



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports

UPC BARCELONATECH

PROGRAMA DE DOCTORAT EN ENGINYERIA CIVIL

Tesi Doctoral

ESTUDI DE LA DINÀMICA DEL TRANSPORT DE DILUCIONS SALINES D'ALTA CONCENTRACIÓ EN CANONADES A PRESSIÓ

Autor:

Arnau Triadú Galí

Directors:

Martí Sànchez Juny

Antoni Andreu Torras

Barcelona, setembre de 2018



DOCTORATS
INDUSTRIALS



Aigües de
Barcelona



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Estudi de la dinàmica del transport de dilucions salines d'alta concentració en canonades a pressió

(versió encriptada)

Arnau Triadú Galí

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

(...)

Resum

Paraules clau: Sal, salmorra, transport de sediments, viscositat, flux a pressió, Col·lector de salmorres.

La conca minera de sal de la comarca del Bages (Catalunya), situada entre Cardona, Súria, Sallent i Balsareny, és el jaciment més important d'Europa i des de l'any 1923 que s'explota per extreure'n potassa, un dels fertilitzants bàsics en agricultura i un element clau en la indústria química. L'exploració de les mines de potassa va generar en molt poc temps un problema de salinització excessiva de l'aigua del riu Llobregat, que ja llavors abastia la població de la ciutat de Barcelona, de tal manera que cap als anys 30 del segle XX es va començar a reclamar la construcció d'una canonada que canalitzés els residus generats a les mines (principalment clorurs de sodi) fins al mar per evitar que s'aboquessin al riu. Aquesta canonada (a la qual s'anomena Col·lector de salmorres) no es va fer realitat fins a l'any 1983. La longitud total de la instal·lació supera de llarg els 100 km, i funciona per gravetat i a pressió. El fet de transportar residus miners a través de canonades de longitud tan elevada fa que la gestió del col·lector sigui molt complicada. Problemes relacionats amb fuites o amb la pèrdua de capacitat d'evacuació són habituals, ja sigui per l'oxidació de les juntes, la precipitació de sals, la sedimentació de partícules sòlides o altres possibles causes.

L'objectiu d'aquest treball és estudiar el comportament hidràulic en una canonada a pressió de les salmorres residuals generades en les mines de sal del Bages, mitjançant la recopilació de dades de cabal, pressió i temperatura d'un flux de salmorra en un medi controlat (laboratori) i en el Col·lector de salmorres.

En primer lloc s'han dut a terme assajos amb unes mescules de salmorra generades amb aigua i amb sal extreta de les mines de Súria, en diferents concentracions. Aquests assajos s'han realitzat en dos circuits experimentals construïts en el Laboratori de Mecànica de Fluids de l'Escola de Camins de Barcelona. A partir d'aquests assajos s'ha pogut determinar la viscositat de les diferents mescules generades.

En segon lloc, s'ha analitzat el comportament de diferents mescules de salmorra, de concentració de sal constant, modificant-ne la concentració de partícules insolubles, mitjançant una sèrie d'assajos duts a terme en el circuit experimental del laboratori de l'empresa Paterson & Cooke, en la seva seu central de Ciutat del Cap (Sud-àfrica). A partir d'aquests assajos s'ha pogut determinar la velocitat límit de deposició de les partícules sòlides en suspensió presents en les mescules generades.

Per últim, s'ha dut a terme una campanya de mesures de camp per al control d'un tram del Col·lector de Salmorres. A partir de les dades de cabal, pressió i temperatura obtingudes es discuteix el funcionament d'aquesta infraestructura, tenint en compte els resultats obtinguts en el laboratori.

Summary

Key words: Salt, salt brine, slurry transport, viscosity, pressure flow, Col·lector de salmorres.

The mining area in the Bages district, in Catalonia (Spain), is located between the villages of Cardona, Súria, Sallent and Balsareny. It contains the most important salt deposit in Europe, which has been exploited since 1923 in order to extract potash, an essential agricultural fertilizer and a key element in the chemical industry. The exploitation of these potash mines quickly produced a salinization problem in the waters of Llobregat river, which already were the drinking water source for the city of Barcelona, so during the 1930s people started claiming for the construction of a pipe in order to canal the waste generated in the mines (sodium chloride in particular) to the sea, to avoid its runoff to the river. Nevertheless, this pipe (named *Col·lector de salmorres*) didn't become a reality since 1983. The total length of the facility far exceeds 100 km, it's a gravity-fed system and its flow is pressurized. The fact of transporting mining waste through a pipe of such high length increases the difficulty in the management of the infrastructure. Problems related with leakages or evacuation capacity losses are common, either because of seal oxidation, salt precipitation, solid particles sedimentation or any other possible cause.

The objective of this work is to study the hydraulic behavior inside a pressure pipe of the residual brines generated in the Bages salt mines, by gathering flow rate, pressure and temperature data of a brine flow in a controlled environment (laboratory) and in the *Col·lector de salmorres*.

First of all, a series of tests have been carried out with brines produced with water and salt extracted from the mines of Súria, at different concentrations. These tests have been performed in two different experimental loops constructed in the Fluid Mechanics Laboratory at the Civil Engineering School of Barcelona. The tests have enabled the determination of the viscosity of the generated brines.

Secondly, the behavior of some brines with a constant salt concentration and different concentrations of insoluble particles has been analyzed, by performing a series of tests in an experimental loop located at the laboratory of the company Paterson & Cooke, in its headquarters in Cape Town (South Africa). These tests have enabled the determination of the limit deposition velocity of the solid particles in suspension of the generated brines.

Finally, a field measurement campaign has been performed to monitor a segment of the *Col·lector de salmorres*. From the flow rate, pressure and temperature data, the behavior of this facility is discussed, considering the results obtained in the laboratory tests.

Agraïments

Vull fer un agraïment sincer a tots aquells que m'han ajudat a dur a bon port aquesta tesi, començant pels meus directors, el Martí i el Toni, amb qui ens hem entès des d'un principi i que m'han fet la vida molt fàcil.

El treball de laboratori és desagraït i sovint desesperant, però he tingut la sort de tenir un Daniel al darrera, sempre disposat a ajudar, a escoltar i a donar bons consells, i un Xavi *McGiver* (i un Marcos) pel que faci falta. Els resultats d'aquest treball són, en part, culpa seva, així com de la Neus i el Javier, els meus tesinands. Vull agrair també al Joan, al Jaume, a la Clara, a la Maria, al Javi i a l'Eduardo que m'hagin permès entrar cinc mil vegades al laboratori d'ambientals i per ajudar-me a distingir una pipeta d'un Erlenmeyer, i a la Susanna Valls i a l'Agustí Fortuny, que també m'han obert amb total confiança els seus respectius laboratoris.

I was blessed the day I wrote Angus and asked him to accept me for three months in his company, Paterson & Cooke, in Cape Town. Not only he opened his company's doors but also his family's, so I'll be always grateful for that. I can say the same of Nic, my mentor there, Sharleen, Sharon and Terry, my South African mothers, Emile, Frans, James and Chenelle, who helped me a lot with my laboratory work, and a long etcetera. Thank you so much to all of you.

Aquesta tesi ha estat finançada en part per Aigües de Barcelona. Vull agrair el tracte que m'han donat, especialment l'Ana Reyes i el Ramon López, sempre disposats a ajudar-me. Igualment, vull agrair al Ricard Devesa la seva col·laboració en l'anàlisi de la sal, duta a terme al seu laboratori.

Un fort agraïment també a la família de camins, amb qui he compartit espai durant aquesta etapa: al Jackson, Gonzalo, Esteban, Marcos i cia. per donar "vidilla" al departament, a la Cesca per la seva paciència amb les factures, al club del cafè de mig matí, Anna, Cris i Anaïs, imprescindibles per aixecar els ànims, i al Vicente, que m'ha il·luminat el túnel en més d'una ocasió.

Finalment, als amics més pròxims, que s'han estalviat la pregunta de com va la tesi cada cop que em veien, especialment al Maiol, que m'ha aguantat durant els tres anys (i els 27 anteriors).

I als meus pares que, encara que no ens veiem gaire, sé que sempre hi són.

Índex

Resum	III
Summary	V
Agraïments.....	VII
Llistat d'abreviatures i símbols.....	1
1. Resum i conclusions	5
1.1. Introducció i antecedents	5
1.2. Objecte de la tesi.....	9
1.3. Resum del treball realitzat	10
1.4. Resultats més destacables. Conclusions	10
1.5. Línies de treball futures.....	19
2. Estat del coneixement.....	21
2.1. Hidràulica en canonades a pressió.....	21
2.2. Solubilitat de les sals en aigua.....	22
2.3. Transport de partícules en suspensió	24
2.4. Viscositat de les salmorres.....	30
3. Assajos duts a terme amb diferents concentracions de sal.....	35
3.1. Circuit experimental 1	35
3.1.1. Objectius.....	35
3.1.2. Descripció del model	35
3.1.3. Característiques de la salmorra.....	41
3.1.4. Metodologia seguida en la realització dels assajos.....	48
3.1.5. Registres obtinguts.....	48
3.1.6. Processament dels assajos	53
3.1.7. Calibratge del circuit.....	53
3.1.8. Modelització numèrica i discussió	57
3.1.9. Observacions relatives als assajos amb salmorra	69
3.2. Circuit experimental 2	71
3.2.1. Objectius.....	71
3.2.2. Determinació de la viscositat. Metodologia experimental	71
3.2.3. Determinació de la viscositat de les mesclures filtrades. Viscosímetre d'Ostwald90	
3.2.4. Modelització numèrica i discussió	94
3.2.5. Observacions relatives als assajos amb salmorra	100
3.3. Anàlisi conjunta dels resultats obtinguts	102

3.4.	Conclusions	106
4.	Assajos duts a terme amb diferents concentracions de partícules sòlides insolubles	109
4.1.	Objectius	109
4.2.	Descripció del model	109
4.2.1.	Circuit experimental	109
4.2.2.	Equips i sensors utilitzats	110
4.3.	Característiques de la salmorra	114
4.4.	Metodologia seguida en la realització dels assajos	117
4.5.	Registres obtinguts	119
4.6.	Processament dels assajos	123
4.7.	Calibratge del circuit	124
4.8.	Modelització numèrica i discussió	125
4.8.1.	Càlcul del coeficient de fricció	125
4.8.2.	Càlcul de la viscositat de les mescles	131
4.8.3.	Resistència al flux	140
4.9.	Conclusions	143
5.	Control d'un tram del Col·lector de Salmorres	145
	Referències	147

Llistat d'abreviatures i símbols

Lletres llatines minúscules

a_f	Celeritat de l'ona de pressió [m/s].
d	Diàmetre de partícula [mm ó μm].
d_{50}	Diàmetre de partícula que correspon al 50% de la distribució acumulada en l'anàlisi granulomètrica [mm ó μm].
e	Gruix de les parets de la canonada [m].
f	Coefficient de fricció de Darcy-Weisbach.
g	Acceleració de la gravetat [m/s^2].
h	Altura de la mescla a l'interior del capil·lar del viscosímetre d'Ostwald [m].
h_f	Pèrdues de càrrega per fricció [m].
h_{loc}	Pèrdues de càrrega localitzades [m].
k	Rugositat absoluta de la canonada [mm].
n	Nombre de valors de la sèrie de dades.
r	Radi del tub capil·lar del viscosímetre d'Ostwald [m].
t_{H_2O}	Temps de descens de l'aigua pel capil·lar del viscosímetre d'Ostwald [s].
t_i	Temps de descens de la mescla i pel capil·lar del viscosímetre d'Ostwald [s].
v	Velocitat mitjana del flux [m/s].
v_D	Velocitat límit de deposició de les partícules en suspensió presents a la mescla amb sediments [m/s].
z	Cota dels dipòsits del Circuit experimental 2 (Capítol 3) [m].

Lletres llatines majúscules

Ar	Nombre d'Arquímedes, $Ar = \frac{4 \cdot g \cdot d^3 \cdot \rho_w \cdot (\rho_s - \rho_w)}{3 \cdot \mu_w^2}$.
C_m	Concentració en massa de partícules sòlides.
C_D	Coefficient d'arrossegament.
C_p	Coefficient adimensional de pressió, $C_p = \frac{\Delta p}{\gamma} \cdot \frac{1}{\frac{v^2}{2g}}$.
C_V	Concentració en volum de partícules sòlides.
C_{Vmax}	Fracció sòlida màxima (Konijn et al. 2014).
D	Diàmetre intern de la canonada [m ó mm]. Distància vertical fins al punt de mesura del sensor de pressió submergit instal·lat a la Bassa de Súria [m].
E	Mòdul elàstic de la canonada.

F_L	Nombre de Froude de Durand (1952).
K	Coeficient invariant adimensional del viscosímetre d'Ostwald, $K = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot L \cdot V}$. Coeficient adimensional de pèrdues de càrrega localitzades. Mòdul de compressibilitat volumètric del fluid [Pa].
K'	Paràmetre que depèn de la geometria del viscosímetre d'Ostwald [m^2/s^2].
L	Longitud de la canonada. Longitud del capil·lar del viscosímetre d'Ostwald [m].
N	Calat de la Bassa de Súria [m].
$N1$	Distància que va del sensor de pressió submergit al nivell de la Bassa de Súria [m].
P_{abs}	Pressió absoluta [kPa].
P_{atm}	Pressió atmosfèrica [kPa].
P_i	Pressió sota la qual es troba la mescla i durant el descens pel capil·lar del viscosímetre d'Ostwald [Pa].
R_{sd}	Densitat relativa del flux, $R_{sd} = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}$.
Re	Nombre de Reynolds.
S_s	Densitat relativa dels sòlids, $S_s = \rho_s / \rho_w$.
V	Volum de líquid [m^3].
$Z0$	Cota de solera de la Bassa de Súria [m].
$Z1$	Cota de referència situada a la Bassa de Súria [m].
ZH	Cota del sensor de pressió submergit instal·lat a la Bassa de Súria [m].
ZN	Cota de nivell de la Bassa de Súria [m].

Lletres gregues minúscules

γ	Pes específic de la mescla de salmorra [N/m^3].
μ	Viscositat dinàmica del fluid [Pa·s].
μ_{H_2O}	Viscositat dinàmica de l'aigua [Pa·s].
μ_i	Viscositat dinàmica de la mescla i [Pa·s].
μ_m	Viscositat dinàmica de la mescla amb sediments [Pa·s].
μ_w	Viscositat dinàmica del líquid de transport de la mescla amb sediments [Pa·s].
ν	Viscositat cinemàtica del fluid [m^2/s].
ρ	Densitat del fluid [kg/m^3].
ρ_{H_2O}	Densitat de l'aigua [kg/m^3].
ρ_i	Densitat mitjana de la mescla i [kg/m^3].
ρ_m	Densitat mitjana de la mescla amb sediments [kg/m^3].
ρ_s	Densitat mitjana de la fase sòlida de la mescla amb sediments [kg/m^3].
ρ_w	Densitat mitjana del líquid de transport de la mescla amb sediments [kg/m^3].

- σ Desviació estàndard.
 σ_x Desviació estàndard de la sèrie de dades X.

Lletres gregues majúscules

- Δh Paràmetre d'ajust utilitzat en el calibratge de les pèrdues de càrrega localitzades del Circuit experimental 1 (Capítol 3) [m].
- ΔP Pressió que exerceix la columna de líquid [Pa].
- $\frac{\Delta P}{\Delta L}$ Gradient de pressió [kPa/m].
- $\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_w$ Gradient de pressió associat al flux del líquid de transport de la mescla amb sediments [kPa/m].

1. Resum i conclusions

El Diccionari de la llengua catalana de l'Institut d'Estudis Catalans (DIEC) defineix la paraula salmorra de la següent manera:

1. f. [LC] [ED] [HO] Aigua saturada de sal amb què es conserven alguns aliments.
2. f. [HO] [GL] [MI] Aigua saturada de sal que resulta, en les salines, d'evaporar l'aigua de la mar, d'una deu salada, o de dissoldre la sal gemma en aigua dolça injectada al jaciment.
3. f. [MI] Aigua amb un grau de concentració de sal superior al 80 ‰.

1.1. Introducció i antecedents

La conca minera de sal de la comarca del Bages (Catalunya), situada entre Cardona, Súria, Sallent i Balsareny, és el jaciment més important d'Europa i des de l'any 1923 que s'explota per extreure'n potassa, un dels fertilitzants bàsics en agricultura i un element clau en la indústria química.



Figura 1.1 Situació de la comarca del Bages dins de Catalunya i espais miners existents dins la comarca del Bages. Font: Creative Commons i GeoParc - Mapa Espai Miner, respectivament.

L'explotació de les mines de potassa va generar en molt poc temps un problema de salinització excessiva de l'aigua del riu Llobregat, que ja llavors abastia la població de la ciutat de Barcelona, de tal manera que cap als anys 30 del segle XX es va començar a reclamar la construcció d'una canonada que canalitzés els residus generats a les mines (principalment

clorurs de sodi) fins al mar per evitar que s'aboquessin al riu. Aquesta canonada (a la qual s'anomena Col·lector de Salmorres) no es va fer realitat fins a l'any 1983, degut a la imminent Guerra Civil Espanyola i la manca d'interès en el projecte de la dictadura posterior.

La Figura 1.2 mostra la planta actual d'aquest col·lector, construït en forma de Y amb orígens als municipis de Cardona i Sallent. La unió d'ambdues branques es produeix a l'alçada de Castellgalí, ja que el tram amb origen a Sallent segueix la traça del riu Llobregat i el tram amb origen a Cardona segueix la del riu Cardener, afluent del Llobregat que hi desemboca en aquell punt.

La longitud total de la instal·lació supera de llarg els 100 km, de tal manera que el temps de trànsit entre Cardona i el mar és d'aproximadament 24 hores. Les canonades tenen un diàmetre que va de 125 mm a 1300 mm, i estan fabricades amb fibrociment fet de Portland anti-sulfats o bé amb polièster reforçat amb fibra de vidre (PRFV).

El col·lector funciona per gravetat i a pressió. Està dividit en diferents trams d'alguns quilòmetres de longitud, al final dels quals es produeix un trencament de càrrega, normalment gràcies a torres dissenyades per a tal efecte. En aquestes torres, com també en basses d'emmagatzematge intermèdies, també es poden produir aportacions de cabal per part d'empreses que compren el dret d'abocar-hi els seus residus salins.

El fet de transportar residus miners a través de canonades de longitud tan elevada fa que la gestió del col·lector sigui molt complicada. Problemes relacionats amb fuites o amb la pèrdua de capacitat d'evacuació són habituals, ja sigui per l'oxidació de les juntes, la precipitació de sals, la sedimentació de partícules sòlides o altres possibles causes. A l'inici d'aquesta tesi, la UTE Col·lector de Salmorres, participada majoritàriament per Aigües de Barcelona, era l'encarregada d'explotar la instal·lació, sota règim de concessió.

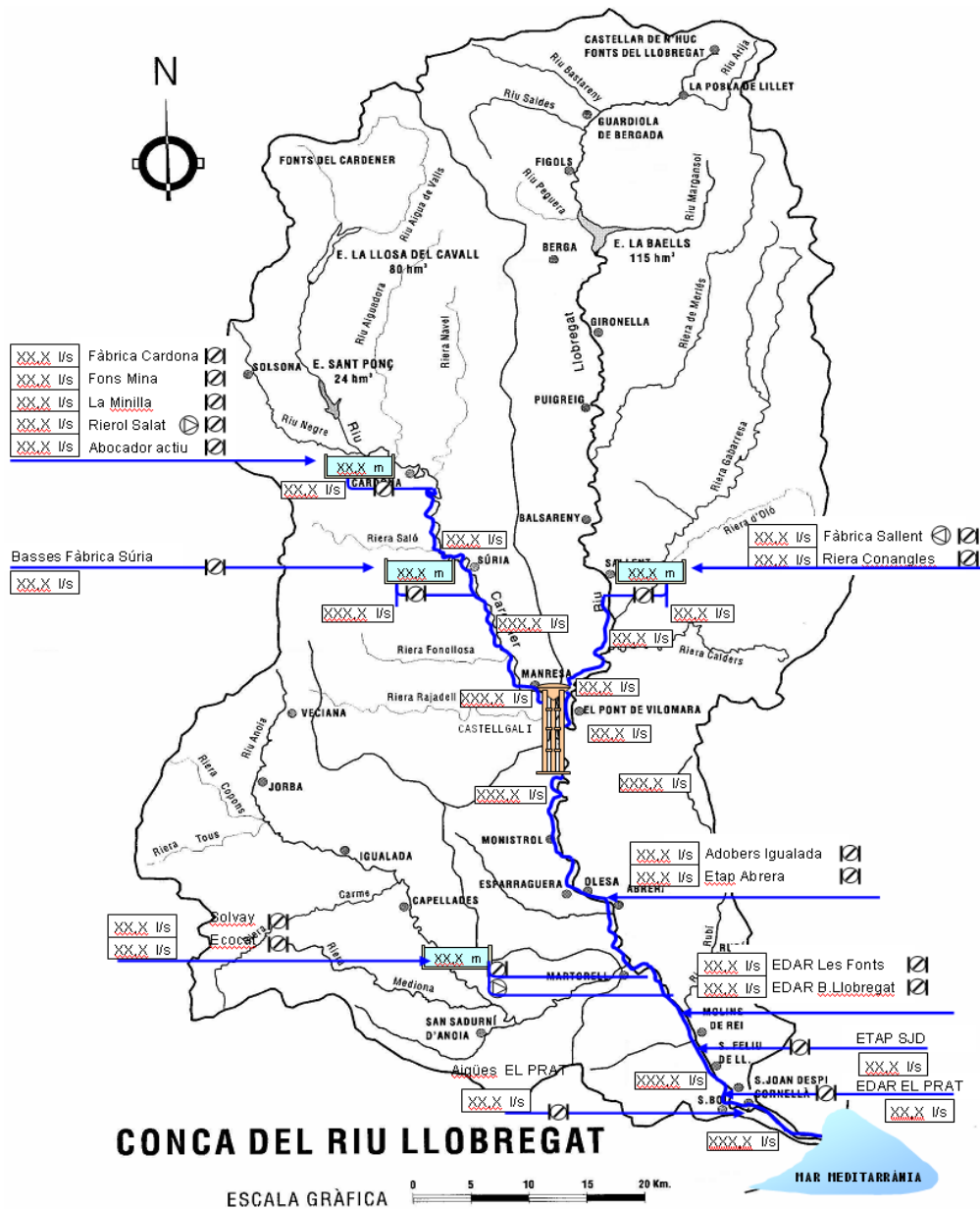


Figura 1.2 Plànol del traçat del Col·lector de Salmorres, que segueix el curs dels rius Cardener i Llobregat. Font: UTE Col·lector de Salmorres.

Antecedents

L'embrió d'aquesta tesi es troba en un estudi realitzat per Aqualogy (grup Agbar) i el grup de recerca FLUMEN (Sánchez-Juny et al. 2012), per encàrrec de Gas Natural.

L'objectiu d'aquest estudi era "conèixer el comportament de la salmorra en un conducte a pressió, per poder predir possibles problemes en el funcionament de l'ampliació del Col·lector de Salmorres entre Balsareny i el mar" (Sánchez-Juny et al. 2012). Les principals preguntes que van portar a realitzar l'estudi són les següents: La concentració de saturació és la mateixa en condicions hidrostàtiques que en un flux a pressió? Quina influència té la temperatura sobre aquesta concentració?

És per això que es va construir una instal·lació experimental al Laboratori de Mecànica de Fluids de l'Escola de Camins de Barcelona, format per un dipòsit acumulador, una bomba i un panell on s'hi ubicà una canonada amb un total de 73 metres de longitud amb diferents obstacles per provocar pèrdues de càrrega locals. El disseny del circuit es va fer amb la idea de representar tots els obstacles amb què es podia trobar la salmorra en circular pel col·lector de projecte, i amb canonades majoritàriament transparents per poder observar les deposicions de sal en cas de precipitació.

El document final del projecte fa una anàlisi del comportament de la salmorra per a diverses concentracions de sal i fent variar la temperatura a la qual circula la salmorra pel circuit. S'arriba a la conclusió que la concentració de saturació en un flux a pressió és pràcticament la mateixa que en el cas hidrostàtic, al voltant dels 360 g/l de sal (cal tenir en compte que la sal utilitzada no és una substància química pura, sinó una mescla de NaCl, CaSO₄ i materials insolubles, entre d'altres, i per tant només és comparable amb els assajos hidrostàtics realitzats amb la mateixa sal en un laboratori del grup Agbar). Els assajos realitzats també mostren que la temperatura de la salmorra circulant tendeix a estabilitzar-se uns 6 °C per damunt d'aquesta. Es va determinar que aquest escalfament, a un ritme de 0,7 °C/h aproximadament, és degut a la fricció de les canonades i al pas de la salmorra per la bomba.

L'estudi també fa referència a les decantacions de matèria insoluble que s'han produït en els diferents assajos. Aquesta matèria inert, que és transportada en suspensió pel flux, té una granulometria molt baixa i, al llarg dels assajos, ha anat adherint-se en part dels conductes i elements singulars de la instal·lació, especialment en zones de velocitats menors.

Arrel del Pla de Doctorats Industrials impulsat per la Generalitat de Catalunya, Aigües de Barcelona i la UPC, a través de FLUMEN, acorden proposar un pla de recerca que prengui el relleu de l'estudi esmentat anteriorment (Sánchez-Juny et al. 2012), ampliant-ne els objectius.

Programa de Doctorats Industrials

Aquesta tesi, doncs, s'emmarca dins del programa de Doctorats Industrials impulsat per la Generalitat de Catalunya. L'objectiu d'aquest programa de doctorats és "contribuir a la competitivitat i internacionalització de la indústria catalana, reforçar els instruments per captar el talent que genera el país i situar els futurs doctors en condicions de desenvolupar projectes d'R+D+I en una empresa.

Dins d'aquest marc, la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) i Aigües de Barcelona Empresa Metropolitana de Gestió del Cicle Integral de l'Aigua, S.A. (AB, Grup Suez) signen un conveni específic de col·laboració per al desenvolupament del projecte de recerca "Estudi de la dinàmica del transport de dilucions salines d'alta concentració en canonades a pressió".

Segons aquest conveni, el projecte de recerca consisteix en "estudiar el transport a pressió de dilucions salines d'elevada concentració, provinent bé sigui d'extraccions mineres o de plantes de dessalinització. Es coneix el comportament estàtic d'aquestes dilucions, però no es coneix la influència en el seu comportament en condicions dinàmiques de transport en una conducció a

pressió. Existeixen determinades incerteses que conviden a aprofundir en el coneixement d'aquest tipus de fluxos". Per a tal fi el conveni proposa els objectius següents:

- “Analitzar les diferències del comportament dinàmic de diferents dilucions de salmorra respecte del comportament estàtic. S’analitzaran diferents condicions de transport: velocitats, concentracions, rugositats, efectes dels fenòmens locals. S’analitzarà si aquestes conclusions són d’aplicabilitat també a emissaris submarins, que tenen un comportament anàleg”.
- “Ampliar el coneixement relacionat amb els materials emprats en els col·lectors terrestres. [...] Es proposa estudiar més en detall altres tipus de materials amb que podrien construir-se aquestes infraestructures, amb particular atenció al polietilè (PVC i PEAD), instal·lacions de ferro i acer inoxidable. [...]”
- “En cas que sigui factible, monitoritzar un tram pilot d’alguna instal·lació existent. Un cop estigui resolta la proposta, a nivell de projecte, se seleccionarà un tram pilot del Col·lector de Salmorres amb l’objectiu de monitoritzar-lo tant pel que fa a variables hidràuliques (cabal, pressió) com variables de qualitat (salinitat, temperatura, densitat, etc.). Aquestes dades permetran contrastar els resultats experimentals obtinguts al laboratori analitzant-ne els possibles efectes d’escala que es derivin de la instal·lació experimental”.
- “Desenvolupament, validació i calibració d’un model numèric, com a eina de gestió del Col·lector. El model numèric ha de ser capaç de simular el transport en pressió d’un flux de densitat com són les salmorres. Addicionalment el model contemplarà l’equació de difusió del calor per analitzar, tenint en compte l’equació d’estat del fluid, l’efecte combinat de la temperatura i la densitat de solut en el fluid transportat. Aquest model ha de permetre estudiar les estratègies de manteniment i alternatives existents en quant a rentats o tractaments en cas de localització de precipitats salins, que permetin preveure el mal funcionament o, fins i tot, trencament amb el perjudici que això provocaria al medi ambient”.

1.2.Objecte de la tesi

L’objecte principal d’aquesta tesi és l’estudi del comportament hidràulic de la salmorra en una canonada a pressió, mitjançant la recopilació de dades de cabal, pressió i temperatura d’un flux de salmorra en un medi controlat (laboratori) i en el Col·lector de Salmorres.

L’objectiu del treball de laboratori és, per una banda, determinar la viscositat de les salmorres generades amb sal del jaciment de Súria, en funció de la seva densitat, i per l’altra, determinar la velocitat límit de deposició dels sediments que transporten, en funció de la seva concentració en volum.

L’objectiu del treball de camp en el Col·lector de Salmorres és disposar de dades de pressió, cabal i temperatura corresponents al funcionament real de la infraestructura i determinar en quina mesura la presència de partícules sòlides en suspensió produeix una afectació en el funcionament de la infraestructura.

1.3. Resum del treball realitzat

Aquesta tesi s'ha organitzat en cinc capítols. El primer capítol, el present, conté la introducció i els antecedents que han motivat la realització d'aquest estudi, i inclou el resum del treball realitzat, els resultats més destacats i les línies de treball futures proposades per l'autor.

En el segon capítol es presenten els aspectes principals de l'estat del coneixement pel que fa a les característiques de les salmorres estudiades i al seu transport a pressió. Per una banda, s'analitza la solubilitat de les diferents sals en aigua, que varia en funció de la seva interacció en una mateixa dissolució. Per altra banda, es fa un resum de l'estat de l'art relatiu al transport de mescles amb sediments. La literatura en aquest cas és extensa però se centra principalment en el transport de mescles amb concentracions de partícules sòlides elevades, mentre que en aquest estudi es tracten mescles amb concentracions de sediments baixes. Finalment, s'analitzen els diversos estudis publicats en relació a la determinació de la viscositat de les dissolucions salines i de les mescles amb sediments, per separat.

En el tercer capítol es presenten els assajos duts a terme amb unes mescles de salmorra generades amb aigua i amb sal extreta de les mines de Súria, en diferents concentracions. Aquests assajos s'han realitzat en dos circuits experimentals construïts en el Laboratori de Mecànica de Fluids de l'Escola de Camins de Barcelona. A partir d'aquests assajos s'ha pogut determinar la viscositat de les diferents mescles generades.

En el quart capítol s'analitza el comportament de diferents mescles de salmorra, de concentració de sal constant, modificant-ne la concentració de partícules insolubles, mitjançant una sèrie d'assajos duts a terme en el circuit experimental del laboratori de l'empresa Paterson & Cooke, en la seva seu central de Ciutat del Cap (Sud-àfrica). A partir d'aquests assajos s'ha pogut determinar la velocitat límit de deposició de les partícules sòlides en suspensió presents en les mescles generades.

Finalment, el cinquè capítol presenta la campanya de mesures de camp per al control d'un tram del Col·lector de Salmorres. A partir de les dades de cabal, pressió i temperatura obtingudes es discuteix el funcionament d'aquesta infraestructura, tenint en compte els resultats obtinguts en els capítols tercer i quart.

1.4. Resultats més destacables. Conclusions

Les conclusions obtingudes que es consideren més rellevants són les següents:

- (Capítols 3 i 5) La sal extreta de les mines de Súria està formada bàsicament per clorur de sodi (NaCl), i en menor mesura per sulfat de calci (CaSO_4) i clorurs de potassi (KCl) i de magnesi (MgCl_2). També té una part gens negligible d'insolubles, concretament de fins (Taula 1.1). Els sediments produïts per aquesta sal formen un material heterogeni o mal seleccionat, ja que contenen diverses mides de partícula dominants, amb un d_{50} de 141.5 μm . L'ampliació làser dels sediments mostra que estan formats per cristalls de CaSO_4 i fins agregats a aquests.

Per la seva banda, els sediments presents a l'interior del tram controlat del Col·lector de Salmorres formen un conglomerat de diferents sals i òxids acompanyat d'un percentatge molt elevat de matèria orgànica, superior al 25%. En la bassa de

decantació situada a l'inici del tram estudiat (Bassa de Súria), els sediments presenten un d_{50} de 620 μm i estan formats en un 9% per matèria orgànica.

Per tant, els sediments generats per la salmorra que circula pel Col·lector presenten mides de partícula més elevades que els produïts per la sal de mina, i un alt contingut de matèria orgànica.

Component	% en massa
NaCl	91.49
CaSO ₄	3.30
KCl	2.30
MgCl	0.95
Insolubles	1.14

Taula 1.1 Percentatge en massa dels diferents compostos o elements insolubles en una mostra de sal provinent de la mina de Súria.

- (Capítol 3) La concentració màxima de sal provinent de les mines de Súria (incloent les diferents sals dissoltes i els sòlids en suspensió) que la mescla és capaç de transportar és de 331 kg/m^3 (kg de sòlids totals / m^3 de mescla).
- (Capítols 3, 4 i 5) En el circuit experimental descrit al Capítol 4 s'ha constatat que la fórmula de càlcul de la velocitat límit de deposició de les partícules sòlides en suspensió proposada per Durand i Condolios (1952) sobreestima, per a concentracions de sediments baixes, les velocitats observades, de tal manera que el líquid de transport té més capacitat d'arrossegament de la prevista. El conjunt d'observacions, però, mostra una tendència clara a assolir les velocitats calculades per a concentracions de sediments majors (Figura 1.3). Per altra banda, la velocitat de deposició disminueix quan el líquid de transport dels sediments té una densitat més elevada.

En el circuit experimental 1 (Capítol 3) no s'han observat deposicions de partícules sòlides al fons de la canonada en cap dels assajos realitzats, la qual cosa concorda amb el càlcul de les velocitats límit de deposició calculades mitjançant el procediment de Durand i Condolios (1952).

En el Col·lector de Salmorres (Capítol 5), en canvi, la velocitat de deposició calculada segons Durand i Condolios és superior a la velocitat del flux mesurada, per a qualsevol mida de partícula, de forma que s'hauria de produir sedimentació al llarg de tot el tram (Figura 1.4). Atès que no s'ha pogut accedir a l'interior de la canonada en estudi, no ha sigut possible comprovar la veracitat de les prediccions de sedimentació. Tot i així, s'ha tingut accés a diferents documents generats per la UTE relatius al manteniment del tub, en els quals es confirma l'existència de sediments en el seu interior. En la Figura 1.5, per exemple, es mostra una de les ventoses del tram controlat completament obturada de sediments fins.

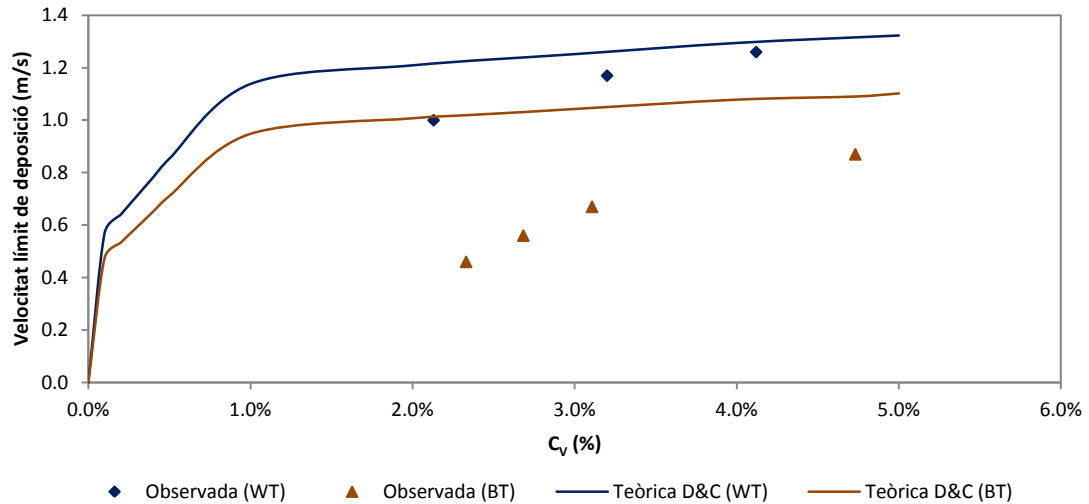


Figura 1.3 Velocitats límit de deposició observades i teòriques (Durand i Condolios, 1952) segons si el líquid de transport és l'aigua (WT) o la solució saturada (BT), en funció de la concentració en volum de les mescles. Aquests valors estan associats a un diàmetre de canonada de 62.4 mm, una densitat dels sòlids de 2650 kg/m³ i un d₅₀ proper a les 150 μm.

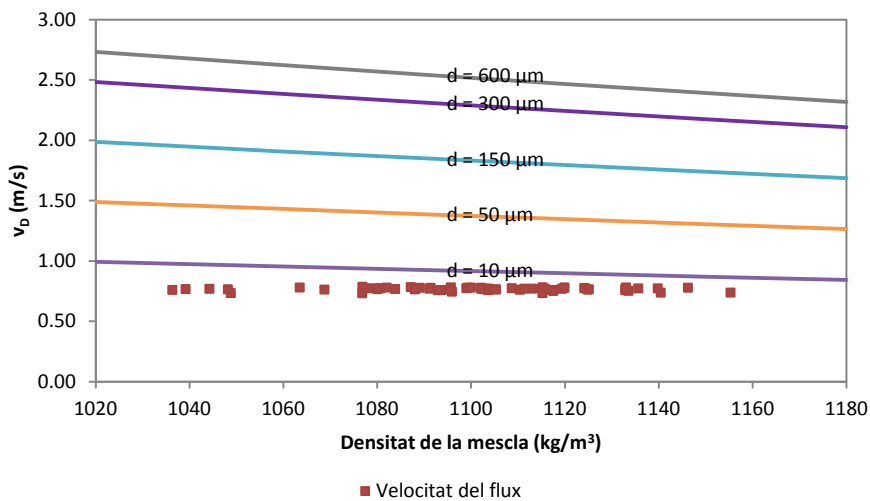


Figura 1.4 Velocitats límit de deposició obtingudes mitjançant l'expressió de Durand i Condolios (1952), representades en funció de la densitat de la mescla de salmorra i de la mida de gra de les partícules en suspensió, per una concentració en volum de l'1% i una densitat dels sòlids de 1980 kg/m³. També, velocitats mitjanes del flux de salmorra registrades durant la campanya de camp.



Figura 1.5 Sediments acumulats a l'interior d'una de les ventoses instal·lades a la canonada, en el Col·lector de Salmorres.

- (Capítol 3) En els assajos realitzats en el circuit experimental 1 del Capítol 3 (apartat 3.1), fabricat amb tubs de plàstic, no s'ha pogut observar precipitació de sals a l'interior de la canonada, ni tan sols durant la circulació d'una mescla de salmorra en la concentració límit de saturació. Malgrat això, les ampliacions làser dutes a terme mostren la presència de cristalls de sal entre els sediments recollits, i s'ha comprovat que tres de les mescles generades es trobaven per sobre del límit de saturació de CaSO_4 (segons Bock (1961)). Per tant, sembla clar que s'ha produït precipitació d'aquest compost, però que això no ha afectat al funcionament hidràulic del circuit, ja que no ha format agregats a les parets d'aquest.

Per la seva banda, en el circuit experimental 2 del Capítol 3 (apartat 3.2), fabricat amb tubs d'acer inoxidable, no s'ha observat cap mena de precipitat durant els assajos, però sí en les hores posteriors al buidat del circuit després de dur a terme els assajos amb la primera mescla de salmorra. Les tres mescles generades per a la realització dels assajos en aquest circuit superaven el límit de solubilitat de CaSO_4 , segons Bock (1961), de tal manera que és possible que s'hagin produït precipitats d'aquest sulfat i que s'hagin vist arrossegats pel flux. L'alta turbulència de les mescles, en qualsevol cas, hauria fet impossible la seva observació. En la Figura 1.6 es mostra una fotografia presa mesos després d'haver finalitzat tots els assajos i d'haver netejat el circuit sencer, incloent les canonades, amb aigua a pressió. Com es pot observar, a l'interior de la canonada de $\frac{3}{4}$ de polzada hi ha hagut un important procés de generació de cristalls de sal agregats a les parets internes que ocupen bona part de la superfície transversal del tub. Per tant, a diferència del circuit experimental 1, en què les canonades de PVC o PEAD no permetien l'agregat de cristalls de sal en les seves parets interiors, en aquest cas, amb tubs d'acer inoxidable, sí que s'ha produït la cristallització de sal. L'elevada rugositat de la canonada, afegida al contacte amb l'aire, ha afavorit l'existència d'aquest fenomen.



Figura 1.6 Cristallització de sal en les parets interiors del tub de $\frac{3}{4}$ de polzada, mesos després de l'últim assaig realitzat i de la neteja del circuit.

- (Capítol 3) S'han pogut determinar diferents valors de la viscositat cinemàtica de les mescles de salmorra generades a 16, 20, 25 i 30°C, per a diferents concentracions de sal. En el circuit experimental 1 (apartat 3.1) s'han assajat les mescles SAL_B a SAL_F, mentre que en el circuit experimental 2 (apartat 3.2) s'ha assajat la mescla S1. Paral·lelament, s'ha mesurat en un viscosímetre d'Ostwald (apartat 3.2.3) la viscositat de les mescles S1, S2 i S3 filtrades (eliminant-ne les partícules sòlides insolubles). La major part dels valors s'han obtingut per una temperatura de les mescles de 25°C (Figura 1.7): aquests segueixen una tendència força clara que, malgrat que el 92% de la sal està format per NaCl, no es correspon amb la corba de viscositat corresponent a una solució pura d'aquesta sal. La manca de dades per a l'interval de densitats que va dels 1000 als 1100 kg/m³ impedeix conèixer el comportament de la corba de viscositat cinemàtica de la salmorra estudiada en aquest tram, però a partir d'una densitat de mescla de 1124 kg/m³, aproximadament, la viscositat augmenta molt ràpidament a mesura que es va afegint més sal a la mescla, a un ritme molt més elevat que en el cas de la solució de clorur de sodi. Les mescles filtrades, en canvi, segueixen una tendència molt similar a la corresponent a aquesta solució.

S'ha ajustat una corba de regressió als valors de la viscositat cinemàtica a 25°C de les mescles no filtrades, en funció de la seva densitat, i s'ha adaptat posteriorment per la resta de temperatures (Figura 1.8), per tal de poder obtenir una relació entre viscositat cinemàtica, densitat i temperatura, a utilitzar en el Capítol 5.

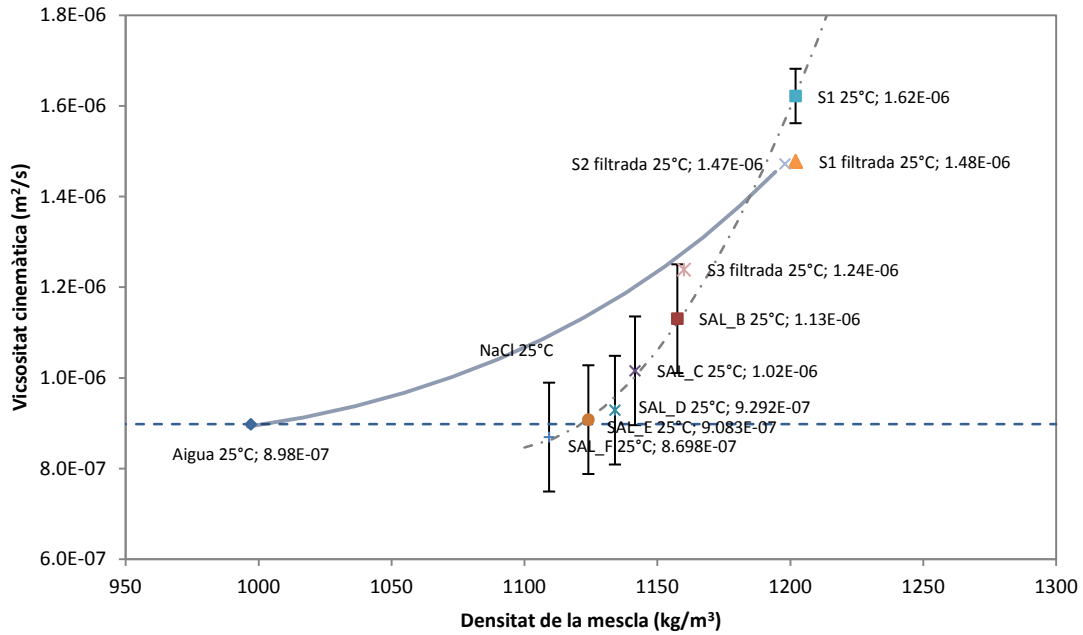


Figura 1.7 Valors de la viscositat cinemàtica a 25°C de les mescles de salmorra, en funció de la seva densitat, obtinguts a partir dels assajos duts a terme en els models experimentals 1 i 2 (Capítol 3), o mesurats en un viscosímetre d'Ostwald (en el cas de les mostres filtrades). També, viscositat cinemàtica teòrica de l'aigua i d'una solució pura de NaCl, en funció de la seva densitat, a 25°C.

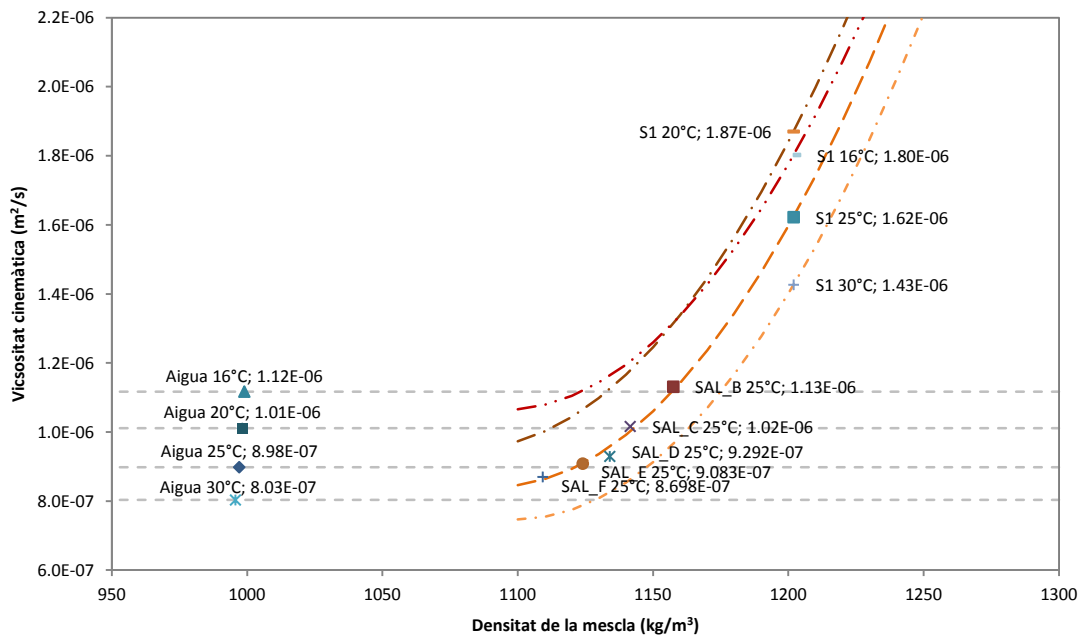


Figura 1.8 Valors de la viscositat cinemàtica a 16°C, 20°C, 25°C i 30°C de les mescles de salmorra estudiades i de l'aigua, i corbes d'ajust corresponents a cadascuna de les temperatures.

- (Capítol 4) S'han pogut determinar diferents valors de la viscositat cinemàtica de les mescles de salmorra generades per a diferents concentracions de partícules en suspensió. Els valors obtinguts per a les mescles generades amb aigua com a líquid de

transport (WT) segueixen una tendència a l'alça moderada a mesura que augmenta la seva concentració en volum (Figura 1.9), mentre que els de les mescles generades amb una dissolució saturada com a líquid de transport (BT) augmenten fins la mescla BT03, amb un C_v del 3.1%, però en aquest punt el creixement s'atura de cop, ja que la mescla BT04 presenta una viscositat molt similar a la de BT03 (Figura 1.10). La viscositat presenta molta més variació en el cas en què el líquid de transport és una dissolució saturada que no pas quan és l'aigua qui fa aquesta funció.

S'han comparat els resultats obtinguts amb algunes de les relacions proposades en la literatura per al càlcul de la viscositat d'una mescla amb sediments. La corba de viscositat relativa que presenta més bon ajust sobre els valors obtinguts per a les mescles WT és la de Chong et al. (2007), adoptant un valor de 0.2 per al paràmetre variable que incorpora, C_{vmax} . En el cas de les mescles BT, no hi ha cap corba que s'ajusti als valors obtinguts, sent la de Chong et al. (2007) amb $C_{vmax} = 0.1$ la que s'hi apropa més.

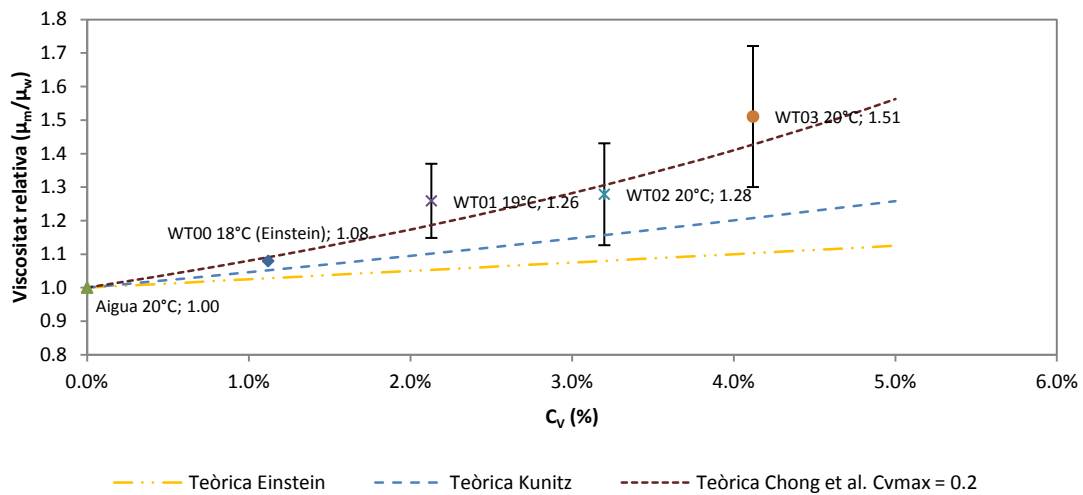


Figura 1.9 Valors de viscositat relativa sobre la viscositat de l'aigua a 20°C, obtinguts per cada mescla en funció de la seva concentració en volum de partícules sòlides insolubles, incloent-hi els errors associats al 95% de confiança de l'ajust. També, corbes calculades mitjançant les expressions d'Einstein (1906), Kunitz (1926) i Chong et al. (2007), aquesta última amb un $C_{vmax} = 0.2$.

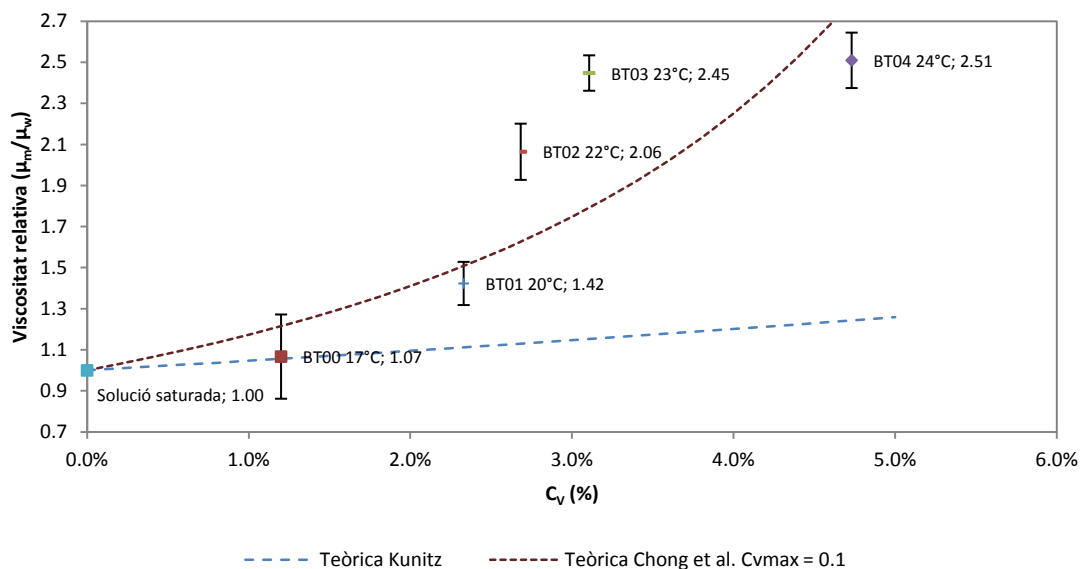


Figura 1.10 Valors de viscositat relativa sobre la viscositat de la dissolució saturada, obtinguts per cada mescla en funció de la seva concentració en volum de partícules sòlides insolubles, incloent-hi els errors associats al 95% de confiança de l'ajust. També, corbes calculades mitjançant les expressions de Kunitz (1926) i Chong et al. (2007), aquesta última amb un $C_{vmax} = 0.1$.

- (Capítol 5) Els resultats obtinguts a partir de les dades de camp permeten concloure que els valors dels coeficients de fricció i , en conseqüència, de la rugositat absoluta, són molt elevats i no es corresponen amb els d'una canonada de PRFV i que, en conseqüència, els pendents motrius obtinguts a partir de les dades de camp no es corresponen amb els de projecte, sinó que són superiors.

La Figura 1.11 mostra les línies d'energia calculades a partir de les dades de camp. També mostra la línia d'energia teòrica que correspondria a un cabal de 67 l/s, un diàmetre intern de 334 mm i una rugositat absoluta de 0.1 mm, que és la que en principi correspondria a una canonada de PRFV envellit ("Teòrica D334 Q67 K0.1"). Les pèrdues de càrrega localitzades s'han comptabilitzat en l'inici de cadascun dels quatre trams del col·lector en estudi. Aquesta línia d'energia teòrica es troba molt per sota de la que s'ha obtingut a partir de les lectures de camp. El cabal que hauria de circular per l'interior de la canonada, mantenint el diàmetre de 334 mm i la rugositat absoluta de 0.1 mm, per tal de coincidir amb les línies d'energia mesurades és d'uns 100 l/s. La línia d'energia associada a aquest cabal ("Teòrica D334 Q100 K0.1") es mostra a la mateixa figura. Les mesures obtingudes amb el cabalímetre, però, mostren que aquest no és el cabal que circula pel col·lector. Tanmateix, si en lloc de modificar el cabal es redueix el diàmetre intern teòric de la canonada fins a 286 mm s'obté una línia d'energia idèntica a l'anterior ("Teòrica D286 Q67 K0.1" en la figura) i, per tant, molt propera a les línies d'energia obtingudes amb les dades de camp. Així doncs, la reducció en un 14% del diàmetre intern equivalent de la canonada (és a dir, la reducció de la seva secció transversal) permetria donar una explicació al funcionament hidràulic actual d'aquest tram de col·lector.

La sedimentació de partícules en suspensió, per tant, pot haver fet variar la secció interna de la canonada fins a assolir un equilibri en què la velocitat del flux sigui igual a la velocitat de deposició de les partícules sòlides en suspensió: en la Figura 1.12 es representen, per una banda, les diferents velocitats de deposició de les partícules sòlides segons Durand i Condolios (1952), corresponents a diàmetres de partícula de 600, 300, 150, 50 i 10 μm . Aquestes velocitats estan calculades per a una concentració en volum de partícules en suspensió d'un 1%, una densitat dels sòlids de 1980 kg/m^3 i una densitat mitjana de la salmorra de 1100 kg/m^3 . Per una altra banda, es mostren les velocitats de flux equivalents a cabals de 67, 80, 90 i 100 l/s. Ambdós grups de corbes es presenten en funció del diàmetre intern de la canonada. Cadascun dels punts en què es tallen una corba de velocitat de flux amb una de velocitat de deposició correspon a una situació d'equilibri i indica el diàmetre intern al qual es produiria.

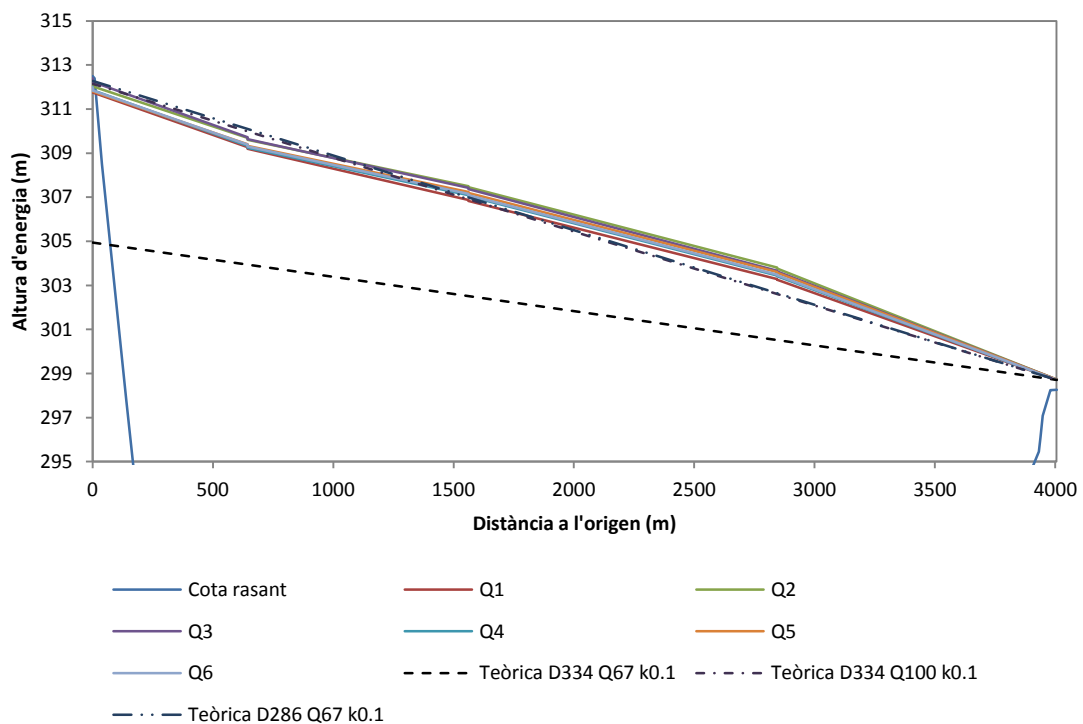


Figura 1.11 Línies d'energia corresponents als sis períodes de cabal constant i cota de rasant del col·lector. També, línies d'energia teòriques segons el diàmetre intern de la canonada, la rugositat absoluta d'aquesta i el cabal circulat.

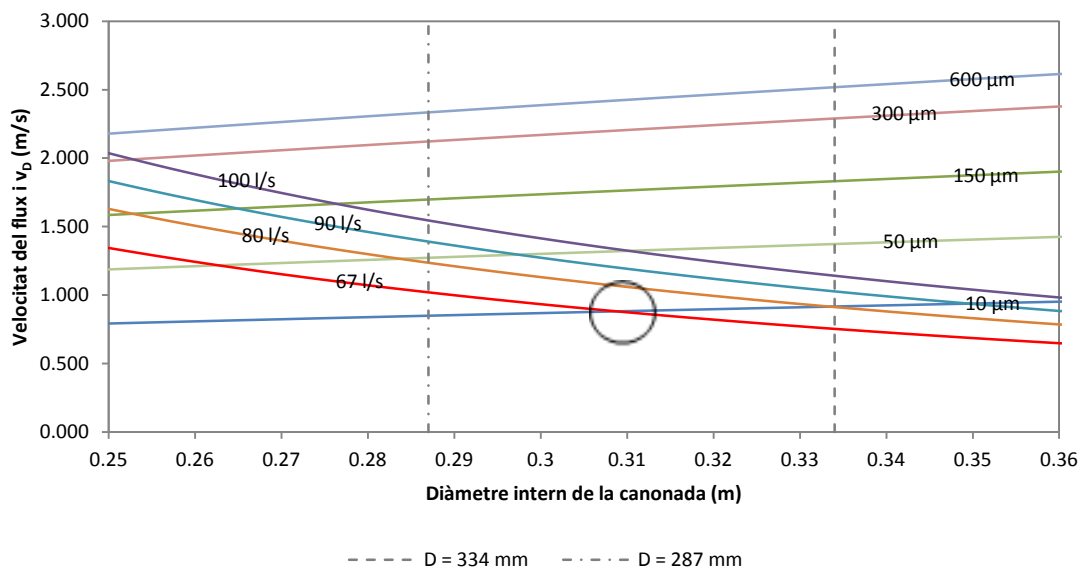


Figura 1.12 Velocitats límit de deposició de les partícules sòlides segons Durand i Condolios (1952), corresponents a diàmetres de partícula de 600, 300, 150, 50 i 10 µm, i velocitats de flux equivalents a cabals de 67, 80, 90 i 100 l/s, en funció del diàmetre intern de la canonada. El punt d'equilibri entre un cabal de 67 l/s i un diàmetre de partícula de 10 µm es troba encerclat.

- (Capítol 5) En el cas que es decidís eliminar la muntanya de sal a través del Col·lector en les condicions actuals, tenint en compte que segons les dades obtingudes el cabal que hi circula és d'uns 67 l/s i que la densitat mitjana de les mescles és de 110 kg/m^3 , caldrien 27 anys per fer-la desaparèixer. Aquest temps s'ha calculat suposant que la canonada només absorbeixi la sal del Cogulló i, per tant, no té en compte l'evacuació dels residus del procés d'exploració de les mines.

1.5. Línies de treball futures

Durant la realització d'aquesta tesi s'ha constatat que la literatura existent en relació al transport de mescles amb sediments és molt extensa en el seu conjunt però limitada en el cas de concentracions i mides de partícula baixes. De la mateixa manera, no existeix una forma senzilla de calcular la viscositat d'una mescla tenint en compte els diferents compostos dissolts en ella i les partícules en suspensió que arrossega. Els resultats obtinguts en els capítols 3 i 4 permeten ampliar aquest coneixement per un tipus de mescles concret, generat a partir d'una sal extreta de les mines de Súria i amb un diàmetre de partícula en suspensió de 150 µm, aproximadament. Tot i així, el treball realitzat en ambdós capítols es podria estendre en la direcció següent:

En el Capítol 3 s'han obtingut diferents valors de viscositat cinemàtica en funció de la densitat i la temperatura d'una mescla concreta, gairebé tots a 25°C. S'han obtingut altres valors a 16, 20 i 30°C, però se n'haurien de generar més per tal de definir més clarament el comportament de la viscositat cinemàtica de les mescles assajades en funció de la temperatura. A més, atès que aquest projecte pretén estudiar el comportament de les salmorres que circulen per l'interior del Col·lector de Salmorres, seria interessant realitzar una bateria d'assajos a 10°C i a 5°C de temperatura, ja que la mescla que circula per aquest tub pot assolir valors força inferiors als

16°C. De la mateixa manera, com que les densitats de les mescles de salmorra estudiades es troben entre 1100 i 1200 kg/m³, es desconeix el valor de la viscositat de les mescles d'entre 1000 i 1100 kg/m³. La realització de més assajos amb mescles situades en aquest rang podria aclarir aquest dubte. Finalment, seria molt interessant dur a terme més mesures de viscositat de les mescles filtrades per poder-les comparar amb les que transporten sòlids: fa la sensació que la presència d'una quantitat mínima de sediments fins modifica en gran mesura la viscositat de la mescla, però no es pot afirmar rotundament amb els valors obtinguts en aquest document, ja que són pocs.

Per la seva banda, en el Capítol 4 s'han determinat alguns valors de la velocitat límit de deposició d'una sorra amb un d_{50} proper a les 150 µm transportada per aigua o per una dissolució saturada de sal, en funció de la concentració de sediments transportats. Segons les diferents publicacions relacionades (Durand i Condolios 1952; Gillies et al. 1991; Wilson i Tse 1984, entre d'altres), el càlcul de la velocitat de deposició depèn de diversos paràmetres: la densitat del líquid de transport, la densitat dels sòlids transportats, la mida de partícula, el diàmetre de la canonada i la concentració de sediments. Els resultats obtinguts en el Capítol 4 s'han obtingut a partir d'uns assajos realitzats amb una densitat dels sòlids, una mida de partícula i un diàmetre de canonada constants, i amb dues densitats de líquid de transport diferents. El paràmetre que s'ha fet variar ha sigut la concentració en volum de partícules en suspensió. Per tant, seria de molt interès dur a terme diferents sèries d'assajos, per a concentracions de sediments baixes (inferiors al 5% en volum), tot variant els paràmetres constants. A més, els resultats obtinguts no concorden amb les fórmules proposades en la literatura, probablement perquè s'ha treballat amb concentracions de sediments molt baixes: els valors de velocitat de deposició obtinguts són més propers als valors teòrics com més alta és la concentració de sediments assajada. Així doncs, també seria d'interès augmentar la mostra de diferents concentracions de sediments assajades per tal de comprovar si per a concentracions més altes els resultats encaixen amb els models proposats en la literatura.

Pel que fa al Capítol 5, en el qual es presenten les dades de cabal, pressió i temperatura recollides en un tram del Col·lector de Salmorres durant un mes i mig, hauria sigut interessant mantenir la campanya de camp durant un any sencer per tal d'abastar tot el cicle anual de temperatures. D'aquesta manera es podria saber si el comportament del flux a l'interior de la canonada canvia d'hivern a estiu. Per altra banda, en relació a l'existència de sediments a l'interior del col·lector, seria d'utilitat obtenir-ne una mostra per tal d'analitzar-ne el contingut i la granulometria: d'aquesta manera es podria saber quina és la capacitat real de decantació de la Bassa de Súria i quina mida de partícula tenen els sediments que aconseguixen introduir-se en el tub. També permetria determinar la composició d'aquests sediments i la seva cohesió: el transport de sòlids cohesius forma per si sol una altra branca de la literatura que no s'ha tractat en aquesta tesi. Finalment, es planteja com a treball futur la modelització numèrica del tram de col·lector estudiat, a partir de les dades obtingudes, mitjançant un model de dues capes, com el proposat per Gillies et al. (1991), és a dir, considerant un llit fix de sediments d'altura variable a la part baixa de la canonada.

2. Estat del coneixement

2.1. Hidràulica en canonades a pressió

L'estudi de la resistència al flux d'un líquid en una canonada a pressió distingeix dos tipus de fluxos: el laminar i el turbulent. Per tal de discernir entre un flux i l'altre, Reynolds proposa un criteri basat en un factor adimensional (nombre de Reynolds) que permet avaluar la preponderància de les forces viscoses sobre les d'inèrcia i es defineix de la següent manera:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (2.1)$$

On v és la velocitat mitjana del flux, D és el diàmetre del tub i ν és la viscositat cinemàtica del fluid.

El pas de flux laminar a turbulent en una canonada es produeix en traspasar un valor crític de Re , el qual pot adquirir valors molt diferents, que van de 2000 a 4000 (Sotelo 1995).

Per al càlcul de les pèrdues de càrrega per fricció produïdes en fer circular un flux per una canonada, Darcy i Weisbach proposen la següent equació:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.2)$$

On h_f són les pèrdues per fricció, f és el coeficient de fricció de Darcy-Weisbach, g és l'acceleració de la gravetat i L és la longitud del tub.

El coeficient de fricció f és funció de la rugositat relativa k/D , on k és la rugositat absoluta de la canonada, i del nombre de Reynolds, i s'han proposat diverses fórmules per tal de calcular-lo. Nikuradse (1933), per exemple, proposa una equació per al càlcul del factor de fricció vàlida per a tubs llisos amb valors de Re de fins a $3 \cdot 10^6$ que s'expressa de la manera següent:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \cdot \log \frac{Re \cdot \sqrt{f}}{2.51} \quad (2.3)$$

Per la seva banda, Colebrook i White (1939) proposen la següent relació per a la zona de règim turbulent intermedi:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} - 2 \cdot \log \left(\frac{D}{k} \right) = 1.14 - 2 \cdot \log \left(1 + 9.35 \cdot \frac{D}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (2.4)$$

L'equació de Colebrook i White és la més utilitzada, ja que també és vàlida per al règim turbulent rugós i llis, però té l'inconvenient de ser implícita, de manera que cal resoldre-la de forma iterativa per obtenir el valor del coeficient de fricció. És per això que alguns autors proposen altres fórmules de resolució més simple, com és el cas de Swamee i Jain (1976), amb la fórmula següent:

$$f = \frac{1.325}{\left[\ln \left(\frac{k}{3.7 \cdot D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (2.5)$$

Els valors del coeficient de fricció obtinguts mitjançant l'equació de Swamee i Jain coincideixen, tant per a tubs llisos com rugosos, amb els obtinguts mitjançant l'equació de Colebrook i White, amb diferències inferiors a l'1% (Kijjarvi 2011).

Com que els tubs comercials utilitzats no tenen una rugositat absoluta constant s'introdueix el concepte de rugositat mitjana, la qual s'obté a partir d'un procés invers. És a dir, una vegada obtingudes les pèrdues per fricció en una canonada de característiques hidràuliques i geomètriques conegudes es determina el coeficient f de la fórmula de Darcy-Weisbach i, posteriorment, amb nombres grans de Reynolds, el valor de k .

2.2.Solubilitat de les sals en aigua

La solubilitat d'una substància A és la proporció relativa d'aquesta en una solució que es troba saturada en relació a A, a una determinada temperatura i pressió. El concepte de solució saturada implica l'existència d'equilibri en els processos de dissolució i precipitació, és a dir, que la substància A dissolta es troba en equilibri amb la seva fase sòlida (International Union of pure and applied chemistry 1991).

Les sals dissoltes en les salmorres residuals de les explotacions mineres del Bages estan compostes en gran mesura per clorurs de sodi i, en menor mesura, per sulfats de calci (anhidrita, o guix en la seva versió dihidratada) i clorurs de potassi. També hi són presents en petit percentatge altres compostos com el clorur de magnesi i algunes partícules sòlides insolubles (Casas Garriga 2011; Sánchez-Juny et al. 2012).

Temperatura (°C)	Solubilitat NaCl (g NaCl/100g de dissolució)	Solubilitat CaSO ₄ (g CaSO ₄ /100g de dissolució)
0	26.28	0.174
10	26.32	0.191
20	26.41	0.202
25	26.45	0.205
30	26.52	0.208
40	26.67	0.210
50	26.84	0.207
60	27.03	0.201
70	27.25	0.193
80	27.50	0.184
90	27.78	0.173
100	28.05	0.163

Taula 2.1 Solubilitat del clorur de sodi i el sulfat de calci en aigua, per a diferents temperatures. El valor de la solubilitat fa referència al percentatge en massa capaç de dissoldre's en aigua abans de precipitar. Font: International Union of pure and applied chemistry (1991) i Marshall i Slusher (1966) respectivament.

La solubilitat d'aquestes sals en aigua depèn principalment de la temperatura del líquid, ja que la pressió a la qual es troba la mescla no té cap efecte significatiu (afecta fonamentalment a la solubilitat de gasos) (Averill and Eldredge 2012). En el cas del clorur de sodi, i per la majoria de sals, la seva solubilitat en aigua augmenta en augmentar la temperatura (Figura 2.1). En canvi, pel que fa al sulfat de calci, un augment de la temperatura no implica un augment de la solubilitat, sinó que aquesta assoleix un màxim al voltant dels 40°C (Figura 2.2). A més, com es pot comprovar en la Taula 2.1, la capacitat de l'aigua per dissoldre CaSO₄ és molt menor que en el cas del NaCl.

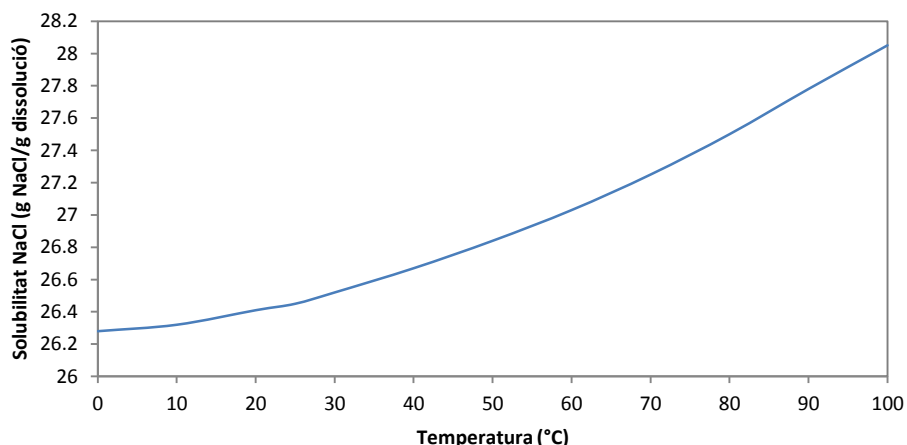


Figura 2.1 Representació gràfica dels valors de solubilitat del clorur de sodi en funció de la temperatura de la solució mostrats a la Taula 2.1. Font: International Union of pure and applied chemistry (1991).

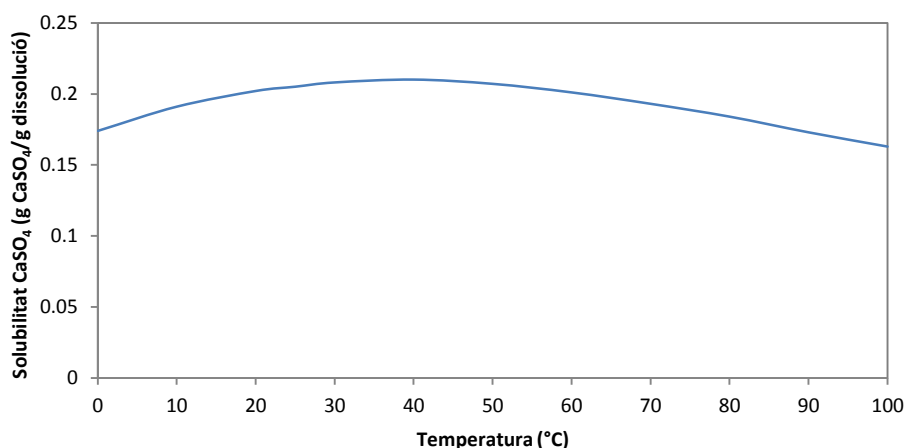


Figura 2.2. Representació gràfica dels valors de solubilitat del sulfat de calci en funció de la temperatura de la solució mostrats a la Taula 2.1. Font: Marshall i Slusher (1966).

La presència d'altres substàncies en una solució també pot fer variar la solubilitat d'un compost. Per exemple, si a una solució de clorur de sodi s'hi afegeix clorur de potassi la solubilitat del NaCl disminuirà, per l'efecte de l'ió comú (en aquest cas, l'ió Cl⁻).

Per altra banda, encara que el clorur de sodi i el sulfat de calci no tenen cap ió en comú, la solubilitat del CaSO₄ en una dissolució que contingui NaCl varia en funció de la concentració d'aquest últim. La Figura 2.3 mostra la relació entre la solubilitat del sulfat de calci en aigua i la concentració de clorur de sodi en la mateixa solució per a diferents temperatures, segons Bock (1961). Com es pot comprovar, la solubilitat del primer varia considerablement en funció de la molalitat del clorur de sodi.

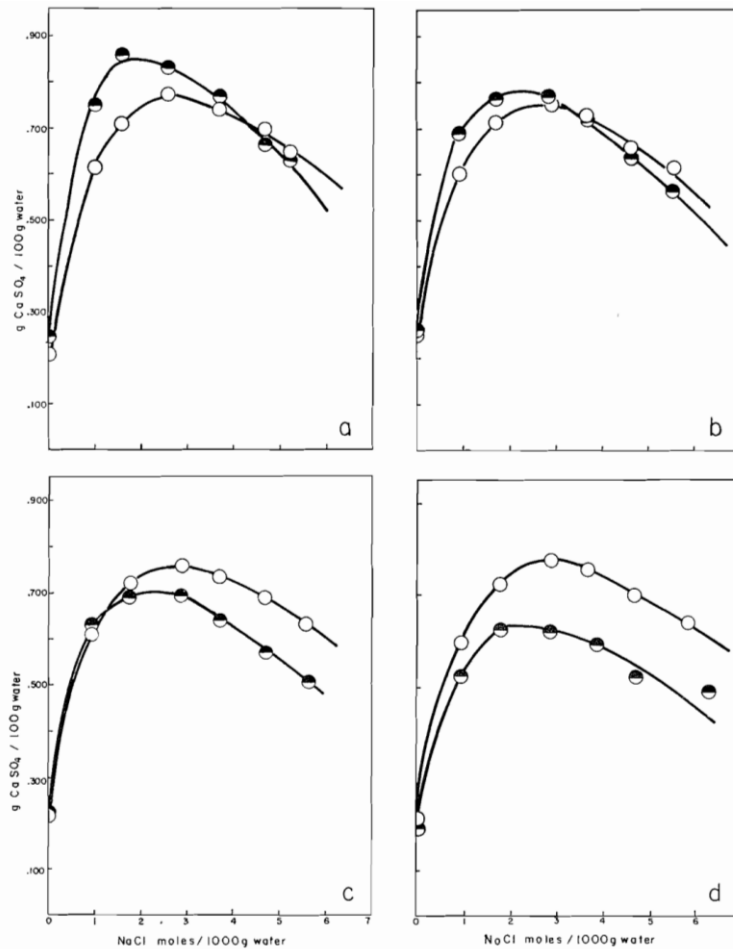


Fig. 4. Isotherms: (a) 25° C, (b) 30° C, (c) 40° C, (d) 50° C; ● CaSO₄ anhyd., ○ CaSO₄·2H₂O.

Figura 2.3 Solubilitat del sulfat de calci en funció de la concentració de clorur de sodi en la dissolució, a 25, 30, 40 i 50°C. Font: Bock (1961).

2.3. Transport de partícules en suspensió

Les mescles que circulen pel Col·lector de Salmorres contenen un petit percentatge de partícules sòlides en suspensió. Aquestes partícules insolubles poden modificar el comportament hidràulic del flux de salmorres o sedimentar a l'interior de la canonada, com es veurà a continuació. En primer lloc, però, és necessari definir els diferents paràmetres que intervenen en el procés de transport de sediments en una canonada a pressió.

En l'estudi del transport a pressió de mescles amb sediments (*slurries*, en anglès) es diferencia la fase líquida d'aquestes de la seva fase sòlida. La primera es considera el vehicle de transport i acostuma a ser l'aigua o, com en el cas d'aquest estudi, una dissolució de diferents compostos. La fase sòlida pot estar formada per partícules de qualsevol mida i en diferents concentracions, i no reacciona químicament amb la fase líquida.

Així doncs, es parlarà de *mescla* quan es faci referència al conjunt de les dues fases, de *líquid de transport* quan es faci referència només a la fase líquida, i de *sòlids* quan es faci referència a la fase sòlida. A cadascun dels tres casos se li associa una densitat mitjana (ρ_m , ρ_w i ρ_s , respectivament), que es relaciona amb les altres a partir de la concentració en volum de sòlids, mitjançant la següent fórmula:

$$\rho_m = \rho_w + C_V \cdot (\rho_s - \rho_w) \quad (2.6)$$

On la concentració en volum (C_V) equival al quocient entre el volum dels sòlids i el volum de la mescla.

El transport de mescles amb sediments en canonades a pressió es pot produir mitjançant diferents règims de flux, que es distingeixen entre si per la distribució, en la secció transversal, de les partícules transportades. Aquesta distribució depèn de la mida de les partícules, de la seva densitat, de la seva concentració en volum en la mescla i de la velocitat del flux de transport. Es poden classificar en els quatre tipus de règims de flux següents (Graf 1984):

- Flux homogeni, en què les partícules sòlides es distribueixen uniformement en la secció transversal de la canonada.
- Flux heterogeni, en què les partícules sòlides es distribueixen de manera gradual en funció de la seva mida i pes.
- Flux amb llit mòbil, saltació (amb o sense suspensió), en el qual es comença a formar un llit de partícules sòlides a la part inferior de la canonada, degut a que el flux no és capaç de mantenir-les totes en suspensió.
- Flux amb llit estacionari, en què les partícules sòlides formen un llit fix a la part inferior de la canonada. Les partícules de la capa que es troba en contacte amb el flux poden moure's lentament formant dunes.

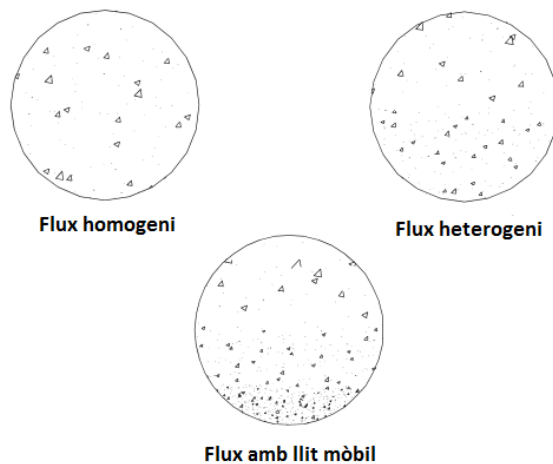


Figura 2.4 Règims de flux associats al transport de mescles amb sediments, en funció de la distribució de les partícules en la secció transversal de la canonada. Font: Moreno Avalos (2012).

Per altra banda, les mescles amb sediments es poden classificar en funció de la velocitat de decantació de les partícules sòlides, que depèn de la distribució de mida i de la densitat d'aquestes. La classificació és la següent:

- Mescles de no-decantació, les partícules sòlides de les quals decanten a velocitats inferiors a 0.1 mm/s. La mescla és homogènia durant el seu transport, fins i tot en règim laminar. Les fases sòlida i líquida es combinen formant una mescla líquida amb propietats que divergeixen de les del líquid original. En alguns casos el nou fluid pot considerar-se no-newtonià, fins i tot quan la concentració de sòlids és baixa.

- Mescles de decantació lenta, amb velocitats de decantació entre 0.1 mm/s i 1 mm/s. En aquest cas les partícules sedimenten en règim laminar i decanten lentament però en massa quan la mescla es troba en repòs.
- Mescles de decantació, en què les fases sòlida i líquida es troben separades. Durant el seu transport, les partícules sòlides formen un llit de sediments i les propietats del líquid es consideren inalterades per la presència de sòlids.
- Mescles de règim mixt, les quals contenen un ampli ventall de mides i/o densitats de partícules sòlides amb diferents velocitats de decantació.

Segons Cooke i Paterson (2014), les mescles amb sediments que contenen un percentatge significant (com a mínim d'un 18% de partícules de diàmetre inferior a 20 μm) de partícules de no-decantació o de decantació lenta formen mescles cohesives quan la concentració de sòlids és alta. En aquest cas, les partícules fines formen un fluid no-newtonià. Aquest fluid acostuma a traslladar-se en règim laminar degut a les altes velocitats necessàries per assolir el règim turbulent.

Velocitat límit de deposició

Atès que el flux heterogeni és el més econòmic pel que fa al transport de mescles amb sediments en canonades (Moreno Avalos 2012), els esforços en aquest camp s'han centrat en obtenir una equació de la velocitat límit de deposició, que és la màxima velocitat de transport a la qual els sòlids en suspensió sedimenten en lloc de ser arrossegats. És a dir, s'ha centrat en conèixer el límit que separa el flux heterogeni del flux amb llit mòbil.

La magnitud de la velocitat límit de deposició depèn principalment de la mida de les partícules transportades, la seva densitat, la concentració de sòlids i el diàmetre de la canonada (Kaushal et al. 2002). Així, segons Kaushal et al. hi ha fins a 60 correlacions diferents, la majoria de les quals es basen en el nombre de Froude de Durand (1952), F_L , i es limiten a un rang d'aplicabilitat determinat.

El nombre de Froude de Durand s'utilitza per a la determinació de la velocitat límit de deposició perquè permet comparar-la en canonades de diferent diàmetre intern (D) i per diferents densitats de flux (R_{sd}) sense haver de canviar l'escala de representació. Per al cas del transport de partícules en suspensió, aquest número queda definit per la següent expressió:

$$F_L = \frac{v_D}{\sqrt{2 \cdot g \cdot R_{sd} \cdot D}} \quad (2.7)$$

On v_D és la velocitat límit de deposició i R_{sd} és la densitat relativa del flux, és a dir:

$$R_{sd} = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w} \quad (2.8)$$

Alguns autors utilitzen expressions del nombre de Froude que no contenen el número 2 o la densitat relativa R_{sd} (Miedema and Ramsdell 2015).

Un dels primers treballs en aquest camp, doncs, va ser realitzat per Durand i Condolios (1952), per a diàmetres de tub d'entre 40 i 700 mm, i per a concentracions de sòlids d'entre el 2% i el 15% en volum. El resultat obtingut es presenta a la Figura 2.5, on es relaciona el nombre de

Froude de Durand amb la mida de les partícules transportades i alguns valors de concentració en volum sobre el total de la mescla.

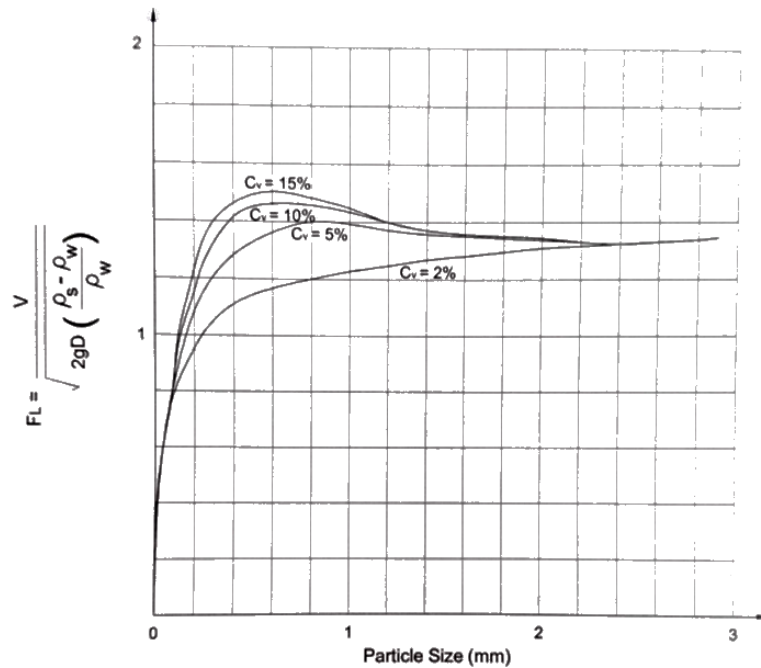


Figura 2.5 Relació entre el nombre de Froude de Durand i la mida de les partícules transportades per la mescla, per a diferents concentracions en volum (Durand i Condolios, 1952).

Per la seva banda, Schaan et al. (2000) desenvolupen una correlació empírica per determinar la velocitat de deposició, obtinguda mitjançant assajos amb partícules d'entre 90 μm i 4 mm de diàmetre i concentracions en volum entre el 15 i el 40%, que relaciona el nombre de Froude de Durand amb el nombre d'Arquímedes. Aquest últim també és adimensional i es defineix de la següent manera:

$$Ar = \frac{4 \cdot g \cdot d^3 \cdot \rho_w \cdot (\rho_s - \rho_w)}{3 \cdot \mu_w^2} \quad (2.9)$$

On d és el diàmetre de partícula representatiu i μ_w és la viscositat dinàmica del líquid de transport. El nombre de Froude de Durand es relaciona amb el d'Arquímedes mitjançant l'expressió següent:

$$F_L = \frac{a + b \cdot \ln(Ar)}{\sqrt{2}} \quad (2.10)$$

On a i b prenen el valor següent:

- per a $Ar > 86000$: $a = 1.35$ i $b = 0$,
- per a $2690 < Ar < 86000$: $a = 2.35$ i $b = -0.088$,
- per a $125 < Ar < 2690$: $a = 1.27$ i $b = 0.049$.

En el camp de l'enginyeria de mines, però, en el qual les partícules transportades o bé solen ser de mides grans o bé es troben en concentracions molt elevades, una de les formes més comuns per a determinar la velocitat límit de deposició és utilitzant el gràfic de Wilson (Wilson i Judge 1978; Wilson 1979). Aquest gràfic permet determinar la velocitat de deposició coneixent el diàmetre de la canonada, la mida de gra dels sediments transportats i la densitat

relativa dels sòlids ($S_s = \rho_s / \rho_w$). Segons el gràfic (Figura 2.6), la mida de partícula representativa que necessita de velocitats més elevades per mantenir-se en suspensió es troba al voltant de 0.5 mm, de tal manera que per a una canonada de 100 mm de diàmetre la velocitat necessària seria de 1.95 m/s, mentre que per a una de 350 mm de diàmetre seria de 4.2 m/s.

De les diferents formes presentades en aquest apartat per determinar la velocitat límit de deposició, i de la resta de correlacions que existeixen en la literatura, en aquest estudi s'utilitzarà la proposada per Durand i Condolios, pel fet de ser la que engloba concentracions menors de partícules sòlides. A més, és la forma de càlcul que proporciona velocitats de deposició més baixes i, per tant, situa les conclusions d'aquest estudi del costat de la seguretat.

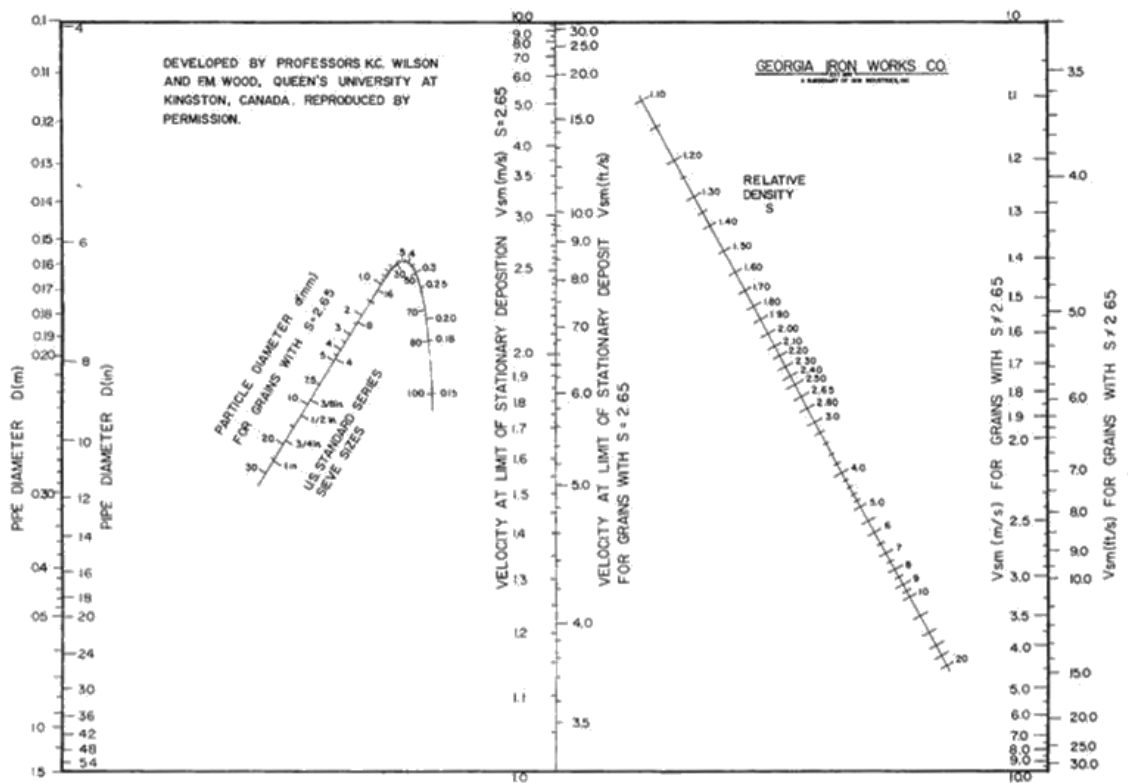


Figura 2.6 Gràfic de Wilson (1979) per a la determinació de la velocitat límit de deposició, en funció del diàmetre de la canonada, el diàmetre de partícula representatiu i la densitat relativa dels sòlids.

Finalment, cal dir que les formes de càlcul de la velocitat límit de deposició exposades es troben sota la hipòtesi que la canonada per la qual circula el flux està en posició horitzontal i rectilínia. Per a canonades amb pendent positiu, la velocitat de deposició pot arribar a augmentar fins un 40% i dificultar encara més l'arrossegament de les partícules sòlides, mentre que en canonades amb pendent negatiu aquesta velocitat decreix (Wilson i Tse 1984).

Per altra banda, cal tenir en compte que, quan les partícules sòlides transportades a través d'una canonada sedimenten degut a una aturada en la circulació del flux, la velocitat necessària per tornar-les a suspendre augmenta amb el temps de durada de l'aturada. Segons

Goosen (2017), en només 15 minuts d'aturada la "velocitat de resuspensió" pot superar en un 25% la velocitat límit de deposició.

Resistència al flux en transport de sediments

Pel que fa a les pèrdues per fricció produïdes durant el transport de les mescles amb sediments, un dels models empírics més coneguts per tal de descriure-les és el de Durand (1953). Aquest model està basat en un conjunt de dades obtingudes de 310 assajos duts a terme amb canonades de diàmetres entre 40 i 580 mm, diàmetres de partícula d'entre 0.2 i 25 mm i concentracions de sòlids entre el 2 i el 22% en volum, a partir de les quals proposa la correlació següent:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_w \cdot \left[1 + 85 \cdot C_V \cdot \left(\frac{g \cdot D \cdot \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}}{v^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{C_D}} \right)^{3/2} \right] \quad (2.11)$$

On $\frac{\Delta P}{\Delta L}$ és el gradient de pressió associat al flux de la mescla amb sediments, $\left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_w$ és el gradient de pressió associat al flux del líquid de transport i C_D és el coeficient d'arrossegament.

Per altra banda, si la concentració de partícules és baixa, la seva distribució en la canonada és homogènia, el líquid de transport és poc viscos i el flux és turbulent, les pèrdues per fricció en la canonada es poden estimar mitjançant el que s'anomena aproximació de pseudofluid (Cooke i Paterson 2014). Aquesta aproximació consisteix en considerar que la mescla amb sediments es comporta com un líquid, de forma que el pendent motriu associat al seu flux serà igual al d'un flux d'aigua neta, en les mateixes condicions. D'aquesta manera, el gradient de pressió del flux de la mescla compliria la següent relació:

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{\rho_m}{\rho_w} \cdot \left(\frac{\Delta P}{\Delta L}\right)_w \quad (2.12)$$

En la Figura 2.7 es poden observar les diferències entre el model de Durand i l'aproximació de pseudofluid, a partir de dues corbes generades en les mateixes condicions de flux. També es mostra la corba que s'obtindria en el cas d'un flux d'aigua neta. Com es pot comprovar, la corba de Durand presenta gradients de pressió elevats per a velocitats de flux baixes. Aquest comportament aniria associat a la reducció de la secció transversal de la canonada provocada per la formació d'un llit de sediments en el seu interior. Aquesta corba també presenta un mínim que coincidiria amb la velocitat límit de deposició de les partícules transportades per la mescla. Finalment, per a velocitats altes, la corba de Durand i la de pseudofluid es troben molt a prop l'una de l'altra.

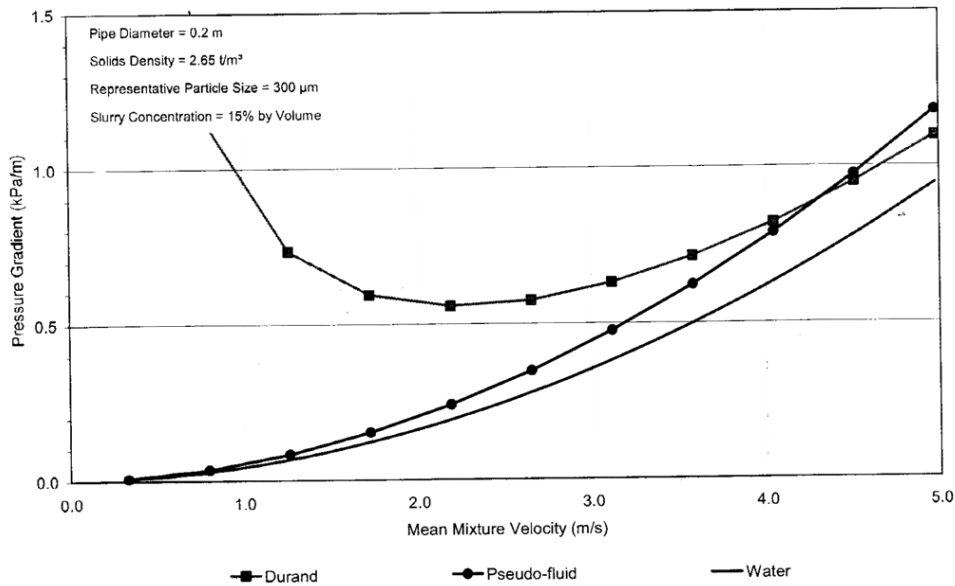


Figura 2.7 Valors del gradient de pressió d'un flux de mescla amb sediments en funció de la seva velocitat, segons el model de Durand (1953) i segons l'aproximació de pseudofluid. Es mostra també la corba relativa a un flux d'aigua neta. Font: Cooke i Paterson (2014).

En cas d'existir un llit de sediments en tot moment, Gillies et al. (1991) proposen un model de dues capes, vàlid per a mescles de decantació amb diàmetres de partícula grans. Aquest model considera que el flux de mescla amb sediments es troba dividit en dues capes diferents:

- La capa inferior, formada per una acumulació de partícules transportades mitjançant un llit mòbil.
- La capa superior, formada per una barreja entre el líquid de transport i les partícules que es mantenen en suspensió.

Atès que en aquest estudi es tractarà amb mescles de baixa concentració en volum de sediments, el mètode utilitzat en la modelització dels fluxos serà el de pseudofluid.

2.4. Viscositat de les salmorres

La viscositat d'un fluid (μ) és una mesura de la seva resistència a fluir, com a resultat de la interacció i cohesió de les seves molècules (Sotelo 1995). Es defineix com el quocient entre la tensió tangencial τ (*shear stress*, en anglès) i el coeficient de cisallament γ (*shear rate*), i les seves dimensions són $[M L^{-1} T^{-1}]$, expressades en Pa·s en el Sistema Internacional d'Unitats (SI). En el cas dels fluids newtonians el seu valor és constant.

$$\mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.13)$$

Per tal de comparar la viscositat de líquids diferents pot ser convenient treballar amb la viscositat cinemàtica (ν), que relaciona la viscositat dinàmica del fluid amb la seva densitat (ρ):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.14)$$

Les seves dimensions són $[L^2 T^{-1}]$, és a dir, m^2/s en el SI.

Com és ben sabut, la viscositat d'un líquid varia en funció de la temperatura a què es troba. En el cas de les dissolucions de sal, a més, aquesta viscositat també varia en funció de la

concentració del solut. Diversos autors, començant per Applebey (1910), han estudiat com varia la viscositat de l'aigua quan se li afegeix un determinat compost soluble, com ara el clorur de sodi o el clorur de potassi. En la Figura 2.8 es mostra la relació proposada per Dajnov (1982) entre la viscositat d'una dissolució de sal i la seva temperatura, per a diferents concentracions de solut. Com s'hi pot observar, a més concentració de sal més elevada és la viscositat de la solució. Tot i així, Dajnov (1982) no especifica a quin compost corresponen les corbes de la figura. Sí que ho fan Kestin et al. (1981) quan presenten en diverses taules els valors de viscositat de les solucions de clorur de sodi, en funció de la seva temperatura (entre 20 i 150°C) i de la concentració de solut (entre 0 i 6 mol/kg). Gonçalves i Kestin (1977) presenten els valors de viscositat de les solucions de clorur de potassi per a temperatures d'entre 25 i 50°C i concentracions de solut de fins a 4.55 mol/kg, i Phang i Stokes (1979) fan el mateix per a solucions de clorur de magnesi, a 25°C i per a concentracions d'entre 0 i 6 mol/kg.

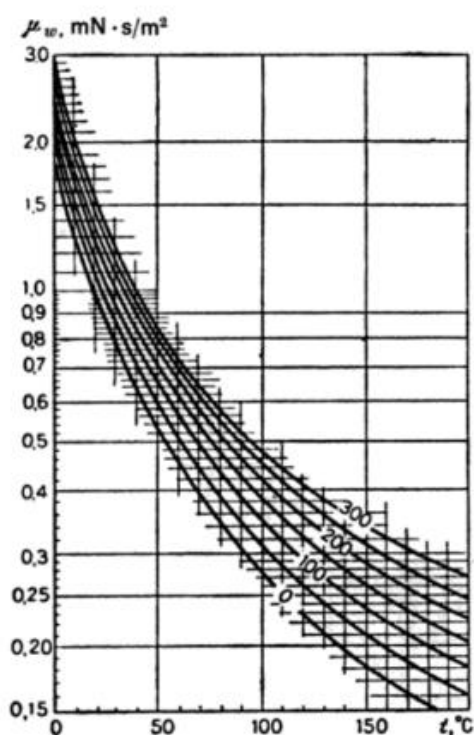


Figura 2.8. Relació entre la viscositat μ_w de l'aigua i la seva temperatura, per a diverses concentracions de sal dissolta, en kg/m^3 . Font: Dajnov (1982).

Tot i així, en aquest estudi es tracta amb una sal formada principalment per NaCl, però que també conté KCl, MgCl_2 i CaSO_4 , entre d'altres compostos, i la viscositat de la mescla generada per aquesta sal varia amb la seva interacció. En el cas de les solucions de NaCl + KCl, per exemple, Zhang i Han (1996) presenten la seva viscositat a 25°C per a diferents relacions molars entre els dos soluts i per a concentracions d'entre 0 i 6 mol/kg (Figura 2.9). De la mateixa manera, Qiblawey i Abu-Jdayil (2010) proporcionen els valors de viscositat de les solucions formades per NaCl i MgCl_2 entre 25 i 45°C, per a diferents relacions molars i concentracions de solut d'entre 0 i 4 mol/kg.

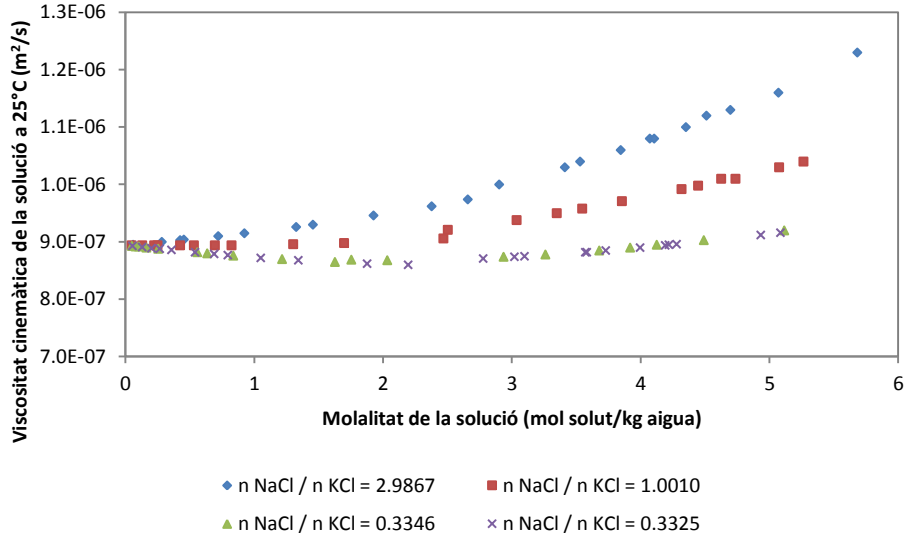


Figura 2.9 Viscositat cinemàtica de diverses solucions formades per aigua + NaCl i KCl, per a diferents relacions molars entre els dos soluts, en funció de la seva molalitat. Font: Zhang i Han (1996).

A més de la interacció entre diferents soluts, però, cal tenir en compte que la presència de partícules sòlides insolubles en la mescla de salmorra també modifica la viscositat d'aquesta. Segons Gillies et al. (1991), quan una mescla conté material insoluble en forma de fins és necessari mesurar-ne la viscositat experimentalment. Tot i així, en la literatura es poden trobar diverses equacions per al càlcul de la viscositat en aquests casos, començant per la proposada per Einstein (1906), pensada per a partícules esfèriques:

$$\frac{\mu_m}{\mu_w} = 1 + 2.5 \cdot C_V \quad (2.15)$$

On μ_m és la viscositat de la mescla, μ_w és la viscositat del líquid de transport i C_V és la concentració en volum de la fase sòlida. Aquesta equació només és vàlida per un flux de transport homogeni amb concentracions de fins inferiors al 2% (Rutgers 1962) i sent l'aigua el líquid de transport. En la literatura es troben altres correlacions basades en la d'Einstein, com la de Kunitz (1926), que segons l'autor és vàlida per a concentracions més elevades:

$$\frac{\mu_m}{\mu_w} = \frac{1 + 0.5 \cdot C_V}{(1 - C_V)^4} \quad (2.16)$$

En d'altres correlacions hi apareix un paràmetre d'ajust anomenat "fracció sòlida màxima" (Konijn et al. 2014), C_{Vmax} , com en el cas de Chong et al. (2007):

$$\frac{\mu_m}{\mu_w} = \left(1 + 0.75 \cdot \frac{\frac{C_V}{C_{Vmax}}}{1 - \frac{C_V}{C_{Vmax}}} \right)^2 \quad (2.17)$$

En aquesta correlació, C_{Vmax} es troba entre el 50 i el 60%, segons els assajos realitzats per Konijn et al. (2014) per a partícules de 15, 30 i 40 μm i amb dos líquids de transport de diferent viscositat.

Totes les correlacions presents en la literatura per al càlcul de la viscositat de les mescles amb sediments estan dissenyades per funcionar amb partícules d'un mateix diàmetre, per la qual cosa és necessari mesurar la viscositat de les mescles en cada cas concret, ja que aquestes

solen tenir més varietat de mides de gra. Tampoc tenen en compte la possibilitat de tractar amb sòlids cohesius; aquests formen part d'una altra branca de la literatura que no es mencionarà aquí.

Viscosímetre Ostwald:

En el Capítol 3 d'aquest estudi es mostraran diferents assajos realitzats amb un viscosímetre d'Ostwald, per la qual cosa s'explica a continuació el seu funcionament (Hardy 1962).

Un viscosímetre, com el seu nom indica, és un aparell que permet determinar la viscositat d'un fluid. En el cas d'un viscosímetre d'Ostwald, aquesta es determina a partir de la mesura del temps que triga el fluid en passar, per gravetat, a través d'un capil·lar. Aquest temps es relaciona amb la viscositat del fluid per comparació amb el temps obtingut per un líquid de viscositat coneguda, que actua de patró. El diàmetre del capil·lar és el que determina el rang de mesura del viscosímetre: com menor és la viscositat del fluid, menor ha de ser aquest diàmetre.

Com es pot veure a la Figura 2.10, el viscosímetre d'Ostwald consisteix en un tub en forma d'U obert per tots dos extrems. En una banda de la U el tub conté en el seu interior un capil·lar del diàmetre que correspongui, en funció del seu rang de mesura, mentre que a l'altra banda s'hi troba una petita cavitat (punt C).

El funcionament és molt senzill: s'omple la cavitat C amb la mescla corresponent a través de l'extrem del tub més proper i posteriorment es xucla des de l'altre extrem fins a omplir completament el capil·lar. Quan es deixa de xuclar, la mescla tendeix de nou cap a l'equilibri i, per tant, s'inicia el buidat del capil·lar. Durant aquest buidat cal mesurar el temps que triga el flux a anar del punt A al punt B. Ambdós punts es troben referenciats amb una marca circular.

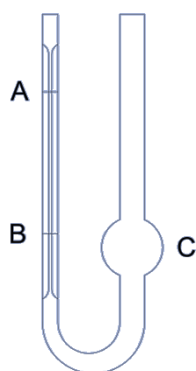


Figura 2.10 Esquema del viscosímetre d'Ostwald utilitzat en aquest estudi.

Pel que fa a la determinació de la viscositat a partir de les mesures obtingudes, es fa ús de l'equació de Poiseuille (1846), la qual relaciona la viscositat dinàmica amb les característiques del viscosímetre usat i el temps de descens del fluid:

$$\mu_i = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot t_i \cdot P_i}{8 \cdot L \cdot V} \quad (2.18)$$

On r és el radi del tub capil·lar de longitud L per on flueix un volum V de líquid, durant un temps t_i i sota una pressió P_i . Atès que r , L i V són constants per un mateix viscosímetre, es pot considerar el coeficient invariànt adimensional següent:

$$K = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot L \cdot V} \quad (2.19)$$

Per tant, considerant la constant K i que la pressió que exerceix la columna de líquid segueix la relació $\Delta P = \rho \cdot g \cdot h$ s'obté:

$$\mu_i = K \cdot \rho_i \cdot g \cdot h \cdot t_i \quad (2.20)$$

Com que h també és una constant per un tub determinat i g és l'acceleració de la gravetat, es poden escriure tots els termes constants com un nou paràmetre constant K' de dimensions L^2/T^2 . D'aquesta manera l'expressió de la viscositat dinàmica queda de la manera següent:

$$\mu_i = K' \cdot \rho_i \cdot t_i \quad (2.21)$$

El paràmetre K' depèn de la geometria del viscosímetre i normalment ve donat pel distribuïdor de l'aparell. En cas de no disposar d'aquesta informació, es pot determinar mitjançant viscositats conegudes com ara la de l'aigua, com s'ha fet en aquest cas. Així, la viscositat dinàmica de l'aigua ve donada per l'expressió:

$$\mu_{H_2O} = K' \cdot \rho_{H_2O} \cdot t_{H_2O} \quad (2.22)$$

Finalment, coneguda la densitat del líquid del qual es vol mesurar la viscositat, aquesta es pot obtenir per comparació a partir de la relació següent:

$$\mu_i = \mu_{H_2O} \cdot \frac{\rho_i \cdot t_i}{\rho_{H_2O} \cdot t_{H_2O}} \quad (2.23)$$

3. Assajos duts a terme amb diferents concentracions de sal

En aquest capítol es presenten els assajos duts a terme amb unes mescles de salmorra generades amb aigua i amb sal extreta de les mines de Sùria, en diferents concentracions. Aquests assajos s'han realitzat en dos circuits experimentals, que s'anomenaran Circuit experimental 1 i Circuit experimental 2, construïts en el Laboratori de Mecànica de Fluids de l'Escola de Camins de Barcelona.

3.1. Circuit experimental 1

3.1.1. Objectius

L'objectiu dels assajos que es detallen en aquest apartat és estudiar el comportament hidràulic, en una canonada a pressió, d'unes salmorres generades amb una sal extreta de les mines de Sùria. Més concretament:

- Ajustar el model de pèrdues d'energia, tant locals com repartides, del circuit experimental amb aigua neta per tal d'aplicar-lo als assajos duts a terme amb les mescles de salmorra.
- Determinar la viscositat de les mescles de salmorra generades, en funció de la seva concentració de sal.
- Fer un estudi qualitatiu del comportament de la salmorra durant el seu transport, pel que fa a la possible precipitació de sal o sedimentació de matèria insoluble, en funció de la concentració de sal i del cabal circulant.
- Conèixer quina és la màxima concentració de sal que la mescla és capaç de transportar.

3.1.2. Descripció del model

3.1.2.1. Circuit experimental

Tal i com s'ha explicat al Capítol 1, la instal·lació experimental utilitzada en el laboratori aprofita la que es va fer servir en un estudi realitzat per FLUMEN per encàrrec de l'empresa Aquatec (Sánchez-Juny et al. 2012). Aquest circuit inicial, però, ha sigut objecte de diverses modificacions per adaptar-lo millor als objectius de l'estudi. El resultat final es presenta a continuació.

El circuit experimental definitiu consta d'un tram d'impulsió, en què es bombeja el líquid des d'un dipòsit acumulador fins al punt de cota més elevat (punt A), un panell de canonades en forma de serpentí i un tram de retorn, des del punt de cota més baixa del panell de canonades (punt B) fins al dipòsit acumulador. Així doncs, quan es faci referència al panell de canonades s'estarà parlant del tram de circuit comprès entre els punts A i B. Aquests punts es troben ubicats en l'esquema del circuit presentat a la Figura 3.1.

El recorregut complet, format per canonades de PEAD i PVC (en alguns trams, PVC transparent), mesura 71 metres de llarg. El diàmetre exterior dels tubs és de 110 mm (100 mm l'interior), amb les excepcions del tub d'impulsió i el de desguàs, que són de 90 i 75 mm, respectivament.

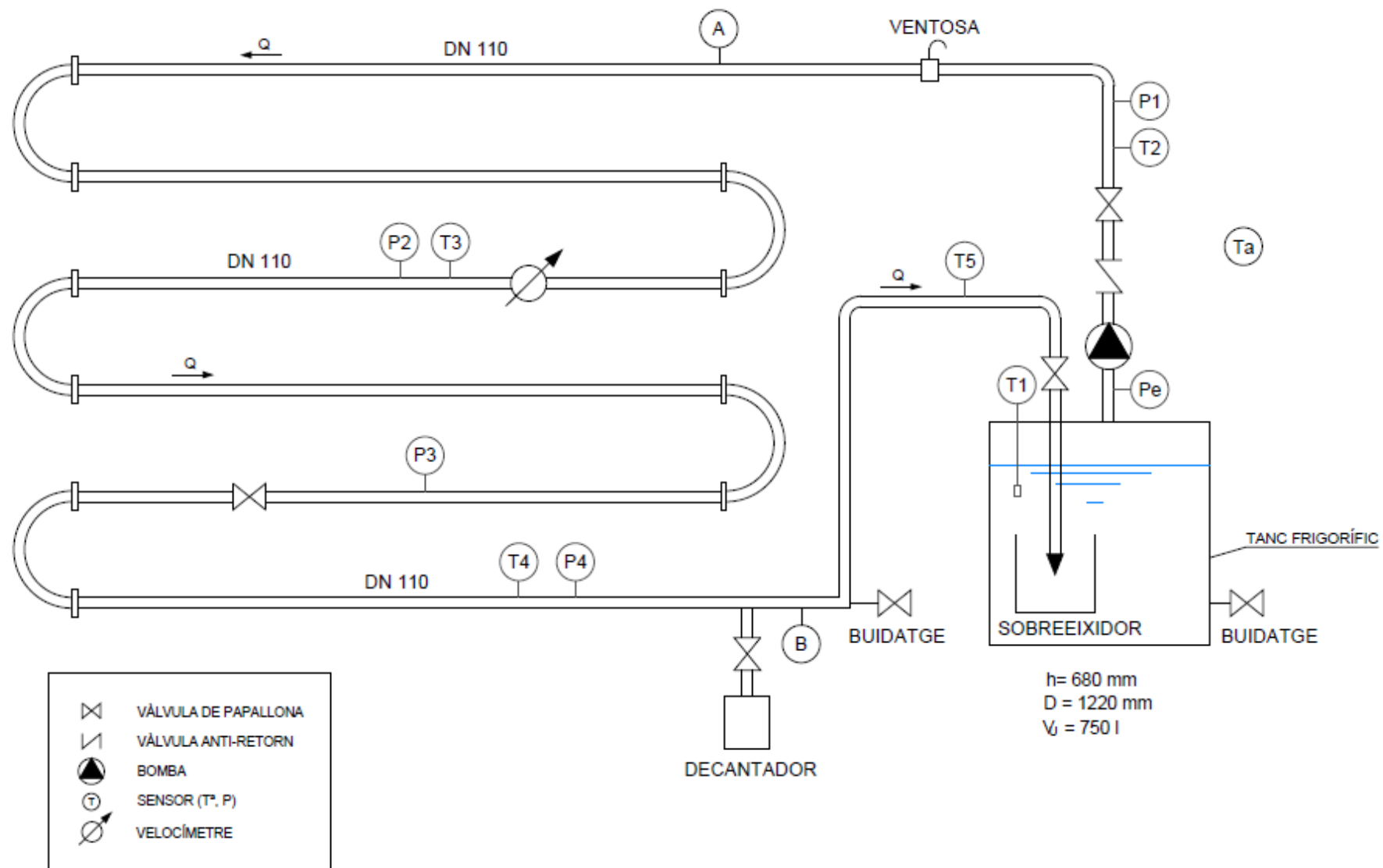


Figura 3.1 Esquema del circuit experimental.

El dipòsit en el qual comença i acaba el circuit és un tanc frigorífic, que permet refrigerar la mescla per poder dur a terme assajos a baixes temperatures. Té una capacitat d'emmagatzematge de més de 750 litres i incorpora unes pales rotatòries que permeten mantenir el líquid en moviment per una millor homogeneïtzació de les mescles. La impulsió de la mescla des del dipòsit es duu a terme mitjançant una bomba centrífuga exterior. Al llarg del circuit s'han instal·lat quatre sensors de pressió, un sensor de pressió negativa, cinc de temperatura i un cabalímetre, tal i com es mostra a la Figura 3.1. Tots ells envien les lectures a un enregistrator de dades, que s'encarrega de registrar-les.

Per tal de facilitar la presentació dels resultats, es defineixen tres trams, als quals s'anirà fent referència al llarg d'aquest apartat:

- Tram 1: Tram de canonada entre els sensors de pressió P1 i P2.
- Tram 2: Entre els sensors de pressió P2 i P3.
- Tram 3: Entre els sensors de pressió P3 i P4.

3.1.2.2. Equips i sensors utilitzats

A continuació es detallen breument les característiques dels equips i els sensors utilitzats en la campanya d'assajos.

Tanc frigorífic

El tanc de refrigeració és de la casa Hackman Wedholms i té una capacitat d'emmagatzematge superior als 750 litres, amb un diàmetre interior d'1,22 metres i una altura útil de 70 centímetres (Figura 3.2). En els assajos presentats en aquest apartat no ha sigut necessària la utilització de la capacitat de refrigeració del tanc, i simplement s'ha fet servir de dipòsit.



Figura 3.2 Tanc frigorífic Hackman Wedholms utilitzat com a dipòsit acumulador.

Sensors de pressió

Són transmissors de pressió de membrana aflorant de la casa Messtech, model FR-401, d'acer inoxidable i amb sensor de mesura ceràmic. Hi ha 5 sensors punxats a la canonada: un a l'entrada de la bomba (P_e), un a la sortida de la bomba (P1) i tres a la zona del panell de canonades (P2 a P4) (veure Figura 3.1). El rang de mesura dels sensors P1 a P4 va de 0 a 1.5 bar, i el del sensor P_e va de -1 a 0 bar. L'error combinat dels sensors és del 0,3% del fons d'escala. Els sensors P1 a P4 han sigut calibrats en estàtic en el mateix circuit, en una columna d'aigua neta.



Figura 3.3 Transmissor de pressió Messtech, model FR-401.

Sensors de temperatura

Són sensors RTD (detectors de temperatura per resistència) de la casa Desin, model PT100, 1/10 DIN. Tenen una tolerància de ± 0.03 °C a 0 °C i de ± 0.08 °C a 100 °C. Estan fabricats amb platí amb una resistència de 100 ohms a una temperatura de 0 °C. Hi ha 5 sensors punxats a la canonada: Un a l'interior del dipòsit (T1), un al tram de retorn del circuit (T5) i tres a la zona del panell de canonades (T2 a T4) (Figura 3.1). Tots els termòmetres s'han calibrat per conèixer les diferències de mesura entre ells: el desviament entre ells no supera els 0,3 graus.



Figura 3.4 Sensor de temperatura RTD Desin, model PT100.

Sensor de temperatura ambient

És del mateix tipus i model que els sensors de temperatura però es troba a l'exterior de la canonada, en el punt més allunyat del dipòsit acumulador.

Cabalímetre

És de la casa Sensotec, model VTH100. Està dissenyat per aplicacions en líquids poc viscosos i poc densos, amb nombres de Reynolds superiors a 5000 i en rangs de treball inferiors a 6 m/s, en canonades de DN15 a DN500. Es val d'un molinet que s'insereix a l'interior de la canonada i que permet al sensor relacionar el número de voltes donades en un temps determinat amb la velocitat del flux. Per tant, el cabal es determinarà de forma indirecta, a partir d'aquesta mesura i del diàmetre interior de la canonada punxada. Té un error de precisió de 0.03 m/s.



Figura 3.5 Cabalímetre Sensotec, model VTH100.

Bomba centrífuga

La bomba que s'encarrega d'impulsar la salmorra des del dipòsit a través del circuit és una centrífuga exterior de la casa Hasa, model RGM-S-17/2, amb una potència màxima d'1.1 kW. La Figura 3.7 mostra la seva corba característica teòrica, que coincideix amb l'obtinguda en els assajos realitzats amb aigua.



Figura 3.6 Bomba centrífuga exterior Hasa, model RGM-S-17/2.

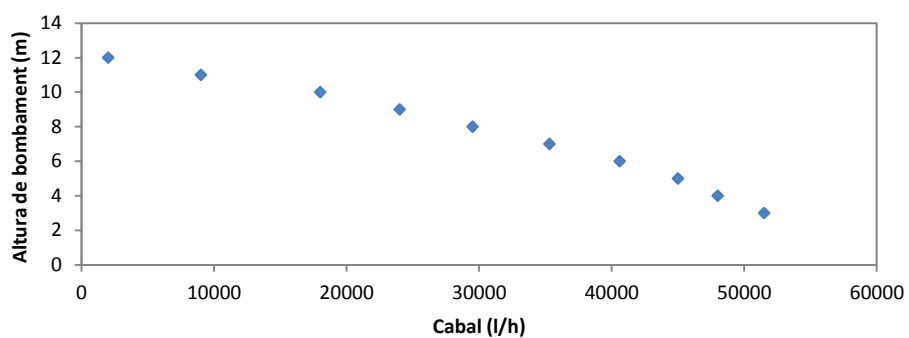


Figura 3.7 Corba característica de la bomba centrífuga Hasa, model RGM-S-17/2.

Enregistrator de dades

La recollida de dades es fa amb un enregistrator de dades de la casa Campbell, model CR1000, de 8 canals d'entrada analògics, al qual es connecten tots els sensors per cable. La seva freqüència màxima de registre de dades és de 2 segons.



Figura 3.8 Enregistrador de dades Campbell, model CR1000, encarregat del registre de les lectures dels sensors instal·lats al llarg del circuit.

3.1.3. Característiques de la salmorra

Els assajos exposats en aquest apartat s'han dut a terme amb diferents mescles de salmorra. La diferència entre les diverses mescles utilitzades rau en la concentració de sòlids de cadascuna, tal i com es mostra a la Taula 3.1. Aquestes mescles s'han preparat en el mateix laboratori a partir d'aigua de xarxa i de sal extreta directament de la mina de Súria. Per tal d'assegurar la màxima dissolució de la sal en l'aigua s'ha fet circular durant almenys una hora a través del circuit, tot remouent a la vegada el líquid contingut en el dipòsit acumulador.

La densitat i la concentració de sòlids de cada mescla s'han mesurat a posteriori a partir d'una mostra de salmorra extreta en circulació. La densitat s'ha mesurat per volumetria, mentre que la concentració de sòlids s'ha calculat a partir del producte del percentatge en massa de la mescla (obtingut per dessecat de la mostra) per la seva densitat.

Mescla	Densitat (kg/m ³)	Percentatge en massa de sòlids (kg de sòlids / kg de mescla · 100)	Concentració de sòlids (kg de sòlids / m ³ de mescla)
SAL_B	1157.5	22.2	258
SAL_C	1141.6	20.0	229
SAL_D	1134.1	19.2	217
SAL_E	1124.1	18.5	209
SAL_F	1109.3	16.9	187

Taula 3.1 Densitat, percentatge en massa de sòlids i concentració de sòlids de cadascuna de les mescles fabricades per a la realització dels assajos. Els sòlids indicats en la segona i tercera columnes fan referència al total de partícules sòlides, ja siguin solubles o insolubles.

La sal utilitzada per dur a terme les mescles no és exactament la sal que circula pel Col·lector de Salmorres ja que està extreta directament de la mina i per tant no ha passat per cap tractament d'extracció del clorur de potassi. Malgrat tot, es considera representativa pel que fa a l'estudi del comportament de la salmorra atès que el pes d'aquest compost no arriba al 3% en massa del conjunt de la sal. A més, conté els mateixos materials insolubles susceptibles de sedimentar. La composició química de la sal es mostra a la Taula 3.2.

Component	% en massa
Sodi (Na)	35.7
Calci (Ca)	0.60
Magnesi (Mg)	0.24
Estronci (Sr)	Traces
Potassi (K)	1.2
Bari (Ba)	No detectat
Bor (B)	No detectat
Bicarbonats (HCO ₃)	Traces
Clorurs (Cl)	57.6
Sulfats (SO ₄)	2.7
Bromurs (Br)	Traces
Insolubles	1.14

Taula 3.2 Percentatge en massa dels diferents components presents en una mostra de sal procedent de la mina de Sùria.

Els resultats de la Taula 3.2 mostren el percentatge en massa d'ions de la mostra de sal. A diferència de la sal utilitzada en el projecte de 2012 detallat al Capítol 1 (Sánchez-Juny et al. 2012), la sal utilitzada ara té un percentatge una mica més elevat de calci i un percentatge inferior de sodi (el 2012, Na: 37,8 % en massa i Ca: 0,55 % en massa).

A partir del càlcul dels mols de cada element en 100 g de mostra s'han pogut associar els cations (elements amb càrrega positiva) amb els seus anions (elements amb càrrega negativa) corresponents, considerant que els cations de sodi, magnesi i potassi formen clorurs i que el calci forma sulfats. Es tracta d'un càlcul que dóna una idea aproximada del pes percentual de cada compost en la mostra de sal utilitzada (Taula 1.1).

Com es pot comprovar, la sal està formada bàsicament per clorur de sodi (NaCl), i en menor mesura de sulfat de calci (CaSO₄) i clorurs de potassi (KCl) i de magnesi (MgCl₂). També té un petit percentatge de residus insolubles, concretament de fins.

Component	% en massa
NaCl	91.49
CaSO ₄	3.30
KCl	2.30
MgCl ₂	0.95
Insolubles	1.14

Taula 3.3 Percentatge en massa dels diferents compostos o elements insolubles en una mostra de sal provinent de la mina de Sùria.

Aquestes partícules insolubles han sigut analitzades amb més detall a partir d'una mostra de sòlids extreta de les canonades de connexió dels sensors de pressió amb el circuit (Figura 3.9). En primer lloc, la Figura 3.10 mostra tres ampliacions làser d'aquesta mostra, de menor zoom a major. En aquestes s'hi observen dues tipologies de partícules: les de major mida presenten formes geomètriques molt marcades, mentre que les altres són completament amorfes i

apareixen agregades a les primeres. Sembla clar que les partícules amb formes cristal·lines corresponen a un precipitat, mentre que les altres corresponen a les partícules fines insolubles. Com es pot veure en la Figura 3.11, extreta de Freyer i Voigt (2003), els cristalls que forma el sulfat de calci prenen una forma molt semblant a la dels que es poden veure en la mostra analitzada, mentre que els cristalls de clorur de sodi (de Oliveira Barauna et al. 2017) o de clorur de potassi (Guo et al. 2010) prenen formes cúbiques (Figura 3.12). Per altra banda, també cal tenir en compte la solubilitat del sulfat de calci en una solució de clorur de sodi, que depèn de la concentració de mols de NaCl d'aquesta. La Taula 3.4 mostra el límit de solubilitat del CaSO_4 hidratat a 25°C (temperatura al voltant de la qual s'han dut a terme els assajos) segons Bock (1961). Com es pot comprovar, el límit de solubilitat d'aquest sulfat se situa per sota de la concentració existent en la mescla en tres dels casos (B, C i D), mentre que en els altres dos se situa al mateix nivell (E) o per sobre (F). Això significa que en les tres primeres mescles de major concentració de sal s'hauria de produir precipitació d'aquest component, si bé és cert que es desconeix quin efecte tenen la resta de sals dissoltes en la concentració límit de saturació del CaSO_4 . Tot indica, però, que la mostra de sediments analitzada està composta per cristalls de CaSO_4 i per partícules insolubles en forma de fins agregades a aquests.

Mescla	Concentració NaCl (mols NaCl/1000g H ₂ O)	Concentració en massa CaSO ₄ (g CaSO ₄ /100g H ₂ O)	Concentració límit de solubilitat CaSO ₄ (g CaSO ₄ /100g H ₂ O)
SAL_B	4.47	0.94	0.69
SAL_C	3.91	0.83	0.72
SAL_D	3.72	0.78	0.74
SAL_E	3.55	0.75	0.75
SAL_F	3.18	0.67	0.76

Taula 3.4 Concentració de NaCl i CaSO₄ en les mescles de salmorra i concentració límit de solubilitat del CaSO₄ hidratat en una solució de NaCl a 25°C (Bock, 1961).



Figura 3.9 A l'esquerra, sensor de pressió amb restes de sediments acumulats. A la dreta, tub de connexió del sensor amb el circuit, també amb presència de partícules sòlides. Aquests sediments formen part de la mostra analitzada.

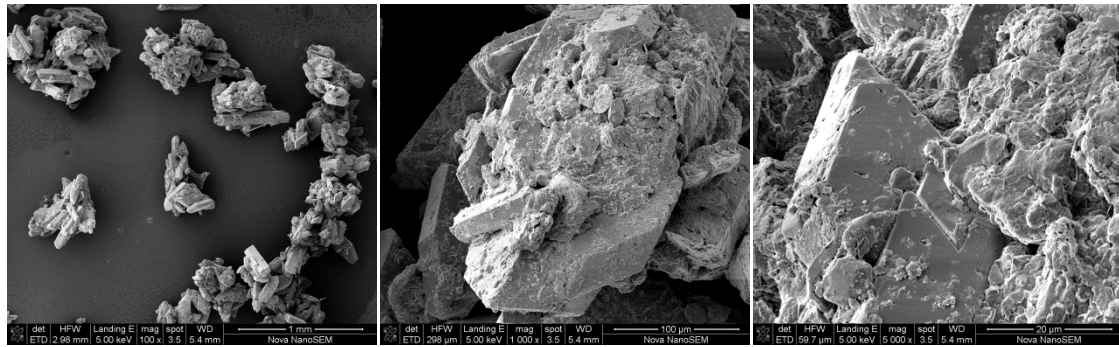


Figura 3.10 Ampliacions làser de la mostra de sediments analitzada (Figura 3.9).

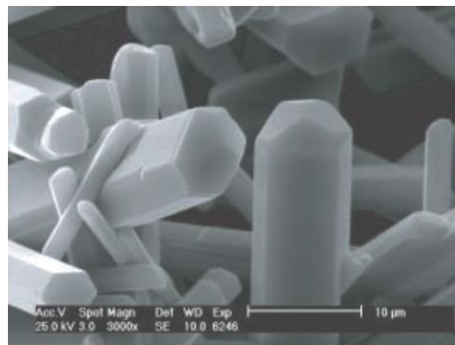


Figura 3.11 Ampliació làser de cristalls de CaSO_4 . Extret de Freyer i Voigt (2003).

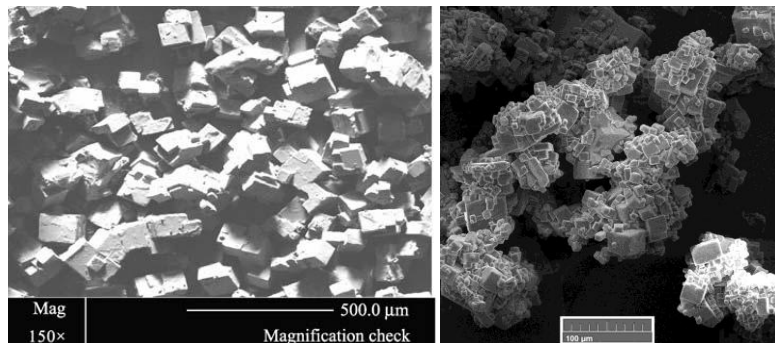


Figura 3.12 Ampliació làser de cristalls de KCl (esquerra) i de NaCl (dreta). Extret de Guo et al. (2010) i de De Oliveira Barauna et al. (2017), respectivament.

En segon lloc, en la Figura 3.13 s'hi representa l'anàlisi granulomètrica de la mateixa mostra de sediments. La corba granulomètrica (en negre) mostra un material heterogeni o mal seleccionat, ja que conté diverses mides de partícula dominants. Això es pot observar en la corba de color vermell, que representa el percentatge de partícules que queden retingudes en cada sedàs: la presència de diversos pics denota que hi ha certes mides de partícula que es repeteixen més que d'altres. Amb les dades a la mà es comprova que la mida de partícula que té una presència més elevada en la mostra de sediments, corresponent al màxim absolut d'aquesta corba, es troba entre 498 i 704 μm i representa un 25.4% del total. Pel que fa als dos màxims relatius de la corba vermella es pot dir, d'un costat, que entre els sedassos de 105 i 249 μm s'hi acumula un 28.75% de les partícules i, de l'altre, que entre els de 37 i 105 μm hi queda retingut un 19.16% d'aquestes. Finalment, per sota de 37 μm de diàmetre s'hi troben en gens menyspreable 22.58% de les partícules. La Figura 3.14 resumeix aquestes dades i hi afegeix el tram entre sedassos en el qual gairebé no hi ha presència de sediments,

corresponent als sedassos que mesuren de 249 a 498 μm . Aquesta distribució, doncs, permet classificar la mostra de sediments en quatre intervals de mida de partícula amb un pes similar.

El d_{50} de la mostra, o el diàmetre que correspon al 50% de la distribució acumulada (és a dir, la mediana), equival a 141.5 μm . El d_{50} s'acostuma a utilitzar com a mida de partícula representativa d'una mostra de sediments, però en el cas d'una distribució de mides heterogènia la seva representativitat disminueix.

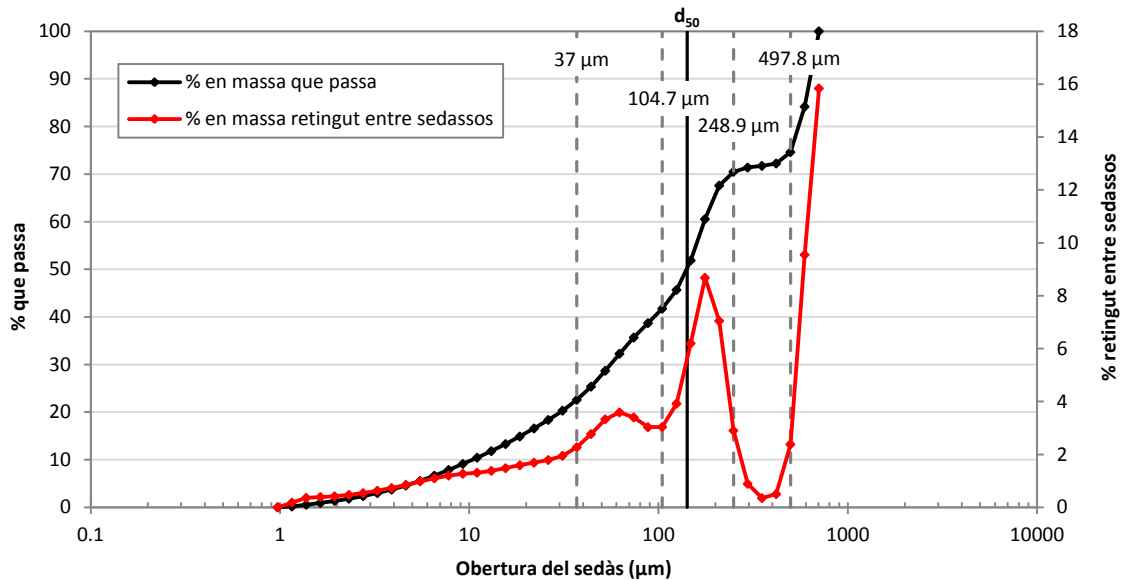


Figura 3.13 Corba granulomètrica de la mostra de sediments analitzada en % que passa en massa (línia negra) i en % en massa retingut entre sedassos (línia vermella). La mida de partícula corresponent al d_{50} és de 141.5 μm .

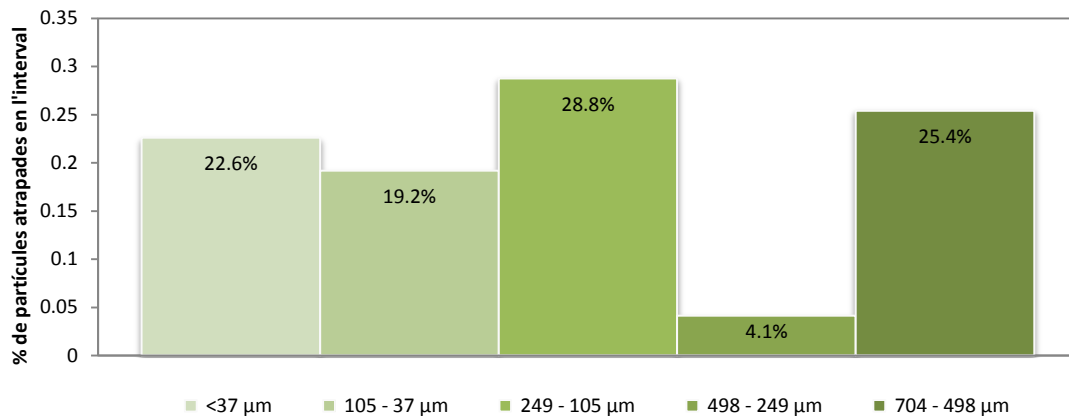


Figura 3.14 Distribució de mides de partícula de la mostra de sediments analitzada.

Finalment, pel que fa a la concentració màxima de sòlids (és a dir, de les diferents sals dissoltes més els sòlids en suspensió) que la mescla és capaç de transportar, s'ha comprovat que aquesta és de 331 kg/m^3 (kg de sòlids totals / m^3 de mescla). Aquest valor s'ha obtingut a partir d'una sèrie d'assajos previs que no s'inclouen en la memòria perquè han sigut duts a terme amb una configuració del circuit anterior a la definitiva. La comprovació ha consistit senzillament en anar afegint sal al dipòsit ple d'aigua fins a saturar-la, tot remouent la mescla per afavorir la dissolució dels elements solubles. S'ha afegit sal fins a obtenir un gruix de llit de

sediments d'uns quants centímetres al fons del dipòsit i a continuació s'ha fet circular el flux de salmorra durant més d'una hora, per permetre a la mescla arribar a una situació d'equilibri pel que fa a la dissolució-precipitació de les sals i a l'arrossegament-sedimentació de les partícules insolubles. Llavors s'ha pres una mostra de la mescla en circulació per mesurar-ne la concentració i la densitat, que és de 1202 kg/m^3 . Per tal d'assegurar que la concentració mesurada és realment la de saturació de la mescla, s'ha tornat a afegir sal a la mescla i s'ha repetit el procés, obtenint el mateix resultat. El percentatge de sòlids equivalent és del 27.5% ($\text{kg de sòlids totals} / \text{kg de mescla} \cdot 100$).

Càlcul de la velocitat límit de deposició

El càlcul teòric de la velocitat límit de deposició de les partícules sòlides en suspensió permet predir de manera aproximada per a quines velocitats de flux es produirà sedimentació a l'interior del circuit experimental, si és que se'n produeix. Atès que la major part de les canonades que el formen són de PVC transparent, durant els assajos es podrà observar si es compleixen les prediccions.

La velocitat de deposició depèn de múltiples paràmetres, com ja s'ha exposat en el Capítol 2. En el cas de l'expressió de càlcul proposada per Durand i Condolios (1952), els paràmetres utilitzats són la densitat dels sòlids (ρ_s), la seva concentració en volum sobre el total de la mescla (C_V), el diàmetre de les partícules sòlides en suspensió (d , normalment s'utilitza el d_{50}) i el diàmetre intern de la canonada (D). Com també s'explica en el Capítol 2, però, el diagrama facilitat per Durand i Condolios no té en consideració el transport de partícules sòlides en concentracions en volum inferiors al 2%, de tal manera que és necessari extrapolar-la al cas d'estudi. Malgrat això, és la que s'adapta millor als diàmetres de partícula i concentracions en volum baixos i per això és l'expressió utilitzada en aquest projecte.

El nombre de Froude de Durand es determina de forma gràfica mitjançant el diagrama presentat en el Capítol 2. Aquest diagrama relaciona el nombre de Froude de Durand, F_L , amb el diàmetre de partícula i presenta diferents corbes en funció de la concentració en volum de sòlids en suspensió. Com ja s'ha esmentat, la concentració en volum més baixa que es troba representada és d'un 2%, de manera que es fa necessari extrapolar una corba associada a les concentracions en volum de les mescles assajades. Per altra banda, atès que no es coneix la densitat dels sòlids en suspensió, aquesta s'ha suposat semblant a l'obtinguda en l'anàlisi dels sòlids en suspensió del Col·lector de Salmorres (veure Capítol 5) i s'ha considerat igual a 2000 kg/m^3 .

El càlcul de la concentració en volum de les partícules sòlides en cada mescla s'ha dut a terme mitjançant l'expressió següent:

$$C_V = C_m \cdot \frac{\rho_m}{\rho_s} \quad (3.1)$$

On C_V és la concentració en volum, en tant per u, C_m és la concentració en massa, en tant per u, i ρ_m i ρ_s són les densitats de la mescla i dels sòlids, respectivament, en kg/m^3 . Al seu torn, la concentració en massa de les partícules insolubles s'ha calculat multiplicant els valors de la concentració en massa del total de partícules sòlides (mesurada al laboratori per a cada

mescla) per un 1.14%, que és el percentatge de partícules insolubles sobre el total (veure Taula 1.1).

Per últim, s'han considerat tres valors diferents pel que fa a la mida de partícula dels sòlids en suspensió: 140 µm, que equival al d_{50} obtingut en l'anàlisi granulomètrica (Figura 3.13), 60 µm i 10 µm. Amb aquests dos últims valors s'ha volgut representar els dos intervals de menor mida de partícula de la Figura 3.14, ja que es considera la possibilitat que els grans de major mida obtinguts en l'anàlisi granulomètrica corresponguin a cristalls de sal precipitats durant l'assecat de la mostra de sòlids, de tal manera que en el flux de salmorra es trobarien dissolts en la mescla. A cada mida de partícula tinguda en compte li correspon un nombre de Froude diferent, i per tant també velocitats límit de deposició diferents.

La Taula 3.5 mostra tots els valors esmentats utilitzats en el càlcul i els valors de la velocitat límit de deposició obtinguts per a cada mescla de salmorra i per als tres diàmetres de partícula considerats. En la Figura 3.15 es pot observar el comportament constant d'aquestes velocitats sigui quina sigui la densitat de la mescla, mentre que presenten variacions molt més considerables en funció de la mida de partícula.

Mescla	Concentració en massa de sòlids totals (%)	C_m (%)	C_V (%)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_s (kg/m ³)	$d = d_{50} \approx 140$ µm		$d = 60$ µm		$d = 10$ µm	
						F_L	v_D (m/s)	F_L	v_D (m/s)	F_L	v_D (m/s)
SAL_B	22.2	0.254	0.15	1143.8		0.54		0.42		0.27	
SAL_C	20.0	0.228	0.13	1157.5		0.55		0.43		0.27	
SAL_D	19.2	0.218	0.12	1141.6	2000	0.45	0.55	0.35	0.43	0.225	0.28
SAL_E	18.5	0.211	0.12	1134.1			0.56		0.43		0.28
SAL_F	16.9	0.192	0.11	1124.0			0.56		0.44		0.28

Taula 3.5 Velocitats límit de deposició (v_D) calculades mitjançant l'expressió de Durand i Condolios (1952) per cadascuna de les mescles de salmorra, en funció de la mida de gra de les partícules sòlides en suspensió. C_m i C_V són les concentracions en massa i en volum d'aquestes partícules, respectivament, i ρ_s la seva densitat. ρ_m és la densitat de la mescla.

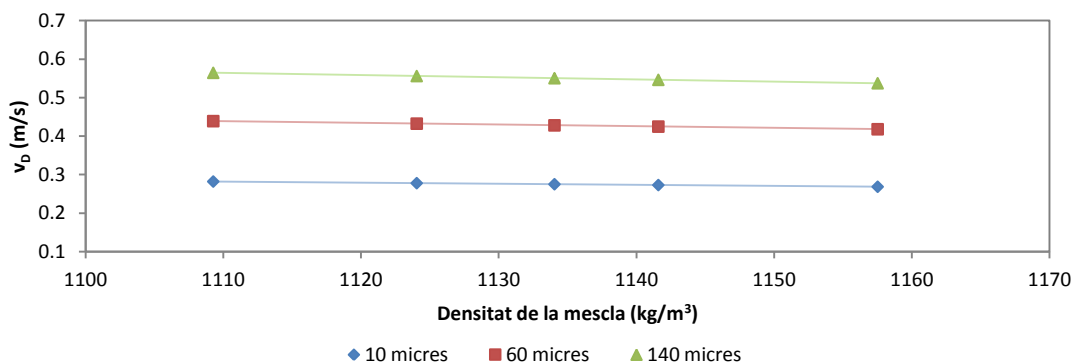


Figura 3.15 Velocitats límit de deposició obtingudes mitjançant l'expressió de Durand i Condolios (1952), representades en funció de la densitat de la mescla de salmorra i de la mida de gra de les partícules en suspensió.

A la vista dels resultats, acceptant totes les hipòtesis considerades, per a velocitats de flux superiors a 0.6 m/s no s'hauria de produir sedimentació de les partícules en suspensió. Com és lògic, com menor sigui la mida de gra d'aquestes partícules, menor serà la velocitat del flux per la qual es dipositin al fons de la canonada.

3.1.4. Metodologia seguida en la realització dels assajos

El procediment que s'ha seguit per a la realització dels assajos és el següent:

1. S'inicia la circulació de l'aigua o la salmorra fins a assolir un equilibri en el flux, amb una velocitat de flux constant, i aconseguir la total evacuació de les bosses d'aire que es formin al llarg de la conducció. Aquest procés es duu a terme amb la vàlvula de sortida del circuit completament oberta, cosa que equival a velocitats de flux d'entre 1.5 i 1.7 m/s.
2. A continuació s'inicia el registre de les lectures amb els sensors instal·lats, durant 5 minuts, amb una freqüència d'adquisició de 2 segons (150 lectures).
3. Tot seguit es tanca parcialment la vàlvula de sortida fins a reduir la velocitat del flux a 1.4 m/s.
4. Assolida l'estabilització de la nova velocitat de flux, es duu a terme un nou registre de dades, i es repeteix el procés per velocitats de flux d'1.2, 1.0, 0.8 i 0.6 m/s.

Atès que la impulsió de la bomba genera lleus fluctuacions en el sistema, les velocitats a les quals s'han dut a terme els assajos poden variar en les centèsimes.

Aquest procediment s'ha dut a terme amb aigua neta, que ha servit de líquid de control, i s'ha repetit per a cadascuna de les mescles de salmorra generades. La Taula 3.6 presenta les característiques de les mostres que s'han estudiat. En cadascun dels assajos s'han registrat dades de pressió (en 4 punts), de temperatura (en 5 punts) i de velocitat.

Cal recordar que la concentració de sòlids de les mescles fa referència als sòlids totals presents en la mescla, i no només als sòlids solubles.

Mescla	Concentració de sòlids (kg/m ³)	Densitat de la mescla (kg/m ³)
Aigua	0	995.2
SAL_B	258	1157.5
SAL_C	229	1141.6
SAL_D	217	1134.1
SAL_E	209	1124.1
SAL_F	187	1109.3

Taula 3.6 Concentració de sòlids i densitat de les mescles fabricades per a la realització dels assajos.

3.1.5. Registres obtinguts

Atès que la quantitat d'assajos duts a terme és considerable no es representaran totes les lectures obtingudes pels sensors instal·lats al circuit, sinó només un exemple representatiu d'aquestes, concretament l'assaig realitzat amb la salmorra SAL_B a velocitat màxima. Les dades obtingudes en la resta de casos són molt similars i per tant no aportarien més informació rellevant. De la Figura 3.16 a la Figura 3.19 es mostren les lectures dels sensors de

pressió, de temperatura i de velocitat, respectivament, en l'assaig esmentat. Per a cada sèrie de lectures es representa la mitjana, i en el cas dels sensors de pressió i el cabalímetre es representen també els intervals de confiança del 95% relatius a la mitjana ($\pm 1.96 \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, on σ és la desviació estàndard i n el nombre de valors de la sèrie). Les lectures registrades són força estables al llarg de la durada de l'assaig, però en el cas de la velocitat presenten una major variació. Aquesta té el seu origen en les fluctuacions associades a la bomba d'impulsió. En els assajos duts a terme amb cabals menors, aquesta variació es va reduir a mesura que disminueix la velocitat. Les dades del sensor de pressió P1 també presenten una variació al llarg del temps superior a les dels altres sensors, probablement per la seva proximitat a la bomba. El coeficient de variació de les mesures dels sensors de pressió se situa entre l'1.3 i el 4.5%, segons l'assaig, mentre que en el cas de les mesures de velocitat es troba entre el 2.8 i el 4.3%. Les lectures de temperatura tenen una desviació màxima del 0.3%.

De les sèries de dades recollides per cadascun dels sensors se n'ha extret un sol valor promig i una desviació estàndard associada, per ser utilitzada en els estudis de sensibilitat dels paràmetres calculats posteriorment. En el cas de la temperatura, s'ha obtingut un sol valor mitjà de totes les dades registrades pels 5 sensors instal·lats. Les taules Taula 3.7 i Taula 3.8 mostren tots els valors. Com s'hi pot observar, tots els assajos es van realitzar amb temperatures del flux d'entre 24 i 25°C, excepte el d'aigua neta, que es va fer a 18-19°C.

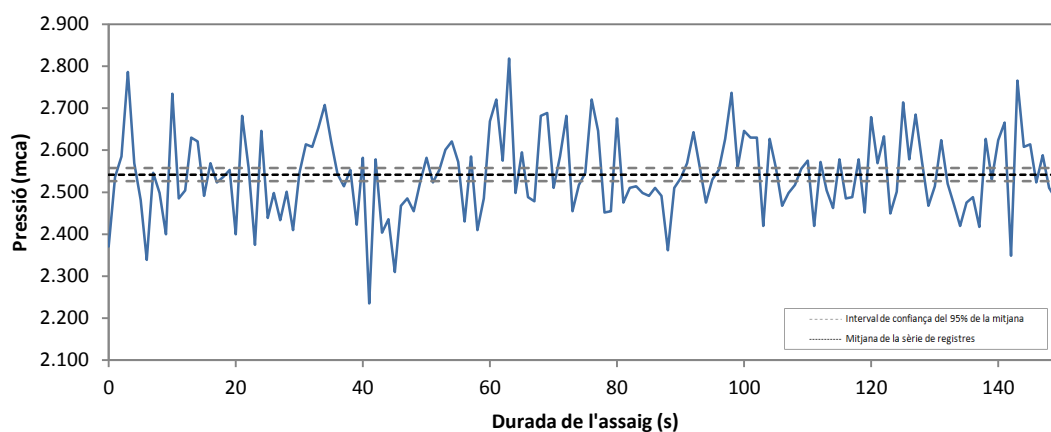


Figura 3.16 Sèrie de lectures del sensor de pressió P1 corresponent a l'assaig realitzat amb la salmorra SAL_B a velocitat màxima (SAL_B 01), la seva mitjana i l'interval de confiança del 95% d'aquesta.

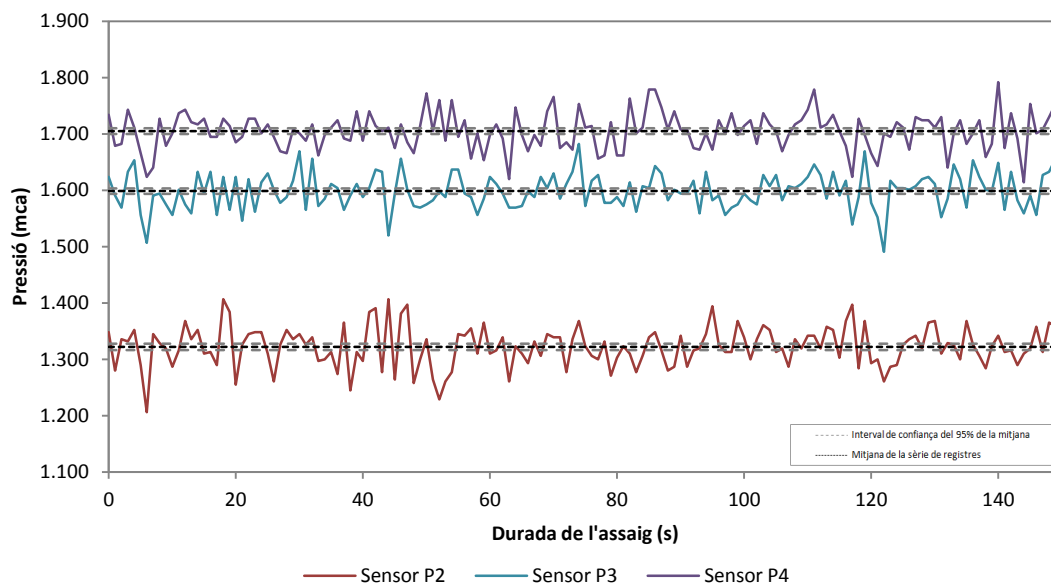


Figura 3.17 Sèries de lectures dels sensors de pressió P2, P3 i P4 corresponents a l'assaig realitzat amb la salmorra SAL_B a velocitat màxima (SAL_B 01), la seva mitjana i l'interval de confiança del 95% d'aquesta.

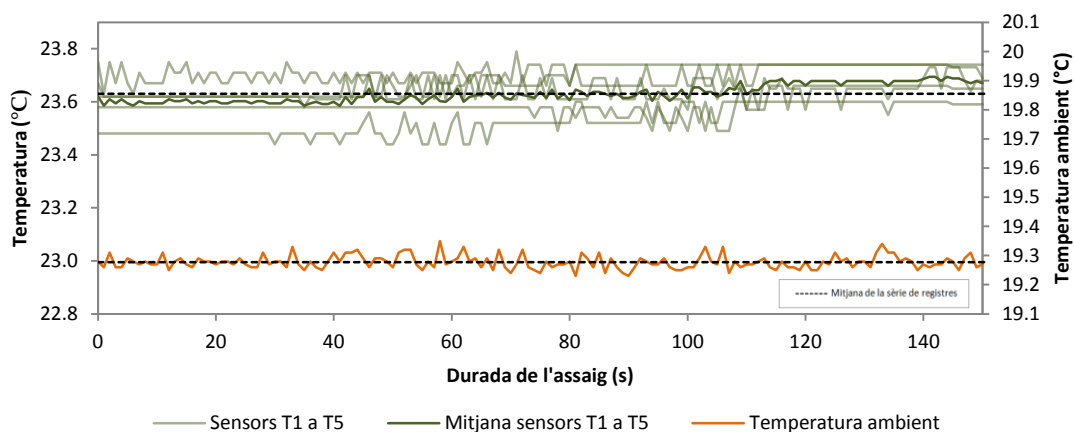


Figura 3.18 Sèries de lectures dels sensors de temperatura T1, T2, T3, T4 i T5, i del de temperatura ambient, corresponents a l'assaig realitzat amb la salmorra SAL_B a velocitat màxima (SAL_B 01), i la seva mitjana.

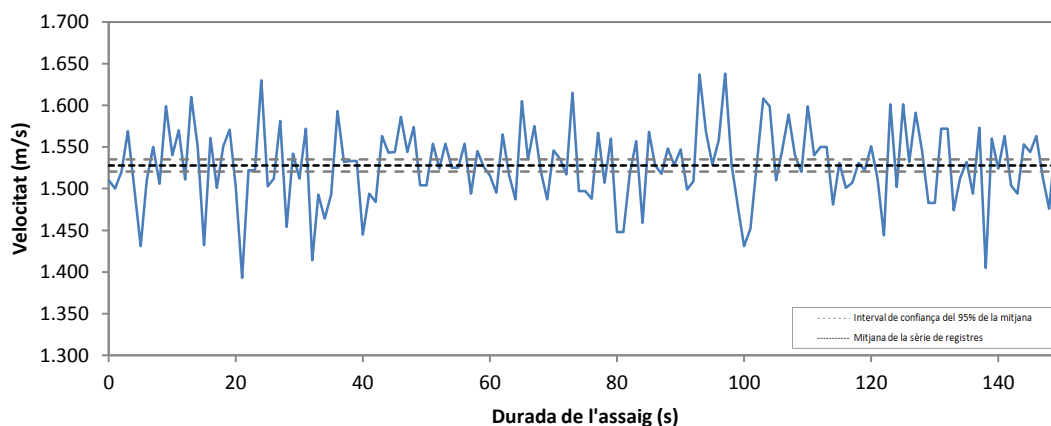


Figura 3.19 Sèrie de lectures del cabalímetre, corresponent a l'assaig realitzat amb la salmorra SAL_B a velocitat màxima (SAL_B 01), la seva mitjana i l'interval de confiança del 95% d'aquesta.

Codi assaig	Pressió mitjana (mca)				Desviació estàndard de la sèrie de registres de pressió (mca)			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
H ₂ O 01	2.601	1.415	1.568	1.650	0.143	0.040	0.036	0.033
H ₂ O 02	4.345	3.584	3.891	4.109	0.162	0.052	0.055	0.049
H ₂ O 03	5.185	4.662	5.044	5.324	0.180	0.063	0.071	0.066
H ₂ O 04	6.183	5.886	6.344	6.706	0.163	0.076	0.085	0.076
H ₂ O 05	6.059	5.894	6.421	6.818	0.147	0.098	0.100	0.097
H ₂ O 06	6.883	6.858	7.443	7.883	0.156	0.118	0.119	0.104
SAL_B 01	2.196	1.142	1.381	1.473	0.098	0.036	0.032	0.033
SAL_B 02	2.951	2.079	2.384	2.534	0.127	0.034	0.036	0.033
SAL_B 03	4.238	3.648	4.053	4.303	0.128	0.052	0.053	0.059
SAL_B 04	5.164	4.757	5.242	5.556	0.129	0.077	0.071	0.075
SAL_B 05	5.947	5.755	6.302	6.678	0.168	0.106	0.102	0.111
SAL_B 06	6.188	6.223	6.834	7.256	0.151	0.123	0.119	0.116
SAL_C 01	2.231	1.161	1.396	1.498	0.083	0.036	0.033	0.033
SAL_C 02	3.012	2.156	2.470	2.635	0.092	0.038	0.035	0.033
SAL_C 03	4.082	3.486	3.890	4.126	0.095	0.053	0.047	0.060
SAL_C 04	5.272	4.920	5.407	5.730	0.139	0.074	0.065	0.073
SAL_C 05	5.473	5.305	5.869	6.249	0.149	0.107	0.111	0.108
SAL_C 06	6.207	6.153	6.763	7.193	0.146	0.122	0.117	0.104
SAL_D 01	1.914	0.940	1.227	1.351	0.130	0.035	0.032	0.026
SAL_D 02	2.749	1.886	2.207	2.361	0.107	0.035	0.037	0.032
SAL_D 03	4.047	3.468	3.890	4.144	0.125	0.063	0.057	0.064
SAL_D 04	5.014	4.621	5.116	5.432	0.141	0.066	0.065	0.074
SAL_D 05	5.016	4.818	5.378	5.750	0.152	0.096	0.099	0.096
SAL_D 06	5.906	5.856	6.491	6.910	0.174	0.118	0.111	0.117
SAL_E 01	2.385	1.260	1.488	1.568	0.075	0.038	0.036	0.032
SAL_E 02	3.519	2.724	3.060	3.228	0.121	0.044	0.045	0.040
SAL_E 03	4.316	3.706	4.114	4.354	0.134	0.055	0.050	0.058
SAL_E 04	5.356	5.017	5.507	5.837	0.130	0.071	0.067	0.076
SAL_E 05	6.037	5.841	6.400	6.775	0.146	0.102	0.101	0.102
SAL_E 06	6.314	6.283	6.893	7.320	0.152	0.116	0.102	0.101
SAL_F 01	2.276	1.196	1.430	1.521	0.073	0.037	0.033	0.032
SAL_F 02	3.192	2.353	2.683	2.855	0.095	0.038	0.041	0.037
SAL_F 03	4.161	3.556	3.965	4.201	0.116	0.049	0.052	0.053
SAL_F 04	5.115	4.712	5.191	5.500	0.121	0.062	0.067	0.074
SAL_F 05	5.957	5.787	6.339	6.709	0.140	0.103	0.107	0.106
SAL_F 06	6.266	6.262	6.870	7.299	0.152	0.124	0.116	0.119

Taula 3.7 Dades corresponents als sensors de pressió P1, P2, P3 i P4, obtingudes en cadascun dels assajos realitzats. Cada valor correspon a la mitjana de totes les lectures obtingudes al llarg de l'assaig. Al costat, desviació estàndard associada al càlcul d'aquesta mitjana.

Codi assaig	Temperatura ambient mitjana (°C)	Temperatura mitjana (°C)	Desviació estàndard de la sèrie de registres de temperatura (°C)	Velocitat mitjana (m/s)	Desviació estàndard de la sèrie de registres de velocitat (m/s)
H ₂ O 01	17.1	18.0	0.08	1.65	0.048
H ₂ O 02	17.1	18.2	0.08	1.38	0.042
H ₂ O 03	17.1	18.3	0.08	1.19	0.042
H ₂ O 04	17.2	18.5	0.08	0.96	0.033
H ₂ O 05	17.2	18.6	0.08	0.81	0.031
H ₂ O 06	17.2	18.8	0.08	0.59	0.025
SAL_B 01	19.3	23.6	0.08	1.53	0.046
SAL_B 02	19.3	23.7	0.08	1.42	0.037
SAL_B 03	19.4	23.9	0.09	1.17	0.036
SAL_B 04	19.3	24.0	0.08	0.98	0.035
SAL_B 05	19.3	24.1	0.08	0.82	0.031
SAL_B 06	19.3	24.2	0.08	0.59	0.025
SAL_C 01	19.4	24.0	0.07	1.54	0.039
SAL_C 02	19.4	24.1	0.09	1.38	0.043
SAL_C 03	19.4	24.3	0.08	1.22	0.039
SAL_C 04	19.4	24.4	0.08	0.99	0.036
SAL_C 05	19.4	24.7	0.08	0.78	0.034
SAL_C 06	19.4	24.8	0.09	0.59	0.029
SAL_D 01	19.7	24.8	0.08	1.46	0.043
SAL_D 02	19.4	24.2	0.07	1.41	0.042
SAL_D 03	19.5	24.3	0.09	1.18	0.036
SAL_D 04	19.5	24.4	0.08	0.97	0.034
SAL_D 05	19.6	24.5	0.08	0.82	0.031
SAL_D 06	19.6	24.6	0.08	0.59	0.024
SAL_E 01	19.9	24.2	0.10	1.59	0.044
SAL_E 02	20.0	24.4	0.08	1.35	0.038
SAL_E 03	20.1	24.6	0.09	1.22	0.039
SAL_E 04	20.1	24.7	0.08	0.99	0.036
SAL_E 05	20.2	24.8	0.08	0.79	0.028
SAL_E 06	20.2	24.9	0.09	0.60	0.026
SAL_F 01	20.1	24.5	0.09	1.56	0.046
SAL_F 02	20.1	24.8	0.10	1.40	0.045
SAL_F 03	20.1	24.9	0.08	1.21	0.041
SAL_F 04	20.1	25.0	0.07	1.02	0.032
SAL_F 05	20.2	25.1	0.09	0.83	0.030
SAL_F 06	20.2	25.2	0.07	0.61	0.026

Taula 3.8 Dades corresponents als sensors de temperatura i temperatura ambient i al cabalímetre, obtingudes en cadascun dels assajos realitzats. Els valors de temperatura ambient i de velocitat corresponen a la mitjana de totes les lectures obtingudes al llarg de cada assaig, mentre que els valors de temperatura del líquid corresponen a la mitjana de totes les lectures dels 5 sensors de temperatura al llarg de l'assaig. Es presenta la desviació estàndard de les dades de temperatura i velocitat.

3.1.6. Processament dels assajos

El procediment de càlcul seguit per al calibratge del model i el posterior tractament de les dades obtingudes ha sigut el següent:

1. Amb els assajos realitzats amb aigua neta, variant la velocitat del flux:
 - a. A partir dels registres de pressió obtinguts, càlcul de les pèrdues de càrrega totals a partir de l'equació del balanç d'energia de Bernoulli.
 - b. Estimació de les pèrdues de càrrega localitzades del circuit a partir de models empírics (Lencastre, 1998). A partir de les pèrdues localitzades i les pèrdues totals obtingudes en el punt anterior, estimació de les pèrdues de càrrega lineals i , amb aquestes, dels coeficients de fricció (f) relatius a cada assaig (per cada tram i velocitat). S'imposa l'expressió de Nikuradse (1933) per tal que els coeficients de fricció obtinguts es trobin propers al règim turbulent llis.
 - c. Càlcul de la rugositat absoluta de la canonada a partir dels valors de pèrdua de càrrega lineal obtinguts en el punt anterior, amb la relació de Darcy-Weisbach i l'expressió de càlcul de f de Swamee i Jain (1976), mitjançant un ajust pel mètode de mínims quadrats.
2. Amb els assajos realitzats amb les mescles de salmorra, amb diferents velocitats del flux:
 - a. A partir de les dades de pressió registrades, estimació de les pèrdues de càrrega totals mitjançant l'equació del balanç d'energia de Bernoulli. Prenent l'ajust de les pèrdues de càrrega localitzades dut a terme amb aigua, càlcul de les pèrdues de càrrega lineals per cada tram.
 - b. Càlcul de la viscositat de cada mescla a partir dels valors de pèrdua de càrrega lineal obtinguts en el punt anterior, amb l'equació de Darcy-Weisbach i l'expressió de càlcul de f de Swamee i Jain, mitjançant un ajust pel mètode de mínims quadrats.

3.1.7. Calibratge del circuit

3.1.7.1. Pèrdues de càrrega localitzades

El calibratge de les pèrdues de càrrega localitzades corresponents als tres trams de circuit estudiats s'ha dut a terme a partir de les dades obtingudes en els assajos realitzats amb aigua neta. Com ja s'ha explicat anteriorment, els assajos s'han executat per a sis velocitats de flux diferents. Per cadascun d'aquests sis assajos s'ha calculat el coeficient de fricció en cada tram, mitjançant l'expressió de Darcy-Weisbach. Per dur a terme aquest càlcul és necessari conèixer les pèrdues de càrrega localitzades, de tal manera que, en una primera aproximació, s'han calculat mitjançant coeficients teòrics associats a cadascun dels obstacles del circuit, o sigui, els colzes amb diferents angles de gir i la vàlvula de papallona. Els coeficients s'han pres de les taules facilitades per Lencastre (1998). El resultat obtingut es mostra, sobre l'àbac de Moody, en la Figura 3.20. Com es pot observar, els valors obtinguts no ressegueixen cap corba de rugositat constant, sinó que mostren una tendència a tallar-ne més d'una. Com que tots els assajos s'han dut a terme en les mateixes condicions i en el mateix circuit, la rugositat relativa

obtinguda en cada assaig ha de ser la mateixa, de manera que per calibrar les pèrdues de càrrega localitzades del circuit s'ha imposat aquesta condició.

D'entrada, per tal de simplificar el procés de calibratge, s'ha establert la següent relació, independent per a cada tram:

$$h_{loc} = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} + \Delta h \quad (3.2)$$

On h_{loc} representa la suma de les pèrdues de càrrega localitzades del tram en qüestió, en m, v és la velocitat, en m/s, g és l'acceleració de la gravetat, en m/s^2 , K és un coeficient adimensional de pèrdues locals i Δh és un paràmetre d'ajust, en m. Aquesta expressió sintetitza totes les pèrdues de càrrega que tenen lloc al llarg del tram, de forma que no permet conèixer-ne l'origen.

En segon lloc, atès que la canonada que forma el circuit és de PVC s'ha considerat que compleix les condicions de tub llis i s'ha imposat que els coeficients de fricció calculats a partir de les dades de laboratori hagin de complir l'equació que Nikuradse (1933) proposa per a aquest cas.

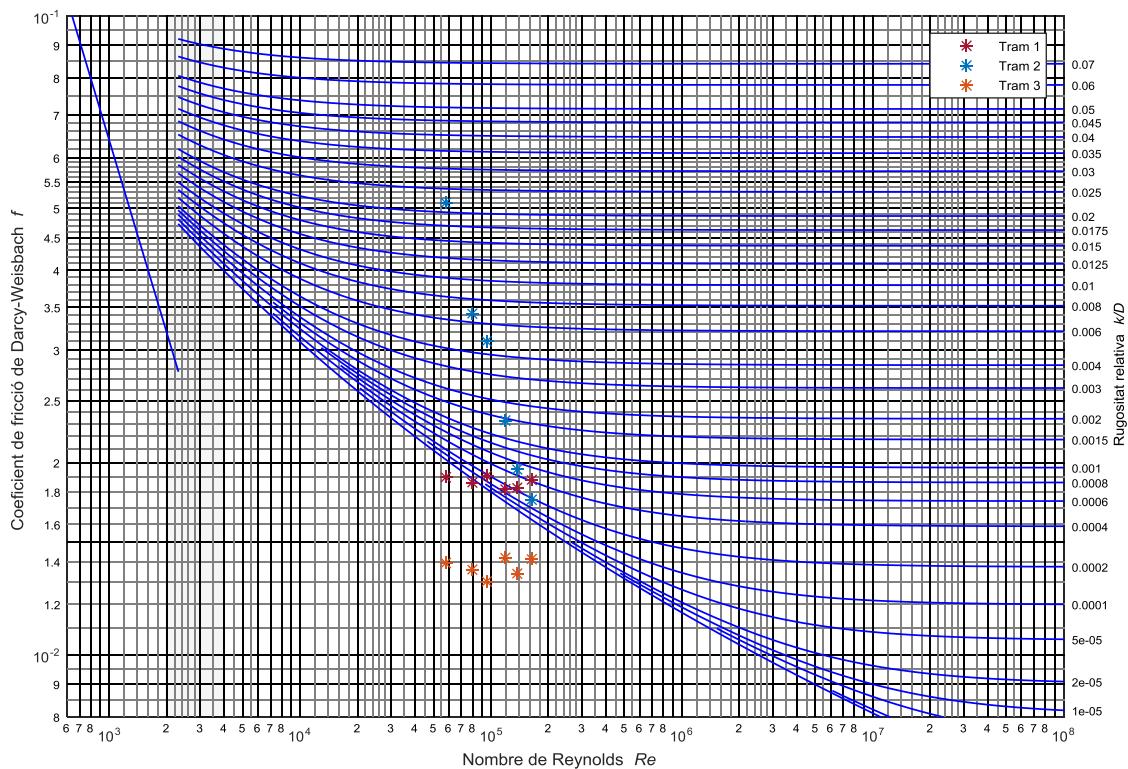


Figura 3.20 Valors del coeficient de fricció obtinguts, per a cadascun dels tres trams del circuit, a partir de les dades experimentals obtingudes en els assajos realitzats amb aigua. Resultats previs al calibratge de les pèrdues de càrrega localitzades, sobre àbac de Moody.

L'equació resultant de tot plegat, doncs, combina les expressions de Darcy-Weisbach i Nikuradse i fa necessari dur a terme un procés iteratiu per cada tram i per cada velocitat de flux assajada. Mitjançant una primera aproximació s'han obtingut els valors de K i Δh recollits a la Taula 3.9. Com s'hi pot apreciar, si bé els valors de K en cada tram són molt propers entre ells per a totes les velocitats, els de Δh presenten una gran variació entre la velocitat més alta i

la més baixa. Si es representen aquests últims en funció de $v^2/2g$ s'observa que mantenen una relació lineal (Figura 3.21), fet que permet descomposar el valor de Δh en una part dependent de $v^2/2g$, que se sumarà al valor inicial de K , i una altra d'independent, que serà la nova Δh . Amb les noves K i Δh com a valors inicials es duu a terme una nova iteració i es representa de nou Δh respecte de $v^2/2g$. Els resultats s'han donat per bons a la tercera iteració (Figura 3.22).

Nombre de Reynolds	K Tram 1 (m)	K Tram 2 (m)	K Tram 3 (m)	Δh Tram 1 (m)	Δh Tram 2 (m)	Δh Tram 3 (m)
1.63E+05	0.507	0.457	0.431	0.550	0.188	0.005
1.36E+05	0.486	0.465	0.449	0.352	0.144	-0.021
1.18E+05	0.481	0.474	0.463	0.240	0.137	-0.016
9.50E+04	0.483	0.483	0.475	0.149	0.133	-0.026
8.00E+04	0.486	0.487	0.483	0.089	0.105	-0.020
5.84E+04	0.492	0.493	0.491	0.038	0.094	-0.014

Taula 3.9 Resultats obtinguts en la primera iteració del calibratge de les pèrdues de càrrega localitzades de la canonada, per trams. K i Δh són el coeficient i el paràmetre d'ajust presents en l'equació de pèrdua de càrrega localitzada que sintetitza totes les pèrdues de càrrega que tenen lloc al llarg de cada tram: $h_{loc} = K \cdot \frac{v^2}{2g} + \Delta h$.

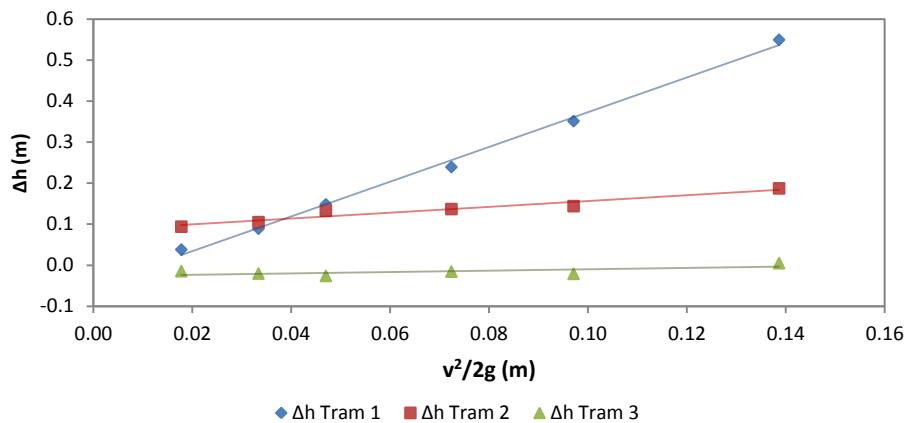


Figura 3.21 Valors de Δh en la primera iteració del calibratge de les pèrdues de càrrega localitzades, per cada tram. El fet que els valors de Δh depenguin de la velocitat del flux fa necessària una nova iteració, especialment en el Tram 1.

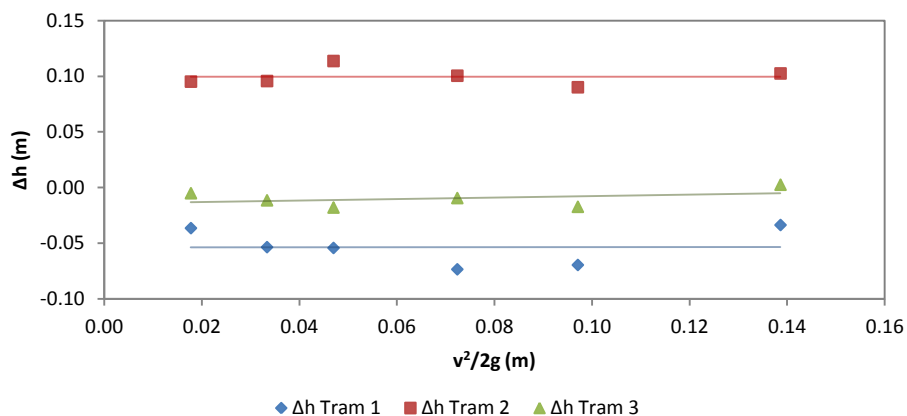


Figura 3.22 Valors de Δh en la darrera iteració del calibratge de les pèrdues de càrrega localitzades, per cada tram.

	K	σ_K	Δh	$\sigma_{\Delta h}$
Tram 1	4.787	0.002	-0.054	0.016
Tram 2	1.144	0.002	0.100	0.008
Tram 3	0.515	0.001	-0.010	0.008

Taula 3.10 Resultats definitius de K i Δh , corresponents a l'equació de calibratge de les pèrdues de càrrega localitzades, i la seva desviació estàndard.

Finalment, atès que K i Δh han de ser constants per a qualsevol velocitat de flux, s'ha calculat la mitjana dels valors obtinguts en cada tram. Aquests valors, els quals es mostren en la Taula 3.10, s'utilitzaran en els càlculs associats a tots els assajos; per a qualsevol velocitat de flux i per a qualsevol concentració de sal. Com es pot observar tant en la taula esmentada com en l'anterior, el coeficient d'ajust Δh pren, en alguns casos, valors negatius; això és possible degut al fet que aquest paràmetre, malgrat tenir unitats de longitud, no té cap mena de sentit físic i s'utilitza únicament per compensar els possibles errors de mesura que impedeixen el calibratge adequat de les pèrdues localitzades del circuit.

Amb els valors constants de K i Δh de la Taula 3.10, doncs, els coeficients de fricció obtinguts s'adapten molt millor a la forma de les corbes de rugositat constant de l'àbac de Moody, com s'observa en la Figura 3.23. Els punts corresponents als nombres de Reynolds més baixos són els que presenten una major desviació respecte del comportament de la resta, la qual cosa concorda amb l'anàlisi de sensibilitat del càlcul dels coeficients de fricció que es detalla més endavant, a l'apartat 3.1.8.1.

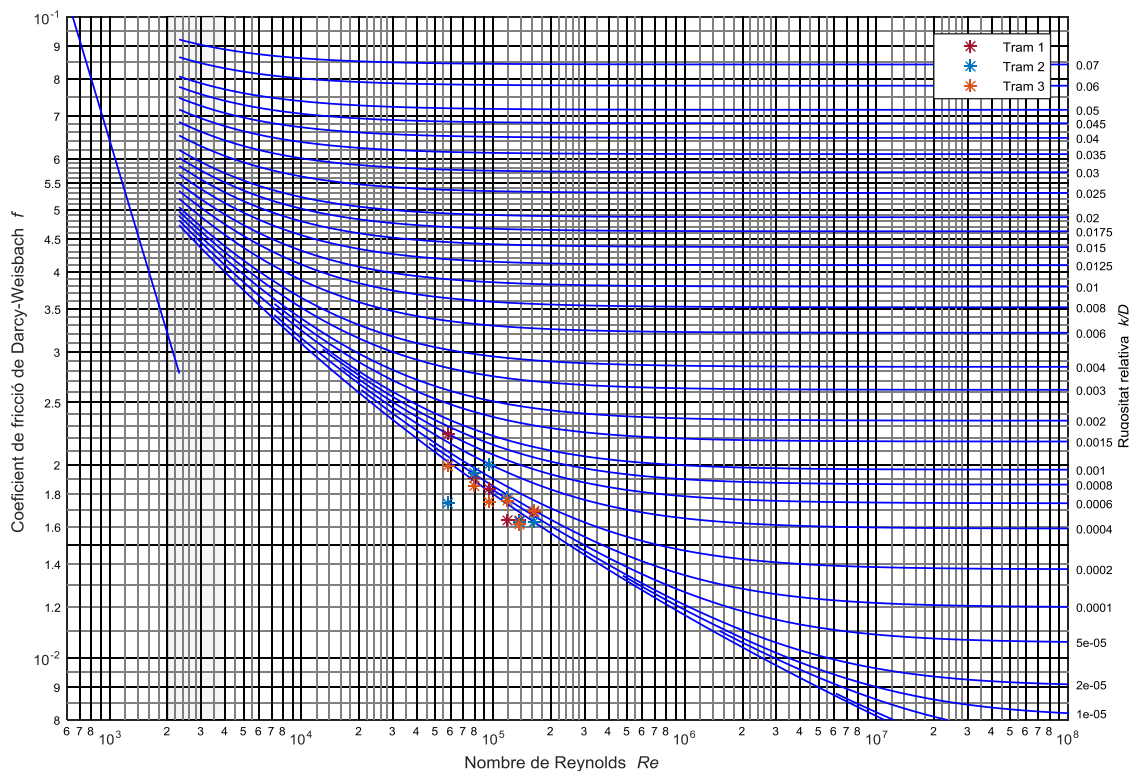


Figura 3.23 Valors del coeficient de fricció obtinguts, per a cadascun dels tres trams del circuit, a partir de les dades experimentals obtingudes en els assajos realitzats amb aigua. Resultats posteriors al calibratge de les pèrdues de càrrega localitzades, sobre àbac de Moody.

3.1.7.2. Rugositat absoluta de la canonada

Per a la realització dels càlculs relatius als assajos amb salmorra és necessari associar un valor al paràmetre de la rugositat absoluta (k) del circuit. El resultat del calibratge de les pèrdues de càrrega locals, malgrat considerar-se molt satisfactori, mostra certa dispersió dels resultats al voltant de diverses corbes de rugositat constant, com s'observa en l'àbac de Moody de la Figura 3.23, de tal manera que s'ha fet necessari establir un procediment per tal d'obtenir el valor de k .

La rugositat absoluta s'ha obtingut a partir del valor mitjà dels gradients de pressió registrats en els assajos realitzats amb aigua, resultant en un sol valor per cada nombre de Reynolds. S'ha calculat un valor únic de rugositat absoluta, comú per als tres trams, perquè els tubs són de plàstic llis en tots els casos i les diferències que pot presentar aquest paràmetre en funció del tram són negligibles.

El valor de la rugositat absoluta s'ha obtingut ajustant, pel mètode de mínims quadrats, una corba als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori, mitjançant la relació de Darcy-Weisbach (Figura 3.24). Aquesta corba ha incorporat la relació de Swamee i Jain (1976) per definir el coeficient de fricció. El resultat d'aquesta regressió ha determinat un valor del coeficient de rugositat de 0.033 mm, amb un $\pm 40\%$ d'error de l'ajust per una confiança del 95%, i un coeficient de determinació (R^2) de 0.998. Aquest valor és més elevat del que és habitual en tubs de plàstic llis (0.0015 mm, segons Sotelo (1995)), però la rugositat absoluta pot presentar grans variacions per qualsevol obstacle interior del tub (una junta imperfecta, per exemple) o pel propi envelliment del material.

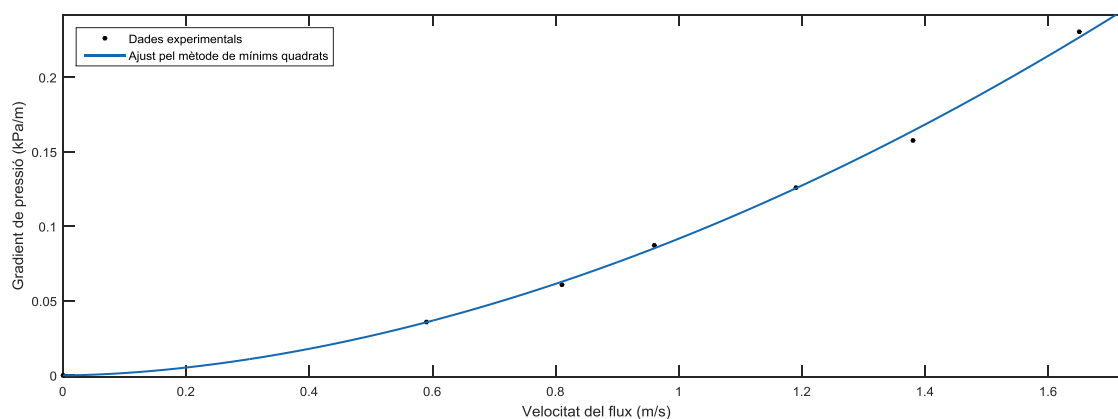


Figura 3.24 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.998$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori, per tal de determinar el valor de la rugositat absoluta de la canonada.

3.1.8. Modelització numèrica i discussió

3.1.8.1. Càlcul del coeficient de fricció

El coeficient de fricció associat a cadascun dels assajos realitzats amb salmorra s'ha obtingut a partir de l'expressió de Darcy-Weisbach, en la qual se'l relaciona amb el pendent motriu del líquid circulant, la velocitat del flux i el diàmetre del tub. La Taula 3.11 mostra els pendents motrius, és a dir les pèrdues lineals (en metres de columna de mescla) per unitat de longitud, per cada assaig i tram de circuit, i la seva mitjana, la qual s'ha fet servir per al càlcul dels coeficients de fricció corresponent. En la mateixa taula es mostren aquests coeficients de

fricció i el nombre de Reynolds associat a cada assaig. Per calcular aquest últim és necessari conèixer la viscositat de les mescles assajades, ja que el flux de salmorra es troba en zona de transició: el procediment de determinació d'aquest paràmetre físic s'explicarà en l'apartat 3.1.8.2.

Codi assaig	N. de Reynolds	Pendent motriu (mcm/m)				Coeficient de fricció			
		Tram 1	Tram 2	Tram 3	Mitjana	Tram 1	Tram 2	Tram 3	Complet
H ₂ O 01	1.63E+05	0.0234	0.0228	0.0264	0.0242	0.0168	0.0163	0.0169	0.0167
H ₂ O 02	1.36E+05	0.0158	0.0159	0.0190	0.0169	0.0164	0.0163	0.0162	0.0163
H ₂ O 03	1.18E+05	0.0120	0.0127	0.0156	0.0134	0.0163	0.0178	0.0176	0.0169
H ₂ O 04	9.50E+04	0.0085	0.0095	0.0112	0.0097	0.0184	0.0200	0.0175	0.0184
H ₂ O 05	8.00E+04	0.0062	0.0064	0.0093	0.0073	0.0190	0.0194	0.0185	0.0186
H ₂ O 06	5.84E+04	0.0041	0.0031	0.0068	0.0047	0.0223	0.0174	0.0199	0.0218
SAL_B 01	1.35E+05	0.0226	0.0184	0.0264	0.0224	0.0190	0.0155	0.0197	0.0182
SAL_B 02	1.25E+05	0.0190	0.0151	0.0231	0.0191	0.0185	0.0148	0.0197	0.0179
SAL_B 03	1.03E+05	0.0149	0.0109	0.0173	0.0143	0.0215	0.0155	0.0208	0.0197
SAL_B 04	8.68E+04	0.0121	0.0071	0.0137	0.0110	0.0248	0.0142	0.0216	0.0213
SAL_B 05	7.21E+04	0.0072	0.0039	0.0103	0.0071	0.0214	0.0115	0.0213	0.0189
SAL_B 06	5.18E+04	0.0023	0.0008	0.0074	0.0035	0.0136	0.0042	0.0289	0.0143
SAL_C 01	1.52E+05	0.0227	0.0186	0.0257	0.0223	0.0187	0.0152	0.0185	0.0178
SAL_C 02	1.35E+05	0.0196	0.0149	0.0222	0.0189	0.0203	0.0156	0.0199	0.0190
SAL_C 03	1.20E+05	0.0140	0.0105	0.0183	0.0143	0.0187	0.0142	0.0204	0.0179
SAL_C 04	9.70E+04	0.0101	0.0068	0.0133	0.0101	0.0204	0.0138	0.0207	0.0188
SAL_C 05	7.66E+04	0.0069	0.0032	0.0097	0.0066	0.0220	0.0096	0.0236	0.0194
SAL_C 06	5.82E+04	0.0052	0.0012	0.0072	0.0045	0.0276	0.0064	0.0243	0.0216
SAL_D 01	1.57E+05	0.0217	0.0159	0.0246	0.0207	0.0200	0.0148	0.0200	0.0187
SAL_D 02	1.52E+05	0.0189	0.0141	0.0229	0.0187	0.0185	0.0139	0.0194	0.0176
SAL_D 03	1.27E+05	0.0143	0.0097	0.0171	0.0137	0.0201	0.0135	0.0200	0.0185
SAL_D 04	1.05E+05	0.0117	0.0065	0.0137	0.0106	0.0243	0.0132	0.0221	0.0210
SAL_D 05	8.87E+04	0.0072	0.0030	0.0101	0.0068	0.0210	0.0084	0.0210	0.0181
SAL_D 06	6.37E+04	0.0050	0.0004	0.0077	0.0041	0.0279	0.0037	0.0247	0.0198
SAL_E 01	1.76E+05	0.0233	0.0182	0.0269	0.0228	0.0180	0.0142	0.0183	0.0171
SAL_E 02	1.49E+05	0.0180	0.0137	0.0221	0.0179	0.0191	0.0147	0.0207	0.0184
SAL_E 03	1.34E+05	0.0147	0.0102	0.0179	0.0143	0.0192	0.0134	0.0197	0.0178
SAL_E 04	1.09E+05	0.0096	0.0068	0.0126	0.0097	0.0196	0.0133	0.0197	0.0180
SAL_E 05	8.66E+04	0.0078	0.0034	0.0104	0.0072	0.0239	0.0104	0.0240	0.0208
SAL_E 06	6.60E+04	0.0043	0.0009	0.0071	0.0041	0.0231	0.0051	0.0222	0.0189
SAL_F 01	1.80E+05	0.0225	0.0182	0.0262	0.0223	0.0181	0.0146	0.0188	0.0173
SAL_F 02	1.61E+05	0.0184	0.0137	0.0217	0.0179	0.0184	0.0137	0.0187	0.0173
SAL_F 03	1.39E+05	0.0145	0.0104	0.0182	0.0144	0.0193	0.0139	0.0204	0.0181
SAL_F 04	1.18E+05	0.0112	0.0072	0.0141	0.0108	0.0211	0.0134	0.0206	0.0189
SAL_F 05	9.57E+04	0.0063	0.0034	0.0104	0.0067	0.0177	0.0101	0.0210	0.0167
SAL_F 06	6.96E+04	0.0032	0.0012	0.0072	0.0039	0.0175	0.0059	0.0211	0.0159

Taula 3.11 Valors del pendent motriu calculats a partir de les dades experimentals, per cada assaig i tram de circuit, i dels coeficients de fricció associats a cadascun. També s'inclou la mitjana dels pendents motrius per al càlcul del coeficient de fricció corresponent al circuit complet.

L'obtenció dels pendents motrius parteix de les lectures dels sensors de pressió. D'entrada, l'equilibri d'energies de Bernouilli permet obtenir el valor de la pèrdua de càrrega total en cada tram, considerant la diferència de pressió entre sensors i la seva diferència de cota respecte del zero de referència (el terra, en aquest cas). La diferència de velocitats no intervé en l'equilibri al tenir ambdues seccions la mateixa velocitat mitjana. El calibratge de les constants de pèrdua de càrrega localitzades duta a terme amb els assajos fets amb aigua permet calcular-les a partir de la velocitat del flux mesurada. Restant les pèrdues localitzades de les pèrdues totals s'obtenen les pèrdues de càrrega lineals, les quals, per unitat de longitud, equivalen al pendent motriu. Aquest s'ha calculat de manera independent per cadascun dels 3 trams del circuit. El coeficient de fricció per cada assaig i tram s'ha obtingut a continuació mitjançant l'equació de Darcy-Weisbach.

Els valors del coeficient de fricció de la Taula 3.11 es troben representats en la Figura 3.25, sobre l'àbac de Moody. La Figura 3.26 presenta una ampliació de la zona de l'àbac on es concentren tots els punts. Com es pot observar, els resultats obtinguts són força similars als de l'aigua, ja que se situen en la majoria dels casos molt a prop de la corba associada als tubs llisos. Tal i com s'explica més endavant, en aquest mateix apartat, la sensibilitat en el càlcul del coeficient de fricció associat a cada assaig és molt alta, és a dir, existeix un possible error de precisió considerablement elevat que impedeix determinar amb claredat quina és la posició exacta dels resultats en l'àbac de Moody. Malgrat això, sí que es pot afirmar que la tendència seguida per aquests resultats és molt similar a la del patró generat amb aigua neta, però amb una major dispersió. Els tres punts més allunyats d'aquesta tendència (dos relatius a la mescla SAL_F i un a la mescla SAL_B) corresponen a assajos duts a terme amb les velocitats de flux més baixes, la qual cosa té sentit: l'anàlisi de sensibilitat que es detalla més endavant mostra que l'error associat al càlcul del coeficient de fricció augmenta exponencialment en disminuir la velocitat del flux.

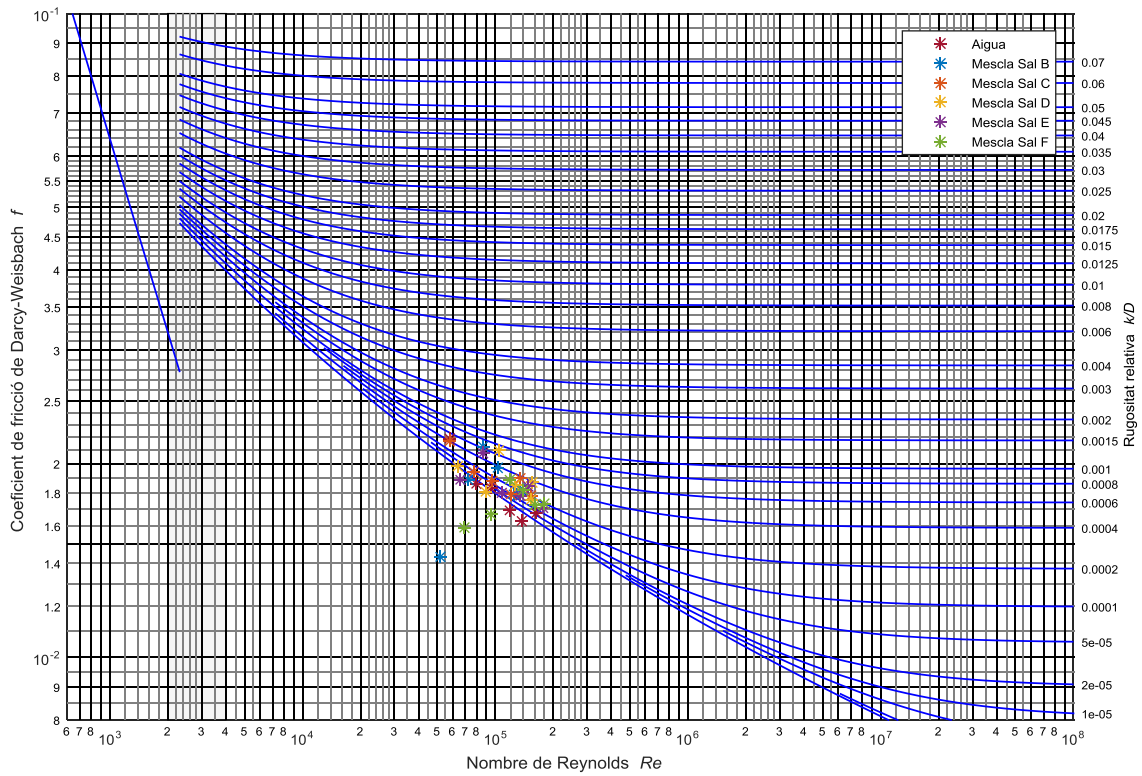


Figura 3.25 Valors del coeficient de fricció presentats a la Taula 3.11, corresponents als càlculs duts a terme per al circuit complet, per cadascuna de les mescles assajades, sobre àbac de Moody.

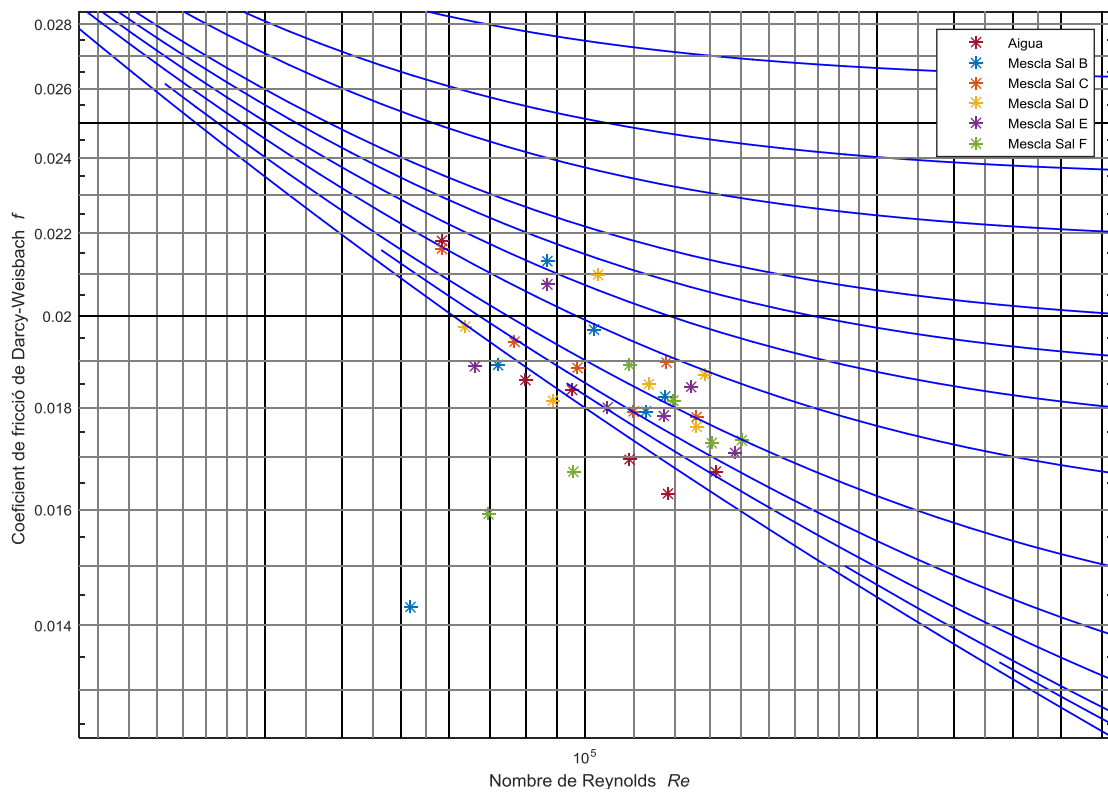


Figura 3.26 Ampliació dels resultats presentats a la Figura 3.25.

Anàlisi de sensibilitat en el càlcul del coeficient de fricció

A continuació s'analitza el grau de precisió obtingut en els valors calculats dels coeficients de fricció relatius a cada assaig. Aquests es calculen mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, en la qual hi intervé la pèrdua de càrrega per fricció, el diàmetre intern de la canonada (D), la velocitat del flux i la longitud del tub (L). Cadascun d'aquests paràmetres té associat el seu error de precisió, el qual s'ha tingut en compte a l'hora de determinar la precisió en el càlcul dels valors del coeficient de fricció. En el cas del diàmetre intern i la longitud del tub, s'ha considerat un error constant associat a la precisió de la mesura, a saber:

- D: ± 0.1 mm
- L: ± 5 mm

Pel que fa a la velocitat del flux, s'ha pres la desviació estàndard dels diferents valors obtinguts al llarg de tot un assaig (un cada 2 segons, durant 4 minuts), de manera que la precisió varia per cada assaig. El coeficient de variació, obtingut dividint la desviació estàndard per la mitjana de les velocitats, va del 2.8% per a velocitats altes (del voltant d'1.6 m/s) fins al 4.3% en les més baixes (de 0.6 m/s), tant per a l'assaig realitzat amb aigua com per als realitzats amb salmorra.

Les pèrdues de càrrega per fricció s'han obtingut restant les pèrdues de càrrega locals (calibrades prèviament, com ja s'ha explicat) de les pèrdues de càrrega totals. Aquestes, al seu torn, s'han obtingut a partir de l'equilibri d'energies de Bernouilli. En aquest equilibri hi intervenen les cotes dels punts de control i les pressions mesurades (la velocitat del flux és constant en tot el recorregut), acompanyades també del seu error de precisió. Per tal de determinar la precisió dels valors de pèrdua de càrrega lineal, doncs, s'ha fet una anàlisi de sensibilitat mitjançant el mètode de Montecarlo (Kochanski 2005) que ha permès propagar els errors de precisió de cotes i pressions. Aquest mètode consisteix en repetir el càlcul de les pèrdues de càrrega lineals un nombre determinat de vegades (1000 en aquest cas), tot associant errors de mesura aleatoris a cada registre per tal d'obtenir la mitjana dels 1000 resultats obtinguts i la desviació estàndard associada. Aquesta desviació permet conèixer el coeficient de variació de les pèrdues lineals considerant tots els possibles errors de mesura i la seva interacció en el càlcul. S'ha suposat que els errors de mesura segueixen una distribució uniforme. Al llarg d'aquest document es farà ús d'aquest mètode en repetides ocasions.

En el cas de les cotes, l'error de mesura considerat ha sigut de ± 1 mm, mentre que per les pressions s'ha pres la desviació estàndard dels diferents valors obtinguts al llarg de tot un assaig, com en el cas de les velocitats. El coeficient de variació de les dades obtingudes varia per cada sensor i nombre de Reynolds, però es troba sempre entre l'1.3% (sensor de pressió P4 i velocitat del flux màxima) i el 5.6% (sensor de pressió P1 i velocitat del flux mínima). La Figura 3.27 mostra l'error de precisió associat al càlcul de les pèrdues de càrrega lineals, que, com es pot comprovar, és força elevat, especialment pels assajos realitzats amb velocitats de flux més baixes.

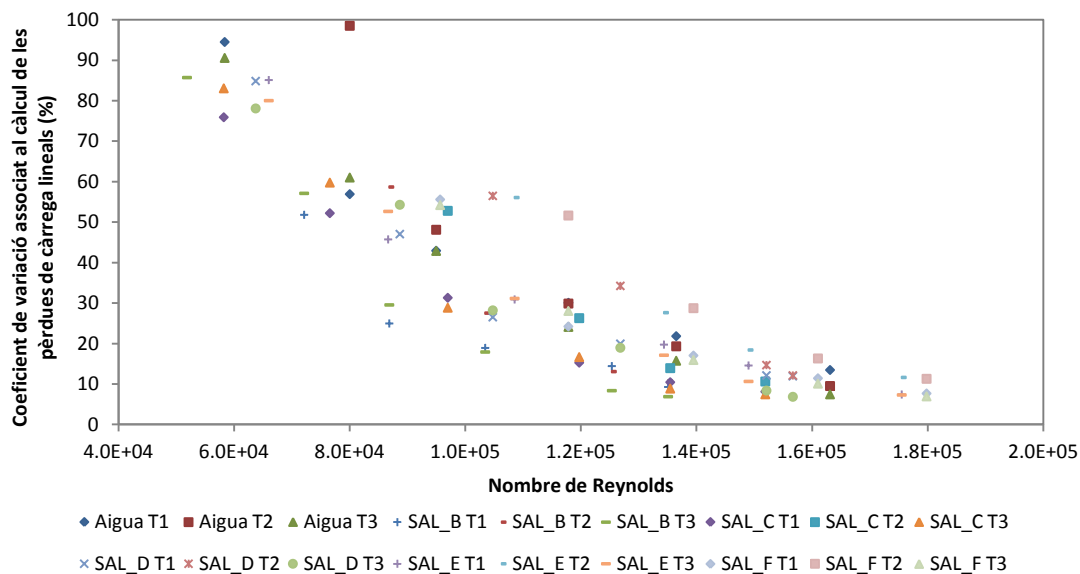


Figura 3.27 Coeficient de variació associat al càlcul de les pèrdues de càrrega lineals, per cadascuna de les mescles i per cada tram del circuit.

La propagació de tots aquests errors de precisió, duta a terme de nou mitjançant el mètode de Montecarlo, ha donat el resultat que es mostra a la Figura 3.28. Com en el cas anterior, la precisió en els assajos fets amb velocitats de flux més baixes empitjora de forma exponencial. Malgrat tot, per a velocitats de flux d'1 m/s i superiors, el percentatge d'error de càlcul de f és inferior al 40%.

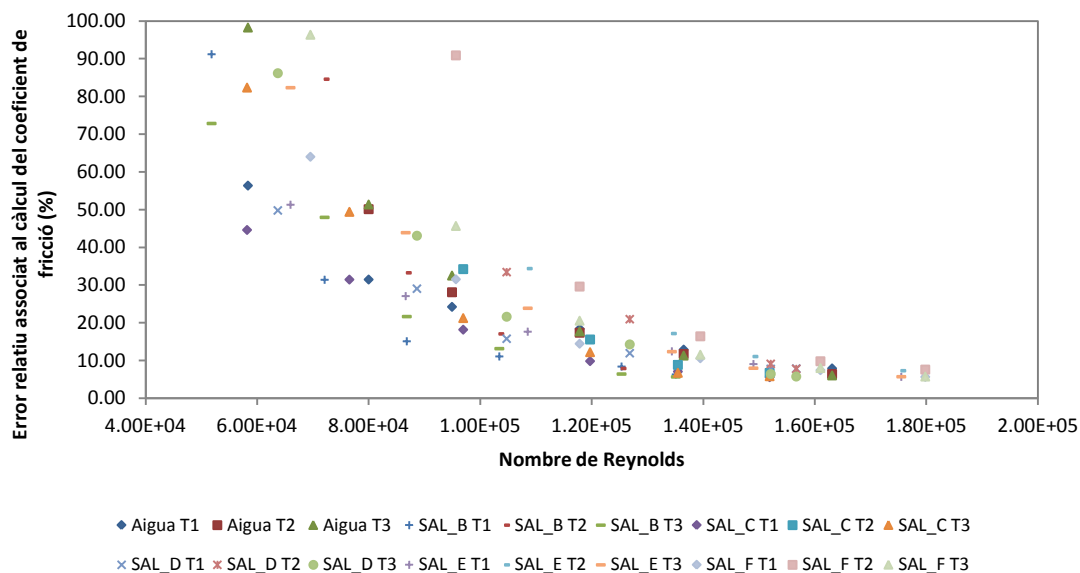


Figura 3.28 Coeficient de variació associat al càlcul del coeficient de fricció, per cadascuna de les mescles i per cada tram del circuit.

3.1.8.2. Càlcul de la viscositat de les mescles

La viscositat de les mescles generades per a la realització dels assajos s'ha obtingut a partir de la relació entre els gradients de pressió registrats i la velocitat del flux associada a aquests. Els gradients de pressió obtinguts de forma experimental corresponen al circuit sencer, des del

sensor de pressió P1 a P4. Així doncs, s'ha dut a terme una regressió no lineal sobre els punts obtinguts de forma experimental, utilitzant l'equació de Darcy-Weisbach i l'expressió per al càlcul del coeficient de fricció de Swamee i Jain (1976). Atès que ja es coneix el valor de la rugositat absoluta de la canonada, ja que s'ha calibrat anteriorment amb aigua neta, l'únic paràmetre desconegut que resta és la viscositat de la mescla, la qual cosa ha permès calcular-ne el valor. En aquest cas s'ha treballat amb la viscositat cinemàtica.

Com és ben sabut, la viscositat d'un fluid varia en funció de la temperatura a què es trobi. És per això que tots els assajos s'han dut a terme a una temperatura similar, propera als 25°C (veure Taula 3.8).

De la Figura 3.29 a la Figura 3.33 es mostra el resultat de les regressions realitzades per a cadascuna de les mescles estudiades. En totes 5 regressions, els valors experimentals obtinguts per a les dues velocitats de flux més baixes són els que s'allunyen més de la corba adaptada, la qual cosa quadra amb l'estudi de sensibilitat de l'apartat anterior, relatiu al càlcul dels coeficients de fricció: com menor és la velocitat del flux, major és l'error màxim associat als càlculs. Tot i així, els valors de R^2 en tots els casos són pròxims a 0.99, de manera que la bondat de les corbes de regressió és molt alta. La Taula 3.12 resumeix els valors de viscositat obtinguts i els errors relatius corresponents al 95% de confiança de l'ajust dut a terme en cada cas.

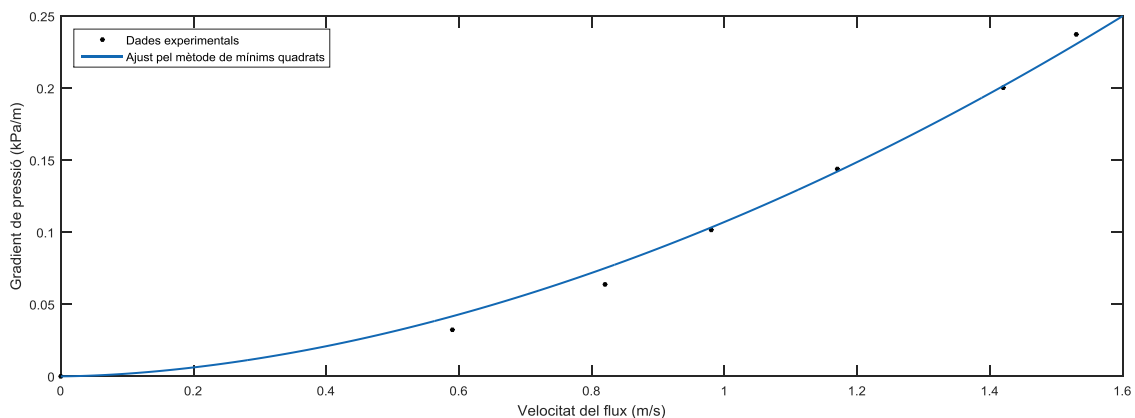


Figura 3.29 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.994$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per tal de determinar el valor de la viscositat de la mescla de salmorra SAL_B.

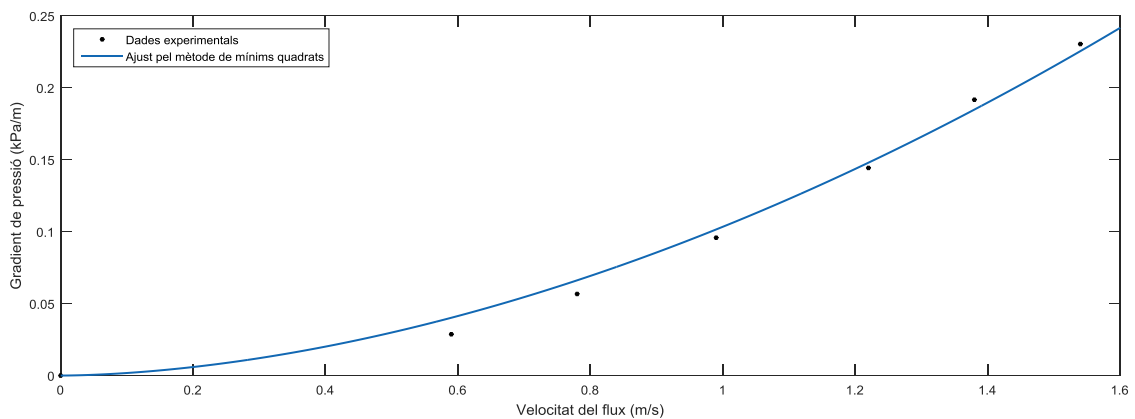


Figura 3.30 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.992$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per tal de determinar el valor de la viscositat de la mescla de salmorra SAL_C.

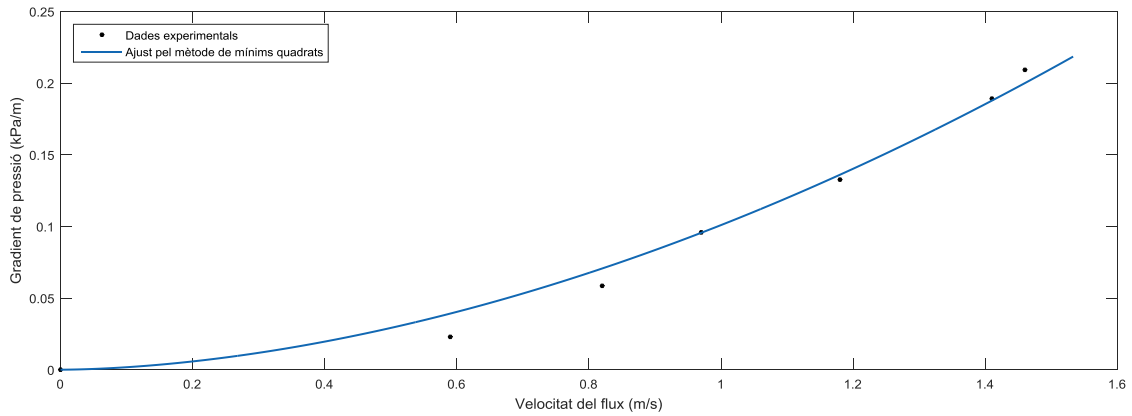


Figura 3.31 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.987$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per tal de determinar el valor de la viscositat de la mescla de salmorra SAL_D.

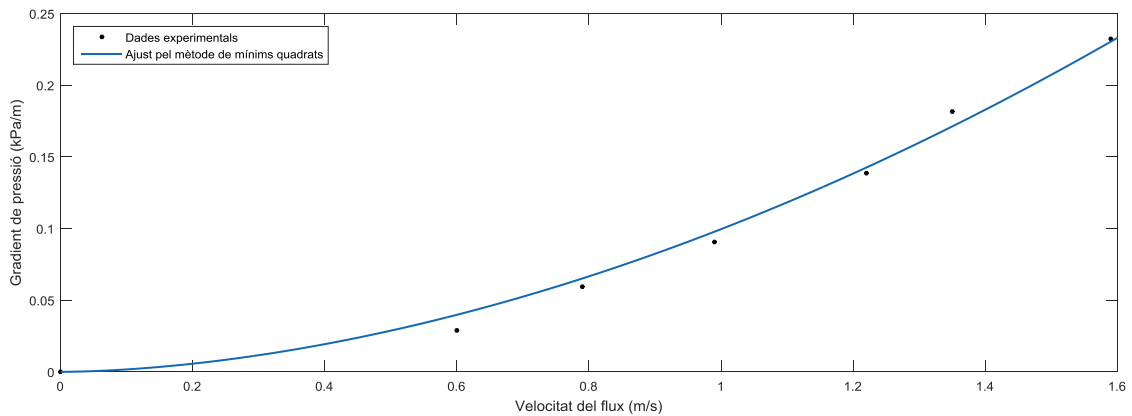


Figura 3.32 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.992$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per tal de determinar el valor de la viscositat de la mescla de salmorra SAL_E.

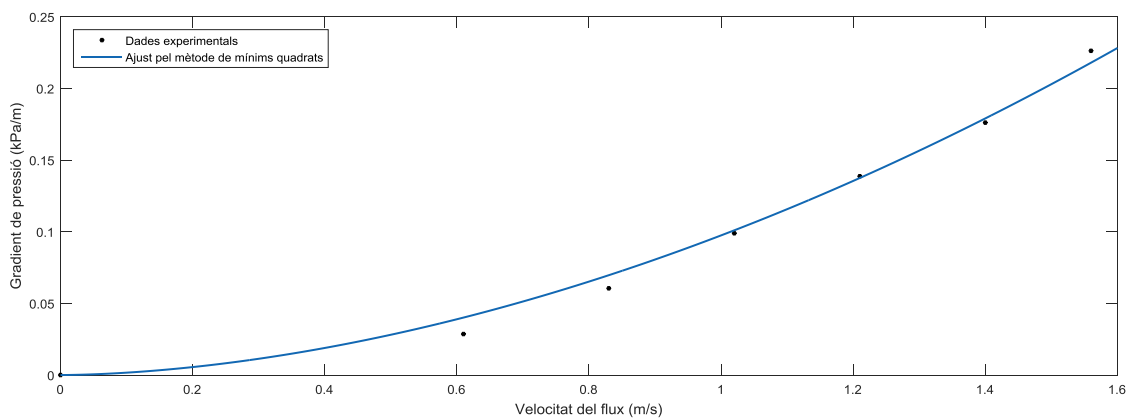


Figura 3.33 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.993$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per tal de determinar el valor de la viscositat de la mescla de salmorra SAL_F.

Mescla	Viscositat cinemàtica (m ² /s)	Coefficient de variació de l'ajust per una confiança del 95% (%)
SAL_B	1.13E-06	10.6%
SAL_C	1.02E-06	11.8%
SAL_D	9.29E-07	12.9%
SAL_E	9.08E-07	13.2%
SAL_F	8.70E-07	13.8%

Taula 3.12 Valors de viscositat cinemàtica obtinguts mitjançant les regressions no lineals dutes a terme per a cadascuna de les mostres de salmorra.

En la Figura 3.34 es representen les viscositats cinemàtiques obtingudes per cada mescla en funció de la seva densitat, a 25°C de temperatura (aproximadament). També s'hi representa la viscositat cinemàtica teòrica de l'aigua i de les dilucions pures de MgCl₂ (Phang i Stokes, 1980), KCl (Gonçalves i Kestin, 1977) i NaCl (Kestin et al., 1981), en funció de la seva densitat, a la mateixa temperatura. Com ja s'ha presentat en la Taula 1.1, la sal extreta de les mines de Sùria, amb la qual s'han dut a terme tots els assajos d'aquest apartat, està formada bàsicament per aquestes tres sals, a més de CaSO₄ i una petita part d'insolubles. No ha sigut possible trobar en la literatura els valors de la viscositat de les dilucions de CaSO₄ en funció de la seva densitat, raó per la qual no es presenten en la figura.

Com es pot observar, les viscositats cinemàtiques resultants dels càlculs realitzats segueixen una tendència força clara que, malgrat que el 92% de la sal està format per NaCl, no es correspon amb la corba traçada per a la solució pura d'aquesta sal. La manca de dades per a l'interval de densitats que va dels 1000 als 1100 kg/m³ impedeix conèixer el comportament de la corba de viscositat cinemàtica de la salmorra estudiada en aquest tram, però es podria interpretar que se situa per sota del valor de la viscositat cinemàtica de l'aigua, seguint el patró de la corba de la solució de KCl, fins a assolir una densitat de mescla de 1124 kg/m³, aproximadament (mescla SAL_E). A partir d'aquest punt, la viscositat augmenta molt ràpidament a mesura que es va afegint més sal a la mescla, a un ritme molt més elevat que en el cas de la solució de clorur de sodi.

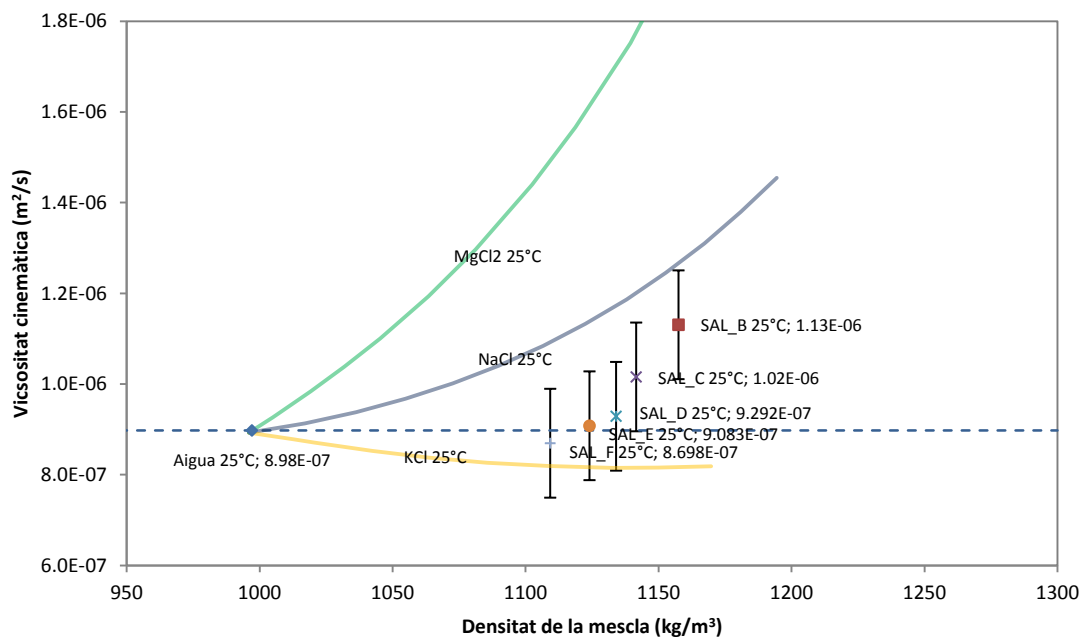


Figura 3.34 Valors de viscositat cinemàtica obtinguts per cada mescla en funció de la seva densitat, a 25°C de temperatura, incloent els errors associats al 95% de confiança de l'ajust. També, viscositat cinemàtica teòrica de l'aigua i de les dilucions pures de MgCl₂, KCl i NaCl, en funció de la seva densitat, a 25°C de temperatura.

Influència de la rugositat absoluta sobre el càlcul de la viscositat

El càlcul de la viscositat relativa de les mescles ha anat precedit del calibratge del circuit per tal d'obtenir el valor de la rugositat absoluta associat a la canonada. Per a tal efecte s'ha dut a terme un ajust sobre les dades experimentals mitjançant el mètode de mínims quadrats, gràcies al qual s'ha pogut determinar el valor de k , amb un error associat del $\pm 40\%$ (per una confiança sobre l'ajust del 95%). Per tal de conèixer la influència d'aquest possible error sobre el càlcul de la viscositat de les mescles s'ha repetit el procés d'obtenció d'aquest valor suposant una desviació del $\pm 10\%$ sobre el valor de la rugositat absoluta. Els resultats es mostren en la Taula 3.13 i es representen en la Figura 3.35, en funció de la seva densitat.

En la taula es pot comprovar que el pes que té la rugositat absoluta sobre la determinació de la viscositat de les mescles és molt baix, tenint en compte que s'ha considerat una desviació del $\pm 40\%$. La seva modificació provoca una variació sobre els valors obtinguts força menor que no pas els errors associats a les regressions dutes a terme per al seu càlcul (veure Taula 3.12).

Per altra banda, com ja s'ha pogut veure en l'anàlisi de sensibilitat dut a terme en relació al càlcul del coeficient de fricció (apartat 3.1.8.1), la desviació sobre els resultats provocada per qualsevol error de mesura (error de càlcul de la rugositat absoluta, en aquest cas) és major per a densitats més baixes.

Mescla	Densitat (kg/m ³)	Desviació de la viscositat associada a una reducció de k d'un 40% (%)	Desviació de la viscositat associada a un augment de k d'un 40% (%)
SAL_B	1157.5	2.65%	-2.56%
SAL_C	1141.6	2.85%	-2.93%
SAL_D	1134.1	3.06%	-3.06%
SAL_E	1124.1	3.23%	-3.21%
SAL_F	1109.3	3.33%	-3.33%

Taula 3.13 Desviació dels valors de viscositat cinemàtica de les mescles produïda en variar un $\pm 40\%$ el valor de la rugositat absoluta de la canonada obtingut.

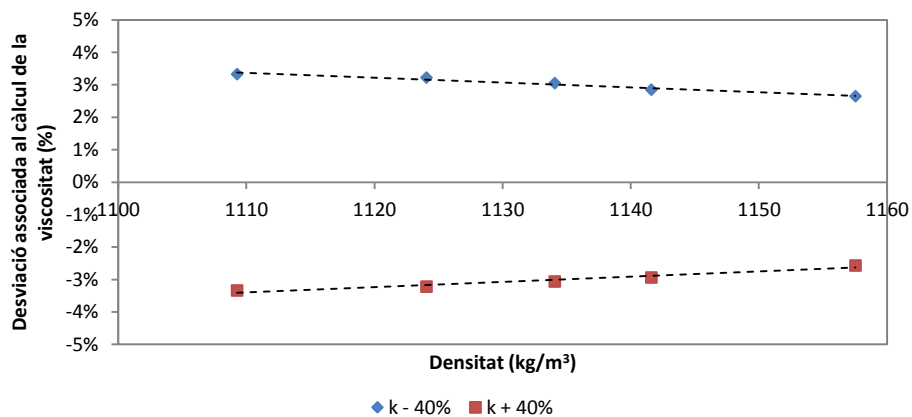


Figura 3.35 Desviació dels valors de viscositat cinemàtica de les mescles produïda en variar un $\pm 40\%$ el valor de la rugositat absoluta de la canonada obtingut, en funció de la densitat de cada mescla.

3.1.8.3. Resistència al flux

Els registres de pressió obtinguts en els assajos, a partir dels quals s'han calculat els pendents motrius associats a cada mescla i a cada velocitat del flux, han permès calcular la viscositat de les diferents mescles generades mitjançant un ajust pel mètode de mínims quadrats a partir de l'expressió de Darcy-Weisbach. Per tal d'il·lustrar la influència de l'augment de la concentració de sòlids totals sobre la resistència al flux que actua sobre la mescla dins la canonada, es presenten tots els resultats en la Figura 3.36. Com és lògic, les mescles amb una concentració major de sòlids i, per tant, major densitat, presenten unes pèrdues de càrrega lineals majors, i la diferència amb les altres mescles s'accentua per a nombres de Reynolds més alts, ja que hi entra en joc la viscositat.

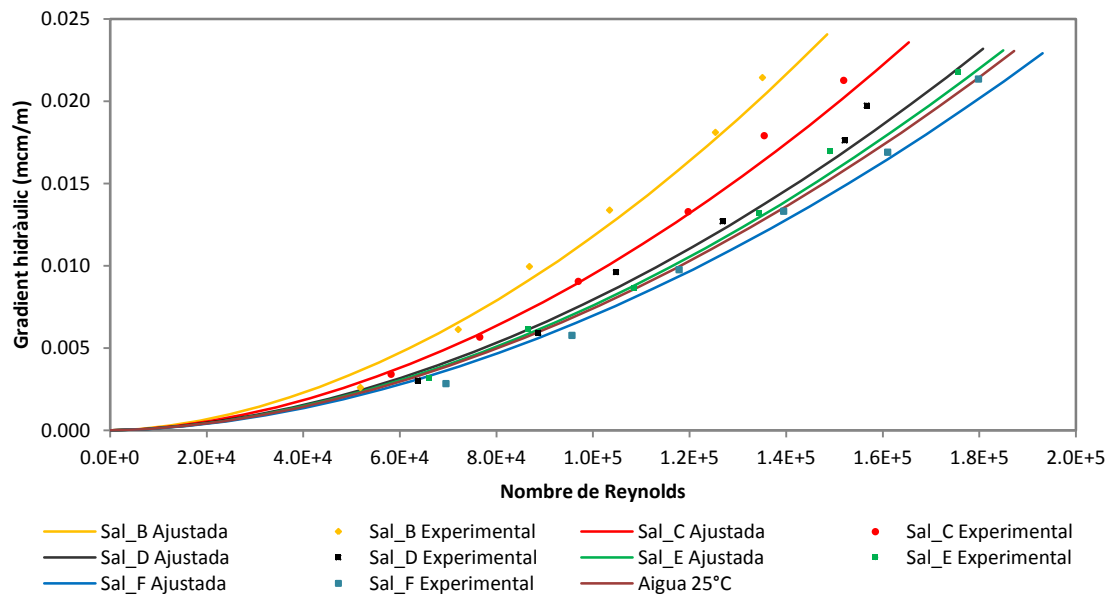


Figura 3.36 Valors del pendent motriu obtinguts a partir de les dades experimentals, per cada mescla assajada, i corbes d'ajust obtingudes pel mètode de mínims quadrats mitjançant la relació de Darcy-Weisbach.

Per altra banda, la Figura 3.37 agrupa totes les mitjanes de les dades experimentals registrades i les corbes que s'hi han ajustat per tal de determinar la viscositat (en el cas de les mescles de salmorra) o la rugositat absoluta (en el cas de l'aigua). Aquestes es presenten de forma

adimensional mitjançant el coeficient de pressió ($C_p = \frac{\Delta p}{\gamma \frac{v^2}{2g}}$, on γ és el pes específic de la

mescla) a l'eix d'ordenades i el nombre de Reynolds a l'eix d'abscisses. D'aquesta manera, les dades presentades ja no depenen ni de la densitat de la mescla ni de la seva viscositat, la qual cosa provoca que totes les corbes ajustades a les dades experimentals pel mètode de mínims quadrats coincideixin en una de sola. Com ja s'ha pogut observar en les figures que mostren aquest ajust (apartat 3.1.8.2) i en l'anàlisi de sensibilitat duta a terme sobre el càlcul del coeficient de fricció (apartat 3.1.8.1), la corba única de la Figura 3.37 presenta un ajust més bo sobre les dades experimentals a mesura que augmenta el nombre de Reynolds.

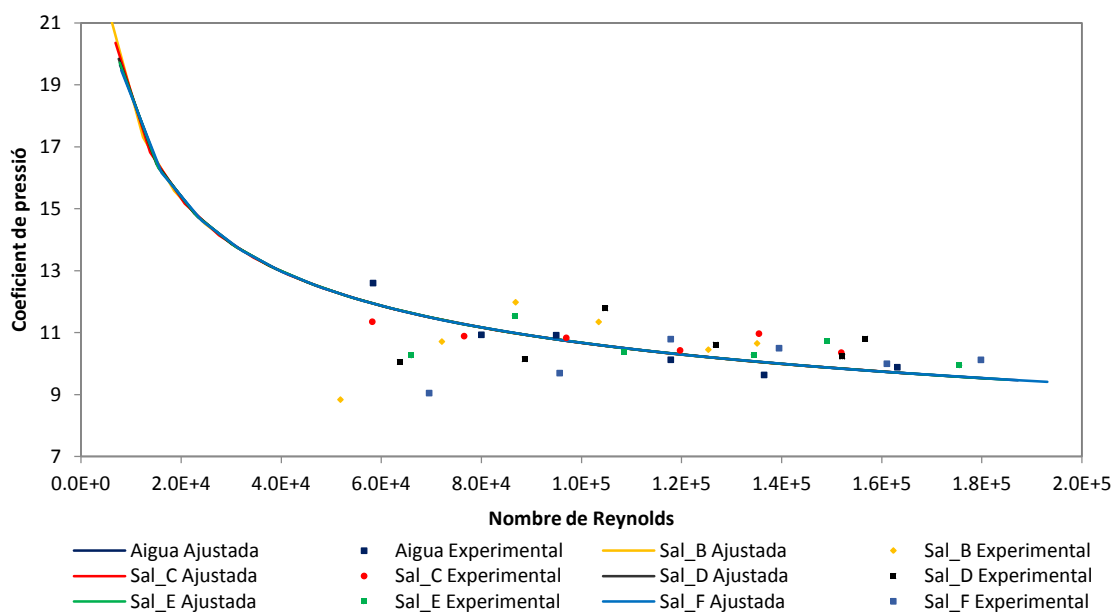


Figura 3.37 Coeficients de pressió obtinguts a partir de les mitjanes de les dades experimentals, per cada mescla assajada, i corbes d'ajust obtingudes pel mètode de mínims quadrats mitjançant la relació de Darcy-Weisbach.

3.1.9. Observacions relatives als assajos amb salmorra

El transport de salmorres a pressió inclou certs fenòmens que amb el circuit experimental del que s'ha disposat i dels sensors utilitzats no s'han pogut quantificar objectivament, però sí qualitativament. La major part de les canonades del circuit són de PVC transparent, la qual cosa permet l'observació del flux en el seu interior. En aquest apartat es presenten les observacions dutes a terme pel que fa a dos dels fenòmens que poden intervenir en el transport d'aquestes mesclades, com són la sedimentació de partícules sòlides i la precipitació de sals.

Sedimentació de les partícules sòlides insolubles

En l'apartat 3.1.3 s'ha presentat un càlcul aproximat dels valors de les velocitats límit de deposició de les partícules sòlides en suspensió, en funció de la mescla assajada. Tal i com s'esperava, no s'han observat deposicions de partícules sòlides al fons de la canonada en cap dels assajos realitzats: la velocitat de flux mínima per a la qual s'han dut a terme ha sigut de 0.6 m/s, i les velocitats límit de deposició teòriques calculades segons l'expressió de Durand i Condolios (1952) es troben per sota d'aquest valor (veure Figura 3.15). Val a dir que l'observació no ha sigut senzilla degut a l'alt grau de turbulència de les mesclades, especialment de les més concentrades. Sí que s'ha pogut observar sedimentació un cop finalitzats els assajos duts a terme amb qualsevol de les mesclades de salmorra, després de l'aturada de la bomba d'impulsió (Figura 3.38, esquerra). En aquesta situació, en la qual es produeix el buidat de les canonades que es troben a cota superior, el líquid es troba en repòs o presenta velocitats molt baixes, la qual cosa afavoreix la sedimentació. Per altra banda, també s'ha pogut observar una acumulació de sediments en els tubs que connecten els sensors de pressió amb la canonada principal (Figura 3.38, dreta).

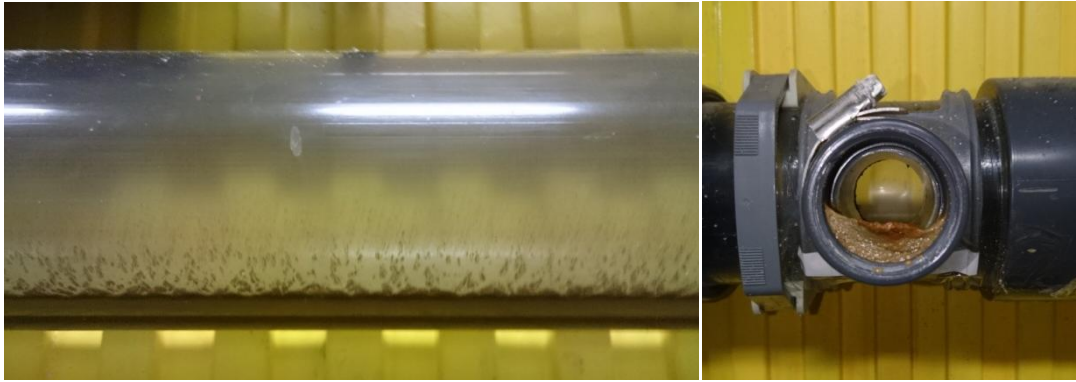


Figura 3.38 Vista d'una canonada del circuit experimental, després d'un assaig realitzat amb salmorra, amb presència de sediments a les parets inferiors (esquerra). Canonada de connexió d'un sensor de pressió amb el tub principal, amb restes de partícules sòlides acumulades al llarg de diverses sèries d'assajos (dreta).

Precipitació de sals

No s'ha pogut observar precipitació de sals a l'interior de la canonada, ni tan sols en el procés de buidatge o en situació de repòs. En cap cas s'ha produït cristal·lització de sals precipitades en les parets internes de la canonada, ni tan sols durant la circulació d'una mescla de salmorra en la concentració límit de saturació. En canvi, sí que s'ha observat precipitació a l'exterior del circuit i del dipòsit d'emmagatzematge, en zones susceptibles d'entrar en contacte amb la mescla. La Figura 3.39 mostra com a exemple la cristal·lització produïda al voltant del punt de buidatge del dipòsit, formant crostes que envolten les parets del tanc o fins i tot estalagmites.

Malgrat que no s'ha pogut observar precipitació, les ampliacions làser dutes a terme mostren la presència de cristalls de sal entre els sediments recollits, i s'ha comprovat que les tres mescles de major concentració de sòlids es trobaven per sobre del límit de saturació de CaSO_4 . Per tant, sembla clar que sí que s'ha produït precipitació d'aquest compost, però que això no ha afectat al funcionament hidràulic del circuit, ja que no ha format agregats a les parets d'aquest.



Figura 3.39 Cristal·lització de precipitats de sal al voltant del tub d'evacuació del dipòsit d'emmagatzematge, i a les parets d'aquest.

3.2. Circuit experimental 2

3.2.1. Objectius

Els assajos duts a terme en la instal·lació experimental de l'apartat anterior han permès determinar alguns valors de la viscositat cinemàtica d'un tipus de salmorra en funció de la seva concentració de sal, a 25°C de temperatura. De qualsevol manera, les dificultats mostrades en la seva determinació van conduir a la necessitat de plantejar una campanya experimental en un nou circuit que fos més simple i que permetés un major control de les pèrdues de càrrega. Així doncs, els objectius plantejats en aquest apartat són els següents:

- Determinar de forma experimental la viscositat de diverses mostres de salmorra, per a diferents concentracions de sal, en funció de la temperatura, mitjançant un model experimental.
- Mesurar la viscositat de les mateixes mostres, filtrades prèviament per eliminar la presència de partícules sòlides insolubles, mitjançant un viscosímetre d'Ostwald.
- Examinar la influència sobre la viscositat de la presència de fins en suspensió.

3.2.2. Determinació de la viscositat. Metodologia experimental

3.2.2.1. Circuit experimental

El model en el qual s'ha dut a terme la campanya experimental presentada en aquest apartat és un circuit tancat que consta de dos dipòsits de PVC, situats a la mateixa cota de solera i connectats mitjançant dues canonades d'acer inoxidable de diferent diàmetre. S'ha ubicat un sobreexidor de llavi fi a l'interior d'ambdós dipòsits que permet assegurar-hi el manteniment d'un nivell constant durant la realització dels assajos. L'altura del sobreexidor en el dipòsit de capçalera (Dipòsit 1) és més alta que la del dipòsit de cua (Dipòsit 2), de tal manera que quan els dipòsits s'omplen es produeix una diferència de càrrega entre ells (Figura 3.40). Es pot seleccionar la conducció a utilitzar en cada assaig usant un tap rosca en el seu extrem aigües amunt.

El circuit es completa amb un tanc inferior de 1000 litres de capacitat, aproximadament, que actua com a dipòsit de recirculació (Figura 3.41, dreta). La impulsió del líquid cap al Dipòsit 1 es duu a terme amb una bomba submergida dins d'aquest tanc. Les vàlvules instal·lades en totes les connexions permeten regular el flux. Són especialment importants la vàlvula de sortida del sobreexidor del Dipòsit 2 i la que es troba en el tub de connexió entre el dipòsit auxiliar i el Dipòsit 1, ja que són les que permeten regular el cabal.

Aquest model s'ha dissenyat amb l'objectiu de determinar indirectament la viscositat de diferents mescles de salmorra. Per això cal prèviament mesurar el cabal circulat entre el Dipòsit 1 i el Dipòsit 2. En la condició d'equilibri, ambdós dipòsits es troben plens fins al seu respectiu sobreexidor, de tal manera que el seu nivell és estable i constant. En aquesta situació, la pèrdua de càrrega entre dipòsits és fàcilment calculable, ja que equival a la diferència de nivell entre dipòsits més les pèrdues de càrrega localitzades, que es discutiran més endavant. Per tant, el cabal que circula per la canonada entre dipòsits és també un valor constant. De la relació de Darcy-Weisbach per determinar el pendent motriu en un flux a pressió es pot afirmar que, a igualtat de rugositat absoluta de la canonada i de temperatura del fluid, aquest cabal només depèn de la viscositat del fluid que es trobi en circulació. És a dir, quant major sigui la viscositat del líquid circulat per la canonada, menor serà el cabal del flux. En l'apartat 3.2.2.5 es detalla el procediment de càlcul.

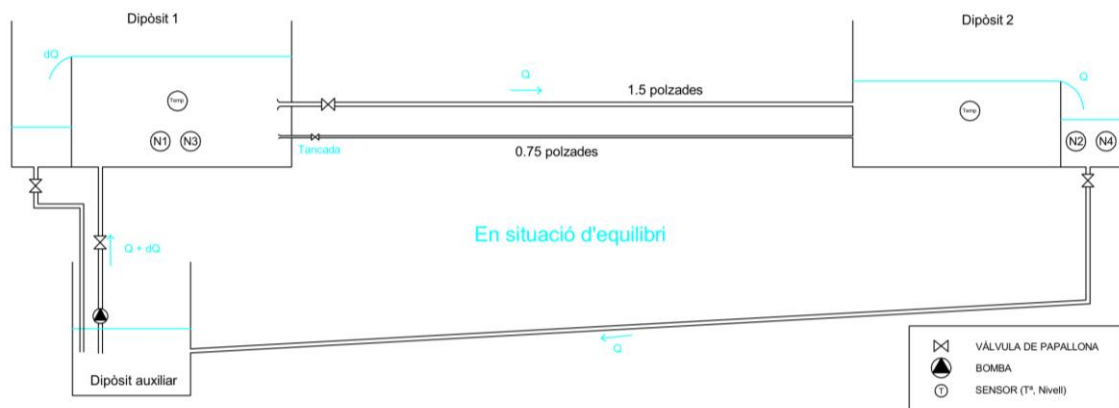


Figura 3.40 Esquema del circuit experimental, incloent els sensors que s'hi troben instal·lats. En blau, posició i flux de l'aigua o de la mescla de salmorra en situació d'equilibri.



Figura 3.41 Vista del circuit des del dipòsit de cua (Dipòsit 2), a l'esquerra, i del dipòsit auxiliar, a la dreta.

Per a un màxim control de la pèrdua de càrrega entre dipòsits en situació d'equilibri és important que la làmina d'aigua en ambdós dipòsits sigui estable. Per a tal efecte, el Dipòsit 1 i el 2 tenen una base rectangular de $77 \times 75 \text{ cm}^2$. Per altra banda, l'altura del sobreexidor del dipòsit de capçalera és de 45 cm, mentre que la del sobreexidor del dipòsit de cua és de 34.9 cm (cosa que suposa una diferència de cota de 10.1 cm). Amb tot això, per omplir ambdós dipòsits fins a la cota dels respectius sobreexidors són necessaris 460 litres.

Els dos dipòsits s'han connectat amb dues canonades de diferent diàmetre, d'1.5 i $\frac{3}{4}$ de polzada, amb unes longituds de 3.012 m i 3.014 m, respectivament. L'objectiu d'aquest desdoblament ha sigut poder dur a terme els mateixos assajos en un i altre tub per tal de validar els resultats. S'han escollit tubs d'acer inoxidable perquè la seva rugositat absoluta és elevada, de manera que la pèrdua de càrrega per fricció sigui suficientment elevada com per poder-la apreciar a partir de la mesura del cabal circulat.

Les mesures del cabal en cadascun dels assajos s'han dut a terme volumètricament en el recinte que es forma aigües avall del sobreexidor de retorn del Dipòsit 2 que en endavant es referirà com a Dipòsit 2.1. Coneguda l'àrea de la base del Dipòsit 2.1, és possible obtenir el valor del cabal que circula per la canonada tot multiplicant aquesta àrea per la velocitat d'ascens del nivell. Com és obvi, per realitzar aquest aforament volumètric totes les vàlvules dels tubs de sortida del Dipòsit 2 s'han de trobar tancades. L'àrea del Dipòsit 2.1 és de $18.2 \times 75.6 \text{ cm}^2$.

La instal·lació la completen tot un seguit de sensors que han de permetre el monitoratge de la temperatura del líquid circulat i de la cota de làmina lliure en els dipòsits, amb la distribució mostrada a la Figura 3.40. Per a l'aforament volumètric és necessari controlar el nivell en el Dipòsit 2.1, per la qual cosa s'hi ha instal·lat dos sensors de pressió (N2 i N4). A l'interior del Dipòsit 1 s'hi ha col·locat dos sensors de pressió més per comprovar l'estabilitat del nivell de la làmina lliure.

3.2.2.1.1. Equips i sensors utilitzats

Es detallen a continuació els aparells utilitzats en la realització dels assajos, amb les seves característiques tècniques i el seu calibratge, si s'escau.

Bomba submergible

Per a impulsar el líquid des del dipòsit auxiliar fins al dipòsit 1 es fa servir una bomba centrífuga submergible de la casa Sterwins, model 1000 DW-3. Aquesta pot aportar un cabal màxim de 18000 l/h i permet el pas de partícules de fins a 0.5 mm de diàmetre. En la Figura 3.42 (dreta) es mostra la seva corba característica.

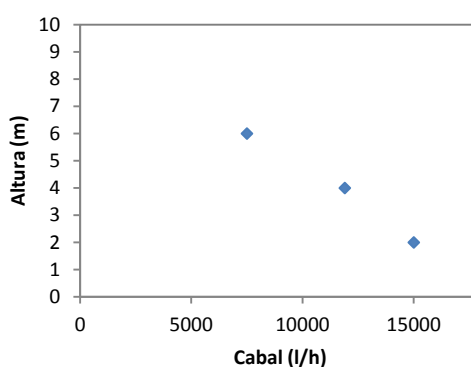


Figura 3.42 Bomba centrífuga submergible Sterwins, model 1000 DW-3, a l'esquerra. A la dreta, punts de la seva corba característica proporcionats pel fabricant.

Resistència elèctrica

S'utilitza una resistència elèctrica per pujar la temperatura de la mescla en cas de necessitat. Incorpora un termòstat i és capaç d'escalfar el líquid del circuit uns 2°C/h. S'ha col·locat a l'interior del dipòsit 1.



Figura 3.43 Resistència elèctrica utilitzada per escalfar el líquid assajat.

Sensors de pressió piezoresistius

Es tracta de sensors de pressió submergibles de la casa Messtech, model MA-403. Tenen un fons d'escala de 5 mca, amb una precisió del $\pm 0.3\%$ del fons d'escala. Se n'han col·locat dos a l'interior del Dipòsit 1 i dos a l'interior del Dipòsit 2, aigües avall del seu sobreexidor (Dipòsit 2.1).

Atesa la importància de les mesures dels sensors de nivell situats al Dipòsit 2.1, se n'ha realitzat un calibratge fent ús del piezòmetre que s'hi ha instal·lat (Figura 3.44, dreta). Aquest calibratge ha consistit en la realització de set mesures en estàtic per diferents nivells d'aigua: per cada nivell d'aigua s'ha anotat la lectura del piezòmetre i les dels sensors piezorresistius, obtenint el resultat presentat a la Taula 3.14.

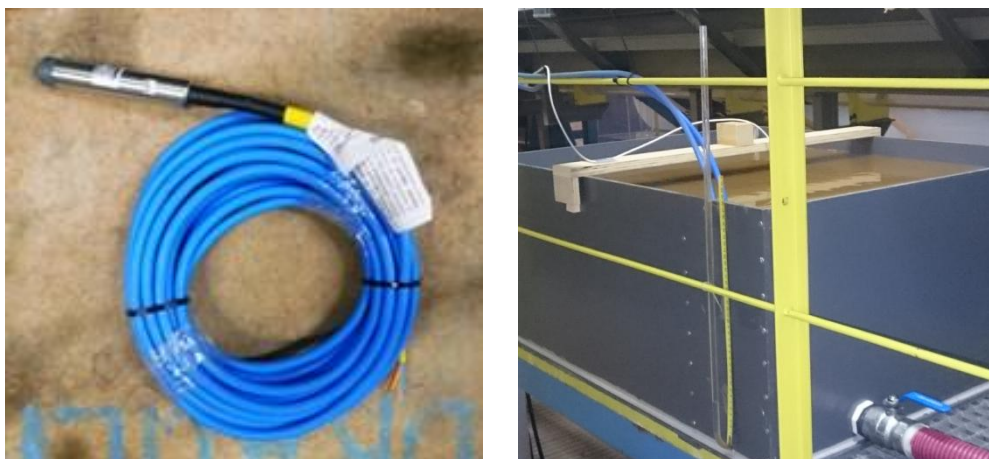


Figura 3.44 Sensor de pressió piezorresistiu Messtech, model MA-403, a l'esquerra. A la dreta, vista del piezòmetre instal·lat en el Dipòsit 2.1.

Lectura	Nivell piezòmetre (cm)	Nivell sensor N2 (cm)	Nivell sensor N4 (cm)
1	6.4	9.6	6.6
2	10.8	14.0	11.1
3	15.6	19.0	15.6
4	20.5	24.0	20.5
5	24.9	28.1	24.6
6	30.7	34.0	30.2
7	33.6	36.8	33.0

Taula 3.14 Mesures de nivell del piezòmetre del Dipòsit 2.1 i dels sensors de pressió situats al seu interior, per al calibratge d'aquests últims.

Com es pot observar, les lectures del sensor de pressió N2 s'allunyen més de 3 centímetres de les lectures de nivell del piezòmetre. Malgrat això, com que l'objectiu d'aquestes mesures és determinar la velocitat de pujada del nivell i no pas el nivell en si, la diferència entre unes mesures i unes altres no suposa cap problema. El que és realment important és que el pendent de la recta d'ajust sigui el mateix per a tots els sensors i per al piezòmetre. A la Figura 3.45 es presenten les mesures dels sensors contra les lectures del piezòmetre: el pendent de les rectes de regressió obtingut, molt proper a 1, mostra la bondat de l'ajust dels sensors. En el cas del sensor N2 l'ajust és gairebé perfecte, ja que el pendent de la recta és d'1.007, mentre que en el cas del sensor N4 el pendent és de 0.9657. Per tal de dotar de coherència les lectures

d'ambdós sensors es calcula un factor d'ajust dividint el pendent de la recta de regressió de les lectures de N2 pel de N4. Aquest factor és 1.036, i és el valor pel qual es multiplicarà tota velocitat de pujada del nivell del Dipòsit 2.1 que s'hagi obtingut a partir de les lectures del sensor N4.

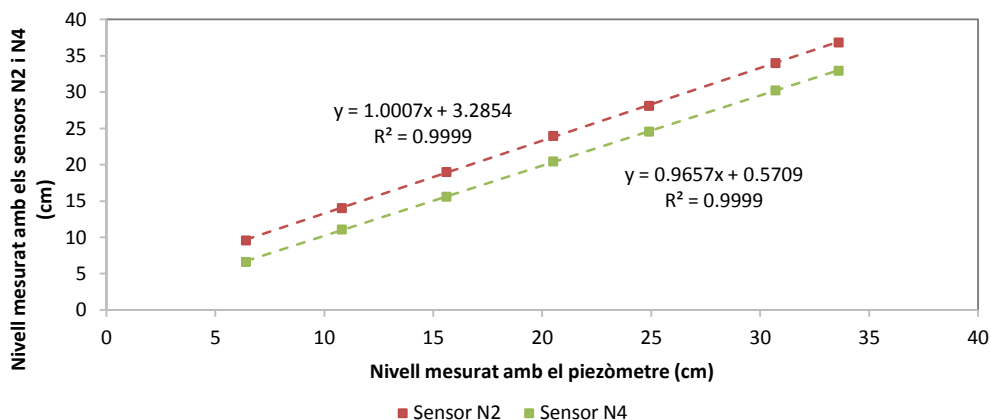


Figura 3.45 Lectures de nivell dels sensors de pressió N2 i N4 en funció de les lectures preses amb el piezòmetre del Dipòsit 2.1. Dades preses de la Taula 3.14.

Sensors de temperatura

Són sensors RTD (detectors de temperatura per resistència) de la casa Desin, model PT100, 1/10 DIN. Tenen una tolerància de ± 0.03 °C a 0 °C i de ± 0.08 °C a 100 °C. Estan fabricats amb platí amb una resistència de 100 ohms a una temperatura de 0 °C. S'han utilitzat dos sensors, un per cada dipòsit.



Figura 3.46 Sensor de temperatura RTD Desin, model PT100.

Enregistrador de dades

La recollida de dades s'ha dut a terme amb un enregistrator de dades de la casa Campbell, model CR1000, de 8 canals d'entrada analògics, al qual es connecten tots els sensors per cable. La seva freqüència de registre de dades màxima és d'1 segon.



Figura 3.47 Enregistrador de dades Campbell, model CR1000, encarregat del registre de les lectures dels sensors instal·lats al llarg del circuit.

Tanc frigorífic

És el tanc de refrigeració presentat en l'apartat anterior. En aquest cas no s'ha utilitzat com a dipòsit d'emmagatzematge sinó per refredar les mescles per a la realització dels assajos a temperatures més baixes. Com ja s'ha comentat a l'apartat 3.1.2.2, és de la casa Hackman Wedholms i té una capacitat d'emmagatzematge superior als 750 litres, amb un diàmetre interior d'1.22 metres i una altura útil de 70 centímetres (Figura 3.48). Incorpora una pala giratòria a per homogeneïtzar la temperatura del fluid.

El refredament del líquid s'aconsegueix mitjançant la circulació de gas R12 a través d'un serpentí que envolta el dipòsit passant per l'interior de les parets d'aquest. El motor que actua de condensador d'aquest gas té una potència d'1.6 kW i se situa al costat del dipòsit (Figura 3.49, esquerra). Va equipat amb un termòstat que permet una precisió màxima d'aproximadament 1.7 °C, i que cobreix un rang de temperatures d'entre -20 °C i 19 °C (Figura 3.49, dreta).



Figura 3.48 Tanc de refrigeració Hackman Wedholms.

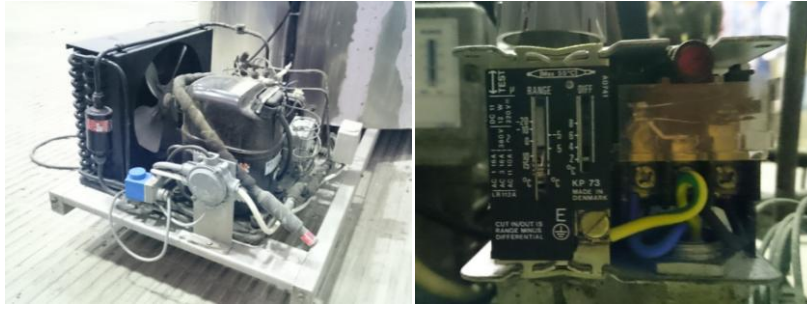


Figura 3.49 Condensador de gas (esquerra) i termòstat (dreta) del tanc de refrigeració.

Per comprovar la capacitat de refrigeració del tanc s'ha omplert amb una salmorra de concentració de sal propera als 100 kg/m^3 . En condicions estàtiques (removent únicament la salmorra mitjançant les pales giratòries que incorpora el tanc), s'han obtingut els resultats que es mostren a la Figura 3.50. Partint d'una temperatura de 25°C (la temperatura ambient) es pot observar com en només 5 hores la temperatura ha disminuït uns 15°C , és a dir amb un ritme de 3°C/h . Al cap d'unes 10 hores la temperatura s'estabilitza al voltant dels 7°C .

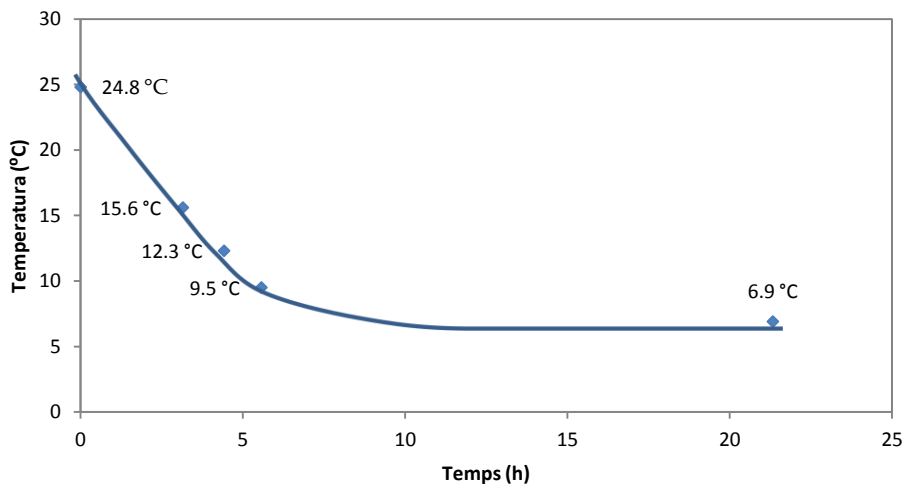


Figura 3.50 Corba de refredament d'una mescla de salmorra de 100 kg/m^3 de concentració, partint d'una temperatura ambient propera als 25°C .

3.2.2.2. Característiques de la salmorra.

Les mescles utilitzades en la realització dels assajos s'han preparat de la mateixa manera que en el cas del circuit experimental de l'apartat 3.1. Com ja s'ha comentat en l'apartat 3.1.3, la diferència entre les diverses mescles utilitzades rau en la concentració de sòlids de cadascuna, tal i com es mostra a la Taula 3.15. Aquestes mescles s'han preparat en el mateix laboratori a partir d'aigua de la xarxa i de sal extreta directament de la mina de Sùria. Per tal d'assegurar la màxima dissolució de la sal en l'aigua i l'homogeneïtzació de la mescla s'ha fet circular durant almenys una hora a través del circuit, tot removent a la vegada el líquid contingut en el dipòsit acumulador.

La densitat i la concentració de sòlids de cada mescla s'han mesurat a posteriori a partir d'una mostra de salmorra extreta en circulació. La densitat s'ha mesurat per volumetria, mentre que la concentració de sòlids s'ha obtingut a partir del producte del percentatge en massa de la mescla per la seva densitat.

En aquest cas, la primera mescla utilitzada en els assajos, la S1, es trobava en situació de màxima saturació de sòlids, és a dir, en la concentració límit de dissolució de les sals. Per tant, la resta de mescles s'han generat a partir d'aquesta tot afegint-hi aigua per diluir-la.

Diversos imprevistos en la realització dels assajos (veure 3.2.2.7) han impedit continuar endavant, raó per la qual només s'han generat les tres mostres presentades.

Mescla	Densitat (kg de mescla/m ³ de mescla)	Percentatge en massa de sòlids (kg de sòlids/kg de mescla)	Concentració de sòlids (kg de sòlids/m ³ de mescla)
S1	1201.6	27.5	331
S2	1197.6	27.2	326
S3	1160.4	22.5	261

Taula 3.15 Densitat, percentatge en massa de sòlids i concentració de sòlids de cadascuna de les mescles fabricades per a la realització dels assajos. Els sòlids indicats en la segona i tercera columnes fan referència al total de partícules sòlides, ja siguin solubles o insolubles.

L'anàlisi de la composició química de la sal i de les partícules sòlides insolubles es pot consultar a l'apartat 3.1.3. Pel que fa a la possible precipitació de CaSO₄, la taula mostra la seva concentració límit de solubilitat a 25°C i a 30 °C en una solució de NaCl (Bock 1961), per a cada mescla. Es desconeix aquesta dada per a 15°C i 20°C. En qualsevol cas, el límit de solubilitat d'aquest sulfat se situa molt per sota de la concentració existent en les mescles assajades, cosa que significa que hauria de precipitar en tots els casos.

Mescla	Concentració NaCl (mols NaCl/1000g H ₂ O)	Concentració en massa CaSO ₄ (g CaSO ₄ /100g H ₂ O)	Concentració límit de solubilitat CaSO ₄ a 25°C (g CaSO ₄ /100g H ₂ O)	Concentració límit de solubilitat CaSO ₄ a 30°C (g CaSO ₄ /100g H ₂ O)
S1	5.94	1.25	0.58	0.55
S2	5.85	1.23	0.60	0.58
S3	4.54	0.96	0.69	0.65

Taula 3.16 Concentració de NaCl i CaSO₄ en les mescles de salmorra i concentració límit de solubilitat del CaSO₄ hidratat en una solució de NaCl (Bock, 1961).

Per a l'obtenció de la velocitat límit de deposició (v_D) de les partícules sòlides transportades en suspensió per la mescla, s'ha seguit el mateix procediment i hipòtesis de càlcul que a l'apartat 3.1.3, obtenint els resultats presentats a la Taula 3.17 i representats a la Figura 3.51 en funció de la densitat de la mescla. Com s'hi pot comprovar, la velocitat límit de deposició en totes les hipòtesis contemplades és pràcticament constant per a qualsevol densitat de la mescla i inferior a 0.6 m/s, de tal manera que per a velocitats de flux superiors a aquest valor no s'hauria de produir sedimentació.

Mescla	Concentració en massa de sòlids totals (%)	C_m (%)	C_v (%)	ρ_m (kg/m ³)	ρ_s (kg/m ³)	$d = d_{50} = 140 \mu\text{m}$		$d = 60 \mu\text{m}$		$d = 10 \mu\text{m}$	
						F_L	v_D (m/s)	F_L	v_D (m/s)	F_L	v_D (m/s)
S1	27.51	0.31	0.19	1201.6		0.51		0.40		0.26	
S2	27.20	0.31	0.19	1197.6	2000	0.45	0.52	0.35	0.40	0.225	0.26
S3	22.53	0.26	0.15	1160.4			0.54		0.42		0.27

Taula 3.17 Velocitats límit de deposició (v_D) calculades per cadascuna de les mescles de salmorra mitjançant l'expressió de Durand i Condolios (1952), en funció de la mida de gra (d) de les partícules sòlides en suspensió, amb el nombre de Froude corresponent (F_L). S'inclou la concentració de sòlids totals, el percentatge en massa (C_m) i en volum (C_v) de les partícules en suspensió, la densitat de la mescla (ρ_m) i la densitat dels sòlids (ρ_s).

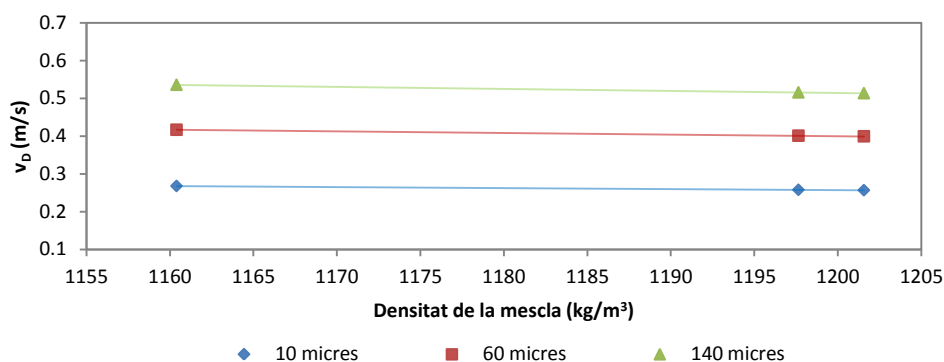


Figura 3.51 Velocitats límit de deposició representades en funció de la densitat de la mescla que arrossega les partícules sòlides en suspensió i de la mida de gra d'aquestes.

3.2.2.3. Metodologia seguida en la realització dels assajos

El procediment que s'ha seguit per a la realització dels assajos és el següent:

1. Un cop preparada i homogeneïtzada la mescla a l'interior del tanc frigorífic, es refreda fins a 10°C de temperatura, aproximadament. En acabat, es transvasa la mescla cap al dipòsit auxiliar mitjançant la bomba submergible.
2. Es fa circular la mescla del dipòsit auxiliar cap al circuit fins a assolir el nivell de sobreexidor en els dipòsits 1 i 2. Es col·loca el tap roscat a la canonada de diàmetre superior, d'1.5 polzades, i es calibra l'obertura de la vàlvula de sortida de la bomba submergible per tal d'assolir règim permanent un cop el nivell dels dos dipòsits s'hagi estabilitzat en els respectius sobreexidors.
3. Es comprova la temperatura de la mescla i s'escalfa fins als 16°C mitjançant la resistència elèctrica, en cas que sigui necessari. També es disposa d'un seguit d'ampolles d'aigua congelada tancades hermèticament per si, en cas contrari, la temperatura és superior a 16°C. Com que la mescla es va escalfant durant la realització dels assajos és possible que calgui fer-ne ús durant el procés per recuperar la temperatura desitjada.
4. Assolits els 16°C s'inicia l'assaig, que consisteix en tancar la vàlvula de sortida del Dipòsit 2.1 per iniciar l'aforament del cabal circulat. S'anota l'instant de temps en el qual el nivell de la mescla es troba per damunt dels sensors de pressió. En el moment en què el nivell està a punt d'assolir la cota del sobreexidor es torna a donar pas al flux a través de la vàlvula, i també s'anota l'instant de temps. Les lectures dels sensors de

pressió instal·lats en el Dipòsit 2.1 són registrades per l'enregistrador de dades amb una freqüència d'un segon i es consultaran posteriorment, raó per la qual cal conèixer l'instant d'inici i de final de l'assaig. Es repeteix aquest punt com a mínim 3 vegades.

5. Es descargola el tap roscat que obstrueix el pas del tub d'1.5 polzades i es col·loca al tub de ¾ de polzada. Es torna a regular la vàlvula de sortida de la bomba submergible per tal d'assolir de nou l'equilibri en el flux de salmorra.
6. Es repeteixen els punts 3 i 4, ara amb cabals superiors.
7. Finalitzats els assajos a 16°C, s'escalfa la mescla fins a 20°C mitjançant la resistència elèctrica. Es repeteixen els passos 4, 5 i 6, és a dir, es duen a terme els assajos per als dos tubs, ara a 20°C de temperatura. Posteriorment, es fa el mateix a 25°C i a 30°C.

Aquest procés s'ha dut a terme inicialment amb aigua destil·lada per tal de calibrar la rugositat absoluta de les canonades i posteriorment amb les mescles S1, S2 i S3 per determinar-ne la viscositat. Per motius que es resoldran més endavant, entre els assajos relatius a la mescla S2 i els relatius a la mescla S3 el procés esmentat també s'ha dut a terme amb aigua de xarxa. Una vegada finalitzats els assajos fets amb qualsevol de les mescles, es traspassa el líquid al tanc frigorífic per tal de generar la següent mescla i es netegen a fons les restes de salmorra en el circuit.

L'elecció de les temperatures a les quals s'han dut a terme els assajos respon a criteris tècnics, tenint en compte que no ha sigut possible mantenir les mescles per sota de 16°C i intentant obtenir un ventall de temperatures suficientment ampli per poder apreciar diferències en les diferents viscositats obtingudes. En tots els casos s'ha considerat com a acceptable una precisió de $\pm 0.3^\circ\text{C}$ en la temperatura de la mescla. La temperatura ambient durant la realització dels assajos, que ha ocupat diverses setmanes, s'ha trobat sempre entre els 19°C i els 23°C.

La Taula 3.18 resumeix les característiques de les mostres d'aigua i de salmorra utilitzades en els assajos que es presenten en aquest apartat. S'ha pres un valor únic de la densitat per a totes les temperatures, mesurat en laboratori a 20°C, aproximadament.

Mescla	Concentració de sòlids (kg/m^3)	Densitat de la mescla (kg/m^3)
Aigua destil·lada	0	997.5
Aigua de xarxa	0	995.2
S1	331	1201.6
S2	326	1197.6
S3	261	1160.4

Taula 3.18 Concentració de sòlids i densitat de les mescles fabricades per a la realització dels assajos.

3.2.2.4. Registres obtinguts

A la Figura 3.52 i la Figura 3.53 es mostren els registres de pressió i temperatura obtinguts, respectivament, en un dels diferents assajos duts a terme. En concret, el realitzat a través del tub de ¾ de polzada de diàmetre amb la mescla S1, al voltant de 25°C de temperatura. Les dades obtingudes en la resta de casos són molt similars i per tant no aportarien més informació rellevant.

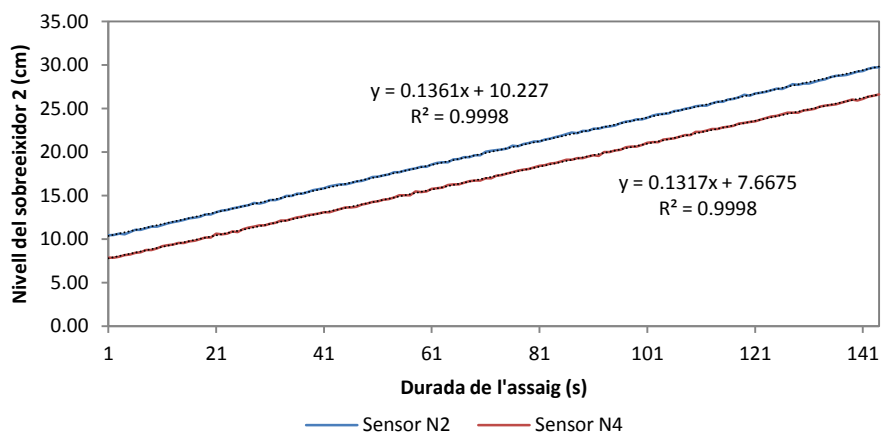


Figura 3.52 Registres dels sensors de pressió N2 i N4 (Dipòsit 2.1), durant l'assaig realitzat amb el tub de ¾ de polzada amb la mescla S1, a 25°C.

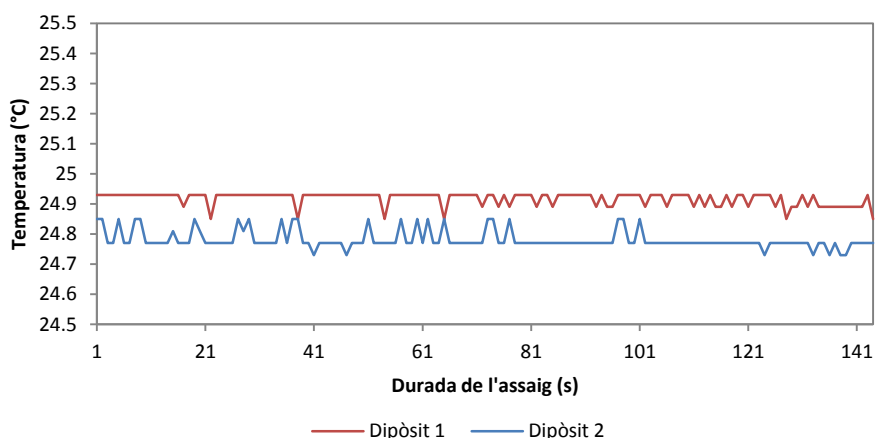


Figura 3.53 Registre de la temperatura als dipòsits 1 i 2. Corresponen a l'assaig realitzat a través del tub de ¾ de polzada amb la mescla S1, a 25°C.

En els assajos fets amb el conducte d'1.5 polzades es produeixen unes fluctuacions considerables en la superfície lliure de la mescla en el Dipòsit 2.1. Aquest fet provoca que els sensors de pressió instal·lats en aquest dipòsit presentin lectures poc concordants, degut a la manca d'horitzontalitat i estabilitat de la làmina lliure. Per aquest motiu, tots els assajos es van acabar realitzant amb el conducte de diàmetre ¾ de polzada.

En la Taula 3.19 es mostren les dades obtingudes, doncs, en els assajos a través del tub de diàmetre menor. Com s'hi pot observar, en alguns casos s'han dut a terme tres repeticions, mentre que en d'altres s'ha arribat fins a les sis.

Els valors de temperatura equivalen a la mitjana de totes les lectures de temperatura registrades pels sensors situats als dipòsits 1 i 2 durant l'assaig corresponent. Per la seva banda, els valors de la velocitat de pujada del nivell en el Dipòsit 2.1 equivalen al pendent de la recta de regressió adaptada a les dades de nivell de cada assaig. Cal recordar que les dades de nivell en el cas dels assajos fets amb salmorres s'han obtingut multiplicant les lectures dels sensors de pressió pel quocient entre la densitat de l'aigua i la de la salmorra assajada. S'ha obtingut un valor de velocitat de pujada del nivell per al sensor de pressió N2 i un altre per al

sensor N4, i en aquest últim cas el valor obtingut s'ha multiplicat pel factor corrector determinat en la calibració dels sensors (veure apartat 3.2.2.1.1).

Finalment, s'ha calculat la mitjana de totes les repeticions i el valor de la desviació estàndard corresponent en tots els casos, per cadascuna de les quatre temperatures assajades. Aquests valors són els que s'han utilitzat a l'hora de realitzar els càlculs.

Mescla	Repetició	Sensor de nivell	Temperatura mitjana (°C)				Velocitat de pujada del nivell (cm/s)			
			16°C	20°C	25°C	30°C	16°C	20°C	25°C	30°C
Aigua destil·lada	1	N2	16.2	20.0	25.0	29.8	0.1390	0.1418	0.1414	0.1411
		N4	16.2	20.0	25.0	29.8	0.1421	0.1423	0.1426	0.1431
	2	N2	16.2	20.0	25.0	29.9	0.1382	0.1407	0.1413	0.1411
		N4	16.2	20.0	25.0	29.9	0.1397	0.1413	0.1417	0.1422
	3	N2	16.2	20.0	25.0	29.9	0.1390	0.1405	0.1399	0.1406
		N4	16.2	20.0	25.0	29.9	0.1396	0.1408	0.1416	0.1433
Mitjana			16.2	20.0	25.0	29.9	0.1396	0.1412	0.1414	0.1419
Desviació estàndard			0.06	0.06	0.09	0.13	0.0013	0.0007	0.0009	0.0011
Aigua de xarxa	1	N2	15.7	20.2	25.2	29.9	0.1161	0.1173	0.1166	0.1172
		N4	15.7	20.2	25.2	29.9	0.1171	0.1179	0.1176	0.1174
	2	N2	15.7	20.1	25.1	29.9	0.1166	0.1163	0.1163	0.1167
		N4	15.7	20.1	25.1	29.9	0.1168	0.1179	0.1166	0.1173
	3	N2	15.8	20.1	25.1	29.9	0.1160	0.1158	0.1164	0.1171
		N4	15.8	20.1	25.1	29.9	0.1170	0.1170	0.1170	0.1177
	4	N2	15.8	20.1	25.1	29.8	0.1161	0.1154	0.1161	0.1166
		N4	15.8	20.1	25.1	29.8	0.1169	0.1169	0.1165	0.1183
	5	N2	15.8	20.1	25.1	29.8	0.1161	0.1161	0.1160	0.1163
		N4	15.8	20.1	25.1	29.8	0.1161	0.1178	0.1173	0.1177
	6	N2	15.8	20.1	25.1	29.8	0.1162	0.1162	0.1165	0.1170
		N4	15.8	20.1	25.1	29.8	0.1165	0.1171	0.1165	0.1175
Mitjana			15.8	20.1	25.1	29.9	0.1165	0.1168	0.1166	0.1172
Desviació estàndard			0.13	0.04	0.07	0.20	0.0004	0.0009	0.0005	0.0006
S1	1	N2	15.9	20.1	24.8	29.9	0.1352	0.1341	0.1361	0.1366
		N4	15.9	20.1	24.8	29.9	0.1365	0.1356	0.1365	0.1380
	2	N2	15.9	20.1	24.8	29.9	0.1342	0.1343	0.1363	0.1378
		N4	15.9	20.1	24.8	29.9	0.1357	0.1350	0.1371	0.1379
	3	N2	16.0	20.1	24.8	29.9	0.1348	0.1344	0.1356	0.1372
		N4	16.0	20.1	24.8	29.9	0.1350	0.1354	0.1366	0.1381
Mitjana			15.9	20.1	24.8	29.9	0.1352	0.1348	0.1364	0.1376
Desviació estàndard			0.05	0.04	0.07	0.11	0.0008	0.0006	0.0005	0.0006
S2	1	N2	16.1	20.1	24.9	29.9	0.1062	0.1059	0.1075	0.1052
		N4	16.1	20.1	24.9	29.9	0.1093	0.1079	0.1077	0.1060
	2	N2	16.2	20.1	24.9	29.9	0.1053	0.1068	0.1074	0.1058
		N4	16.2	20.1	24.9	29.9	0.1054	0.1080	0.1083	0.1071
	3	N2	16.3	20.2	24.9	29.8	0.1050	0.1061	0.1068	0.1057
		N4	16.3	20.2	24.9	29.8	0.1059	0.1073	0.1080	0.1062
Mitjana			16.2	20.1	24.9	29.8	0.1062	0.1070	0.1076	0.1060
Desviació estàndard			0.05	0.11	0.15	0.16	0.0016	0.0009	0.0005	0.0006

Mescla	Repetició	Sensor de nivell	Temperatura mitjana (°C)				Velocitat de pujada del nivell (cm/s)				
			16°C	20°C	25°C	30°C	16°C	20°C	25°C	30°C	
S3	1	N2	15.8	20.0	25.1	29.9	0.1133	0.1146	0.1142	0.1158	
		N4					0.1145	0.1149	0.1152	0.1165	
	2	N2	15.8	20.0	25.1	29.9	0.1135	0.1138	0.1136	0.1145	
		N4					0.1141	0.1149	0.1151	0.1159	
	3	N2	15.8	20.1	25.1	29.8	0.1136	0.1138	0.1141	0.1152	
		N4					0.1144	0.1145	0.1151	0.1157	
	4	N2	15.9	20.1	25.0	29.8	0.1132	0.1137	0.1140	0.1145	
		N4					0.1142	0.1149	0.1145	0.1162	
	5	N2	16.0	20.1	25.0	29.8	0.1127	0.1133	0.1141	0.1150	
		N4					0.1138	0.1144	0.1151	0.1160	
	6	N2	16.0	20.0	25.0	29.9	0.1132	0.1137	0.1144	0.1151	
		N4					0.1139	0.1144	0.1154	0.1162	
	Mitjana			15.9	20.0	25.1	29.9	0.1137	0.1143	0.1146	0.1155
	Desviació estàndard			0.19	0.11	0.10	0.19	0.0006	0.0006	0.0006	0.0007

Taula 3.19 Dades de temperatura i de velocitat de pujada de nivell del Dipòsit 2.1 obtingudes en els assajos a través del tub de ¾ de polzada. Inclou la mitjana de totes les repeticions i el valor de la desviació estàndard corresponent.

3.2.2.5. Processament dels assajos

El procediment de càlcul seguit per al calibratge del model i el posterior tractament de les dades obtingudes ha sigut el següent:

1. Amb els assajos realitzats amb aigua destil·lada i aigua de xarxa, duts a terme per a diferents temperatures del líquid:
 - a. A partir de les dades de velocitat d'ascens del nivell al Dipòsit 2.1, estimació del cabal circulat com el producte d'aquesta velocitat per la superfície de la base del dipòsit.
 - b. Estimació de les pèrdues de càrrega localitzades del circuit a partir de models teòrics, determinació de les pèrdues de càrrega lineals i, a partir d'aquestes, obtenció dels coeficients de fricció relatius a cada assaig (per cada temperatura), mitjançant l'equació de Darcy-Weisbach.
 - c. Tenint en compte que els valors de la viscositat de l'aigua destil·lada i de xarxa, en funció de la temperatura, són coneguts, estimació de la rugositat absoluta de la canonada a partir dels valors del coeficient de fricció obtinguts en el punt anterior. Per fer-ho s'utilitzarà la fórmula de Swamee i Jain (1976). Com a validació dels resultats, els valors de la rugositat absoluta obtinguts haurien de ser independents de la temperatura de l'assaig.
2. Amb els assajos realitzats amb les mescles de salmorra, duts a terme per a diferents temperatures del fluid:
 - a. A partir de les dades de velocitat d'ascens del nivell al Dipòsit 2.1, estimació del cabal circulat com el producte d'aquesta velocitat per la superfície de la base del dipòsit.
 - b. determinació de les pèrdues de càrrega lineals i, a partir d'aquestes, obtenció dels coeficients de fricció relatius a cada assaig (per cada temperatura), mitjançant l'equació de Darcy-Weisbach.

- c. Conegut el valor de la rugositat absoluta de la canonada (obtinguda en el punt c dels assajos realitzats amb aigua destil·lada i aigua de xarxa), estimació de la viscositat cinemàtica de la mescla en funció de la temperatura a partir dels valors del coeficient de fricció obtinguts en el punt anterior, mitjançant la fórmula de Swamee i Jain.

En qualsevol cas, per assegurar la correcta aplicació de la fórmula de Swamee i Jain, cal comprovar un cop finalitzats els càlculs que en tots els assajos el flux es troba en zona de règim turbulent intermedi.

Per tal d'analitzar la propagació dels possibles errors de precisió durant la realització dels assajos, cadascun dels passos de càlcul descrits s'ha dut a terme mitjançant el mètode de Montecarlo, amb 1000 repeticions.

3.2.2.6. Calibratge del circuit

3.2.2.6.1. Pèrdues de càrrega localitzades

El model experimental s'ha dissenyat amb l'objectiu de reduir al mínim les pèrdues de càrrega localitzades que es puguin produir en el flux entre el Dipòsit 1 i el 2. En la Figura 3.54 es pot veure com el nivell de la superfície lliure en el Dipòsit 1 corresponent a l'assaig ja presentat en l'apartat 3.2.2.4 (mescla S1 a 25°C) es manté constant durant tot l'assaig, amb petites variacions de mil·límetres. Per tal d'evitar fluctuacions produïdes per l'entrada del flux impulsat per la bomba des del dipòsit auxiliar al Dipòsit 1 s'han situat diversos elements davant de l'orifici d'accés per tal de tranquil·litzar aquest flux (Figura 3.55). Per altra banda, per evitar que es produeixi una pèrdua de càrrega significativa en el pas del Dipòsit 1 a la canonada s'ha introduït aquesta última en el dipòsit en una longitud superior a sis vegades el seu diàmetre, en el cas del tub de $\frac{3}{4}$ de polzada, i de tres vegades el seu diàmetre, en el cas del tub d'1.5 polzades (Figura 3.56). Això fa que la transició d'aigua estancada a flux en canonada a pressió es produeixi suaument, minimitzant les pèrdues de càrrega locals. En canvi, sí que s'ha considerat una pèrdua de càrrega localitzada en el pas de la canonada al Dipòsit 2, prenent un coeficient $K = 1$ (Lencastre 1998).

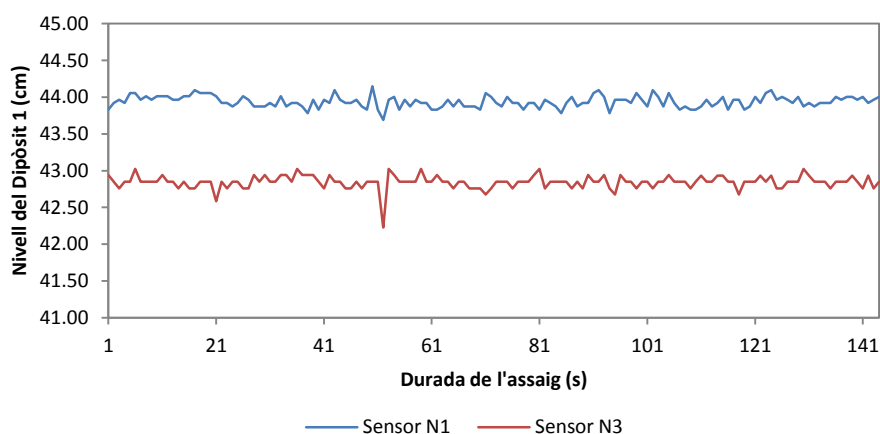


Figura 3.54 Sèrie de lectures associades als sensors de pressió N1 i N3 (Dipòsit 1). Corresponen a l'assaig realitzat a través del tub de $\frac{3}{4}$ de polzada amb la mescla S1, a 25°C de temperatura. Les lectures de pressió han sigut convertides a mesures de nivell per a la seva representació.

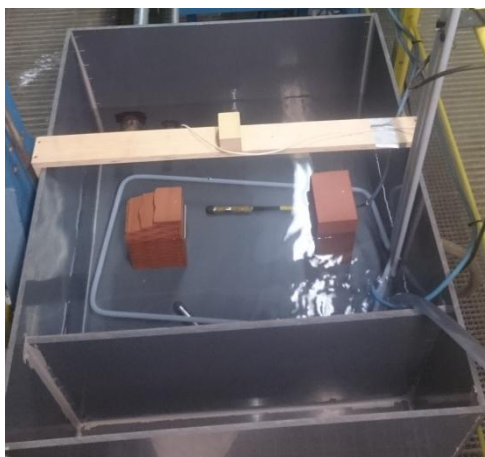


Figura 3.55 Vista dels elements utilitzats per a tranquil·litzar el flux d'entrada al Dipòsit 1 i evitar fluctuacions en la superfície lliure.



Figura 3.56 Vista zenital de la connexió entre les canonades i el Dipòsit 1.

3.2.2.6.2. Rugositat absoluta de la canonada

El calibratge de la rugositat absoluta de la canonada s'ha dut a terme a partir dels assajos fets amb aigua destil·lada. Per raons que s'explicaran en l'apartat següent (3.2.2.7) ha calgut dur a terme una nova calibració amb aigua de xarxa després d'haver realitzat els assajos amb les mescles S1 i S2.

El primer pas per al calibratge ha passat pel càlcul dels coeficients de fricció relatius a cada temperatura de mescla. Com ja s'ha explicat, aquest càlcul s'ha dut a terme mitjançant el mètode de Montecarlo (amb 1000 repeticions), associant a cada paràmetre que intervé en l'equació un error aleatori inferior o igual al seu error de precisió. D'aquesta manera s'ha obtingut un valor mitjà de totes les repeticions i una desviació estàndard associada. L'error de precisió associat als paràmetres que participen en aquest càlcul ha sigut el següent:

- $L: \pm 1 \text{ mm}$
- $z: \pm 1 \text{ mm}$
- $D: \pm 0.1 \text{ mm}$

Sent L qualsevol longitud utilitzada (la llargada de la canonada i les mides del Dipòsit 2.1), z les cotes dels dipòsits i D el diàmetre intern del tub. Pel que fa a les dades de velocitat d'ascens

del nivell en el Dipòsit 2.1 s'ha pres la desviació estàndard de la mitjana de tots els assajos realitzats per un mateix líquid i temperatura.

La Taula 3.20 mostra els resultats obtinguts per als assajos fets amb aigua destil·lada, mentre que la Taula 3.21 mostra els obtinguts per als assajos amb aigua de xarxa.

	Aigua destil·lada			
	16°C	20°C	25°C	30°C
Coefficient de fricció mitjà	0.0411	0.0400	0.0399	0.0395
Desviació estàndard	4.7E-04	3.9E-04	4.2E-04	4.4E-04
Coefficient de variació (%)	1.15%	0.98%	1.06%	1.11%
Nombre de Reynolds	1.03E+04	1.15E+04	1.30E+04	1.45E+04

Taula 3.20 Mitjana dels valors del coeficient de fricció obtinguts per als assajos fets amb aigua destil·lada, a diferents temperatures, amb la seva desviació estàndard i el coeficient de variació.

	Aigua de xarxa			
	16°C	20°C	25°C	30°C
Coefficient de fricció mitjà	0.0622	0.0617	0.0620	0.0612
Desviació estàndard	5.6E-04	6.1E-04	5.5E-04	5.4E-04
Coefficient de variació (%)	0.90%	0.99%	0.89%	0.88%
Nombre de Reynolds	7.4E+03	8.5E+03	9.3E+03	1.0E+04

Taula 3.21 Mitjana dels valors del coeficient de fricció obtinguts per als assajos fets amb aigua de xarxa, a diferents temperatures, amb la seva desviació estàndard i el coeficient de variació.

Atès que el valor de la viscositat de l'aigua per cada temperatura és conegut (International Organization for Standardization (ISO) 1998), s'ha pogut calcular els nombres de Reynolds associats a cada valor del coeficient de fricció i comprovar sobre l'àbac de Moody que el flux estudiat es troba en zona de règim turbulent intermedi (Figura 3.60). Això valida l'ús de la fórmula de Swamee i Jain en el següent pas del calibratge, que implica el càlcul del valor de la rugositat absoluta de la canonada. En aquest cas també s'ha fet ús del mètode de Montecarlo per incorporar la propagació dels errors de mesura en el càlcul i s'han obtingut els valors de k_i i de la seva desviació estàndard que es mostren a la Taula 3.22 i la Taula 3.23, per a aigua destil·lada i aigua de xarxa, respectivament. S'ha calculat un valor per cada temperatura de la mescla, però la rugositat absoluta de la canonada és un valor únic independent de la temperatura. Com es pot observar, en ambdós casos els quatre valors obtinguts són molt similars, la qual cosa valida les mesures registrades en cada assaig. D'aquests quatre valors se n'ha extret la mitjana i la desviació típica associada (Taula 3.24), les quals seran utilitzades en la realització dels càlculs de la viscositat de les mescles.

En el calibratge realitzat amb aigua destil·lada s'ha obtingut un valor de la rugositat absoluta molt raonable, ja que és molt semblant a l'habitual en tubs d'acer (Sotelo 1995). En canvi, el valor obtingut en l'assaig amb aigua de xarxa és molt elevat per a un tub d'aquestes característiques.

	Aigua destil·lada			
	16°C	20°C	25°C	30°C
Rugositat absoluta mitjana (mm)	0.159	0.149	0.158	0.160
Desviació estàndard (mm)	5.2E-03	4.1E-03	4.5E-03	4.6E-03
Coefficient de variació (%)	3.26%	2.77%	2.82%	2.85%

Taula 3.22 Mitjana dels valors de la rugositat absoluta obtinguts per als assajos fets amb aigua destil·lada, a diferents temperatures, amb la seva desviació estàndard i el coeficient de variació.

	Aigua de xarxa			
	16°C	20°C	25°C	30°C
Rugositat absoluta mitjana (mm)	0.645	0.648	0.663	0.652
Desviació estàndard (mm)	9.7E-03	1.0E-02	9.5E-03	9.3E-03
Coefficient de variació (%)	1.51%	1.62%	1.44%	1.42%

Taula 3.23 Mitjana dels valors de la rugositat absoluta obtinguts per als assajos fets amb aigua de xarxa, a diferents temperatures, amb la seva desviació estàndard i el coeficient de variació.

	Aigua destil·lada	Aigua de xarxa
Rugositat absoluta mitjana (mm)	0.157	0.652
Desviació estàndard (mm)	5.2E-03	1.0E-05
Coefficient de variació (%)	3.31%	1.61%

Taula 3.24 Mitjana dels valors de la rugositat absoluta obtinguts per als assajos fets amb aigua destil·lada i aigua de xarxa, per a qualsevol temperatura, amb la seva desviació estàndard i el coeficient de variació.

3.2.2.7. Dificultats aparegudes durant el procés experimental

L'ordre cronològic en el què s'han dut a terme els assajos és el següent:

1. Assajos amb aigua destil·lada.
2. Assajos amb la mescla S1.
3. Assajos amb la mescla S2.
4. Assajos amb aigua de xarxa.
5. Assajos amb la mescla S3.

Com ja s'ha explicat anteriorment, la primera dificultat apareguda té a veure amb les fluctuacions produïdes en el Dipòsit 2.1 durant els assajos realitzats a través del tub de major diàmetre. Aquestes fluctuacions han generat una sèrie de pertorbacions en els registres dels assajos que han obligat a descartar totes les lectures de pressió obtingudes en aquests casos.

Independentment d'això, els assajos amb aigua destil·lada s'han dut a terme sense complicacions, de la mateixa manera que els relatius a la mescla S1. Cal remarcar que aquests últims s'han realitzat sense necessitat de buidar el circuit en cap moment, en dos dies. Posteriorment, s'ha buidat el circuit per tal de netejar-lo i per generar la mescla S2 a l'interior del tanc frigorífic. Un cop generada, s'ha tornat a omplir el circuit, ja net, amb la nova mescla i s'han realitzat els assajos corresponents, que també s'han dut a terme sense complicacions.

Acabats els assajos amb la mescla S2, s'ha repetit el procés de buidat i neteja del circuit per tal de generar la mescla S3.

És en aquest moment quan s'han analitzat les dades obtingudes en els assajos realitzats amb la mescla S2 i s'ha observat un comportament anòmal en les velocitats de pujada del Dipòsit 2.1, que resulten ser excessivament baixes. Els valors de la viscositat obtinguts a partir d'aquestes dades han resultat ser entre 5 i 6 vegades superiors als obtinguts per a la mescla S1. Atès que la mescla S2 ha sigut generada a partir de la dilució de la mescla S1, la seva viscositat hauria de ser menor que l'anterior. Una vegada constatat que els assajos s'han dut a terme correctament, s'arriba a la conclusió que les condicions a l'interior de la canonada han canviat durant el temps de buidat, neteja i reompliment del circuit, degut a la cristal·lització de sal en el seu interior. L'observació de l'interior de la canonada des d'un dels seus extrems permet comprovar com, efectivament, s'ha produït aquest fenomen, com es mostra a la Figura 3.57.



Figura 3.57 Vistes de l'interior de la canonada de diàmetre superior des del Dipòsit 1. S'hi pot observar la formació de cristalls de sal a les parets del tub.

Per tant, es fa necessari netejar l'interior de la canonada i tornar-ne a calibrar la rugositat absoluta. S'hi ha fet passar aigua a pressió, però la cristal·lització era molt elevada i finalment s'ha decidit fer-li un bany amb àcid acètic (vinagre) per intentar tornar a dissoldre la sal precipitada. Aquest bany ha durat quatre dies, i en acabat s'ha fet passar aigua a pressió de nou. A primer cop d'ull, i des de l'extrem de la canonada, la sal s'hauria dissolt en gran mesura, per la qual cosa s'ha passat a la següent fase, a saber, tornar a dur a terme una sèrie d'assajos amb aigua, per tal de determinar la nova rugositat absoluta del tub.

Els assajos amb aigua de xarxa s'han pogut realitzar sense més problema, de la mateixa manera que els assajos posteriors amb la mescla S3. La nova calibració de la canonada, com ja s'ha mostrat a la Taula 3.24, ha resultat en un valor de la rugositat absoluta més de quatre vegades superior a l'inicial. Tot i així, els valors de viscositat cinemàtica de la mescla S3 obtinguts a partir dels assajos han seguit sent superiors als obtinguts per la mescla S1, de tal manera que no s'ha continuat amb el procés experimental. Aquests resultats seran discutits més endavant en l'apartat 3.2.4, però s'ha arribat a la conclusió que la cristal·lització de la sal a l'interior de la canonada pot haver afectat no només el valor de la rugositat absoluta, sinó també el diàmetre equivalent d'aquesta: atès que aquest diàmetre és essencial a l'hora de calcular el cabal que circula a través del tub, qualsevol petita variació pot modificar (considerablement, com es demostrarà en l'apartat 3.2.4.2) els resultats finals.

3.2.3. Determinació de la viscositat de les mescles filtrades. Viscosímetre d'Ostwald

La determinació de la viscositat de diverses mescles duta a terme amb el model experimental es complementa en aquest apartat a partir de la mesura d'aquest paràmetre mitjançant un viscosímetre d'Ostwald. Atès que aquest tipus d'aparell no admet la presència de partícules sòlides en suspensió, les mescles generades han sigut filtrades prèviament. El resultat de les mesures, doncs, ha de permetre esbrinar, per comparació amb els resultats obtinguts en el model experimental, com es veu modificada la viscositat d'una mescla quan aquesta conté un petit percentatge de partícules fines.

3.2.3.1. Descripció i funcionament de l'aparell

El viscosímetre d'Ostwald (Figura 2.10) permet determinar la viscositat d'un fluid a partir de la mesura del temps que triga el fluid en passar, per gravetat, a través d'un capil·lar. Com ja s'ha comentat en el Capítol 2, aquest temps es relaciona amb la viscositat del fluid per comparació amb el temps obtingut per un líquid de viscositat coneguda, que actua de patró. El diàmetre del capil·lar és el que determina el rang de mesura del viscosímetre: com menor és la viscositat del fluid, menor ha de ser aquest diàmetre. Per tant, és de molta utilitat conèixer prèviament l'ordre de magnitud de la viscositat del fluid que es vol determinar. En el cas que ocupa aquest projecte ja s'ha pogut veure que la viscositat de les mescles és molt propera a la de l'aigua.

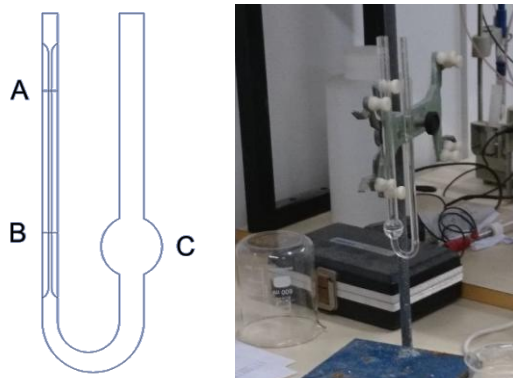


Figura 3.58 Esquema (esquerra) i imatge (dreta) del viscosímetre d'Ostwald utilitzat per mesurar la viscositat de les mescles.

Per tal d'obtenir el valor de la viscositat del fluid que correspongui és necessari dur a terme la mesura del temps de buidat del capil·lar amb el fluid patró de viscositat coneguda. Com que la viscositat depèn de la temperatura, cal obtenir una mesura de referència per cada temperatura a la qual es vulgui mesurar la viscositat de la mescla. En aquest cas, el fluid patró utilitzat ha sigut l'aigua destil·lada, i s'ha dut a terme mesures per a temperatures del líquid de 16°C, 20°C, 25°C i 30°C. En l'apartat 3.2.3.3 s'explicarà el procediment seguit per dur a terme els assajos.

Pel que fa a la determinació de la viscositat a partir de les mesures obtingudes, es fa ús de l'equació (3.3), obtinguda a partir de l'equació de Poiseuille (1846).

$$\mu_i = \mu_{H_2O} \cdot \frac{\rho_i \cdot t_i}{\rho_{H_2O} \cdot t_{H_2O}} \quad (3.3)$$

On μ_i i ρ_i i μ_{H_2O} i ρ_{H_2O} són la viscositat dinàmica i la densitat del líquid i de viscositat desconeguda i de l'aigua, respectivament, mentre que t_i i t_{H_2O} corresponen al seu temps de pas a través del capil·lar.

3.2.3.2. Característiques de la salmorra

Les mescles per a les quals s'han dut a terme les mesures de la seva viscositat són les mateixes que les exposades en l'apartat 3.2.2.2, però filtrades prèviament mitjançant un filtre de fibra de vidre de 0.45 μm per tal d'eliminar-ne les partícules sòlides insolubles. La Taula 3.25 mostra les característiques de les mescles després de ser filtrades.

Mescla	Densitat (kg/m^3)	Percentatge en massa de sòlids (kg de sòlids/kg de mescla)	Concentració de sòlids ($\text{kg de sòlids}/\text{m}^3$ de mescla)
S1 filtrada	1202.7	27.5	330
S2 filtrada	1198.9	26.9	323
S3 filtrada	1163.5	22.5	262

Taula 3.25 Densitat, percentatge en massa de sòlids i concentració de sòlids de cadascuna de les mescles filtrades de les quals s'ha mesurat la viscositat.

3.2.3.3. Metodologia seguida en la realització de les mesures

El procediment que s'ha seguit per a la realització dels assajos és el següent:

1. Es refreda la mostra fins a uns 10°C . També es refreden diverses ampolles amb aigua.
2. Per tal de mantenir la temperatura constant durant l'assaig, es buiden les ampolles d'aigua refredades en un recipient dins del qual s'hi mantindrà submergit el viscosímetre.
3. S'introdueix la mostra a assajar a l'interior del viscosímetre i aquest se submergeix a l'interior del recipient.
4. Mitjançant una resistència elèctrica, s'escalfa l'aigua del recipient fins a 16°C , tot remouent-la per homogeneïtzar-ne la temperatura.
5. Es comprova la temperatura de la mostra d'aigua o de mescla a l'interior del viscosímetre per tal d'assegurar que es troba a la temperatura adequada i, en cas afirmatiu, s'inicia la mesura de la viscositat succionant la mostra fins al capil·lar.
6. S'inicia el descens de la mostra pel capil·lar i, amb un cronòmetre, s'activa el compte de temps quan el menisc superior creua la primera marca. Quan creua la segona, s'atura, i s'anota el temps passat entre els dos instants.
7. Es repeteixen els punts 5 i 6 un mínim de tres vegades. En acabat, es buida el viscosímetre i es neteja amb aigua a pressió i amb aigua destil·lada.
8. Retorn al punt 4, aquesta vegada per una temperatura de 20°C , i el mateix per 25°C i 30°C .

És important que el viscosímetre es trobi en posició vertical en tot moment i que la temperatura es mantingui constant al llarg de tot l'assaig. Atès que l'activació i desactivació del cronòmetre es realitza manualment, es poden produir errors, raó per la qual es repetirà les vegades que sigui necessari el procediment fins a obtenir diverses mesures semblants. A més,

també és recomanable que totes les mesures siguin dutes a terme per la mateixa persona, amb un mateix criteri i velocitat de reacció.

Aquest procediment s'ha dut a terme per cadascuna de les mostres assajades, o sigui, amb aigua destil·lada i amb les mescles S1, S2 i S3. Degut a les complicacions esdevingudes en el procés experimental realitzat amb les mateixes mescles, s'ha decidit repetir el procés també per a l'aigua corrent utilitzada en el calibratge del tub (veure apartat 3.2.2.7).

La Taula 3.26 resumeix les característiques de les mostres d'aigua i de salmorra utilitzades en els assajos que es presenten en aquest apartat. La densitat ha sigut mesurada en laboratori a aproximadament 20°C de temperatura.

Mescla	Concentració de sòlids (kg/m ³)	Densitat de la mescla (kg/m ³)
Aigua destil·lada	0	997.5
Aigua de xarxa	0	995.2
S1 filtrada	330	1202.7
S2 filtrada	323	1198.9
S3 filtrada	262	1163.5

Taula 3.26 Concentració de sòlids i densitat de les mescles filtrades de les quals s'ha mesurat la viscositat.

3.2.3.4. *Mesures obtingudes*

La Taula 3.27 recull els temps de descàrrega mesurats en tots els assajos realitzats. Alguns d'aquests valors han sigut descartats (marcats en color vermell) per manca de confiança en la seva lectura, en considerar molt probable un error humà, a criteri de la persona que ha dut a terme les mesures. S'ha assegurat un mínim de tres mesures per tal de poder obtenir posteriorment un valor mitjà de la viscositat amb la seva desviació estàndard.

Mescla	Repetició	Temps de descàrrega (s)			
		16°C	20°C	25°C	30°C
Aigua destil·lada	1	98.28	99.05	93.98	88.77
	2	103.08	98.75	92.01	84.89
	3	101.86	100.14	91.45	84.70
	4	101.77		91.09	84.91
	5	102.08			84.57
Aigua de xarxa	1	109.11	98.82	93.89	87.01
	2	105.23	98.82	94.30	86.25
	3	105.46	99.50	93.52	84.91
	4	105.73	98.89	94.50	84.85
	5				86.25
S1 filtrada	1	175.08	164.31	153.33	140.21
	2	173.18	164.44	150.23	141.10
	3	176.41	164.08	151.40	139.52
	4	175.82	163.58	150.45	139.60

Mescla	Repetició	Temps de descàrrega (s)			
		16°C	20°C	25°C	30°C
S2 filtrada	1	168.33	161.56	149.11	138.43
	2	172.84	162.42	150.33	139.80
	3	167.76	162.26	150.88	138.45
	4	168.48		150.14	137.79
	5	166.89			
S3 filtrada	1	142.30	135.75	126.82	115.45
	2	144.36	135.68	126.08	114.83
	3	143.94	136.10	126.09	117.25
	4	143.46	137.48		115.68

Taula 3.27 Temps de descàrrega obtinguts en els assajos duts a terme amb el viscosímetre, per cada líquid i temperatura. En color vermell es marquen els valors descartats.

La Taula 3.28 mostra els valors de viscositat cinemàtica obtinguts a partir dels temps de descàrrega del capil·lar, per cadascuna de les temperatures assajades. Els valors mostrats corresponen a la mitjana del conjunt d'assajos considerats vàlids relatiu a una mateixa mescla i temperatura. La desviació típica en tots els casos té un ordre de magnitud de 10^{-9} m²/s. Com es pot observar a la Figura 3.59, en la qual es troben representades les dades de la taula, en tots els casos la viscositat disminueix en augmentar la temperatura i en disminuir la densitat de la mescla. Atès que les mescles S1 i S2 tenen densitats molt similars, les viscositats mesurades presenten valors molt propers entre si.

Mescla	Densitat de la mescla (kg/m ³)	Viscositat cinemàtica (m ² /s)			
		16°C	20°C	25°C	30°C
Aigua de xarxa	995.2	1.16E-06	1.01E-06	9.22E-07	8.42E-07
S1 filtrada	1202.7	1.93E-06	1.67E-06	1.48E-06	1.33E-06
S2 filtrada	1198.9	1.84E-06	1.65E-06	1.47E-06	1.31E-06
S3 filtrada	1163.5	1.58E-06	1.38E-06	1.24E-06	1.09E-06

Taula 3.28 Valors de viscositat cinemàtica obtinguts mitjançant el viscosímetre d'Ostwald per la mostra d'aigua de xarxa i per les mescles de salmorra S1, S2 i S3. Corresponen a la mitjana dels resultats obtinguts en cadascuna de les repeticions.

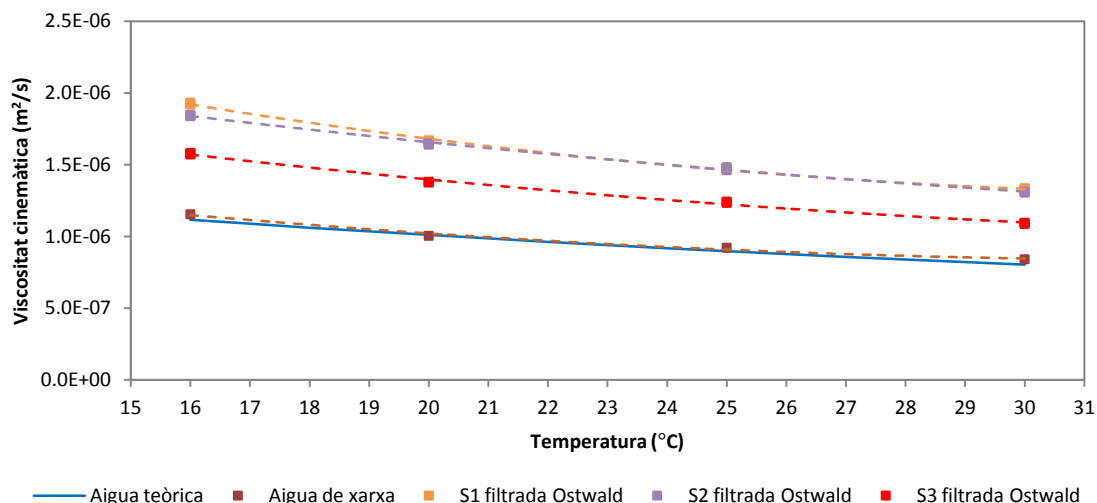


Figura 3.59 Valors de viscositat cinemàtica presentats a la Taula 3.28, en funció de la temperatura del líquid. Es representen també els valors teòrics de la viscositat de l'aigua destil·lada.

3.2.4. Modelització numèrica i discussió

3.2.4.1. Càlcul del coeficient de fricció

Com a pas previ al càlcul de la viscositat de les mesclures assajades s'ha dut a terme, mitjançant l'expressió de Darcy-Weisbach i fent ús del mètode de Montecarlo (amb 1000 repeticions), el càlcul dels coeficients de fricció associats als assajos realitzats. S'ha associat a cada paràmetre que intervé en l'equació un error aleatori inferior o igual al seu error de precisió. D'aquesta manera s'ha obtingut un valor mitjà de totes les repeticions i una desviació estàndard associada. L'error de precisió associat als paràmetres que participen en aquest càlcul ha sigut el següent:

- $L: \pm 1 \text{ mm}$
- $z: \pm 1 \text{ mm}$
- $D: \pm 0.1 \text{ mm}$

Sent L qualsevol longitud utilitzada (la llargada de la canonada i les mides del Dipòsit 2.1), z les cotes dels dipòsits i D el diàmetre intern del tub. Pel que fa a les dades de velocitat d'ascens del nivell en el Dipòsit 2.1 s'ha pres la desviació estàndard de la mitjana de tots els assajos realitzats per una mateixa mescla i temperatura.

La Taula 3.29 mostra la mitjana dels valors obtinguts i la seva desviació estàndard i coeficient de variació. Els nombres de Reynolds s'han calculat prenent els valors de viscositat cinemàtica obtinguts en l'apartat següent (3.2.4.2). Com es pot comprovar, la precisió obtinguda en aquest càlcul és molt alta, ja que el coeficient de variació no supera l'1% en cap cas: en la Figura 3.60 es pot observar com els valors obtinguts es troben perfectament alineats seguint una corba de rugositat relativa constant de l'àbac de Moody, al costat dels valors associats al seu líquid de calibració (aigua destil·lada en el cas de la mescla S1, aigua de xarxa en el cas de la S3).

	Mescla S1				Mescla S3			
	16°C	20°C	25°C	30°C	16°C	20°C	25°C	30°C
f mitjana	0.0442	0.0446	0.0434	0.0425	0.0656	0.0648	0.0644	0.0632
σ_f	4.4E-04	4.2E-04	4.2E-04	4.0E-04	6.0E-04	6.2E-04	6.0E-04	6.1E-04
Coefficient de variació (%)	0.99%	0.93%	0.96%	0.93%	0.91%	0.95%	0.93%	0.97%
Nombre de Reynolds	6.2E+03	5.9E+03	6.9E+03	7.9E+03	4.1E+03	4.6E+03	4.9E+03	6.2E+03

Taula 3.29 Mitjana dels valors del coeficient de fricció (f) obtinguts per als assajos fets amb les mescles S1 i S3, a diferents temperatures. S'inclou la seva desviació estàndard (σ_f) i el coeficient de variació.

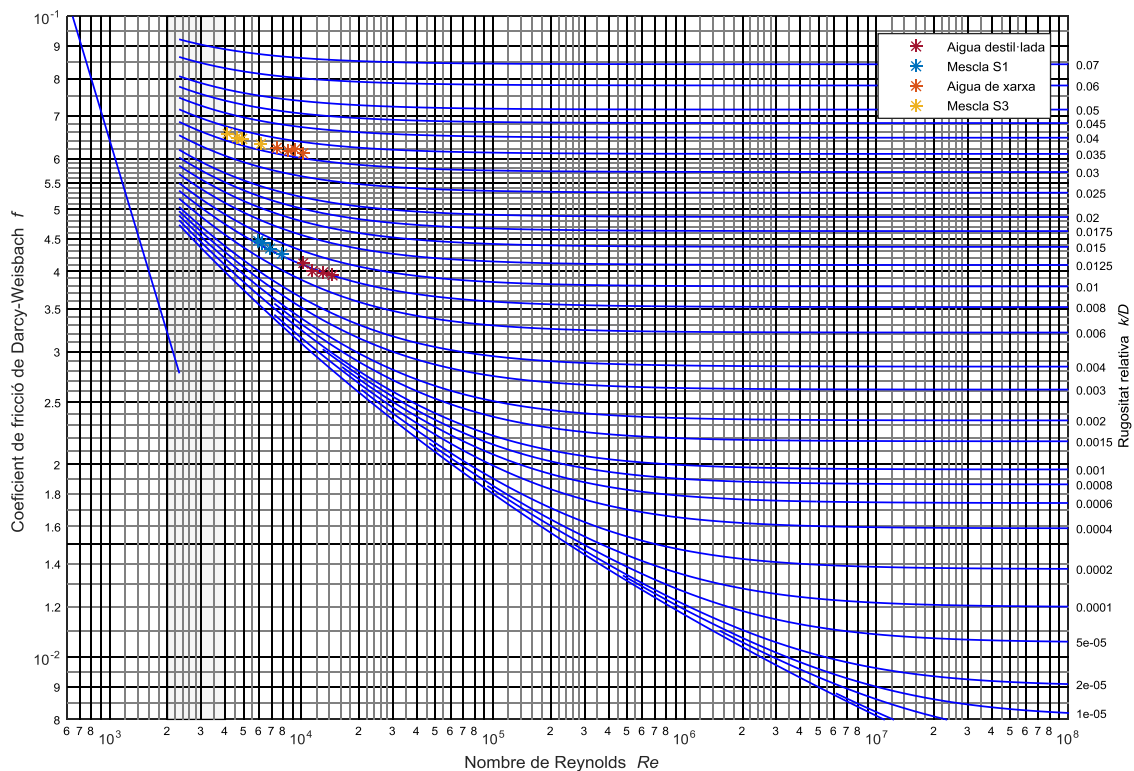


Figura 3.60 Valors del coeficient de fricció presentats a la Taula 3.20, la Taula 3.21 i la Taula 3.29, corresponents als assajos duts a terme amb aigua destil·lada, aigua de xarxa i les mescles S1 i S3, a diferents temperatures, sobre àbac de Moody.

3.2.4.2. Càlcul de la viscositat de les mescles

En l'apartat 3.2.3.4 s'han presentat els valors de la viscositat cinemàtica de les mescles de salmorra filtrades. A continuació es presenten els resultats dels valors obtinguts en el model experimental per a les mescles sense filtrar. Com ja s'ha comentat, una sèrie d'incidències en la realització dels assajos han impedit obtenir resultats vàlids per la mescla S2 sense filtrar, de tal manera que no es mostraran. A més, pel que fa a la mescla S3 els resultats obtinguts tampoc han sigut gaire satisfactoris, per això no s'han dut a terme més assajos amb altres mescles. El càlcul de la viscositat cinemàtica s'ha dut a terme a partir dels valors del coeficient de fricció obtinguts en l'apartat anterior, mitjançant la fórmula de Swamee i Jain. També s'ha fet ús del mètode de Montecarlo (amb 1000 repeticions) per tal de continuar la propagació dels errors de mesura. La Taula 3.30 mostra les mitjanes dels resultats obtinguts per a S1 i S3, la seva corresponent desviació estàndard i el coeficient de variació, mentre que la Figura 3.61 representa aquests resultats juntament amb les mesures realitzades amb el viscosímetre

d'Ostwald. Com es pot comprovar, l'error de precisió associat al càlcul de la viscositat segueix sent baix, sobretot en el cas de la mescla S1.

	Mescla S1				Mescla S3			
	16°C	20°C	25°C	30°C	16°C	20°C	25°C	30°C
Viscositat cinemàtica mitjana (m²/s)	1.80E-06	1.87E-06	1.62E-06	1.43E-06	2.02E-06	1.81E-06	1.71E-06	1.37E-06
Desviació estàndard (m²/s)	6.5E-08	6.3E-08	6.0E-08	5.9E-08	1.1E-07	1.2E-07	1.1E-07	1.1E-07
Coefficient de variació (%)	3.6%	3.4%	3.7%	4.1%	5.7%	6.4%	6.6%	8.1%

Taula 3.30 Mitjana i desviació estàndard i coeficient de variació associats dels valors de viscositat cinemàtica obtinguts amb els assajos duts a terme amb el model experimental per les mescles de salmorra S1 i S3.

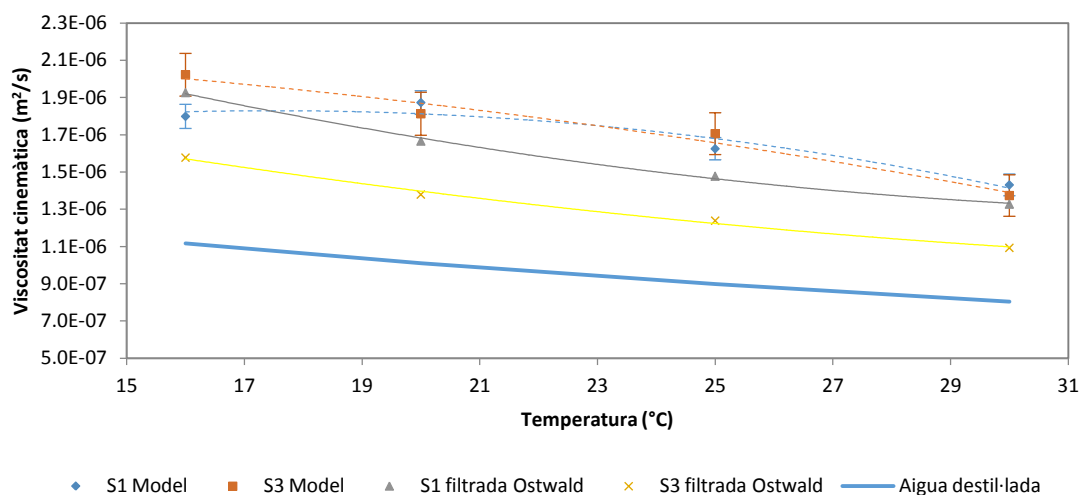


Figura 3.61 Valors de viscositat cinemàtica presentats a la Taula 3.30, en funció de la temperatura del líquid. Es representen també els valors de la viscositat de l'aigua destil·lada i aquells obtinguts per a les mateixes mescles (S1 i S3) mitjançant el viscosímetre d'Ostwald.

En la Figura 3.61 es pot veure com en el cas de la mescla S1 els resultats obtinguts mitjançant el model experimental i els obtinguts amb el viscosímetre es troben en el mateix ordre de magnitud, malgrat que els primers són superiors als segons. Cal recordar que l'única diferència entre ambdues mescles és que la utilitzada en el model experimental conté partícules sòlides en suspensió, mentre que la usada en el viscosímetre es troba lliure d'aquestes. Per tant, en aquest cas les partícules en suspensió provoquen un petit augment de la viscositat cinemàtica de la mescla.

Pel que fa a la viscositat cinemàtica de la mescla S3, en canvi, els resultats obtinguts amb el model experimental són força superiors als obtinguts amb el viscosímetre. A més, els primers igualen o superen els valors de viscositat de la mescla S1, sent la mescla S3 molt menys concentrada que la S1. Atenent els problemes de cristallització produïts al llarg del procés d'assajos en el circuit, i malgrat el recalibratge de la rugositat absoluta de la canonada, es considera molt probable que aquests resultats no siguin correctes: tant la cristallització com el bany en vinagre posterior poden haver afectat les característiques físiques de la canonada de

tal manera que les condicions inicials assumides no siguin vàlides. Els dos paràmetres que intervenen en aquestes característiques físiques són la rugositat absoluta i el diàmetre intern de la canonada. El primer ha sigut recalibrat abans de dur a terme els assajos amb la mescla S3, però es desconeix l'efecte dels precipitats de sal en el diàmetre equivalent final. Si aquest s'ha vist reduït i, per tant, l'àrea del tub també, els cabals mesurats en els assajos també hauran sigut menors, la qual cosa haurà provocat l'obtenció de valors de la viscositat superiors als reals. Més endavant es discutirà la influència de la rugositat absoluta i del diàmetre de la canonada sobre el càlcul de la viscositat cinemàtica.

Per tal d'estimar quins haurien de ser els valors de la viscositat de la mostra S3 per coherència amb els altres resultats obtinguts s'han representat a la Figura 3.62 les viscositats obtingudes en l'apartat 3.1 per a les mescles SAL_B a SAL_F, a 25°C (veure 3.1.8.2), i la viscositat de la mescla S1 a la mateixa temperatura, en funció de la densitat de les mostres. A partir dels punts obtinguts s'ha adaptat una línia de tendència (amb $R^2 = 0.997$) mitjançant un polinomi de segon grau per tal de descriure el comportament de la viscositat cinemàtica de la salmorra estudiada per a qualsevol densitat o concentració de sòlids, a 25°C. La regressió ha permès calcular quin hauria de ser el valor de la viscositat cinemàtica de la mescla S3, de densitat igual a 1160 kg/m³, a 25°C; a saber, 1.14E-06 m²/s. Aquest valor dista molt de l'obtingut mitjançant els assajos duts a terme en el model experimental que, com s'ha exposat a la Taula 3.30, ha sigut d'1.71E-06 m²/s. Per aquest motiu, i atès que no es té suficient control sobre les condicions de contorn (rugositat absoluta i diàmetre equivalent de la canonada), es descarten també els resultats obtinguts per a la mescla S3.

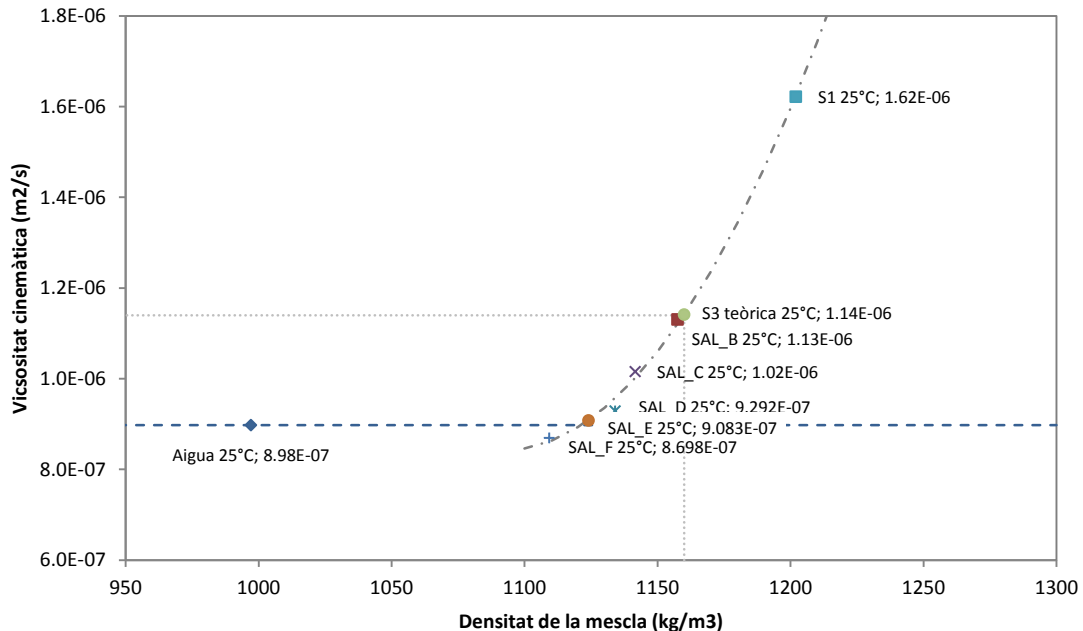


Figura 3.62 Valors de viscositat cinemàtica obtinguts mitjançant el model experimental de l'apartat 3.1 (mescles SAL_B a SAL_F) i mitjançant el model experimental d'aquest apartat (mescla S1), en funció de la seva densitat, a 25°C de temperatura. Es representa la corba de regressió que uneix aquests valors i que permet determinar la viscositat "teòrica" a 25°C de la mescla S3, a partir de la seva densitat.

Influència de la rugositat absoluta sobre el càlcul de la viscositat

A continuació és discuteix la importància de la precisió en el calibratge de la rugositat absoluta de la canonada a l'hora de calcular experimentalment la viscositat cinemàtica de les mescles de salmorra. Per a tal efecte s'han repetit els càlculs duts a terme en els apartats anteriors imposant diferents variacions en el valor de la rugositat absoluta del tub. L'error de precisió d'aquest paràmetre que s'ha calculat en l'apartat 3.2.2.6.2 era inferior al 5%; en aquest cas es considera fins a un 10% de variació.

La Figura 3.63 i la Figura 3.64 presenten la variació del valor de la viscositat cinemàtica de les mescles S1 i S3, respectivament, en funció de la variació de la rugositat absoluta utilitzada per al seu càlcul. Com es pot comprovar, la relació entre variacions és gairebé lineal: si la rugositat absoluta disminueix un tant per cent, la viscositat cinemàtica obtinguda és superior en aproximadament el mateix tant per cent. També es pot observar que la influència de la variació de la rugositat absoluta sobre la viscositat augmenta lleugerament per a temperatures més altes.

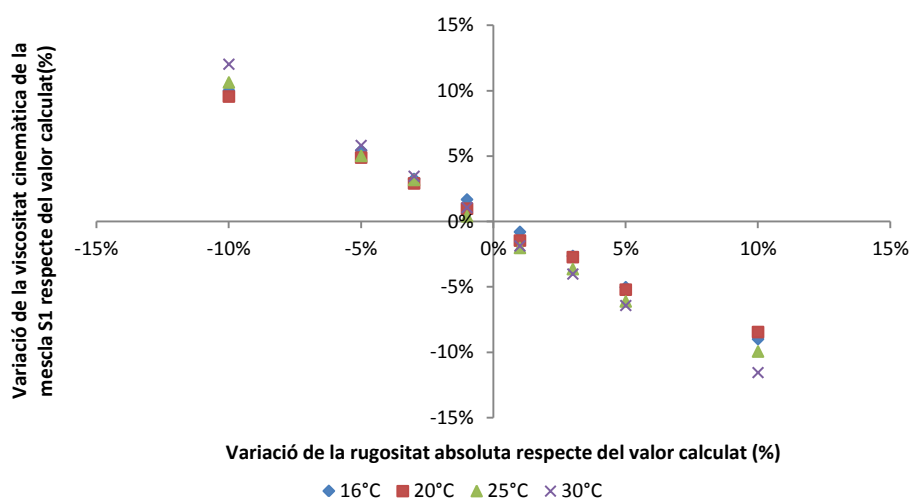


Figura 3.63 Variació del valor de la viscositat cinemàtica de la mescla S1 en funció de la variació de la rugositat absoluta de la canonada.

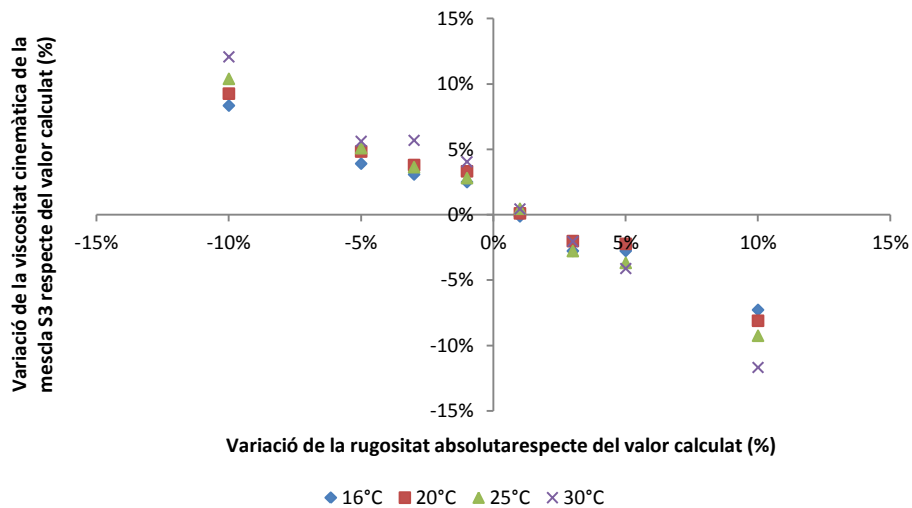


Figura 3.64 Variació del valor de la viscositat cinemàtica de la mescla S3 en funció de la variació de la rugositat absoluta de la canonada.

Influència del diàmetre de la canonada sobre el càlcul de la viscositat

El mateix estudi s'ha dut a terme considerant variacions de fins un -10% sobre el diàmetre de la canonada. En cas que la secció de la canonada s'hagi vist parcialment obturada degut a la cristallització de sal en les seves parets internes, el diàmetre equivalent associat a la secció efectiva podria ser menor al mesurat. En aquest supòsit, la viscositat cinemàtica calculada presentaria variacions considerables, com es pot observar en la Figura 3.65, per a la mescla S1, i la Figura 3.66, per a la S3. La propagació d'errors, que va des del càlcul del cabal que circula per la canonada fins al càlcul de la viscositat de les mescles, passant pel càlcul del coeficient de fricció i el calibratge de la rugositat absoluta, provoca una variació molt destacable sobre els resultats obtinguts. En cas que el diàmetre equivalent sigui un 10% inferior al mesurat, la variació en la viscositat cinemàtica calculada pot superar el 40% en el cas de la mescla S1 i el 35% en el cas de S3. Com es pot observar, la variació en el diàmetre equivalent de la canonada té un menor efecte sobre el càlcul de la viscositat com més alta és la temperatura de l'assaig.

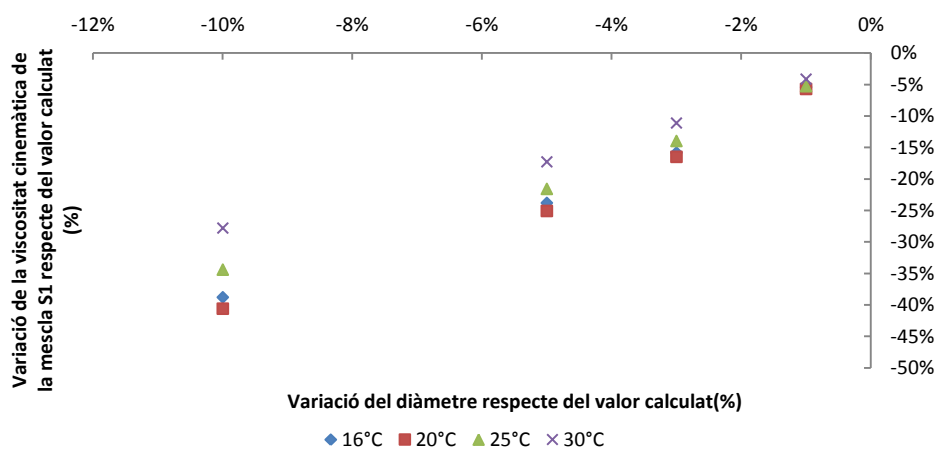


Figura 3.65 Variació del valor de la viscositat cinemàtica de la mescla S1 en funció de la variació del diàmetre equivalent de la canonada.

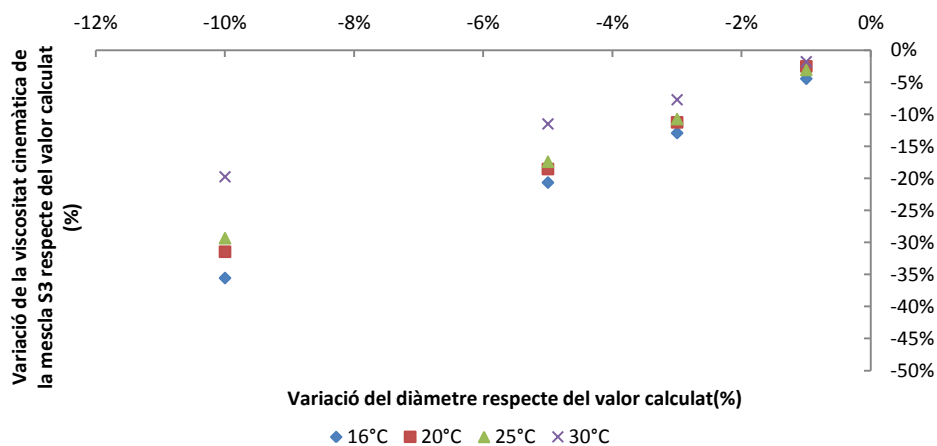


Figura 3.66 Variació del valor de la viscositat cinemàtica de la mescla S3 en funció de la variació del diàmetre equivalent de la canonada.

3.2.5. Observacions relatives als assajos amb salmorra

Durant la realització dels assajos en el model experimental s'ha observat especialment el comportament de les mescles de salmorra en relació a la sedimentació de partícules sòlides insolubles i a la precipitació de sals, de forma qualitativa. Aquestes observacions es detallen a continuació.

Sedimentació de les partícules sòlides insolubles

Els assajos duts a terme amb la mescla de salmorra S1 han generat una gran quantitat de sediments, especialment a l'interior del Dipòsit 1, però també en el Dipòsit 2. Degut a l'alta terbolesa de la mescla, aquesta sedimentació no s'ha pogut observar fins que s'ha dut a terme el buidat del circuit per generar la següent mescla. La Figura 3.67 i la Figura 3.68 mostren els sediments acumulats en els dipòsits 1 i 2, respectivament. En ambdós casos l'acumulació s'ha produït a tocar del punt de connexió entre el dipòsit i les canonades.



Figura 3.67 Acumulació de sediments a l'interior del Dipòsit 1, en la zona més propera a la connexió del dipòsit amb les canonades. Imatge posterior als assajos duts a terme amb la mescla S1.



Figura 3.68 Acumulació de sediments a l'interior del Dipòsit 2, en la zona més propera a la connexió del dipòsit amb les canonades. Imatge posterior als assajos duts a terme amb la mescla S1.

Atès que les canonades d'aquest model experimental no són transparents, no s'ha pogut observar l'existència o no de sedimentació a l'interior d'aquestes durant els assajos. Sí que és possible, però, comparar les velocitats de flux assolides a l'interior del tub de $\frac{3}{4}$ de polzada amb les velocitats límit de deposició de les partícules sòlides calculades a l'apartat 3.2.2.2 i presentades en la Figura 3.51. La Taula 3.31 mostra les velocitats assolides a l'interior del tub, segons els càlculs realitzats, en els assajos duts a terme amb les mescles S1 i S3. Com ja s'ha explicat anteriorment, els resultats obtinguts en els assajos amb el tub de diàmetre superior no s'han pogut donar per vàlids i per tant no es presenten.

Com es pot observar, les velocitats obtingudes en el cas de la mescla S1 són superiors a la velocitat de deposició calculada per al diàmetre de partícula més elevat ($140 \mu\text{m}$), de manera que en aquest cas no s'hauria de produir sedimentació. En el cas de S3, la velocitat del flux és inferior a la velocitat de deposició per a diàmetres de partícula de $140 \mu\text{m}$, però superior a la que correspon a una mida de gra de $60 \mu\text{m}$. Així doncs, segons els càlculs realitzats mitjançant l'expressió de Durand i Condolios (1952), les partícules en suspensió de la mescla S3 poden haver sedimentat a l'interior del tub en funció de la seva mida de gra. Tot i així, en el Capítol 4 es mostrarà com per a concentracions en volum de sediments molt baixes, com és el cas, les velocitats de deposició observades són inferiors a les proposades per Durand i Condolios, especialment si el líquid de transport és una dissolució de sal.

Com és lògic, degut a l'estat de calma de les mescles quan es troben a l'interior dels dipòsits 1 i 2, s'ha d'haver produït més sedimentació en aquests que no pas a l'interior del tub.

Mescla	Velocitat del flux (m/s)			
	16°C	20°C	25°C	30°C
S1	0.52	0.52	0.53	0.53
S3	0.44	0.44	0.44	0.45

Taula 3.31 Velocitat mitjana del flux a l'interior de la canonada de $\frac{3}{4}$ de polzada en els assajos duts a terme amb les mescles S1 i S3, per a cada temperatura.

Precipitació de sals

Com ja s'ha comentat, els assajos duts a terme amb la mescla de salmorra S1 han generat una gran quantitat de sediments. Atès que aquesta mescla conté una quantitat de partícules sòlides solubles superior al seu límit de saturació, les insolubles han sedimentat acompanyades de precipitats de sal. El color blanquinós de les acumulacions de sediments ha denotat la seva presència (Figura 3.67). En el cas dels assajos duts a terme amb les mescles S2 i S3, la sedimentació ha estat molt menor i no s'ha pogut observar aquest fenomen. En totes tres mescles, però, la concentració en massa de sulfat de calci superava el seu límit de solubilitat, segons les dades proporcionades per Bock (1961), de tal manera que és possible que s'hagin produït precipitats de CaSO_4 i que s'hagin vist arrossegats pel flux. L'alta turbulència de les mescles, en qualsevol cas, hauria fet impossible la seva observació.

Pel que fa a la cristallització de sal a l'interior dels tubs, com ja s'ha explicat en l'apartat 3.2.2.7, no s'ha observat cap mena de precipitat durant els assajos, però sí en les hores posteriors al buidat del circuit després de dur a terme els assajos amb la mescla S1. En la Figura 1.6 es mostra una fotografia presa mesos després d'haver finalitzat tots els assajos i d'haver netejat el circuit sencer, incloent les canonades, amb aigua a pressió. Com es pot observar, a l'interior de la canonada de $\frac{3}{4}$ de polzada hi ha hagut un important procés de generació de cristalls de sal agregats a les parets internes que ocupen bona part de la superfície transversal del tub. Així doncs, a diferència del circuit experimental de l'apartat 3.1, en què les canonades de PVC o PEAD no permetien l'agregat de cristalls de sal en les seves parets interiors, en aquest cas, amb tubs d'acer inoxidable, sí que es produeix la cristallització de sal. L'elevada rugositat de la canonada, afegida al contacte amb l'aire, afavoreix l'existència d'aquest fenomen.



Figura 3.69 Cristallització de sal en les parets interiors del tub de $\frac{3}{4}$ de polzada, mesos després de l'últim assaig realitzat i de la neteja del circuit.

3.3. Anàlisi conjunta dels resultats obtinguts

En aquest apartat es presenten i es discuteixen els resultats obtinguts amb els assajos realitzats en els circuits experimentals dels apartats 3.1 i 3.2.

Atès que la majoria de valors de viscositat s'han obtingut a 25°C, es presenten d'entrada tots els resultats obtinguts experimentalment per a aquesta temperatura, incloent les mesures fetes amb el viscosímetre d'Ostwald, en la Figura 1.7. Tots els valors presentats incorporen el seu coeficient de variació associat a la propagació d'errors de mesura en el càlcul. Com ja s'ha pogut veure anteriorment, els valors de viscositat cinemàtica de les mescles sense filtrar segueixen un patró molt clar que s'ha representat mitjançant una corba de regressió polinòmica. Per la seva banda, els punts corresponents a les mescles S1, S2 i S3 filtrades se situen molt a prop de la corba de viscositat cinemàtica corresponent a les solucions pures de NaCl. Atès que més del 91% del contingut dels sòlids de les mescles de salmorra està format per clorur de sodi, no és sorprenent que el comportament de la viscositat de les mostres sigui similar al de les solucions de NaCl. Així, un mínim percentatge de sòlids en suspensió (de fins, en aquest cas), fa variar substancialment el comportament de la viscositat de la mescla, sent aquesta menys viscosa per a densitats baixes, fins a vora 1190 kg/m³, i més viscosa a partir d'aquest valor.

Es pot observar un patró similar en les viscositats obtingudes a 20°C i a 30°C, malgrat que en aquests dos casos es disposa de molt pocs punts per confirmar aquesta tendència (Figura 3.71 i Figura 3.72, respectivament). Tot i així, sí que s'observa com les viscositats corresponents a les mescles filtrades se situen molt properes a les corbes corresponents a les dissolucions de clorur de sodi. També es presenten els resultats obtinguts a 16°C (Figura 3.73), però en aquest cas es desconeix la corba de viscositat cinemàtica del clorur de sodi, ja que no es troba en la literatura existent.

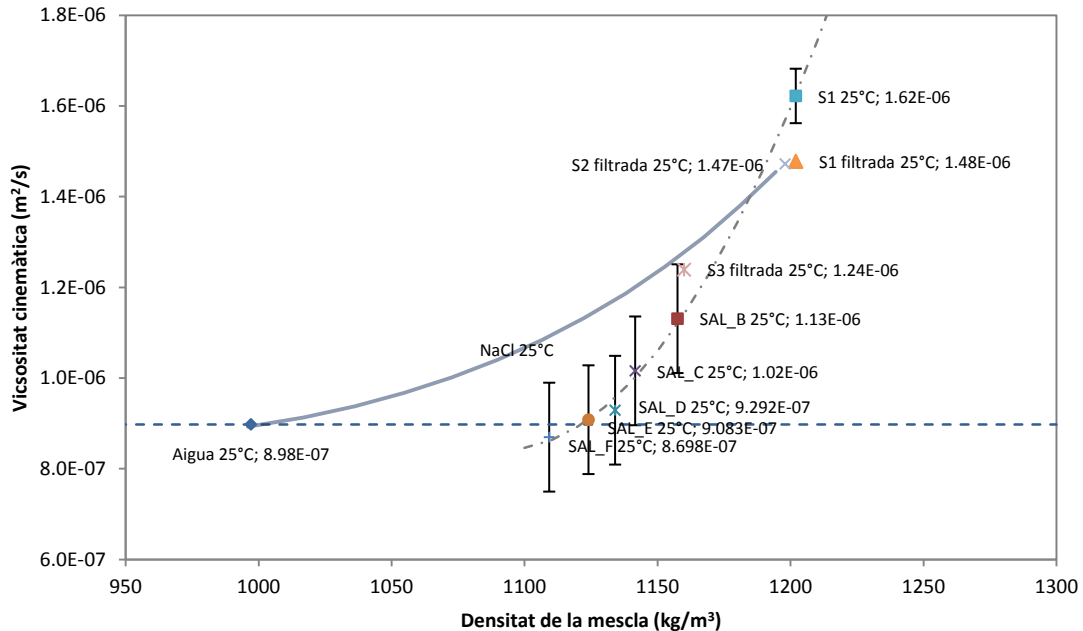


Figura 3.70 Valors de la viscositat cinemàtica a 25°C de les mescles de salmorra, en funció de la seva densitat, obtinguts a partir dels assajos duts a terme en els models experimentals dels apartats 3.1 i 3.2, o mesurats en un viscosímetre d'Ostwald (en el cas de les mostres filtrades). També, viscositat cinemàtica teòrica de l'aigua i d'una solució pura de NaCl, en funció de la seva densitat, a 25°C.

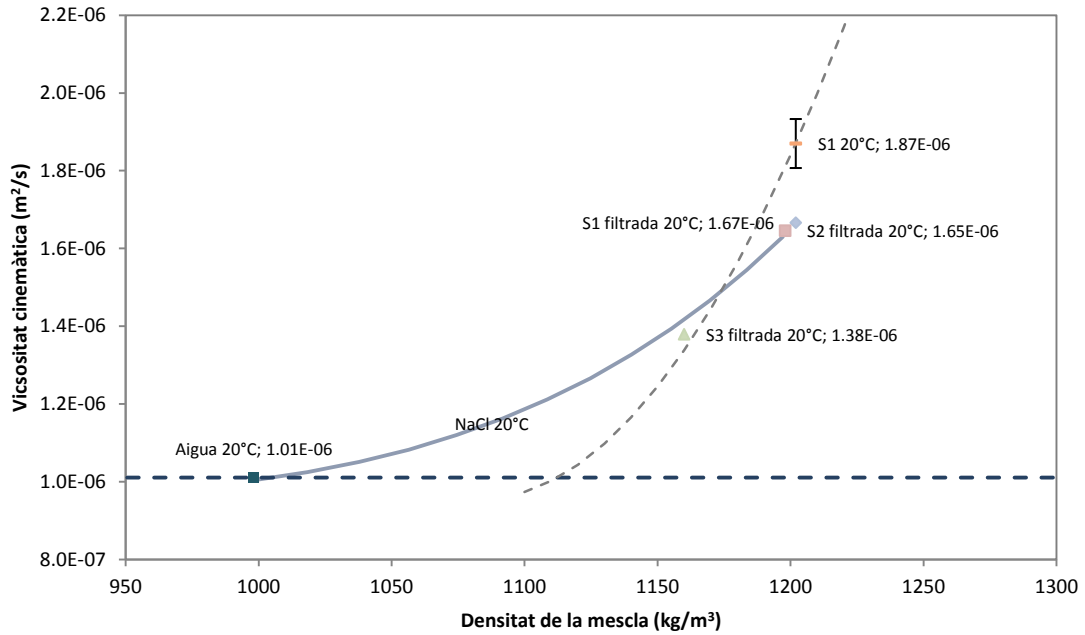


Figura 3.71 Valors de la viscositat cinemàtica a 20°C de les mesclures S1 i S3, obtinguts a partir dels assajos duts a terme en el model experimental del present apartat, i de les mesclures S1, S2 i S3 filtrades, mesurats en un viscosímetre d'Ostwald. També, viscositat cinemàtica teòrica de l'aigua i d'una solució pura de NaCl, en funció de la seva densitat, a 20°C.

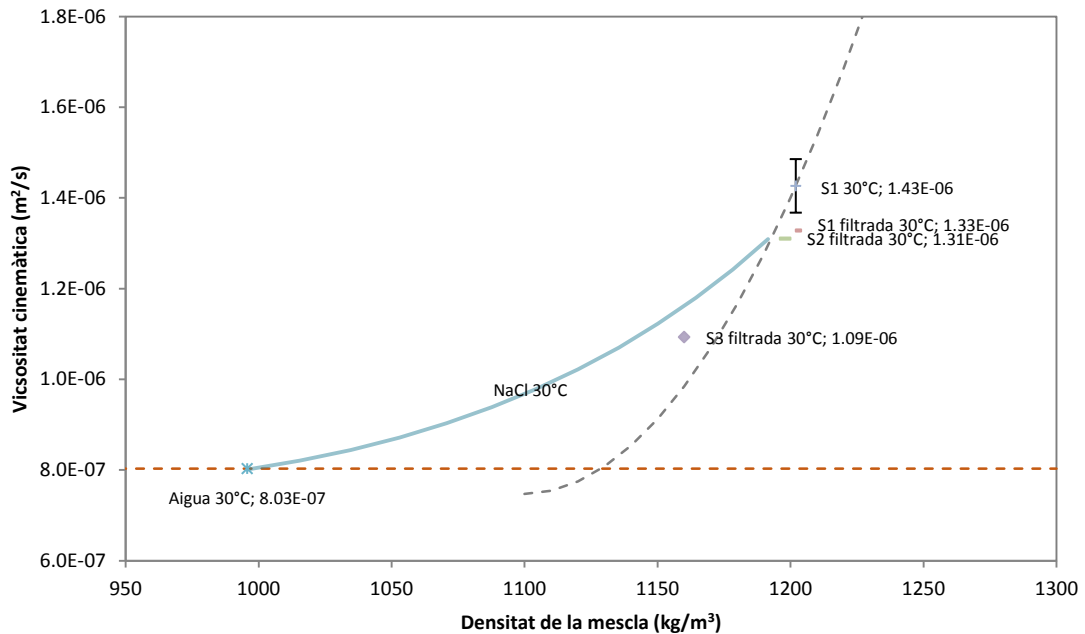


Figura 3.72 Valors de la viscositat cinemàtica a 30°C de les mesclures S1 i S3, obtinguts a partir dels assajos duts a terme en el model experimental del present apartat, i de les mesclures S1, S2 i S3 filtrades, mesurats en un viscosímetre d'Ostwald. També, viscositat cinemàtica teòrica de l'aigua i d'una solució pura de NaCl, en funció de la seva densitat, a 30°C.

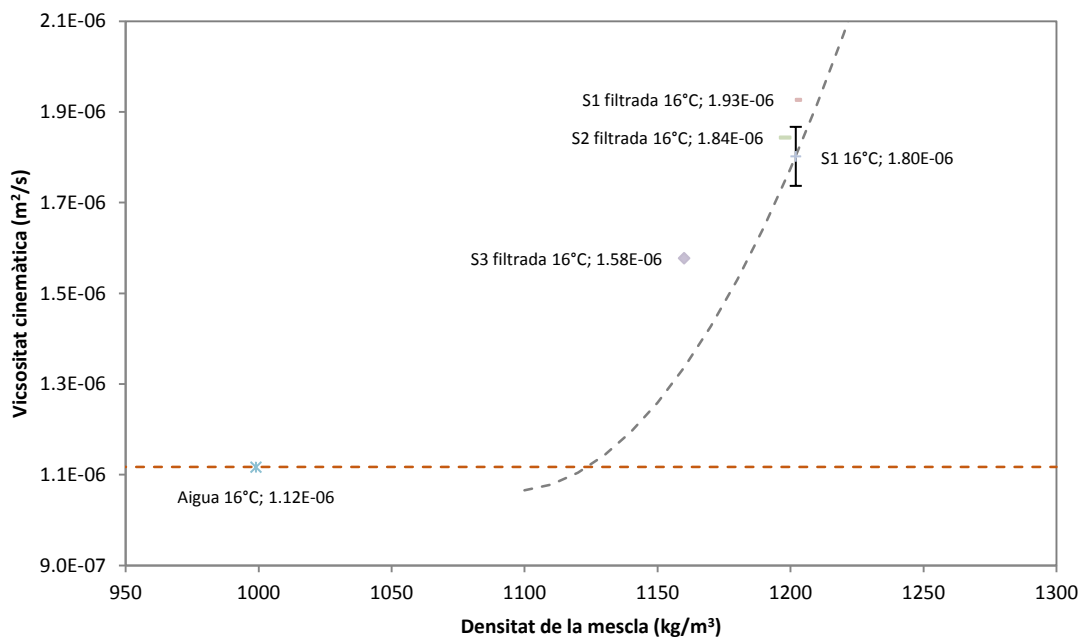


Figura 3.73 Valors de la viscositat cinemàtica a 16°C de les mescles S1 i S3, obtinguts a partir dels assajos duts a terme en el model experimental del present apartat, i de les mescles S1, S2 i S3 filtrades, mesurats en un viscosímetre d'Ostwald. També, viscositat cinemàtica teòrica de l'aigua a 16°C.

En aquests tres últims casos la corba de regressió que relaciona la viscositat cinemàtica amb la densitat de les mescles de salmorra s'ha ajustat a partir de la generada per als resultats obtinguts a 25°C. S'ha desplaçat la corba sobre l'eix d'ordenades en funció de la viscositat teòrica de l'aigua i s'ha imposat el seu pas pel valor de viscositat de la mescla S1, mantenint intacte el coeficient a de l'expressió ax^2+bx+c . Aquesta aproximació s'ha dut a terme per tal d'obtenir una relació entre densitat, viscositat cinemàtica i temperatura de la mescla, que es farà necessària en el Capítol 5. En la Figura 1.8 es presenten les quatre corbes d'ajust, sobre les quals s'ha ajustat el pla que es mostra a la Figura 3.75. L'ajust del pla s'ha dut a terme mitjançant una regressió polinòmica pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.998$), tant en l'eix d'ordenades com en el d'abscisses. A partir d'aquest ajust s'ha obtingut una equació que relaciona la viscositat cinemàtica de les salmorres estudiades amb la seva densitat i temperatura.

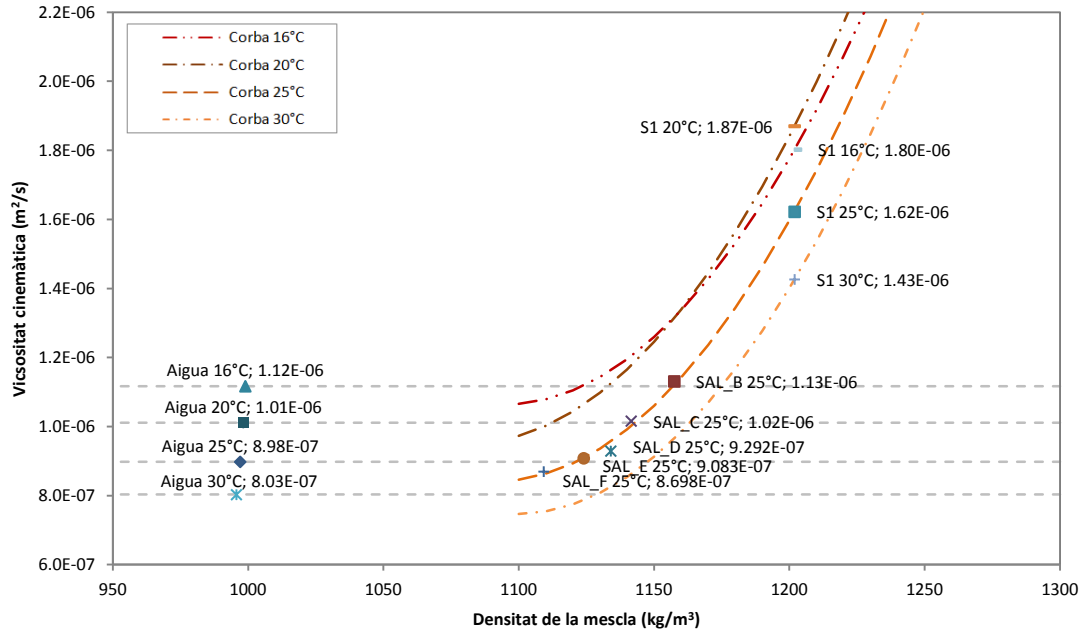


Figura 3.74 Valors de la viscositat cinemàtica a 16°C, 20°C, 25°C i 30°C de les mescles de salmorra estudiades i de l'aigua, i corbes d'ajust corresponents a cadascuna de les temperatures.

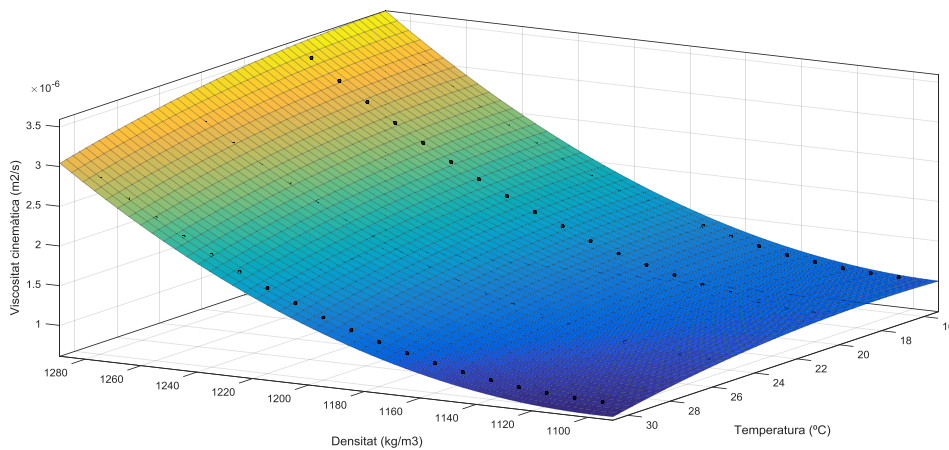


Figura 3.75 Pla ajustat pel mètode de mínims quadrats mitjançant una regressió polinòmica de segon grau ($R^2 = 0.998$) sobre les corbes viscositat cinemàtica - temperatura generades a partir dels resultats experimentals.

3.4. Conclusions

Pel que fa als resultats obtinguts a partir dels assajos duts a terme en el circuit experimental 1 (apartat 3.1), s'han extret les conclusions següents:

- La sal utilitzada en la generació de les salmorres per als assajos està formada bàsicament per clorur de sodi (NaCl), i en menor mesura de sulfat de calci (CaSO_4) i clorurs de potassi (KCl) i de magnesi (MgCl_2). També té una part gens negligible d'insolubles, concretament de fins (Taula 1.1).
- La corba granulomètrica de la mostra de sediments analitzada mostra un material heterogeni o mal seleccionat, ja que conté diverses mides de partícula dominants (Figura 3.13). La mida de partícula que té una presència més elevada en la mostra de

sediments, corresponent al màxim absolut d'aquesta corba, es troba entre 498 i 704 μm i representa un 25.4% del total. El d_{50} de la mostra és de 141.5 μm .

- Les ampliacions làser dutes a terme mostren la presència de cristalls de CaSO_4 entre els sediments recollits, mentre que les mescles SAL_B, SAL_C i SAL_D es troben per sobre del límit de saturació d'aquest compost.
- Els valors del coeficient de fricció obtinguts per a les mescles de salmorra assajades se situen en la majoria dels casos molt a prop de la corba de Darcy-Weisbach associada als tubs llisos (Figura 3.25). La tendència seguida per aquests resultats és molt similar a la del patró generat amb aigua neta, però amb una major dispersió. La precisió en els assajos fets amb velocitats de flux més baixes empitjora de forma exponencial. Malgrat tot, per a velocitats de flux d'1 m/s i superiors, el percentatge d'error de càlcul de f és inferior al 40%.
- No s'han observat deposicions de partícules sòlides al fons de la canonada en cap dels assajos realitzats, la qual cosa concorda amb el càlcul de les velocitats límit de deposició teòriques. Sí que s'ha pogut observar sedimentació en els tubs que connecten els sensors de pressió amb la canonada principal (Figura 3.38, dreta).
- No s'ha pogut observar precipitació de sals a l'interior de la canonada, ni tan sols durant la circulació d'una mescla de salmorra en la concentració límit de saturació. Sí que s'ha observat precipitació a l'exterior del circuit i del dipòsit d'emmagatzematge, en zones susceptibles d'entrar en contacte amb la mescla.

Per altra banda, pel que fa als resultats obtinguts a partir dels assajos duts a terme en el circuit experimental 2 (apartat 3.2), s'han extret les conclusions següents:

- La concentració màxima de sòlids (és a dir, de les diferents sals dissoltes més els sòlids en suspensió) que la mescla és capaç de transportar és de 331 kg/m^3 (kg de sòlids totals / m^3 de mescla).
- Els valors de la viscositat cinemàtica de la mescla S1 obtinguts mitjançant el model experimental i els obtinguts amb el viscosímetre es troben en el mateix ordre de magnitud, malgrat que els primers són superiors als segons. Per tant, en aquest cas les partícules en suspensió provoquen un petit augment de la viscositat cinemàtica de la mescla.
- Pel que fa a la viscositat cinemàtica de la mescla S3 els resultats obtinguts amb el model experimental són força superiors als obtinguts amb el viscosímetre. Atenent als problemes de cristallització produïts al llarg del procés d'assajos en el circuit i la manca de coherència en relació a les viscositats obtingudes en l'apartat 3.1, i malgrat el recalibratge de la rugositat absoluta de la canonada, es considera molt probable que els resultats experimentals no siguin vàlids.
- Els assajos duts a terme amb la mescla S1 han generat una gran quantitat de sediments, especialment a l'interior del Dipòsit 1, però també en el Dipòsit 2. En ambdós casos l'acumulació s'ha produït a tocar del punt de connexió entre el dipòsit i les canonades. Atès que aquesta mescla conté una quantitat de partícules sòlides solubles superior al seu límit de saturació, les insolubles han sedimentat acompanyades de precipitats de sal.

- No s'ha pogut observar l'existència o no de sedimentació a l'interior de les canonades durant els assajos. Les velocitats de flux a l'interior del tub de $\frac{3}{4}$ de polzada obtingudes en el cas de la mescla S1 són superiors a la velocitat de deposició calculada per al diàmetre de partícula més elevat (140 μm), de manera que en aquest cas no s'hauria produït sedimentació. En el cas de S3 la velocitat del flux és inferior a la velocitat de deposició per a diàmetres de partícula de 140 μm , però superior a la que correspon a una mida de gra de 60 μm . Així doncs, les partícules en suspensió de la mescla S3 amb mides de gra superiors podrien haver sedimentat a l'interior del tub.
- Pel que fa a la cristallització de sal a les parets internes de la canonada, no s'ha produït cap mena de precipitat durant els assajos, però sí en les hores posteriors al buidat del circuit després de dur a terme els assajos amb la mescla S1, i durant els mesos posteriors a la finalització dels assajos.
- Els resultats corresponents al viscosímetre d'Ostwald són més precisos que els obtinguts amb el circuit experimental, presenten menys dispersió. Les corbes de major concentració es troben per sobre de les de menor concentració i, a la vegada, totes aquestes es troben per sobre de les de l'aigua. També, en tots els casos, la viscositat disminueix en augmentar la temperatura.
- Tot error de precisió en el calibratge de la rugositat absoluta de la canonada genera un error de precisió del mateix grau en els valors de viscositat cinemàtica calculats. En canvi, en el cas de la mesura del diàmetre del tub, l'error de precisió es pot veure multiplicat per quatre en el resultat final.

Finalment, considerant els resultats d'ambdós apartats, s'ha conclòs el següent:

- Els valors de la viscositat cinemàtica de les mescles de salmorra a 25°C segueixen una tendència força clara que, malgrat que el 92% de la sal està format per NaCl, no es correspon amb la corba traçada per a la solució pura d'aquesta sal. La manca de dades per a l'interval de densitats que va dels 1000 als 1100 kg/m^3 impedeix conèixer el comportament de la corba de viscositat cinemàtica de la salmorra estudiada en aquest tram, però es podria interpretar que se situa per sota del valor de la viscositat cinemàtica de l'aigua, seguint el patró de la corba de la solució de KCl, fins a assolir una densitat de mescla de 1124 kg/m^3 , aproximadament (mescla SAL_E). A partir d'aquest punt, la viscositat augmenta molt ràpidament a mesura que es va afegint més sal a la mescla, a un ritme molt més elevat que en el cas de la solució de clorur de sodi. S'ha ajustat una corba de regressió als valors de la viscositat cinemàtica a 25°C de les mescles no filtrades, en funció de la seva densitat, i s'ha adaptat posteriorment per la resta de temperatures.
- Els valors de la viscositat cinemàtica corresponents a les mescles S1, S2 i S3 filtrades segueixen una tendència molt similar als corresponent a les solucions pures de NaCl.

4. Assajos duts a terme amb diferents concentracions de partícules sòlides insolubles

4.1.Objectius

Els assajos mostrats en el Capítol 3 d'aquest document s'han centrat en determinar el comportament de la salmorra estudiada en funció de la seva concentració de sal, tot mantenint una concentració de partícules sòlides insolubles constant. De manera inversa, en aquest capítol s'analitzarà el comportament de diferents mescles de salmorra, de concentració de sal constant, modificant-ne la concentració de partícules insolubles.

Els objectius d'aquest capítol, doncs, són els següents:

- Determinar la viscositat de diverses mescles de salmorra, en funció de la seva concentració de partícules sòlides en suspensió.
- Determinar, en cada cas, la velocitat límit de deposició de les partícules sòlides insolubles presents en les mescles assajades.
- Analitzar la variació en la resistència al flux d'una mescla en funció de la quantitat de partícules que transporti, en concentracions baixes, i del seu líquid de transport.

Els assajos s'han dut a terme en el circuit experimental del laboratori de l'empresa Paterson & Cooke, en la seva seu central de Ciutat del Cap (Sud-àfrica). La descripció d'aquest circuit es presenta a continuació.

4.2.Descripció del model

4.2.1. Circuit experimental

Es tracta d'un circuit tancat d'uns 20 metres de recorregut format majoritàriament per tubs metàl·lics, excepte en un tram de 2 metres de tub de PVC transparent. El diàmetre extern dels tubs és de 65 mm, i l'intern de 62,4 mm. El flux es fa circular mitjançant la impulsió d'una bomba centrífuga, que s'alimenta a través d'un petit dipòsit cònic intermedi. L'existència d'aquest dipòsit permet l'addició de sediments a la mescla sense necessitat d'aturar la circulació.

A l'inici del circuit el flux passa a través d'un cabalímetre per efecte Coriolis, que és capaç de mesurar el cabal, la densitat i la temperatura del líquid circulant. A continuació, en un tram de tub rectilini que es troba en posició horitzontal hi ha instal·lat un sensor de pressió diferencial, capaç de mesurar la diferència de pressions entre dos punts, en aquest cas separats per 2 metres de distància. Finalment, el flux retorna al dipòsit per ser impulsat de nou. La Figura 4.1 mostra l'esquema del circuit.

La bomba d'impulsió utilitzada és de potència regulable, de tal manera que permet testar les mescles per a diferents valors de cabal.

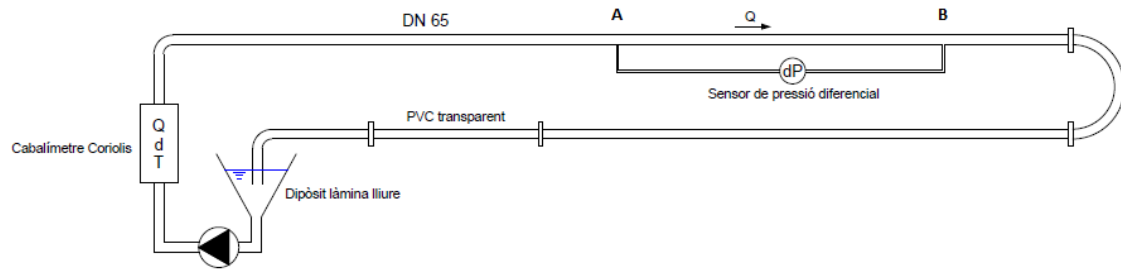


Figura 4.1 Esquema del circuit experimental situat al laboratori de l'empresa Paterson & Cooke, en la seva seu central de Ciutat del Cap (Sud-àfrica).



Figura 4.2 Vistes laterals del circuit experimental situat al laboratori de l'empresa Paterson & Cooke, en la seva seu central de Ciutat del Cap (Sud-àfrica).

4.2.2. Equips i sensors utilitzats

A continuació es detallen breument les característiques dels equips i els sensors utilitzats en la campanya d'assajos.

Bomba centrífuga

L'encarregada de donar la impulsió necessària al circuit és una bomba centrífuga axial de la casa Warman, dissenyada per al transport de fluxos amb una alta concentració de sediment gruixut (*coarse*, en anglès). Consta d'un motor trifàsic de la casa WEG, de 30 kW de potència nominal. Aquesta potència de sortida és regulable mitjançant un comandament que permet controlar el cabal del flux circulant.



Figura 4.3 Bomba centrífuga Warman, amb motor WEG de 30kW de potència nominal, i cabalímetre Endress+Hauser, model Promass 83F I. Al costat dret, dipòsit d'entrada al circuit.

Cabalímetre d'efecte Coriolis

La mesura del cabal circulant la duu a terme un cabalímetre de la casa Endress+Hauser, model Promass 83F I (Figura 4.3). El principi de mesura d'aquest aparell està basat en la generació controlada de forces de Coriolis: l'amplitud de la força de Coriolis depèn de la massa en moviment, de la seva velocitat en el sistema i, per tant, del cabal. El sensor Promass utilitza l'oscil·lació dels tubs de mesura a través dels quals flueix el líquid. Les forces de Coriolis produïdes en aquests tubs de mesura causen un desfasament en les oscil·lacions que són interpretades en forma de senyal elèctric.

En la Figura 4.4 es representa esquemàticament el funcionament dels tubs de mesura: a cabal zero els dos tubs oscil·len en fase (1), mentre que amb un cabal circulant es produeix una desacceleració de l'oscil·lació en l'entrada dels tubs (2) i acceleració a la sortida (3). La diferència de fase entre A i B incrementa amb l'increment del cabal. Uns sensors electrodinàmics registren les oscil·lacions a l'entrada i a la sortida dels tubs. Aquest principi de mesura és independent de la temperatura, de la pressió, de la viscositat, de la conductivitat i del perfil de velocitats del flux.

L'error màxim en la mesura del cabal és de $\pm 0.10\%$ del fons d'escala. El rang de mesura del sensor depèn de la densitat del líquid circulant, i va de 0 a 70000 kg/h. Per exemple, si el líquid és l'aigua, amb una densitat d' 1 kg/dm^3 , el rang de mesura es troba entre 0 i 19.4 l/s. A major densitat de la mescla, menor és el rang de mesura del cabal.

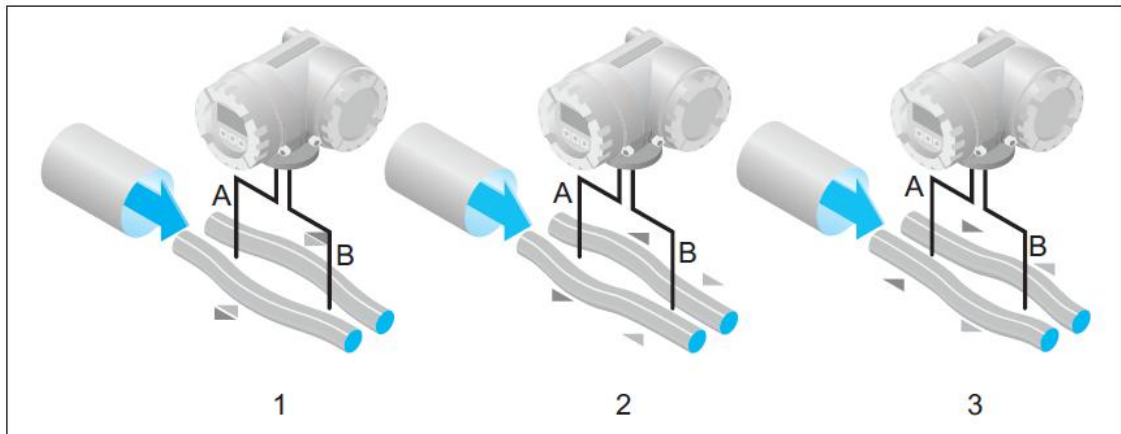


Figura 4.4 Esquema de funcionament dels tubs de mesura del cabal. A cabal nul, aquests tubs oscil·len en fase (1), mentre que amb un cabal circulant es produeix una desacceleració de l'oscil·lació en l'entrada dels tubs (2) i acceleració a la sortida (3). Font: fitxa tècnica de l'instrument (Endress+Hauser).



Figura 4.5 Pantalla de visualització del cabalímetre, amb les mesures de cabal, densitat i temperatura.

Aquest mateix sensor també és capaç de mesurar densitats, ja que la freqüència d'oscil·lació dels tubs de mesura varia en funció de la densitat del fluid que hi circula a través. Les dades de sortida tenen una precisió de $\pm 0.0005 \text{ kg/m}^3$, i el rang de mesura es troba entre 0 i 5000 kg/m^3 .

Per últim, incorpora un termòmetre per a la mesura de la temperatura del líquid, el coneixement del qual és necessari per calcular les compensacions degudes als seus efectes. L'error màxim de càlcul en aquest cas és de $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, amb un rang de mesura entre -50 i $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

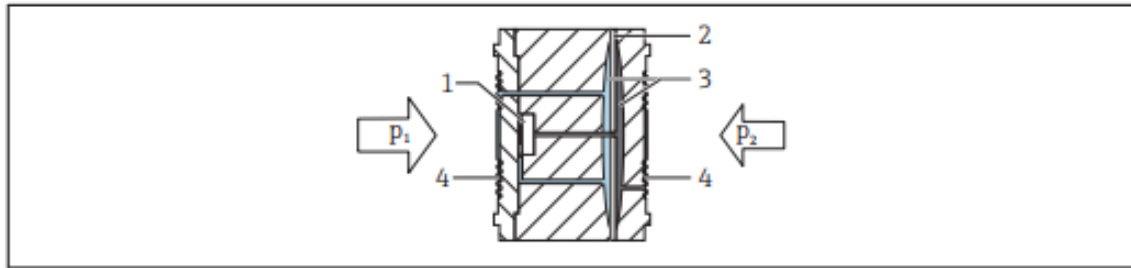
La calibració del cabalímetre i densímetre de Coriolis la duu a terme l'empresa distribuïdora, ja que és un instrument molt sensible que necessita revisions periòdiques. Per tal que les mesures es produeixin correctament cal que es trobi en posició vertical. A més, les mesures de densitat dutes a terme durant els assajos presentats en aquest estudi s'han validat a posteriori per volumetria.

Sensor de pressió diferencial

Per dur a terme les mesures de diferència de pressió entre els dos punts de control del circuit s'utilitza un sensor de pressió diferencial. Aquests dos punts es troben connectats, mitjançant dos tubs prims, amb el sensor, de manera que la pressió es transmet sobre el diafragma

separador que es troba en el seu interior. Aquest diafragma interactua amb un fluid secundari, que s'encarrega de transferir la pressió a un pont de resistències. La Figura 4.6 esquematitza aquest procés.

El sensor utilitzat és de la casa Endress+Hauser, model Deltabar S, PMD75. Està preparat per realitzar mesures de pressió d'entre 0 i 160 kPa. El màxim error acumulat en les mesures és del $\pm 0.035\%$ del fons d'escala.



- 1 *Measuring element*
- 2 *Middle diaphragm*
- 3 *Filling oil*
- 4 *Process isolating diaphragm*

Figura 4.6 Esquema de funcionament del sensor de pressió diferencial. Font: fitxa tècnica de l'instrument (Endress+Hauser).



Figura 4.7 Vista del sensor de pressió diferencial (tub superior). Al centre, la pantalla de visualització de l'aparell, que es troba connectat mitjançant dos tubs als dos punts del circuit que delimiten el tram de control. La connexió amb aquests punts inclou una vàlvula d'escapament per permetre l'eliminació de l'aire atrapat.

El sensor de pressió diferencial es calibra abans de cada assaig. En primer lloc, s'omple el circuit d'aigua o del líquid a testar i un cop eliminades les bosses d'aire s'atura el flux. A continuació es purguen els tubs que connecten el circuit amb el sensor de pressió per eliminar l'aire que hi pogués quedar i es comprova que la mesura del diferencial de pressió sigui nul·la. En cas que no ho sigui, s'imposa mitjançant la interfície de la pantalla de visualització.

Enregistrador de dades i programari de lectura en temps real

Per a la recollida de dades de tots els sensors s'utilitza un enregistrador de dades multicanal dissenyat i fabricat expressament per a l'empresa Paterson & Cooke. De la mateixa manera, el software integrat a Microsoft Excel dissenyat per la mateixa companyia permet la lectura en temps real i l'enregistrament i el tractament de les dades. Per raons de confidencialitat només

es mostra la Figura 4.8 i la Figura 4.9, on s'hi pot veure la caixa que conté l'enregistrador de dades i una instantània del software utilitzat, respectivament.



Figura 4.8 Punt de recepció de les dades, amb l'enregistrador de dades i l'ordinador que conté el software de lectura en temps real.

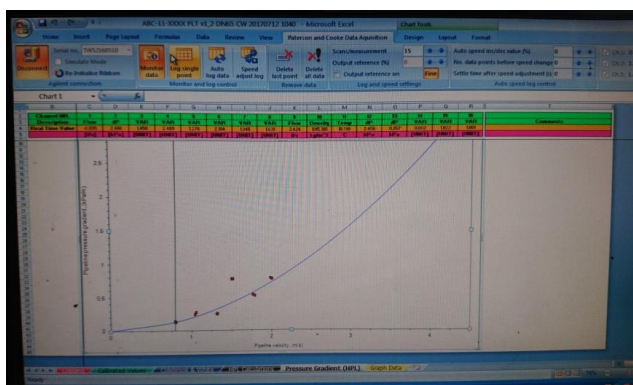


Figura 4.9 Instantània del software de lectura en temps real programat per l'empresa Paterson & Cooke.

4.3. Característiques de la salmorra

En el transport a pressió de mescles que inclouen partícules sòlides solubles en quantitats considerables es fa una distinció entre els sediments en si i el líquid que els arrossega, que és anomenat líquid de transport.

Els líquids de transport utilitzats en la generació de les mescles amb les quals s'han dut a terme els assajos presentats en aquest capítol han sigut, d'una banda, l'aigua de xarxa i, de l'altra, una dissolució saturada de diverses sals. Pel que fa als sediments incorporats s'ha fet servir una sorra de característiques conegudes que es detallen més endavant.

La dissolució saturada que s'ha utilitzat està formada per aigua com a dissolvent i els components solubles d'una silvinita extreta dels jaciments de sal del Bages com a solut. Aquesta solució s'ha dut a terme en un contenidor industrial i s'hi ha propiciat la decantació de les partícules sòlides insolubles per tal d'extreure'n una dissolució pura sense partícules en suspensió. Aquestes últimes s'extreuen per tal de poder controlar completament les característiques de la part sòlida de les mescles, per tal que siguin les mateixes tant amb aigua com amb la dissolució saturada.

La silvinita utilitzada conté els percentatges de sodi, potassi, clorurs i residus insolubles presentats a la Taula 4.1. A partir d'aquestes dades és possible calcular de forma aproximada el

contingut en NaCl i KCl de les partícules solubles, que en aquest cas correspon a un 75% en massa en el primer cas i a un 21% en massa en el segon. Aquests percentatges han sigut calculats sobre el total de partícules sòlides solubles, ja que les insolubles no formen part del líquid de transport. Així doncs, a diferència de la sal utilitzada en la generació de mescles per als assajos presentats al Capítol 3, el contingut de clorur de potassi de la utilitzada en els assajos que es presentaran a continuació és força elevat. Finalment, el percentatge en massa del total de sòlids dissolts en la solució saturada és d'un 27% (kg de sòlids / kg de mescla · 100).

Component	% en massa
Sodi (Na)	28.12
Potassi (K)	10.6
Clorurs (Cl)	54.9
Insolubles	2.4
Altres	3.98

Taula 4.1 Percentatge en massa de components presents en una mostra de la silvinita utilitzada per generar la dissolució saturada.

La Taula 4.2 recull algunes característiques de totes les mescles generades, amb les quals s'han dut a terme els assajos. En quatre d'elles el líquid de transport és l'aigua, mentre que per a la resta és la dissolució saturada. Per tal de representar les possibles situacions que es poguessin produir en el Col·lector de Salmorres, fil conductor de tot l'estudi (veure Capítol 1), les mescles s'han generat amb concentracions de sediments relativament baixes, sempre inferiors al 5%. El càlcul de la concentració en volum de les partícules sòlides en cada mescla s'ha dut a terme mitjançant l'expressió següent:

$$C_V = \frac{\rho_m - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} \quad (4.1)$$

On C_V és la concentració en volum, en tant per u, i ρ_m , ρ_w i ρ_s són les densitats de la mescla, del líquid de transport (aigua o la dissolució saturada) i dels sòlids, respectivament, en kg/m^3 .

Mescla	Líquid de transport	Densitat (kg de mescla/ m^3 de mescla)	C_V (%)
WT00	Aigua	1017	1.12%
WT01		1034	2.13%
WT02		1051	3.20%
WT03		1067	4.12%
Dissolució saturada	-	1234	-
BT00	Dissolució saturada	1251	1.20%
BT01		1267	2.33%
BT02		1272	2.68%
BT03		1278	3.11%
BT04		1301	4.73%

Taula 4.2 Densitat i percentatge en volum de sòlids insolubles de cadascuna de les mescles fabricades per a la realització dels assajos.

Els sediments utilitzats per generar les mescles s'han escollit amb la intenció que el seu diàmetre representatiu i la seva distribució granulomètrica fos el més semblant possible al de les partícules sòlides insolubles de les mescles generades en el Capítol 3. L'anàlisi de la distribució de mida de gra d'aquestes últimes mostrava que el seu d_{50} es troba al voltant de les 140 μm . Així doncs, per a la realització dels assajos al laboratori de Paterson & Cooke s'ha triat una sorra de Mamalsberry, a la qual se li han eliminat totes les partícules de diàmetre superior a 500 μm per obtenir un d_{50} de 158.2 μm i una corba de distribució similar a la dels sediments del Capítol 3. Es tracta d'una sorra no cohesiva que té una densitat de 2650 kg/m^3 . La Figura 4.10 mostra la distribució granulomètrica de la sorra original i l'obtinguda després del garbellat. També mostra la corba obtinguda en l'anàlisi de la mostra de sediments obtinguda en el Capítol 3, que com es pot comprovar té una gran similitud amb la de la sorra utilitzada en el present capítol.

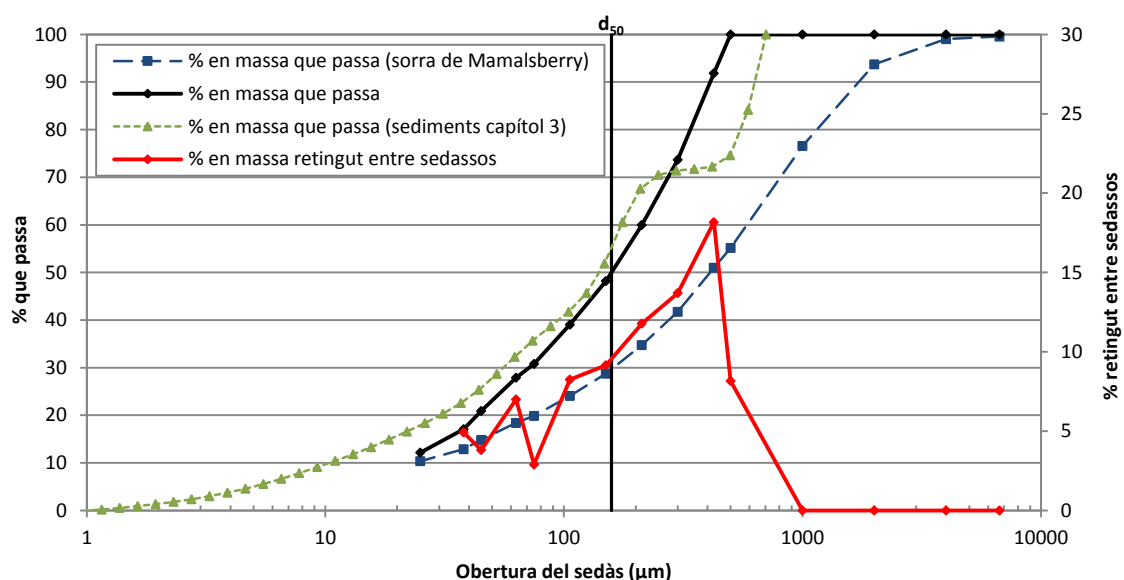


Figura 4.10 Corba granulomètrica de la sorra utilitzada en la generació de les mescles en % que passa en massa (línia negra) i en % en massa retingut entre sedassos (línia vermella). La mida de partícula corresponent al d_{50} és de 158.2 μm . La línia discontinua correspon a la corba granulomètrica de la sorra de Mamalsberry abans del garbellat de les partícules superiors a 500 μm , en % en massa que passa. Finalment, la línia puntejada correspon a la corba granulomètrica de la mostra de sediments analitzada en el Capítol 3.

Càlcul de la velocitat límit de deposició

El càlcul de la velocitat límit de deposició dels sediments que formen part de les mescles generades s'ha dut a terme amb l'expressió proposada per Durand i Condolios (1952) perquè és la que millor s'adapta als diàmetres de partícula i concentracions de partícules en suspensió baixes. Com ja s'ha explicat en el Capítol 2, aquesta expressió depèn de la densitat del líquid de transport (ρ_w), de la densitat dels sòlids (ρ_s) i la seva concentració en volum sobre el total de la mescla (C_v), del diàmetre de les partícules sòlides en suspensió (d , normalment s'utilitza el d_{50}) i del diàmetre intern de la canonada (D). Atès que Durand i Condolios no tenen en consideració

el transport de partícules sòlides en concentracions en volum inferiors al 2%, en alguns casos ha sigut necessari fer-ne una extrapolació.

La Figura 4.11 mostra les velocitats de deposició teòriques en funció de la concentració en volum de sediments i segons quin sigui el líquid de transport: o bé aigua o bé la dissolució saturada. Com s'hi pot veure, la velocitat límit augmenta molt ràpidament en afegir els primers sediments al líquid de transport. A partir d'una concentració en volum del 0.2%, el pendent de la corba $v_D - C_V$ disminueix considerablement, i més enllà de l'1% pràcticament deixa de créixer. Per altra banda, i com és lògic, en les mateixes condicions de concentració en volum, diàmetre de partícula, etc., la velocitat de deposició de les partícules en suspensió disminueix quan la densitat del líquid de transport augmenta, ja que un líquid més dens té més capacitat per arrossegar les mateixes partícules. Per tant, la sedimentació s'hauria de produir a menor velocitat en el cas de les mescles transportades per la dissolució saturada que les transportades per aigua.

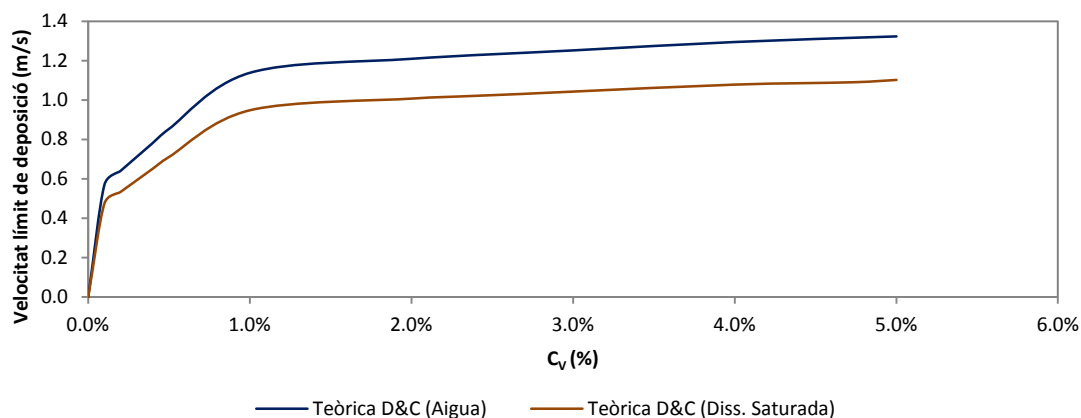


Figura 4.11 Velocitat límit de deposició calculada mitjançant l'expressió de Durand i Condolios (1952), en funció de la concentració en volum de partícules sòlides insolubles i segons si el líquid de transport de la mescla és l'aigua o la dissolució saturada. Aquests valors estan associats a un diàmetre de canonada de 62.4 mm, una densitat dels sòlids de 2650 kg/m^3 i un d_{50} proper a les 150 μm .

4.4. Metodologia seguida en la realització dels assajos

El procediment que s'ha seguit per a la realització dels assajos és el següent:

5. S'inicia la circulació de l'aigua o la salmorra fins a assolir un equilibri en el flux, amb una velocitat de flux constant, i aconseguir la total eliminació de les bosses d'aire que es formen al llarg de la conducció. Prèviament s'han purgat els tubs del sensor de pressió diferencial i s'ha calibrat en estàtic.
6. Es duu a terme el registre de les lectures dels sensors per a diferents velocitats de flux, per intervals de 0.5 m/s, començant per la velocitat més elevada i fins a velocitat nul·la. Cada registre correspon a la mitjana de 15 lectures realitzades amb una freqüència d'un segon, i es fa per duplicat per assegurar que s'ha assolit el règim estacionari. Si els valors dels dos registres es troben a distància inferior a $\pm 0.05 \text{ kPa/m}$ es consideren vàlids; si no, es descarten i es repeteix el procés.
7. A continuació es reactiva el flux fins a un cabal suficient per mantenir totes les partícules en suspensió i es va disminuint la velocitat del flux fins que s'observa la deposició al fons de la canonada del primer gra de sorra. Aquesta velocitat correspon a

- la velocitat límit de deposició dels sediments en aquest circuit, i s'anota com a tal. Aquesta observació es fa a ull nu en el tram de tub transparent del circuit (Figura 4.12).
8. A través del dipòsit intermedi, sense aturar la circulació del flux, s'afegeixen sediments a la mescla (Figura 4.13) i es repeteixen els punts 2 i 3. En el cas de l'aigua com a líquid de transport, l'addició de sediments s'ha dut a terme tres vegades; quatre en el cas de la dissolució saturada.

Els assajos s'han dut a terme en dues tandes, primer amb l'aigua com a líquid de transport i després amb la dissolució saturada. Entre tanda i tanda s'ha buidat el circuit d'aigua i s'ha reomplert amb la dissolució saturada.

Cal tenir en compte que abans de dur a terme els assajos s'ha fet circular aigua amb certa quantitat de sorra per tal d'eliminar per abracció les partícules sòlides que es trobessin adherides a les parets de la canonada d'assajos anteriors. Això és important perquè les mescles que s'utilitzen en la resta d'assajos contenen partícules sòlides, i si els tubs no estan nets el coeficient de rugositat es podria veure modificat durant el procés. Atès que no ha sigut possible extreure del circuit el 100% de les partícules utilitzades en aquest procés de neteja, no s'han pogut dur a terme assajos amb aigua o la dissolució saturada completament lliures de sediments, però sí amb una quantitat mínima.



Figura 4.12 Exemple de com es duu a terme la determinació de la velocitat límit de deposició, en un tram de canonada transparent amb l'ajuda d'un focus.



Figura 4.13 Imatge de l'addició de sediments al circuit, a través del dipòsit intermedi.

La Taula 4.3 i la Taula 4.4 presenten les mescles que s'han estudiat, amb l'aigua i la dissolució saturada com a líquids de transport respectivament, i la temperatura mitjana a la qual es trobaven durant els assajos. Com es pot comprovar, aquesta temperatura ha anat augmentant

a cada assaig, degut al fet que la fricció del flux amb la canonada provoca un escalfament molt ràpid de la mescla (Sánchez-Juny et al. 2012). Atès que no es disposava de l'equipament necessari, no s'ha pogut regular aquesta temperatura. Malgrat tot, s'ha mantingut en l'interval que va dels 16.6°C als 23.7°C.

La densitat de les mescles ha sigut mesurada a posteriori a partir d'una mostra de cada mescla per tal de comprovar la bondat de les lectures del cabalímetre de Coriolis. En el cas dels assajos realitzats amb aigua com a líquid de transport les densitats mesurades per volumetria han coincidit amb les mesurades pel cabalímetre de Coriolis, però no en els assajos amb salmorra. En aquest últim cas, s'ha donat validesa a les mesures fetes a posteriori. Es desconeix el motiu d'aquesta divergència entre les lectures fetes pel cabalímetre i les mesures realitzades per volumetria, però com que només ha succeït amb les mescles el líquid de transport de les quals era la dissolució saturada es pot interpretar que el problema de lectura ve d'aquí.

Cada mostra s'ha testat per a velocitats de flux al voltant de 0.5, 1, 1.5, 2 i 2.5 m/s, i en alguns casos s'han dut a terme alguns assajos fins a 3 m/s (mescles BT) o 4 m/s (mescla WT00).

Mescla	Densitat (kg/m ³)	C _v (%)	Temperatura mitjana (°C)
WT00	1017	1.12%	18.2
WT01	1034	2.13%	19.3
WT02	1051	3.20%	19.6
WT03	1067	4.12%	20.1

Taula 4.3 Densitat i concentració en volum de les mescles el líquid de transport de les quals és l'aigua i temperatura mitjana d'aquestes durant la realització dels assajos.

Mescla	Densitat (kg/m ³)	C _v (%)	Temperatura mitjana (°C)
BT00	1251	1.20%	16.6
BT01	1267	2.33%	19.6
BT02	1272	2.68%	22.1
BT03	1278	3.11%	23.1
BT04	1301	4.73%	23.7

Taula 4.4 Densitat i concentració en volum de les mescles el líquid de transport de les quals és la dissolució saturada i temperatura mitjana d'aquestes durant la realització dels assajos.

4.5.Registres obtinguts

La Taula 4.5 mostra tots els registres obtinguts pel sensor de pressió diferencial i el cabalímetre de Coriolis durant els assajos realitzats. Com ja s'ha explicat, cada valor correspon a la mitjana de 15 lectures dutes a terme amb una freqüència d'un segon, i no es presenten les lectures descartades en temps real. També s'hi indica la velocitat límit de deposició de les partícules sòlides en suspensió (v_D) en els casos en què s'ha determinat.

Mescla / C _v	Velocitat del flux (m/s)	Diferencial de pressió (kPa)	Temperatura (°C)
WT00 C _v = 1.12%	3.04	2.668	17.7
	3.04	2.661	17.8
	2.71	2.146	18.0
	2.74	2.150	18.0
	2.49	1.827	18.0
	2.50	1.830	18.1
	2.24	1.492	18.1
	2.25	1.476	18.3
	2.01	1.195	18.2
	2.00	1.194	18.3
	1.70	0.869	18.2
	1.70	0.873	18.3
	1.49	0.666	18.3
	1.49	0.676	18.3
	1.26	0.494	18.3
	1.26	0.494	18.3
	1.04	0.340	18.4
	1.04	0.348	18.4
	0.72	0.163	18.4
	0.73	0.162	18.3
0.45	0.073	18.2	
0.43	0.046	18.4	
0.22	0.006	18.2	
0.03	0.003	18.3	
0.01	0.003	18.3	
WT01 C _v = 2.13%	2.47	1.865	19.3
	2.46	1.865	19.2
	2.46	1.865	19.2
	1.99	1.234	19.3
	2.01	1.243	19.4
	1.49	0.708	19.4
	1.48	0.704	19.3
	1.00 (v _D)	0.379	19.2
	0.55	0.103	19.3
	0.53	0.110	19.2
WT02 C _v = 3.20%	2.48	1.927	19.6
	2.47	1.928	19.8
	2.09	1.349	19.8
	2.09	1.359	19.6
	1.50	0.748	19.6
	1.48	0.747	19.7
	1.17 (v _D)	0.488	19.4
	1.03	0.452	19.7
	1.04	0.434	19.7
0.60	0.146	19.6	

Mescla / C_V	Velocitat del flux (m/s)	Diferencial de pressió (kPa)	Temperatura (°C)
	0.60	0.148	19.7
	2.52	2.041	20.1
	2.54	2.046	20.0
	2.03	1.355	20.1
	2.03	1.339	20.3
WT03	1.49	0.781	20.2
	1.48	0.791	20.2
$C_V = 4.12\%$	1.26 (v_D)	0.655	20.0
	0.95	0.452	20.0
	0.97	0.433	20.2
	0.66	0.216	20.0
	0.67	0.224	20.2
	3.00	3.396	16.4
	3.01	3.360	16.2
	2.51	2.295	16.4
	2.51	2.293	16.4
	1.99	1.399	16.6
BT00	1.99	1.408	16.7
	1.49	0.821	16.7
$C_V = 1.20\%$	1.47	0.821	16.8
	0.97	0.426	16.8
	0.98	0.428	16.7
	0.55	0.241	16.7
	0.51	0.205	16.7
	0.09	0.032	16.8
	0.08	0.042	16.9
	2.99	3.450	19.1
	3.00	3.441	19.1
	2.99	3.418	19.2
	2.50	2.485	19.5
	2.53	2.487	19.6
	2.06	1.663	19.4
	2.03	1.675	19.9
BT01	1.50	0.978	19.8
	1.50	0.982	19.8
$C_V = 2.33\%$	1.03	0.531	19.8
	1.02	0.521	19.8
	0.57	0.251	19.7
	0.57	0.251	19.7
	0.46 (v_D)	0.193	19.5
	0.04	0.062	19.6
	0.04	0.067	19.6
	3.03	3.678	21.7
BT02	3.01	3.689	22.0
	2.58	2.766	22.1
$C_V = 2.68\%$	2.54	2.760	22.0
	2.06	1.861	22.0
	2.05	1.862	22.3

Mescla / C_v	Velocitat del flux (m/s)	Diferencial de pressió (kPa)	Temperatura (°C)
	1.53	1.108	22.2
	1.53	1.112	22.2
	1.05	0.575	22.2
	1.04	0.570	22.3
	0.57	0.250	22.2
	0.57	0.257	22.0
	0.56 (v_D)	0.239	22.0
	0.03	0.080	22.1
	0.03	0.085	22.1
	BT03 $C_v = 3.11\%$	2.95	3.683
2.97		3.683	23.1
2.52		2.798	23.2
2.53		2.802	23.1
2.08		1.961	23.3
2.05		1.961	23.4
1.55		1.170	23.3
1.54		1.159	23.2
1.00		0.518	23.2
1.00		0.522	23.2
0.67 (v_D)		0.239	22.8
0.53		0.104	23.1
0.52		0.113	23.2
0.04		0.008	22.9
0.02		0.011	22.9
BT04 $C_v = 4.73\%$	2.98	3.810	23.4
	2.98	3.809	23.5
	2.50	2.800	23.8
	2.49	2.803	23.7
	1.96	1.854	23.8
	2.01	1.852	23.7
	1.51	1.115	23.8
	1.50	1.129	23.8
	1.03	0.528	23.8
	1.03	0.538	23.8
	0.87 (v_D)	0.373	23.6
	0.54	0.067	23.7
	0.55	0.068	23.7
	0.04	0.005	23.5
	0.04	0.001	23.5

Taula 4.5 Dades corresponents al sensors de pressió diferencial i al cabalímetre (velocitat del flux i temperatura), obtingudes en cadascun dels assajos realitzats.

La Taula 4.6 sintetitza les velocitats límit de deposició observades en els assajos duts a terme amb cadascuna de les mescles (excepte WT00 i BT00) i la Figura 1.3 les representa al costat de la predicció feta anteriorment mitjançant el diagrama de Durand i Condolios (1952). Com era d'esperar, les velocitats límit obtingudes en el cas de les mescles en què el líquid de transport és l'aigua són superiors a les de les mescles formades per la dissolució saturada, degut a la

major densitat d'aquesta última. Tot i així, en la figura s'observa clarament com la predicció duta a terme sobreestima en tots els casos les velocitats mesurades, de tal manera que el líquid de transport té més capacitat d'arrossegament de la prevista, especialment en el cas de les mescles generades amb la solució saturada. El conjunt d'observacions, però, mostra una tendència clara a assolir les velocitats calculades per a concentracions de sediments majors.

Mescla	ρ_w (kg/m ³)	ρ_s (kg/m ³)	C_v (%)	C_m (%)	v_D observada (m/s)	F_L observat	F_L previst (D&C)
WT00	999	2650	1.12	2.92	-	-	0.8
WT01			2.13	5.46	1.00	0.70	0.85
WT02			3.20	8.06	1.17	0.82	0.88
WT03			4.12	10.24	1.26	0.89	0.91
BT00	1234	2650	1.20	2.54	-	-	0.8
BT01			2.33	4.87	0.46	0.39	0.86
BT02			2.68	5.59	0.56	0.48	0.87
BT03			3.11	6.44	0.67	0.57	0.88
BT04			4.73	9.64	0.87	0.74	0.92

Taula 4.6 Velocitats límit de deposició (v_D) observades, nombre de Froude (F_L) associat a cadascuna i nombre de Froude calculat mitjançant l'expressió de Durand i Condolios (1952) per cadascuna de les mescles assajades.

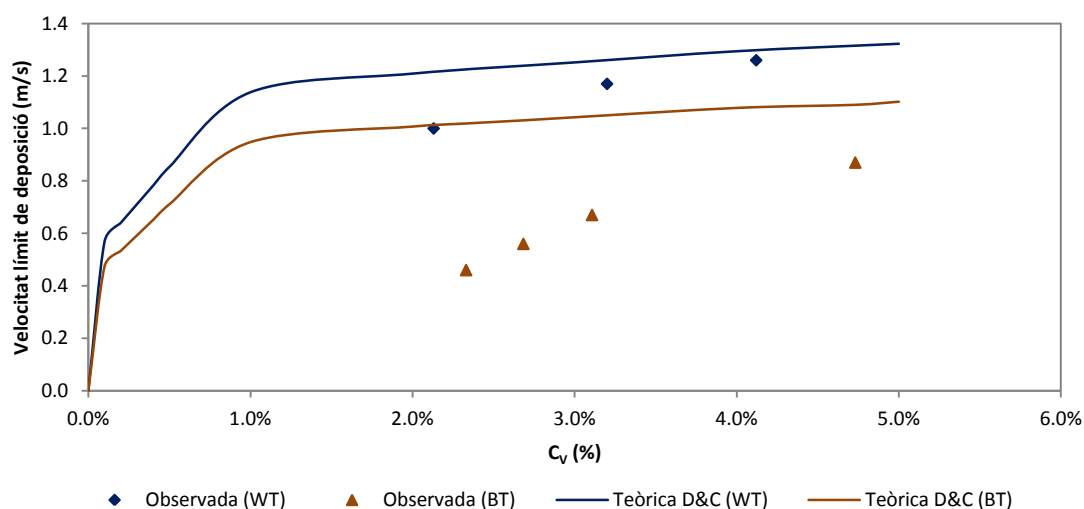


Figura 4.14 Velocitats límit de deposició observades i teòriques (Durand i Condolios, 1952) segons si el líquid de transport és l'aigua (WT) o la solució saturada (BT), en funció de la concentració en volum de les mesclures. Aquests valors estan associats a un diàmetre de canonada de 62.4 mm, una densitat dels sòlids de 2650 kg/m³ i un d_{50} proper a les 150 μ m.

4.6. Processament dels assajos

El procediment de càlcul seguit per al calibratge del model i el posterior tractament de les dades obtingudes ha sigut el següent:

2. Amb l'assaig realitzat amb la mescla WT00, per a diferents velocitats del flux:
 - c. Estimació de la viscositat de la mescla mitjançant l'expressió proposada per Einstein (1906) i, a partir dels registres de pressió i velocitat del flux obtinguts,

- càlcul de les pèrdues de càrrega lineals i , amb l'equació de Darcy-Weisbach, dels coeficients de fricció associats.
- d. Càlcul de la rugositat absoluta de la canonada a partir dels valors de pèrdua de càrrega lineal obtinguts en el punt anterior, amb la relació de Darcy-Weisbach i l'expressió de càlcul de f de Swamee i Jain (1976), mitjançant un ajust pel mètode de mínims quadrats.
3. Amb els assajats realitzats amb la resta de mescles, per a diferents velocitats del flux:
- a. A partir dels registres de pressió i velocitat del flux obtinguts, càlcul de les pèrdues de càrrega lineals i , amb l'equació de Darcy-Weisbach, dels coeficients de fricció associats.
 - b. Càlcul de la viscositat de cada mescla a partir dels valors de pèrdua de càrrega lineal obtinguts en el punt anterior, amb la relació de Darcy-Weisbach i l'expressió de càlcul de f de Swamee i Jain, mitjançant un ajust pel mètode de mínims quadrats.

4.7. Calibratge del circuit

Les lectures del sensor de pressió diferencial han estat preses en un tram de canonada de 2 metres, recte i horitzontal i, per tant, les pèrdues de càrrega localitzades en aquest tram es consideren nul·les. Amb aquesta premissa s'ha dut a terme el calibratge de la rugositat absoluta de la canonada.

Aquest calibratge s'ha dut a terme amb la mescla WT00, el líquid de transport de la qual és l'aigua i amb una concentració en volum de partícules insolubles mínima, de l'1.12%. Com ja s'ha explicat, no s'ha pogut realitzar un assaig amb aigua completament neta per la impossibilitat d'extreure completament les partícules de sorra incorporades prèviament al circuit amb l'objectiu d'eliminar per abrasió les impureses de les parets de la canonada. Malgrat tot, atès que el percentatge de sediments de la mescla és mínim, s'ha utilitzat l'equació d'Einstein (1906) per calcular-ne la viscositat. Aquesta equació només és vàlida per a suspensions molt diluïdes, amb $C_v < 2\%$ (Rutgers 1962), com és el cas. Tenint en compte que l'assaig s'ha dut a terme a 18 °C i que la viscositat dinàmica de l'aigua a aquesta temperatura és de $1.060 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ (*Viscosity of Water*, ISO/TR Technical Report 3666 (E) 1998), s'obté que la viscositat del líquid circulant és de $1.089 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$.

Un cop determinada la viscositat es pot estimar la rugositat absoluta de la conducció mitjançant un ajust pel mètode de mínims quadrats sobre els valors de gradient de pressió i velocitat del flux obtinguts en l'assaig realitzat amb la mescla WT00. Aquest ajust s'ha dut a terme mitjançant l'equació de Darcy-Weisbach i la fórmula de Swamee i Jain (1976), i es mostra en la Figura 4.15. El valor de la rugositat absoluta obtingut ha sigut de 0.014 mm, amb un $\pm 10\%$ d'error de l'ajust per a una confiança del 95%, i un coeficient de determinació (R^2) de 0.999. El valor obtingut es troba dins del rang habitual en tubs metàl·lics llisos (Lencastre i Robles García, 1998).

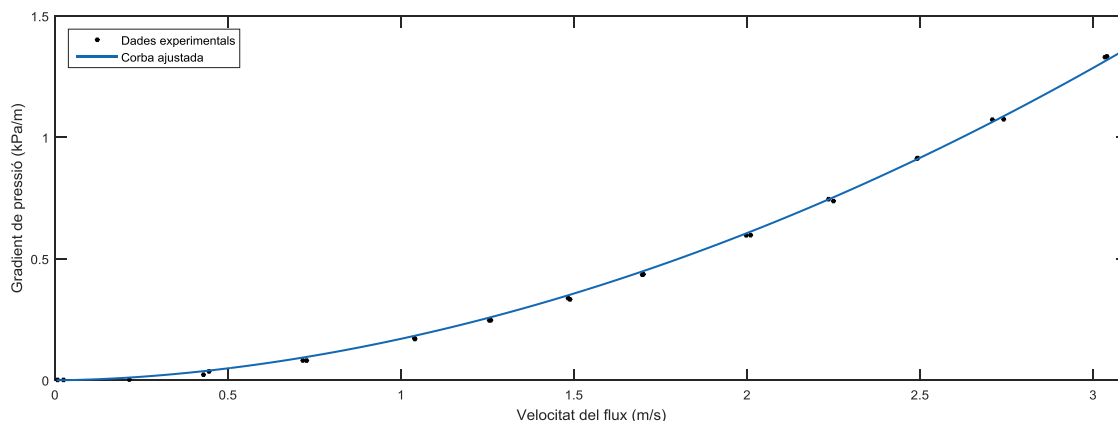


Figura 4.15 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.999$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori, per tal de determinar el valor de la rugositat absoluta de la canonada.

Per a la realització de la sèrie d'assajos en què el líquid de transport és la dissolució saturada, és necessari buidar el circuit i omplir-lo de nou amb aquesta solució. Per assegurar que el coeficient de rugositat de la canonada no ha variat durant els assajos de la primera sèrie, abans d'omplir el circuit de salmorra es torna a fer un assaig de calibratge amb aigua amb un percentatge mínim de partícules en suspensió i s'obté un resultat molt similar.

4.8. Modelització numèrica i discussió

4.8.1. Càlcul del coeficient de fricció

El coeficient de fricció associat a cadascun dels assajos realitzats amb salmorra s'ha obtingut a partir de l'expressió de Darcy-Weisbach, en la qual se'l relaciona amb el pendent motriu del líquid circulant, la velocitat del flux i el diàmetre del tub.

La Taula 4.7 mostra el pendent motriu i el coeficient de fricció de Darcy-Weisbach corresponents a cada mescla i velocitat del flux assajada. En la mateixa taula es mostra el nombre de Reynolds associat a cada assaig. Per calcular-lo és necessari conèixer la viscositat de les mescles assajades, ja que el flux de salmorra es troba en zona de transició: el procediment de determinació d'aquest paràmetre físic s'explicarà en l'apartat 4.8.2. S'han eliminat del procés de càlcul els registres dels assajos duts a terme a velocitats inferiors a la velocitat límit de deposició de les partícules en suspensió, ja que en produir-se la sedimentació d'aquestes al fons de la canonada varien les condicions de contorn: el llit de sediments provoca un canvi en la rugositat absoluta i en la secció efectiva de la canonada. En el cas de les mescles WT00 i BT00, en les quals no s'ha dut a terme la determinació de la velocitat de deposició, aquesta s'aproxima mitjançant una extrapolació de les dades obtingudes per les altres mescles, en funció de la concentració en volum de les partícules de sorra (Figura 1.3).

Mescla / C_v	Nombre de Reynolds	Pendent motriu (mcm/m)	Coefficient de fricció
WT00	1.77E+05	0.1362	0.0180
	1.77E+05	0.1358	0.0180
$C_v = 1.12\%$	1.58E+05	0.1096	0.0182
	1.60E+05	0.1097	0.0178

Mescla / C_v	Nombre de Reynolds	Pendent motriu (mcm/m)	Coefficient de fricció
	1.45E+05	0.0932	0.0183
	1.45E+05	0.0934	0.0183
	1.30E+05	0.0761	0.0186
	1.31E+05	0.0753	0.0182
	1.17E+05	0.0610	0.0184
	1.16E+05	0.0609	0.0186
	9.90E+04	0.0444	0.0188
	9.92E+04	0.0446	0.0188
	8.68E+04	0.0340	0.0187
	8.65E+04	0.0345	0.0191
	7.33E+04	0.0252	0.0195
	7.35E+04	0.0252	0.0194
	6.07E+04	0.0173	0.0195
	6.06E+04	0.0177	0.0200
	4.19E+04	0.0083	0.0197
	4.25E+04	0.0083	0.0190
	2.61E+04	0.0037	0.0227
	2.51E+04	0.0023	0.0154
	1.27E+04	0.0003	0.0082
	1.25E+05	0.0919	0.0185
	1.25E+05	0.0921	0.0185
WT01	1.01E+05	0.0609	0.0187
	1.02E+05	0.0614	0.0186
$C_v = 2.13\%$	7.55E+04	0.0349	0.0193
	7.50E+04	0.0347	0.0194
	5.09E+04	0.0187	0.0227
	1.26E+05	0.0935	0.0186
	1.25E+05	0.0934	0.0187
WT02	1.06E+05	0.0654	0.0182
	1.06E+05	0.0661	0.0184
$C_v = 3.20\%$	7.59E+04	0.0363	0.0198
	7.53E+04	0.0362	0.0201
	5.22E+04	0.0219	0.0254
	1.10E+05	0.0976	0.0187
	1.11E+05	0.0977	0.0185
WT03	8.85E+04	0.0649	0.0193
	8.86E+04	0.0638	0.0189
$C_v = 4.12\%$	6.52E+04	0.0374	0.0205
	6.47E+04	0.0378	0.0210
	4.15E+04	0.0216	0.0292
	1.42E+05	0.1384	0.0188
	1.42E+05	0.1369	0.0185
BT00	1.19E+05	0.0936	0.0181
	1.19E+05	0.0935	0.0181
$C_v = 1.20\%$	9.43E+04	0.0570	0.0175
	9.41E+04	0.0574	0.0177
	7.03E+04	0.0335	0.0185

Mescla / C_v	Nombre de Reynolds	Pendent motriu (mcm/m)	Coefficient de fricció
	6.94E+04	0.0335	0.0190
	4.60E+04	0.0174	0.0224
	4.61E+04	0.0174	0.0224
	2.60E+04	0.0098	0.0397
	1.08E+05	0.1388	0.0189
	1.08E+05	0.1385	0.0189
	1.08E+05	0.1376	0.0188
	9.01E+04	0.1000	0.0196
	9.12E+04	0.1001	0.0192
BT01	7.42E+04	0.0669	0.0193
	7.32E+04	0.0674	0.0200
$C_v = 2.33\%$	5.40E+04	0.0394	0.0215
	5.42E+04	0.0395	0.0214
	3.72E+04	0.0214	0.0245
	3.68E+04	0.0210	0.0246
	2.07E+04	0.0101	0.0375
	2.06E+04	0.0101	0.0378
	1.67E+04	0.0078	0.0441
	7.57E+04	0.1474	0.0196
	7.53E+04	0.1479	0.0199
	6.44E+04	0.1109	0.0204
	6.35E+04	0.1106	0.0210
	5.15E+04	0.0746	0.0214
BT02	5.11E+04	0.0746	0.0218
	3.83E+04	0.0444	0.0231
$C_v = 2.68\%$	3.83E+04	0.0446	0.0232
	2.63E+04	0.0231	0.0255
	2.60E+04	0.0229	0.0259
	1.41E+04	0.0100	0.0383
	1.44E+04	0.0103	0.0383
	1.39E+04	0.0096	0.0378
	6.21E+04	0.1470	0.0207
	6.25E+04	0.1469	0.0204
	5.32E+04	0.1117	0.0215
	5.33E+04	0.1118	0.0214
BT03	4.38E+04	0.0782	0.0222
	4.33E+04	0.0782	0.0227
$C_v = 3.11\%$	3.26E+04	0.0467	0.0239
	3.26E+04	0.0462	0.0237
	2.10E+04	0.0207	0.0254
	2.11E+04	0.0208	0.0255
	1.12E+04	0.0041	0.0180
	6.25E+04	0.1493	0.0205
BT04	6.23E+04	0.1493	0.0206
	5.23E+04	0.1098	0.0216
$C_v = 4.73\%$	5.21E+04	0.1099	0.0217
	4.11E+04	0.0727	0.0231
	4.20E+04	0.0726	0.0220

Mescla / C_v	Nombre de Reynolds	Pendent motriu (mcm/m)	Coefficient de fricció
	3.15E+04	0.0437	0.0235
	3.14E+04	0.0442	0.0241
	2.17E+04	0.0207	0.0236
	2.16E+04	0.0211	0.0242
	1.14E+04	0.0026	0.0109

Taula 4.7 Valors del pendent motriu calculats a partir de les dades experimentals, per cada mescla i assaig, i dels coeficients de fricció associats a cadascun.

Els valors del coeficient de fricció es representen en funció del nombre de Reynolds corresponent en l'àbac de Moody de la Figura 4.16, en el cas de les mescles el líquid de transport de les quals és l'aigua, i de la Figura 4.17, quan el líquid de transport és la dissolució saturada. Per altra banda, la Figura 4.18 mostra una ampliació de la superposició de les dues anteriors. Com s'hi pot observar, el flux de mescla es troba en zona de règim turbulent intermedi en tots els casos, de manera que la fórmula de Swamee i Jain utilitzada en els càlculs de l'apartat 4.8.2 és aplicable. A més, el núvol de punts obtingut se situa al voltant de la corba de règim turbulent llis, cosa que té sentit tenint en compte que s'ha utilitzat un tub metàl·lic llis en la realització dels assajos.

Els valors obtinguts per les mescles en què l'aigua és el líquid de transport són molt propers entre si i tendeixen a resseguir amb força precisió les corbes de rugositat relativa constant de l'àbac. Tot i així, per als nombres de Reynolds més baixos aquesta precisió disminueix i augmenta la variabilitat: l'anàlisi de sensibilitat que es detalla més endavant mostra que l'error associat al càlcul del coeficient de fricció augmenta en disminuir la velocitat del flux. En el cas de les mescles en què el líquid de transport és la dissolució saturada els coeficients de fricció obtinguts també segueixen la tendència de les corbes de rugositat constant, al voltant de la corba de rugositat relativa imposada, amb $k/D = 0.00022$. La precisió obtinguda en els càlculs es considera acceptable tenint en compte que s'està treballant amb valors molt sensibles al més petit error en les mesures, com ja s'ha pogut comprovar en el Capítol 3 i com es pot veure en l'anàlisi de sensibilitat per al càlcul dels valors del coeficient de fricció del present capítol, que es presenta a continuació.

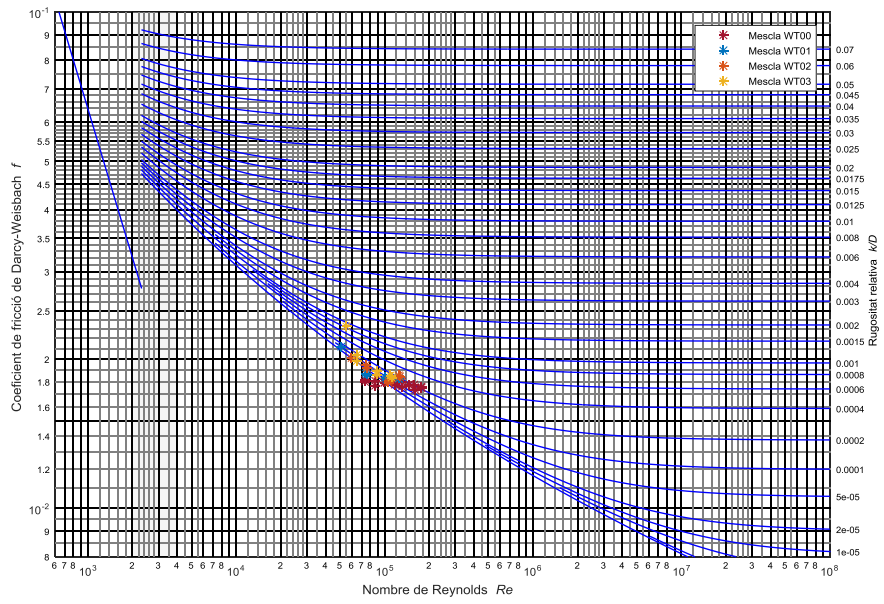


Figura 4.16 Valors del coeficient de fricció corresponents als assajos duts a terme amb les mescles el líquid de transport de les quals és l'aigua, sobre àbac de Moody.

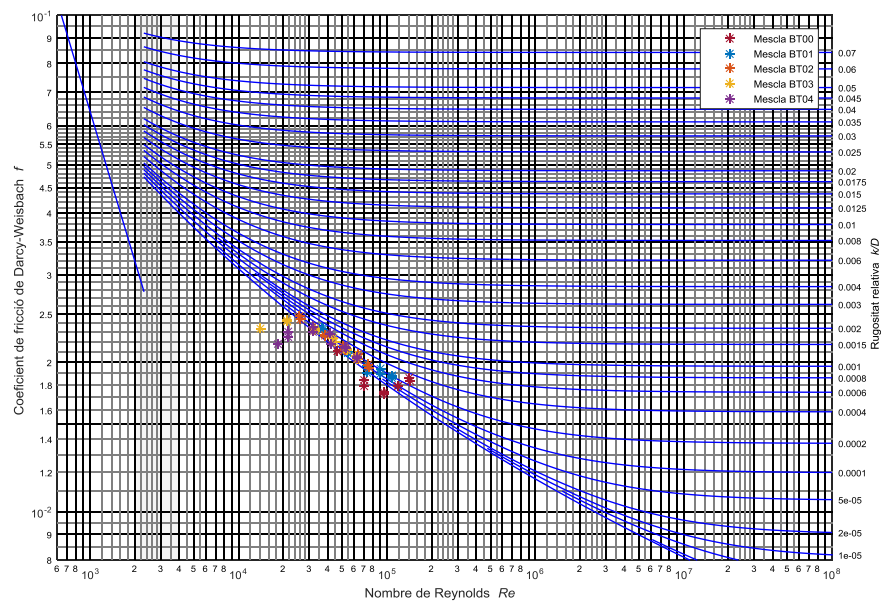


Figura 4.17 Valors del coeficient de fricció corresponents als assajos duts a terme amb les mescles el líquid de transport de les quals és la dissolució saturada, sobre àbac de Moody.

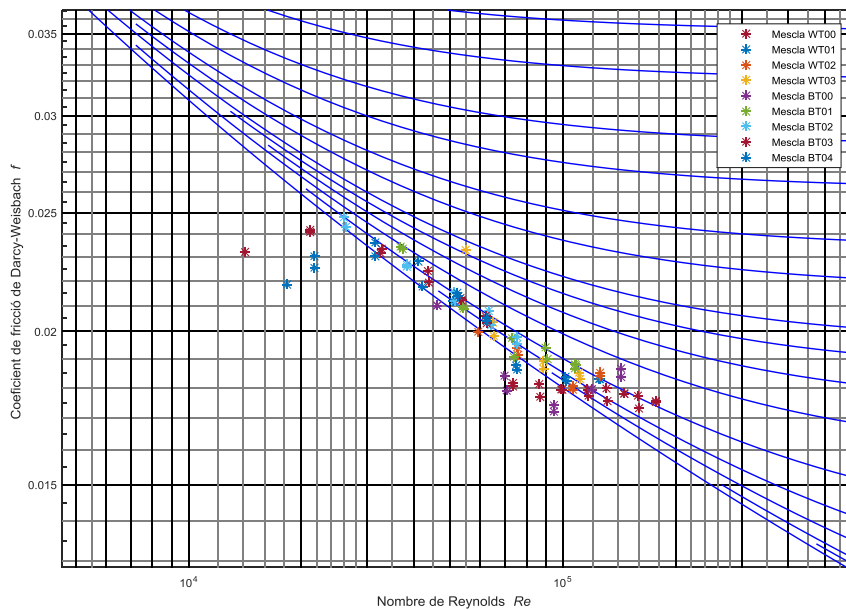


Figura 4.18 Valors del coeficient de fricció corresponents a tots els assajos duts a terme, sobre àbac de Moody. Ampliació de la superposició de les figures anteriors.

Anàlisi de sensibilitat en el càlcul del coeficient de fricció

A continuació s'analitza el grau de precisió obtingut en els valors calculats dels coeficients de fricció relatius a cada assaig. Aquests es calculen mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, en la qual hi intervé la pèrdua de càrrega per fricció, el diàmetre intern de la canonada (D), la velocitat del flux i la longitud del tub (L). Cadascun d'aquests paràmetres té associat el seu error de precisió, el qual s'ha tingut en compte a l'hora de determinar la precisió en el càlcul dels valors del coeficient de fricció. En el cas del diàmetre intern i la longitud del tub, s'ha considerat un error constant associat a la precisió de la mesura, a saber:

- $D: \pm 0.1 \text{ mm}$
- $L: \pm 1 \text{ mm}$

Pel que fa a la velocitat del flux, aquesta s'ha calculat a partir de les mesures de cabal del cabalímetre de Coriolis, l'error de precisió del qual és de $\pm 0.1\%$ del seu fons d'escala (variable en funció de la densitat de la mescla). Les pèrdues de càrrega lineals en aquest cas són equivalents a les totals (les pèrdues de càrrega localitzades es consideren negligibles), així que s'han calculat directament a partir de l'equilibri d'energies de Bernoulli, en el qual només hi intervé la diferència de pressió entre l'entrada i la sortida del tram monitorat, ja que la velocitat del flux és constant en tot el recorregut. Per tant, en aquest càlcul s'ha tingut en compte l'error de mesura associat al sensor de pressió diferencial, que és de $\pm 0.035\%$ del seu fons d'escala.

La propagació de tots aquests errors de precisió s'ha dut a terme mitjançant una simulació de Montecarlo de mil repeticions, amb què s'ha obtingut el resultat de la Figura 4.19. Aquesta figura mostra el coeficient de variació associat al càlcul d'aquest paràmetre en funció del nombre de Reynolds del flux circulant, per cada mescla assajada. Com es pot comprovar, i com

ja succeïa en l'anàlisi de sensibilitat realitzada en el Capítol 3, el percentatge d'error augmenta per a nombres de Reynolds menors, especialment en el cas de la mescla WT00. Tot i així, en aquest cas la precisió en el càlcul del coeficient de fricció és força superior: el coeficient de variació es troba per sota del 10% en gairebé tots els assajos.

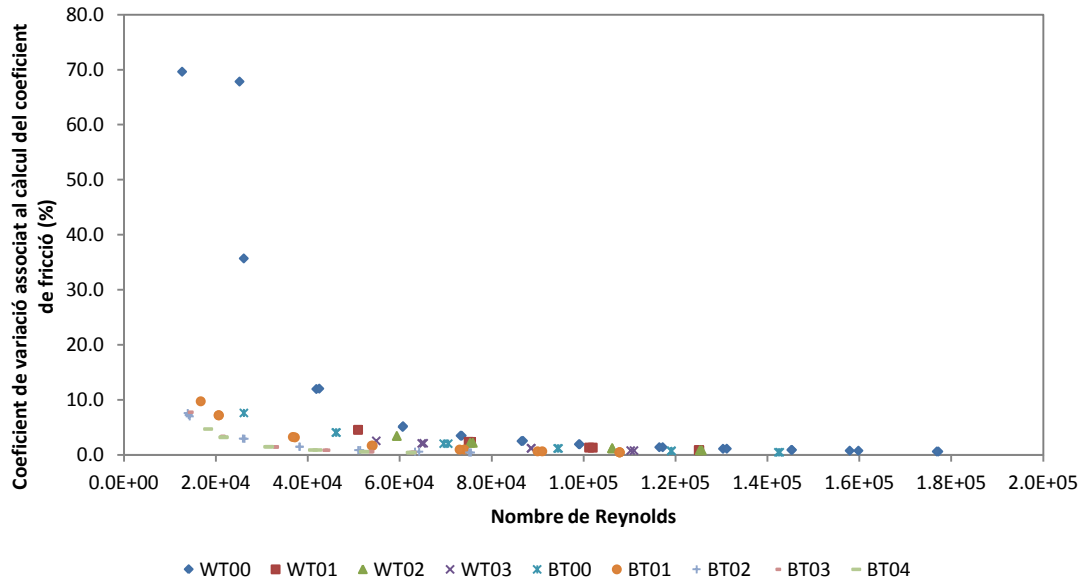


Figura 4.19 Coeficient de variació associat al càlcul del coeficient de fricció per cadascuna de les mescles assajades.

4.8.2. Càlcul de la viscositat de les mescles

La viscositat de les mescles generades per a la realització dels assajos s'ha obtingut a partir de la relació entre els gradients de pressió registrats i la velocitat del flux associada a aquests. Per cada mescla assajada, s'ha dut a terme una regressió no lineal sobre els punts obtinguts de forma experimental, utilitzant l'equació de Darcy-Weisbach i l'expressió per al càlcul del coeficient de fricció de Swamee i Jain (1976). Atès que ja es coneix el valor de la rugositat absoluta de la canonada, ja que s'ha calibrat anteriorment amb la mescla WT00, l'únic paràmetre desconegut que resta és la viscositat de la mescla, la qual cosa ha permès calcular-ne el valor. Com en el càlcul del coeficient de fricció, en aquest cas també s'han eliminat del procés de càlcul els registres dels assajos duts a terme a velocitats inferiors a la velocitat límit de deposició de les partícules en suspensió.

De la Figura 4.20 a la Figura 4.27 es mostra el resultat de les regressions realitzades per a cadascuna de les mescles estudiades i la Taula 4.8 sintetitza els valors de la viscositat cinemàtica obtinguts per a cada mescla. La mateixa taula indica la temperatura mitjana a la qual s'ha trobat cada mescla durant la realització dels assajos, la seva viscositat relativa, seguint un criteri que s'explicarà més endavant, i l'error relatiu associat a aquesta. Aquest error correspon al 95% de confiança de l'ajust dut a terme en cada cas.

La Figura 4.28 i la Figura 4.29 mostren la superposició de les corbes d'ajust relatives a les mescles WT (on l'aigua és el líquid de transport) i les mescles BT (on ho és la solució saturada), respectivament. Com es pot comprovar en l'ordenació de les corbes, el gradient de pressió és superior com major és la concentració en volum de partícules sòlides de cada mescla.

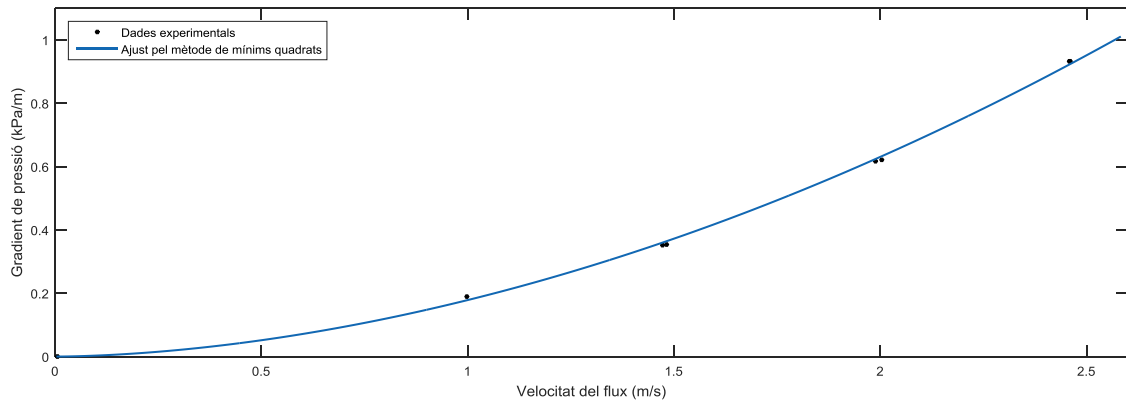


Figura 4.20 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.999$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per tal de determinar el valor de la viscositat de la mescla WT01.

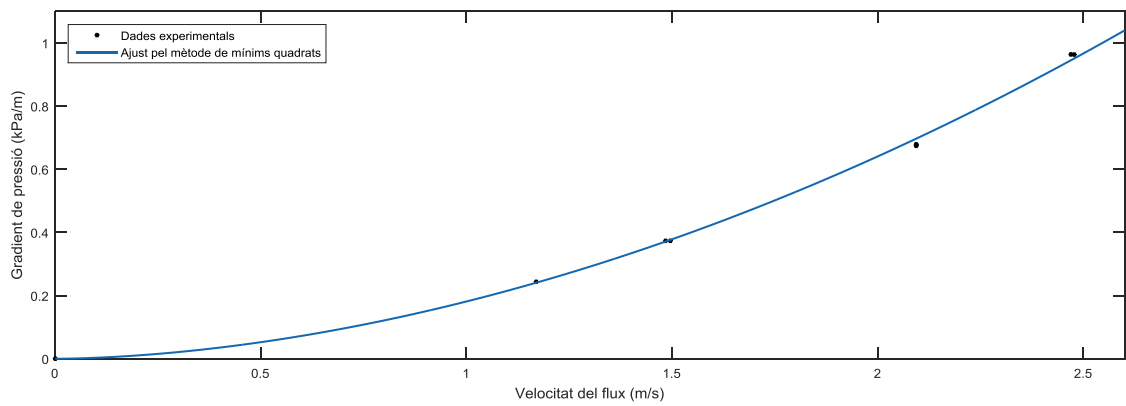


Figura 4.21 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.998$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per tal de determinar el valor de la viscositat de la mescla WT02.

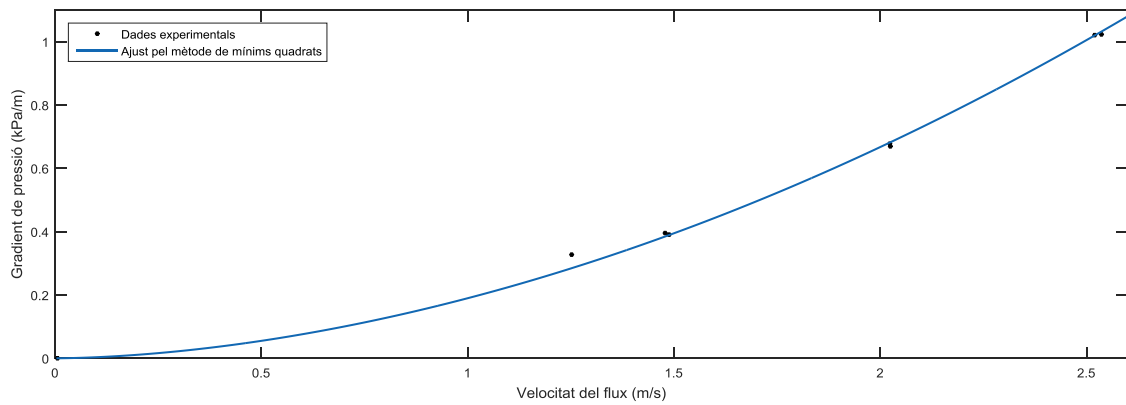


Figura 4.22 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.998$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per tal de determinar el valor de la viscositat de la mescla WT03.

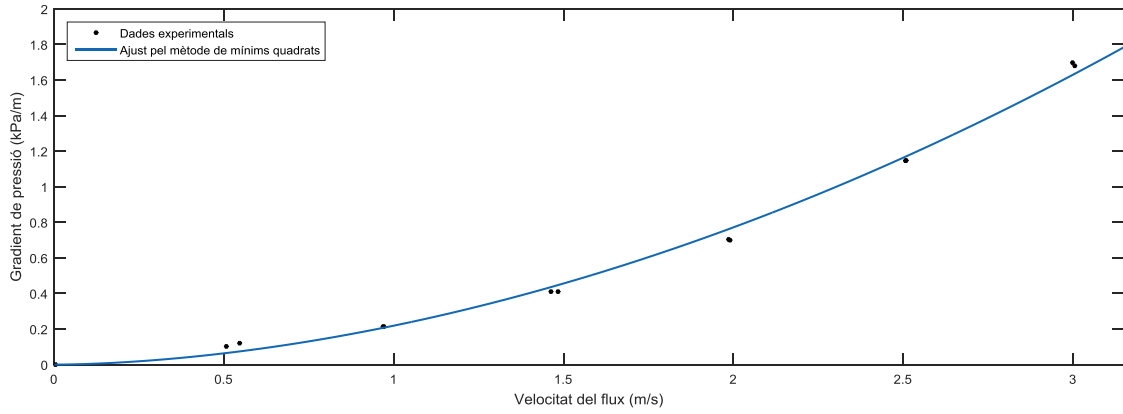


Figura 4.23 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.995$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per tal de determinar el valor de la viscositat de la mescla BT00.

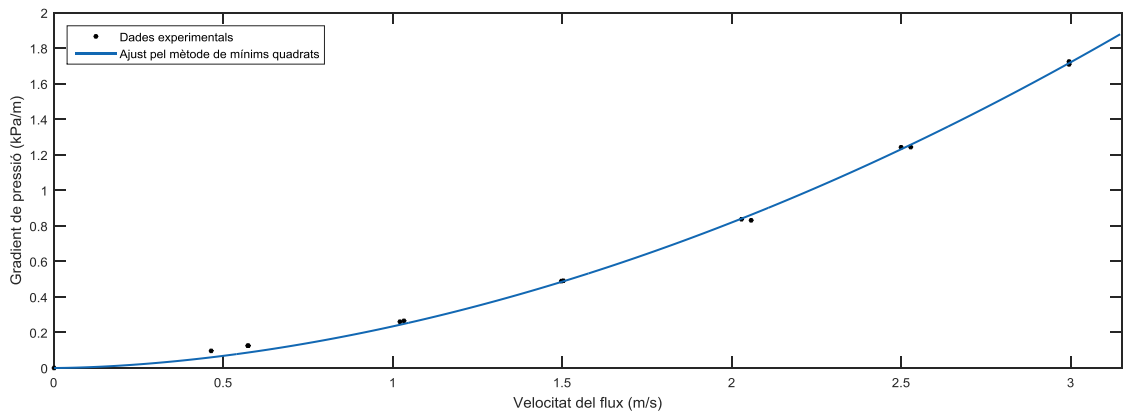


Figura 4.24 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.999$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per tal de determinar el valor de la viscositat de la mescla BT01.

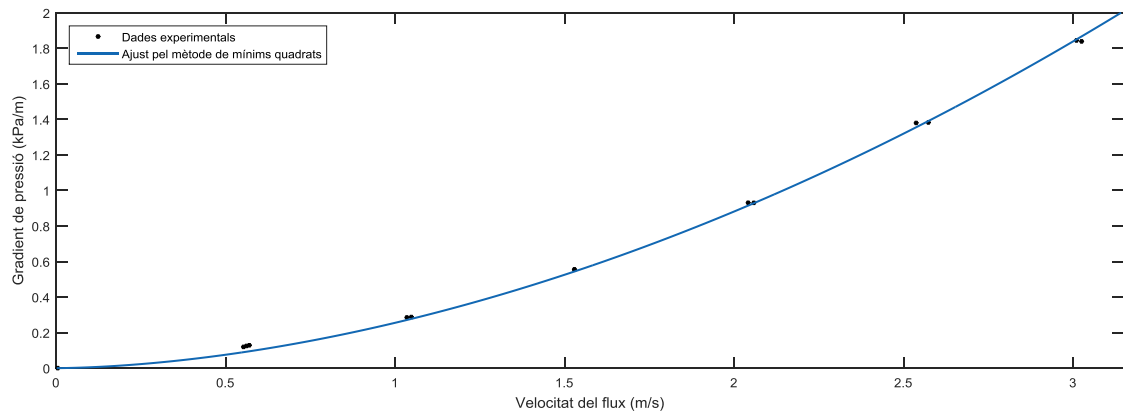


Figura 4.25 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.999$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per tal de determinar el valor de la viscositat de la mescla BT02.

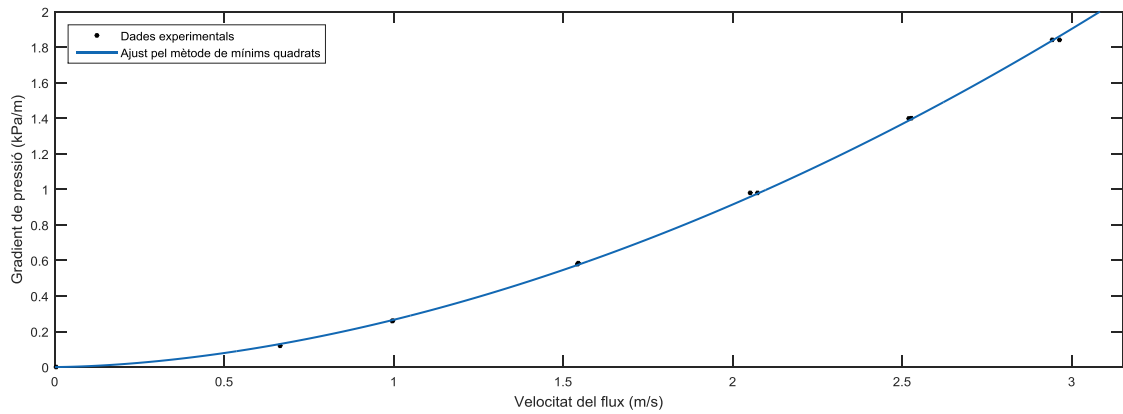


Figura 4.26 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 1.000$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per tal de determinar el valor de la viscositat de la mescla BT03.

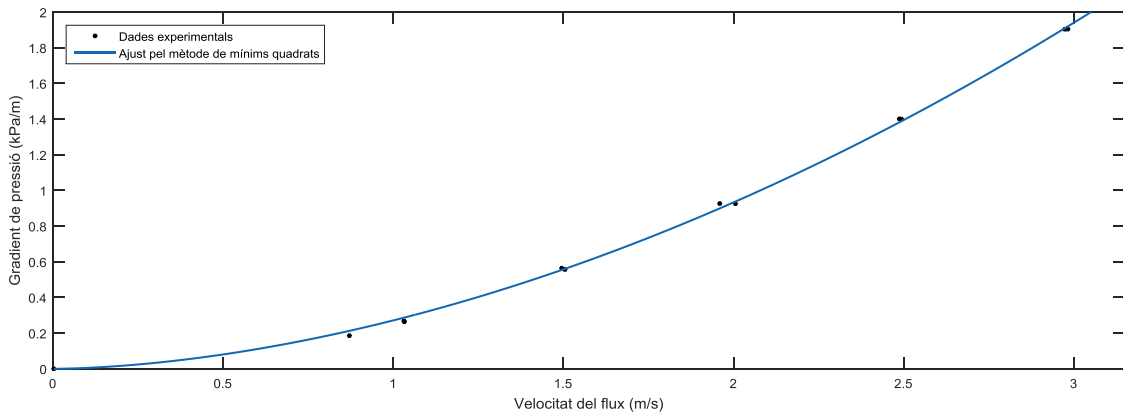


Figura 4.27 Corba ajustada pel mètode de mínims quadrats ($R^2 = 0.999$), mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per tal de determinar el valor de la viscositat de la mescla BT04.

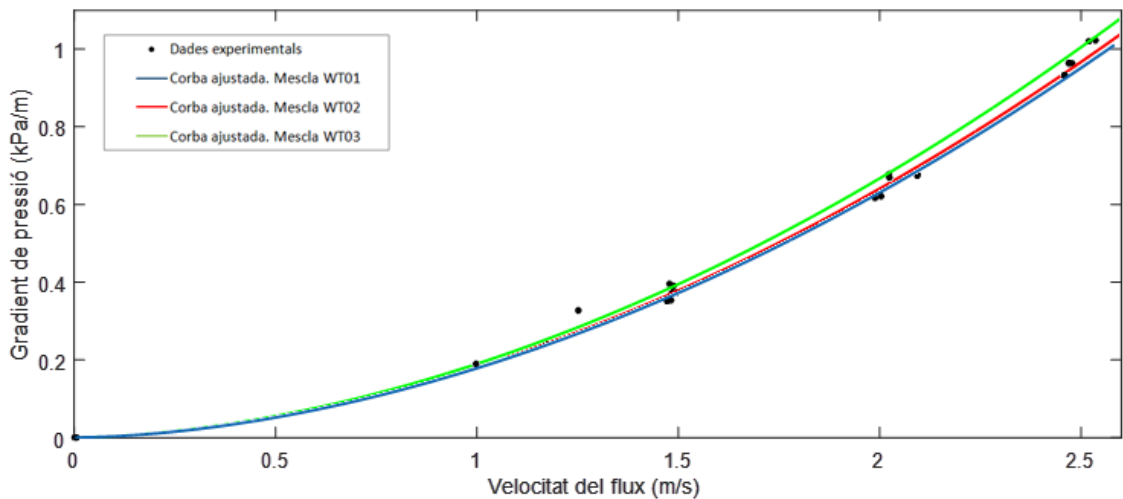


Figura 4.28 Corbes ajustades pel mètode de mínims quadrats, mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per a les mesclades que tenen l'aigua com a líquid de transport.

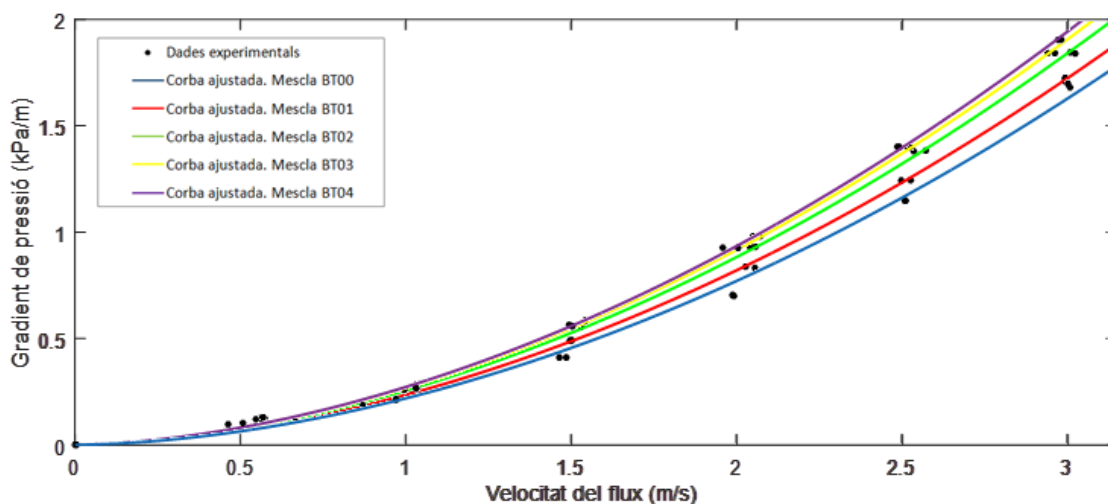


Figura 4.29 Corbes ajustades pel mètode de mínims quadrats, mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, als punts obtinguts a partir de les dades experimentals de laboratori per a les mesclades que tenen la solució saturada com a líquid de transport.

Mescla	C_v (%)	Viscositat cinemàtica (m^2/s)	Viscositat relativa (μ_m/μ_w)	Error relatiu de l'ajust per a una confiança del 95% (%)	Temperatura mitjana ($^{\circ}C$)
WT01	2.13%	1.23E-06	1.26	8.79%	19.3
WT02	3.20%	1.23E-06	1.28	11.89%	19.6
WT03	4.12%	1.43E-06	1.51	13.93%	20.1
BT00	1.20%	1.32E-06	1.07	19.22%	16.6
BT01	2.33%	1.73E-06	1.42	7.39%	19.6
BT02	2.68%	2.50E-06	2.06	6.63%	22.1
BT03	3.11%	2.96E-06	2.45	3.52%	23.1
BT04	4.73%	2.98E-06	2.51	5.38%	23.7

Taula 4.8 Valors de viscositat cinemàtica i relativa (sobre la viscositat del líquid de transport a $20^{\circ}C$) de les mesclades a la temperatura indicada, obtinguts mitjançant les regressions no lineals dutes a terme per a cadascuna de les mesclades.

Com es pot observar en la Taula 4.8, els assajos s'han dut a terme per a diferents temperatures de les mesclades, entre 16.6 i $23.7^{\circ}C$, degut a la impossibilitat de regular aquesta variable. Això dificulta la comparació entre els resultats obtinguts ja que aquests corresponen a diferents concentracions en volum de partícules insolubles i a diferents temperatures. Malgrat aquest fet, en la Figura 4.30 es mostren els valors de la viscositat cinemàtica calculats a partir de les dades experimentals, en funció de la concentració en volum dels sòlids en suspensió. Per una banda, els valors obtinguts per a les mesclades que tenen l'aigua com a líquid de transport (WT) segueixen una tendència a l'alça moderada a mesura que augmenta la seva concentració en volum. Per l'altra, la viscositat cinemàtica de les mesclades en què el líquid de transport és la dissolució saturada (BT) augmenta ràpidament fins la mescla BT03, amb un C_v del 3.1%, però en aquest punt el creixement s'atura de cop, ja que la mescla BT04 presenta una viscositat molt similar a la de BT03.

Aquest valor inesperat de la viscositat de la mescla BT04 podria ser degut a un error en la presa de dades dels assajos, però és poc probable, ja que tots els registres s'han dut a terme per duplicat i comprovant en temps real la similitud entre mesures dutes a terme per a una mateixa velocitat del flux. Tampoc ha presentat cap problema l'ajust realitzat sobre aquestes dades (Figura 4.27) per tal d'obtenir la viscositat de la mescla, i no s'han utilitzat registres obtinguts a velocitats inferiors a la velocitat límit de deposició.

Una altra possibilitat a tenir en compte és que l'expressió de Darcy-Weisbach ja no sigui aplicable en el cas d'una concentració de sediments com la de BT04, per massa elevada. Aquesta darrera hipòtesi es basa en l'afirmació de Durand (1953) sobre el comportament de les pèrdues de càrrega per fricció generades a conseqüència del flux d'una mescla amb sòlids en suspensió (veure Capítol 2). Per comprovar aquesta màxima, en la Figura 4.31 s'ha representat l'expressió proposada per Durand juntament amb els resultats obtinguts. Com s'hi pot veure, la corba obtinguda no s'ajusta en absolut als registres de laboratori. En la resta de mesclades assajades també s'ha dut a terme la mateixa comprovació i s'ha obtingut el mateix resultat. Així doncs, la viscositat calculada sembla tenir les mateixes garanties que la resta de valors obtinguts.

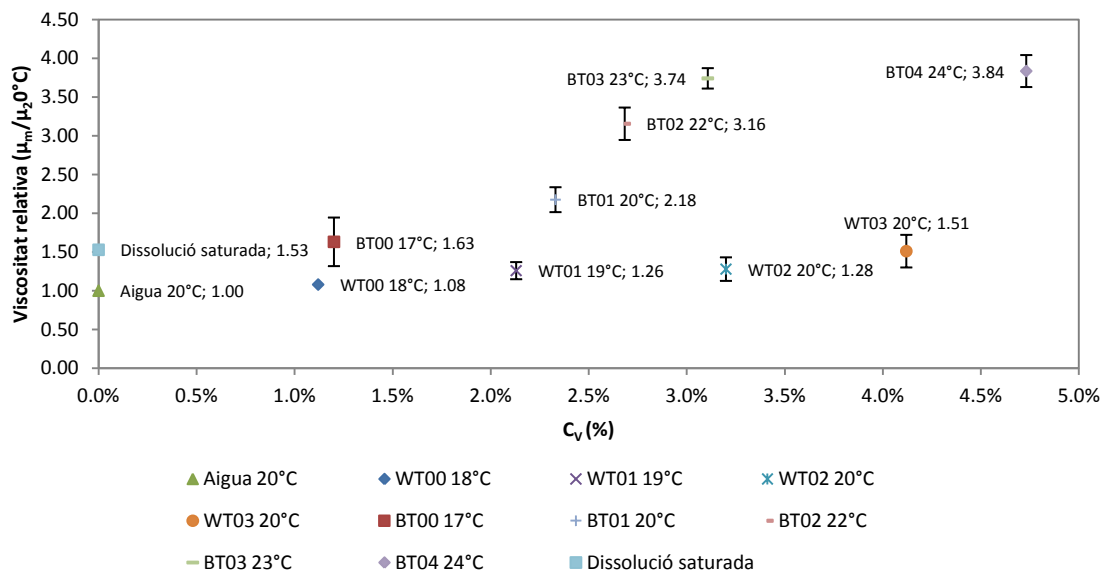


Figura 4.30 Valors de viscositat cinemàtica obtinguts per cada mescla en funció de la seva concentració en volum de partícules sòlides insolubles, incloent els errors associats al 95% de confiança de l'ajust. També, viscositat cinemàtica teòrica de l'aigua a 20°C.

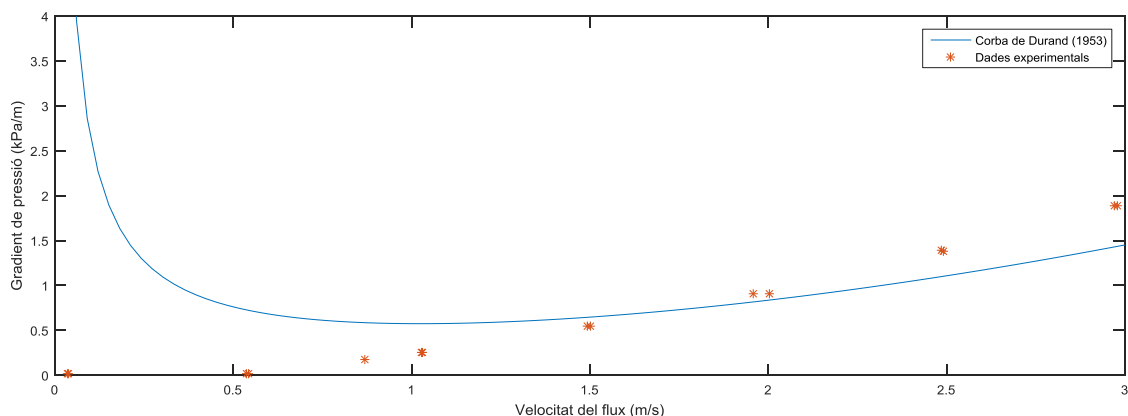


Figura 4.31 Dades experimentals obtingudes en l'assaig realitzat amb la mescla BT04 i corba calculada mitjançant l'expressió de Durand (1953).

Per tal de visualitzar la influència de les partícules en suspensió sobre la viscositat de les mescles s'ha calculat la seva viscositat relativa. Per al càlcul d'aquesta última s'ha pres com a referència la viscositat dinàmica a 20°C del líquid de transport. Atès que la viscositat de la dissolució saturada no és coneguda, s'ha hagut d'estimar en base a la literatura existent:

D'entrada, cal tenir en compte que el solut d'aquesta dissolució saturada està format en un 96% en massa per clorur de sodi (75%) i clorur de potassi (21%). Zhang i Han (1996) han estudiat la viscositat d'aquest tipus de solucions, i han comprovat que aquesta varia en funció de la relació de mols entre un solut i l'altre, de la concentració de sals i de la temperatura de la mescla. Conegudes la densitat de la solució saturada, de 1234 kg/m³, i la concentració de sòlids dissolts, del 27% en massa, s'obté que la relació molar entre aquestes és de 4.52 mol NaCl/mol KCl, mentre que la molalitat de la solució és de 5.22 mol solut/kg aigua. Tenint en compte aquestes dades, les taules de viscositats publicades per Zhang i Han (1996) permeten dur a terme l'estimació de la viscositat de la solució. Malgrat això, la relació molar màxima presentada en aquestes taules és de 3 mol NaCl/mol KCl, i tots els valors s'han obtingut a 25°C de temperatura. Si la relació molar fos aquesta, la viscositat cinemàtica que correspondria a la molalitat de la solució seria d'1.18E-06 m²/s. Extrapolant a una relació molar de 4.52 mol NaCl/mol KCl, la viscositat obtinguda passaria a ser d'1.23E-06 m²/s. Atès que la viscositat que es pretén obtenir és la corresponent a 20°C de temperatura i la primera augmenta amb la disminució de la segona, es pren un valor estimat d'1.25E-06 m²/s. Aquesta viscositat encara podria augmentar si el 4% en massa restant de soluts estigués format per MgCl₂, la qual cosa es desconeix: la presència d'aquesta sal en dissolucions de clorur de sodi també n'afecta les propietats reològiques (Qiblawey i Abu-Jdayil 2010). Així i tot, es considera un valor absolutament raonable tenint en compte els resultats obtinguts en els assajos.

Dit això, en la Figura 1.9 es presenten els valors obtinguts per les mescles el líquid de transport de les quals és l'aigua, i en la Figura 1.10 els de les mescles transportades per la dissolució saturada. A més dels resultats obtinguts experimentalment, s'hi representen algunes corbes proposades per diversos autors per tal de descriure l'evolució de la viscositat relativa de les mescles en funció de la seva concentració en volum de sòlids en suspensió. Les corbes que presenten algun paràmetre variable s'han modificat per tal d'adaptar-les als punts experimentals.

En la primera figura, que agrupa les mescles WT, s'hi poden veure les corbes proposades per Einstein (1906), Kunitz (1926) i Chong et al. (2007), amb $C_{Vmax} = 0.2$, a 20°C de temperatura. Com era d'esperar, l'expressió proposada per Einstein és la que pitjor s'ajusta a les dades experimentals perquè només és aplicable a mescles molt diluïdes. La que presenta més bon ajust és la de Chong et al., sempre i quan s'adopti un valor de 0.2 per al paràmetre variable que incorpora, C_{Vmax} . En la literatura, aquest paràmetre acostuma a presentar valors més elevats, d'entre 0.5 i 0.8 (Konijn et al. 2014).

La segona figura agrupa les mescles BT i presenta les corbes proposades per Kunitz (1926) i Chong et al. (2007), amb $C_{Vmax} = 0.1$, a 20°C de temperatura. En aquest cas, l'ajust s'esdevé molt més complicat. Òbviament, la corba que més s'ajusta a les dades és la de Chong et al. (2007), però farien falta més dades experimentals per tal de discernir la tendència real de la viscositat en augmentar la concentració de sòlids. Sembla clar, però, que la viscositat presenta molta més variació en el cas en què el líquid de transport és una dissolució saturada que no pas quan és l'aigua qui fa aquesta funció.

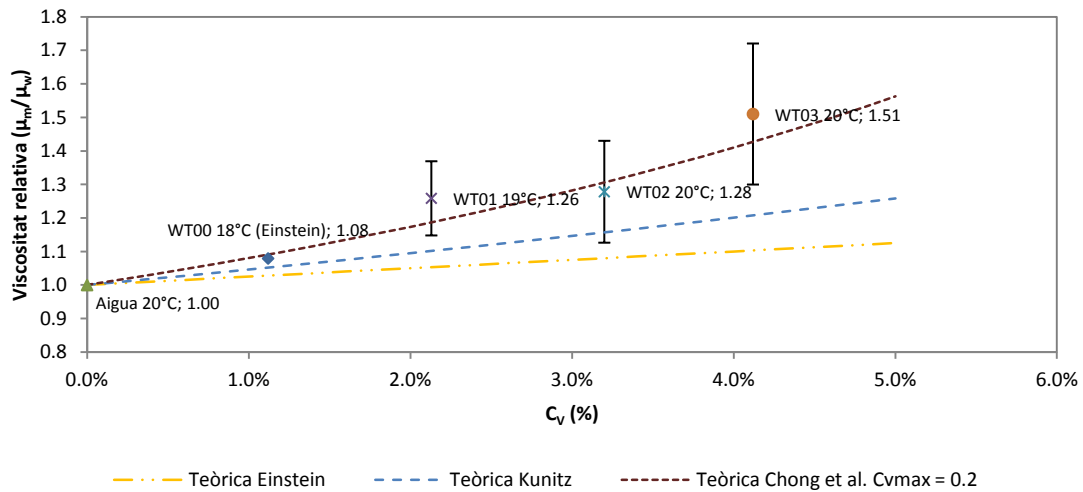


Figura 4.32 Valors de viscositat relativa sobre la viscositat de l'aigua a 20°C , obtinguts per cada mescla en funció de la seva concentració en volum de partícules sòlides insolubles, incloent-hi els errors associats al 95% de confiança de l'ajust. També, corbes calculades mitjançant les expressions d'Einstein (1906), Kunitz (1926) i Chong et al. (2007), aquesta última amb un $C_{Vmax} = 0.2$.

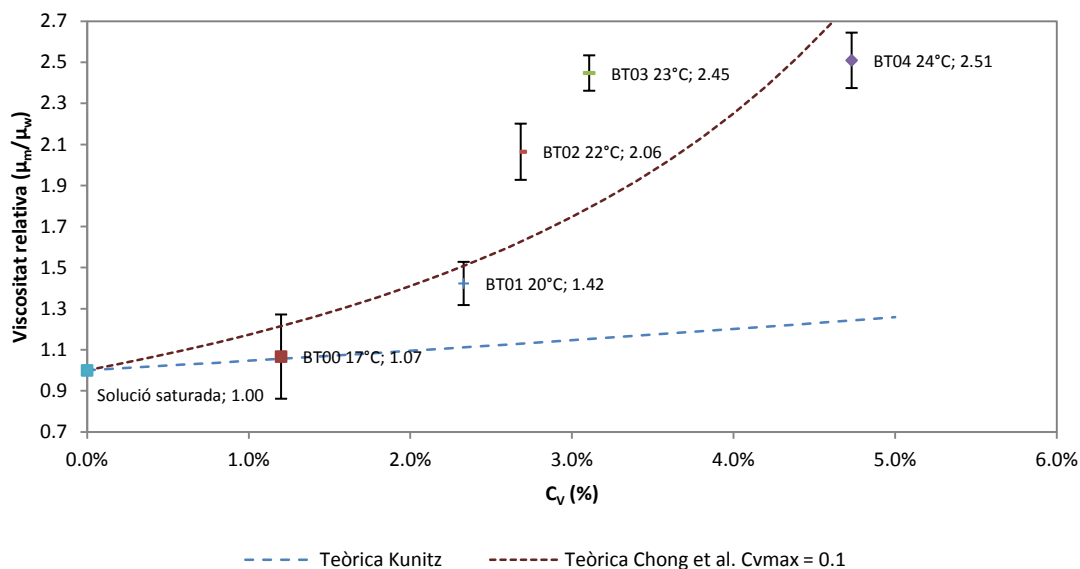


Figura 4.33 Valors de viscositat relativa sobre la viscositat de la dissolució saturada, obtinguts per cada mescla en funció de la seva concentració en volum de partícules sòlides insolubles, incloent-hi els errors associats al 95% de confiança de l'ajust. També, corbes calculades mitjançant les expressions de Kunitz (1926) i Chong et al. (2007), aquesta última amb un $C_{vmax} = 0.1$.

Influència de la rugositat absoluta sobre el càlcul de la viscositat

El càlcul de la viscositat relativa de les mescles ha anat precedit del calibratge del circuit per tal d'obtenir el valor de la rugositat absoluta associat a la canonada. Per a tal efecte s'ha dut a terme un ajust sobre les dades experimentals mitjançant el mètode de mínims quadrats, gràcies al qual s'ha pogut determinar el valor de k , amb un error associat del $\pm 10\%$ (duta per a una confiança sobre l'ajust del 95%). Per tal de conèixer la influència d'aquest possible error sobre el càlcul de la viscositat de les mescles s'ha repetit el procés d'obtenció d'aquest valor suposant una desviació del $\pm 10\%$ sobre el valor de la rugositat absoluta. Els resultats es mostren en la Taula 4.9 i es representen en la Figura 4.34, en funció de la seva concentració en volum de partícules sòlides en suspensió.

En la taula es pot comprovar el pes que té la rugositat absoluta sobre la determinació de la viscositat de les mescles, que és relativament baix: la seva modificació provoca menor variació sobre els valors obtinguts que no pas els errors associats a les regressions dutes a terme per al seu càlcul (veure Taula 4.8).

Per altra banda, com ja s'ha pogut veure en l'anàlisi de sensibilitat dut a terme en relació al càlcul del coeficient de fricció (apartat 4.8.1), la desviació sobre els resultats provocada per qualsevol error de mesura (error de càlcul de la rugositat absoluta, en aquest cas) és major per a concentracions en volum més baixes.

Mescla	C_v (%)	Desviació de la viscositat associada a una reducció de k d'un 10% (%)	Desviació de la viscositat associada a un augment de k d'un 10% (%)
WT01	2.13%	4.15%	-4.07%
WT02	3.20%	4.15%	-4.15%
WT03	4.12%	3.57%	-3.64%
BT00	1.20%	4.48%	-4.64%
BT01	2.33%	3.58%	-3.52%
BT02	2.68%	2.40%	-2.44%
BT03	3.11%	2.00%	-2.00%
BT04	4.73%	2.15%	-2.12%

Taula 4.9 Desviació dels valors de viscositat cinemàtica de les mescles produïda en variar un $\pm 10\%$ el valor de la rugositat absoluta de la canonada obtingut.

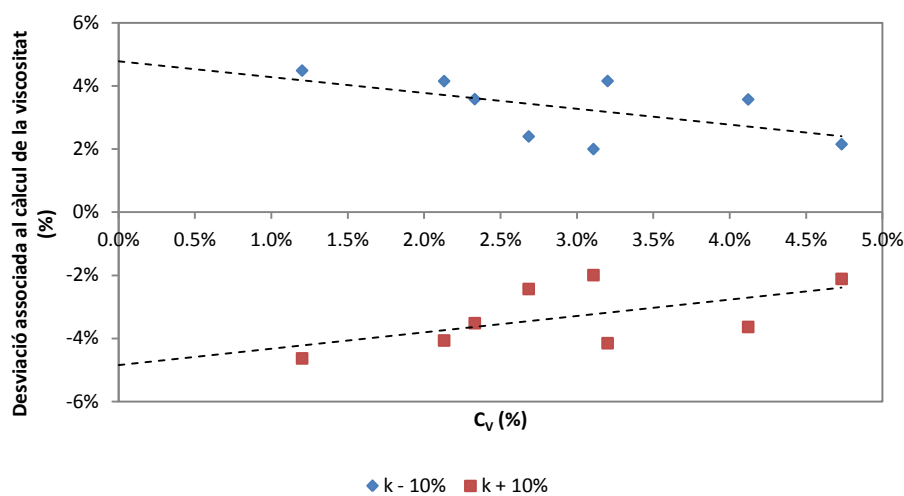


Figura 4.34 Variació relativa dels valors de viscositat cinemàtica de les mescles produïda en variar un $\pm 10\%$ el valor de la rugositat absoluta de la canonada obtingut en funció de la densitat de cada mescla. Es presenten també les línies de tendència dels valors obtinguts.

4.8.3. Resistència al flux

Els registres de pressió obtinguts en els assajos, a partir dels quals s'han calculat els pendents motrius associats a cada mescla i velocitat del flux, han permès calcular la viscositat de les diferents mescles generades mitjançant un ajust pel mètode de mínims quadrats a partir de l'expressió de Darcy-Weisbach. Per tal d'il·lustrar la influència de l'augment de la concentració en volum de sòlids en suspensió sobre la resistència al flux que actua sobre la mescla dins la canonada, es presenten tots els resultats en dos conjunts de figures, una per cada líquid de transport utilitzat.

La Figura 4.35 mostra els valors del pendent motriu obtinguts per a les mescles WT i la corba ajustada corresponent a la mescla WT00, utilitzada per al calibratge de la rugositat absoluta de la canonada. També s'hi indica les diferents velocitats límit de deposició observades (V_{dep}). Com s'hi pot veure, la variació en les pèrdues de càrrega lineals entre mescles és mínima, ja que tots els punts obtinguts experimentalment se situen molt a prop de la corba d'ajust. Aquest fet era previsible perquè les concentracions de sediments testades són força reduïdes,

d'entre l'1% i el 5% en volum, de forma que la mescla transportada es comporta gairebé de la mateixa manera que el líquid de transport.

Els punts més allunyats d'aquesta corba corresponen en tots els casos a valors de velocitat del flux iguals o inferiors a la velocitat límit de deposició de cada mescla. Això és degut al fet que en aquests casos varien les condicions de contorn del flux (rugositat absoluta i secció efectiva del tub), en formar-se un llit de sediments a la part baixa de la canonada. Aquesta situació es veu més clarament en la Figura 4.36, en la qual es mostren les mateixes dades però adimensionalitzades, mitjançant el nombre de Reynolds, en abscisses, i el coeficient de pressió, en ordenades. Com ja s'ha vist en el Capítol 3, el coeficient de pressió és adimensional

i es defineix com $C_p = \frac{\Delta p}{\gamma \frac{v^2}{2g}}$, on Δp és la diferència de pressió entre els dos punts de control

(en Pa), γ és el pes específic de la mescla (en N/m^3), v és la velocitat del flux (en m/s) i g és l'acceleració de la gravetat (en m/s^2). En aquesta figura es pot comprovar com totes les corbes ajustades se situen una a sobre de l'altra, formant-ne una de sola, i les dades obtingudes experimentalment s'hi agrupen al voltant, excepte en els casos en què el nombre de Reynolds és inferior al que correspon a la velocitat límit de deposició: en aquests casos el núvol de punts es dispersa tot allunyant-los de la corba d'ajust.

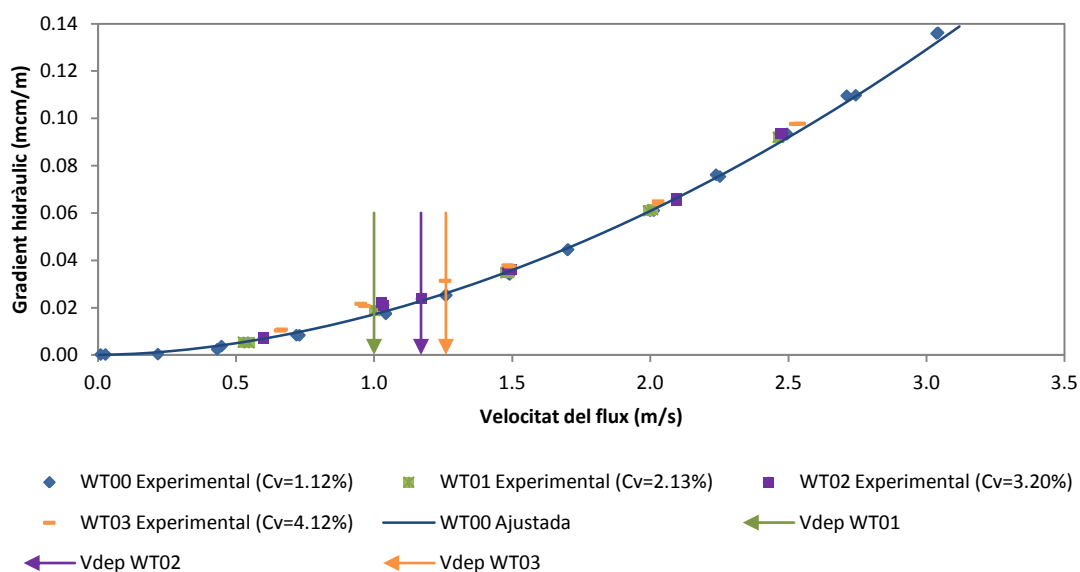


Figura 4.35 Valors del pendent motriu obtinguts a partir de les dades experimentals, per cada mescla WT assajada, i corba d'ajust relativa a la mescla WT00, obtinguda pel mètode de mínims quadrats mitjançant la relació de Darcy-Weisbach. S'assenyalen les velocitats límit de deposició relatives a les mesclades WT01, WT02 i WT03.

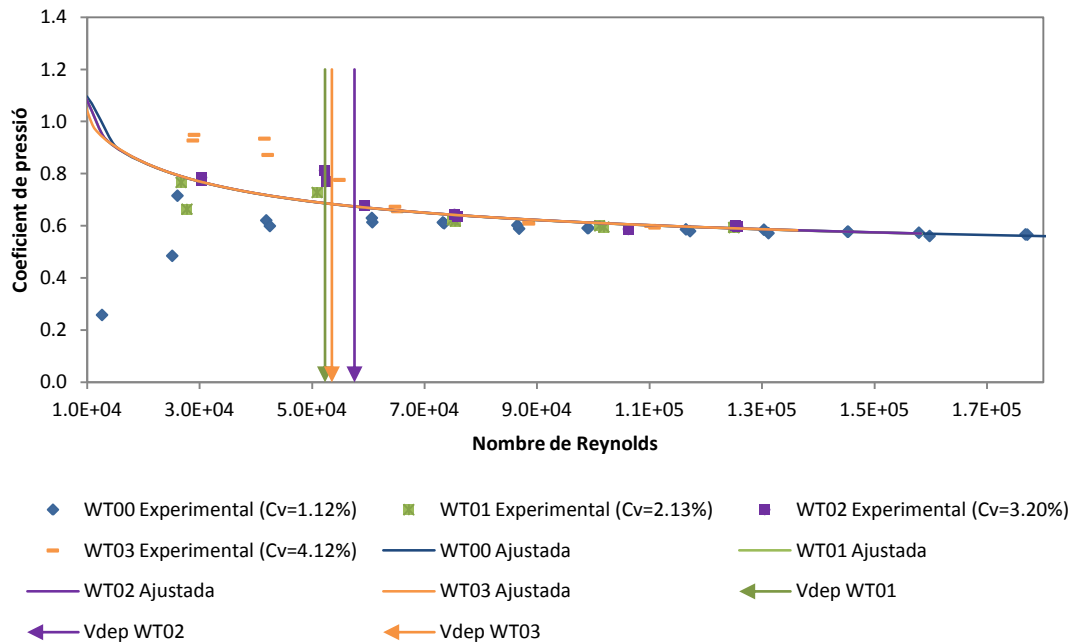


Figura 4.36 Coeficients de pressió obtinguts a partir de les dades experimentals, per cada mescla WT assajada, i corbes d'ajust obtingudes pel mètode de mínims quadrats mitjançant la relació de Darcy-Weisbach. S'assenyalen els nombres de Reynolds associats a les velocitats límit de deposició de les mesclades WT01, WT02 i WT03.

Per altra banda, la Figura 4.37 i la Figura 4.38 presenten les mateixes dades però en aquest cas corresponents a les mesclades en què el líquid de transport és la dissolució saturada. En la primera figura es pot comprovar com l'augment de les pèrdues de càrrega lineals provocat per una major concentració de sediments és més destacable que en el cas de les mesclades WT (Figura 4.35), ja que els punts obtinguts experimentalment es troben clarament més allunyats de la corba d'ajust corresponent a la mescla més diluïda, la BT00. Atès que les concentracions en volum assajades es troben en el mateix rang, entre l'1% i el 5%, es dedueix que el líquid que transporta aquestes partícules té influència sobre el comportament d'aquestes pèrdues repartides.

De la mateixa manera que en el cas anterior, els punts experimentals la velocitat del flux dels quals és inferior a la velocitat límit de deposició presenten comportaments anòmals. Això és difícil d'observar en la Figura 4.37 però es pot veure clarament en la Figura 4.38. En aquest cas, de fet, l'allunyament dels punts experimentals respecte de la corba d'ajust unificada comença per a nombres de Reynolds lleugerament superiors als que corresponen en cada cas a la velocitat límit de deposició.

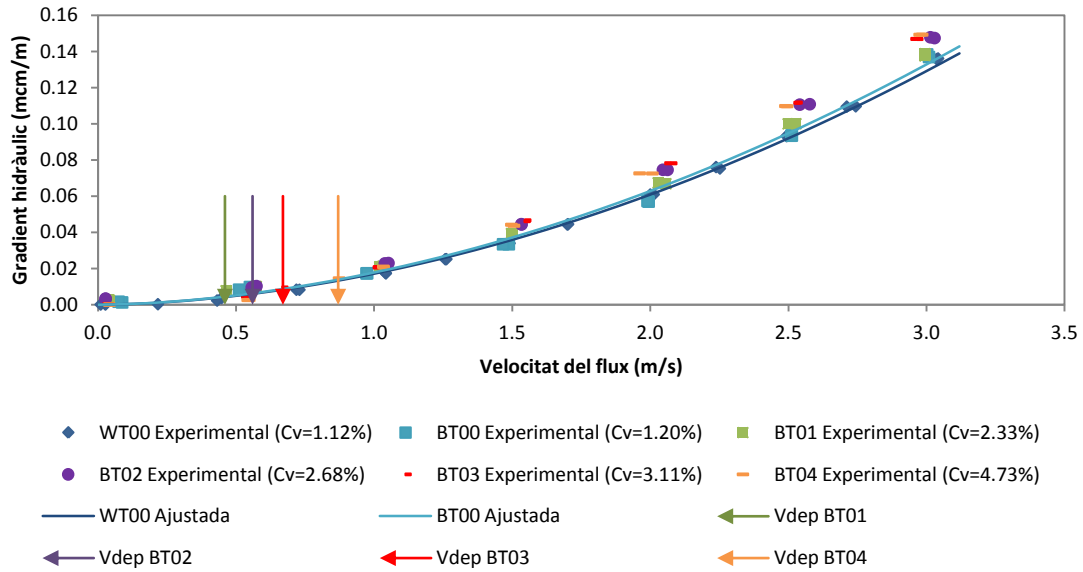


Figura 4.37 Valors del pendent motriu obtinguts a partir de les dades experimentals, per cada mescla BT assajada, i corbes d'ajust relatives a les mesclades WT00 i BT00, obtingudes pel mètode de mínims quadrats mitjançant la relació de Darcy-Weisbach. S'assenyalen les velocitats límit de deposició relatives a les mesclades BT01, BT02, BT03 i BT04.

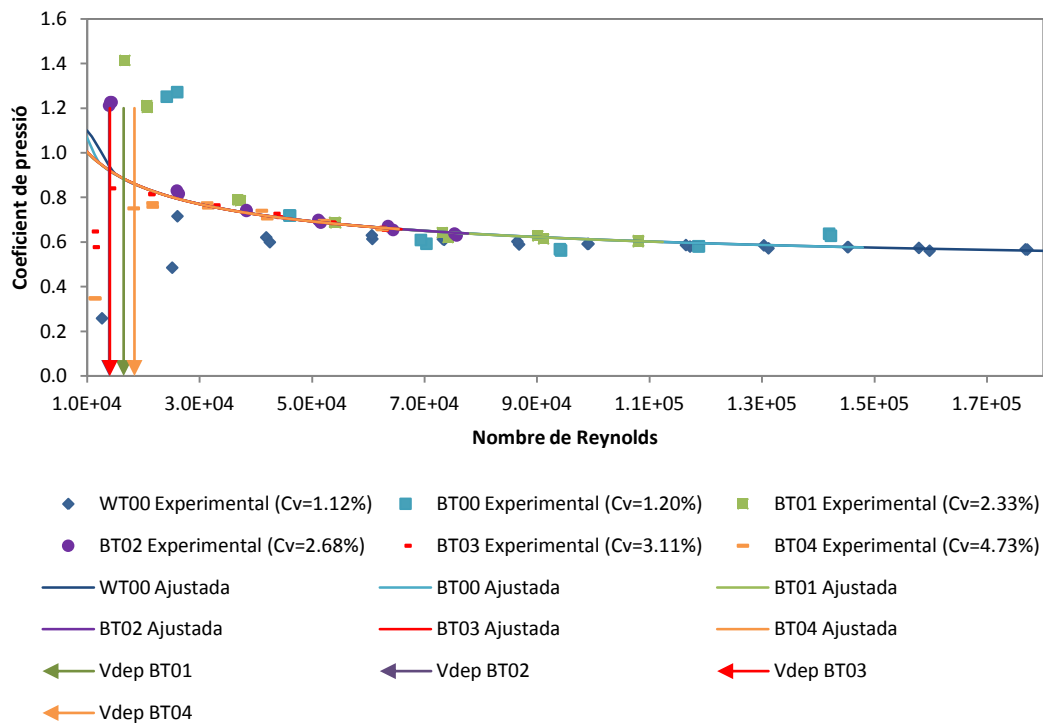


Figura 4.38 Coeficients de pressió obtinguts a partir de les dades experimentals, per cada mescla BT assajada, i corbes d'ajust obtingudes pel mètode de mínims quadrats mitjançant la relació de Darcy-Weisbach, incloent la relativa a la mescla WT00. S'assenyalen els nombres de Reynolds associats a les velocitats límit de deposició de les mesclades BT01, BT02, BT03 i BT04.

4.9. Conclusions

Les conclusions extretes de l'estudi realitzat en aquest apartat són les següents:

- Les velocitats límit de deposició observades en el cas de les mescles en què el líquid de transport és l'aigua són superiors a les de les mescles formades per la dissolució saturada, degut a la major densitat d'aquesta última. La predicció duta a terme mitjançant l'expressió de Durand i Condolios (1952) sobreestima en tots els casos les velocitats mesurades, de tal manera que el líquid de transport té més capacitat d'arrossegament de la prevista, especialment en el cas de les mescles generades amb la solució saturada. El conjunt d'observacions, però, mostra una tendència clara a assolir les velocitats calculades per a concentracions de sediments majors.
- Els valors del coeficient de fricció obtinguts per a totes les mescles són molt propers entre si i tendeixen a resseguir amb força precisió la corba de rugositat relativa $k/D = 0.00022$. El coeficient de variació associat al càlcul de f augmenta per a nombres de Reynolds menors, especialment en el cas de la mescla WT00. Tot i així, es troba per sota del 10% en gairebé tots els assajos.
- Els valors de viscositat cinemàtica obtinguts per a les mescles que tenen l'aigua com a líquid de transport (WT) segueixen una tendència a l'alça moderada a mesura que augmenta la seva concentració en volum, mentre que els de les mescles en què el líquid de transport és la dissolució saturada (BT) augmenten fins la mescla BT03, amb un C_v del 3.1%, però en aquest punt el creixement s'atura de cop, ja que la mescla BT04 presenta una viscositat molt similar a la de BT03.
- La corba de viscositat relativa que presenta més bon ajust sobre els valors obtinguts per a les mescles WT és la de Chong et al. (2007), adoptant un valor de 0.2 per al paràmetre variable que incorpora, C_{vmax} . En el cas de les mescles BT, no hi ha cap corba que s'ajusti als valors obtinguts, sent la de Chong et al. (2007) amb $C_{vmax} = 0.1$ la que s'hi apropa més. La viscositat presenta molta més variació en el cas en què el líquid de transport és una dissolució saturada que no pas quan és l'aigua qui fa aquesta funció.
- La variació en les pèrdues de càrrega lineals entre mescles és mínima, però és superior per a les mescles BT. Per a velocitats inferiors a la velocitat límit de deposició augmenta la dispersió dels resultats obtinguts, degut a la variació en les condicions de contorn del flux (rugositat absoluta i secció efectiva del tub) en formar-se un llit de sediments a la part baixa de la canonada.

5. Control d'un tram del Col·lector de Salmorres

Aquest capítol es troba sota acord de confidencialitat i és d'accés restringit.

Referències

- Applebey, Malcolm Percival. 1910. "CCXI.—The Viscosity of Salt Solutions." *Journal of the Chemical Society, Transactions* 97: 2000–2025. <http://xlink.rsc.org/?DOI=CT9109702000>.
- Averill, Bruce A., and Patricia Eldredge. 2012. "Solutions." In *Principles of General Chemistry*, , 161–72.
- Bock, E. 1961. "On the Solubility of Anhydrous Calcium Sulphate and of Gypsum in Concentrated Solutions of Sodium Chloride." *Canadian Journal of Chemistry* 39(1061): 1746–51.
- Bricollé, David. 2015. "El Runam Del Cogulló Tindrà Uns 40 Milions de Tones Quan s'hi Acabi de Posar Material." *Regió7*. <https://www.regio7.cat/bages/2015/11/24/runam-del-cogullo-tindra-40/338399.html>.
- . 2018. "ICL Farà Servir Els Dos Anys de Pròrroga per Abocar Al Cogulló Mentre Completa La Rampa." *Regió7*. <https://www.regio7.cat/bages/2018/04/25/icl-fara-servir-dos-anys/472146.html>.
- Casas Garriga, Sandra. 2011. "Valorization of Brines in the Chlor-Alkali Industry. Integration of Precipitation and Membrane Processes." UPC.
- Chong, J. S., E. B. Christiansen, and A. D. Baer. 2007. "Rheology of Concentrated Suspensions." *Journal of applied polymer science* 15(1971): 2007–21.
- Colebrook, Cyril Frank et al. 1939. "Turbulent Flow in Pipes, with Particular Reference to the Transition Region between the Smooth and Rough Pipe Laws." *Journal of the Institution of Civil engineers* 12(8): 393–422.
- Cooke, Robert, and Angus Paterson. 2014. *The Design of Slurry Pipeline Systems*. Paterson & Cooke.
- Dajnov, V N. 1982. *Petróleo y gas en las rocas : métodos geofísicos para determinar sus propiedades colectoras y de saturación*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Durand, R. 1953. "Basic Relationships of the Transportation of Solids in Pipes—experimental Research." In *Proceedings: Minnesota International Hydraulic Convention*, ASCE, 89–103.
- Durand, R, and E Condolios. 1952. "Experimental Study of the Hydraulic Transport of Coal and Solid Material in Pipes." In *Proc. Colloq. on the Hydraulic Transport of Coal*, Natl. Coal Board, UK, , 39–55.
- Einstein, Albert. 1906. "Eine Neue Bestimmung Der Moleküldimensionen." *Annalen der Physik* 324(2): 289–306. <https://doi.org/10.1002/andp.19063240204>.
- Freyer, Daniela, and Wolfgang Voigt. 2003. "Crystallization and Phase Stability of CaSO₄ and CaSO₄- Based Salts." *Monatshefte für Chemie* 134(5): 693–719.
- Gillies, R. G., C. A. Shook, and K. C. Wilson. 1991. "An Improved Two Layer Model for Horizontal Slurry Pipeline Flow." *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 69(1): 173–78.
- Gonçalves, F A, and J Kestin. 1977. "The Viscosity of NaCl and KCl Solutions in the Range 25–50°C." *Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie* 81(11): 1156–61. <http://dx.doi.org/10.1002/bbpc.19770811108>.

- Goosen, Peter. 2017. "Analysis of Friction Pressure Gradients During Slurry Pipeline Restart."
- Graf, Walter Hans. 1984. *Hydraulics of Sediment Transport*. Water Resources Publications.
- Grau, Xavier. 2015. "Brussel·les Avisa Que Els Residus d'Iberpotash Al Bages Poden Tenir Efectes En La Salut Pública." *Ara*: 4. https://www.ara.cat/economia/Brusselles-creu-residus-salins-Bages-salut-publica_0_1461454024.html.
- . 2016. "Iberpotash Haurà de Restaurar El Dany Fet Al Medi Ambient." *Ara*: 3. https://www.ara.cat/economia/Iberpotash-que-sentencia-no-tribunal_0_1528647153.html.
- Guo, Xiaofu, Junsheng Yuan, Zhiyong Ji, and Min Su. 2010. "Influences of Additives on the Crystal Habit of Potassium Chloride." *Frontiers of Chemical Engineering in China* 4(1): 78–81.
- Halliwell, A R. 1963. "Velocity of a Water-Hammer Wave in an Elastic Pipe." *Journal of the Hydraulics Division* 89(4): 1–21.
- Hardy, Robert Craig. 1962. *55 NBS Viscometer Calibrating Liquids and Capillary Tube Viscometers*. US Government Printing Office.
- International Organization for Standardization (ISO). 1998. *Viscosity of Water*. Ginebra. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:tr:3666:ed-2:v1:en>.
- International Union of pure and applied chemistry. 1991. *47 Solubility Data Series. Alkali Metal and Ammonium Chlorides in Water and Heavy Water (Binary Systems)*. eds. Roger Cohen-Adad and John W. Lorimer. Pergamon Press, Oxford.
- Kaushal, D. R., Yuji Tomita, and R. R. Dighade. 2002. "Concentration at the Pipe Bottom at Deposition Velocity for Transportation of Commercial Slurries through Pipeline." *Powder Technology* 125(1): 89–101.
- Kestin, Joseph, H. Ezzat Khalifa, and Robert J. Correia. 1981. "Tables of the Dynamic and Kinematic Viscosity of Aqueous NaCl Solutions in the Temperature Range 20–150 °C and the Pressure Range 0.1–35 MPa." *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 10(1): 71–88. <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.555641>.
- Kijjarvi, Jukka. 2011. "Darcy Friction Factor Formulae in Turbulent Pipe Flow." *Lunowa Fluid Mechanics Paper*: 1–11. http://www.kolumbus.fi/jukka.kijjarvi/clunowa/fluid_mechanics/pdf_articles/darcy_friction_factor.pdf.
- Kochanski, Greg. 2005. "Monte Carlo Simulation." : 14. <http://kochanski.org/gpk/teaching/0401Oxford>.
- Konijn, B. J., O. B.J. Sanderink, and N. P. Kruyt. 2014. "Experimental Study of the Viscosity of Suspensions: Effect of Solid Fraction, Particle Size and Suspending Liquid." *Powder Technology* 266: 61–69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2014.05.044>.
- Kunitz, M. 1926. "An Empirical Formula for the Relation between Viscosity of Solution and Volume of Solute." (2): 715–25.
- Lencastre, Armando Coutinho. 1998. *Manual de Ingeniería Hidráulica*. ed. Camilo Robles García. Universidad Pública de Navarra.

- http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0022112091220935.
- Marshall, William L., and Ruth Slusher. 1966. "Thermodynamics of Calcium Sulfate Dihydrate in Aqueous Sodium Chloride Solutions, 0-110° 1,2." *The Journal of Physical Chemistry* 70(12): 4015–27. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/j100884a044>.
- Miedema, Sape A., and Robert C. Ramsdell. 2015. "The Limit Deposit Velocity Model, a New Approach." *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 63(4): 273–86.
- Moreno Avalos, Víctor Manuel. 2012. "Optimización de La Succión de Sólidos Sumergidos Utilizando Bombas Centrífugas Con Velocidad Variable." Universidad Politécnica de Madrid.
- Nikuradse, Johann. 1933. *Strömungsgesetze in Rauhen Rohren: Mit 13 Zahlentafeln*. VDI-Verlag.
- de Oliveira Barauna, Jairo Breno Francisco et al. 2017. "Sodium Chloride Crystallization by Electric Discharge in Brine." *Materials Research*: 1–6.
- Phang, Sonny, and R. H. Stokes. 1979. "Density, Viscosity, Conductance, and Transference Number of Concentrated Aqueous Magnesium Chloride at 25°C." *Journal of Solution Chemistry* 9(7): 497–505.
- Poiseuille, Jean L. M. 1846. "Experimental Research on the Movement of Liquids in Tubes of Very Small Diameters." *Mémoires présentés par divers savants a l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France, IX*: 433–544.
- Qiblawey, Hazim A., and Basim Abu-Jdayil. 2010. "Viscosity and Density of the Ternary Solution of Magnesium Chloride + Sodium Chloride + Water from (298.15 to 318.15) K." *Journal of Chemical & Engineering Data* 55(9): 3322–26. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/je100111w>.
- Rutgers, R. 1962. "Relative Viscosity and Concentration." *Rheologica Acta* 2: 305–48.
- Sánchez-Juny, Martí, Ernest Bladé Castellet, Daniel Niñerola Chifoni, and Juan Pomares Abad. 2012. *Estudi Del Comportament de La Salmorra En l'ampliació de La Capacitat Del Col·lector de Salmorres Entre Balsareny i El Mar*.
- Schaan, J, RJ Sumner, R G Gillies, and CA Shook. 2000. "The Effect of Particle Shape on Pipeline Friction for Newtonian Slurries of Fine Particles." *Canadian Journal of Chemical Engineering* 78: 717–25.
- Sotelo, Gilberto. 1995. *Hidráulica General: Fundamentos*. Limusa. <https://books.google.es/books?id=NpljAAAAMAAJ>.
- Swamee, P. K., and Akalank K. Jain. 1976. "Explicit Equations for Pipeflow Problems." *Journal of the hydraulics division* 102(5).
- Wilson, K C. 1979. "Deposition Limit Nomograms for Particles of Various Densities in Pipeline Flow." In *Proc. Hydrotransport*, BHRA Fluid Engineering Bhubaneswar, India, 1–12.
- Wilson, K C, and D G Judge. 1978. "Analytically-Based Nomographic Charts for Sand-Water Flow." In *Proceedings of the Hydrotransport*, , B1-1.
- Wilson, K C, and J K P Tse. 1984. "Deposition Limit for Coarse Particle Transport in Inclined Pipes." In *Proceedings of the 9th International Conference on the Hydraulic Transport of*

Solids in Pipes, , 149–61.

Zhang, Hai Lang, and Shi Jun Han. 1996. "Viscosity and Density of Water+sodium Chloride+potassium Chloride Solutions at 298.15 K." *Journal of Chemical and Engineering Data* 41(3): 516–20.