4 Fotografia 4 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

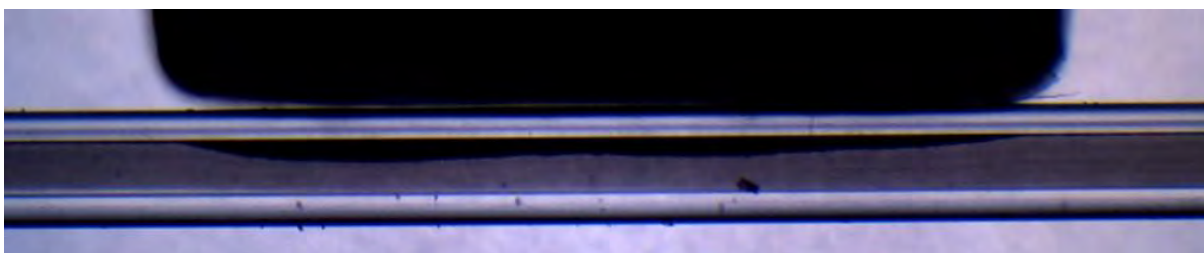


Figura A.3.5 Fotografia 5 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

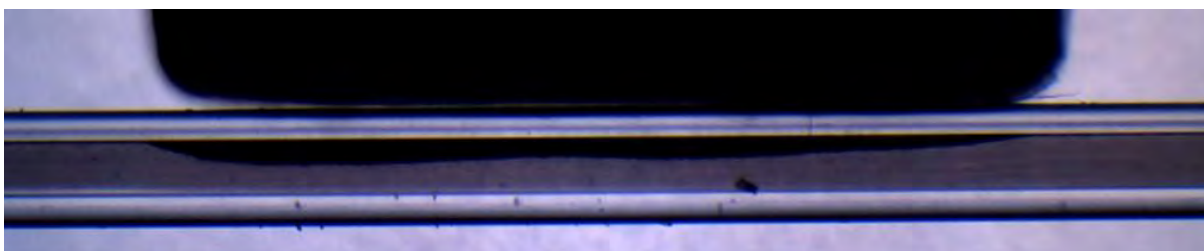


Figura A.3.6 Fotografia 6 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

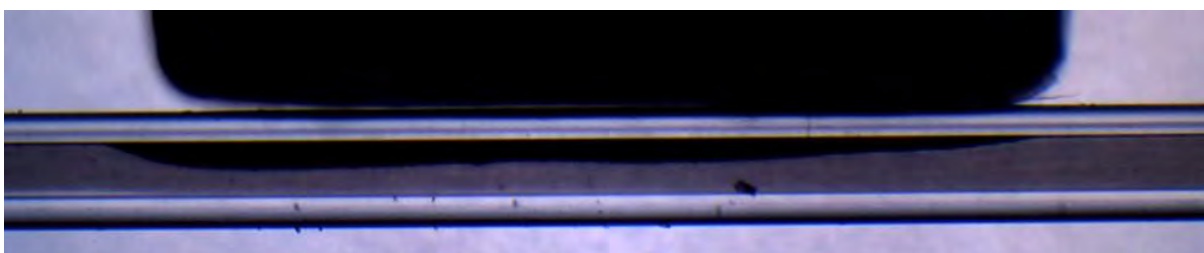


Figura A.3.7 Fotografia 7 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

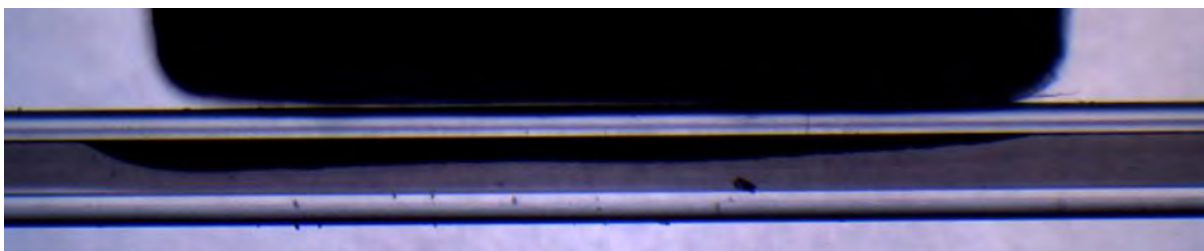


Figura A.3.8 Fotografia 8 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

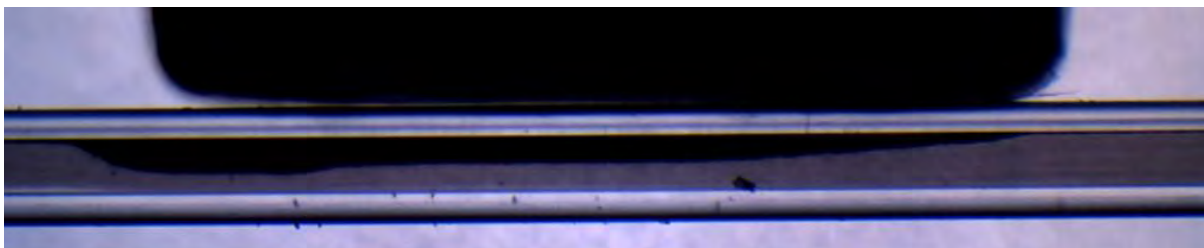


Figura A.3.9 Fotografia 9 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

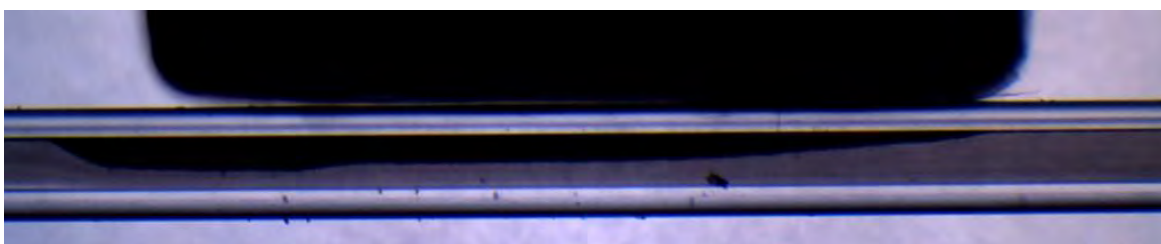


Figura A.3.10 Fotografia 10 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

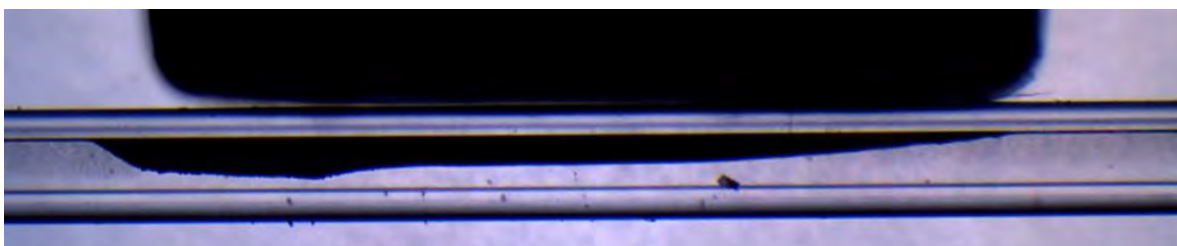


Figura A.3.11 Fotografia 11 de l'experiment NS-I5-P1-C3-QA.

A.4 Experiment N-I5-P1-C3-QB

Les variables utilitzades per realitzar aquest experiment es poden observar a la taula A.4.1.

Taula A.4.1 Paràmetres utilitzats a l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

Experiment	Orientació	Imant (mm)	Diàmetre de les partícules (μm)	Costat del capil·lar (μm)	Cabal (ml/min)
N-I5-P1-C3-QB	Nord	5	1.14	300	0.03

Per interpretar millor les fotografies, a la taula A.4.2, es comenta la diferent informació rellevant d'aquestes.

Taula A.4.2 Resum de les diferents imatges adjuntades de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

Numero de fotografia	Temps real (s)	Temps adimensional	Volum aproximat (ml)	Figura
1	2	$4.47 \cdot 10^1$	0.00	A.4.1
100	200	$4.47 \cdot 10^3$	0.10	A.4.2
200	400	$8.95 \cdot 10^3$	0.20	A.4.3
300	600	$1.34 \cdot 10^4$	0.30	A.4.4
400	800	$1.79 \cdot 10^4$	0.40	A.4.5
500	1000	$2.24 \cdot 10^4$	0.50	A.4.6
600	1200	$2.68 \cdot 10^4$	0.60	A.4.7
700	1400	$3.13 \cdot 10^4$	0.70	A.4.8
800	1600	$3.58 \cdot 10^4$	0.80	A.4.9
900	1800	$4.03 \cdot 10^4$	0.90	A.4.10
999	1998	$4.47 \cdot 10^4$	1.00	A.4.11

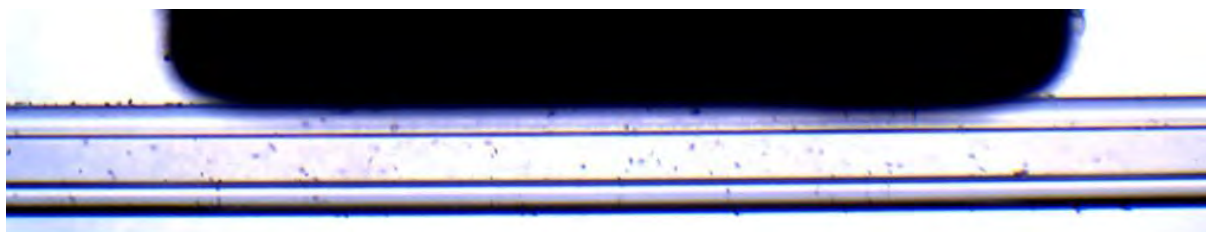


Figura A.4.1 Fotografia 1 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

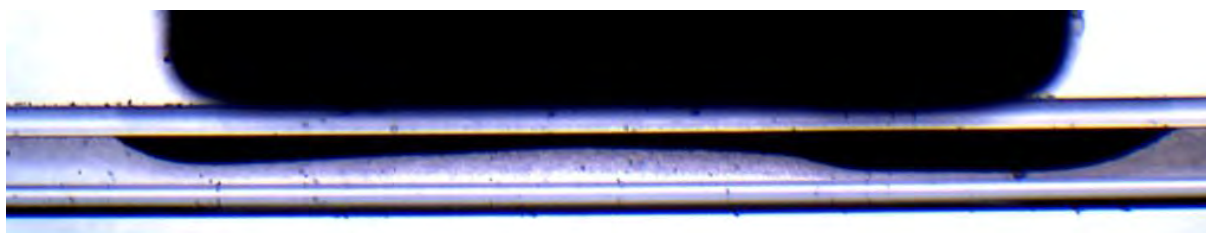


Figura A.4.2 Fotografia 2 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

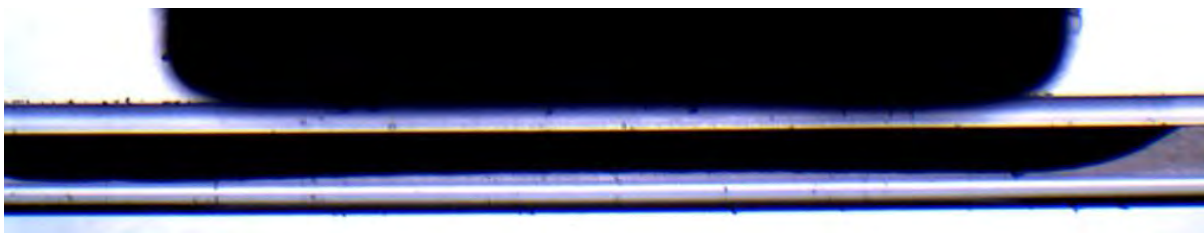


Figura A.4.3 Fotografia 3 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

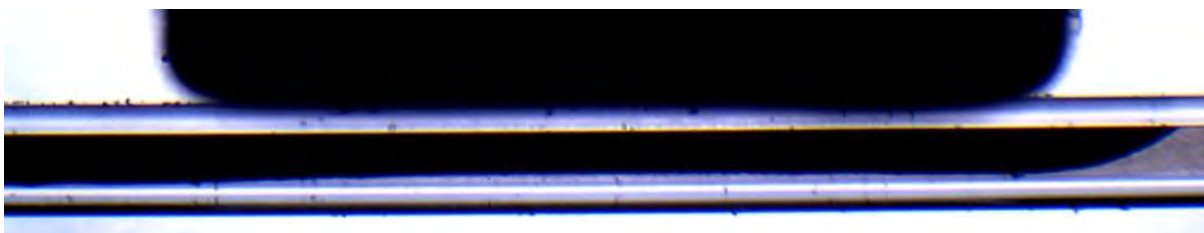


Figura A.4.4 Fotografia 4 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

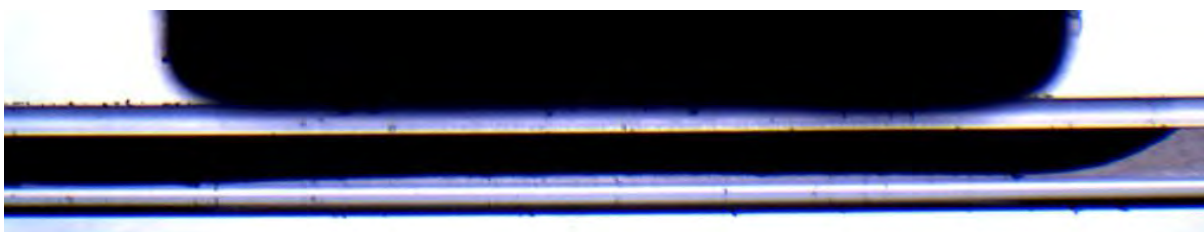


Figura A.4.5 Fotografia 5 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.



Figura A.4.6 Fotografia 6 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.



Figura A.4.7 Fotografia 7 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

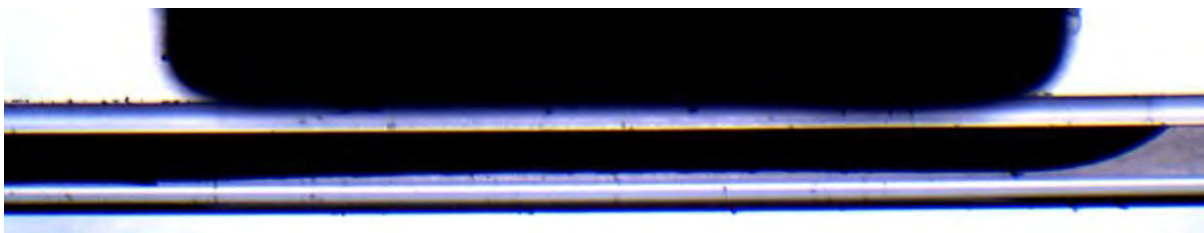


Figura A.4.8 Fotografia 8 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

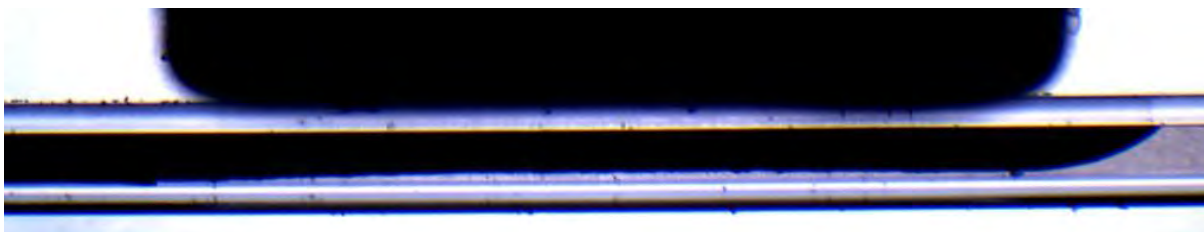


Figura A.4.9 Fotografia 9 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

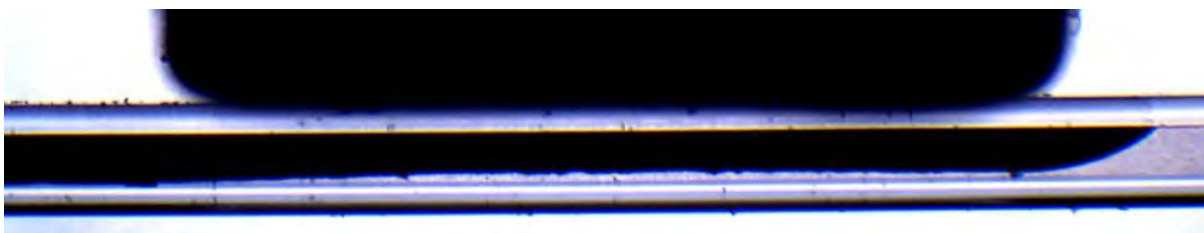


Figura A.4.10 Fotografia 10 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

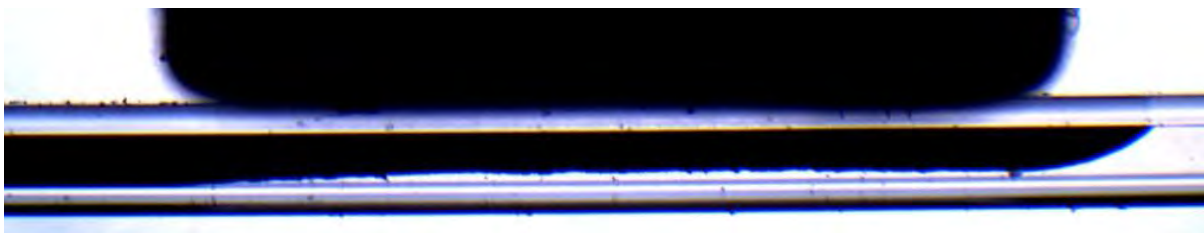


Figura A.4.11 Fotografia 11 de l'experiment N-I5-P1-C3-QB.

A.5 Experiment N-I5-P1-C3-QM

A la taula A.5.1 es mostra els paràmetres utilitzats per realitzar l'experiment N-I5-P1-C3-QM, es pot observar que en aquest cas s'ha duplicat el cabal utilitzat a l'experiment N-I5-P1-C3-QB i s'han mantingut la resta de variables.

Taula A.5.1 Paràmetres utilitzats a l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

Experiment	Orientació	Imant (mm)	Diàmetre de les partícules (μm)	Costat del capil·lar (μm)	Cabal (ml/min)
N-I5-P1-C3-QM	Nord	5	1.14	300	0.06

A l'altre taula hi apareixent diferents dades de cadascuna de les imatges adjuntades en aquest apartat.

Taula A.5.2 Resum de les diferents imatges adjuntades de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

Numero de fotografia	Temps real (s)	Temps adimensional	Volum aproximat (ml)	Figura
1	1	$4.47 \cdot 10^1$	0.00	A.5.1
100	100	$4.47 \cdot 10^3$	0.10	A.5.2
200	200	$8.95 \cdot 10^3$	0.20	A.5.3
300	300	$1.34 \cdot 10^4$	0.30	A.5.4
400	400	$1.79 \cdot 10^4$	0.40	A.5.5
500	500	$2.24 \cdot 10^4$	0.50	A.5.6
600	600	$2.68 \cdot 10^4$	0.60	A.5.7
700	700	$3.13 \cdot 10^4$	0.70	A.5.8
800	800	$3.58 \cdot 10^4$	0.80	A.5.9
900	900	$4.03 \cdot 10^4$	0.90	A.5.10
999	999	$4.47 \cdot 10^4$	1.00	A.5.11

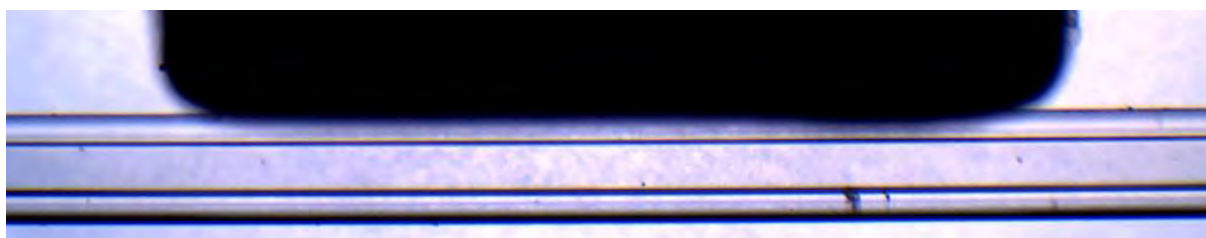


Figura A.5.1 Fotografia 1 de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

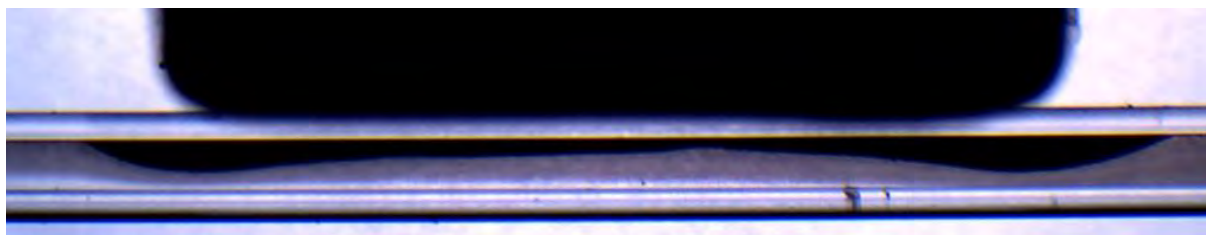


Figura A.5.2 Fotografia 2 de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

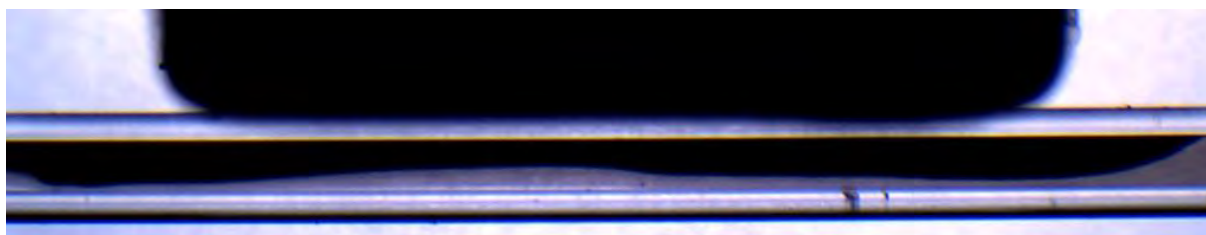


Figura A.5.3 Fotografia 3 de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

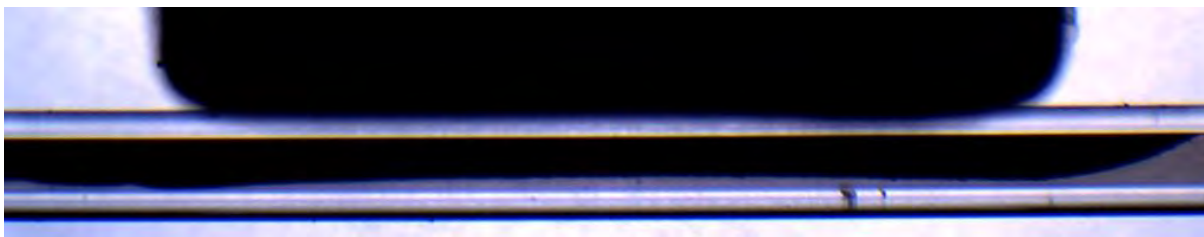


Figura A.5.4 Fotografia 4 de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

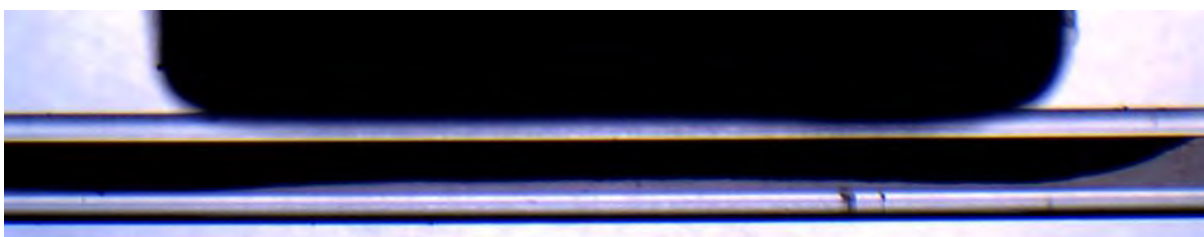


Figura A.5.5 Fotografia 5 de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

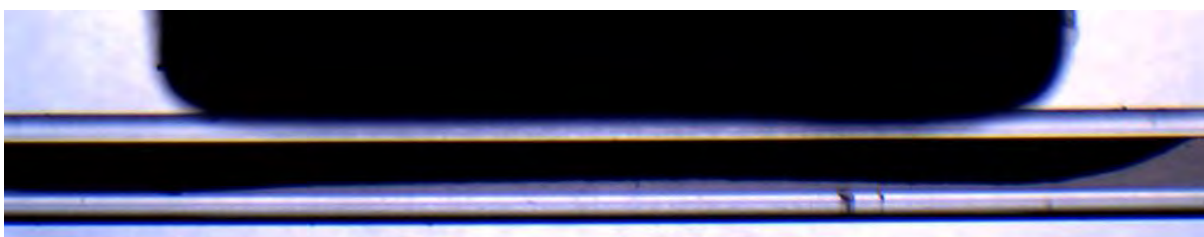


Figura A.5.6 Fotografia 6 de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

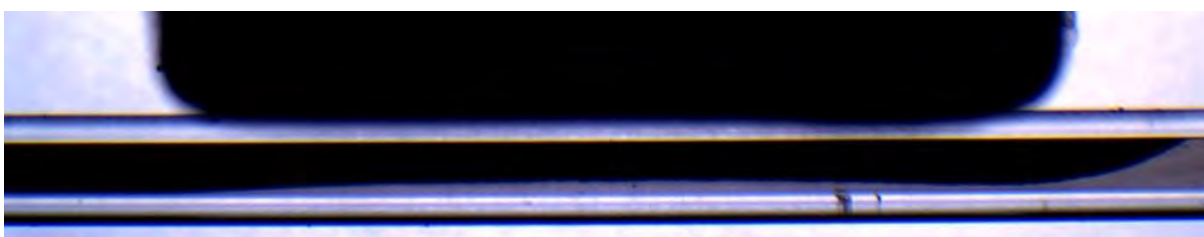


Figura A.5.7 Fotografia 7 de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

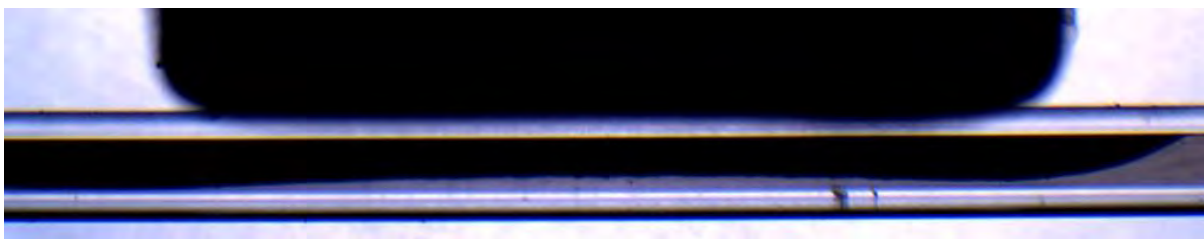


Figura A.5.8 Fotografia 8 de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

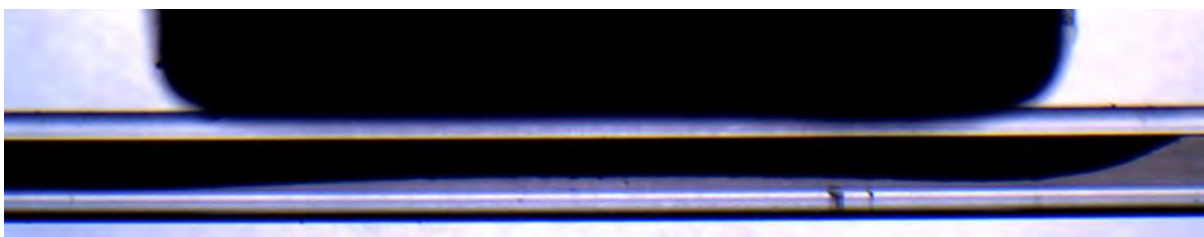


Figura A.5.9 Fotografia 9 de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

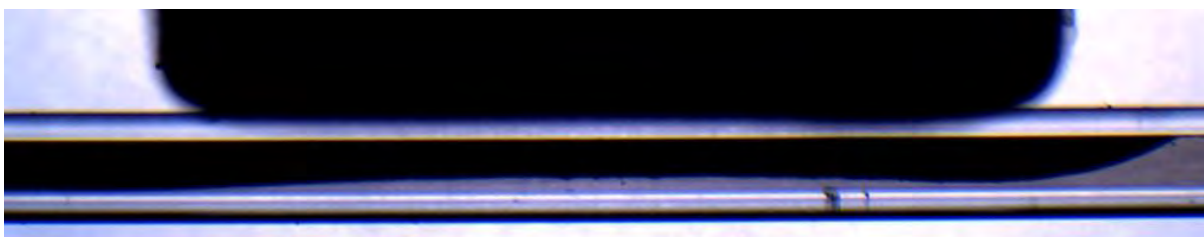


Figura A.5.10 Fotografia 10 de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

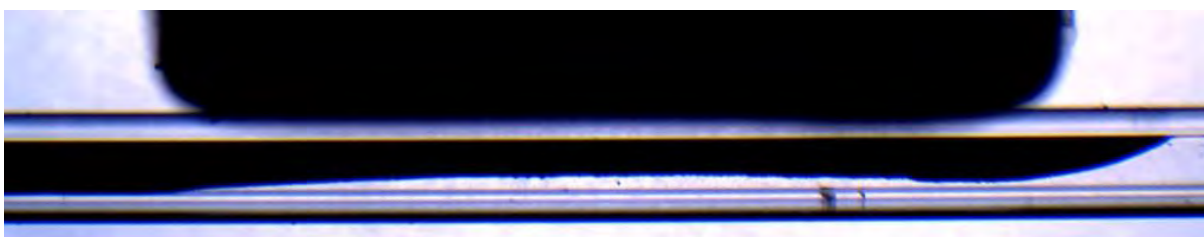


Figura A.5.11 Fotografia 11 de l'experiment N-I5-P1-C3-QM.

A.6 Experiment N-I5-P1-C3-QA

En aquest apartat es mostra les fotografies de l'experiment N-I5-P1-C3-QA, el qual s'ha realitzat amb els paràmetres de la taula A.6.1

Taula A.6.1 Paràmetres utilitzats a l'experiment N-I5-P1-C3-QA.

Experiment	Orientació	Imant (mm)	Diàmetre de les partícules (μm)	Costat del capil·lar (μm)	Cabal (ml/min)
N-I5-P1-C3-QA	Nord	5	1.14	300	0.12

A continuació, es mostra un resum de la informació rellevant de les imatges mostrades en aquest apartat, per tal de conèixer el temps i el volum transcorregut d'experiment.

Taula A.6.2 Resum de les diferents imatges adjuntades de l'experiment N-I5-P1-C3-QA.

Numero de fotografia	Temps real (s)	Temps adimensional	Volum aproximat (ml)	Figura
1	0.5	$4.47 \cdot 10^1$	0.00	A.6.1
100	50	$4.47 \cdot 10^3$	0.10	A.6.2
200	100	$8.95 \cdot 10^3$	0.20	A.6.3
300	150	$1.34 \cdot 10^4$	0.30	A.6.4
400	200	$1.79 \cdot 10^4$	0.40	A.6.5
500	250	$2.24 \cdot 10^4$	0.50	A.6.6
600	300	$2.68 \cdot 10^4$	0.60	A.6.7
700	350	$3.13 \cdot 10^4$	0.70	A.6.8
800	400	$3.58 \cdot 10^4$	0.80	A.6.9
900	450	$4.03 \cdot 10^4$	0.90	A.6.10
999	500	$4.47 \cdot 10^4$	1.00	A.6.11

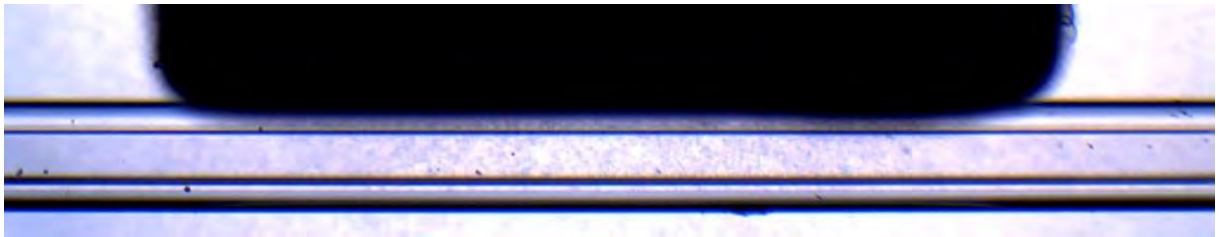


Figura A.6.1 Fotografia 1 de l'experiment N-I5-P1-C3-QA.



Figura A.6.2 Fotografia 2 de l'experiment N-I5-P1-C3-QA.

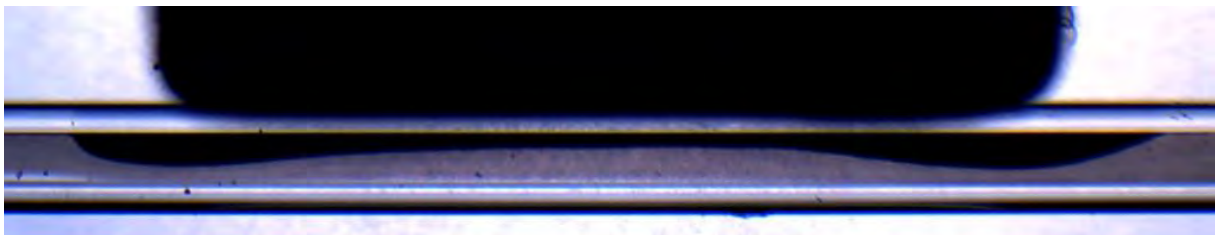


Figura A.6.3 Fotografia 3 de l'experiment N-I5-P1-C3-QA.

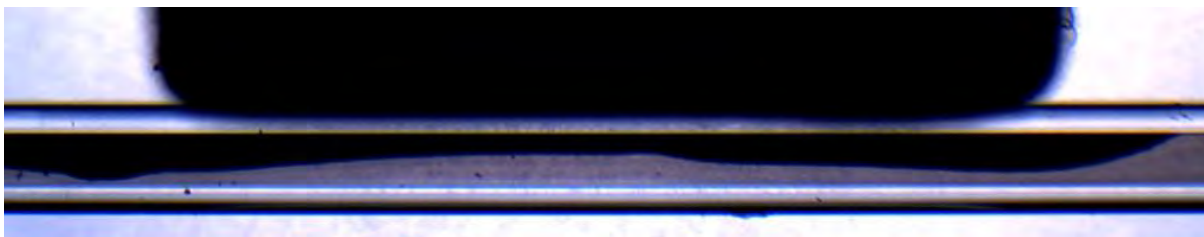


Figura A.6.4 Fotografia 4 de l'experiment N-I5-P1-C3-QA.

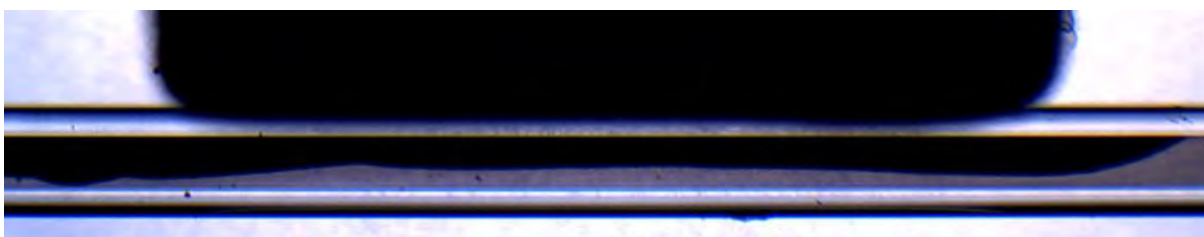


Figura A.6.5 Fotografia 5 de l'experiment N-I5-P1-C3-QA.

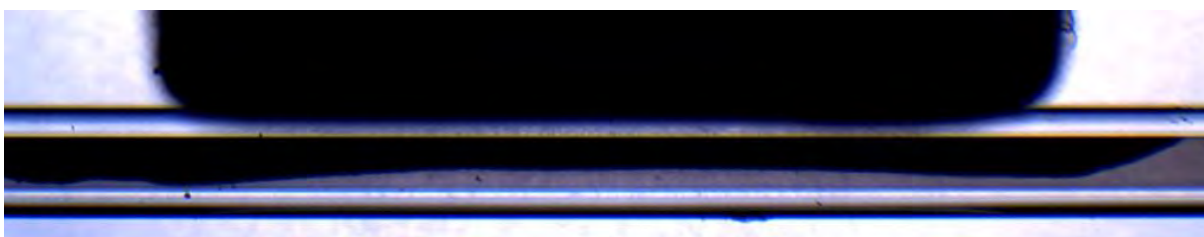


Figura A.6.6 Fotografia 6 de l'experiment N-I5-P1-C3-QA.



Figura A.6.7 Fotografia 7 de l'experiment N-I5-P1-C3-QA.

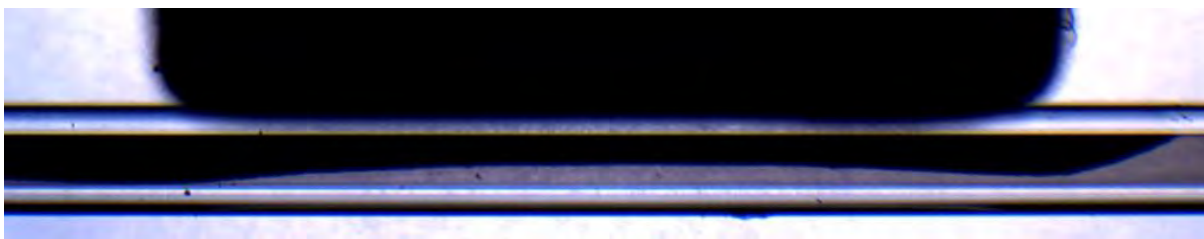


Figura A.6.8 Fotografia 8 de l'experiment N-I5-P1-C3-QA.

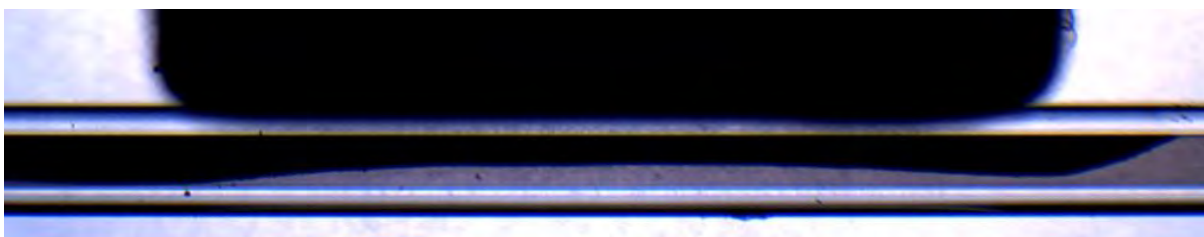


Figura A.6.9 Fotografia 9 de l'experiment N-I5-P1-C3-QA.

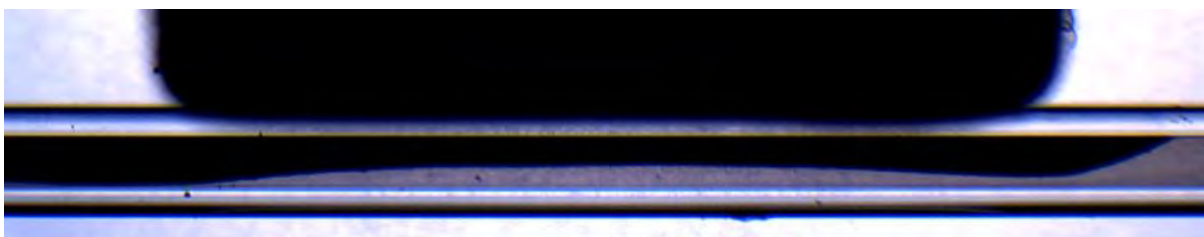


Figura A.6.10 Fotografia 10 de l'experiment N-I5-P1-C3-QA.



Figura A.6.11 Fotografia 11 de l'experiment N-I5-P1-C3-QA.

A.7 Experiment N-I3-P1-C3-QM

Les variables utilitzades per aquest experiment es mostren en la següent taula. La variable més destacable d'aquest experiment, es que s'utilitza un imant de 3 mm.

Taula A.7.1 Paràmetres utilitzats a l'experiment N-I3-P1-C3-QM.

Experiment	Orientació	Imant (mm)	Diàmetre de les partícules (μm)	Costat del capil·lar (μm)	Cabal (ml/min)
N-I3-P1-C3-QM	Nord	3	1.14	300	0.06

A la següent taula, es mostra la informació sobre les diferents fotografies del experiment N-I3-P1-C3-QM.

Taula A.7.2 Resum de les diferents imatges adjuntades de l'experiment N-I3-P1-C3-QM.

Numero de fotografia	Temps real (s)	Temps adimensional	Volum aproximat (ml)	Figura
1	1	$4.47 \cdot 10^1$	0.00	A.7.1
100	100	$4.47 \cdot 10^3$	0.10	A.7.2
200	200	$8.95 \cdot 10^3$	0.20	A.7.3
300	300	$1.34 \cdot 10^4$	0.30	A.7.4
400	400	$1.79 \cdot 10^4$	0.40	A.7.5
500	500	$2.24 \cdot 10^4$	0.50	A.7.6
600	600	$2.68 \cdot 10^4$	0.60	A.7.7
700	700	$3.13 \cdot 10^4$	0.70	A.7.8
800	800	$3.58 \cdot 10^4$	0.80	A.7.9
900	900	$4.03 \cdot 10^4$	0.90	A.7.10
999	999	$4.47 \cdot 10^4$	1.00	A.7.11



Figura A.7.1 Fotografia 1 de l'experiment N-I3-P1-C3-QM.

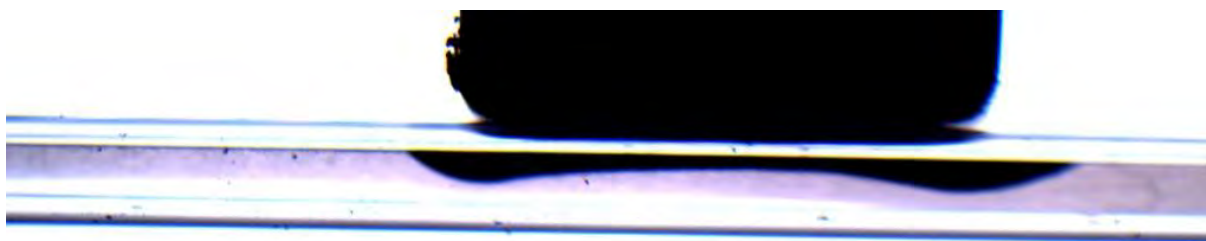


Figura A.7.2 Fotografia 2 de l'experiment N-I3-P1-C3-QM.

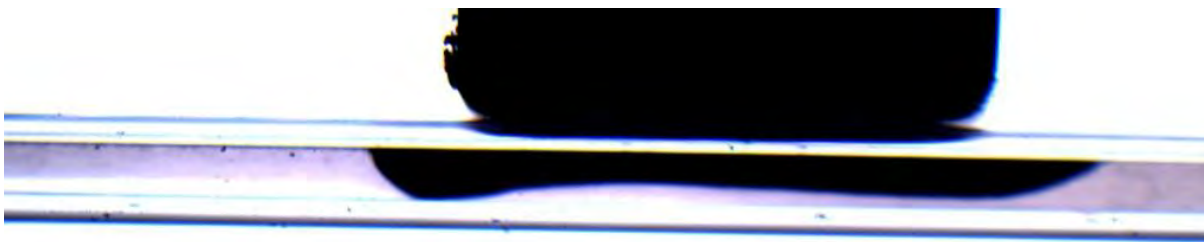


Figura A.7.3 Fotografia 3 de l'experiment N-I3-P1-C3-QM.



Figura A.7.4 Fotografia 4 de l'experiment N-I3-P1-C3-QM.



Figura A.7.5 Fotografia 5 de l'experiment N-I3-P1-C3-QM.

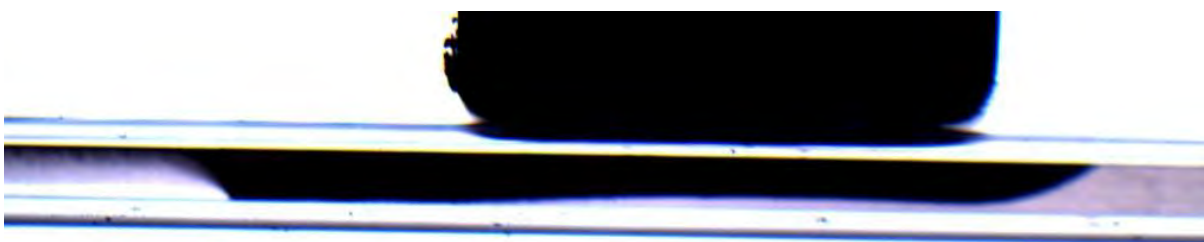


Figura A.7.6 Fotografia 6 de l'experiment N-I3-P1-C3-QM.



Figura A.7.7 Fotografia 7 de l'experiment N-I3-P1-C3-QM.



Figura A.7.8 Fotografia 8 de l'experiment N-I3-P1-C3-QM.



Figura A.7.9 Fotografia 9 de l'experiment N-I3-P1-C3-QM.

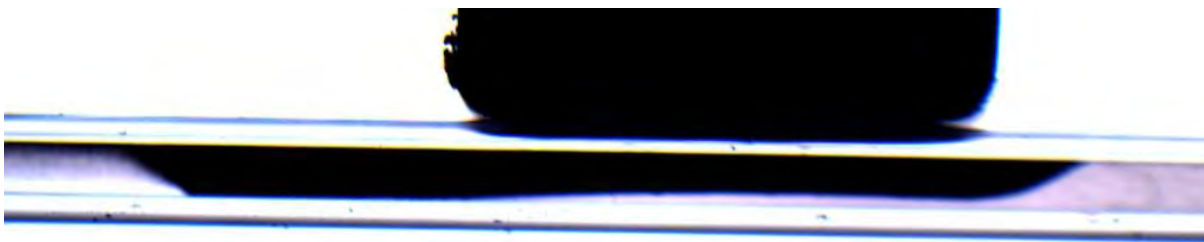


Figura A.7.10 Fotografia 10 de l'experiment N-I3-P1-C3-QM.

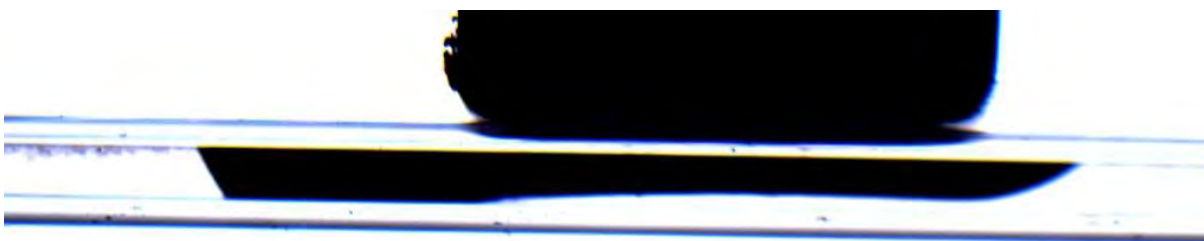


Figura A.7.11 Fotografia 11 de l'experiment N-I3-P1-C3-QM.

A.8 Experiment N-I3-P4-C3-QM

A la taula 8.1 es pot observar que en aquest experiment l'únic que varia respecte a l'anterior és el diàmetre de les partícules.

Taula A.8.1 Paràmetres utilitzats a l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

Experiment	Orientació	Imant (mm)	Diàmetre de les partícules (μm)	Costat del capil·lar (μm)	Cabal (ml/min)
N-I3-P4-C3-QM	Nord	3	4.37	300	0.06

També s'adjunta una taula on s'indica informació de les diferents captures de l'experiment.

Taula A.8.2 Resum de les diferents imatges adjuntades de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

Numero de fotografia	Temps real (s)	Temps adimensional	Volum aproximat (ml)	Figura
1	1	$4.47 \cdot 10^1$	0.00	A.8.1
100	100	$4.47 \cdot 10^3$	0.10	A.8.2
200	200	$8.95 \cdot 10^3$	0.20	A.8.3
300	300	$1.34 \cdot 10^4$	0.30	A.8.4
400	400	$1.79 \cdot 10^4$	0.40	A.8.5
500	500	$2.24 \cdot 10^4$	0.50	A.8.6
600	600	$2.68 \cdot 10^4$	0.60	A.8.7
700	700	$3.13 \cdot 10^4$	0.70	A.8.8
800	800	$3.58 \cdot 10^4$	0.80	A.8.9
900	900	$4.03 \cdot 10^4$	0.90	A.8.10
999	999	$4.47 \cdot 10^4$	1.00	A.8.11

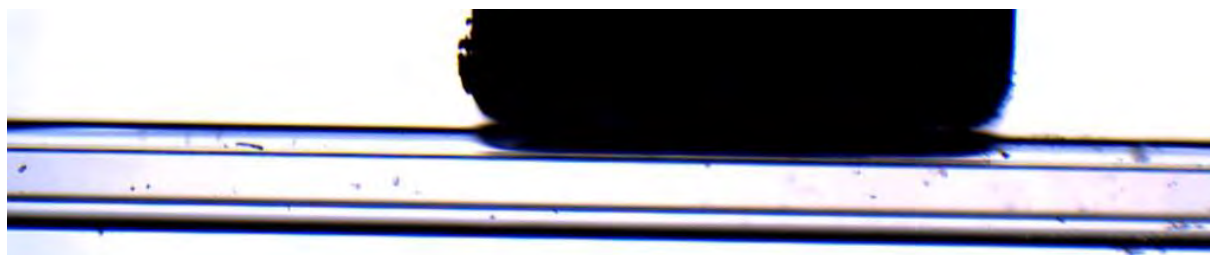


Figura A.8.1 Fotografia 1 de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

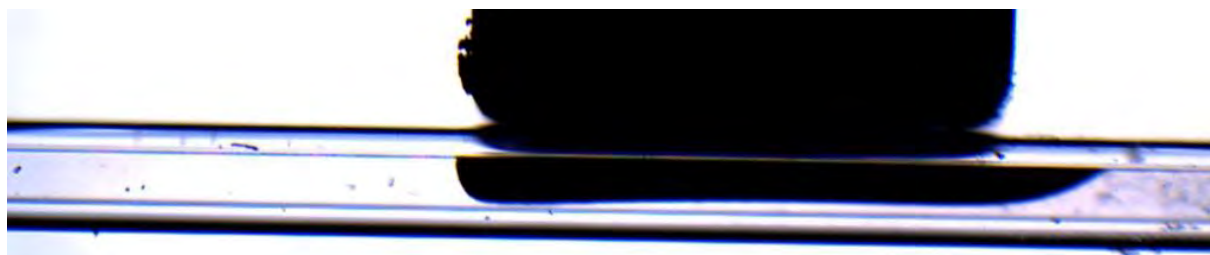


Figura A.8.2 Fotografia 2 de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

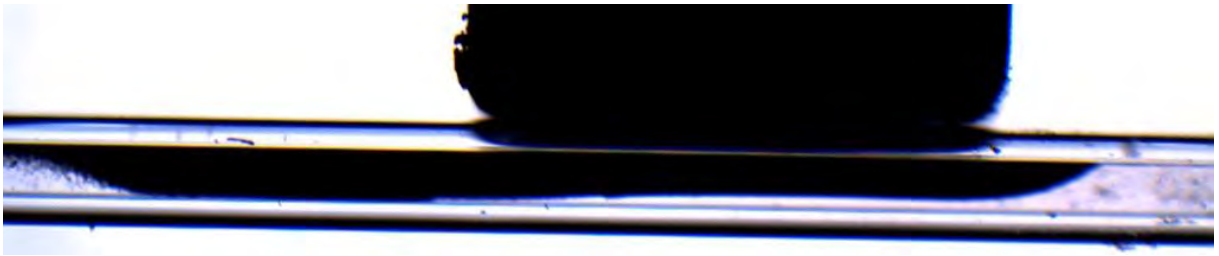


Figura A.8.3 Fotografia 3 de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

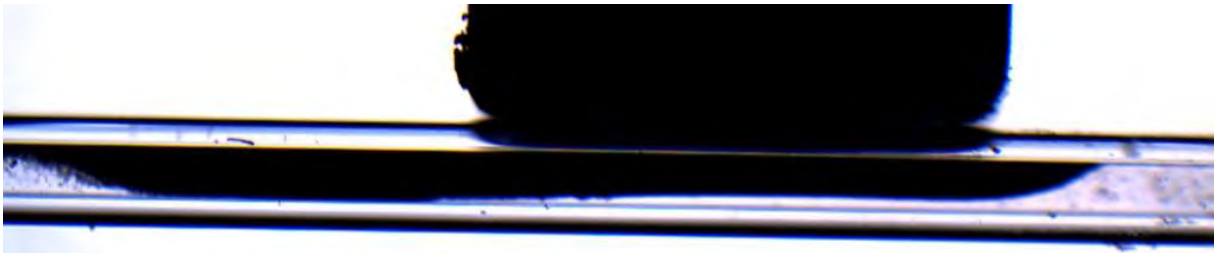


Figura A.8.4 Fotografia 4 de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

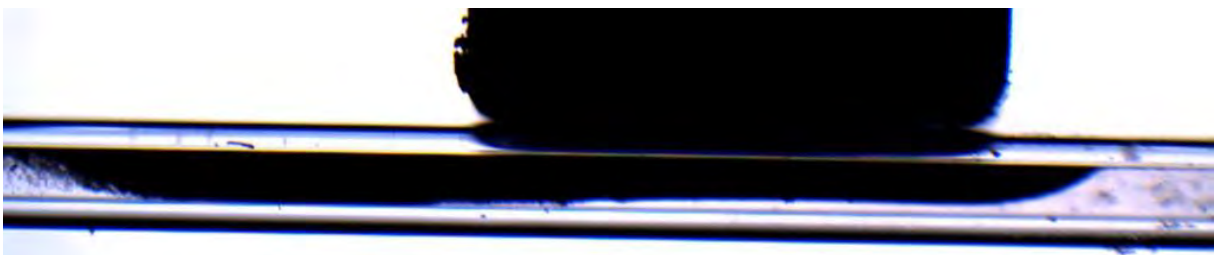


Figura A.8.5 Fotografia 5 de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

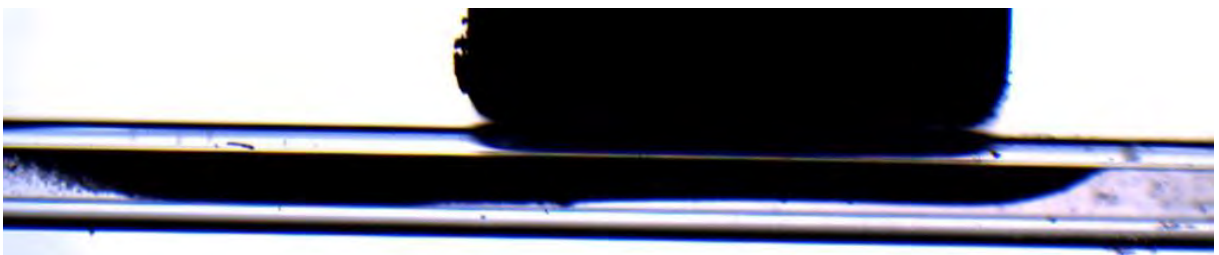


Figura A.8.6 Fotografia 6 de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

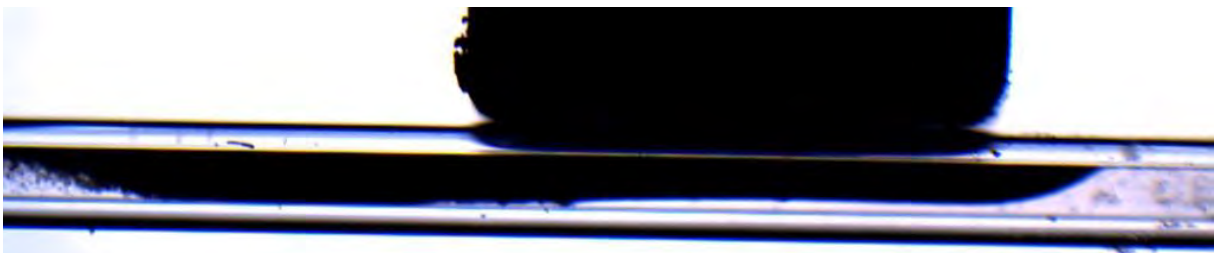


Figura A.8.7 Fotografia 7 de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

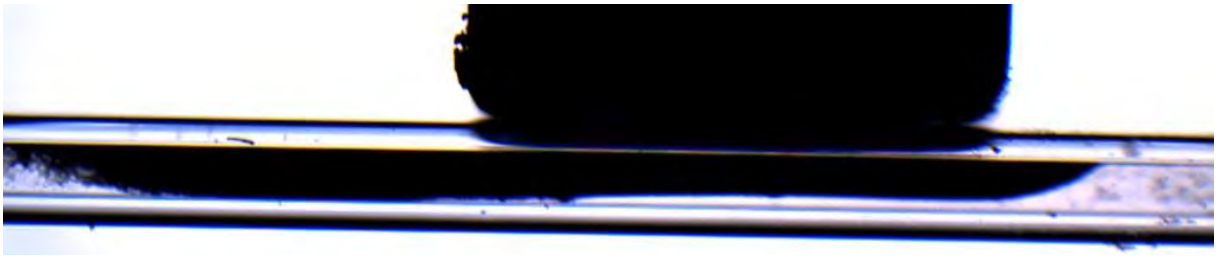


Figura A.8.8 Fotografia 8 de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

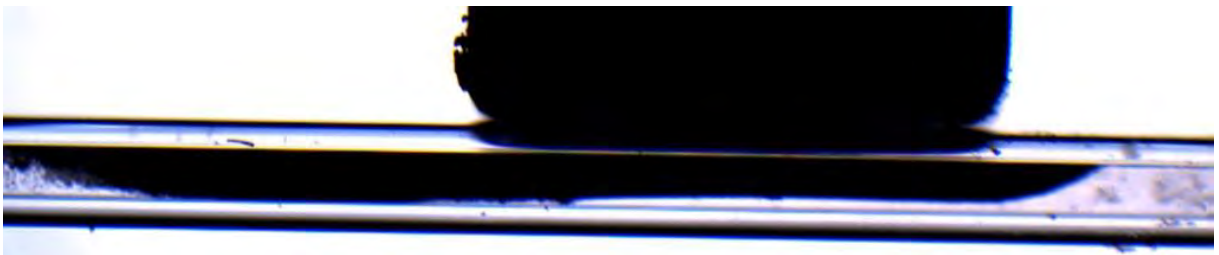


Figura A.8.9 Fotografia 9 de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

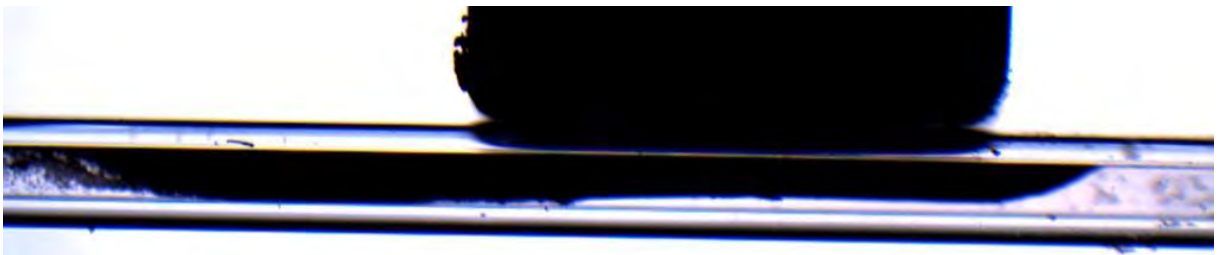


Figura A.8.10 Fotografia 10 de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

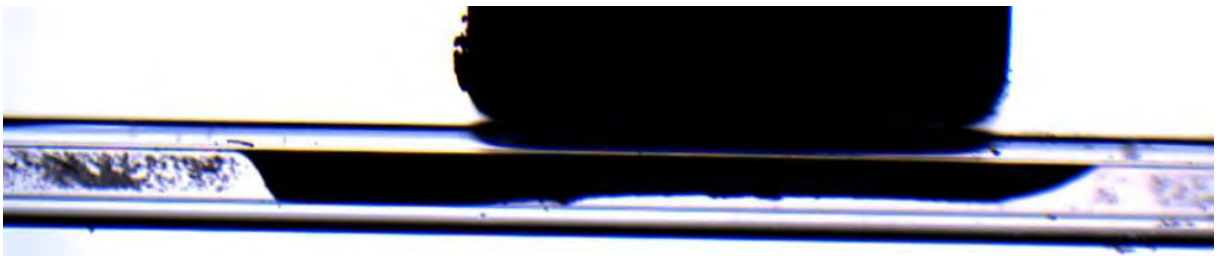


Figura A.8.11 Fotografia 11 de l'experiment N-I3-P4-C3-QM.

A.9 Experiment N-I5-P4-C3-QB

Els paràmetres utilitzats en aquest experiment, els quals es mostren a la taula A.9.1, són com els utilitzats a l'experiment N-I5-P1-C3-QB però usant partícules més grans.

Taula A.9.1 Paràmetres utilitzats a l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

Experiment	Orientació	Imant (mm)	Diàmetre de les partícules (μm)	Costat del capil·lar (μm)	Cabal (ml/min)
N-I5-P4-C3-QB	Nord	5	4.37	300	0.03

A continuació, es mostra una taula amb el numero de cada fotografia i els seus pertinent temps real i adimensional, el volum aproximat i el numero de figura.

Taula A.9.2 Resum de les diferents imatges adjuntades de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

Numero de fotografia	Temps real (s)	Temps adimensional	Volum aproximat (ml)	Figura
1	2	$4.47 \cdot 10^1$	0.00	A.9.1
100	200	$4.47 \cdot 10^3$	0.10	A.9.2
200	400	$8.95 \cdot 10^3$	0.20	A.9.3
300	600	$1.34 \cdot 10^4$	0.30	A.9.4
400	800	$1.79 \cdot 10^4$	0.40	A.9.5
500	1000	$2.24 \cdot 10^4$	0.50	A.9.6
600	1200	$2.68 \cdot 10^4$	0.60	A.9.7
700	1400	$3.13 \cdot 10^4$	0.70	A.9.8
800	1600	$3.58 \cdot 10^4$	0.80	A.9.9
900	1800	$4.03 \cdot 10^4$	0.90	A.9.10
999	1998	$4.47 \cdot 10^4$	1.00	A.9.11

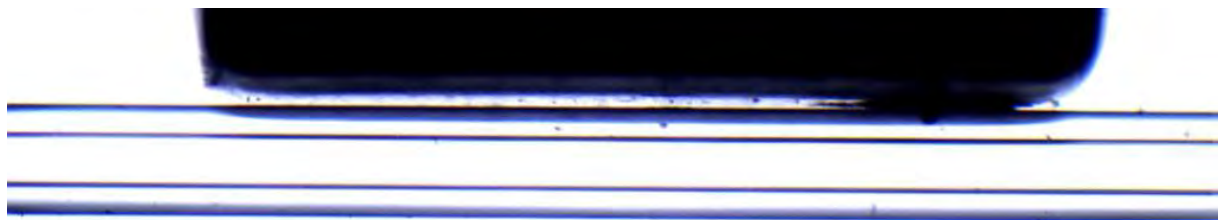


Figura A.9.1 Fotografia 1 de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

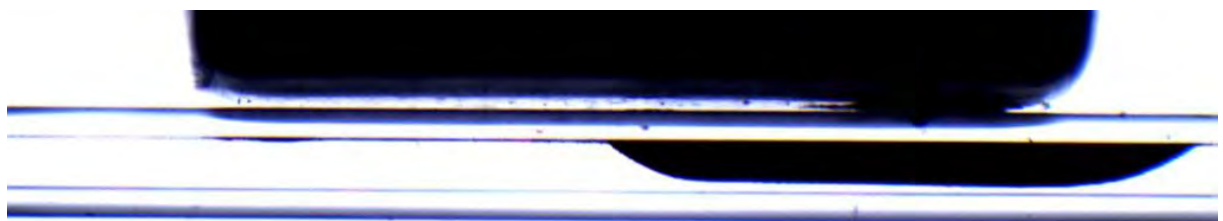


Figura A.9.2 Fotografia 2 de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

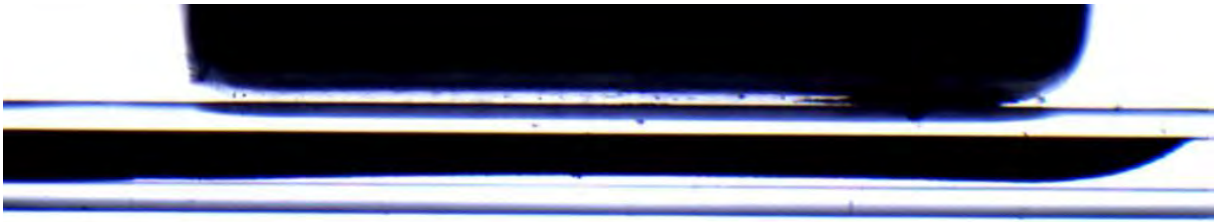


Figura A.9.3 Fotografia 3 de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

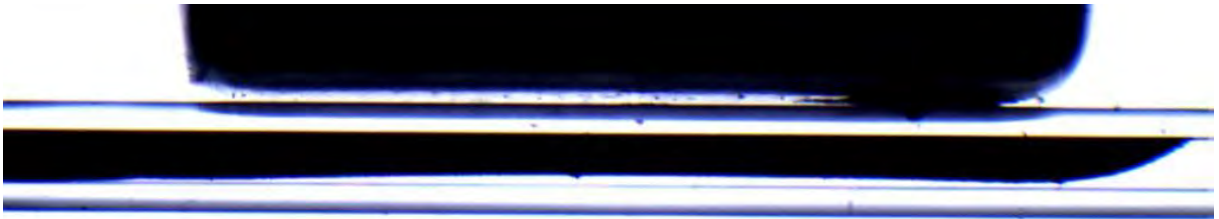


Figura A.9.4 Fotografia 4 de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

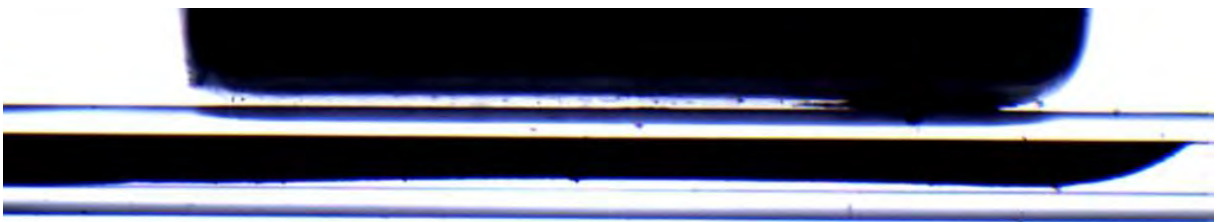


Figura A.9.5 Fotografia 5 de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

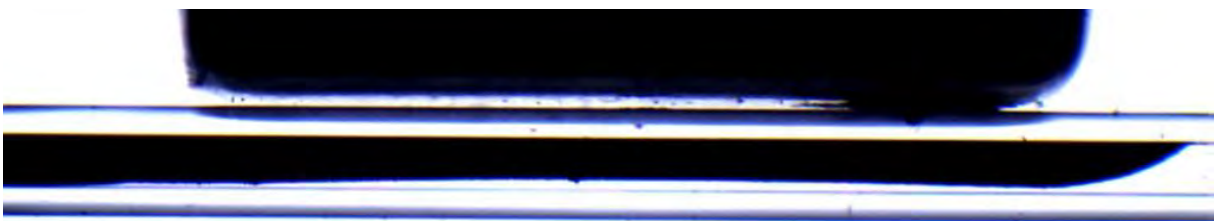


Figura A.9.6 Fotografia 6 de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

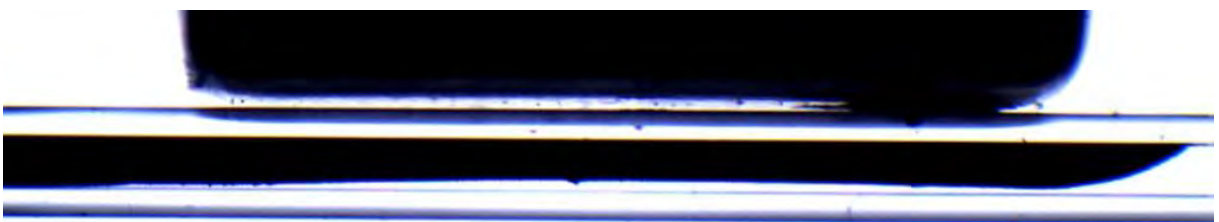


Figura A.9.7 Fotografia 7 de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

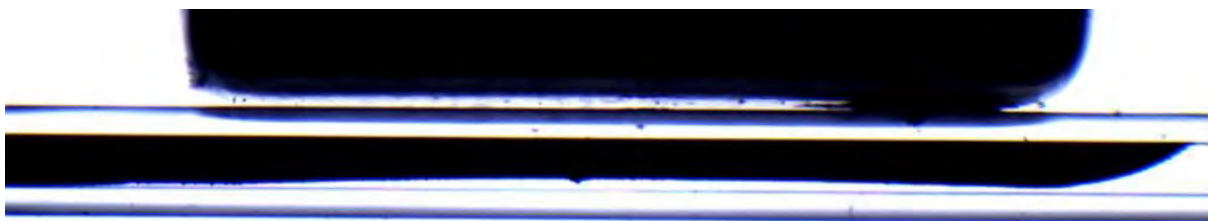


Figura A.9.8 Fotografia 8 de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

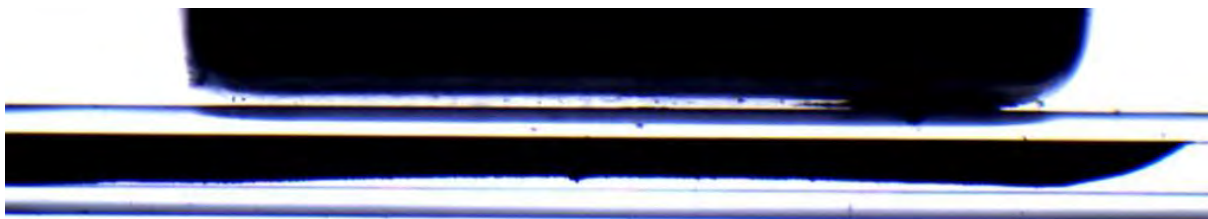


Figura A.9.9 Fotografia 9 de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

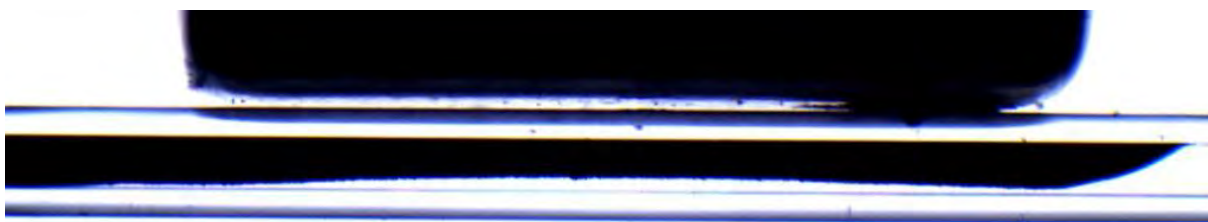


Figura A.9.10 Fotografia 10 de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

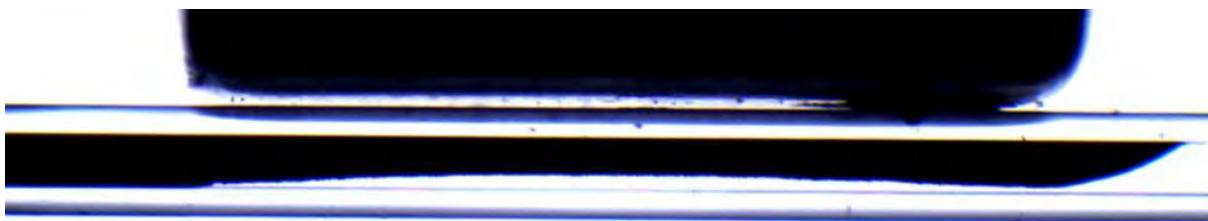


Figura A.9.11 Fotografia 11 de l'experiment N-I5-P4-C3-QB.

A.10 Experiment N-I5-P4-C3-QM

En aquest apartat es mostra les fotografies de l'experiment N-I5-P4-C3-QM, el qual s'ha realitzat amb els paràmetres de la taula A.10.1

Taula A.10.1 Paràmetres utilitzats a l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

Experiment	Orientació	Imant (mm)	Diàmetre de les partícules (μm)	Costat del capil·lar (μm)	Cabal (ml/min)
N-I5-P4-C3-QM	Nord	5	4.37	300	0.06

A l'altre taula hi apareixent diferents dades de cadascuna de les imatges adjuntades en aquest apartat.

Taula A.10.2 Resum de les diferents imatges adjuntades de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

Numero de fotografia	Temps real (s)	Temps adimensional	Volum aproximat (ml)	Figura
1	1	$4.47 \cdot 10^1$	0.00	A.10.1
100	100	$4.47 \cdot 10^3$	0.10	A.10.2
200	200	$8.95 \cdot 10^3$	0.20	A.10.3
300	300	$1.34 \cdot 10^4$	0.30	A.10.4
400	400	$1.79 \cdot 10^4$	0.40	A.10.5
500	500	$2.24 \cdot 10^4$	0.50	A.10.6
600	600	$2.68 \cdot 10^4$	0.60	A.10.7
700	700	$3.13 \cdot 10^4$	0.70	A.10.8
800	800	$3.58 \cdot 10^4$	0.80	A.10.9
900	900	$4.03 \cdot 10^4$	0.90	A.10.10
999	999	$4.47 \cdot 10^4$	1.00	A.10.11



Figura A.10.1 Fotografia 1 de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

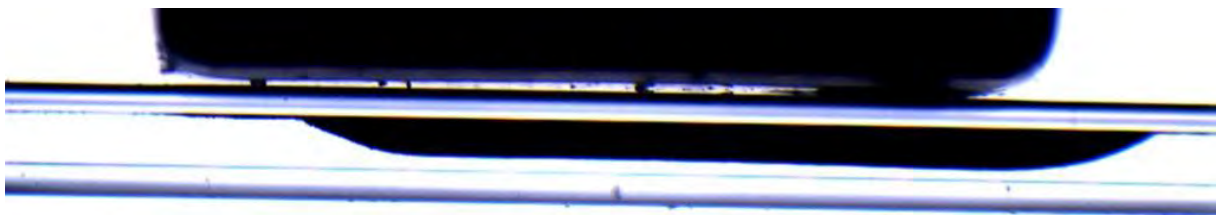


Figura A.10.2 Fotografia 2 de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

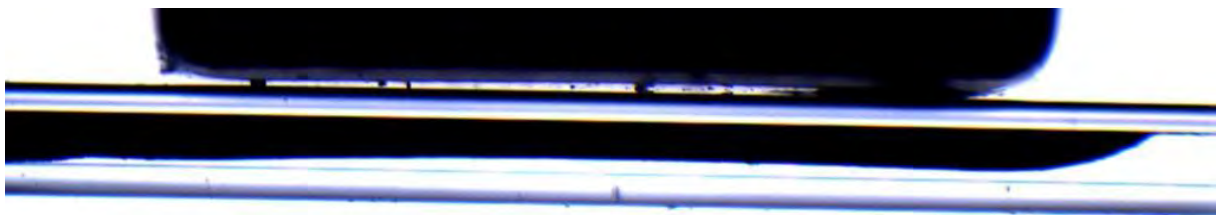


Figura A.10.3 Fotografia 3 de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

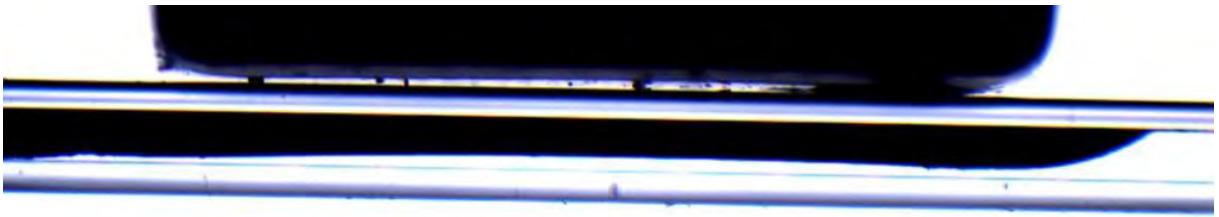


Figura A.10.4 Fotografia 4 de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

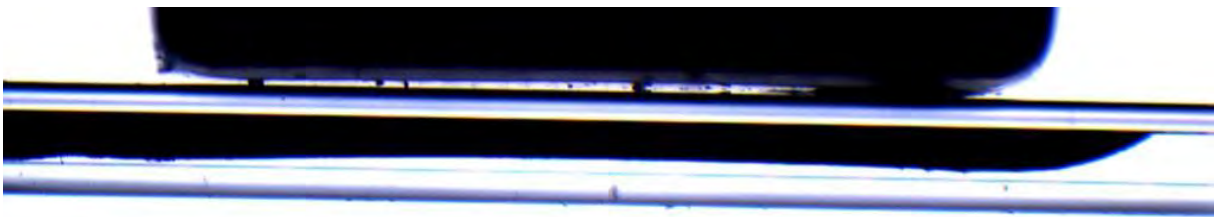


Figura A.10.5 Fotografia 5 de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

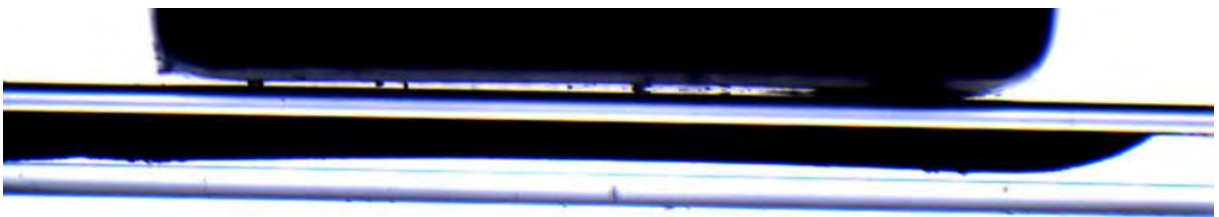


Figura A.10.6 Fotografia 6 de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

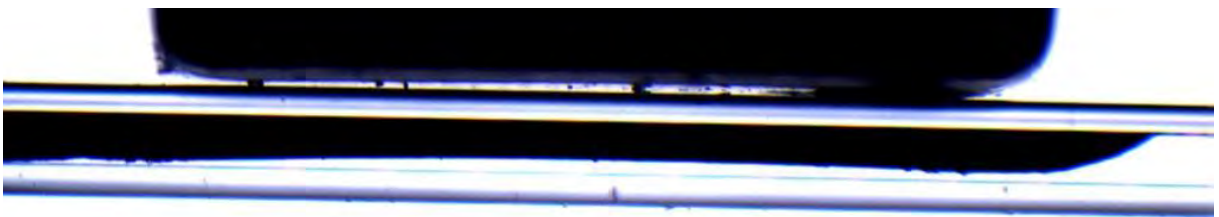


Figura A.10.7 Fotografia 7 de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

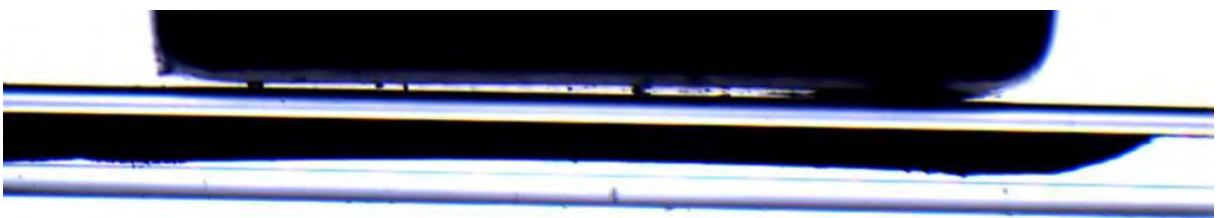


Figura A.10.8 Fotografia 8 de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

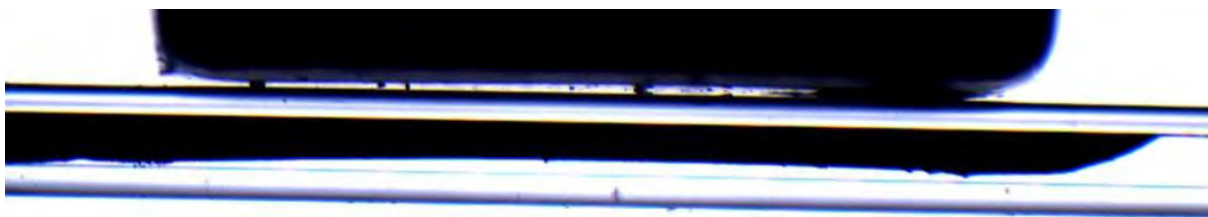


Figura A.10.9 Fotografia 9 de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

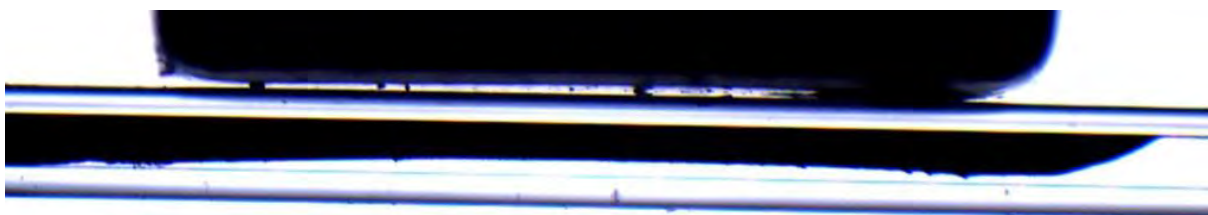


Figura A.10.10 Fotografia 10 de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

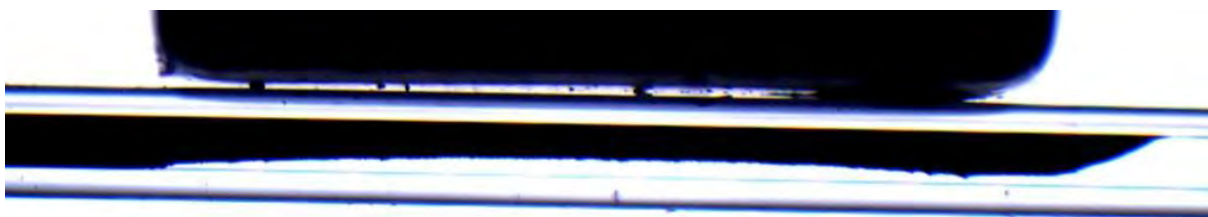


Figura A.10.11 Fotografia 11 de l'experiment N-I5-P4-C3-QM.

A.11 Experiment N-I5-P4-C3-QA

A l'experiment N-I5-P4-C3-QA, es varia el cabal i es manté la resta de variables iguals que els últims dos experiments, això es pot observar a la taula A.11.1.

Taula A.11.1 Paràmetres utilitzats a l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

Experiment	Orientació	Imant (mm)	Diàmetre de les partícules (μm)	Costat del capil·lar (μm)	Cabal (ml/min)
N-I5-P4-C3-QA	Nord	5	4.37	300	0.12

La taula A.2.2, permet conèixer la diferent informació sobre les fotografies escollides de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

Taula A.11.2 Resum de les diferents imatges adjuntades de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

Numero de fotografia	Temps real (s)	Temps adimensional	Volum aproximat (ml)	Figura
1	0.5	$4.47 \cdot 10^1$	0.00	A.11.1
100	50	$4.47 \cdot 10^3$	0.10	A.11.2
200	100	$8.95 \cdot 10^3$	0.20	A.11.3
300	150	$1.34 \cdot 10^4$	0.30	A.11.4
400	200	$1.79 \cdot 10^4$	0.40	A.11.5
500	250	$2.24 \cdot 10^4$	0.50	A.11.6
600	300	$2.68 \cdot 10^4$	0.60	A.11.7
700	350	$3.13 \cdot 10^4$	0.70	A.11.8
800	400	$3.58 \cdot 10^4$	0.80	A.11.9
900	450	$4.03 \cdot 10^4$	0.90	A.11.10
999	500	$4.47 \cdot 10^4$	1.00	A.11.11

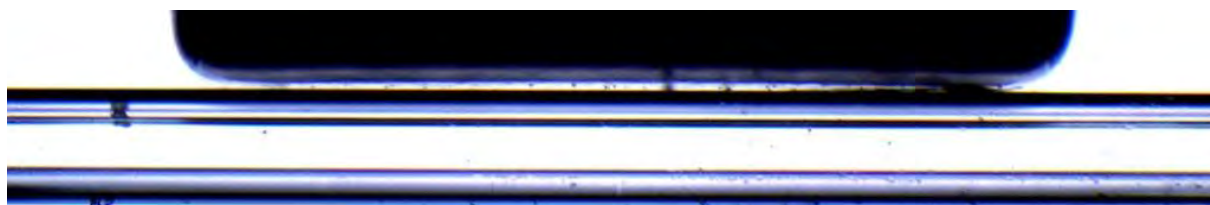


Figura A.11.1 Fotografia 1 de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

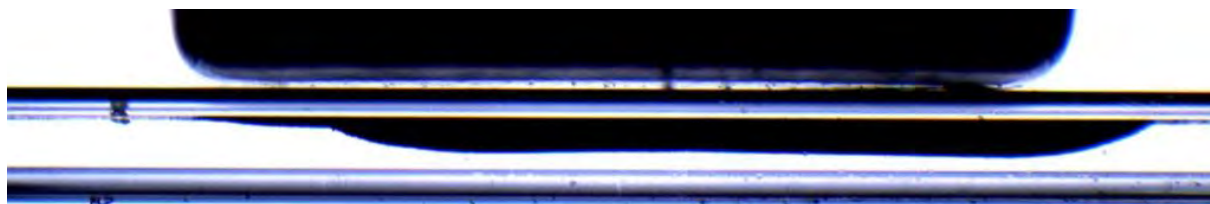


Figura A.11.2 Fotografia 2 de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

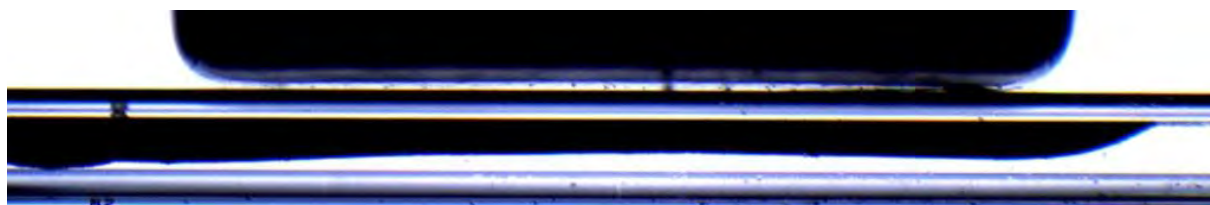


Figura A.11.3 Fotografia 3 de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

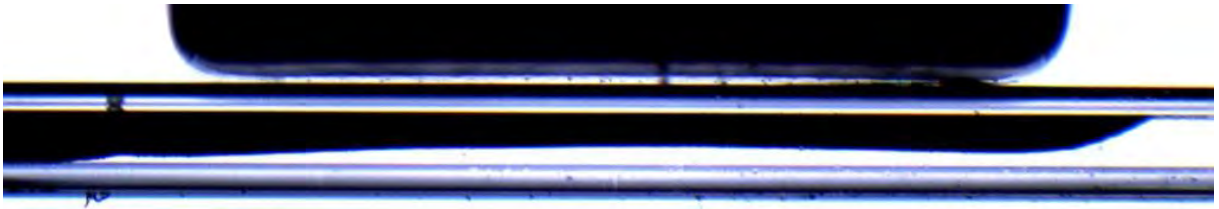


Figura A.11.4 Fotografia 4 de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

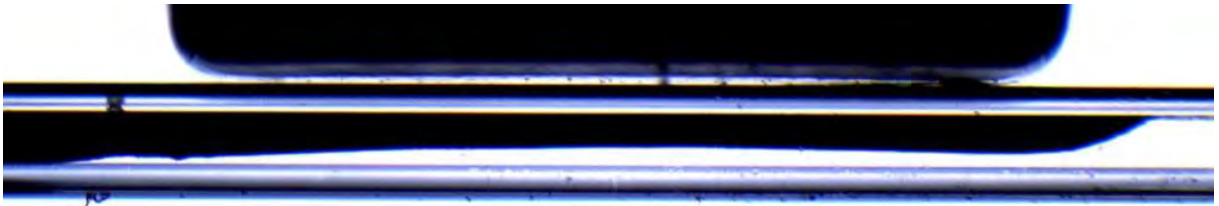


Figura A.11.5 Fotografia 5 de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

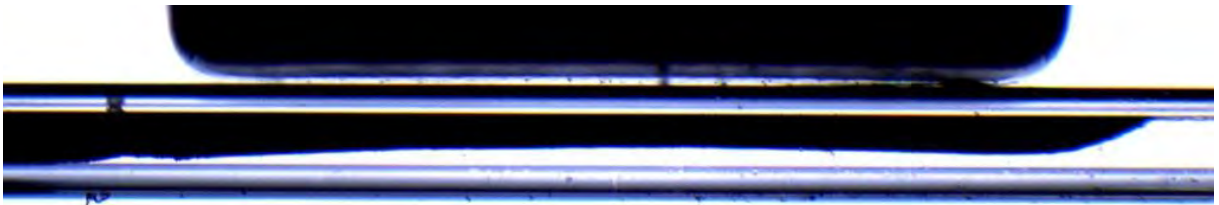


Figura A.11.6 Fotografia 6 de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.



Figura A.11.7 Fotografia 7 de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.



Figura A.11.8 Fotografia 8 de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

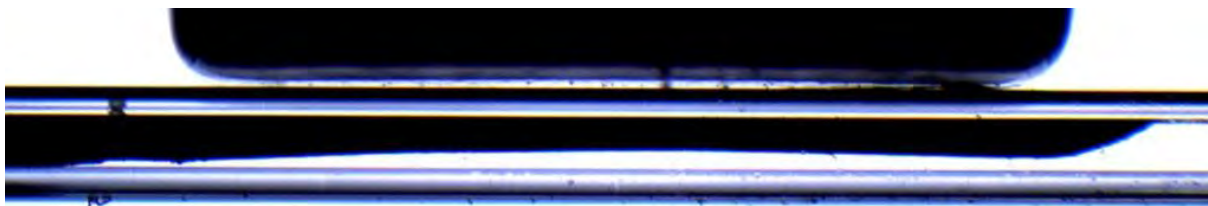


Figura A.11.9 Fotografia 9 de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

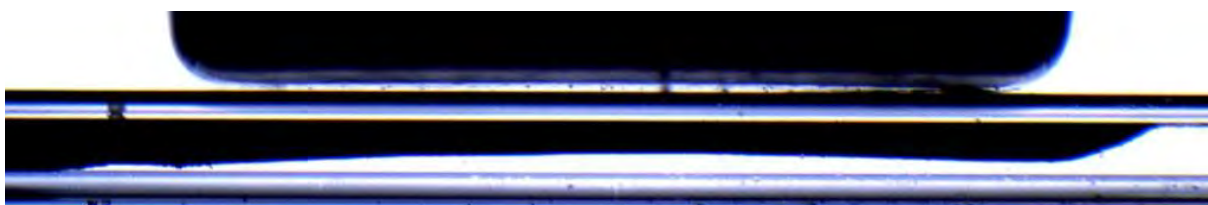


Figura A.11.10 Fotografia 10 de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

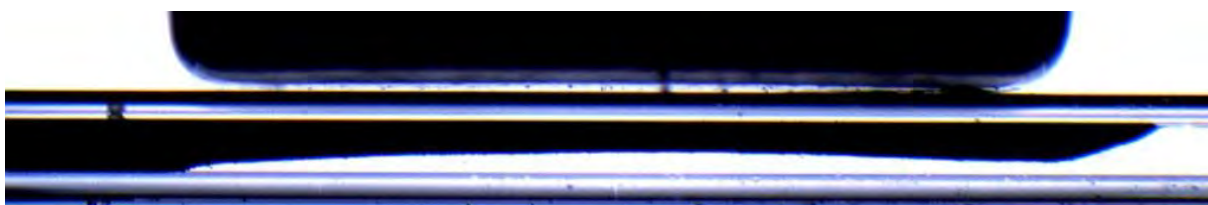


Figura A.11.11 Fotografia 11 de l'experiment N-I5-P4-C3-QA.

A.12 Experiment N-I5-P4-C6-QB

Finalment, l'últim experiment s'ha realitzat amb un capil·lar de 600 μm tal com es pot veure a la taula A.12.1.

Taula A.12.1 Paràmetres utilitzats a l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

Experiment	Orientació	Imant (mm)	Diàmetre de les partícules (μm)	Costat del capil·lar (μm)	Cabal (ml/min)
N-I5-P4-C6-QB	Nord	5	4.37	600	0.03

A l'altre taula, s'observa la informació rellevant de les diferents captures adjuntades. En aquest cas, cal destacar que el temps adimensional és uns 10 cops més petit que a la resta dels experiments.

Taula A.12.2 Resum de les diferents imatges adjuntades de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

Numero de fotografia	Temps real (s)	Temps adimensional	Volum aproximat (ml)	Figura
1	2	4.88	0.00	A.12.1
100	200	$4.88 \cdot 10^2$	0.10	A.12.2
200	400	$9.76 \cdot 10^2$	0.20	A.12.3
300	600	$1.46 \cdot 10^3$	0.30	A.12.4
400	800	$1.95 \cdot 10^3$	0.40	A.12.5
500	1000	$2.44 \cdot 10^3$	0.50	A.12.6
600	1200	$2.93 \cdot 10^3$	0.60	A.12.7
700	1400	$3.42 \cdot 10^3$	0.70	A.12.8
800	1600	$3.91 \cdot 10^3$	0.80	A.12.9
900	1800	$4.39 \cdot 10^3$	0.90	A.12.10
999	1998	$4.88 \cdot 10^3$	1.00	A.12.11



Figura A.12.1 Fotografia 1 de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

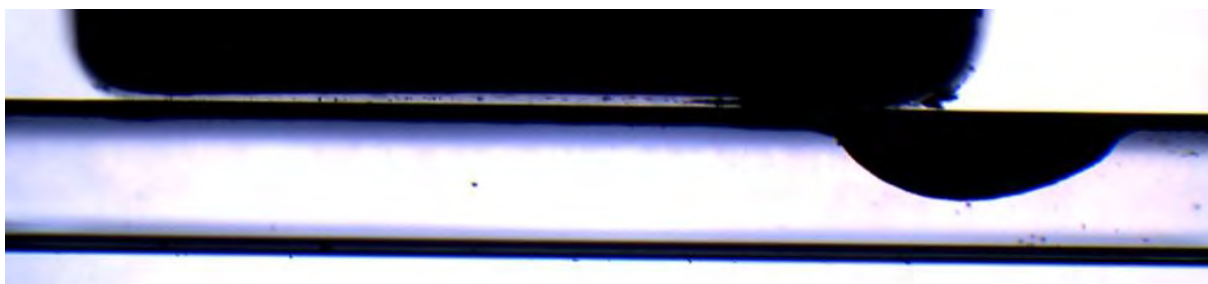


Figura A.12.2 Fotografia 2 de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

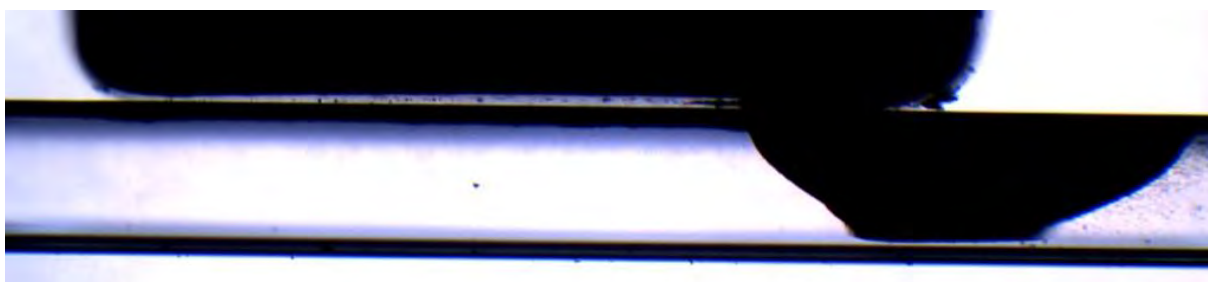


Figura A.12.3 Fotografia 3 de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

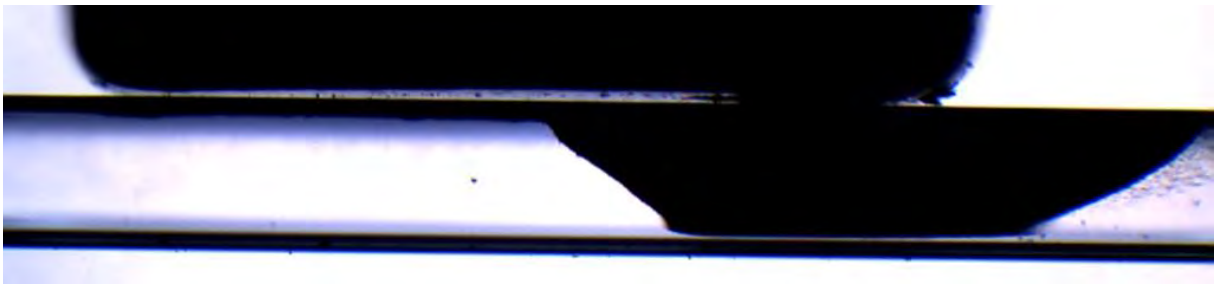


Figura A.12.4 Fotografia 4 de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

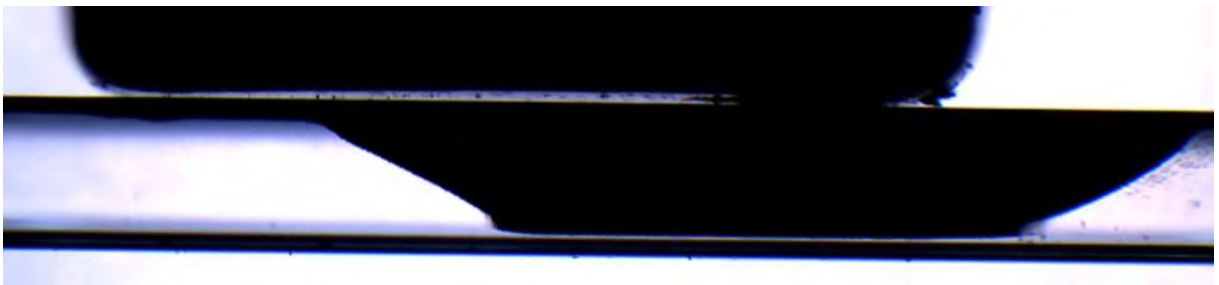


Figura A.12.5 Fotografia 5 de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

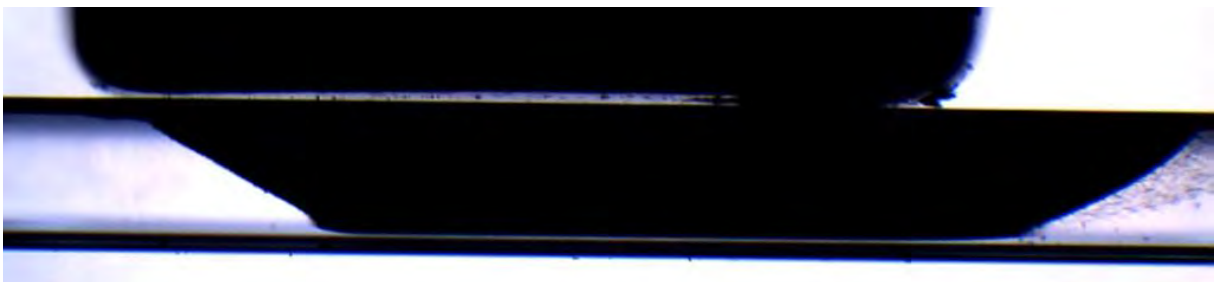


Figura A.12.6 Fotografia 6 de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

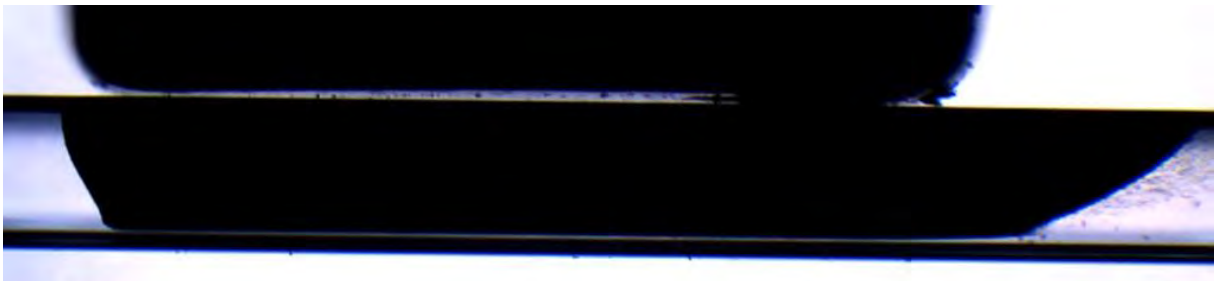


Figura A.12.7 Fotografia 7 de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

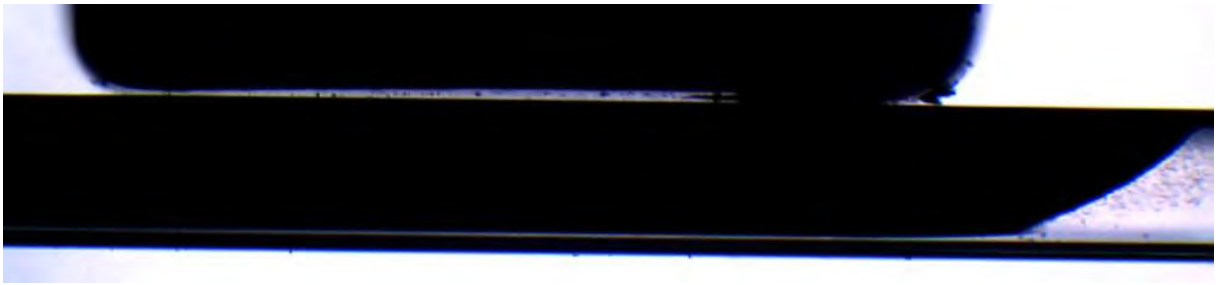


Figura A.12.8 Fotografia 8 de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

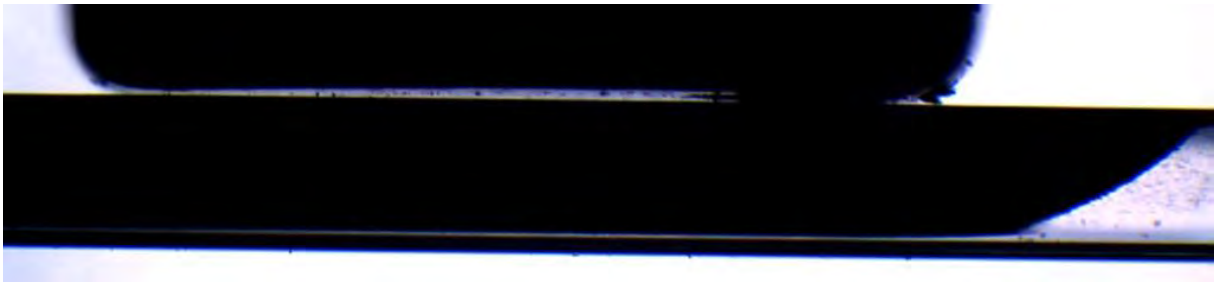


Figura A.12.9 Fotografia 9 de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

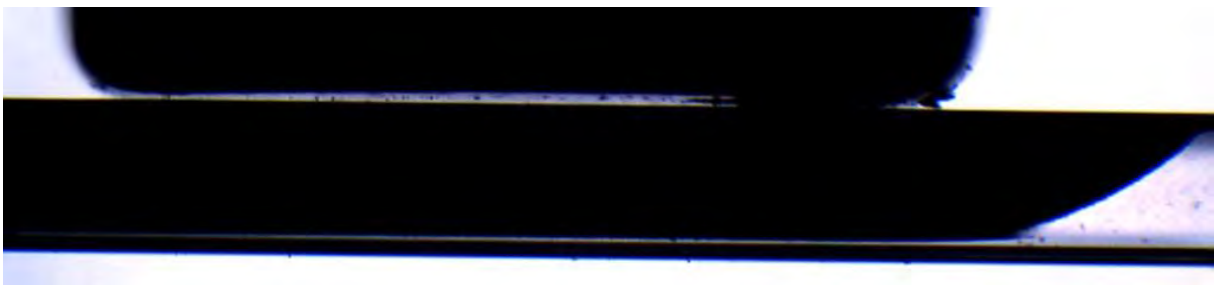


Figura A.12.10 Fotografia 10 de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

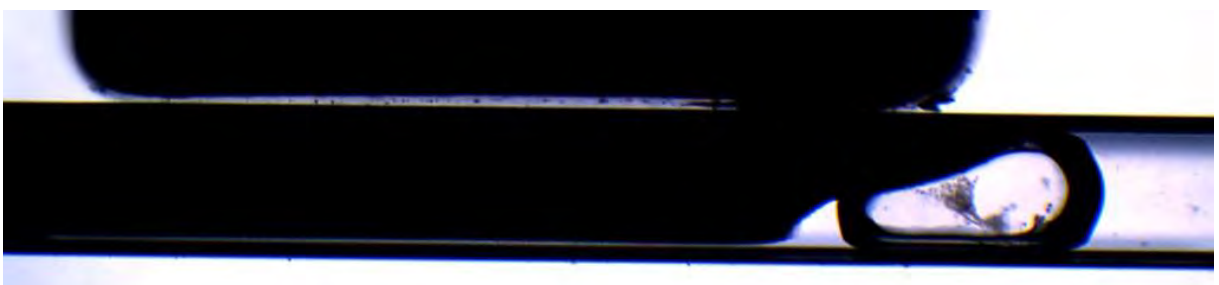


Figura A.12.11 Fotografia 11 de l'experiment N-I5-P4-C6-QB.

B Codi de Matlab

En aquest apartat, es mostra els 3 codis de Matlab. El codi utilitzat per generar una matriu a partir de les captures binaritzades dels experiment realitzats i els dos codis per calcular i analitzar l'àrea i la simetria d'aquesta respecte l'imant.

A més a més, s'explica com calculen l'àrea les dos funcions utilitzades [13]:

- **Bwarea:** estima l'àrea de tots els píxels de la imatge sumant l'àrea de cada píxel. L'àrea de cada píxel s'estima observant una zona de 2x2 píxels. Es poden veure 6 situacions: zero píxels (0), un píxel (1/4), dos píxels adjacents (1/2), dos píxels en diagonal (3/4), tres píxels (7/8) i quatre píxels (1).
- **Regionprops:** calcula l'àrea a partir de les regions contínues.

B.1 Generació de la matriu

%Generació de la matriu a partir de les imatges

%Llegeix les imatges jpg y creu una matriu tridimensional, per cada pla de la matriu hi ha una imatge

% Netejar el lloc de treball

clear

close all

clc

% Carregar les imatges

imagedir=['C:\Users\fosca_000\Desktop\Jordi
Lladós\Microcanals\Experiments\21.02.2018_Q0.03_N-S\Recortes']; % Localització de la
carpeta amb les fotografies

nframes=999; % nombre total de captures

cd(imagedir)

% Generació de la matriu i binarització

for iframe=1:nframes ;

nom=['Capture_Q_003_N-S',num2str(iframe),'.jpg'];

aux=imread(nom);

aux=rgb2gray(aux);

aux=imbinarize(aux,0.31); % Grau de sensibilitat envers l'escala de grisos

matriz(:, :, iframe)=aux;

end

vl=matriz;

```
%Guarda la matriu
save('matriz_21.02.2018_Q0.03_N-S.mat', 'vI', '-v7.3')

cd ..
```

B.2 Càlcul i anàlisis de l'àrea

%Càlcul i anàlisis de l'àrea a partir de la matriu generada

```
% Netejar el lloc de treball
clear
close all
clc
```

% Carregar de les imatges i la matriu

```
imagedir=['D:\Usuarios\Usuari\Desktop\MEI\2n MEI\2n Quatrimestre\TFM\Jordi
Lladós\Microcanals\Experiments\21.02.2018_Q0.03_N-S\Recortes'];
```

```
nframes=999; % Nombre total d'imatges
```

```
cd(imagedir)
```

```
load('matriz_21.02.2018_Q0.03_N-S.mat')
```

% Càrrega la primera imatge de l'experiment

```
imtool('Capture_Q_003_N-S1.jpg')
```

% Crear una nova matriu, on les imatges estiguin més retallades

```
v4=vI(66:160, :, :);
```

% Dades de l'experiment

```
H=281.7e-3; % amplada del capil·lar de l'experiment (mm)
```

```
L=5; % Mida imant (mm)
```

```
t=2; % Temps entre cada captura (s)
```

```
Q=0.03*1000/60; % Passar ml/min a mm3/s
```

```
v=Q/H^2; % Càlcul de la velocitat
```

% escala (píxels de l'experiment / amplada del capil·lar de l'experiment)

```
scale=45/(H);
```

```
for iframe=23:nframes
```

```

pp(:,:,iframe)=v4(:,:,1)-v4(:,:,iframe); % resta entre la primera imatge i les altres

area(iframe)=bwarea(pp(:,:,iframe)); % Càlcul àrea per bwarea
area(iframe)=area(iframe)/scale^2; % Passar de píxels a mm^2
Aa(iframe)=area(iframe)/(H*L); % Passar l'àrea a adimensional

S=regionprops(pp(:,:,iframe),'Area'); % Càlcul àrea per regionprops
F(iframe)=S.Area;
F(iframe)=F(iframe)/scale^2; % Passar de píxels a mm^2
AF(iframe)=F(iframe)/(H*L); % Passar l'àrea a adimensional

end

t0=t*v/H; % Temps adimensional inicial
tf=t*nframes*v/H; % Passar a temps adimensional

ff=244 % Fotografia fins la qual s'observa tot l'experiment
r=t*ff*v/H % Passar a temps adimensional

% Representació de l'àrea de l'experiment
figure
xx=t0:10*t0:tf;
plot(xx,Aa(1:10:end),'r*')
hold on

plot(xx,AF(1:10:end),'d')
plot([r, r], [0, 3/2],'m')
ylim([0 3/2])

xlabel('Temps adimensional')
ylabel('Àrea adimensional')
grid on

figure
imshow(v4(:,:,30)) % partícules es veuen negres

figure
imshow(pp(:,:,30)) % partícules es veuen blanques

figure
imshowpair(v4(:,:,30),pp(:,:,30),'montage') % Comparació de les imatges anteriors
title('starting accumulation')

```

B.3 Càlcul i anàlisis de la simetria de l'àrea

%Càlcul i anàlisis de l'àrea a partir de la matriu generada

% Netejar el lloc de treball

clear

close all

clc

% Carregar les imatges i la matriu

imagedir=['D:\Usuarios\Usuari\Desktop\MEI\2n MEI\2n Quatrimestre\TFM\Jordi
Lladós\Microcanals\Experiments\21.02.2018_Q0.03_N-S\Recortes'];

nframes=999; % total nombre de captures

cd(imagedir)

load('matriz_21.02.2018_Q0.03_N-S.mat')

% Càrrega la primera imatge de l'experiment

imtool('Capture_Q_003_N-S1.jpg')

% Dades de l'experiment

H=281.7e-3; % amplada del capil·lar de l'experiment (mm)

t=2; % Temps entre cada captura (s)

Q=0.03*1000/60; % Passar ml/min a mm³/s

v=Q/H²; % Càlcul de la velocitat

% escala (píxels de l'experiment / amplada del capil·lar de l'experiment)

scale=45/(H);

% Seleccionar la línia de píxels situada a ¼ de l'ímant

v7=vl(:,661,:);

for iframe=23:nframes

pp(:, :, iframe)=v7(:, :, 1)-v7(:, :, iframe); % resta entre la primera imatge i les altres

area025(iframe)=bwarea(pp(:, :, iframe)); % Càlcul de la longitud

area025(iframe)=area025(iframe)/scale; % Passar de píxels a mm

d25(iframe)=area025(iframe)/H; % Passar a longitud adimensional

end

% Seleccionar la línia de píxels situada a ½ de l'ímant

```

v8=vl(:,468,:);

for iframe=23:nframes

    pp(:,:,iframe)=v8(:,:,1)-v8(:,:,iframe); % resta entre la primera imatge i les altres
    area050(iframe)=bwarea(pp(:,:,iframe)); % Càlcul de la longitud
    area050(iframe)=area050(iframe)/scale; % Passar de píxels a mm
    d50(iframe)=area050(iframe)/H; % Passar a longitud adimensional

end

% Seleccionar la línia de píxels situada a 3/4 de l'imant
v9=vl(:,276,:);

for iframe=23:nframes

    pp(:,:,iframe)=v9(:,:,1)-v9(:,:,iframe); % resta entre la primera imatge i les altres
    area075(iframe)=bwarea(pp(:,:,iframe)); % Càlcul de la longitud
    area075(iframe)=area075(iframe)/scale; % Passar de píxels a mm
    d75(iframe)=area075(iframe)/H; % Passar a longitud adimensional

end

t0=t*v/H; % Temps adimensional inicial
tf=t*nframes*v/H; % Passar a temps adimensional

ff=244 % Fotografia fins la qual s'observa tot l'experiment
r=t*ff*v/H % Passar a temps adimensional

% Representació de l'àrea de l'experiment
xx=t0:10*t0:tf;
figure
plot(xx,d25(1:10:end),'r*')
ylim([0 1.2])
hold on
plot(xx,d50(1:10:end),'d')
plot(xx,d75(1:10:end),'g <')
plot([r, r], [0, 1.2],'m')
xlabel('Temps adimensional')
ylabel('Longitud adimensional')
grid on
legend('1/4 d\'imant','1/2 d\'imant','3/4 d\'imant')

```

C Mesures realitzades amb el teslàmetre

A continuació, es mostra les mesures realitzades amb el teslàmetre a la cara nord dels diferents imants cúbics de 5 mm. Cal tenir present que $x=0$ i $y=0$, cal tenir present que $z=0$ es troba a la cara de l'imant.

Taula C.1 Densitat del flux magnètic segons el tipus d'imant i la distància Z

z	Densitat del flux magnètic		
	N50	N42	Iman usat
1	0.276	0.256	0.254
2	0.166	0.156	0.157
3	0.104	0.097	0.092
4	0.066	0.064	0.061
5	0.047	0.043	0.042
10	0.011	0.011	0.011

A partir d'aquests valors es realitza la figura C.1. Es pot observar que l'imant utilitzat té una densitat de flux magnètic molt semblant a l'imant N42.

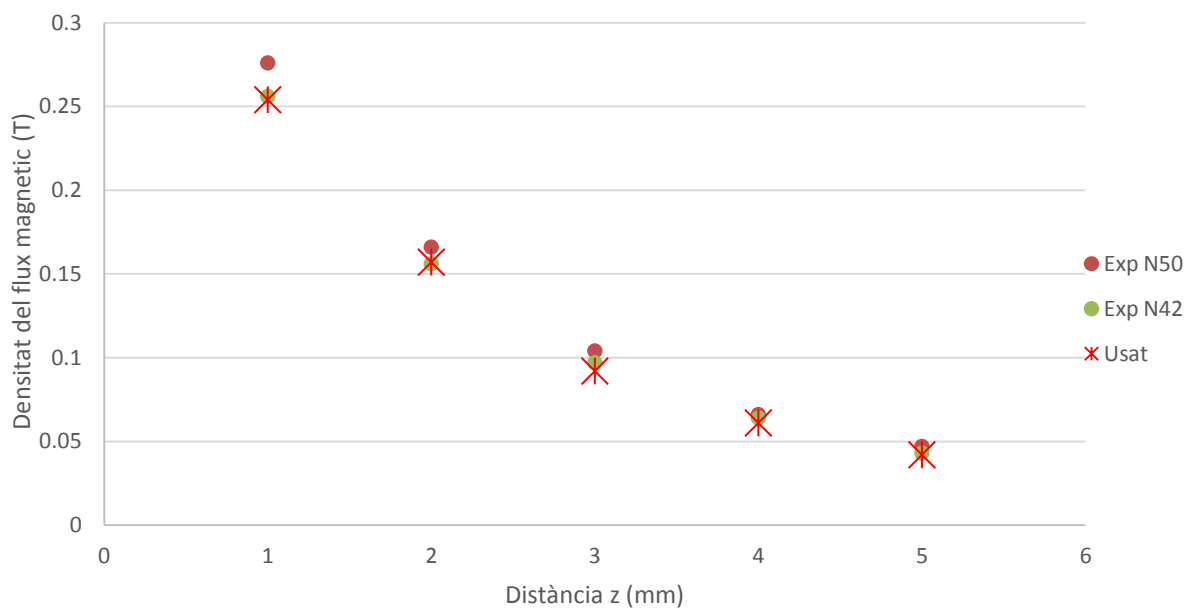


Figura C.1. Densitat de flux magnètic per cada imant segons la distància z.

D Susceptibilitat magnètica

Per l'experiment realitzat per determinar la susceptibilitat magnètica de les partícules cada 30 segons, s'ha fet un captura amb el microscopi. En aquestes s'ha pogut observar com es desplacen les partícules.

A continuació es mostra una seqüència de captures per observar el desplaçament de les partícules. En vermell s'ha marcat un dels conjunts de partícules que es desplacen cap a terra, és a dir, es desplacen cap a l'esquerra de la fotografia. En canvi, s'ha marcat en blau un dels grups de partícules que van cap a l'imatge, les quals es desplacen cap a la dreta de la fotografia.

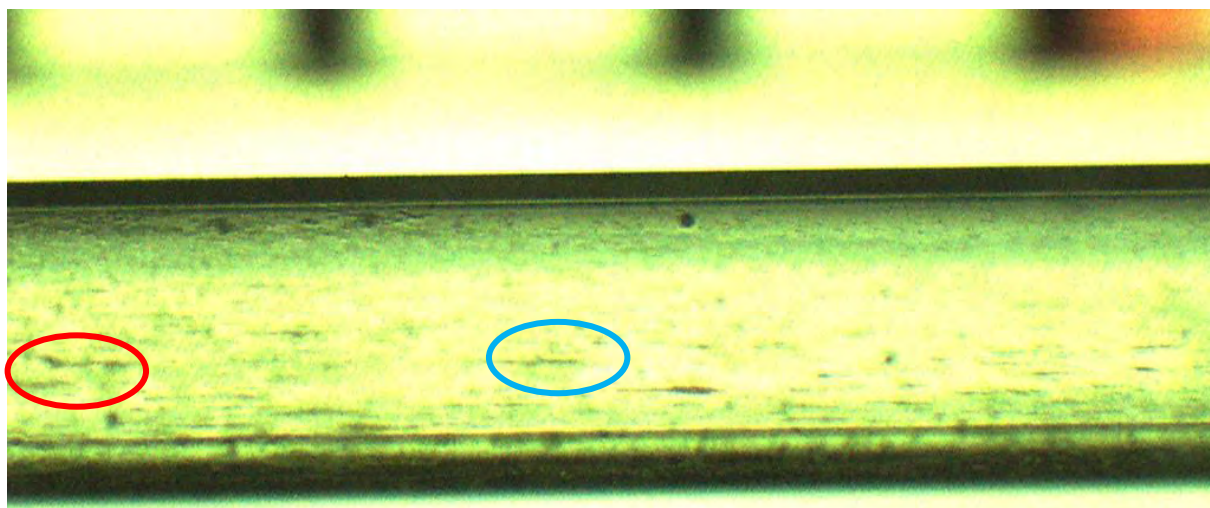


Figura D.1 Fotografia 36 de l'experiment de la susceptibilitat.

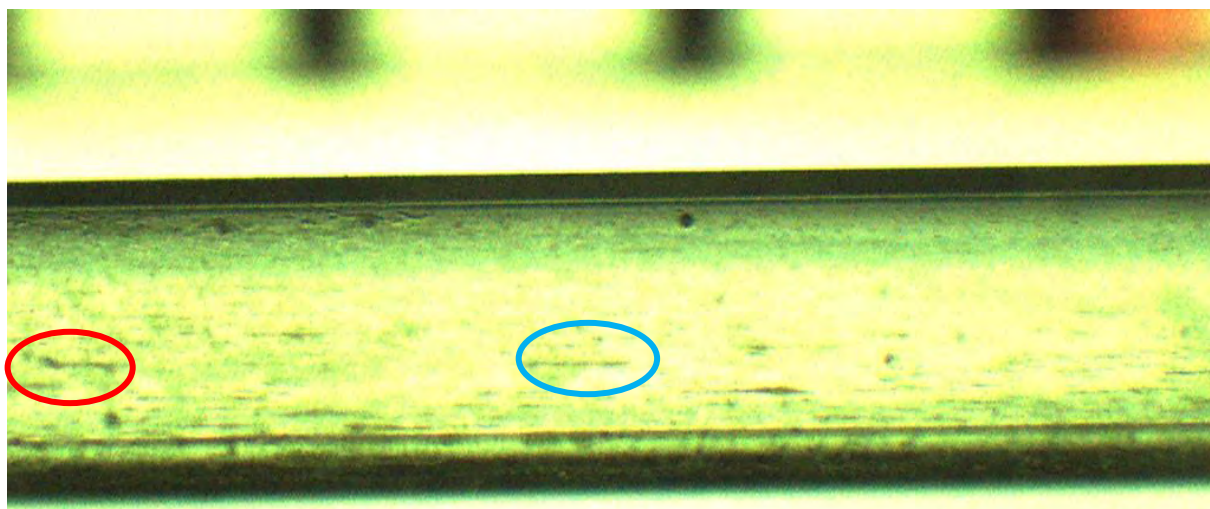


Figura D.2 Fotografia 38 de l'experiment de la susceptibilitat.

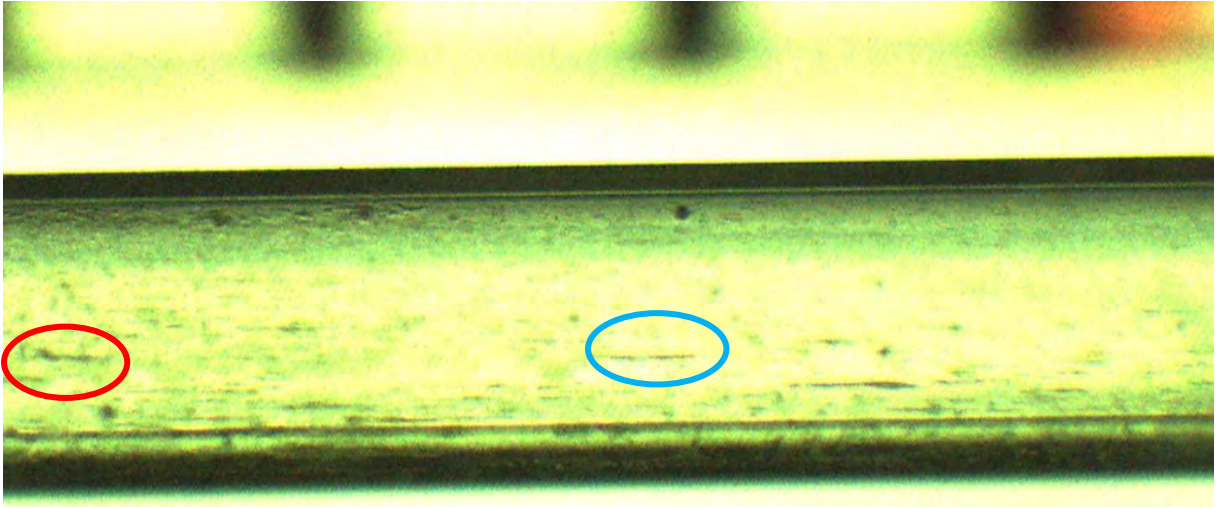


Figura D.3 Fotografia 40 de l'experiment de la susceptibilitat.

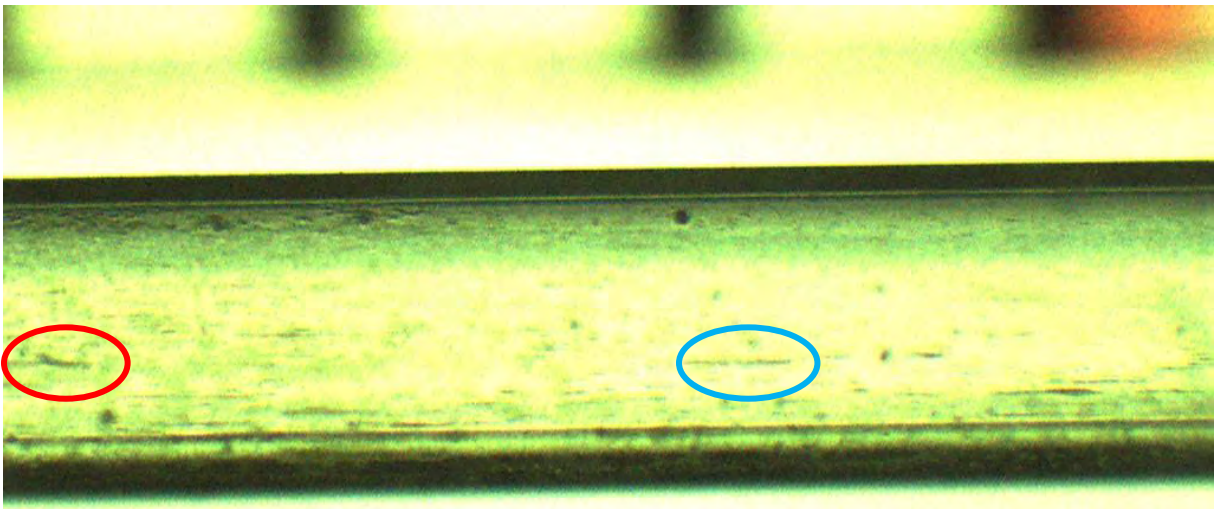


Figura D.4 Fotografia 42 de l'experiment de la susceptibilitat.

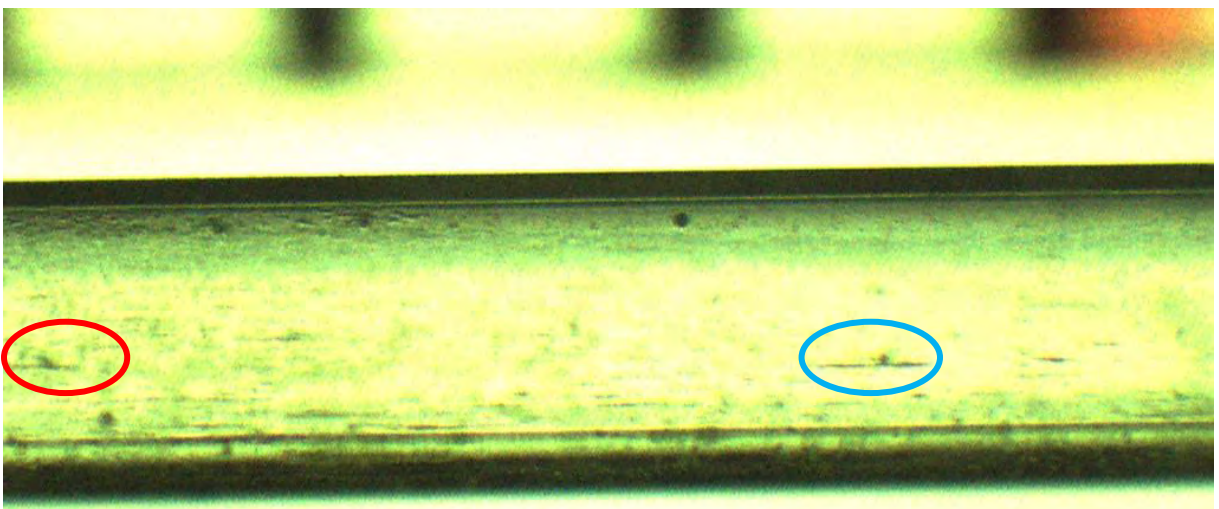


Figura D.5 Fotografia 44 de l'experiment de la susceptibilitat.

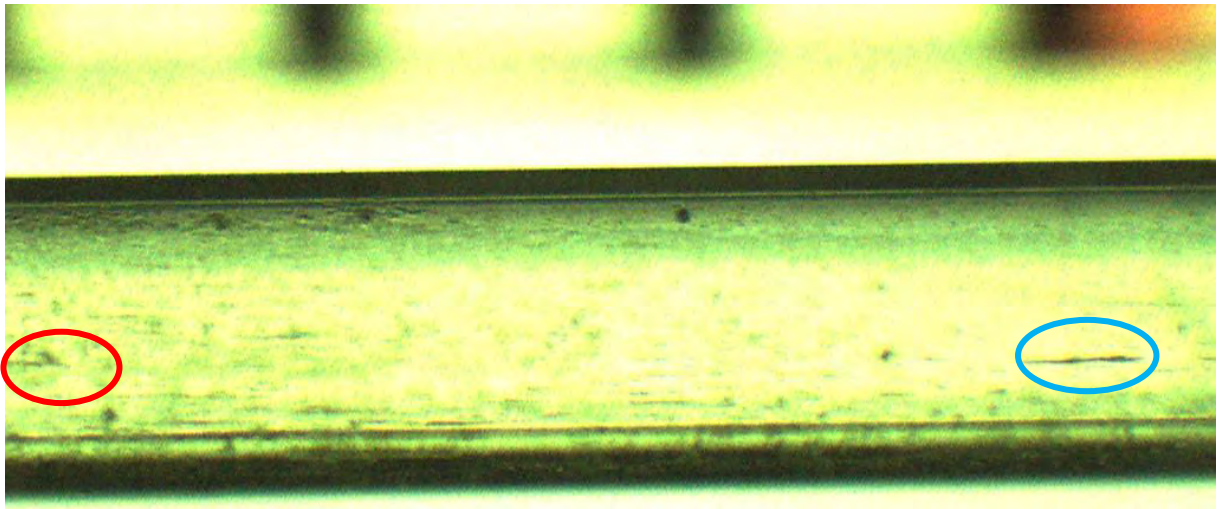


Figura D.6 Fotografia 46 de l'experiment de la susceptibilitat.

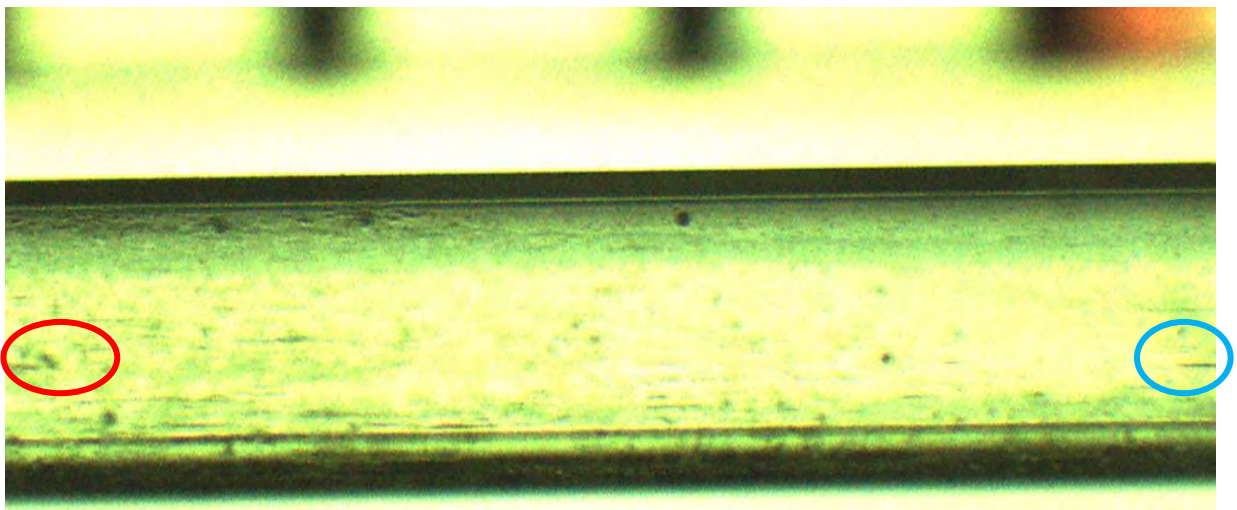


Figura D.7 Fotografia 48 de l'experiment de la susceptibilitat.

Es pot observar que les partícules atretes per l'imant es mouen a més velocitat que les que sedimenten.