



**Escola de Camins**

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

# Determinació experimental de la viscositat de dilucions salines d'alta concentració

Treball realitzat per:

**Javier Sanz Broto**

Dirigit per:

**Martí Sánchez-Juny**

Grau en:

**Enginyeria Civil**

Barcelona, **Gener 2017**

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental

**TREBALL FINAL DE GRAU**

## Resum

La present tesina busca determinar la viscositat de la salmorra per a diferents concentracions de sal i per a diferents temperatures. L'estudi es duu a terme mitjançant una instal·lació experimental constituïda per un sistema clàssic de dos dipòsits connectats per una conducció que funcionarà a pressió. Es disposarà de diversos aparells de mesura que permeten avaluar els paràmetres necessaris, la pressió i la temperatura.

Aquest estudi pretén avaluar els diferents valors de la viscositat cinemàtica de la salmorra en les diferents situacions que comporten els canvis de temperatura i de concentració de sal en el fluid per, finalment, trobar les corbes viscositat-temperatura que relacionen aquestes tres variables.

S'han dut a terme múltiples assaigs realitzats amb aigua i diverses mescles de salmorra en els quals es realitzen aforaments de cabal, paràmetre del qual es parteix per trobar la viscositat.

## Agraïments

M'agradaria que aquestes línies servissin per expressar el meu sincer agraïment a totes aquestes persones que m'han ajudat i col·laborat en la realització del treball.

En primer lloc agrair al meu tutor, Martí Sánchez-Juny, i a l'Arnau Triadú pel guiatge durant tot el treball i per l'ajuda en la realització dels assaigs i el posterior tractament de dades.

Agraeixo també l'ajuda prestada d'en Xavier Martínez pel muntatge de la instal·lació, en Daniel Niñerola pel muntatge i la connexió dels diferents aparells de mesura, i la Maribel Ortego pels suggeriments relacionats amb aspectes estadístics que s'utilitzen en aquesta tesina. També agrair a en Jaume Puigagut, en Joan Garcia i la Iveta Ferrer per deixar utilitzar l'espai del laboratori del Gemma, i a la Susana Valls per l'espai del laboratori de química de materials.

Agrair també a Aigües de Barcelona, Empresa Metropolitana de Gestió del Cicle Integral de l'Aigua, S.A. la seva col·laboració en el desenvolupament del projecte.

I per últim, però no menys important, agrair als meus pares i als meus germans tot el suport anímic prestat durant la realització del treball.

## Índex

Resum.....	2
Agraïments .....	3
Índex de figures.....	6
Índex de taules .....	10
1 ANTECEDENTS .....	13
2 OBJECTIUS.....	16
3 ESTAT DEL CONEIXEMENT .....	17
3.1 COL·LECTOR DE SALMORRES DE LA CONCA DEL LLOBREGAT .....	17
3.2 VISCOSITAT D'UN FLUID .....	18
3.3 CARACTERITZACIÓ DE LA SALMORRA .....	19
3.3.1 SOLUBILITAT DE LES SALS EN AIGUA.....	20
3.3.2 CALOR ESPECÍFIC DE DISSOLUCIONS SALINES.....	22
3.3.3 DENSITAT DE DISSOLUCIONS SALINES .....	23
3.3.4 VISCOSITAT DE DISSOLUCIONS SALINES .....	24
3.4 FLUX EN UNA CANONADA A PRESSIÓ .....	25
3.4.1 TIPUS DE MOVIMENT EN UNA CANONADA .....	25
3.4.2 EQUACIONS BÀSIQUES.....	26
3.4.3 PÈRDUES D'ENERGIA REPARTIDES EN UNA CANONADA (FRICCIÓ) .....	28
3.4.4 ÀBAC DE MOODY.....	31
3.4.5 PÈRDUES DE CÀRREGA LOCALS.....	32
3.5 VISCOSÍMETRE D'OSTWALD.....	33
4 METODOLOGIA.....	36
5 INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL .....	40
5.1 DIPÒSITS PRINCIPALS I SOBREEIXIDORS.....	40
5.2 DIPÒSIT AUXILIAR.....	41
5.3 SISTEMA DE CANONADES.....	42
5.4 SISTEMA DE BOMBAMENT.....	43
5.5 TANC DE REFRIGERACIÓ.....	44
5.6 PANELL DE CANONADES.....	44
5.7 APARELLS DE MESURA .....	45
5.8 RESISTÈNCIA ELÈCTRICA.....	48
6 POSADA A PUNT DEL CIRCUIT EXPERIMENTAL I CALIBRATGE DELS SENSORS DE PRESSIÓ	49
6.1 POSADA A PUNT DEL CIRCUIT EXPERIMENTAL DEL LABORATORI .....	49

6.2	CALIBRATGE DELS SENSORS DE PRESSIÓ .....	51
7	CAMPANYA EXPERIMENTAL .....	56
7.1	ASSAIGS AMB EL CIRCUIT HIDRÀULIC .....	57
7.1.1	ASSAIGS AMB AIGUA DESTIL·LADA .....	60
7.1.2	ASSAIGS AMB SALMORRA AMB CONCENTRACIÓ DE 331 g/l.....	66
7.1.3	ASSAIGS AMB SALMORRA AMB CONCENTRACIÓ DE 326 g/l.....	72
7.1.4	ASSAIGS AMB AIGUA CORRENT .....	77
7.1.5	ASSAIGS AMB SALMORRA AMB CONCENTRACIÓ DE 261 g/l.....	82
7.2	ASSAIGS AMB EL VISCOSÍMETRE D'OSTWALD .....	85
7.2.1	DETERMINACIÓ DE LA CONSTANT K' .....	87
7.2.2	DETERMINACIÓ DE LA VISCOSITAT .....	88
8	ESTUDI DE SENSIBILITAT .....	89
8.1	REGRESSIÓ LINEAL.....	89
8.2	ESTUDI DE SENSIBILITAT EN FUNCIÓ DE LES VARIACIONS EN LES MESURES DEL SENSOR DE PRESSIÓ.....	93
8.3	ESTUDI DE SENSIBILITAT EN FUNCIÓ DEL DIÀMETRE .....	97
9	DISCUSSIÓ DELS RESULTATS.....	99
9.1	RUGOSITAT ABSOLUTA DE LES CANONADES .....	99
9.2	COMPORAMENT DE LA VISCOSITAT EN FUNCIÓ DE LA TEMPERATURA.....	104
9.2.1	VISCOSITAT OBTINGUDA AMB EL VISCOSÍMETRE D'OSTWALD.....	104
9.2.2	VISCOSITAT DE LA SALMORRA 1 (331 g/l) PEL TUB PRIM .....	105
9.2.3	VISCOSITAT DE LA SALMORRA 1 (331 g/l) PEL TUB GROS.....	107
9.2.4	VISCOSITAT DE LA SALMORRA 2 (326 g/l) PEL TUB PRIM .....	108
9.2.5	VISCOSITAT DE LA SALMORRA 3 (261 g/l) PEL TUB PRIM .....	109
9.2.6	VISCOSITAT DE LA SALMORRA 3 (261 g/l) PEL TUB GROS.....	111
9.2.7	COMPARATIVA DE LA SALMORRA 3 PEL TUB PRIM AMB CANVI DE DIÀMETRE.....	112
9.2.8	COMPARATIVA DE LA SALMORRA 1 I LA SALMORRA 3 PEL TUB PRIM .....	114
10	CONCLUSIONS .....	116
11	PROPOSTES.....	120
12	BIBLIOGRAFIA .....	122
	ANNEXOS.....	125
	ANNEX A: DADES PRESES AL LABORATORI (CIRCUIT HIDRÀULIC) .....	126
	ANNEX B: DADES PRESES AL LABORATORI (VISCOSÍMETRE D'OSTWALD) .....	136

## Índex de figures

Figura 1. Escombrera de El Cogulló (Sallent). Font: Institució Catalana d'Història Natural. [http://ichn.iec.cat/Bages/impactes/imatges%20grans/cimg05.htm].....	13
Figura 2. Esquema del col·lector de salmorres. Font: Vidal Vidal (2011).....	17
Figura 3. Solubilitat del clorur de sodi en funció de la temperatura de l'aigua. Font: Triadú Galí (2016). .....	21
Figura 4. Solubilitat del sulfat de calci en funció de la temperatura de l'aigua. Font: Triadú Galí (2016). .....	21
Figura 5. Solubilitat calculada i experimental de l'anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) en funció de la concentració en mols de clorur de sodi ( $\text{NaCl}$ ) a $25^\circ\text{C}$ . Font: Raju and Atkinson (1990). .....	22
Figura 6. Calor específic en funció de la temperatura per a diferents concentracions de sal. Font: Sharqawy et al. (2010). .....	23
Figura 7. Densitat en funció de la temperatura per a diferents concentracions de sal. Font: Sharqawy et al. (2010). .....	23
Figura 8. Relació entre la viscositat de l'aigua ( $\mu_w$ ) i la temperatura ( $t$ ) per a diverses concentracions volumètriques ( $C_v$ ) de les sals dissoltes en aquesta. La xifra que es troba sobre les corbes correspon a $C_v$ en $\text{kg}/\text{m}^3$ . Font: Dajnov (1982). .....	24
Figura 9. Volum de control que cal analitzar per estudiar les pèrdues de càrrega per fregament amb el contorn. Font: Sánchez-Juny et al. (2005). .....	29
Figura 10. Àbac de Moody. Font: Sánchez-Juny et al. (2005). .....	32
Figura 11. Esquema d'un viscosímetre d'Ostwald. Font: Plummer (1994). .....	35
Figura 12. Viscosímetre utilitzat en aquesta tesina. .....	35
Figura 13. Esquema del circuit hidràulic experimental en situació d'equilibri. .....	36
Figura 14. Model del circuit hidràulic del laboratori usat en aquesta tesina.....	36
Figura 15. Dipòsit i sobreexidor 1 amb salmorra en el seu interior.....	40
Figura 16. Dipòsit auxiliar amb la bomba en el seu interior. ....	41
Figura 17. Vista del circuit hidràulic des del dipòsit 2.....	42
Figura 18. Canonada de retorn en la sortida del sobreexidor 2.....	43
Figura 19. Bomba usada i la seva corba característica.....	43
Figura 20. Tanc de refrigeració i corba de refredament d'una salmorra amb concentració de 100 g/l dins del tanc frigorífic i en condicions estàtiques (únicament remoguda per les pales del tanc). Font: Triadú Galí (2016). .....	44
Figura 21. Panell de canonades.....	45
Figura 22. Datalogger i ordinador usats durant els assaigs.....	45

Figura 23. Sensor de temperatura usat.....	46
Figura 24. Sensors de pressió 2 i 4 a l'interior del sobreeixidor 2.....	47
Figura 25. Resistència elèctrica d'immersió usada. ....	48
Figura 26. Contactes entre les canonades d'acer i el dipòsit 1 de PVC recoberts amb una pel·lícula de massilla de butil.....	51
Figura 27. Piezòmetre situat a una de les parets verticals del sobreeixidor del dipòsit 2.....	52
Figura 28. Rectes de la variació del nivell d'aigua mesurades amb el piezòmetre i les enregistrades pels dos sensors comparades amb la mesura realitzada amb el piezòmetre.....	53
Figura 29. Rectes de la variació del nivell d'aigua mesurades amb el piezòmetre i les enregistrades pels dos sensors comparades amb la mesura realitzada amb el piezòmetre un cop calibrat el sensor 4. ....	54
Figura 30. Vista del dipòsit 2 (esquerra de la imatge) i del dipòsit auxiliar (dreta de la imatge) connectats amb la canonada de retorn. ....	58
Figura 31. Dipòsit amb l'aigua destil·lada utilitzada en aquests assaigs. ....	60
Figura 32. Nivell d'aigua al sobreeixidor 2 en funció del temps per un aforament de cabal realitzat amb el tub prim a 20°C.....	61
Figura 33. Nivell d'aigua al sobreeixidor 2 en funció del temps per un aforament de cabal realitzat amb el tub gros a 20°C. ....	62
Figura 34. Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb aigua destil·lada amb el tub prim. ....	63
Figura 35. Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb aigua destil·lada amb el tub gros. ....	63
Figura 36. Fluctuacions en la làmina lliure d'aigua del sobreeixidor 2 produïdes pel cabal que aporta el tub gros.....	64
Figura 37. Sals i sòlids insolubles acumulats en el fons del dipòsit 1 després de la utilització de la salmorra amb concentració de 331 g/l. ....	66
Figura 38. Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb la salmorra 1 (331 g/l) amb el tub prim. ....	69
Figura 39. Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb la salmorra 1 (331 g/l) amb el tub gros. ....	69
Figura 40. Vista de l'interior del tub prim (esquerra) i del tub gros (dreta) amb cristalls de sal adherits a les seves parets. ....	72
Figura 41. Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb la salmorra 2 (326 g/l) amb el tub prim. ....	74
Figura 42. Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb la salmorra 2 (326 g/l) amb el tub gros. ....	74

Figura 43. Colzes utilitzats per omplir les canonades amb vinagre. ....	77
Figura 44. Vista de l'interior del tub prim (esquerra) i del tub gros (dreta) després de la utilització del vinagre.....	78
Figura 45. Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb l'aigua corrent amb el tub prim. ....	79
Figura 46. Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb l'aigua corrent amb el tub gros.....	80
Figura 47. Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb la salmorra 3 (261 g/l) amb el tub prim. ....	83
Figura 48. Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb la salmorra 3 (261 g/l) amb el tub gros. ....	83
Figura 49. Viscosímetre d'Ostwald usat per a aquests assaigs. ....	85
Figura 50. Viscosímetre d'Ostwald en un <i>bany maria</i> . ....	86
Figura 51. Regressió lineal. Ajust d'una recta a les dades mesurades pel sensor mitjançant el mètode de mínims quadrats. Cas corresponent a un aforament de cabal amb aigua destil·lada a 30°C amb el tub prim. ....	91
Figura 52. Valor dels residus ( $e$ ) en funció del valor del nivell previst ( $y$ ). Cas corresponent a un aforament de cabal amb aigua destil·lada a 30°C amb el tub prim.....	92
Figura 53. Histograma dels residus. Cas corresponent a un aforament de cabal amb aigua destil·lada a 30°C amb el tub prim.....	92
Figura 54. Zoom de la recta de regressió lineal de les dades obtingudes i de les rectes amb pendents corresponents als quantils 2,5% i 97,5% determinades mitjançant el mètode de bootstrap. Cas corresponent a un aforament de cabal amb aigua destil·lada a 30°C amb el tub prim. ....	94
Figura 55. Valors de la rugositat absoluta calculats a partir dels cabals mesurats amb aigua destil·lada pel tub prim. ....	100
Figura 56. Valors de la rugositat absoluta calculats a partir dels cabals mesurats amb aigua destil·lada pel tub gros.....	101
Figura 57. Valors de la rugositat absoluta calculats a partir dels cabals mesurats amb aigua corrent pel tub prim.....	102
Figura 58. Valors de la rugositat absoluta calculats a partir dels cabals mesurats amb aigua corrent pel tub gros.....	103
Figura 59. Viscositat cinemàtica (adimensional) en funció de la temperatura de la salmorra 1 (330 g/l), la salmorra 2 (323 g/l), la salmorra 3 (262 g/l) i l'aigua corrent corresponents als assaigs amb el viscosímetre d'Ostwald. ....	104



Figura 60. Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 1 (331 g/l) en funció de la temperatura pel tub prim i pels dos sensors. ....	106
Figura 61. Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 1 (331 g/l) en funció de la temperatura pel tub gros i pels dos sensors. ....	107
Figura 62. Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 2 (326 g/l) en funció de la temperatura pel tub prim i pels dos sensors. ....	109
Figura 63. Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 3 (261 g/l) en funció de la temperatura pel tub prim i pels dos sensors. ....	110
Figura 64. Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 3 (261 g/l) en funció de la temperatura pel tub gros i pels dos sensors. ....	111
Figura 65. Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 3 (261 g/l) en funció de la temperatura pel tub prim i pels dos sensors amb un diàmetre de 20 mm. ....	113
Figura 66. Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 1 (331 g/l) i de la salmorra 3 (261 g/l) en funció de la temperatura pel tub prim amb el diàmetre inicial de 21,3 mm en els dos casos. ....	114
Figura 67. Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 1 (331 g/l) i de la salmorra 3 (261 g/l) en funció de la temperatura pel tub prim amb el diàmetre inicial de 21,3 mm per la corba de la salmorra 1 i un diàmetre de 20 mm per la corba de la salmorra 3. ....	115

## Índex de taules

Taula 1. Propietats físiques de l'aigua destil·lada. Font: Aqua Rifer (2016).....	19
Taula 2. Composició d'una mostra de salmorra provinent de la mina de Cardona. Font: Sánchez-Juny et al. (2012). .....	20
Taula 3. Mesura dels nivells d'aigua amb el piezòmetre i dels dos sensors per al calibratge estàtic. ....	52
Taula 4. Mesura dels nivells d'aigua observats amb el piezòmetre i els enregistrats amb el sensor 4 un cop calibrat.....	54
Taula 5. Concentracions i densitats de les diferents mostres de salmorra i aigua corrent. ....	57
Taula 6. Característiques de l'assaig 1.....	61
Taula 7. Característiques de l'assaig 2.....	65
Taula 8. Característiques de l'assaig 3.....	65
Taula 9. Característiques de l'assaig 4.....	66
Taula 10. Característiques de l'assaig 5.....	67
Taula 11. Característiques de l'assaig 6.....	68
Taula 12. Característiques de l'assaig 7.....	68
Taula 13. Característiques de l'assaig 8.....	70
Taula 14. Característiques de l'assaig 9.....	70
Taula 15. Característiques de l'assaig 10.....	71
Taula 16. Característiques de l'assaig 11.....	73
Taula 17. Característiques de l'assaig 12.....	73
Taula 18. Característiques de l'assaig 13.....	75
Taula 19. Característiques de l'assaig 14.....	75
Taula 20. Característiques de l'assaig 15.....	76
Taula 21. Característiques de l'assaig 16.....	76
Taula 22. Característiques de l'assaig 17.....	78
Taula 23. Característiques de l'assaig 18.....	79
Taula 24. Característiques de l'assaig 19.....	80
Taula 25. Característiques de l'assaig 20.....	81
Taula 26. Característiques de l'assaig 21.....	81
Taula 27. Característiques de l'assaig 22.....	82
Taula 28. Característiques de l'assaig 23.....	84
Taula 29. Característiques de l'assaig 24.....	84

Taula 30. Característiques de l'assaig 25.....	85
Taula 31. Mitjana aritmètica de la constant K' per a cada temperatura. ....	87
Taula 32. Rugositat absoluta de la canonada calculada a partir dels valors dels cabals corresponents als quantils 10%, 50% i 90% per l'assaig amb aigua destil·lada a 30°C pel tub prim. ....	95
Taula 33. Viscositat cinemàtica de la salmorra 1 (331 g/l) a 30°C calculada a partir dels valors dels cabals corresponents als quantils 10%, 50% i 90%.....	96
Taula 34. Viscositat cinemàtica de la salmorra 1 (331 g/l) a 30°C calculats a partir del valor de cabal corresponent al quantil 50% d'aquest assaig en funció de la rugositat absoluta . ....	96
Taula 35. Rugositat absoluta de la canonada calculada a partir del valor del cabal corresponent al quantil 50% de l'aigua destil·lada a 30°C en funció del diàmetre de la canonada.....	97
Taula 36. Viscositat cinemàtica de la salmorra 1 (331 g/l) a 30°C calculada a partir del valor del cabal corresponent al quantil 50% d'aquest mateix assaig en funció del diàmetre de la canonada. ....	98
Taula 37. Rugositats absolutes (mm) calculades amb aigua destil·lada per a cadascun dels sensors i cadascuna de les canonades. ....	101
Taula 38. Rugositats absolutes (mm) calculades amb aigua corrent per a cadascun dels sensors i cadascuna de les canonades. ....	103
Taula 39. Dades recollides al laboratori corresponents a les proves realitzades amb aigua corrent abans dels assaigs definitius. ....	126
Taula 40. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 1, 2 i 3.....	127
Taula 41. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 4, 5 i 6.....	128
Taula 42. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 7, 8 i 9.....	129
Taula 43. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 10, 11 i 12.....	130
Taula 44. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 13, 14 i 15.....	131
Taula 45. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 16 i 17.....	132
Taula 46. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 18, 19 i 20.....	133
Taula 47. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 21, 22 i 23.....	134
Taula 48. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 24 i 25.....	135
Taula 49. Temps mesurats amb el cronòmetre corresponents als assaigs realitzats amb aigua destil·lada pel viscosímetre d'Ostwald.....	136
Taula 50. Temps mesurats amb el cronòmetre corresponents als assaigs realitzats amb aigua corrent pel viscosímetre d'Ostwald. ....	136

Taula 51. Temps mesurats amb el cronòmetre corresponents als assaigs realitzats amb la salmorra 1 (330 g/l) pel viscosímetre d'Ostwald. ....	137
Taula 52. Temps mesurats amb el cronòmetre corresponents als assaigs realitzats amb la salmorra 2 (323 g/l) pel viscosímetre d'Ostwald. ....	137
Taula 53. Temps mesurats amb el cronòmetre corresponents als assaigs realitzats amb la salmorra 3 (262 g/l) pel viscosímetre d'Ostwald. ....	137

## 1 ANTECEDENTS

A la conca mitja del riu Llobregat, a la comarca del Bages (Catalunya), s'hi troben importants explotacions mineres de potassa, que degut a la seva explotació constant s'han format muntanyes de residus salins de gran impacte a l'entorn.

Aquesta activitat comporta afectacions importants a les poblacions locals i al medi ambient a causa de la salinització excessiva del riu Llobregat, entre d'altres. Des d'un punt de vista social, l'extracció d'aquesta sal presenta alguns inconvenients com ara la reducció del rendiment de les explotacions agrícoles i ramaderes a causa de la salinització del sòl, enfonsaments del terreny deguts a la continua explotació d'aquestes mines i la disminució del valor dels terrenys pròxims a aquestes explotacions.

L'any 2005 s'abocava a un ritme de 10.000 tones diàries de residus salins, unes 3 milions de tones anuals. Aquell mateix any ja s'acumulaven 70 milions de tones de sal sobre una superfície d'unes 100 hectàrees. A més a més, aquests residus eren dipositats sobre un terreny que no havia estat impermeabilitzat ni recobert prèviament provocant un fort impacte ambiental. Aquestes muntanyes de sal anomenades escombreres, a més a més d'alterar el paisatge, queden exposades a l'acció de l'aigua de la pluja i les corrents d'aigua. Aquest fet comporta que l'aigua pugui contaminar la xarxa fluvial i les aigües subterrànies.



**Figura 1.** Escombrera de El Cogulló (Sallent). Font: Institució Catalana d'Història Natural. [<http://ichn.iec.cat/Bages/impactes/imatges%20grans/cimg05.htm>]

L'exploració comercial de la sal potàssica començà a Sùria l'any 1925, a Cardona el 1930 i a Sallent l'any 1932. Els residus generats per totes aquestes explotacions generaren des d'un bon començament la necessitat de transportar aquestes grans quantitats de sal fins al mar (Joan Escriu i Paradell, 1981). Tot i així, no va ser fins l'any 1989 que el col·lector de salmorres de la conca del Llobregat va entrar en servei podent transportar un cabal de fins a 150 l/s.

Aquest cabal no només és format per aigua i sal dissolta, sinó que també és format per partícules sòlides en suspensió. Per tant, en aquest col·lector s'ha de tenir en compte que les partícules sòlides poden sedimentar reduint el rendiment del col·lector.

Amb l'objectiu de conèixer les condicions necessàries per al bon funcionament del col·lector, Aigües de Barcelona com a entitat gestora que té la concessió per part de l'ACA, realitza un estudi estàtic del fluid amb diferents concentracions de sal. Aquest inclou un estudi fisico-químic i busca també conèixer a partir de quines concentracions es produeixen precipitats.

Com que el transport de salmorra és un transport dinàmic, l'any 2012 s'encarrega a membres de l'Institut de Recerca FLUMEN de la UPC-Barcelona TECH un estudi en condicions dinàmiques de la salmorra transportada que pugui reflectir d'una manera més semblant les condicions reals. Aquest estudi es realitza mitjançant una instal·lació experimental constituïda per un panell de canonades a pressió de 73 metres de llargada total.

La conclusió més destacada d'aquest estudi dinàmic pel que fa a la saturació és que la concentració per a arribar a aquesta en un flux a pressió és d'uns 360 g/l, gairebé la mateixa que en el cas estàtic.

Posteriorment, l'any 2015 s'inicia dins del Pla de Doctorats Industrials de la Generalitat de Catalunya el projecte "Estudi de la dinàmica del transport de dilucions salines d'alta concentració en canonades a pressió". Vinculat a aquest projecte, el juliol de 2015 es defensa el Treball Final de Grau en Enginyeria Civil "*Estudi experimental del transport a pressió de salmorres*" (Rojas, 2015). L'objectiu d'aquesta tesina fou la nova posta a punt de la instal·lació experimental després d'uns anys inactiva, i servir com a punt de partida del projecte de recerca.

La salmorra que es va utilitzar en tots els assaigs d'aquest estudi dinàmic i els utilitzats en la present tesina és la mateixa. Aquesta va ser generada a partir de diverses mostres d'aigua dels rius Llobregat i Cardener i de mostres de sal de les mines. Aquesta sal no és una substància química pura, sinó que és una mescla formada principalment per clorur de sodi i sulfat de calci.

La present tesina té com a objectiu principal la determinació de la viscositat de la salmorra, propietat física fonamental per descriure el comportament hidrodinàmic del flux. La viscositat de qualsevol salmorra, a més a més de dependre de la temperatura, depèn tant de la concentració de sals dissoltes en l'aigua com de la concentració de partícules sòlides transportades.

Per a la determinació de la viscositat s'instal·la un model experimental al Laboratori d'Hidràulica i Mecànica de Fluids de l'Institut de Recerca FLUMEN de la UPC-Barcelona TECH. Aquest consta de dos dipòsits units per dues canonades per on passa el flux a pressió. Aquesta instal·lació s'explica en apartats posteriors.

En aquest treball es realitzen un seguit d'assaigs amb els que es juga amb la concentració i la temperatura de la salmorra per tal de determinar la viscositat de la mescla per, finalment, poder realitzar una comparativa en les diferents condicions.

## 2 OBJECTIUS

L'objecte principal d'aquesta tesina consisteix en comprovar el correcte funcionament de la instal·lació experimental i la seva validesa per a avaluar la variació de la viscositat de la salmorra en diferents condicions de temperatura i concentració.

Més concretament, els objectius específics que es proposen en aquesta tesina per cobrir els objectius generals són els següents:

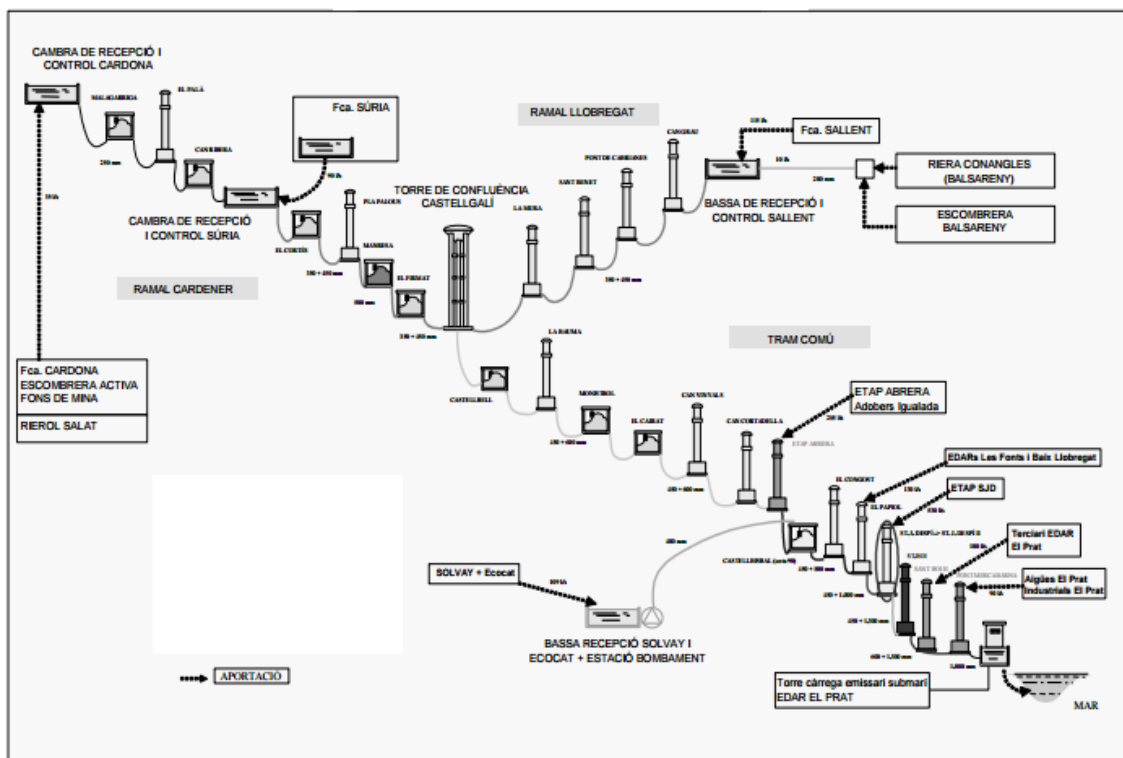
- Posar a punt el sistema experimental, verificant el bon funcionament d'aquest.
- Calibrar els sensors encarregats de mesurar el cabal.
- Analitzar la rugositat absoluta de les canonades.
- Avaluar el comportament de la viscositat en funció dels paràmetres de temperatura i concentració mitjançant aforaments de cabal.
- Realitzar una comparativa de les diferents corbes viscositat-temperatura obtingudes a partir dels diferents aforaments de cabal.



### 3 ESTAT DEL CONEIXEMENT

#### 3.1 COL·LECTOR DE SALMORRES DE LA CONCA DEL LLOBREGAT

Es tracta d'un col·lector de més de 100 km que transporta, sense necessitat d'impulsió, la salmorra provinent del residu de les explotacions mineres del Bages. El seu traçat, en forma d'Y, té un ramal que parteix de Cardona i un altre de Sallent, confluint ambdós a Castellgalí. Des d'aquest punt travessa la conca del riu Llobregat fins a la seva desembocadura en el mar, on connecta amb un emissari submarí.



**Figura 2.** Esquema del col·lector de salmorres. Font: Vidal Vidal (2011).

Des de la branca que comença a Balsareny, la canalització presenta un recorregut de 28 km de longitud. L'altra, que inicia el seu recorregut a Cardona, presenta un tram de 39 km de longitud.

Les canonades del col·lector tenen un diàmetre d'entre 125 mm i 1300 mm, i estan fabricades amb fibrociment fet de Portland anti-sulfats o bé amb polièster reforçat amb fibra de vidre (PRFV).

L'any 2012 Aigües de Barcelona va desenvolupar un avantprojecte per la construcció d'un nou col·lector de salmorres. En aquest cas, es planteja un conducte realitzat amb PRFV amb el qual es tindria una rugositat absoluta d'uns 0,025 mm, 500 mm de diàmetre i més de 100 km de longitud. Aquest nou col·lector podria transportar un cabal de fins a 0,330 m<sup>3</sup>/s.

### 3.2 VISCOSITAT D'UN FLUID

El concepte de viscositat representa la resistència que presenta un fluid a fluir, a causa de la interacció i cohesió de les seves molècules.

La viscositat és una propietat que és sensible a variacions de pressió i de temperatura. En el cas que es faci augmentar la pressió, la viscositat augmenta. D'altra banda, si augmenta la temperatura, la viscositat tendeix a disminuir.

La unitat del SI per a la viscositat dinàmica és el Pa·s, que és el mateix que (N·s)/m<sup>2</sup>.

Per tant, dimensionalment la viscositat dinàmica es defineix com:

$$[\mu] = \frac{[F] \cdot [T]}{[L]^2} \quad (1)$$

També es defineix la densitat cinemàtica del fluid dividint la viscositat dinàmica per la densitat del líquid:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

D'aquesta manera els aspectes dinàmics queden suprimits, i la seva unitat en el SI és el m<sup>2</sup>/s.

Dimensionalment la viscositat cinemàtica es defineix:

$$[v] = \frac{[L]^2}{[T]} \quad (3)$$

A continuació, en la Taula 1, es presenta la variació de la densitat, la viscositat dinàmica i la viscositat cinemàtica de l'aigua destil·lada amb la temperatura:

Temperatura (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\mu$ (N·s/m <sup>2</sup> )	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)
15	999,1	1,145E-03	1,146E-06
16	999	1,116E-03	1,117E-06
17	998,8	1,088E-03	1,089E-06
18	998,6	1,060E-03	1,061E-06
19	998,4	1,034E-03	1,036E-06
20	998,2	1,009E-03	1,011E-06
21	998	9,84E-04	9,86E-07
22	997,8	9,61E-04	9,63E-07
23	997,6	9,38E-04	9,40E-07
24	997,5	9,16E-04	9,18E-07
25	997,1	8,95E-04	8,98E-07
26	996,8	8,75E-04	8,78E-07
27	996,5	8,55E-04	8,58E-07
28	996,3	8,36E-04	8,39E-07
29	996	8,18E-04	8,21E-07
30	995,7	8,00E-04	8,03E-07

**Taula 1.** Propietats físiques de l'aigua destil·lada. Font: Aqua Rifer (2016).

### 3.3 CARACTERITZACIÓ DE LA SALMORRA

La salmorra és una mescla d'aigua amb altes concentracions de sals dissoltes, que també inclou partícules sòlides insolubles associades a l'extracció minera de la sal que acaben formant part de la mescla.

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 i clorurs de potassi. Aquestes també inclouen altres compostos en petits percentatges. La composició química de la sal utilitzada en els assaigs es mostra en la Taula 2.

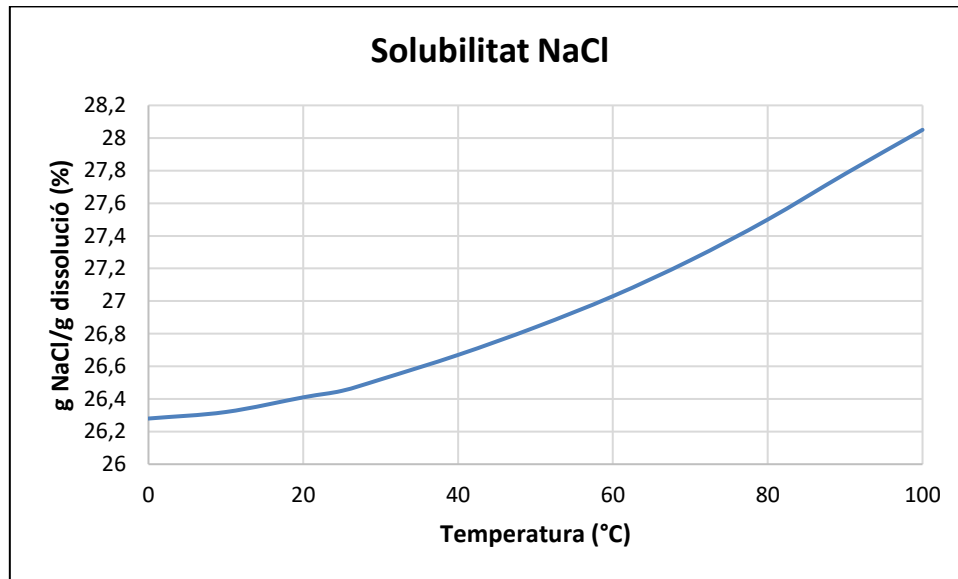
Component	Quantitat (g/kg)	% en massa
<b>Sodi</b>	378.0	37.8
<b>Calci</b>	5.53	0.55
<b>Magnesi</b>	1.34	0.13
<b>Potassi</b>	13.47	1.35
<b>Estronci</b>	0.08	0.01
<b>Bari</b>	<0.01	0
<b>Bor</b>	<0.025	0
<b>Sílice</b>	<0.50	0
<b>Bicarbonats</b>	<0.01	0
<b>Clorurs</b>	560.5	56.05
<b>Sulfats</b>	20.60	2.06
<b>Bromurs</b>	0.25	0.03
<b>Insolubles</b>	26.1	2.61

**Taula 2.** Composició d'una mostra de salmorra provinent de la mina de Cardona. Font: Sánchez-Juny et al. (2012).

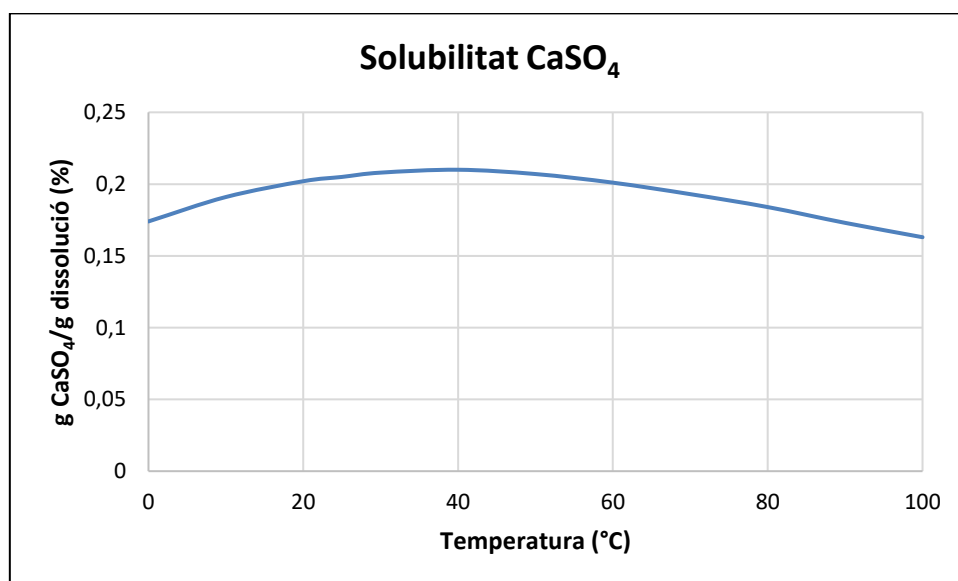
### 3.3.1 SOLUBILITAT DE LES SALS EN AIGUA

Es defineix solubilitat d'un sòlid en un dissolvent líquid a una temperatura determinada com la seva concentració en la dissolució saturada.

La solubilitat del clorur de sodi (i per la majoria de les sals) augmenta quan també ho fa la temperatura. D'altra banda, el sulfat de calci assoleix un màxim de solubilitat quan aquest arriba als 40°C.

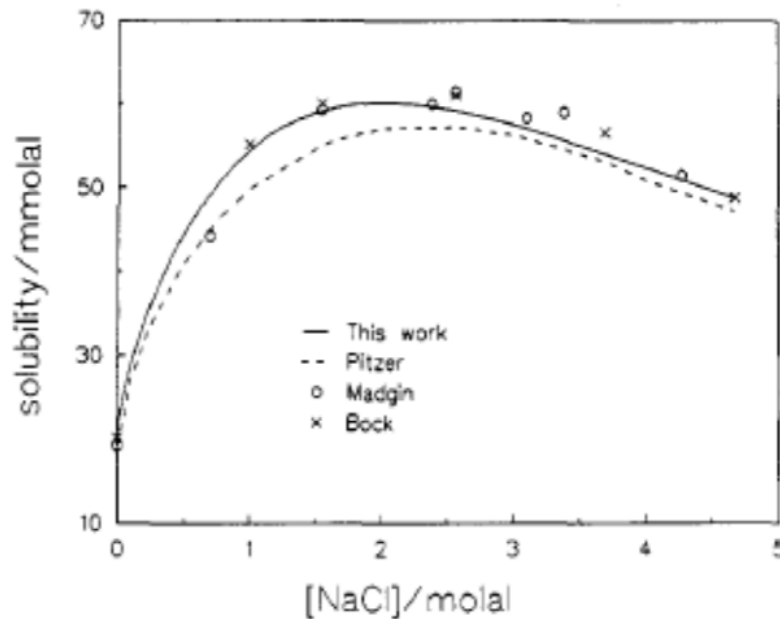


**Figura 3.** Solubilitat del clorur de sodi en funció de la temperatura de l'aigua. Font: Triadú Galí (2016).



**Figura 4.** Solubilitat del sulfat de calci en funció de la temperatura de l'aigua. Font: Triadú Galí (2016).

S'ha de tenir en compte que la presència d'altres substàncies també pot fer variar la solubilitat del compost. A més a més, la solubilitat del CaSO<sub>4</sub> en una dissolució que contingui NaCl varia en funció de la concentració del clorur de sodi (Ostroff and Metler (1984); Raju and Atkinson (1990)).



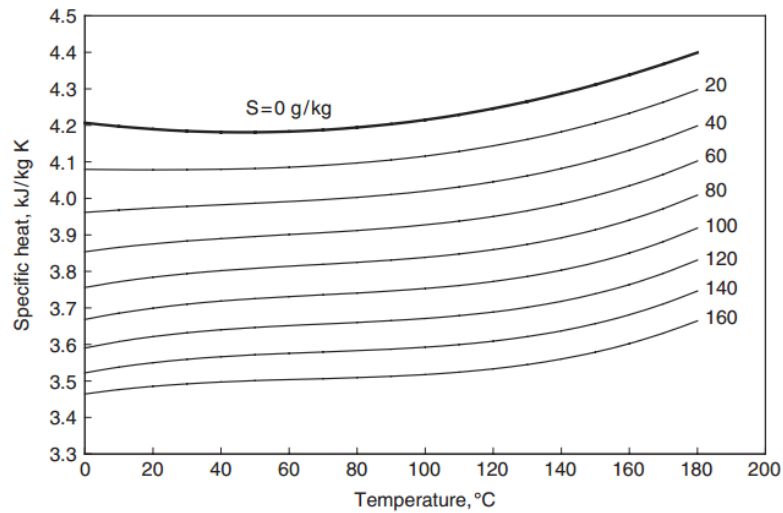
**Figura 5.** Solubilitat calculada i experimental de l'anhidrita (CaSO<sub>4</sub>) en funció de la concentració en mols de clorur de sodi (NaCl) a 25°C. Font: Raju and Atkinson (1990).

Com es pot veure en el document “*Estudi del comportament de la salmorra en l’ampliació de la capacitat del col·lector de salmorres entre Balsareny i el mar*”, l’any 2012 es van realitzar un seguit d’assaigs al Laboratori d’Hidràulica i Mecànica de Fluids de l’Institut de Recerca FLUMEN de la UPC-Barcelona TECH per tal de fer una primera anàlisi del comportament de la salmorra i detectar possibles problemes que poguessin aparèixer en el col·lector. Un dels problemes és la precipitació de sals. En el model de laboratori es va poder observar com per una concentració de 360 g/l ja es començaven a formar precipitats de sal en les zones de menor velocitat.

### 3.3.2 CALOR ESPECÍFIC DE DISSOLUCIONS SALINES

El calor específic es defineix com la quantitat de calor necessària per pujar 1°C la temperatura d’un sòlid, líquid o gas. Per l’aigua, aquest valor és de 4,18 J·g<sup>-1</sup>·°C<sup>-1</sup>.

Com es pot veure en la Figura 6, el calor específic disminueix a mesura que augmenta la concentració d’una dissolució salina. En aquesta també es pot comprovar que tot i no ser molt pronunciat, sí que existeix un lleuger augment del calor específic amb la temperatura.

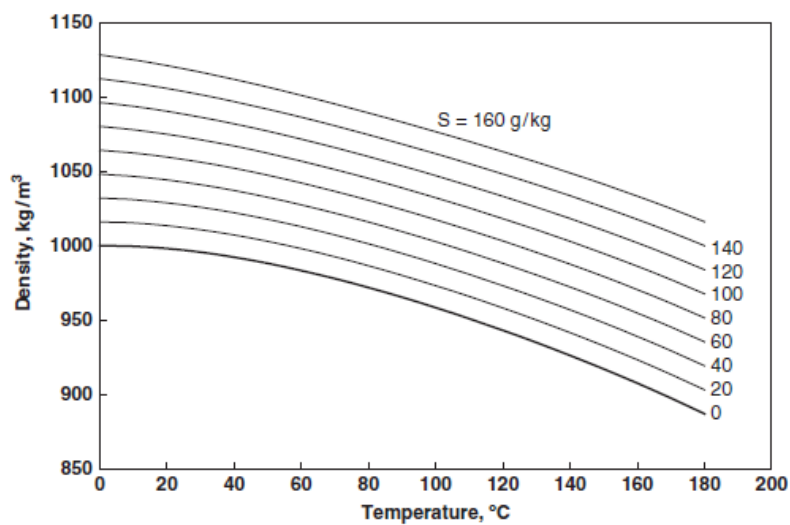


**Figura 6.** Calor específic en funció de la temperatura per a diferents concentracions de sal. Font: Sharqawy et al. (2010).

### 3.3.3 DENSITAT DE DISSOLUCIONS SALINES

La densitat és una propietat física que indica la massa per unitat de volum d'una certa substància. Per dissolucions salines, aquesta propietat varia segons la concentració de sal i la temperatura a la que es troba la mescla.

Quant més alta és la concentració de sal, més elevat és el valor de la densitat. Contràriament, quant més alta és la temperatura, més baixa és la densitat de la mescla. La Figura 7 mostra aquestes variacions de densitat per a aquests dos paràmetres.

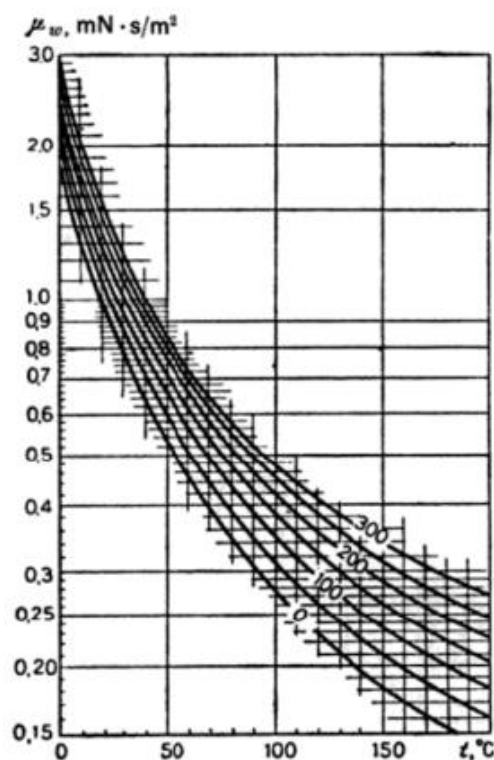


**Figura 7.** Densitat en funció de la temperatura per a diferents concentracions de sal. Font: Sharqawy et al. (2010).

### 3.3.4 VISCOSITAT DE DISSOLUCIONS SALINES

De la mateixa manera que la temperatura, la concentració de sal en aigua provoca una variació en la viscositat de la dissolució. Com més elevada és la concentració, més alta és la viscositat de la mescla per a una mateixa temperatura.

En la literatura es troben diverses informacions sobre la viscositat de dissolucions salines però aquestes són més limitades per a salinitats més altes. La Figura 8 mostra els diferents valors de la viscositat de l'aigua per a diverses dissolucions (diferents concentracions) i per a diverses temperatures.



**Figura 8.** Relació entre la viscositat de l'aigua ( $\mu_w$ ) i la temperatura ( $t$ ) per a diverses concentracions volumètriques ( $C_v$ ) de les sals dissoltes en aquesta. La xifra que es troba sobre les corbes correspon a  $C_v$  en  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Font: Dajnov (1982).

Com es pot observar en el document “*Estudi del comportament en de la salmorra en l’ampliació de la capacitat del col·lector de salmorres entre Balsareny i el mar*”, un dels problemes que es van detectar durant els assaigs en condicions dinàmiques al laboratori és la precipitació de material inert en suspensió que es transporta. La decantació d’aquestes partícules sòlides queda definida per la velocitat de circulació de l’aigua, sent la decantació d’aquestes més important a menor velocitat de circulació. Aquest material es pot quedar adherit a les parets dels conductes



formant una fina pel·lícula que pot modificar les condicions de rugositat de la conducció. A més a més, una altra conseqüència d'aquest material és la modificació de la viscositat de l'aigua quan aquests es mesclen.

### 3.4 FLUX EN UNA CANONADA A PRESSIÓ

#### 3.4.1 TIPUS DE MOVIMENT EN UNA CANONADA

El moviment d'un fluid a pressió en una canonada es pot classificar en diferents tipus: en funció de la dependència del flux amb el temps i en funció del comportament del propi fluid.

El flux a pressió en una canonada, amb relació a la seva dependència amb el temps, pot classificar-se com a règim permanent o estacionari, si el cabal és independent del temps, o com a règim variable, no permanent o transitori, si el cabal varia amb el temps.

En el cas del règim permanent, aquest es pot classificar com a uniforme, si la velocitat mitjana del flux no varia al llarg de la conducció, o com a règim variat, en el cas que variï.

Altrament, amb relació a la seva dependència amb el número de Reynolds, es pot classificar en règim laminar o en règim turbulent. Aquest avalua conceptualment el quocient entre les forces d'inèrcia i les forces viscoses. El nombre de Reynolds, tenint en consideració un conducte cilíndric a pressió, està definit de la següent manera:

$$Re = \frac{v \cdot \Phi}{\nu} \quad (4)$$

On:

- $v$ : és la velocitat mitjana del flux.
- $\Phi$ : és el diàmetre de la canonada.
- $\nu$ : és la viscositat cinemàtica del fluid.

El canvi de règim laminar a turbulent es produeix en superar un valor crític del nombre de Reynolds que es troba entre 2100 i 4000.

A la pràctica, en una canonada, generalment el flux assoleix valors corresponents al règim turbulent, caracteritzat per un moviment desordenat de les seves partícules i una velocitat de flux relativament elevada. En canvi, el flux laminar s'assoleix típicament a velocitats baixes o viscositats altes. Aquest últim es caracteritza físicament perquè el moviment del fluid és en capes paral·leles que no es barregen entre elles.

Les condicions hidrodinàmiques del col·lector de salmorres fan que el present estudi es centri en fluxos a pressió en règim estacionari i turbulent.

### 3.4.2 EQUACIONS BÀSIQUES

#### Equació de la continuïtat

L'equació aplica el principi de conservació de la massa, el qual estableix que, per unitat de temps, la massa d'un medi continu que entra a un determinat volum de control, és igual a la que surt més la que s'hi acumula.

L'equació de continuïtat aplicada en un tub de flux ve donada per l'expressió següent:

$$\frac{\partial(\rho \cdot S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot v \cdot S)}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

On:

- $\rho$ : és la densitat del fluid ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).
- $v$ : és la velocitat del fluid ( $\text{m}/\text{s}$ ).
- $S$ : és l'àrea de la secció considerada ( $\text{m}^2$ ).

Si es treballa amb fluids incompressibles (densitat constant) resultaria:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(v \cdot S)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

Al considerar una canonada rígida, la secció d'aquesta no varia amb el temps i, per tant, l'expressió anterior queda de la següent forma:

$$\frac{\partial(v \cdot S)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

Això implica que:

$$Q = v \cdot S = ctt \quad \longrightarrow \quad v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2 \quad \longrightarrow \quad Q_1 = Q_2 = ctt$$

Si a més el règim és permanent, el cabal és el mateix al llarg de tota la canonada en qualsevol instant de temps.

### Equació de momentum. Conservació de la quantitat de moviment

L'equació momentum o equació de flux de la quantitat de moviment engloba les forces que actuen sobre un volum de fluid i les seves condicions externes.

En el cas de que es pugui acceptar que la velocitat es distribueix de manera uniforme, es pot escriure com:

$$\sum \vec{F} = \frac{d(m \cdot \vec{v})}{dt} \quad (8)$$

Si es treballa amb un fluid incompressible i en règim permanent, l'equació s'expressa de la següent manera:

$$\sum \vec{F} = \rho \cdot Q \cdot \Delta \vec{v} \quad (9)$$

Aquesta equació mostra com un canvi de velocitat tant a l'entrada com a la sortida del volum de control crea una nova força sobre aquest.

### Equació de l'energia. Trinomi de Bernoulli

El trinomi de Bernoulli postula que, per un fluid no viscos i sense fregament, la seva energia es manté constant al llarg de la línia de corrent. L'expressió de la fórmula és la següent:

$$h + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2 \cdot g} = ctt \quad (10)$$

On:

- $h$ : és la elevació en la direcció de la gravetat (m). Correspon a l'energia potencial del fluid per unitat de pes.
- $P$ : és la pressió al llarg de la línia de corrent (Pa).
- $v$ : és la velocitat del fluid (m/s).

D'aquesta se'n dedueix que l'energia del fluid per unitat de pes consta de tres components:

- Energia potencial per unitat de pes: És deguda a l'altitud del fluid i correspon al terme  $h$  de la fórmula.
- Energia de pressió per unitat de pes: És deguda a la pressió exercida sobre el fluid i correspon al terme  $\frac{P}{\gamma}$ .
- Energia cinètica per unitat de pes: És deguda a la velocitat del fluid i correspon al terme  $\frac{v^2}{2 \cdot g}$ .

A l'hora de tractar amb fluids reals, es dissipa certa energia quan un fluid va d'una secció 1 a una secció 2 a causa del fregament. Per aquest motiu, la diferència d'energia entre una secció i l'altra, correspon a l'energia dissipada entre ambdues:

$$\left( h_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \right) - \left( h_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \cdot \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \right) = \Delta H_{12} \quad (11)$$

On:

- $h_i$ : és l'elevació en la direcció de la gravetat en la secció  $i$  (m).
- $P_i$ : és la pressió en la secció  $i$  (Pa).
- $v_i$ : és la velocitat del fluid en la secció  $i$  (m/s).
- $g$ : és l'acceleració de la gravetat ( $m/s^2$ ).
- $\gamma$ : és el pes específic del fluid ( $N/m^3$ ).
- $\Delta H_{12}$ : és la pèrdua d'energia entre les seccions 1 i 2 (m).
- $\alpha_i$ : és el coeficient de Coriolis.

### 3.4.3 PÈRDUES D'ENERGIA REPARTIDES EN UNA CANONADA (FRICCIÓ)

Les forces de fricció, produïdes per les parets de la canonada, causen unes pèrdues d'energia. Aquestes poden ser calculades fent balanç de les forces a favor i en contra del moviment del fluid.

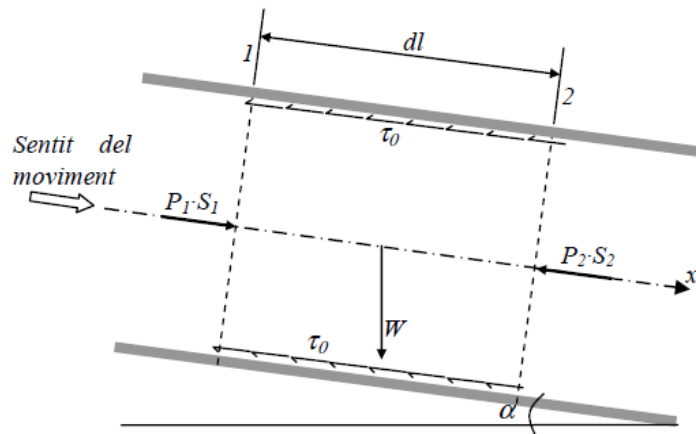
En la direcció i el sentit del moviment es troba la component del pes i la resultant de la distribució de pressió sobre la secció d'entrada del volum de control. En contra s'hi troba la resultant de la distribució de tensions tangencials que s'originen pels efectes de fricció del fluid amb el contorn interior de la canonada.

En condicions de règim permanent, el balanç d'aquestes forces ha de ser nul ja que si no ho fos, existiria una acceleració en el flux. En aquest cas, el cabal seria variant en el temps i, en conseqüència, no compliria la condició de flux en règim permanent. Aleshores, tenint en consideració això, l'equació del moviment és la següent:

$$P_1 \cdot S + W \cdot \sin(\alpha) - P_2 \cdot S - \pi \cdot \Phi \cdot \tau_0 \cdot dl = 0 \quad (12)$$

On:

- $P_1$ : és la pressió mitjana en la secció 1 corresponent a la secció d'entrada del volum de control ( $\text{N/m}^2$ ).
- $P_2$ : és la pressió mitjana en la secció 2 corresponent a la secció de sortida del volum de control ( $\text{N/m}^2$ ).
- $S$ : és la secció de la canonada ( $\text{m}^2$ ).
- $W \cdot \sin(\alpha)$ : és la component pes del fluid en direcció del moviment.
- $\pi \cdot \Phi \cdot \tau_0 \cdot dl$ : és la resultant de la distribució de les tensions tangencials provocades pel fregament amb el contorn de la canonada.



**Figura 9.** Volum de control que cal analitzar per estudiar les pèrdues de càrrega per fregament amb el contorn. Font: Sánchez-Juny et al. (2005).

Finalment, relacionant el pes específic amb el pes del fluid i atès que la canonada és de secció circular, l'equació (12) es pot expressar com:

$$\left(\frac{P_1}{\gamma} + z_1\right) - \left(\frac{P_2}{\gamma} + z_2\right) = \frac{4 \cdot \tau_0 \cdot dl}{\gamma \cdot \Phi} = \Delta H_{12} \quad (13)$$

Tenint en compte la hipòtesi de règim permanent i secció circular, la velocitat mitjana del flux ha de ser constant al llarg de tota la canonada.

El membre de l'esquerra de l'equació (13) és la diferència del trinomi de Bernoulli entre les seccions 1 i 2, la qual ha de ser l'energia dissipada entre les dues a causa de la fricció amb les parets de la canonada.

El *pendent motriu* és el quocient entre el desnivell d'energia entre dos punts d'una massa de líquid i la distància que els separa. Aquest és expressat com la pèrdua d'energia per unitat de pes i unitat de longitud de la canonada. Si tenim en compte l'equació (13), la fórmula del pendent motriu queda expressada de la següent manera:

$$I = \frac{\Delta H_{12}}{\Delta L_{12}} = \frac{4 \cdot \tau_0}{\gamma \cdot \Phi} \quad (14)$$

Per determinar aquestes pèrdues d'energia, a més a més dels paràmetres introduïts anteriorment com són el diàmetre de la canonada, la viscositat cinemàtica i la tensió tangencial, també s'ha d'incloure la rugositat de la canonada.

La rugositat depèn del material del qual està fet la canonada i es representa amb la *rugositat absoluta* ( $k$ ). Així mateix, es defineix *rugositat relativa* com el quocient entre la rugositat absoluta i el diàmetre de la canonada ( $k/\Phi$ ).

Finalment, es pot expressar el pendent motriu en funció de la velocitat mitjana del flux, del diàmetre de la canonada i del *coeficient de fricció de Darcy-Weisbach* ( $f$ ). Aquest és un coeficient adimensional que caracteritza el fregament del fluid amb el contorn. Generalment, depèn del diàmetre i la rugositat de la canonada, així com del número de Reynolds.

Així doncs, Darcy i Weisbach proposaren la següent fórmula:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{\Phi} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (15)$$

On  $h_f$  és la pèrdua per fricció i el pendent motriu és:

$$I = \frac{f}{\Phi} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (16)$$

En el cas de flux laminar, Poiseuille proposà una nova equació basada en resultats empírics per determinar el factor de fricció de Darcy-Weisbach (Sánchez-Juny et al., 2005):

$$f = \frac{64}{Re} \quad (17)$$

Insistir en que aquesta equació només és vàlida en el cas de flux laminar i, per tant, el nombre de Reynolds no pot ser superior al valor crític de 2100. Si fos el cas, el coeficient de fricció només dependria del nombre de Reynolds.

En el règim turbulent es poden distingir diversos casos segons la rugositat del contorn:

- Turbulent llis: Quan la rugositat del contorn pràcticament no influeix en el moviment.
- Turbulent rugós: Quan la rugositat és prou important com per interferir en la distribució de velocitats del fluid.
- Turbulent intermedi: La dimensió de la rugositat fa que el fregament amb el contorn de la canonada no sigui constant i que variï segons el nombre de Reynolds.

Per la determinació del coeficient de fricció de Darcy-Weisbach, en tots tres casos, es pot usar la fórmula de Colebrook i White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1.14 - 2 \cdot \log \left( \frac{k}{\Phi} + \frac{9.35}{Re \cdot \sqrt{f}} \right) \quad (18)$$

#### 3.4.4 ÀBAC DE MOODY

L'àbac de Moody representa gràficament la relació entre el coeficient de Darcy-Weisbach i el nombre de Reynolds, que planteja la fórmula de Colebrook i White. Aquest requereix conèixer les característiques cinemàtiques del fluid (velocitat mitjana i viscositat cinemàtica) i les característiques de la canonada (rugositat absoluta i diàmetre).

Aquest gràfic mostra, donada una canonada, si ens trobem en el règim laminar, en el règim turbulent llis, en el règim turbulent rugós o en el règim turbulent intermedi segons el nombre de Reynolds en el que es treballi.

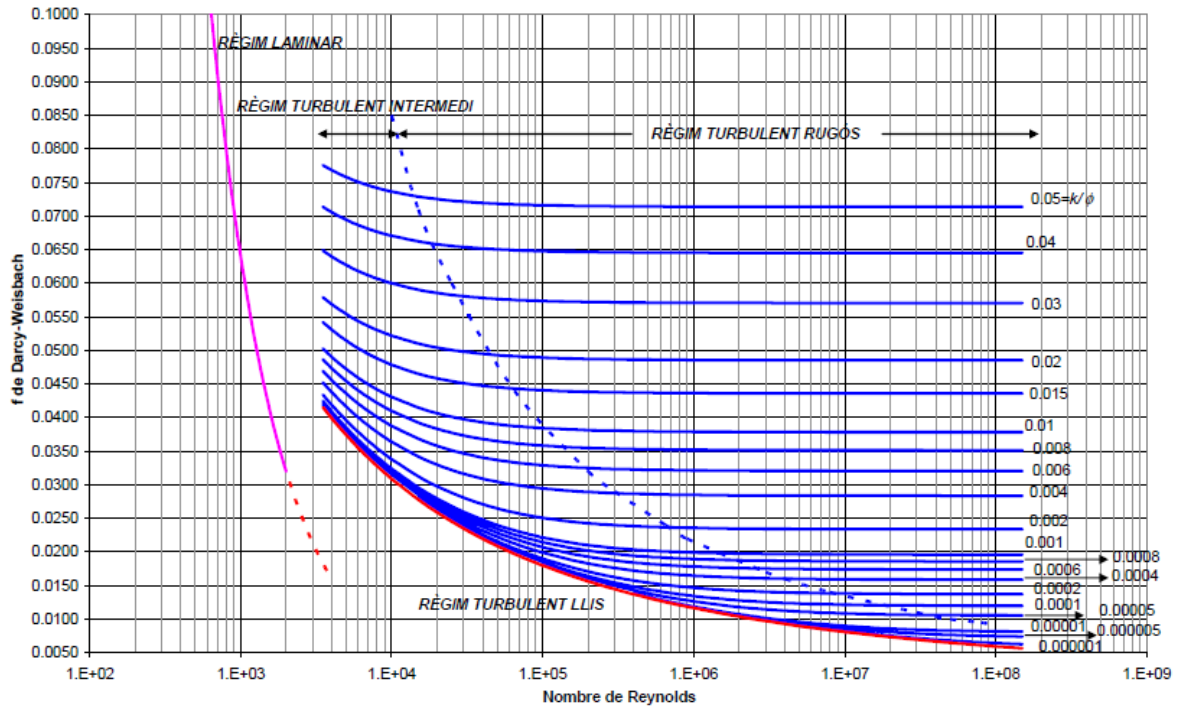


Figura 10. Àbac de Moody. Font: Sánchez-Juny et al. (2005).

### 3.4.5 PÈRDUES DE CÀRREGA LOCALS

Les pèrdues d'energia locals es produeixen per la presència de canvis sobtats en la geometria de la conducció, com per exemple canvis de direcció (colzes), canvis de diàmetre (contraccions i/o eixamplaments), presència de vàlvules, etc.

Les pèrdues de càrrega locals són, generalment, menors que les produïdes per fregament en les conduccions de prou longitud. En canvi, en conduccions curtes (pocs centenars de metres) les pèrdues localitzades poden arribar a ser més grans que les contínues.

En general es poden calcular utilitzant:

$$\Delta H = \lambda \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (19)$$

On  $\lambda$  és el coeficient de pèrdues de càrrega localitzades. Aquest paràmetre pot ser estimat en alguns casos. El llibre *"Manual de ingeniería hidráulica"* de Lencastre (1998) disposa d'un promptuari detallat per la determinació de pèrdues de càrrega locals.



En l'anàlisi dels diferents escenaris estudiats s'ha considerat un coeficient de pèrdua de càrrega locals  $\lambda=1$  en la incorporació de la canonada al dipòsit de cua, que representa conceptualment el frenat del líquid dins del dipòsit final. Altrament, en el cas de l'entrada en la canonada des de l'altre dipòsit, es consideren que les pèrdues de càrrega locals són negligibles gràcies al seu disseny hidràulic. La canonada té una determinada longitud dins del dipòsit i, per tant, evita pèrdues quan el líquid provinent del dipòsit entra a la canonada (veure METODOLOGIA).

### 3.5 VISCOSÍMETRE D'OSTWALD

Un viscosímetre és un aparell que permet mesurar la viscositat dinàmica d'un líquid. Per a líquids poc viscosos es pot determinar experimentalment aquesta propietat física amb un procediment comparatiu utilitzant tubs capil·lars.

El viscosímetre d'Ostwald mesura els temps de flux que necessita un determinat volum de líquid per travessar un tub capil·lar sotmès a la seva pressió hidrostàtica, la qual és proporcional a la seva densitat. L'equació de Poiseuille mostra la relació de la viscositat amb les característiques del viscosímetre usat:

$$\mu_i = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot t_i \cdot P_i}{8 \cdot L \cdot V} \quad (20)$$

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  $P_i$ .

Al ser  $r, L, V$  constants per un mateix viscosímetre, es pot considerar un coeficient invariant adimensional  $K$ :

$$K = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot L \cdot V} \quad (21)$$

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

$$\mu_i = K \cdot \rho_i \cdot g \cdot h \cdot t_i \quad (22)$$

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 és la següent:

$$\mu_i = K' \cdot \rho_i \cdot t_i \quad (23)$$

El paràmetre  $K'$  depèn de la geometria del viscosímetre i normalment ve donat pel propi constructor. En cas de no disposar d'aquesta, es pot determinar mitjançant viscositats conegudes com ara la de l'aigua. Per tant, la viscositat dinàmica de l'aigua vindria donada per l'expressió:

$$\mu_{H_2O} = K' \cdot \rho_{H_2O} \cdot t_{H_2O} \quad (24)$$

Si es coneixen la densitat del líquid del qual es vol trobar la viscositat, per comparació, es pot obtenir la viscositat dinàmica d'aquest:

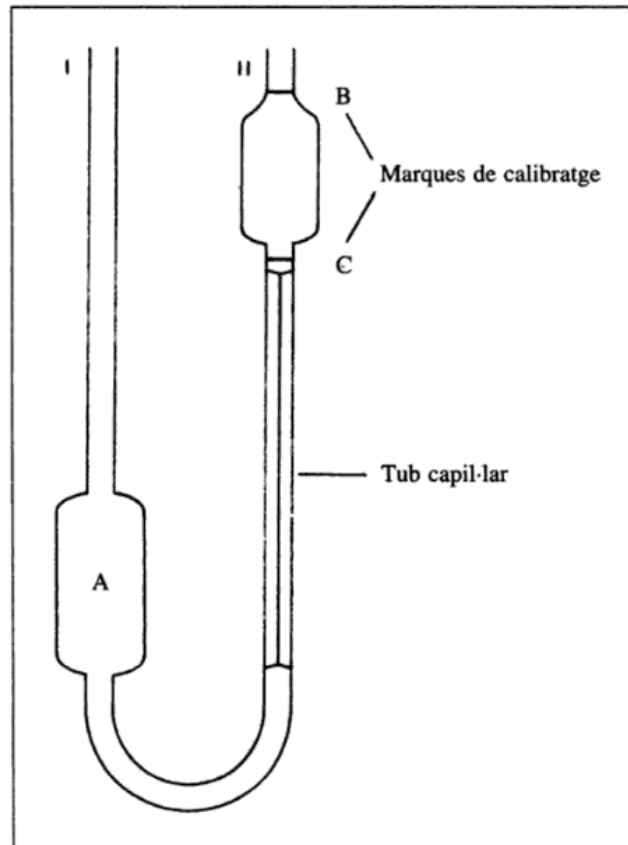
$$\mu_1 = \mu_{H_2O} \cdot \frac{\rho_1 \cdot t_1}{\rho_{H_2O} \cdot t_{H_2O}} \quad (25)$$

Així doncs, és possible obtenir la viscositat dinàmica (Pa·s) calculant el temps que triga en fluir un volum de líquid a través del tub capil·lar.

L'assaig amb el viscosímetre d'Ostwald és molt sensible a la temperatura. Per aquest fet, és important que aquesta sigui controlada d'alguna manera per tal de que no variï durant l'assaig. També és necessari que el viscosímetre estigui sec i net a més a més de que aquest es trobi en posició completament vertical.

Per estimar els temps s'omple la cavitat inferior A (veure Figura 11) amb el líquid del qual es vol trobar el temps tot introduint-lo per I. Després, es succiona per II fins que el nivell de líquid sobrepasa la marca B.

A continuació es deixa caure el líquid i es mesura el temps que triga aquest per passar de B a C.



**Figura 11.** Esquema d'un viscosímetre d'Ostwald. Font: Plummer (1994).

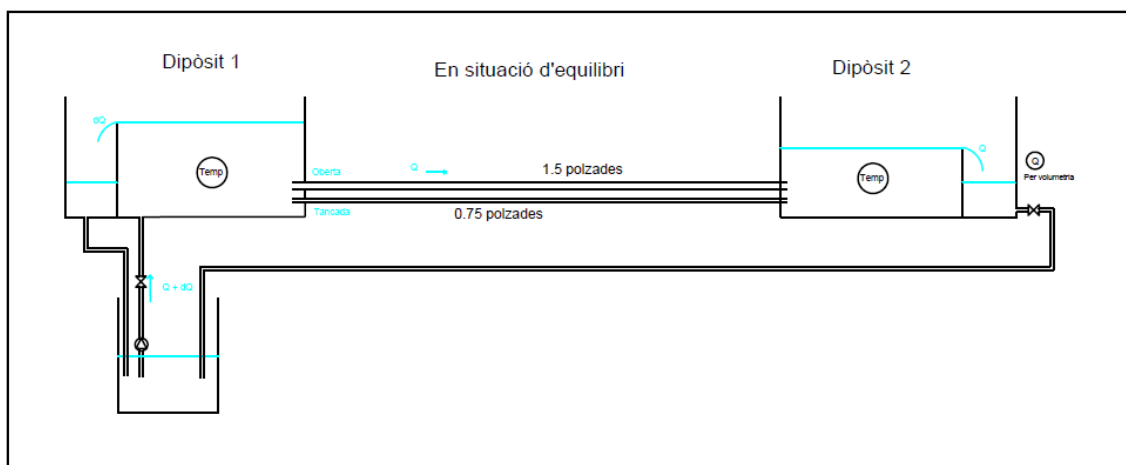


**Figura 12.** Viscosímetre utilitzat en aquesta tesina.

## 4 METODOLOGIA

Amb la finalitat de determinar la viscositat de la salmorra s'ha dissenyat un model hidràulic clàssic de dos dipòsits connectats per canonades per on circula el líquid.

Els dos dipòsits, els quals tenen la seva làmina lliure de líquid a cotes diferents, estan connectats mitjançant dues canonades de diferent diàmetre per les quals passa el líquid d'un dipòsit a l'altre a causa de la diferència de pressió. Del sobreexidor corresponent al dipòsit 2 surt una altra canonada que retorna el líquid per gravetat fins a un dipòsit auxiliar. Dintre d'aquest s'hi troba una bomba que retorna el líquid al dipòsit 1 i permet que no es buidi (veure Figura 13).



**Figura 13.** Esquema del circuit hidràulic experimental en situació d'equilibri.



**Figura 14.** Model del circuit hidràulic del laboratori usat en aquesta tesina.

Els diferents assaigs es realitzen per a mescles amb diferents concentracions de sal i diferents temperatures. Aquestes són de 16°C, 20°C, 25°C i 30°C. La raó principal per la qual els assaigs es duen a terme en aquest rang de temperatures és perquè la temperatura del col·lector de salmorres també es trobaria dintre d'aquest rang durant tot l'any. La salmorra que baixa pel col·lector no registra temperatures gaire baixes ja que aquest es troba enterrat i la temperatura sota terra es manté bastant constant. El més probable és que la salmorra en el seu interior es trobi per sobre dels 16°C durant tot l'any i, evidentment, també per sota dels 30°C.

D'altra banda, per motius tècnics, tampoc es podia abaixar més la temperatura ja que els assaigs s'han dut a terme durant el període estival i de tardor, amb temperatures ambientals elevades, de fins a 24°C. Per escalfar el líquid no sorgeix cap problema ja que la resistència elèctrica que s'utilitza per a aquesta finalitat permet escalfar-lo fins a la temperatura desitjada. En canvi, el refredament del líquid, el qual es realitza amb ampolles d'aigua glaçades, és limitat.

A més, la raó per la qual no s'han pres més valors intermedis entre temperatures és perquè la precisió dels assaigs no és tan alta com per pretendre observar diferències de viscositat entre dues temperatures molt properes.

#### Determinació de la viscositat

Amb l'objectiu de calcular la viscositat de les diferents mescles de salmorra es segueix el procediment següent:

1. Es fa circular aigua destil·lada, de la qual es coneix la viscositat, fins a aconseguir una situació d'equilibri, és a dir, que ambdós dipòsits principals es trobin plens en tot moment (veure Figura 13). Això permet que la pèrdua de càrrega entre dipòsits sigui coneguda. Arribat a aquest punt, es mesura el cabal per volumetria. Per fer-ho possible, es tanca la vàlvula que es troba a la sortida del sobreeixidor 2 i es mesura el temps que es triga en omplir un cert volum en aquest mateix sobreeixidor. Aquest volum de líquid és el mateix que passa per la canonada, que al estar el dipòsit 2 ple, fa vessar el líquid d'aquest al sobreeixidor.

Els sensors dins del sobreeixidor 2 són els encarregats de mesurar el nivell d'aigua. El *datalogger* enregistra aquests nivells cada segon, així com la temperatura. Posteriorment és possible tractar aquestes dades i conèixer la velocitat de pujada del nivell d'aigua, que multiplicat per l'àrea del sobreeixidor dóna com a resultat el cabal.

2. Es calcula el coeficient de fricció de Darcy-Weisbach tenint en compte les pèrdues de càrrega locals. En aquest cas es considera que el coeficient de pèrdues de càrrega localitzades ( $\lambda$ ) a l'entrada de la canonada al dipòsit 2 és igual a la unitat. Això és degut a la hipòtesi de la frenada completa del flux quan aquest arriba al dipòsit 2. En el cas de l'entrada a la canonada des del dipòsit 1, les pèrdues de càrrega locals es consideren negligibles ja que la canonada té una certa longitud dins del dipòsit evitant pèrdues de càrrega en aquesta secció. Per tant, el coeficient de fricció és calculat amb l'equació següent:

$$f = \frac{\Phi}{L} \cdot \left( \frac{\Delta H}{\frac{v^2}{2 \cdot g}} - 1 \right)$$

On:

- $\Phi$ : és el diàmetre de la canonada (m).
- $f$ : és el coeficient de fricció de Darcy-Weisbach.
- $v$ : és la velocitat de circulació (m/s) (deduïda a partir del cabal).
- $L$ : és la longitud de la canonada (m).
- $\Delta H$ : és la pèrdua de càrrega (m).

Com que la finalitat és calcular la viscositat, és necessari que el comportament del flux depengui d'aquesta i, per tant, del nombre de Reynolds. Dit això, es calcula la rugositat absoluta de la canonada ( $k$ ). En el cas de trobar-se en règim turbulent intermedi, es calcula mitjançant l'equació de Colebrook-White:

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

On:

- $Re$ : és el nombre de Reynolds.
  - $k$ : és la rugositat absoluta de la canonada (m).
3. Es fa circular la primera mescla de salmorra fins a assolir l'equilibri i, posteriorment, es mesura el cabal i la temperatura de la mateixa manera que s'ha explicat en el punt 1.

4. Ja coneguda la rugositat de la canonada, s'utilitza la fórmula de Colebrook-White per calcular el nombre de Reynolds en cas d'estar en règim turbulent intermedi o l'expressió següent si s'està en règim laminar:

$$Re = \frac{64}{f}$$

5. Posteriorment, es calcula la viscositat cinemàtica de la salmorra amb l'equació següent:

$$\nu = \frac{v \cdot \Phi}{Re}$$

On:

- $\nu$ : és la viscositat cinemàtica ( $m^2/s$ ).
6. Es torna a començar pel punt 3 per a cadascuna de les diferents mescles de salmorra (diferents concentracions), diferents temperatures i per ambdós tubs.

## 5 INSTAL·LACIÓ EXPERIMENTAL

Per a la realització d'aquest estudi s'ha construït un circuit hidràulic tancat pel qual circulen els diferents líquids (aigua i salmorra) utilitzats en l'experiment. Aquest es troba al Laboratori d'Hidràulica i Mecànica de Fluids de l'Institut de Recerca FLUMEN de la UPC-Barcelona TECH.

### 5.1 DIPÒSITS PRINCIPALS I SOBREEIXIDORS

En aquesta instal·lació es disposa de dos dipòsits rectangulars de PVC. El dipòsit 1 té una superfície de 76,9 cm x 75,6 cm i 45 cm d'alçària. El dipòsit 2 té una superfície de 77,2 cm x 75,6 cm i una alçària de 34,9 cm. Aquestes dimensions han estat escollides per tal de que les mesures dels cabals fossin les més idònies possibles per dur a terme aquest experiment i que, a més a més, s'adaptés el millor possible a l'espai disponible del laboratori. Per tant, la diferència de cota de la superfície de líquid entre els dos dipòsits quan estan plens és de 10,1 cm, de tal manera que la diferència de pressió fa circular el líquid d'un dipòsit a l'altre mitjançant dues canonades que els connecten.

Els dos dipòsits disposen de sobreeixidors per tal de que els nivells d'aigua o salmorra romanguin constants en tot moment quan els dipòsits estan plens. El sobreeixidor corresponent al dipòsit 1 té una superfície de 17,7 cm x 75,6 cm i una alçària de 45 cm, mentre que el corresponent al dipòsit 2 té una superfície de 18,2 cm x 75,6 cm i 34,9 cm d'alçària.



**Figura 15.** Dipòsit i sobreeixidor 1 amb salmorra en el seu interior.



El sobreexidor del dipòsit 2 s'utilitza per calcular el cabal que vessa en aquest provinent del dipòsit 2, que ha de se el mateix que el que passa per les canonades que connecten els dos dipòsits. Aquesta mesura es fa per volumetria i per això, en el sobreexidor 2, s'hi troben sensors que permeten calcular el nivell de líquid amb el temps. Cal remarcar la importància de la mesura de l'àrea del sobreexidor 2 ja que és la utilitzada per als càlculs.

## 5.2 DIPÒSIT AUXILIAR

Aquest té una capacitat per a uns 1000 l. Tant els dipòsits com els sobreexidors estan connectats a aquest amb unes canonades que retornen el líquid d'aquests elements fins al dipòsit auxiliar per gravetat. Dins del dipòsit auxiliar es troba la bomba que retorna el líquid cap al dipòsit 1 perquè no es buidi i pugui mantenir el nivell de la superfície de líquid constant.



**Figura 16.** Dipòsit auxiliar amb la bomba en el seu interior.

### 5.3 SISTEMA DE CANONADES

Els dos dipòsits principals estan connectats per dues canonades d'acer de 21,3 mm i 42,2 mm de diàmetre amb una llargada de 3,014 m i 3,012 m respectivament. Aquestes no tenen claus de pas per regular el flux. Només es disposa d'uns taps que s'utilitzen per obstruir el flux que passa per la canonada segons el tub que estigui sent utilitzat en cada moment.



**Figura 17.** Vista del circuit hidràulic des del dipòsit 2.

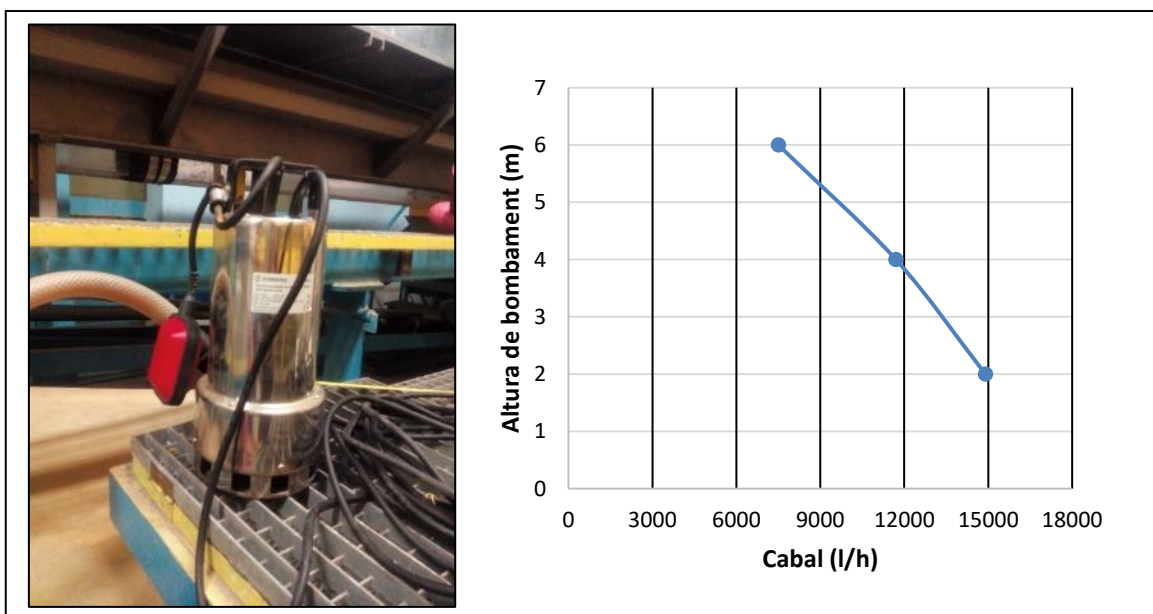
D'altra banda, la canonada que connecta la bomba amb el dipòsit 1 és d'unes 0,75 polzades. Els dos dipòsits i els sobreexidors disposen de canonades de 10 mm de diàmetre que retornen el líquid al dipòsit auxiliar. A més a més, el sobreexidor 2 disposa d'una canonada d'1,5 polzades (canonada de retorn) per poder evacuar el líquid que s'hi diposita. Totes aquestes sí disposen de vàlvules per regular els fluxos segons convingui.



**Figura 18.** Canonada de retorn en la sortida del sobreexidor 2.

#### 5.4 SISTEMA DE BOMBAMENT

Per a impulsar el líquid des del dipòsit auxiliar fins al dipòsit 1 es fa servir una bomba centrífuga de la marca 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 19 es mostra la seva corba característica.

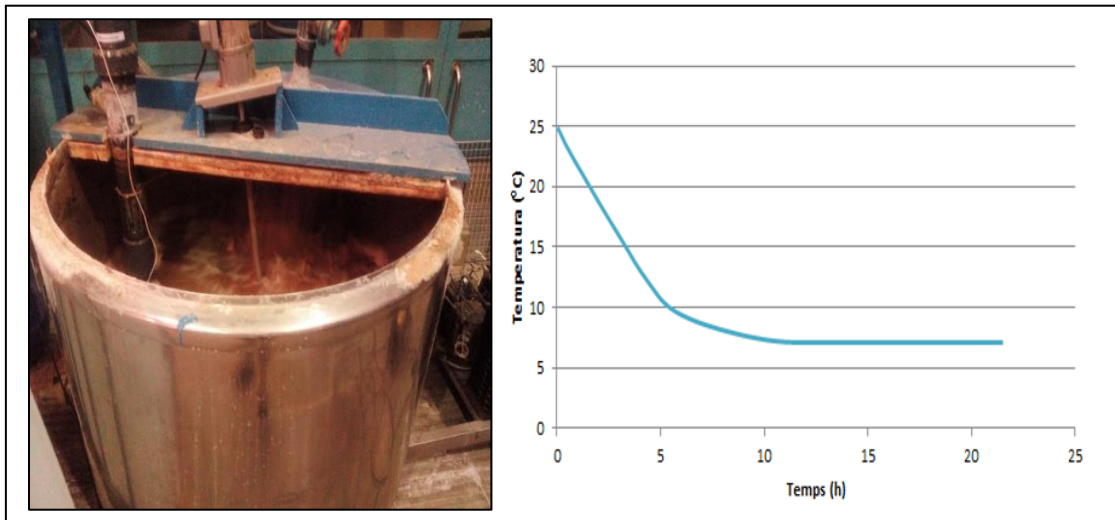


**Figura 19.** Bomba usada i la seva corba característica.

També s'utilitzen bombes més petites per tal d'omplir els dipòsits i, en general, per la gestió i trasvassaments d'aigua i salmorra.

## 5.5 TANC DE REFRIGERACIÓ

Aquest té una capacitat d'emmagatzematge superior als 700 l. Tot i que en aquest cas, principalment, s'utilitza per l'emmagatzematge i homogeneïtzació de les diferents mescles de salmorra, aquest també permet controlar la temperatura del líquid que es troba al seu interior. A més, disposa d'una pala giratòria per tal d'homogeneïtzar la temperatura del fluid.



**Figura 20.** Tanc de refrigeració i corba de refredament d'una salmorra amb concentració de 100 g/l dins del tanc frigorífic i en condicions estàtiques (únicament remoguda per les pales del tanc). Font: Triadú Galí (2016).

## 5.6 PANELL DE CANONADES

Aquesta instal·lació és un circuit tancat de 73 m de canonada, principalment composta de PVC. Aquesta consta de diversos diàmetres així com de diverses vàlvules i sensors. Aquest panell de canonades està connectat amb el tanc de refrigeració, d'on es subministra amb el líquid del seu interior mitjançant una bomba.

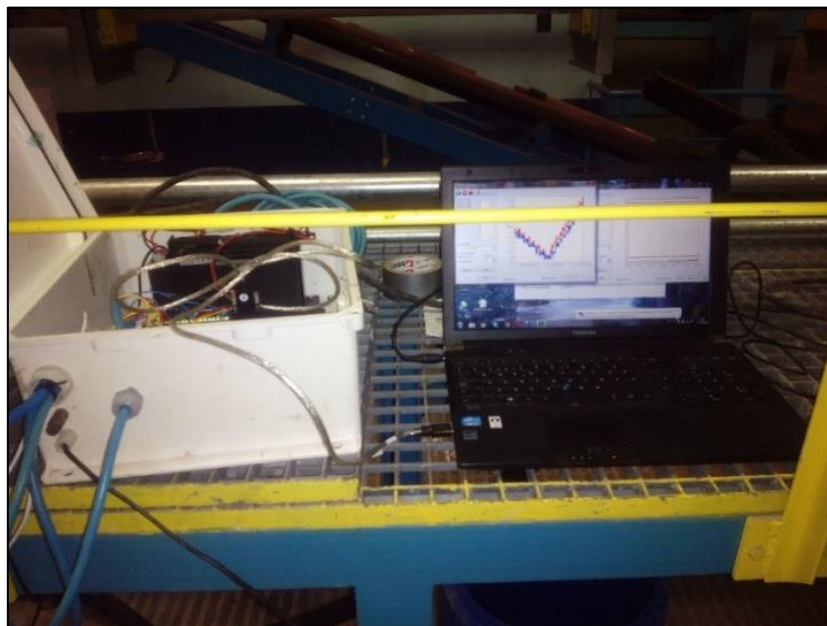
En aquest estudi experimental, el panell de canonades s'utilitza bàsicament per a aconseguir una millor homogeneïtzació de la mescla fent circular aquesta pel seu interior.



**Figura 21.** Panell de canonades.

## 5.7 APARELLS DE MESURA

S'instal·len diversos sensors de temperatura i de pressió per tal d'analitzar la temperatura i els nivells de la superfície lliure de líquid durant els assaigs. Aquests sensors que estan connectats a un *datalogger*, que és el dispositiu electrònic que s'encarrega d'enregistrar les dades mesurades per aquests sensors i transmetre-les a l'ordinador.



**Figura 22.** Datalogger i ordinador usats durant els assaigs.

A continuació es presenten les característiques tècniques dels diversos aparells de mesura:

- Sensors de temperatura: S'usen termòmetres de resistència. Aquests disposen d'una sonda en la qual es troba l'element sensible (filferro de platí) en un dels extrems i la terminal elèctrica a l'extrem contrari. Aquests estan basats en l'increment de la resistència elèctrica que pateixen els conductors metàl·lics a causa d'un augment de la temperatura del líquid amb el que es troba en contacte. En total es col·loquen dos sensors de temperatura, un al centre de cada dipòsit principal.

Aquests són el model B de la marca SENSOTEC tipus PT100. El rang de mesura es troba entre  $-200^{\circ}\text{C}$  i  $500^{\circ}\text{C}$  amb una tolerància que varia entre  $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$  per temperatures de  $0^{\circ}\text{C}$  i  $\pm 0,8^{\circ}\text{C}$  per temperatures de  $100^{\circ}\text{C}$ .



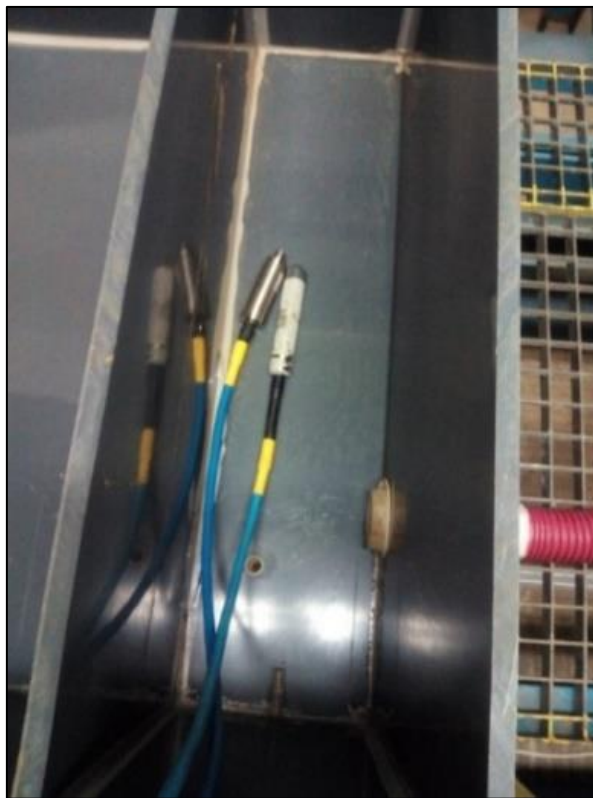
**Figura 23.** Sensor de temperatura usat.

A més a més, per conèixer puntualment la temperatura del líquid contingut en el dipòsit auxiliar, s'utilitza un termòmetre digital (una pistola làser).

- Sensors de pressió: S'utilitzen 4 sensors de pressió per la mesura dels nivells de líquid del circuit. Dos d'ells col·locats en el dipòsit 1, i els altres dos en el sobreeixidor 2 per mesurar els cabals.

Tres d'ells són de la marca MESSTECH, model MA-403. El sensor de mesura del transmissor de pressió submergible està realitzat amb ceràmica, sent la tècnica utilitzada piezoresistiva. Aquesta tecnologia consisteix en la deformació de la membrana ceràmica del sensor per l'efecte d'una pressió que desequilibra el circuit electrònic que conforma la senyal de sortida proporcional i lineal a la pressió que suporta la cèl·lula ceràmica. El sensor 4 (situat en el sobreeixidor 2) té un fons d'escala de 5 m.c.a mentre que els sensors 1 i 3 (situats en el dipòsit 1) tenen un de 250 mBar. Tots ells amb una precisió del 0,3% del fons d'escala.

L'altre sensor és de la marca MESSTECH, model XA-700. Utilitza la mateixa tècnica que els altres, la tècnica piezoresistiva. Té un fons d'escala de 350 mBar i una precisió del 0,3% del fons d'escala. Aquest correspon al sensor 2, situat en el sobreeixidor 2.



**Figura 24.** Sensors de pressió 2 i 4 a l'interior del sobreeixidor 2.

## 5.8 RESISTÈNCIA ELÈCTRICA

S'utilitza una resistència elèctrica d'immersió per apujar la temperatura de la mescla. Aquesta és capaç d'escalfar el líquid del circuit uns  $2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ , fins a aconseguir la temperatura desitjada. Aquesta es troba a l'interior del dipòsit 1, des d'on escalfa el líquid que circula pel circuit tancat fins a assolir i homogeneïtzar la temperatura en la que es vol dur a terme l'assaig. Permet assolir temperatures de fins a  $90^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 25.** Resistència elèctrica d'immersió usada.



## 6 POSADA A PUNT DEL CIRCUIT EXPERIMENTAL I CALIBRATGE DELS SENSORS DE PRESSIÓ

En aquesta secció s'explica tot el procediment seguit per a la posada a punt del circuit hidràulic. Inclou les incidències sorgides degudes al disseny de la instal·lació o altres factors que provoquen modificacions en aquesta respecte al disseny original.

A més a més, inclou el calibratge realitzat abans dels assaigs definitius dels sensors de pressió 2 i 4, encarregats de la mesura dels cabals.

### 6.1 POSADA A PUNT DEL CIRCUIT EXPERIMENTAL DEL LABORATORI

Per a la posada a punt del model del laboratori es desenvolupen una sèrie d'assaigs o proves que permeten identificar incidències o problemes en la realització d'aquests. Tots ells es realitzen amb aigua corrent.

El primer problema que sorgeix és la necessitat de més potència per part de la bomba que aporta líquid del dipòsit auxiliar al dipòsit 1. Quan s'intentava realitzar assaigs amb la canonada d'1,5 polzades, el dipòsit 1 es buidava tot i estar la vàlvula que permet l'entrada de flux a aquest en el punt de màxima obertura.

Com a conseqüència del canvi de bomba, es va haver de canviar la canonada que connecta la bomba (col·locada dins del dipòsit auxiliar) i el dipòsit 1 per una de diàmetre més gran, de 0,75 polzades.

Un cop solucionat aquest problema i havent pogut mantenir el dipòsit 1 ple sense que es buidés, es va poder observar com el diàmetre de la canonada de retorn (canonada que connecta el sobreexidor del dipòsit 2 amb el dipòsit auxiliar), encarregada de buidar el sobreexidor on es mesuren els cabals, no era suficientment gran. No es podia mantenir el nivell d'aigua constant en el sobreexidor ni evacuar-lo. És a dir, el cabal entrant al sobreexidor quan s'utilitzava la canonada d'1,5 polzades era més gran del que la canonada de retorn era capaç d'evacuar. Per aquesta raó, es va canviar la canonada de retorn per una d'1,5 polzades de diàmetre.

Per realitzar aquest canvi, es va procedir a realitzar un forat a la part posterior del sobreexidor per poder connectar la nova canonada de retorn (veure Figura 18) al no ser possible realitzar-lo

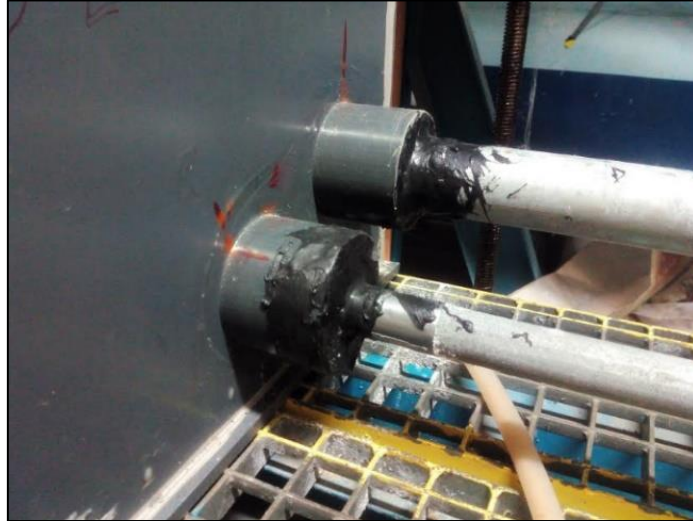
a la seva base. D'aquesta manera, la canonada de retorn passava a estar connectat del fons del sobreexidor a la part inferior d'una de les seves parets verticals.

Tot i aquest canvi, es podia observar com la pressió amb la que sortia l'aigua no era la suficient per evacuar. Per tal d'augmentar aquesta pressió es va decidir col·locar el dipòsit auxiliar, inicialment situat entre els dos dipòsits principals, al costat del sobreexidor 2.

A més a més, es va descartar col·locar un cabalímetre tal i com estava previst en el disseny original. No es va poder trobar-ne cap pel nou diàmetre de la canonada de retorn. A causa d'això, es passa de tenir dues mesures de cabal (mesura del cabalímetre i mesura per volumetria) a només tenir-ne una (mesura per volumetria). Per tal de tenir més precisió en aquesta única mesura del cabal per volumetria, es va decidir instal·lar dos sensors en lloc d'un dins del sobreexidor 2.

Una altra complicació eren les fluctuacions de la làmina d'aigua que es produïen dintre dels dipòsits principals quan el tub gros era l'assajat. Les làmines lliures d'aigua dels dipòsits no es mantenien constants a causa dels cabals amb els que es treballava. Per mitigar aquest problema, es va decidir col·locar de la manera més efectiva possible varies totxanes a les entrades d'aigua dels dipòsits principals. Amb aquesta mesura, es va aconseguir esmorteir gran part d'aquesta energia, però no completament.

Un dels problemes principals detectats d'aquesta instal·lació són les fuites que es produeixen en el contacte entre les dues canonades d'acer i els dipòsits de PVC. Les juntes entre aquests dos elements es troben recobertes de massilla de butil, material que es sol utilitzar per tancar forats o esquerdes. En aquest cas també s'utilitza per tancar les fuites que sorgeixen en aquests contactes. Aquestes apareixen en aquests punts a causa de que l'adherència d'aquests tres materials no és perfecte. Aquest problema es podria veure augmentat amb el canvi de temperatura al no tenir els materials el mateix coeficient de dilatació tèrmica i al utilitzar salmorra en els assaigs, la qual és molt corrosiva. Al no trobar una solució més satisfactòria, sempre que apareix una fuga es para l'assaig i es buiden els dipòsits per tal de tancar-la.



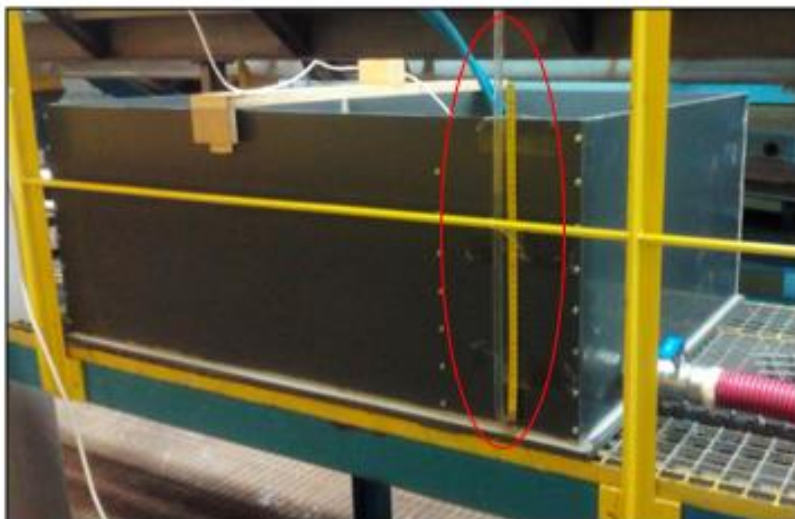
**Figura 26.** Contactes entre les canonades d'acer i el dipòsit 1 de PVC recoberts amb una pel·lícula de massilla de butil.

Una limitació que es va detectar és el rang de temperatures en el qual es podia assajar. Al no ser possible trobar un mètode més eficient per refredar el líquid del circuit, s'han utilitzat ampolles glaçades en les quals, en alguns casos, podien aparèixer petites fuites. De totes maneres, aquestes eren molt petites i menyspreables. A més, degut a la temperatura ambient, la qual durant aquestes primeres proves es trobava entre 23°C i 24°C, la temperatura mínima a la que es podien dur a terme tots els assaigs desitjats era de 16°C. Per tant, es va estar obligat a assajar a aquesta temperatura i no a 15°C, temperatura amb la que estava previst assajar inicialment.

## 6.2 CALIBRATGE DELS SENSORS DE PRESSIÓ

Els sensors de pressió situats al sobreeixidor del dipòsit 2 (sensor 2 i sensor 4) són els encarregats d'enregistrar el nivell de líquid durant els assaigs que es realitzen per mesurar el cabal. En les primeres proves amb aigua corrent es va poder observar com la mesura de la velocitat de pujada del nivell d'aigua no era la mateixa per ambdós sensors. En general, aquesta era més gran pel sensor 2 que pel sensor 4.

El calibratge es va realitzar mitjançant un calibratge estàtic. Aquest consisteix en mesurar diferents nivells d'aigua amb un piezòmetre situat al sobreeixidor amb els nivells d'aigua constants i amb la làmina lliure d'aigua inalterada.



**Figura 27.** Piezòmetre situat a una de les parets verticals del sobreeixidor del dipòsit 2.

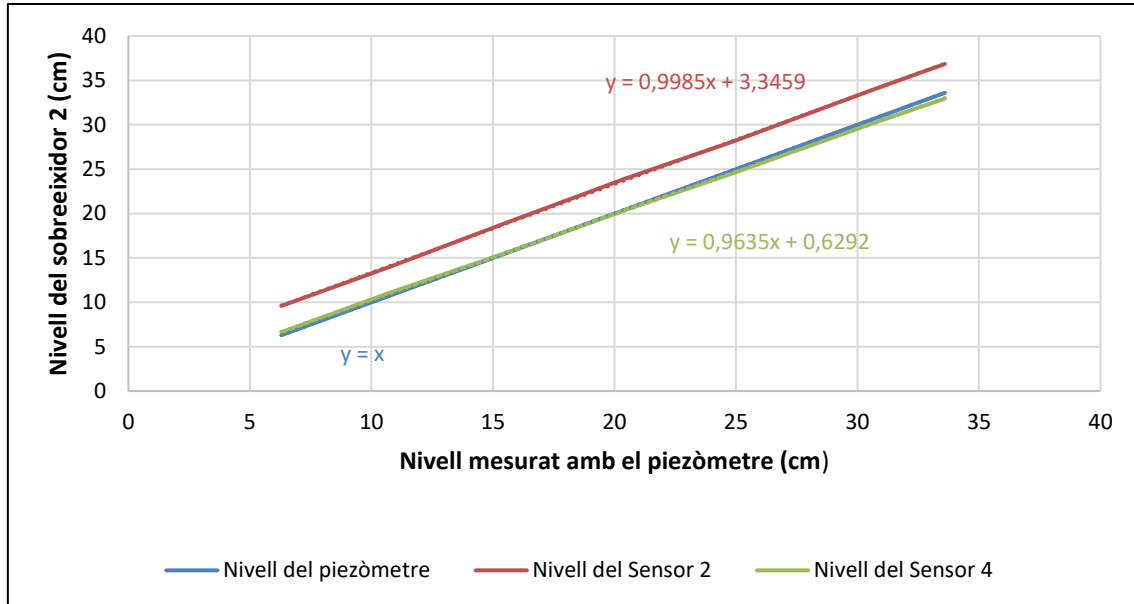
Aquests mateixos nivells apreciats amb el piezòmetre, a la vegada són mesurats pels sensors. Comparant la mesura d'aquests amb la realitzada amb el piezòmetre, és possible comprovar la veracitat de les dades enregistrades pels sensors.

A continuació es presenten els 7 nivells mesurats:

Nivell	Mesura del Piezòmetre (cm)	Mesura del Sensor 2 (cm)	Mesura del Sensor 4 (cm)
1	6,3	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.** Mesura dels nivells d'aigua amb el piezòmetre i dels dos sensors per al calibratge estàtic.

A continuació es poden observar les 3 rectes corresponents als nivells d'aigua mesurats amb el piezòmetre i els mesurats pels dos sensors. Aquestes són comparades amb la mesura realitzada amb el piezòmetre:



**Figura 28.** Rectes de la variació del nivell d'aigua mesurades amb el piezòmetre i les enregistrades pels dos sensors comparades amb la mesura realitzada amb el piezòmetre.

En la Figura 28, es pot observar com el sensor 2 mesura nivells d'aigua més elevats que aquests mesurats amb el piezòmetre i pel sensor 4. Tot i així, al ser variacions de nivell el que s'utilitza per als càlculs, el que interessa són els pendents d'aquestes rectes.

El pendent mesurat amb el piezòmetre s'imposa que sigui d'1. D'aquesta manera es pot comparar amb els dels dos sensors. El pendent del sensor 2 és de 0,9985 i el del sensor 4 de 0,9635. Per tant, el sensor 2 dona un resultat més semblant al del piezòmetre. El pendent del sensor 2 s'acosta més a 1 que no pas el del sensor 4.

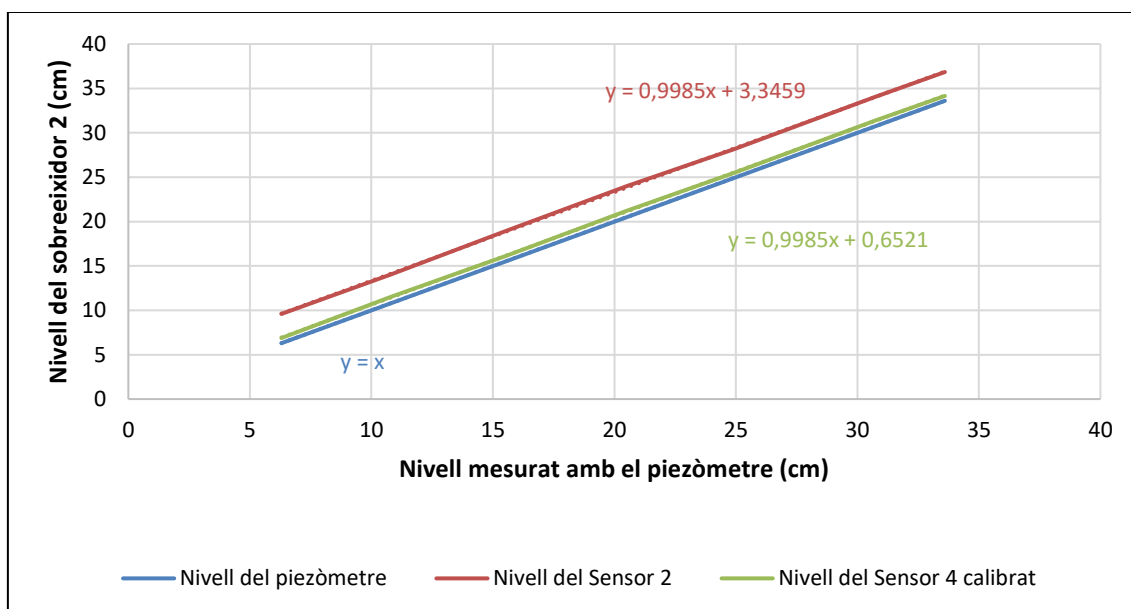
La mesura del piezòmetre és realitzada "a ull" (amb una cinta mètrica mil·limetrada) i, per tant, pot tenir algun petit error. Per aquesta raó, es decideix ajustar la mesura del sensor 4 a la mesura del sensor 2, donant d'aquesta manera la mesura del sensor 2 per vàlida.

Per tant, s'aplica un factor corrector a tots els nivells mesurats pel sensor 4. Aquest es calcula dividint el pendent del sensor 2 (0,9985) entre el pendent del sensor 4 (0,9635). D'aquesta manera, en tots els assaigs realitzats posteriorment, els nivells enregistrats pel sensor 4 són multiplicats pel factor corrector d'1,036.

A continuació es presenten els resultats amb els valors del sensor 4 calibrats:

Nivell	Mesura del Piezòmetre (cm)	Mesura del Sensor 4 calibrat (cm)
1	6,3	6,9
2	10,8	11,5
3	15,6	16,2
4	20,5	21,2
5	24,9	25,5
6	30,7	31,3
7	33,6	34,1

**Taula 4.** Mesura dels nivells d'aigua observats amb el piezòmetre i els enregistrats amb el sensor 4 un cop calibrat.



**Figura 29.** Rectes de la variació del nivell d'aigua mesurades amb el piezòmetre i les enregistrades pels dos sensors comparades amb la mesura realitzada amb el piezòmetre un cop calibrat el sensor 4.

Com es pot veure en la Figura 29, d'aquesta manera s'aconsegueix que el pendent de les rectes d'ambdós sensors sigui el mateix i a la vegada molt propers a l'obtingut amb el piezòmetre. Amb

aquest calibratge, la velocitat de pujada del nivell d'aigua mesurada i, en conseqüència, el cabal circulant hauria de ser la mateixa independentment del sensor que la mesurés. Més endavant, en els resultats dels assaigs, es pot veure que això no es produeix. En general, un cop realitzat el calibratge, els cabals resultants del sensor 4 passen a ser més grans que els del sensor 2. Per aquesta raó, es decideix tractar les dades dels dos sensors de manera independent. D'aquesta manera, a l'hora de dur a terme el càlcul de la viscositat d'una mescla es considerarà una rugositat absoluta diferent en funció del sensor que s'hagi utilitzat per calcular-la.

Aquesta decisió genera una contradicció, i és que la rugositat d'una canonada és un valor únic que evidentment no depèn de l'equip que el mesuri. Malgrat tot, la determinació d'aquesta rugositat requereix d'una enorme precisió en la mesura dels sensors (veure ESTUDI DE SENSIBILITAT) que els aparells de mesura utilitzats en aquest treball no poden donar.

Com que no se sap del cert quin dels dos sensors mesura amb més encert, es decideix no mesclar les dades i dur a terme els càlculs en paral·lel.

A més, l'objectiu principal d'aquest projecte és el càlcul de la viscositat de diferents mescles de salmorra, i no pas el càlcul de la rugositat de la canonada. Per tant, donat que per al càlcul d'aquestes viscositats no s'han creuat dades entre sensors, el resultat final és el mateix que s'hagués obtingut si s'haguessin fet els assajos de manera independent. Primer amb un sensor i després amb l'altre.

D'altra banda, el càlcul de la viscositat es basa en un procés invers al del càlcul de la rugositat absoluta de la canonada (veure METODOLOGIA). Això fa pensar que les diferències entre sensors en el càlcul de la rugositat es poden veure compensades a posteriori, de tal manera que la viscositat obtinguda amb un sensor i amb l'altre per a una mateixa mescla coincideixin.

Aquests resultats es poden veure a DISCUSSIÓ DELS RESULTATS.

## 7 CAMPANYA EXPERIMENTAL

Aquesta campanya experimental consta de dos tipus principals d'assaigs, els dos amb la finalitat de determinar la viscositat de la salmorra. El primer és el realitzat amb el circuit hidràulic, en el qual es mesuren els cabals per trobar els diferents valors de la viscositat. El segon és el realitzat amb el viscosímetre d'Ostwald, també amb la finalitat d'obtenir les diferents corbes viscositat-temperatura per a cada mescla de salmorra.

Les diferents concentracions i densitats de cada mescla que s'utilitzen en aquests assaigs es determinen al laboratori d'Enginyeria Ambiental, espai cedit pel grup de recerca Gemma. Per calcular la concentració és necessari el % en massa de sòlids i la densitat de cada mescla. Aquests paràmetres es calculen diversos cops i es realitza la seva mitjana aritmètica per obtenir un únic valor. Multiplicant el % en massa per la densitat, s'obté la concentració total de sòlids de la mescla.

Per determinar el % en massa, és necessari conèixer el pes del recipient on s'introdueix la mostra per pesar-la, el pes de la mostra (pes de la dissolució líquida i dels sòlids en suspensió) i el seu pes sec (pes de sòlids que conté la mescla). Per determinar aquest últim es deixa la mostra 24 hores al forn a 100°C de tal manera que els sòlids de la mescla són els únics que queden retinguts en el recipient. Finalment, es divideix el pes sec entre el pes total de la mostra per conèixer el % en massa de la mescla.

Pel que fa a la densitat, es calcula dividint el pes de la mostra entre el seu volum. Aquest últim es pot conèixer amb precisió ja que ve donat per la pipeta, eina que permet prendre un cert volum de mostra. En aquest cas s'usen volums de 20 ml, 25 ml o 30 ml, els quals asseguren una certa exactitud. Tot i ser sensibles per la manca d'una gota de mescla que pugui haver quedat adherida a la paret de la pipeta quan s'introdueix la mescla en el recipient on es calcula el seu pes, no presenta variacions molt importants com podria passar si s'utilitzessin volums de 5 ml.

Amb el mètode emprat en el laboratori no ha sigut possible determinar la densitat en funció de la temperatura. Per aquesta raó, s'utilitza un únic valor de densitat en els càlculs per a cada una de les mescles.

Aquests càlculs de concentració i densitat també es realitzen per a les mostres filtrades, és a dir, sense sòlids en suspensió. Aquests s'usen únicament per al càlcul de la viscositat amb el viscosímetre d'Ostwald ja que els tubs capil·lars d'aquest no permeten l'entrada d'aquests sòlids



(podrien malmetre l'aparell). També, degut a la necessitat de conèixer la densitat de l'aigua corrent per motius que s'expliquen més endavant, se'n realitza un assaig.

A continuació es mostren els resultats obtinguts:

Mostra	Concentració de la mostra (g/l)	Concentració de la mostra filtrada (g/l)	Densitat de la mostra (kg/m <sup>3</sup> )	Densitat de la mostra filtrada (kg/m <sup>3</sup> )
1	331	330	1202	1203
2	326	323	1198	1199
3	261	262	1160	1164
Aigua corrent	-	-	995	-

**Taula 5.** Concentracions i densitats de les diferents mostres de salmorra i aigua corrent.

Com es pot observar en la Taula 5, la concentració de sòlids total de la mescla sense filtrar és molt semblant a la de la mescla filtrada. Pel que fa a la densitat, també són molt semblants entre elles però en aquest cas la densitat de la mostra filtrada sempre és superior al de la mostra sense filtrar. Això podria ser a causa de que el pes específic del sòlid insoluble és més petit que el pes específic de la sal dissolta en aigua. Com que la precisió que s'obté en aquests assaigs no és menor a 1 kg/m<sup>3</sup> per a tots els casos, això no es podria confirmar ja que les diferències són mínimes.

## 7.1 ASSAIGS AMB EL CIRCUIT HIDRÀULIC

En total hi consten 28 assaigs, tots ells sotmesos a condicions de temperatura i de concentració de sal diferents. Degut a la importància de l'ordre dels assaigs, aquests s'expliquen cronològicament per tal de poder entendre millor els resultats finals.

Primerament, es fa circular aigua destil·lada, de la qual es coneix la viscositat, fins a aconseguir una situació d'equilibri. S'arriba a aquesta quan ambdós dipòsits principals es troben plens en tot moment. Arribat a aquest punt, es mesura el cabal per volumetria. Per fer-ho possible es tanca la vàlvula que es troba a la sortida del sobreeixidor 2 i es mesura el temps que es triga en

omplir un cert volum al sobreexidor. Per evitar possibles errors en la mesura dels sensors, es comença a mesurar el cabal quan el nivell d'aigua es troba per sobre d'aquests.

Quan el sobreexidor es troba gairebé ple, s'obre la vàlvula per buidar-lo. Tots els instants en els que es tanca i s'obre la vàlvula són anotats respecte un temps base per tal de facilitar el tractament de dades que es realitza posteriorment. Aquests temps es poden consultar en l'ANNEX A: DADES PRESES AL LABORATORI (CIRCUIT HIDRÀULIC).

Els sensors situats dins del sobreexidor 2 són els encarregats de mesurar el nivell de líquid, mentre que el *datalogger* enregistra aquests nivells cada segon. D'aquests, s'ajusta una recta nivell-temps de la qual el seu pendent és la velocitat de pujada del nivell de líquid. El cabal final buscat resulta de la multiplicació de la velocitat de pujada del nivell per l'àrea del sobreexidor.

En general, la temperatura ambient, i per tant la del líquid, s'ha trobat entre els 19°C i els 23°C. Per tal d'aconseguir les temperatures desitjades de 16°C, 20°C, 25°C i 30°C, es fan servir mètodes diferents segons es vulgui apujar-la o abaixar-la. Per apujar la temperatura s'utilitza una resistència elèctrica situada en el dipòsit 1. Per abaixar-la s'utilitzen varies ampolles d'aigua glaçades que es situen dintre del dipòsit auxiliar per tal de que aquestes no interfereixin en la realització dels assaigs. Tant la resistència com les ampolles glaçades, també s'usen per mantenir la temperatura pràcticament constant durant tot l'assaig. La temperatura no és exactament constant durant aquest ja que controlar-la resulta ser un dels aspectes més complicats d'aquest procediment. Tot i així, s'assegura que no varia més de quatre dècimes de grau durant l'assaig. Per tant, tot i que s'indiqui una temperatura concreta, la temperatura real durant l'assaig pot variar  $\pm 0,2$  °C.



**Figura 30.** Vista del dipòsit 2 (esquerra de la imatge) i del dipòsit auxiliar (dreta de la imatge) connectats amb la canonada de retorn.

Pel que fa a la concentració de sal, s'han realitzat 3 mescles de salmorra de diferent concentració. S'ha començat amb la concentració més alta (331 g/l de mescla) i s'ha acabat amb la més baixa (261 g/l de mescla).

Prèviament, abans dels assaigs definitius, es realitzen diversos assaigs amb aigua corrent per comprovar el bon funcionament de la instal·lació però no són explicats en aquesta secció al no tenir cap rellevància en els resultats finals.

Els primers assaigs són els realitzats amb l'aigua destil·lada per tal de calibrar la rugositat absoluta de les canonades. Posteriorment, es duen a terme els assaigs amb la mostra de salmorra de 331 g/l amb la finalitat de trobar les viscositats d'aquesta i tot seguit es realitzen els assaigs corresponents a la mostra de salmorra de 326 g/l.

Abans de continuar calculant la viscositat de la tercera mostra de salmorra, sorgeix la necessitat de calibrar novament la rugositat absoluta de les canonades a causa de l'aparició de cristalls de sal a les parets d'aquestes. Abans però, s'utilitza vinagre per intentar dissoldre la sal acumulada, de la qual no s'aconsegueix eliminar la seva totalitat.

Al no disposar de més aigua destil·lada, s'utilitza aigua corrent per obtenir les noves rugositats absolutes de les canonades. La densitat de l'aigua corrent utilitzada per als càlculs és la mesurada al laboratori i és única. Al ser també necessària la seva viscositat per a cada temperatura, s'utilitza la calculada amb el viscosímetre d'Ostwald, la qual és molt propera a la de l'aigua destil·lada.

Finalment, es procedeix a calcular la viscositat de la mostra de salmorra de 261 g/l amb les noves rugositats absolutes.

Els assaigs que es presenten a continuació es troben en ordre cronològic en el qual s'han dut a terme, tot indicant la data en el que es realitzen per facilitar l'enteniment d'aquests. També es troben detallats en forma de taules, gràfiques i comentaris, separats per les concentracions i les temperatures corresponents.

### 7.1.1 ASSAIGS AMB AIGUA DESTIL·LADA

A continuació es mostren els 4 assaigs realitzats amb aigua destil·lada amb la finalitat de determinar la rugositat absoluta de les canonades. Tots els cabals obtinguts en aquests tenen associada una rugositat absoluta concreta de les quals després en surt un valor únic per canonada i sensor per tal de determinar la viscositat de la salmorra.

En l'ASSAIG 1 es presenten tots els cabals calculats amb l'aigua destil·lada, corresponents als assaigs 1, 2, 3 i 4. A més, per entendre millor com es determina el cabal, inclou un exemple de càlcul de cabal. Tot els valors de rugositat absoluta es poden consultar en la secció DISCUSSIÓ DELS RESULTATS.



**Figura 31.** Dipòsit amb l'aigua destil·lada utilitzada en aquests assaigs.

**ASSAIG 1**

ASSAIG 1	
Mostra	Aigua destil·lada
Concentració (g/l)	-
Temperatura (°C)	20
Data	23/09/2016
Aforaments de cabal pel tub prim	3
Aforaments de cabal pel tub gros	3

Taula 6. Característiques de l'assaig 1.

Amb l'ànima de mostrar com es determina la velocitat de pujada del nivell d'aigua (o de salmorra) per al càlcul de cadascun dels cabals, a continuació es mostra un exemple. Aquests corresponen a les velocitats de pujada del nivell d'aigua destil·lada del sobreeixidor 2 per dos aforaments de cabal, un realitzat amb el tub prim (Figura 32) i un altre realitzat amb el tub gros (Figura 33). Els dos corresponen a aforaments per a aquest mateix assaig a 20°C.

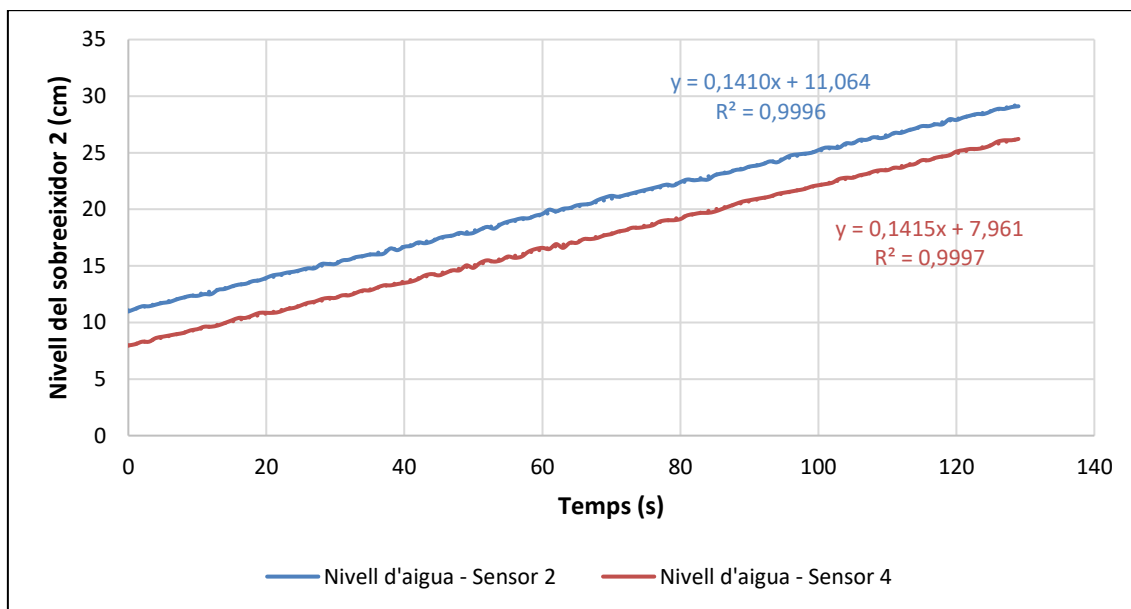
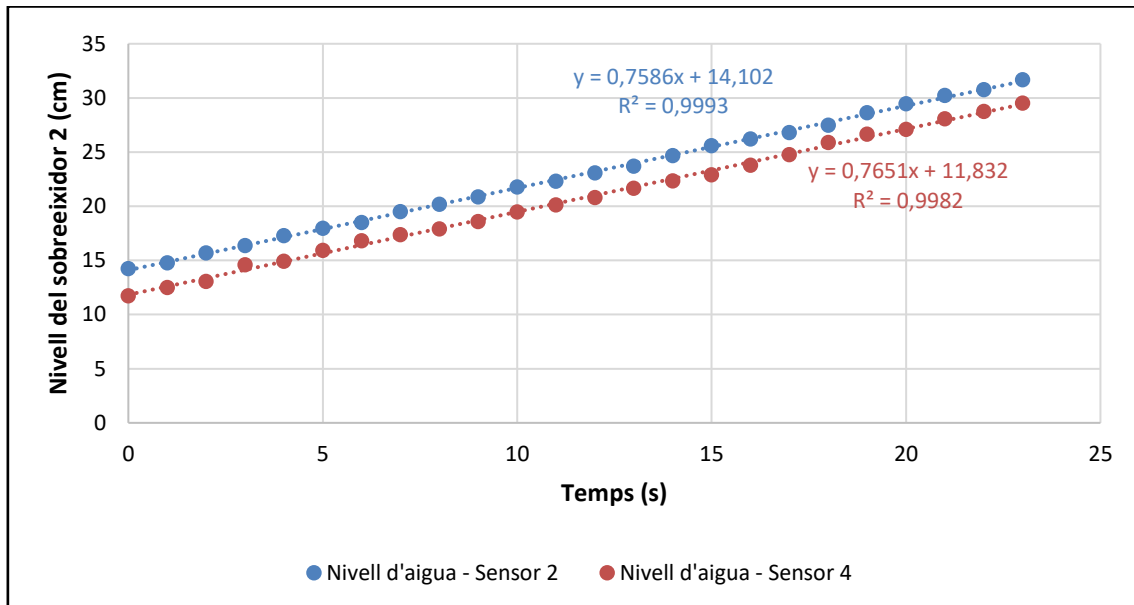


Figura 32. Nivell d'aigua al sobreeixidor 2 en funció del temps per un aforament de cabal realitzat amb el tub prim a 20°C.

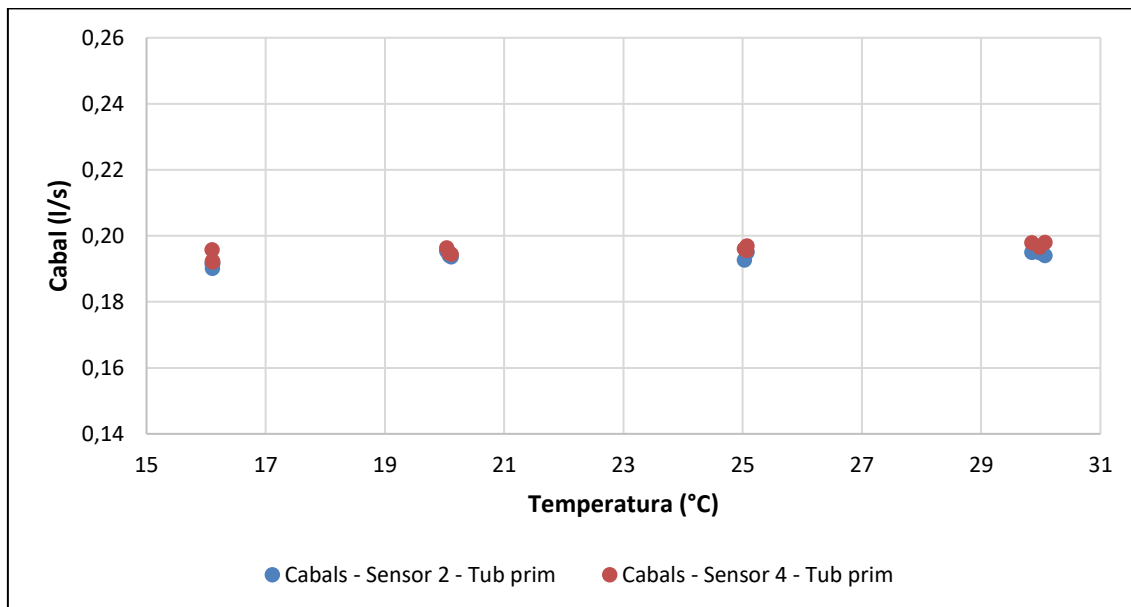


**Figura 33.** Nivell d'aigua al sobreexidor 2 en funció del temps per un aforament de cabal realitzat amb el tub gros a 20°C.

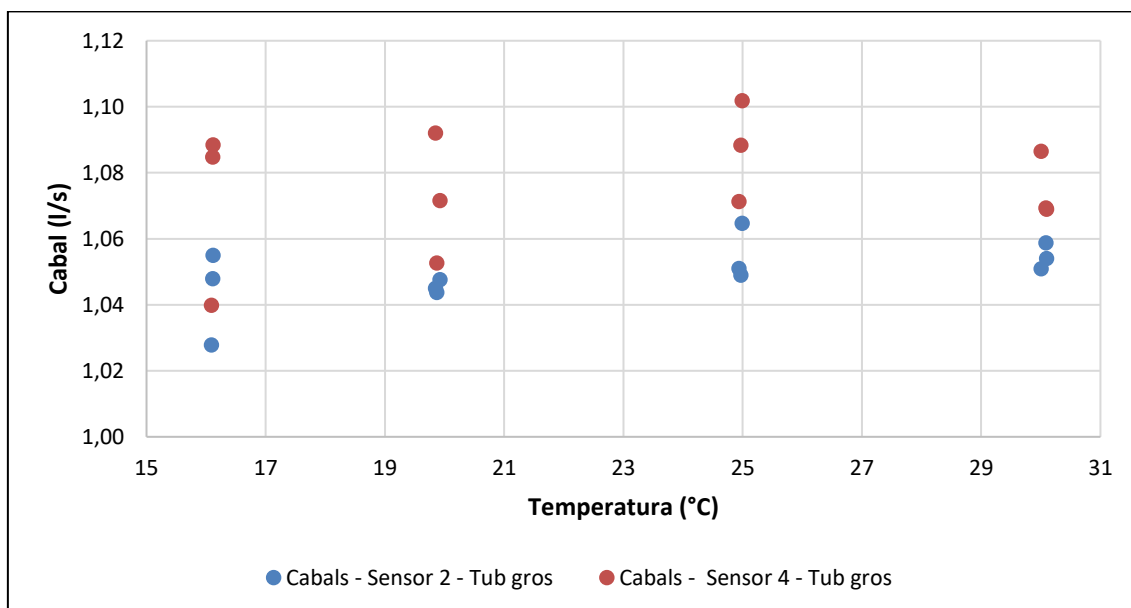
Els pendents de les rectes ajustades a les dades obtingudes de la Figura 32 i de la Figura 33 corresponen a la velocitat de pujada del nivell d'aigua del sobreexidor 2 en cm/s. Multiplicant aquests valors per l'àrea del sobreexidor, s'obtenen els cabals. Un cop calculats aquests, es procedeix a analitzar-los.

En aquest primer assaig realitzat amb aigua destil·lada ja es pot percebre una diferència significativa en la dispersió dels cabals segons la canonada. Per la canonada de 21,3 mm de diàmetre, la dispersió dels valors dels cabals és més petita que la associada a la de 42,2 mm de diàmetre (veure Figura 34 i Figura 35).

Els valors dels cabals són de l'ordre d'1 l/s pel tub gros i de 0,19 l/s pel tub prim. A més a més, generalment, els cabals mesurats pel sensor 4 són mes grans que els mesurats pel sensor 2. Aquesta és la raó principal per la qual les dades enregistrades per cadascun d'ells es tenen en compte per separat.



**Figura 34.** Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb aigua destil·lada amb el tub prim.



**Figura 35.** Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb aigua destil·lada amb el tub gros.

Un dels principals aspectes que s'observen i s'ha de tenir en compte és el poc temps (entre 20 i 25 segons) que triga en omplir-se un cert volum del sobreixidor quan és el tub gros l'assajat (veure Figura 33). Això contrasta amb els 2-3 minuts que es triga amb el tub prim per omplir un volum semblant (veure Figura 32). Aquest fet implica un menor nombre de dades enregistrades

(nivells d'aigua) quan s'assaja amb el tub gros respecte les dades enregistrades quan s'assaja amb el tub prim.

Quan s'utilitza el tub gros també apareixen fluctuacions considerables en el sobreeixidor. En canvi, pel tub prim, la làmina lliure d'aigua resta inalterada, pujant el nivell d'aigua d'una manera constant. Aquest fenomen s'uneix a l'anterior com un dels responsables de la dispersió dels valors dels cabals.



**Figura 36.** Fluctuacions en la làmina lliure d'aigua del sobreeixidor 2 produïdes pel cabal que aporta el tub gros.

Un cop calculades les rugositats absolutes corresponents a cada tub, es poden observar diferències considerables entre el tub prim i el tub gros. La majoria dels valors de la rugositat de la canonada de menor diàmetre es troben entre 0,15 mm i 0,20 mm. D'altra banda, per la canonada de major diàmetre, la majoria d'aquests valors es troben entre 0,15 mm i 0,30 mm. A més a més, els valors de la rugositat del sensor 2 són majors que els del sensor 4 a causa de que les mesures dels cabals del sensor 4 són, majoritàriament, més grans que les del sensor 2. Tots aquests resultats es mostren en la secció DISCUSSIÓ DELS RESULTATS (Figura 55 i Figura 56).



**ASSAIG 2**

<b>ASSAIG 2</b>	
<b>Mostra</b>	Aigua destil·lada
<b>Concentració (g/l)</b>	-
<b>Temperatura (°C)</b>	25
<b>Data</b>	23/09/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	3
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

**Taula 7.** Característiques de l'assaig 2.

Les observacions de l'assaig 2 són anàlogues a les de l'assaig 1.

**ASSAIG 3**

<b>ASSAIG 3</b>	
<b>Mostra</b>	Aigua destil·lada
<b>Concentració (g/l)</b>	-
<b>Temperatura (°C)</b>	16
<b>Data</b>	26/09/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	3
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

**Taula 8.** Característiques de l'assaig 3.

Les observacions de l'assaig 3 són anàlogues a les dels assaigs 1 i 2.

**ASSAIG 4**

ASSAIG 4	
<b>Mostra</b>	Aigua destil·lada
<b>Concentració (g/l)</b>	-
<b>Temperatura (°C)</b>	30
<b>Data</b>	27/09/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	3
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

**Taula 9.** Característiques de l'assaig 4.

Les observacions de l'assaig 4 són anàlogues a les dels assaigs 1, 2 i 3.

### 7.1.2 ASSAIGS AMB SALMORRA AMB CONCENTRACIÓ DE 331 g/l

Es realitzen un total de 6 assaigs dels quals només 4 són els utilitzats per als càlculs posteriors. Aquesta mescla ja havia sigut preparada i homogeneïtzada dins del tanc refrigerador diversos dies abans dels primers assaigs. Tot i així, es va observar una important acumulació de sal i d'altres sòlids al fons dels dipòsits, indicant que la mescla havia arribat al seu límit de saturació.



**Figura 37.** Sals i sòlids insolubles acumulats en el fons del dipòsit 1 després de la utilització de la salmorra amb concentració de 331 g/l.

En l'ASSAIG 7 es mostren tots els cabals calculats amb aquesta mescla de salmorra, cabals corresponents als assaigs 7, 8, 9 i 10. Tots els valors de viscositat es poden consultar en la secció DISCUSSIÓ DELS RESULTATS.

### **ASSAIG 5**

<b>ASSAIG 5</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 1
<b>Concentració (g/l)</b>	331
<b>Temperatura (°C)</b>	12
<b>Data</b>	28/09/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	0
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

**Taula 10.** Característiques de l'assaig 5.

Per refredar aquesta mescla es va utilitzar el tanc de refrigeració, del qual surt a 10°C. Degut a la temperatura ambient, que es trobava entre els 20°C i els 23°C, i a la fricció que es produeix durant el transvasament del tanc al circuit hidràulic, aquesta temperatura va augmentar fins als 12°C. Aquesta és la temperatura en la qual es va realitzar aquest assaig.

En aquest cas, al ser la diferència de temperatura de la mescla i la de l'ambient massa gran, no va ser possible mantenir la temperatura de 12°C durant el suficient temps com per realitzar tots els assaigs desitjats. Per tant, només se'n van realitzar 3, tots amb el tub gros. Aquests assaigs no es tenen en compte en els càlculs perquè no es va poder mantenir una temperatura constant.

Aquest assaig també ha sigut útil per adonar-se de l'efecte de la densitat de la salmorra en les mesures dels sensors. En aquest cas, l'ordinador està preparat per donar les mesures en m.c.a.. Al ser la densitat de la salmorra més gran que la de l'aigua, aquesta mesura no és la corresponent al nivell de líquid sinó que els valors són lleugerament més elevats. Aquest fenomen és corregit posteriorment en els càlculs multiplicant els valors dels nivells que registren els sensors per la densitat de l'aigua i dividint per la densitat del líquid assajat.

**ASSAIG 6**

<b>ASSAIG 6</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 1
<b>Concentració (g/l)</b>	331
<b>Temperatura (°C)</b>	16
<b>Data</b>	28/09/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	0
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

**Taula 11.** Característiques de l'assaig 6.

Les dades d'aquest assaig també es desestimen perquè el tap que evita l'entrada de líquid pel tub prim es trobava mal tancat. D'aquesta manera, aquest podria haver aportat cabal mentre s'assajava amb el tub gros.

**ASSAIG 7**

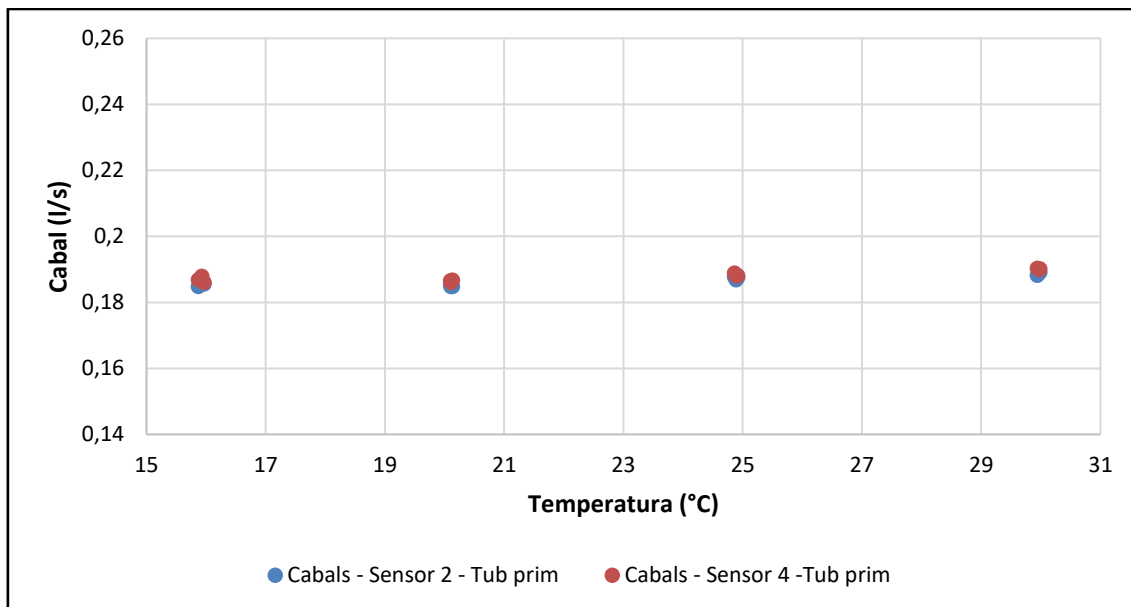
<b>ASSAIG 7</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 1
<b>Concentració (g/l)</b>	331
<b>Temperatura (°C)</b>	16
<b>Data</b>	28/09/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	3
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

**Taula 12.** Característiques de l'assaig 7.

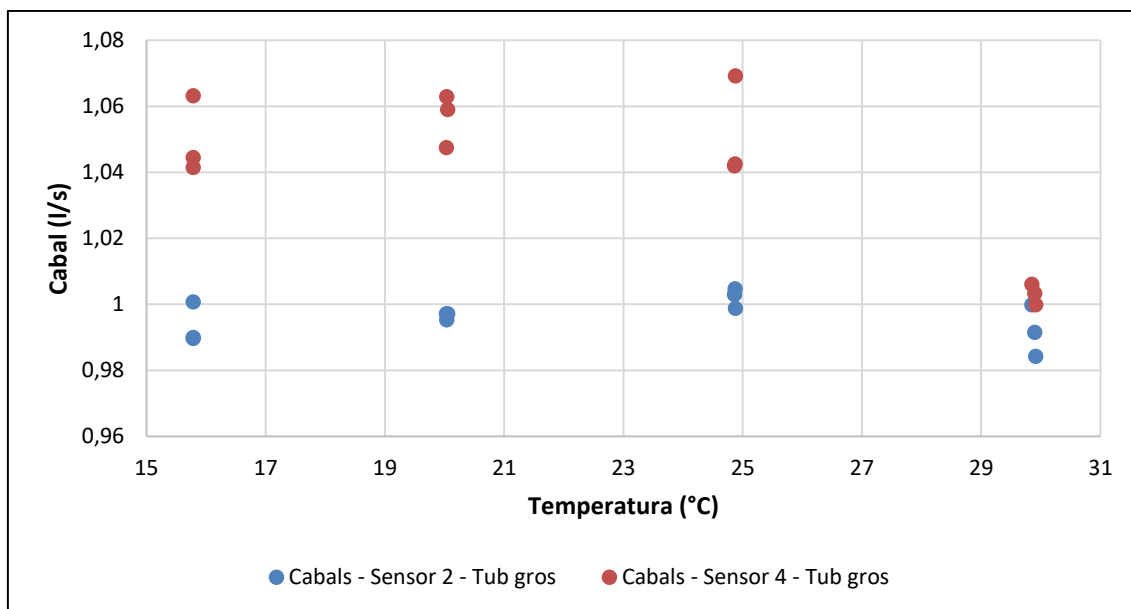
Les ampolles d'aigua glaçades, a diferència que en l'assaig a 12°C, sí que permeten mantenir una temperatura constant a 16°C fent possible les mesures desitjades.

Totes les observacions mencionades en el cas de l'aigua destil·lada pel que fa a les fluctuacions quan s'assaja amb el tub gros, també es poden aplicar a qualsevol mescla de salmorra. La dispersió dels valors dels cabals quan s'assaja amb el tub gros i el tub prim també són molt

semblants a les observades amb aigua destil·lada, sent molt més gran la dispersió pel tub gros. En aquest cas però, aquesta afecta directament als valors finals de la viscositat de la salmorra i no a la rugositat de la canonada.



**Figura 38.** Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb la salmorra 1 (331 g/l) amb el tub prim.



**Figura 39.** Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb la salmorra 1 (331 g/l) amb el tub gros.

Els valors de la viscositat d'aquesta mescla corresponents a les mesures de cabal realitzades amb el tub prim són aproximadament el doble de la viscositat de l'aigua. D'altra banda, pel tub gros, aquests valors depenen del sensor. El sensor 2 mostra valors de l'ordre de 3 o 4 cops la viscositat de l'aigua i el sensor 4 entre 1 i 2 vegades la de l'aigua. Tots aquests valors es mostren en la secció DISCUSSIÓ DELS RESULTATS .

### **ASSAIG 8**

<b>ASSAIG 8</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 1
<b>Concentració (g/l)</b>	331
<b>Temperatura (°C)</b>	20
<b>Data</b>	29/09/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	3
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

**Taula 13.** Característiques de l'assaig 8.

Les observacions de l'assaig 8 són anàlogues a les de l'assaig 7.

### **ASSAIG 9**

<b>ASSAIG 9</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 1
<b>Concentració (g/l)</b>	331
<b>Temperatura (°C)</b>	25
<b>Data</b>	29/09/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	3
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

**Taula 14.** Característiques de l'assaig 9.

Les observacions de l'assaig 9 són anàlogues a les dels assaigs 7 i 8.

**ASSAIG 10**

<b>ASSAIG 10</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 1
<b>Concentració (g/l)</b>	331
<b>Temperatura (°C)</b>	30
<b>Data</b>	03/10/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	3
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

**Taula 15.** Característiques de l'assaig 10.

Les observacions que es fan d'aquest assaig són les mateixes que les dels assaigs 7, 8 i 9 però s'observa una diferència important en els valors dels cabals corresponents al tub gros. Aquests resulten ser significativament més baixos que els resultants de les anteriors temperatures (veure Figura 39).

No és fins a la realització dels assaigs amb la mostra de salmorra de 326 g/l que es va ser conscient de que aquesta anomalia era causada per la cristal·lització de la sal. A causa d'una fuita 4 dies abans, després de l'assaig 9, la canonada es va buidar per solucionar el problema. Aquest fet va facilitar l'aparició de cristalls de sal en les parets de la canonada de 42,2 mm de diàmetre. Això provoca que els valors de viscositat d'aquesta mostra de salmorra a 30°C calculats a partir dels cabals corresponents al tub gros resultin ser entre 3,5 i 4,5 cops la de l'aigua. Aquests valors no són correctes al utilitzar la rugositat absoluta calculada amb l'aigua destil·lada abans de la cristal·lització. En realitat, aquesta rugositat és augmentada pels cristalls de sal.

### 7.1.3 ASSAIGS AMB SALMORRA AMB CONCENTRACIÓ DE 326 g/l

Per aconseguir una mescla de salmorra amb una certa concentració menor a la de 331 g/l, es va treure un cert volum d'aquesta i es va substituir per aigua. En un principi, es volia aconseguir una concentració menor a 326 g/l. L'aigua necessària per dissoldre la sal fins a aconseguir una concentració menor de 300 g/l va ser calculada però al no considerar la sal dipositada al fons del dipòsit, es va obtenir una concentració de sal major a la desitjada.

A causa d'una fuita que apareix després de l'assaig 10, es va buidar el tub prim de tal manera que també es va produir una cristal·lització a les parets d'aquest. Cal recordar que fins un cop començats els assaigs amb aquesta mostra, no es va ser conscient del fenomen de cristal·lització. Per aquest motiu, tots els assaigs presenten cabals molt menors als anteriors corresponents a la mostra de 331 g/l. Les viscositats resultants d'aquests tampoc són les correctes ja que la rugositat absoluta utilitzada en els càlculs no és la real en cap de les dues canonades.



**Figura 40.** Vista de l'interior del tub prim (esquerra) i del tub gros (dreta) amb cristalls de sal adherits a les seves parets.

A més a més, els dipòsits van ser buidats entre els assaigs 13 i 14, i entre els assaigs 15 i 16. Això va poder ocasionar diferències de rugositat entre aquests assaigs a diferents temperatures a causa de la cristal·lització.

En l'ASSAIG 12 es mostren tots els cabals calculats amb aquesta mostra de salmorra, cabals corresponents als assaigs 12, 13, 14, 15 i 16. Tots els valors de viscositat es poden consultar en la secció DISCUSSIÓ DELS RESULTATS.



**ASSAIG 11**

<b>ASSAIG 11</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 2
<b>Concentració (g/l)</b>	326
<b>Temperatura (°C)</b>	20
<b>Data</b>	11/10/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	0
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

Taula 16. Característiques de l'assaig 11.

Aquest assaig és descartat perquè les posicions dels sensors dins del sobreexidor estaven canviades respecte anteriors assaigs. D'aquesta manera podrien resultar diferents respostes en comparació a les anteriors per part de cada sensor a causa de la força amb la que cau el líquid en el sobreexidor quan s'assaja amb el tub gros, la qual podria afectar directament als sensors.

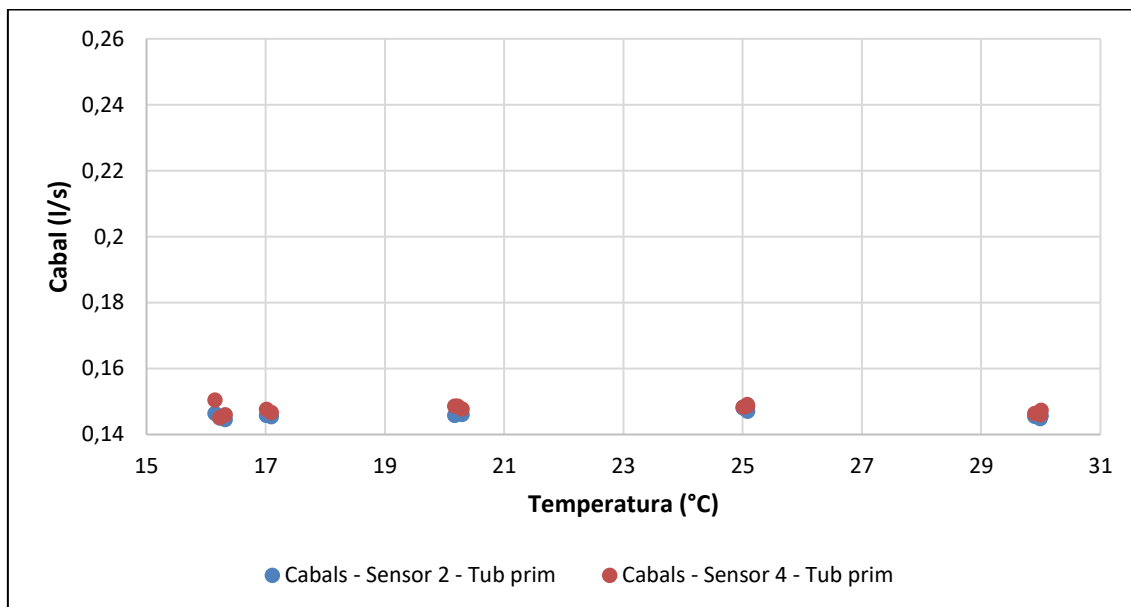
**ASSAIG 12**

<b>ASSAIG 12</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 2
<b>Concentració (g/l)</b>	326
<b>Temperatura (°C)</b>	20
<b>Data</b>	11/10/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	3
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

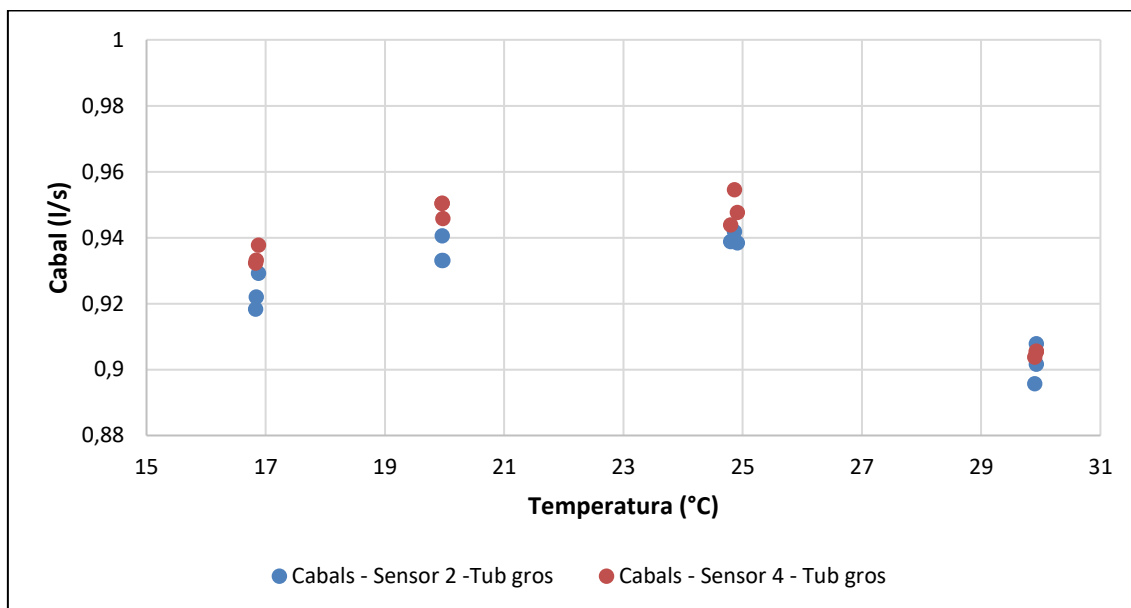
Taula 17. Característiques de l'assaig 12.

En aquest assaig, el cabal del tub prim passa a ser d'uns 0,19 l/s per la salmorra 1 a uns 0,15 l/s per la salmorra 2. Pel cas del tub gros, el cabal passa a ser d'1 l/s a uns 0,9 l/s. Com es pot observar, la cristal·lització que es produeix en el tub prim afecta d'una manera més considerable als resultats que no pas la produïda en el tub gros.

A continuació es poden veure els valors dels cabals corresponents a la salmorra 2:



**Figura 41.** Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb la salmorra 2 (326 g/l) amb el tub prim.



**Figura 42.** Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb la salmorra 2 (326 g/l) amb el tub gros.

A causa d'aquests valors tan baixos de cabal i que la rugositat utilitzada en els càlculs no és la real, les viscositats resultants són incorrectes. Les calculades amb els cabals corresponents al tub prim, resulten ser 10 vegades la viscositat de l'aigua. En el cas del tub gros, aquestes no es

poden calcular al trobar-se els valors del nombre de Reynolds en el rang corresponent al règim crític.

### **ASSAIG 13**

<b>ASSAIG 13</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 2
<b>Concentració (g/l)</b>	326
<b>Temperatura (°C)</b>	25
<b>Data</b>	11/10/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	3
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

**Taula 18.** Característiques de l'assaig 13.

Les observacions de l'assaig 13 són anàlogues a les de l'assaig 12.

### **ASSAIG 14**

<b>ASSAIG 14</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 2
<b>Concentració (g/l)</b>	326
<b>Temperatura (°C)</b>	16
<b>Data</b>	14/10/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	3
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	0

**Taula 19.** Característiques de l'assaig 14.

En aquest assaig només es van realitzar 3 aforaments de cabal pel tub prim al no ser possible mantenir la temperatura de 16°C durant el temps suficient per realitzar tots els desitjats. En conseqüència, es realitzen els assaigs per 17°C.

Les observacions de l'assaig 14 són anàlogues a les dels assaigs 12 i 13.

**ASSAIG 15**

<b>ASSAIG 15</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 2
<b>Concentració (g/l)</b>	326
<b>Temperatura (°C)</b>	17
<b>Data</b>	14/10/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	3
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

**Taula 20.** Característiques de l'assaig 15.

Les observacions de l'assaig 15 són anàlogues a les dels assaigs 12, 13 i 14. A més, en aquest es va observar que el sobreexidor del dipòsit 1 es va omplir durant el tercer aforament de cabal amb el tub prim a causa d'una mala evacuació en el sobreexidor provocant un augment del nivell de la superfície de salmorra al dipòsit 1. Aquest increment de nivell canvia les condicions establertes provocant un augment del cabal. Per tant, aquest tercer aforament de cabal amb el tub prim no es considera en els càlculs.

**ASSAIG 16**

<b>ASSAIG 16</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 2
<b>Concentració (g/l)</b>	326
<b>Temperatura (°C)</b>	30
<b>Data</b>	17/10/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	3
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	3

**Taula 21.** Característiques de l'assaig 16.

Les observacions de l'assaig 16 són anàlogues a les dels assaigs 12, 13 i 14.

#### 7.1.4 ASSAIGS AMB AIGUA CORRENT

Per tal de resoldre el problema de la cristal·lització, es va intentar dissoldre la sal amb un vinagre de 6 graus d'acidesa. Es van deixar diversos dies ambdues canonades reomplertes de vinagre tot col·locant taps per un extrem i colzes en els altres. Per aquests últims és per on es va introduir el líquid per omplir-les.



**Figura 43.** Colzes utilitzats per omplir les canonades amb vinagre.

Tot i haver calculat els litres de vinagre necessaris per omplir els dos tubs, es va observar que entrava poc més del 50% d'aquest volum degut a que l'aire que es trobava a l'interior de les canonades no era capaç de sortir.

Una vegada ja s'havia deixat el vinagre uns dies per dissoldre la sal, es va procedir a assajar amb aigua corrent per tal de determinar la nova rugositat absoluta de les dues canonades.

Com que no es coneixia com afectaria la cristal·lització en la dispersió dels resultats, a partir d'aquests assaigs, es va decidir prendre 6 mesures de cabal. Això permetia obtenir més valors de cabal i, per tant, de rugositat (en el cas dels assaigs amb aigua corrent) i de viscositat (en el cas dels assaigs amb salmorra).

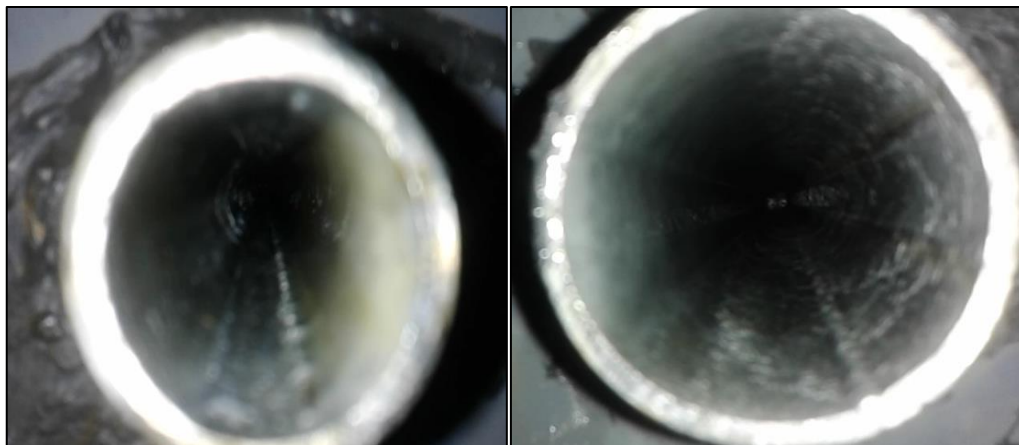
En l'ASSAIG 18 es presenten els valors de tots els cabals calculats amb l'aigua corrent, corresponents als assaigs 18, 19, 20 i 21. Els valors corresponents a la rugositat absoluta es poden veure en la secció DISCUSSIÓ DELS RESULTATS.

**ASSAIG 17**

ASSAIG 17	
Mostra	Aigua corrent
Concentració (g/l)	-
Temperatura (°C)	20
Data	02/11/2016
Aforaments de cabal pel tub prim	3
Aforaments de cabal pel tub gros	0

**Taula 22.** Característiques de l'assaig 17.

L'objectiu d'aquest assaig era conèixer l'abast de la dissolució de la sal provocada pel vinagre. En aquest es va observar un lleuger augment del cabal però sense arribar als valors anteriors a la cristal·lització o el que és el mateix, només es va aconseguir dissoldre part de la sal adherida a les parets de les canonades. Pel tub prim, aquest cabal passa de ser de 0,15 a 0,16 l/s, encara lluny dels 0,19 l/s d'abans de la cristal·lització.



**Figura 44.** Vista de l'interior del tub prim (esquerra) i del tub gros (dreta) després de la utilització del vinagre.

**ASSAIG 18**

ASSAIG 18	
Mostra	Aigua corrent
Concentració (g/l)	-
Temperatura (°C)	16
Data	04/11/2016
Aforaments de cabal pel tub prim	6
Aforaments de cabal pel tub gros	6

Taula 23. Característiques de l'assaig 18.

En aquest assaig es van dur a terme tots els aforaments de cabal desitjats. Els valors d'aquests corresponents al tub gros, després de la utilització del vinagre, són propers a 1 l/s, cabals similars als de l'aigua destil·lada abans de la cristal·lització. Per tant, es dedueix que els cristalls de sal adherits a les parets del tub gros van ser eliminats gairebé en la seva totalitat. Al contrari, com ja s'ha comentat anteriorment, el tub petit dista molt de tornar a tenir els cabals de 0,19 l/s anteriors a la cristal·lització.

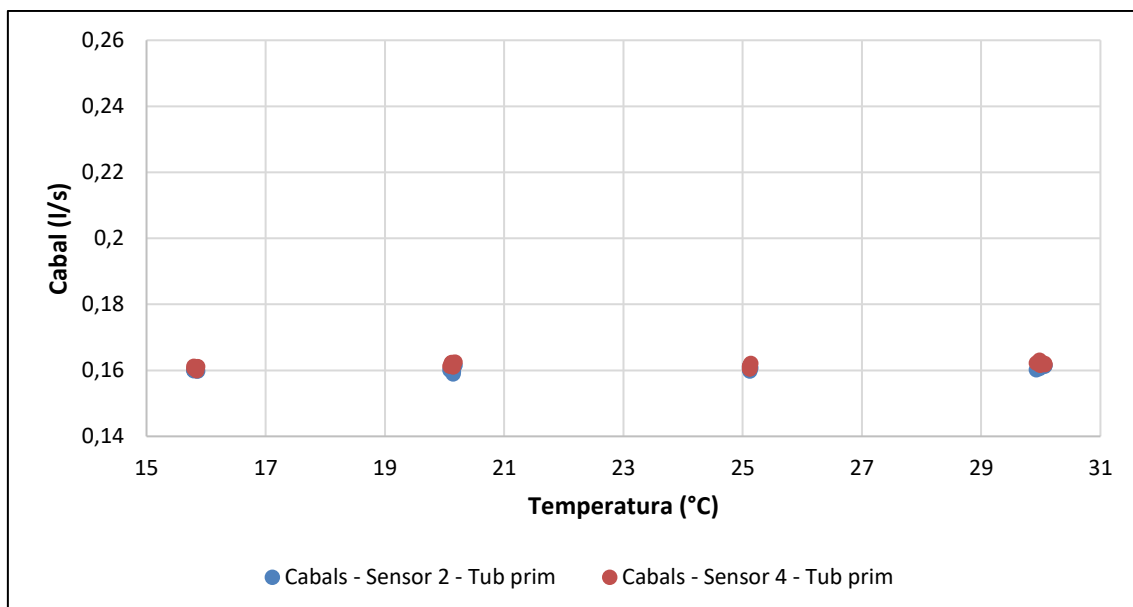
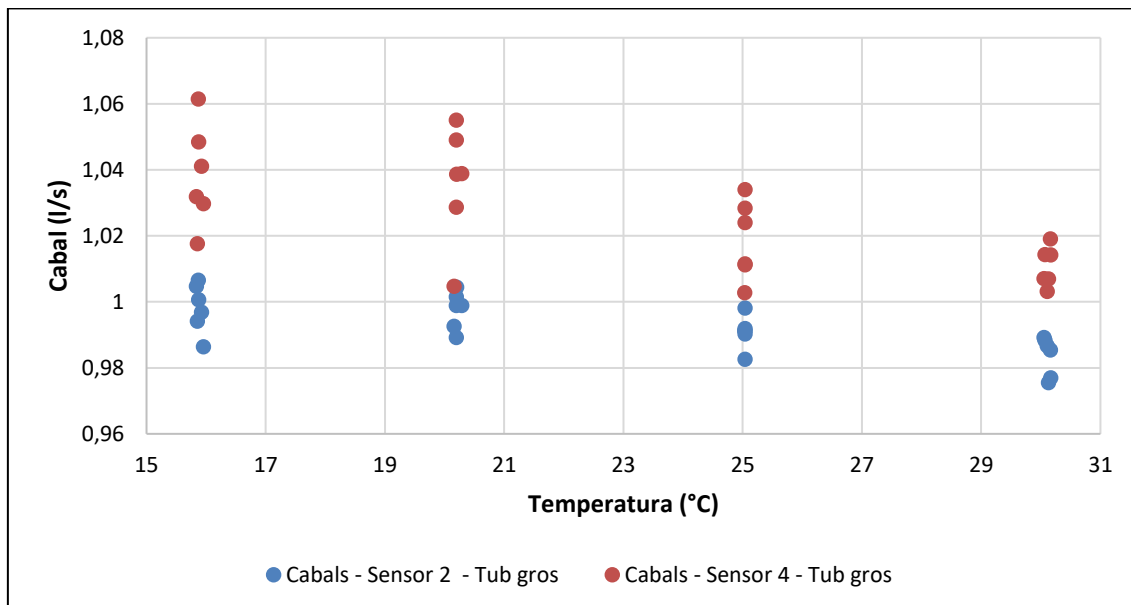


Figura 45. Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb l'aigua corrent amb el tub prim.



**Figura 46.** Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb l'aigua corrent amb el tub gros.

Després de la cristallització i la utilització del vinagre, els valors de la rugositat absoluta es situen entre els 0,65 mm i els 0,75 mm pel tub prim, i entre els 0,25 mm i els 0,55 mm pel tub gros, depenen del sensor. Tots els valors es mostren en la secció DISCUSSIÓ DELS RESULTATS (Figura 57 i Figura 58).

### **ASSAIG 19**

<b>ASSAIG 19</b>	
<b>Mostra</b>	Aigua corrent
<b>Concentració (g/l)</b>	-
<b>Temperatura (°C)</b>	20
<b>Data</b>	04/11/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	6
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	6

**Taula 24.** Característiques de l'assaig 19.

Les observacions de l'assaig 19 són anàlogues a les de l'assaig 18.



**ASSAIG 20**

<b>ASSAIG 20</b>	
<b>Mostra</b>	Aigua corrent
<b>Concentració (g/l)</b>	-
<b>Temperatura (°C)</b>	25
<b>Data</b>	07/11/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	6
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	6

Taula 25. Característiques de l'assaig 20.

Les observacions de l'assaig 20 són anàlogues a les dels assaigs 18 i 19.

**ASSAIG 21**

<b>ASSAIG 21</b>	
<b>Mostra</b>	Aigua corrent
<b>Concentració (g/l)</b>	-
<b>Temperatura (°C)</b>	30
<b>Data</b>	09/11/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	6
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	6

Taula 26. Característiques de l'assaig 21.

Les observacions de l'assaig 21 són anàlogues a les dels assaigs 18, 19 i 20.

### 7.1.5 ASSAIGS AMB SALMORRA AMB CONCENTRACIÓ DE 261 g/l

Per aconseguir una mescla de salmorra amb concentració de 261 g/l es va treure un cert volum de salmorra de 326 g/l i es va substituir aquesta pel mateix volum d'aigua. Després, com les dues anteriors, va ser homogeneïtzada utilitzant el tanc refrigerador i el panell de canonades.

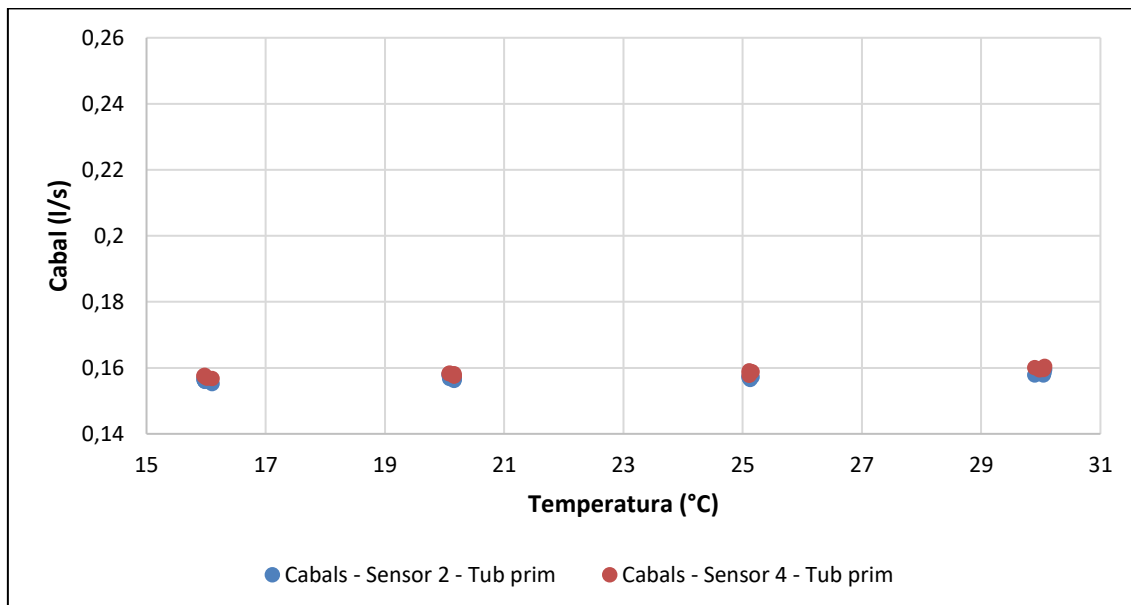
En l'ASSAIG 22 es presenten els valors de tots els cabals calculats amb aquesta mostra de salmorra, cabals corresponents als assaigs 22, 23, 24 i 25. Els valors corresponents a la viscositat es poden consultar en la secció DISCUSSIÓ DELS RESULTATS.

#### ASSAIG 22

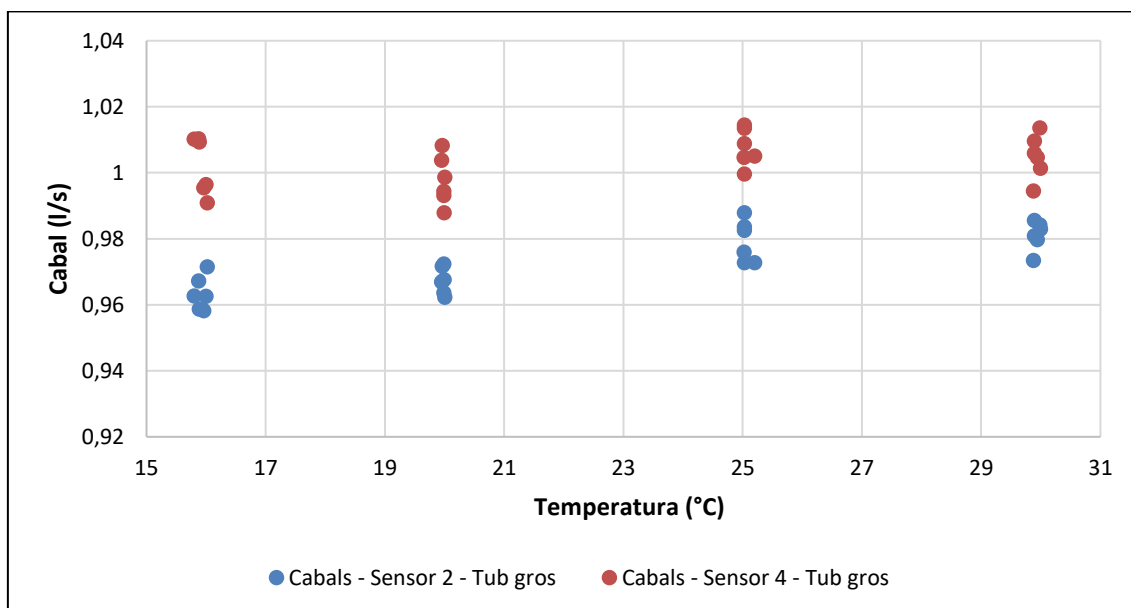
<b>ASSAIG 22</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 3
<b>Concentració (g/l)</b>	261
<b>Temperatura (°C)</b>	16
<b>Data</b>	10/11/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	6
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	6

**Taula 27.** Característiques de l'assaig 22.

En els aforaments realitzats amb el tub prim, s'observen cabals una mica inferiors a 0,16 l/s. Aquests combinats amb la rugositat absoluta corresponent, provoca que els nombres de Reynolds es trobin entre els 3500 i 4500. Tot i que entre els 2100 i els 4000 és considerat règim crític, es pot seguir utilitzant la fórmula de Colebrook-White al trobar-se aquests valors per sobre de 3500 (veure Figura 10), fent possible el càlcul de la viscositat.



**Figura 47.** Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb la salmorra 3 (261 g/l) amb el tub prim.



**Figura 48.** Valors dels cabals obtinguts dels assaigs amb la salmorra 3 (261 g/l) amb el tub gros.

Les viscositats d'aquesta mescla resulten una mica més del doble que la viscositat de l'aigua pels cabals mesurats amb el tub prim i entre 1,5 i 3 vegades superiors pels del tub gros. Aquests valors es poden consultar en la secció DISCUSSIÓ DELS RESULTATS.

**ASSAIG 23**

<b>ASSAIG 23</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 3
<b>Concentració (g/l)</b>	261
<b>Temperatura (°C)</b>	20
<b>Data</b>	11/11/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	6
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	6

**Taula 28.** Característiques de l'assaig 23.

Els cabals i les viscositats resultants són semblants a les de l'assaig 22 però en aquest cas cap valor del nombre de Reynolds està per sota dels 4000. Tots els casos es troben en règim turbulent intermedi.

**ASSAIG 24**

<b>ASSAIG 24</b>	
<b>Mostra</b>	Salmorra 3
<b>Concentració (g/l)</b>	261
<b>Temperatura (°C)</b>	25
<b>Data</b>	11/11/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	6
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	6

**Taula 29.** Característiques de l'assaig 24.

Les observacions de l'assaig 24 són anàlogues a les de l'assaig 23.

**ASSAIG 25**

ASSAIG 25	
<b>Mostra</b>	Salmorra 3
<b>Concentració (g/l)</b>	261
<b>Temperatura (°C)</b>	30
<b>Data</b>	15/11/2016
<b>Aforaments de cabal pel tub prim</b>	6
<b>Aforaments de cabal pel tub gros</b>	6

**Taula 30.** Característiques de l'assaig 25.

Les observacions de l'assaig 25 són anàlogues a les dels assaigs 23 i 24.

## 7.2 ASSAIGS AMB EL VISCOSÍMETRE D'OSTWALD

El segon tipus d'assaig és el realitzat amb el viscosímetre d'Ostwald, també amb la finalitat d'obtenir les diferents corbes viscositat-temperatura per a cada concentració de salmorra. Aquests assaigs es realitzen al Laboratori de Química de Materials de la Construcció de la UPC. Les mostres utilitzades per a aquest assaig són les filtrades (sense sòlids) perquè, en cas contrari, es podria malmetre l'aparell.



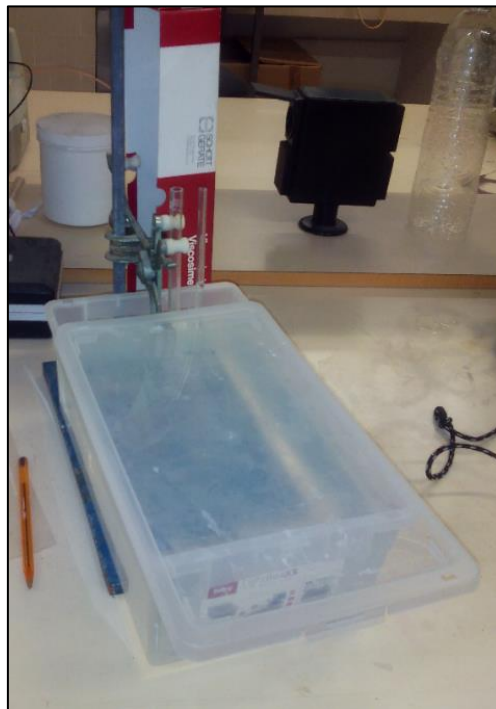
**Figura 49.** Viscosímetre d'Ostwald usat per a aquests assaigs.

Al contrari que amb els assaigs realitzats amb el circuit hidràulic, aquí no apareixen cristalls de sal en cap moment ja que un cop finalitzat cada assaig, el viscosímetre es neteja amb aigua destil·lada evitant problemes d'aquest tipus.

La dificultat més accentuada dels assaigs realitzats amb el viscosímetre és el control de la temperatura. La quantitat de volum de líquid utilitzada per a la mesura és molt petita i, per tant, és més influenciable per la temperatura ambient ( $19^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}$ ).

Per refredar la mostra es deixa aquesta a la nevera durant un cert temps de tal manera que surt a uns  $10^{\circ}\text{C}$ . Després, s'escalfa la mostra fins a la temperatura desitjada de  $16^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$  i  $30^{\circ}\text{C}$ .

Per tal de mantenir constant la temperatura durant els assaigs, s'utilitza la tècnica del *bany maria*. El viscosímetre es col·loca dintre d'un recipient ple d'aigua en el qual sí és possible controlar la temperatura utilitzant un termòmetre. Per escalfar l'aigua del recipient a la temperatura desitjada s'usa una resistència elèctrica submergible.



**Figura 50.** Viscosímetre d'Ostwald en un *bany maria*.

Per determinar els valors de viscositat de les diferents mescles de salmorra i de l'aigua corrent, es mesuren un mínim de 3 temps. També es mesuren els temps corresponents a l'aigua destil·lada per al càlcul de  $K'$ .

Aquests temps són mesurats amb un cronòmetre i, per tant, les imprecisions venen donades per l'error humà. Abans i després de prendre els temps, es mesura la temperatura del líquid que conté dins el viscosímetre per tal d'assegurar que sigui la correcta. Tots els temps que no corresponen a la temperatura a la qual es vol realitzar l'assaig es desestimen. Aquestes dades preses al laboratori es poden consultar en l'ANNEX B: DADES PRESES AL LABORATORI (VISCOSÍMETRE D'OSTWALD).

El procediment de càlcul que es realitza és explicat amb detall en l'apartat 3.5.

### 7.2.1 DETERMINACIÓ DE LA CONSTANT $K'$

Aquest assaig es realitza amb aigua destil·lada per tal de determinar la constant  $K'$  (veure apartat 3.5) per, posteriorment, calcular les viscositats dels altres líquids per comparació. Això és possible al ser totes les característiques físiques de l'aigua destil·lada conegudes.

Es calculen un mínim de 3 valors de  $K'$  corresponents a 3 temps mesurats amb l'aigua destil·lada per a cadascuna de les temperatures. Com que és necessari obtenir un únic valor de  $K'$  per a cada temperatura, es realitza la mitjana aritmètica d'aquestes:

Temperatura (°C)	$K'$ ( $m^2/s^2$ )
16	1,096E-08
20	1,016E-08
25	9,81E-09
30	9,48E-09

**Taula 31.** Mitjana aritmètica de la constant  $K'$  per a cada temperatura.

### 7.2.2 DETERMINACIÓ DE LA VISCOSITAT

Per obtenir els diferents valors de la viscositat dinàmica d'una mescla per a cada temperatura, es calculen els temps corresponents a cadascun d'ells. Després es realitza el procés invers realitzat amb l'aigua destil·lada. Un cop coneguda  $K'$  per a cada temperatura, es calcula la viscositat dinàmica de la mescla per a la temperatura desitjada (veure apartat 3.5).

Cal puntualitzar que, a diferència de l'aigua destil·lada, no es disposa dels valors de les densitats per a cadascuna de les temperatures, sinó que només es disposa d'un sol valor de densitat calculat al laboratori a temperatura ambient, a uns 20°C. Com que la variació de la densitat entre els 16°C i els 30°C no és molt gran, l'error en el càlcul de la viscositat dinàmica no serà molt important.

La dispersió dels temps calculats per a cada temperatura (que es poden consultar en l'ANNEX B: DADES PRESES AL LABORATORI (VISCOSÍMETRE D'OSTWALD)) provoca una certa dispersió en els resultats de la viscositat dinàmica. A mesura que la temperatura de l'assaig s'allunya de la temperatura ambient resulta més difícil controlar-la. Tot i que s'utilitza un *bany maria* per a aquesta finalitat, no és possible tenir una precisió de dècimes de grau durant tot el temps que dura l'assaig. Aquest fet pot afectar lleugerament el resultat.

Com ja s'ha dit anteriorment, si la temperatura és la correcta, l'error més groller ve donat per l'error humà. El temps es calcula amb un cronòmetre però és l'ull humà el que identifica quan passen les marques de calibratge definides en el viscosímetre. De totes maneres, aquest error no és superior als dos o tres segons. També s'ha de tenir en compte que al assajar amb mescles de major viscositat, l'error relatiu de la viscositat que pugui ser causat per un error humà és menor al ser els temps de mesura majors.

En la secció DISCUSSIÓ DELS RESULTATS, es comparen les diferents corbes viscositat-temperatura corresponents a cada mostra obtinguda en aquest assaig.



## 8 ESTUDI DE SENSIBILITAT

En aquest apartat es duu a terme un estudi que té com a objectiu valorar la sensibilitat dels resultats obtinguts en el càlcul de la viscositat en funció de la variació de les dades preses en els assaigs de laboratori.

Les variacions en la mesura del cabal (veure procediment dels assaigs, apartat 7.1) poden afectar als resultats finals de la rugositat absoluta de la canonada i la viscositat de la salmorra.

De la mateixa manera que una variació en el cabal, una variació en la mesura del diàmetre també pot afectar al càlcul de la viscositat.

Per aquestes raons, aquest estudi pretén analitzar com poden afectar als resultats errors inherents a la mesura dels sensors o alteracions en el canvi de diàmetre.

Com es veurà en l'apartat DISCUSSIÓ DELS RESULTATS, la mesura dels sensors de pressió és poc precisa en els assaigs realitzats amb el tub gros deguda a les fluctuacions de la làmina lliure de líquid i, per tant, els resultats finals també són poc precisos i es desestimen. Per aquesta raó, aquest estudi de sensibilitat només es durà a terme pel tub prim.

### 8.1 REGRESSIÓ LINEAL

Els sensors de pressió mesuren el nivell de líquid del sobreeixidor del dipòsit 2 (veure Figura 13) en funció del temps. En aquest cas, s'obté un valor de nivell cada segon. Per a cada aforament de cabal s'ajusta una recta pel mètode de mínims quadrats. El pendent d'aquesta recta correspon a la velocitat de pujada del nivell de líquid. Si es multiplica aquesta velocitat per l'àrea del sobreeixidor 2, la qual és constant, s'obté el valor del cabal que s'utilitza per als càlculs de la rugositat absoluta i de la viscositat.

Per tal de poder realitzar aquesta regressió lineal és necessari que els valors mesurats pels sensors compleixin certes condicions. Per construir un model de regressió es comença amb un gràfic de les dades, a continuació s'estimen els paràmetres del model, posteriorment es construeixen intervals de confiança o s'efectuen contrastos d'hipòtesis i, finalment es comproven aquestes mitjançant l'anàlisi dels residus.

El model de regressió bàsic és el següent:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 t_i + e_i$$

On  $y_i$  i  $e_i$  són variables aleatòries,  $t_i$  és una variable predeterminada de valors coneguts, i  $\beta_0$  i  $\beta_1$  són paràmetres desconeguts. En aquest cas,  $y_i$  correspondria als nivells mesurats pel sensor a cada instant de temps  $t_i$ . L'error  $e_i$  correspondria a la pertorbació aleatòria que es produeix quan els sensors mesuren els nivells.

Per poder procedir amb la regressió, s'han de complir les següents hipòtesis per la pertorbació:

- a) La pertorbació ha de tenir esperança nul·la, és a dir:

$$E[e_i] = 0$$

- b) La variància de la pertorbació és sempre constant, i no depèn de  $t$ :

$$\text{Var}(e_i) = \sigma^2$$

- c) Les pertorbacions  $e_i$  són independents entre elles, és a dir:

$$E(u_i u_j) = 0 \quad (i \neq j)$$

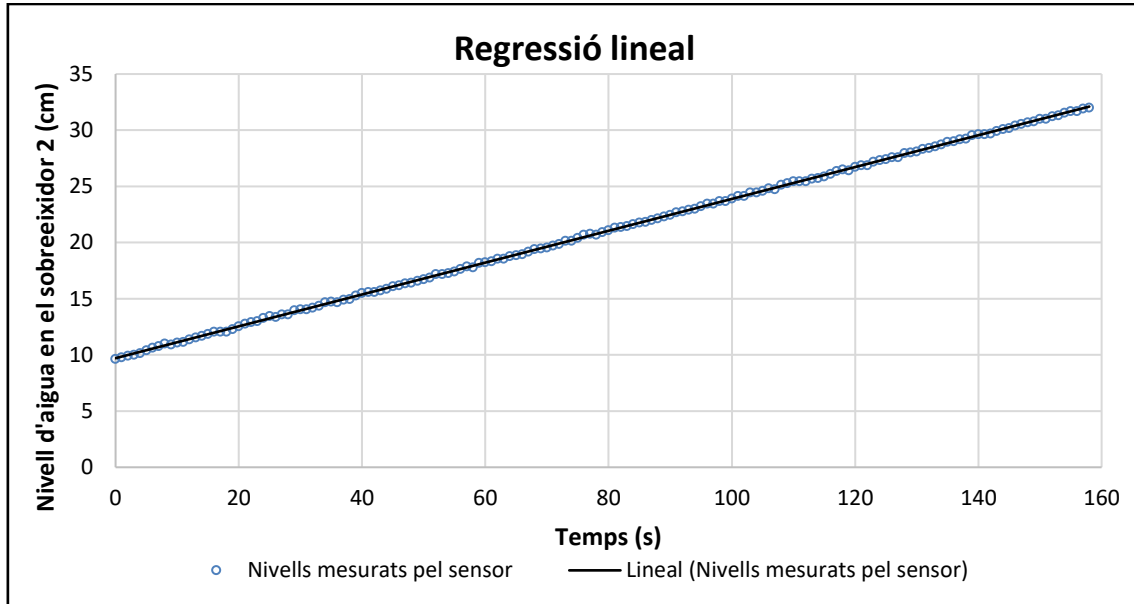
- d) La pertorbació té una distribució normal.

El resultat de la recta de regressió serà:

$$\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 t_i$$

En aquest cas,  $\hat{y}_i$  seran els valors estimats de  $y_i$ . En la literatura es poden trobar explicacions més detallades (Peña Sánchez de Rivera, 1987). També s'explica com estimar els paràmetres  $\beta_0$  i  $\beta_1$  pel mètode de mínims quadrats.

A continuació es presenta un exemple extret dels assaigs realitzats per comprovar el compliment de les hipòtesis anteriors. Els valors dels nivells mesurats de la Figura 51 corresponen a un dels aforaments de cabal realitzats amb aigua destil·lada a 30°C amb el tub prim:



**Figura 51.** Regressió lineal. Ajust d'una recta a les dades mesurades pel sensor mitjançant el mètode de mínims quadrats. Cas corresponent a un aforament de cabal amb aigua destil·lada a 30°C amb el tub prim.

L'error de predicció o residu ( $e$ ) és la diferència entra el valor observat ( $y$ ) i el valor previst ( $\hat{y}$ ):

$$e = y - \hat{y}$$

On el valor previst es pot calcular, en aquest exemple, com:

$$\hat{y} = 0,1417t + 9,71$$

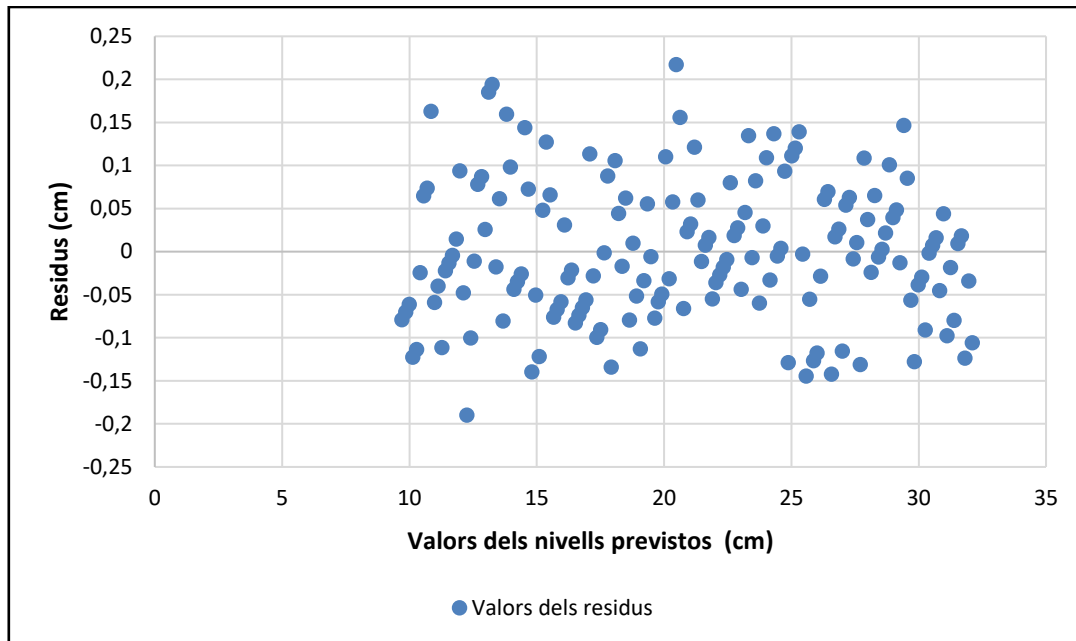
$$R^2 = 0,9998$$

On el pendent de la recta és 0,1417 i correspon a la velocitat de pujada del nivell d'aigua pel sobreexidor 2 en cm/s. Si es multiplica aquest valor per l'àrea del sobreexidor (18,2 cm x 75,6 cm), s'obté el cabal que s'utilitzarà per als càlculs posteriors.

Un cop coneguts els residus ( $e$ ), es poden comprovar les hipòtesis de regressió lineal introduïdes anteriorment.

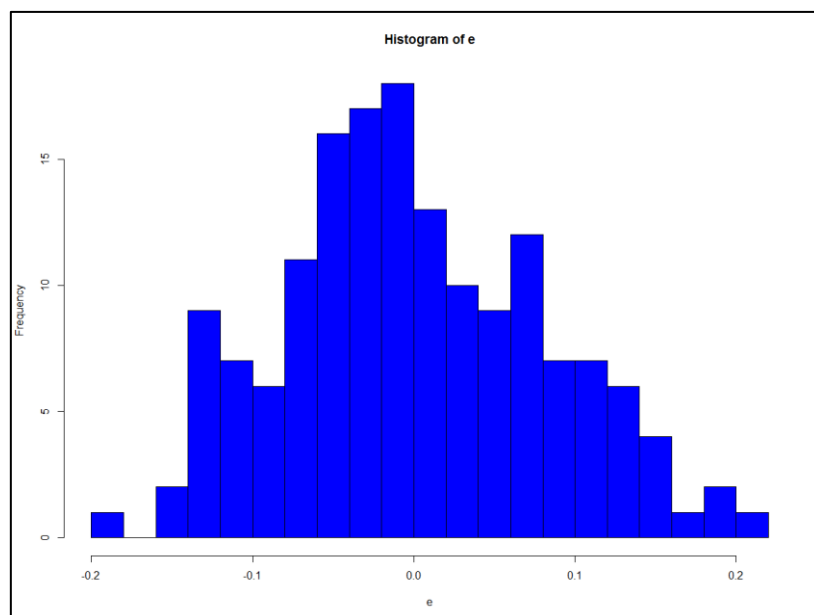
En la Figura 52 es presenten els valors dels residus en funció del valor previst ( $\hat{y}$ ) per l'exemple introduït. En aquesta es pot veure gràficament com els residus no tenen cap relació amb el valor

previst (els valors no segueixen cap tendència) i com la desviació típica es manté bastant constant (els valors dels residus es troben entre 0,2 cm i -0,2 cm aproximadament i cap valor es surt molt d'aquest interval ). Per tant, es compleixen les hipòtesis b) i c).



**Figura 52.** Valor dels residus ( $e$ ) en funció del valor del nivell previst ( $\hat{y}$ ). Cas corresponent a un aforament de cabal amb aigua destil·lada a 30°C amb el tub prim.

Finalment, per comprovar les hipòtesis d'esperança nul·la i de distribució normal, es presenta un histograma corresponent als valors dels residus de la Figura 52:



**Figura 53.** Histograma dels residus. Cas corresponent a un aforament de cabal amb aigua destil·lada a 30°C amb el tub prim.

Com es pot veure en la Figura 53, els residus segueixen aproximadament una distribució normal de mitjana nul·la i, per tant, es compleixen les hipòtesis a) i d).

## 8.2 ESTUDI DE SENSIBILITAT EN FUNCIÓ DE LES VARIACIONS EN LES MESURES DEL SENSOR DE PRESSIÓ

Quan es realitza una mesura amb el sensor de pressió i s'ajusta una recta a les dades per trobar el pendent d'aquesta, existeixen uns residus tal i com ja s'ha comentat en l'apartat anterior. Aquests residus s'han distribuït en un ordre concret però també podrien haver-ho fet en un altre. És per això que aquesta variabilitat es pot tenir en compte per determinar quins serien els valors dels pendents de les rectes si els residus estiguessin distribuïts d'una altra manera.

Per poder determinar totes les possibles rectes que es podrien obtenir amb una diferent ordenació dels residus, s'utilitza una aproximació basada en la construcció d'un nou mostreig estadístic a partir de les dades o mostres que es tenen a mà. Aquest mètode és conegut com *bootstrap*. En aquest cas, com que el valor de les  $t$  (temps) està fixat, el que interessa és un remostreig residual.

En el remostreig residual es pot escriure:

$$Y = \hat{Y} + e$$

On  $\hat{Y}$  és el vector dels valors estimats i  $e$  el vector dels residus.

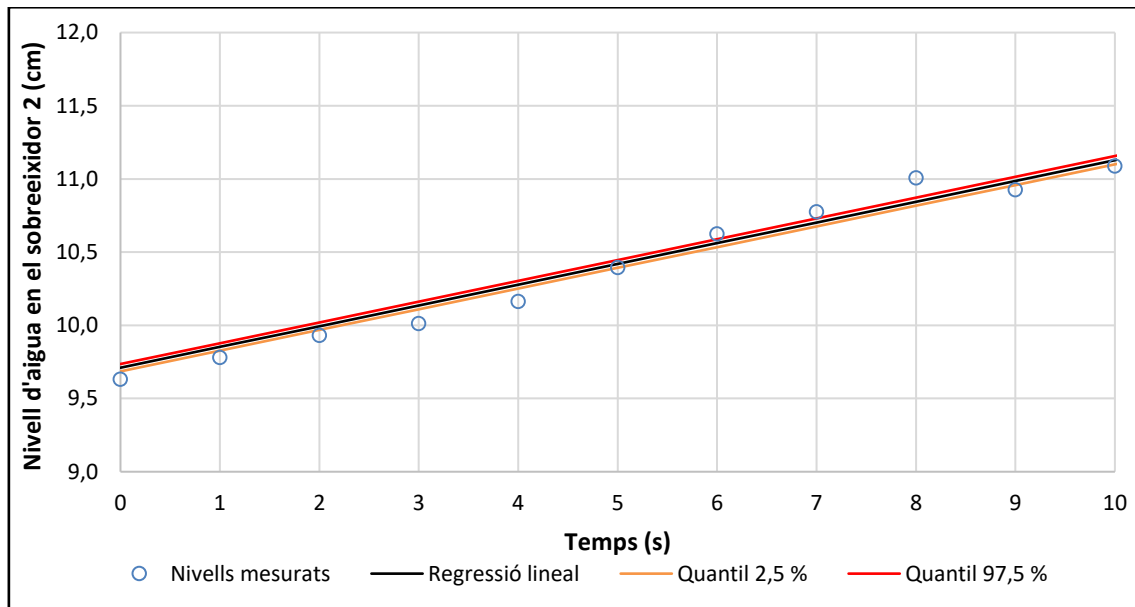
En el remostreig residual es fixa  $\hat{Y}$  i es torna a mostrejar  $e$  per aconseguir:

$$Y^* = \hat{Y} + e^*$$

Per a la obtenció de les diferents rectes possibles s'utilitza el programa *R*. El mètode "*residual*" per *Boot*, funció del programa *R*, implementa lleugeres modificacions en aquest procediment. Aquestes, i tot el procediment, es poden veure detalladament en la literatura (Davison and Hinkley, 1997).

Tornant al exemple anterior, mitjançant el mètode *bootstrap* es poden determinar múltiples rectes i, per tant, pendents a partir de les dades obtingudes de la mostra tenint en compte una distribució normal d'aquests.

A continuació es presenten les rectes que presenten els pendents corresponents als quantils 2,5% i 97,5% extrets de realitzar *bootstrapping* amb la mostra presentada anteriorment:



**Figura 54.** Zoom de la recta de regressió lineal de les dades obtingudes i de les rectes amb pendents corresponents als quantils 2,5% i 97,5% determinades mitjançant el mètode de bootstrap. Cas corresponent a un aforament de cabal amb aigua destil·lada a 30°C amb el tub prim.

Recta de regressió:  $\hat{y} = 0,1417t + 9,71$

Recta corresponent al quantil 2,5%:  $\hat{y} = 0,1414t + 9,69$

Recta corresponent al quantil 97,5%:  $\hat{y} = 0,1420t + 9,74$

D'aquesta manera es pot afirmar amb el 95% de confiança que els pendents obtinguts per a aquesta mostra tenint en compte les diferents ordenacions possibles dels residus es trobarien entre 0,1414 i 0,1420.

En aquesta tesina es realitzen només 3 mesures per a cada temperatura de les quals s'obtenen 3 pendents. Si per a cadascuna d'aquestes mostres o mesures es duu a terme el mètode de *bootstrapping*, és possible trobar múltiples valors de pendents corresponents a una temperatura concreta. De tots aquests, se'n pot treure un sol valor com la mitjana o la mediana. Aquest procés es pot repetir diversos cops de tal manera que s'obtenen diversos valors d'aquests dos paràmetres.

Amb la finalitat de veure com afecta una petita variació del pendent de la recta (i per tant del cabal) en la rugositat absoluta de la canonada, a continuació es mostra un exemple. Per aquest

s'utilitzaran els valors dels quantils 10%, 50% i 90% corresponents als valors de les medianes comentades ja que la mitjana està més afectada per la dispersió que s'obté en els resultats.

Els valors dels pendents i dels cabals que s'utilitzen per a aquest exemple corresponen als quantils 10%, 50% i 90% de la mediana, obtinguts amb els aforaments de cabal (mesures del sensor 2) realitzats amb aigua destil·lada a 30°C:

Quantil	Pendent de la recta de regressió (cm/s)	Cabal (l/s)	Rugositat absoluta (mm)
10%	0,14144	0,19462	0,1791
50%	0,14153	0,19473	0,1781
90%	0,14158	0,19480	0,1776

**Taula 32.** Rugositat absoluta de la canonada calculada a partir dels valors dels cabals corresponents als quantils 10%, 50% i 90% per l'assaig amb aigua destil·lada a 30°C pel tub prim.

Un cop és coneguda la rugositat absoluta de la canonada, valor que es calcula realitzant la mitjana aritmètica dels valors obtinguts dels diferents assaigs amb aigua destil·lada, és possible obtenir la viscositat de la salmorra mitjançant aforaments de cabal per a aquesta (veure METODOLOGIA).

De la mateixa manera que s'ha comentat anteriorment, es pot utilitzar el mètode *bootstrap* per determinar els valors dels pendents de les rectes corresponents als quantils 10%, 50% i 90% de la salmorra 1 a 30°C. Amb aquests diferents valors de pendent és possible veure com afecta una variació del cabal en la viscositat de la salmorra.

A continuació es presenta un exemple amb els valors dels pendents (mesures del sensor 2) corresponents als quantils 10%, 50% i 90% de la salmorra 1 (331 g/l) per la temperatura de 30°C. En aquest s'assumeix que el valor de la rugositat absoluta és de 0,176 mm:

Quantil	Pendent de la recta de regressió (cm/s)	Cabal (l/s)	Viscositat cinemàtica (m <sup>2</sup> /s)
10%	0,13732	0,18895	1,479E-06
50%	0,13738	0,18902	1,469E-06
90%	0,13743	0,18909	1,461E-06

**Taula 33.** Viscositat cinemàtica de la salmorra 1 (331 g/l) a 30°C calculada a partir dels valors dels cabals corresponents als quantils 10%, 50% i 90%.

En els valors de la viscositat de la Taula 33, no es té en compte una possible variació en la rugositat absoluta, la qual s'arrossegaria per al càlcul de la viscositat. En la Taula 34 es presenten diferents valors de la viscositat cinemàtica en funció de la rugositat absoluta. En aquesta només es té en compte un únic valor de cabal corresponent al quantil 50%, amb el qual es calcula la viscositat introduint diversos valors de rugositat absoluta:

Quantil	Pendent de la recta de regressió (cm/s)	Cabal (l/s)	Rugositat absoluta (mm)	Viscositat cinemàtica (m <sup>2</sup> /s)
50%	0,13738	0,18902	0,175	1,482E-06
			0,176	1,469E-06
			0,177	1,458E-06

**Taula 34.** Viscositat cinemàtica de la salmorra 1 (331 g/l) a 30°C calculats a partir del valor de cabal corresponent al quantil 50% d'aquest assaig en funció de la rugositat absoluta .

Com es pot veure en la Taula 32 i la Taula 33, una petita variació en el cabal mesurat afecta lleugerament al valor de la rugositat absoluta de la canonada i a la viscositat de la salmorra. Si a més a més es considera un possible error en el càlcul de la rugositat absoluta, la viscositat de la salmorra encara es veu més afectada (veure Taula 34).



Tots aquests resultats presentats anteriorment només tenen en compte petites variacions en la mediana de les mesures obtingudes. Si es prenguessin més mesures per a cada temperatura, aquesta mediana podria ser considerablement diferent ja que el mètode utilitzat és molt sensible a petits canvis. Si a més a més es té en compte casos límits en lloc de medianes, els valors de rugositat absoluta i viscositat podrien presentar valors significativament diferents als obtinguts en aquests assaigs.

Així doncs, seria necessari un estudi més profund per tal de determinar l'abast de la dispersió real que s'obtindria utilitzant aquest mètode però queda fora dels objectius d'aquesta tesina.

### 8.3 ESTUDI DE SENSIBILITAT EN FUNCIÓ DEL DIÀMETRE

La cristal·lització de la sal que es produeix en les parets de la canonada afecta d'una manera important tant a la rugositat absoluta com al seu diàmetre. Aquest últim deixa de ser l'inicial i deixa de ser constant. Per aquest motiu, és important tenir present com poden variar els resultats en funció de canvis en el diàmetre de la canonada.

A continuació es presenta un exemple de la variació de la rugositat absoluta en funció del diàmetre de la canonada. Per a aquest s'utilitza el valor de cabal corresponent al quantil 50% de l'aigua destil·lada a 30°C:

Cabal (l/s)	Diàmetre (mm)	Rugositat absoluta (mm)
0,19473	21,2	0,1583
	21,3	0,1781
	21,4	0,1993

**Taula 35.** Rugositat absoluta de la canonada calculada a partir del valor del cabal corresponent al quantil 50% de l'aigua destil·lada a 30°C en funció del diàmetre de la canonada.

Com es pot veure en la Taula 35, una variació de 0,1 mm en el diàmetre pot fer variar considerablement el valor de la rugositat absoluta de la canonada.

Si s'assumeix que el valor de la rugositat absoluta és de 0,176 mm, es pot observar com varia la viscositat de la salmorra en funció del diàmetre. En l'exemple que es presenta a continuació es pren com a cabal de referència el corresponent al quantil 50% de la salmorra 1 (331 g/l) a 30°C:

Cabal (l/s)	Rugositat absoluta (mm)	Diàmetre (mm)	Viscositat cinemàtica (m <sup>2</sup> /s)
0,18902	0,176	21,2	1,192E-06
		21,3	1,469E-06
		21,4	1,766E-06

**Taula 36.** Viscositat cinemàtica de la salmorra 1 (331 g/l) a 30°C calculada a partir del valor del cabal corresponent al quantil 50% d'aquest mateix assaig en funció del diàmetre de la canonada.

Com es pot observar en la Taula 36, un petit canvi en el diàmetre provoca una variació molt gran en la viscositat.

## 9 DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

Un cop analitzats els diferents assaigs individualment, es procedeix a analitzar els resultats obtinguts. Es procedirà a comparar els diferents assaigs per discutir les diferències obtingudes per diferents temperatures i concentracions de sal.

Primerament, es mostren conjuntament els diversos valors de la rugositat absoluta (calculats a partir de l'aigua destil·lada i l'aigua corrent) amb la finalitat de poder visualitzar els valors i la dispersió segons la canonada amb la que es realitzen els assaigs.

Tot seguit es comparen les diferents corbes viscositat-temperatura obtingudes tant pels assaigs realitzats amb el circuit hidràulic com pels assaigs realitzats amb el viscosímetre d'Ostwald.

### 9.1 RUGOSITAT ABSOLUTA DE LES CANONADES

En aquesta secció es mostren els resultats obtinguts de la rugositat absoluta calculada amb l'aigua destil·lada i l'aigua corrent.

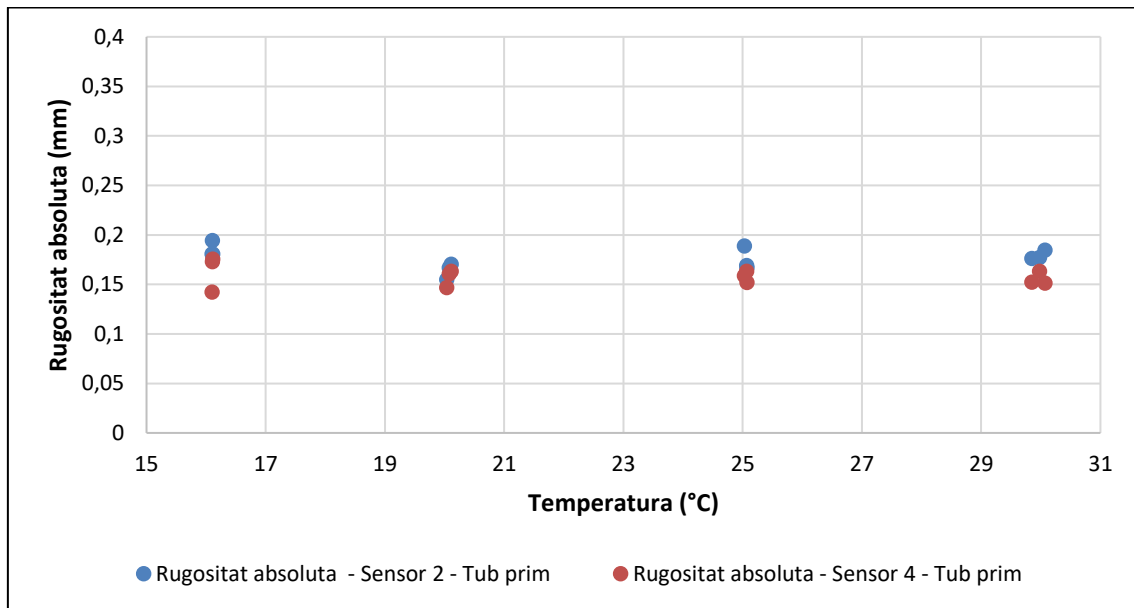
Al ser la viscositat i la densitat de l'aigua destil·lada coneguda, la incertesa més important en la rugositat absoluta vindrà donada per l'error en l'estimació del cabal circulant. En els assaigs amb el tub prim, la dispersió dels cabals és petita (veure Figura 34) i, per tant, també ho és la de la rugositat absoluta. D'altra banda, els valors corresponents al tub gros presenten una variació més important en aquesta degut a la significativa dispersió dels cabals (veure Figura 35). Això provocarà alhora una variació important en els resultats finals de la viscositat (veure apartat 9.2).

Tot i que la rugositat absoluta depèn bàsicament del material i el procés de fabricació de la canonada, a l'hora de calcular els valors de la viscositat s'utilitzaran valors diferents de rugositat en funció del sensor que s'hagi utilitzat per obtenir-los. S'ha procedit així ja que s'ha observat que les petites diferències de calibratge entre els sensors acaben provocant diferències considerables en el valor dels cabals i, per tant, també en el càlcul de la rugositat absoluta (veure ESTUDI DE SENSIBILITAT).

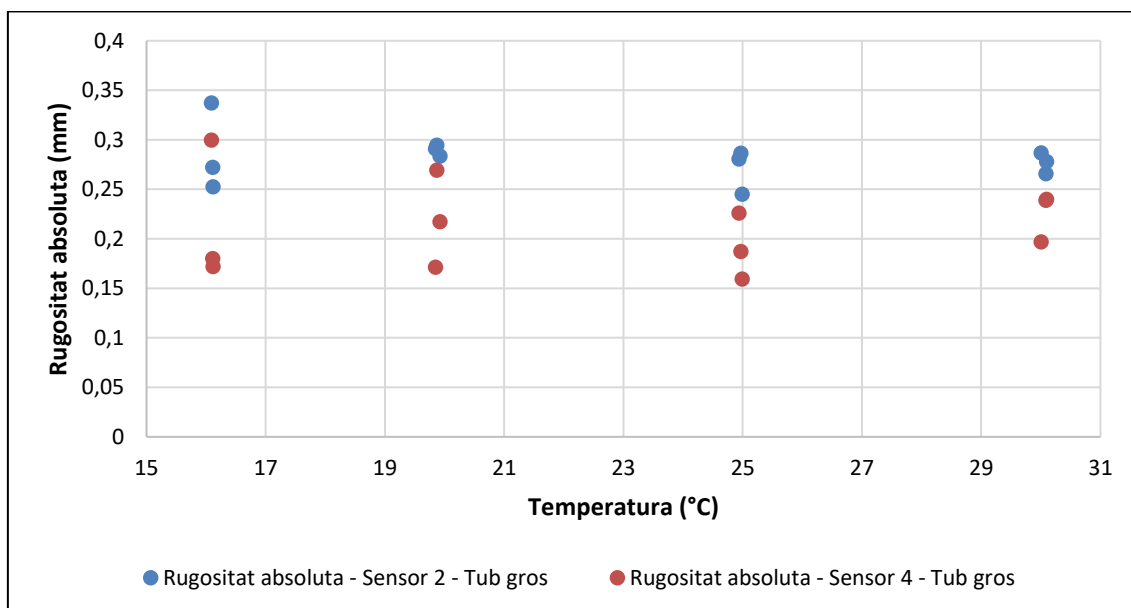
Les diferències en la mesura dels cabals, corresponents a l'aigua destil·lada, observades entre els dos sensors també s'observen quan s'assaja amb una mescla de salmorra. Com que en tot el procés de càlcul es tracten les dades d'un sensor i les de l'altre de manera independent, s'obtenen dues rugositats absolutes (una per a cada sensor). En conseqüència, com que el càlcul

de la viscositat de la salmorra es realitza a través del procés invers al càlcul de la rugositat (veure METODOLOGIA), les diferències entre sensors en el càlcul de la rugositat es veuen compensades a posteriori, de tal manera que la viscositat obtinguda amb un sensor i amb l'altre per a una mateixa mescla coincideixen. Aquests resultats de viscositat es poden veure en la secció 9.2.

En la Figura 55 i la Figura 56 es poden veure els valors de la rugositat absoluta corresponents a cadascun dels cabals mesurats amb l'aigua destil·lada, pel tub prim i tub gros respectivament:



**Figura 55.** Valors de la rugositat absoluta calculats a partir dels cabals mesurats amb aigua destil·lada pel tub prim.



**Figura 56.** Valors de la rugositat absoluta calculats a partir dels cabals mesurats amb aigua destil·lada pel tub gros.

Com que per als càlculs de la viscositat només es pot utilitzar una rugositat per sensor i canonada, s'utilitza la mitjana aritmètica dels resultats obtinguts en cada assaig. Tot seguit es presenta una taula amb aquestes dades, les quals es fan servir per als càlculs de la viscositat de la salmorra 1 (331 g/l) i la salmorra 2 (326 g/l):

Rugositat absoluta (mm)				
Paràmetre	Tub prim		Tub gros	
	Sensor 2	Sensor 4	Sensor 2	Sensor 4
Mitjana aritmètica	0,176	0,159	0,281	0,213

**Taula 37.** Rugositats absolutes (mm) calculades amb aigua destil·lada per a cadascun dels sensors i cadascuna de les canonades.

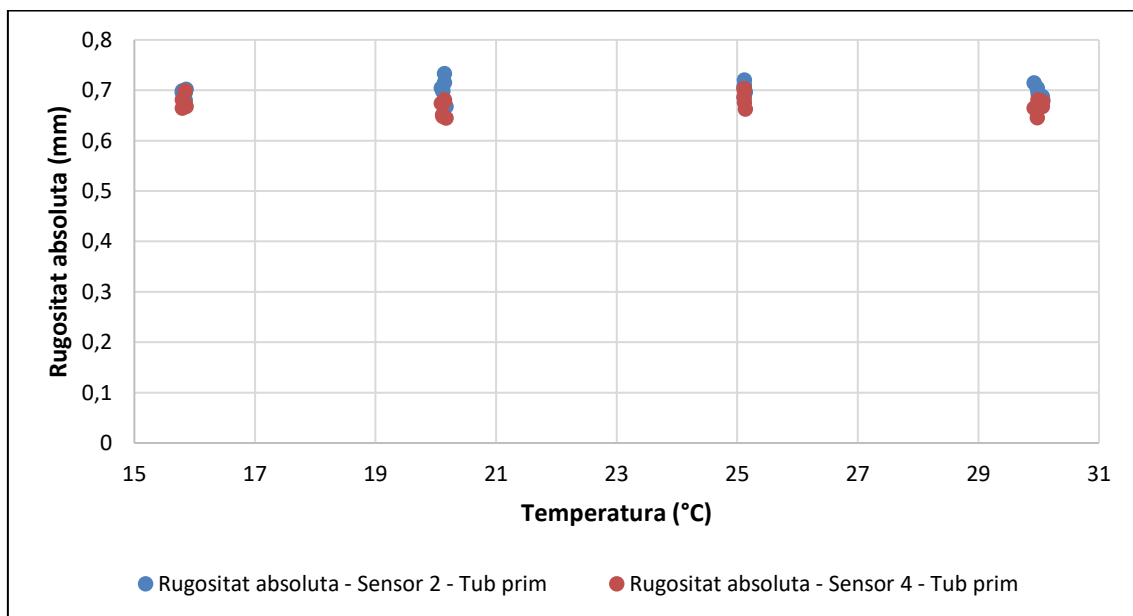
Tenint en compte els diferents valors de la rugositat absoluta corresponent a cada cabal mesurat amb el tub prim, ja que aquest és el que no presenta grans variacions en la seva mesura, és possible estimar un valor de la rugositat absoluta per a aquest. El valor de la rugositat del tub prim es trobaria aproximadament entre els 0,15 mm i els 0,20 mm. Segons Sotelo (1995) correspondria a un acer soldat, de qualitat normal i netejat després de molt ús.

En el cas de l'aigua corrent, la densitat que s'ha utilitzat en els càlculs és la calculada al laboratori i no s'ha pogut mesurar per a diferents temperatures per manca de precisió dels equips disponibles. El fet de no utilitzar la densitat corresponent per a cada temperatura pot influir en els resultats tant de la rugositat absoluta com de la viscositat de la salmorra 3. Tot i així, s'estima que la diferència de densitat entre els 16°C i els 30°C no és superior als 5 kg/m<sup>3</sup> (prenent de referència els valors de l'aigua destil·lada) i es considera negligible.

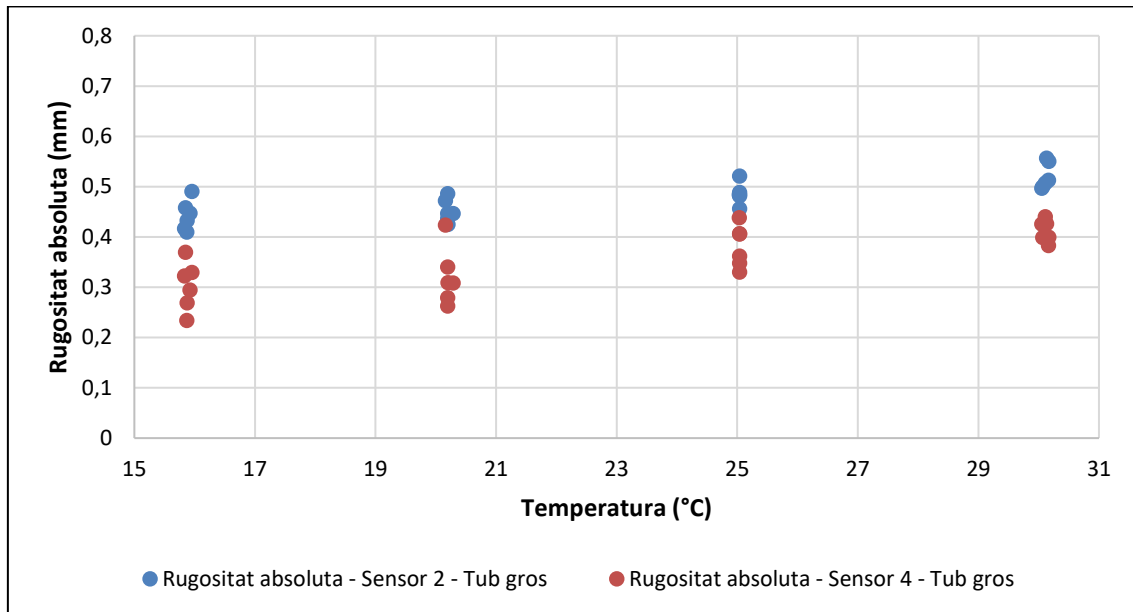
A més a més, els valors de la viscositat de l'aigua corrent, també necessaris per als càlculs de la rugositat, són els extrems dels assaigs del viscosímetre d'Ostwald. Aquests són prou precisos (comparats amb els valors de viscositat del circuit hidràulic) i no aporten errors grans en els càlculs. Aquests es poden veure en la secció 9.2.1.

Tal i com s'ha pogut concloure també en el cas de l'aigua destil·lada, al ser la dispersió dels cabals corresponent al tub prim més petita que la corresponent al tub gros, també ho és la de la rugositat absoluta. Aquesta gran variabilitat en els valors de la rugositat del tub gros també afectarà d'una manera important als resultats finals de la viscositat de la salmorra 3 (261 g/l).

En la Figura 57 i Figura 58 es poden veure els valors de la rugositat absoluta corresponents a cadascun dels cabals mesurats amb l'aigua corrent, pel tub prim i tub gros respectivament:



**Figura 57.** Valors de la rugositat absoluta calculats a partir dels cabals mesurats amb aigua corrent pel tub prim.



**Figura 58.** Valors de la rugositat absoluta calculats a partir dels cabals mesurats amb aigua corrent pel tub gros.

Com ja s'ha comentat anteriorment, per als càlculs només es pot utilitzar una rugositat per sensor i canonada. Per tant, s'utilitza la mitjana aritmètica. Tot seguit es presenta una taula amb aquestes dades, les quals s'utilitzen per als càlculs de la viscositat de la salmorra 3 (261 g/l):

Rugositat absoluta (mm)				
Paràmetre	Tub prim		Tub gros	
	Sensor 2	Sensor 4	Sensor 2	Sensor 4
Mitjana aritmètica	0,700	0,674	0,475	0,354

**Taula 38.** Rugositats absolutes (mm) calculades amb aigua corrent per a cadascun dels sensors i cadascuna de les canonades.

Cal recordar que l'aigua corrent es fa passar un cop la sal ja ha cristal·litzat en les parets de les canonades i, també, un cop s'ha fet passar vinagre i s'ha aconseguit eliminar part d'aquesta sal. Dit això, es pot observar en la Taula 38 (l'anterior) que tot i la utilització del vinagre, la rugositat és bastant més elevada que la calculada amb l'aigua destil·lada (veure Taula 37) abans de la cristal·lització de la sal. Aquesta diferència encara és més evident pel tub prim.

## 9.2 COMPORTAMENT DE LA VISCOSITAT EN FUNCIÓ DE LA TEMPERATURA

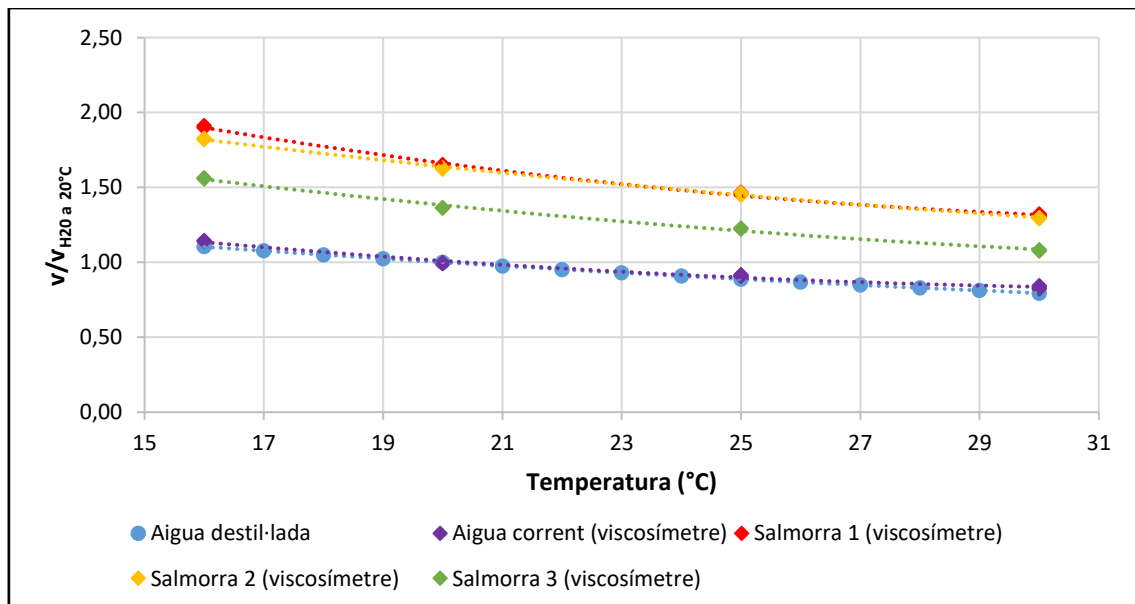
Tot seguit es procedeix a comparar les diferents corbes viscositat-temperatura obtingudes dels assaigs amb el viscosímetre d'Ostwald i dels assaigs realitzats amb el circuit hidràulic. Les corbes que presenten un millor ajust amb els resultats són polinomis de segon grau.

Totes les viscositats es presenten de manera adimensional, és a dir, tots els valors de les diferents viscositats cinemàtiques estan dividits pel valor d' $1,01E-06$ . Aquest és un valor conegut corresponent a la viscositat cinemàtica de l'aigua destil·lada a una temperatura de 20°C.

Cal recordar que les densitats i les concentracions corresponents als assaigs del viscosímetre d'Ostwald no són exactament les mateixes que les corresponents als assaigs del circuit hidràulic. Això és perquè en els assaigs corresponents al viscosímetre s'utilitzen mostres filtrades (sense sòlids). Aquestes dades es poden consultar en la Taula 5.

### 9.2.1 VISCOSITAT OBTINGUDA AMB EL VISCOSÍMETRE D'OSTWALD

Les corbes que es presenten a continuació són el resultat dels assaigs realitzats amb el viscosímetre d'Ostwald a diferents temperatures i per a les diferents mostres, comparades amb la viscositat cinemàtica de l'aigua destil·lada ja coneguda.



**Figura 59.** Viscositat cinemàtica (adimensional) en funció de la temperatura de la salmorra 1 (330 g/l), la salmorra 2 (323 g/l), la salmorra 3 (262 g/l) i l'aigua corrent corresponents als assaigs amb el viscosímetre d'Ostwald.



En la Figura 59 es mostra la variació de les diferents viscositats de les mostres de salmorra i de l'aigua corrent amb la temperatura. En aquesta es pot observar com la viscositat de l'aigua destil·lada i la de l'aigua corrent són pràcticament idèntiques. La corba de l'aigua corrent està molt lleugerament per sobre de la corba de l'aigua destil·lada. També es troben molt properes les corbes de la salmorra 1 i la salmorra 2, que en el cas de l'assaig d'Ostwald corresponen a les concentracions de 330 g/l i 323 g/l respectivament. En aquest últim cas, la corba de la salmorra 2 està lleugerament per sota de la corba de la salmorra 1 al ser la diferència de concentracions entre ambdues petita. Tot i així, és una diferència que es pot apreciar.

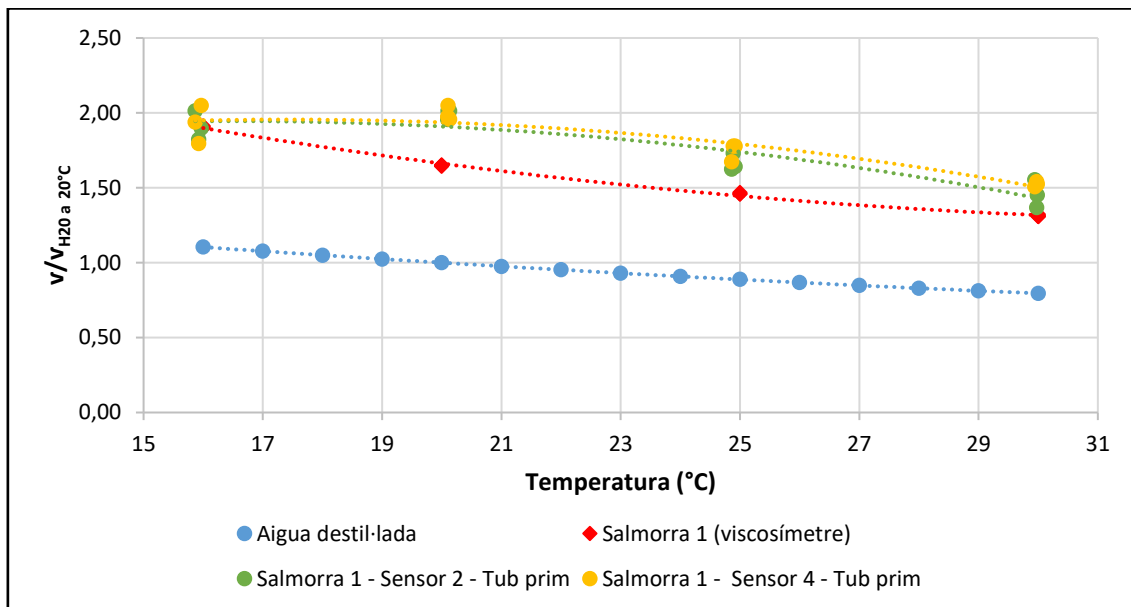
Totes les corbes corresponents a una mostra de salmorra es trobarien per sota de la corba de la salmorra 1 al trobar-se aquesta en el seu límit de saturació. Així ho exemplifica la corba de la salmorra 3, la qual és la de menor concentració (262 g/l per la mostra filtrada). Aquesta es troba entre les corbes de l'aigua i les dues mostres de concentració major. En aquest cas, la diferència amb les altres dues mostres de salmorra ja és molt distingida.

Pel que fa a la tendència de les corbes de salmorra, totes tres presenten una forma convexa i són bastant paral·leles entre elles. A més, totes elles segueixen el raonament teòric de que a major temperatura, menor és la viscositat, i que a major concentració de sal, major és la viscositat.

Per a les següents comparacions, aquests resultats es consideren correctes al ser resultats esperats i lògics. A més a més, presenten molt poca dispersió en comparació amb els assaigs realitzats amb el circuit hidràulic.

### 9.2.2 VISCOSITAT DE LA SALMORRA 1 (331 g/l) PEL TUB PRIM

Les corbes que es presenten a continuació són el resultat dels assaigs realitzats amb el tub prim del circuit hidràulic per la salmorra 1 de 331 g/l a diferents temperatures i pels dos sensors. Aquestes són comparades amb la corba introduïda anteriorment de la salmorra 1 corresponent a l'assaig realitzat amb el viscosímetre d'Ostwald.



**Figura 60.** Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 1 (331 g/l) en funció de la temperatura pel tub prim i pels dos sensors.

La Figura 60 mostra les dues corbes corresponents als dos sensors per la salmorra 1. Aquestes dades presenten una dispersió més gran que les del viscosímetre. La principal causa d'aquesta té com a origen la dispersió dels cabals mesurats amb el circuit hidràulic. A més a més, la gran sensibilitat que presenta aquest mètode a gairebé qualsevol dels paràmetres utilitzats pot ser important en el resultat final. La gran majoria d'aquests paràmetres han sigut calculats amb prou precisió com per no fer variar molt el resultat final.

La diferència entre les dues corbes (dos sensors) resultants del circuit hidràulic no és molt gran ja que tot i que els cabals mesurats per cadascun dels sensors sí que tenen una diferència significativa, al considerar rugositats diferents per a cada sensor es corregeix aquesta diferència resultant valors de viscositat molt semblants.

Com es pot observar en la Figura 60, les dues corbes es troben una mica per sobre de la corba obtinguda amb el viscosímetre d'Ostwald. En els 16°C les tres corbes coincideixen mentre que els punts de viscositat de les següents temperatures de les dues corbes resultants del circuit hidràulic es troben per sobre dels punts de viscositat corresponents al viscosímetre.

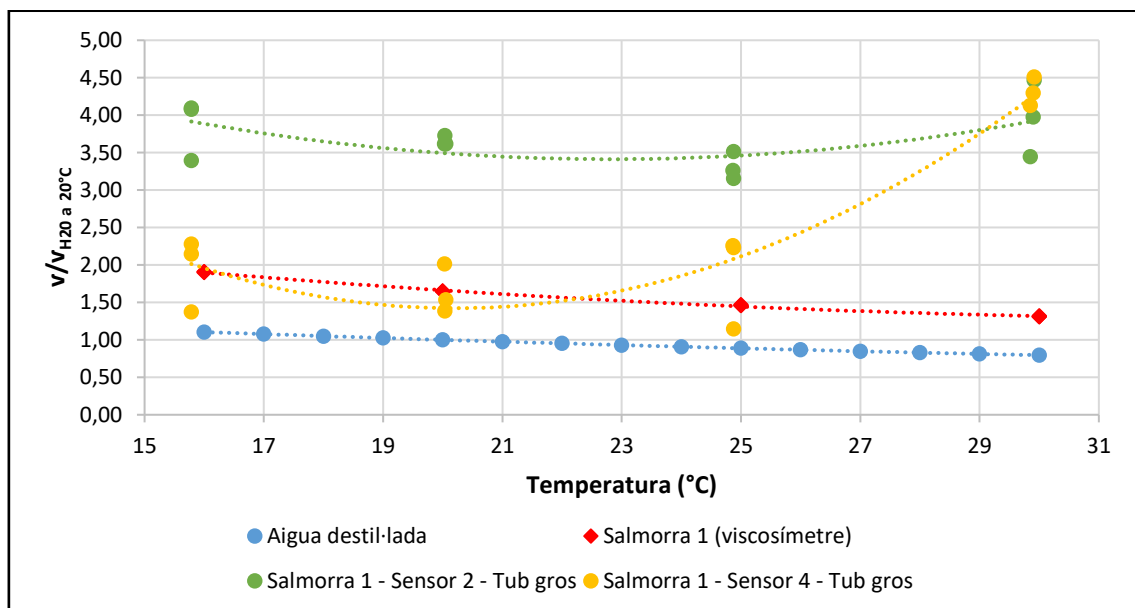
Al ser l'assaig a 16°C amb la salmorra 1 el primer que es va realitzar amb salmorra, podria ser el més fiable. Després d'aquest podrien haver anat apareixent petits cristalls de sal a les parets del tub provocant viscositats més altes. En aquest cas, això no es podria afirmar ja que el tub prim

no es buida en cap moment durant els assaigs amb la salmorra 1 i, per tant, no es facilita l'aparició de cristalls de sal en les parets dels tubs.

Pel que fa a les tendències de les corbes, aquestes tenen una forma còncava que contrasta amb la corba corresponent a la del viscosímetre, la qual és convexa. Això fa pensar que els sòlids podrien tenir algun efecte sobre aquestes ja que pel viscosímetre s'utilitza la mateixa mostra però sense sòlids en suspensió.

### 9.2.3 VISCOSITAT DE LA SALMORRA 1 (331 g/l) PEL TUB GROS

Les corbes que es presenten a continuació són el resultat dels assaigs realitzats amb el tub gros del circuit hidràulic per la salmorra 1 de 331 g/l a diferents temperatures i pels dos sensors. Aquestes són comparades amb la corba introduïda anteriorment de salmorra 1 corresponent a l'assaig realitzat amb el viscosímetre d'Ostwald.



**Figura 61.** Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 1 (331 g/l) en funció de la temperatura pel tub gros i pels dos sensors.

La Figura 61 mostra les dues corbes corresponents als dos sensors per la salmorra 1. Aquestes dades presenten una dispersió molt més gran que les del viscosímetre i que les corresponents als assaigs amb el tub prim. Això és degut a que la dispersió dels cabals mesurats amb el tub gros és molt gran, fins i tot entre valors corresponents als mateixos sensors. Aquest fet no fa possible

la convergència dels valors de viscositat dels dos sensors en els mateixos punts tot i utilitzant diferents rugositats absolutes per a cada sensor.

Aquesta diferència entre sensors podria ser causada per les fluctuacions de la làmina lliure de salmorra que es creen en el sobreeixidor. Una gran quantitat de líquid cau en el sobreeixidor a una velocitat important quan es fan assaigs amb la canonada d'1,5 polzades, provocant que la làmina lliure del sobreeixidor no sigui constant i pugi pel sobreeixidor molt ràpidament. Només triga uns 25 segons en omplir-se. A més a més, la posició dels sensors en el sobreeixidor també podria ser determinant ja que la força amb la que cau el líquid podria afectar als sensors, sobretot al principi de l'assaig quan la distància entre els sensors i la làmina lliure de líquid és petita.

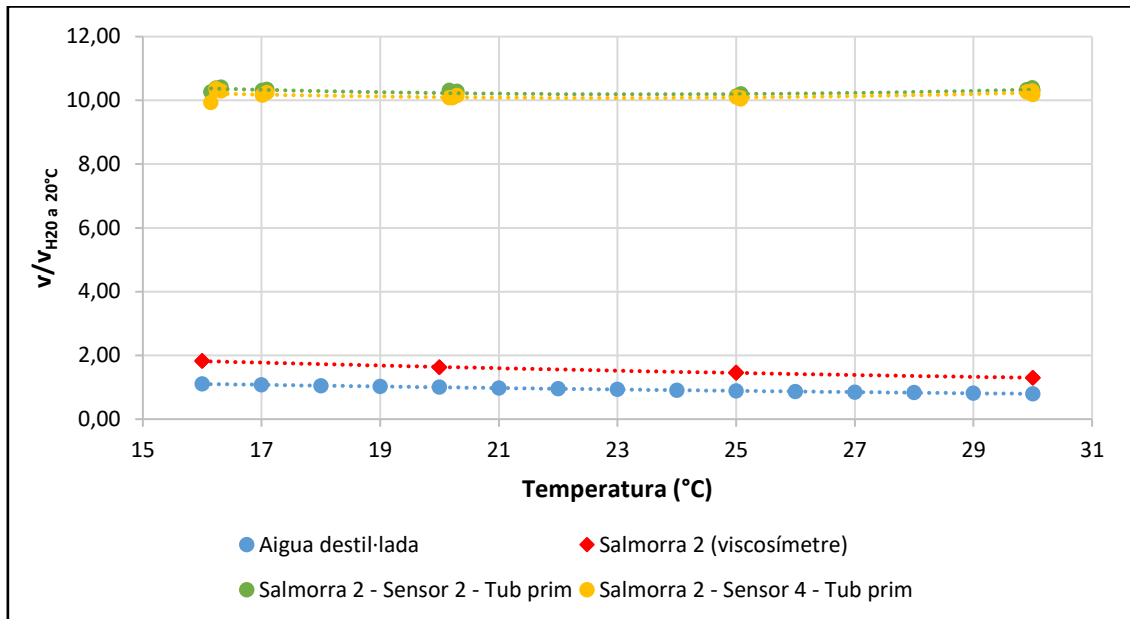
Pel que fa al valor de la viscositat, no se'n pot deduir cap a causa del comentat anteriorment. De totes maneres la gràfica deixa entreveure el començament d'una cristal·lització important en el tub gros ja que els valors de viscositat en els 30°C són considerablement més grans que els seus anteriors.

La cristal·lització fa augmentar la rugositat de la canonada i això fa disminuir el cabal de pas a través d'aquesta. Com que la rugositat ha variat però es fa servir l'obtinguda inicialment per als càlculs, la viscositat dóna valors molt elevats.

Aquest procés de cristal·lització es produeix entre els assaigs a 25°C i a 30°C, entre els quals passen 4 dies. El motiu pel qual aquesta cristal·lització no es produeix en el tub prim és perquè es buiden els dipòsits fins a l'altura del tub prim per tancar una fuga en el tub gros. D'aquesta manera, el tub prim queda ple de salmorra i el tub gros buit. Per tant, aquest buidatge afavoreix a la cristal·lització de la sal a les parets del tub gros.

#### 9.2.4 VISCOSITAT DE LA SALMORRA 2 (326 g/l) PEL TUB PRIM

Les corbes que es troben a continuació són el resultat dels assaigs realitzats amb el tub prim del circuit hidràulic per la salmorra 2 de 326 g/l a diferents temperatures i pels dos sensors. Aquestes són comparades amb la corba introduïda anteriorment de la salmorra 2 corresponent a l'assaig realitzat amb el viscosímetre d'Ostwald.



**Figura 62.** Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 2 (326 g/l) en funció de la temperatura pel tub prim i pels dos sensors.

La Figura 62 mostra les dues corbes corresponents als dos sensors per la salmorra 2. Tal i com es pot veure en aquesta, la viscositat calculada per a aquesta mostra dona prop de 10 cops la de l'aigua. Aquest fet és degut a que abans de començar a realitzar assaigs amb la salmorra 2 es van buidar els dipòsits deixant ambdós tubs buits, la qual cosa va afavorir la cristallització de la sal. No va ser fins arribat a aquest punt que es va ser conscient d'aquest fenomen.

Com a conseqüència de la formació d'aquests cristalls de sal en la paret de la canonada, els valors emprats per als càlculs de la rugositat absoluta i del diàmetre no són els correctes. Per aquest motiu, els valors de la viscositat són erronis.

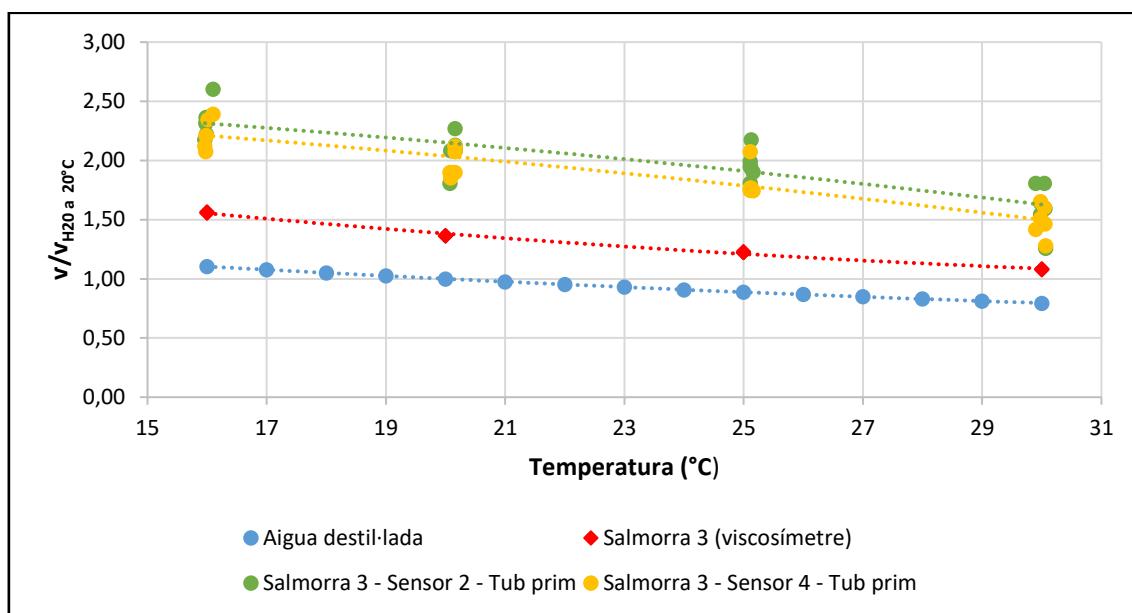
Tampoc es pot treure cap conclusió relativa a la variació de la viscositat amb la temperatura ja que els dipòsits van ser buidats entre certs assaigs amb aquesta mostra de salmorra de tal manera que podrien haver canviat els valors de rugositat absoluta i de diàmetre entre aquests.

### 9.2.5 VISCOSITAT DE LA SALMORRA 3 (261 g/l) PEL TUB PRIM

Les corbes que es troben a continuació són el resultat dels assaigs realitzats amb el tub prim del circuit hidràulic per la salmorra 3 de 261 g/l a diferents temperatures i pels dos sensors. Aquestes són comparades amb la corba introduïda anteriorment de la salmorra 3 corresponent a l'assaig realitzat amb el viscosímetre d'Ostwald.

Durant aquests assaigs ja s'és conscient del fenomen de cristal·lització. Per tal de dissoldre aquesta sal, s'introdueix vinagre en les dues canonades però només se'n elimina una part.

Els diferents valors de la viscositat que es troben en la gràfica següent són calculats amb les noves rugositats absolutes determinades a partir dels cabals de l'aigua corrent un cop ja s'ha utilitzat el vinagre:



**Figura 63.** Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 3 (261 g/l) en funció de la temperatura pel tub prim i pels dos sensors.

La Figura 63 mostra les dues corbes corresponents als dos sensors per la salmorra 3. Tal i com es pot veure en aquesta, tot i haver calibrat les noves rugositats absolutes amb aigua corrent, les corbes corresponents al circuit hidràulic encara disten de la corba corresponent al viscosímetre. Tot i així, ho fan amb molta menys diferència que en el cas de la salmorra 2. Aquesta irregularitat podria ser a causa d'una reducció del diàmetre, paràmetre del qual el càlcul de la viscositat també és molt sensible (veure ESTUDI DE SENSIBILITAT).

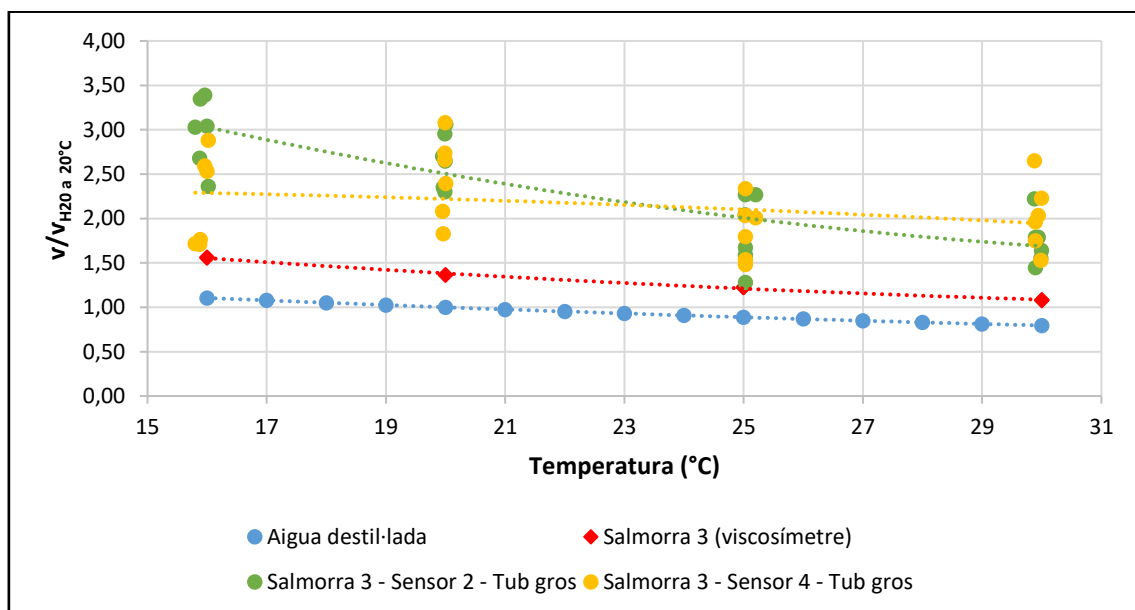
Pel que fa a la tendència de les corbes de la salmorra 3 corresponents al circuit hidràulic, tenen una forma còncava tal i com ja il·lustrava la salmorra 1. Així doncs, aquests resultats també fan pensar que els sòlids insolubles podrien tenir relació amb els resultats. Per poder-ho afirmar seria necessari prendre mesures de cabals a més temperatures per poder seguir la tendència de la corba així com més mostres de salmorra de diferents concentracions que recolzessin aquesta hipòtesi.

### 9.2.6 VISCOSITAT DE LA SALMORRA 3 (261 g/l) PEL TUB GROS

Les corbes que es troben a continuació són el resultat dels assaigs realitzats amb el tub gros del circuit hidràulic per la salmorra 3 de 261 g/l a diferents temperatures i pels dos sensors. Aquestes són comparades amb la corba introduïda anteriorment de la salmorra 3 corresponent a l'assaig realitzat amb el viscosímetre d'Ostwald.

Com en el tub prim, en el tub gros es deixa reposar vinagre en el seu interior durant uns dies per tal d'eliminar la sal de les parets d'aquest. En aquest cas, s'aconsegueix dissoldre més sal que en el tub prim. Tot i així, tampoc es pot eliminar la totalitat d'aquesta.

Els diferents valors de la viscositat que es troben en la gràfica següent són calculats amb les noves rugositats absolutes determinades a partir dels cabals de l'aigua corrent un cop ja s'ha utilitzat el vinagre:



**Figura 64.** Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 3 (261 g/l) en funció de la temperatura pel tub gros i pels dos sensors.

Com en tots els assaigs realitzats amb la canonada d'1,5 polzades, la dispersió dels resultats és molt gran deguda a la variació dels cabals mesurats i, per tant, no es pot deduir cap valor de viscositat.

### 9.2.7 COMPARATIVA DE LA SALMORRA 3 PEL TUB PRIM AMB CANVI DE DIÀMETRE

La causa més probable de que les corbes determinades amb el circuit hidràulic per la salmorra 2 i la salmorra 3 es trobin bastant per sobre de la corba calculada amb el viscosímetre és que el diàmetre ja no és l'inicial de 21,3 mm, sinó que s'ha reduït.

És evident que en el cas d'una reducció d'aquest diàmetre, aquest no seria constant ni completament circular com l'inicial. Tot i així, es calcula un diàmetre aproximat pel qual la corba de viscositat-temperatura s'aproparia a la esperada. Per fer-ho, es consideren correctes les corbes de la salmorra 1 de 331 g/l determinada amb el circuit hidràulic i les corbes determinades amb el viscosímetre.

Primerament, es calcula el tant per cent que es redueix la viscositat de la de la salmorra 3 respecte de la salmorra 1 en les corbes del viscosímetre. Aquesta reducció és aplicada als valors de la viscositat de les dues corbes (dos sensors) del circuit hidràulic corresponents a la salmorra 1. D'aquesta manera es troben els valors de la viscositat sobre els quals es vol que es trobin els valors de la viscositat de la salmorra 3.

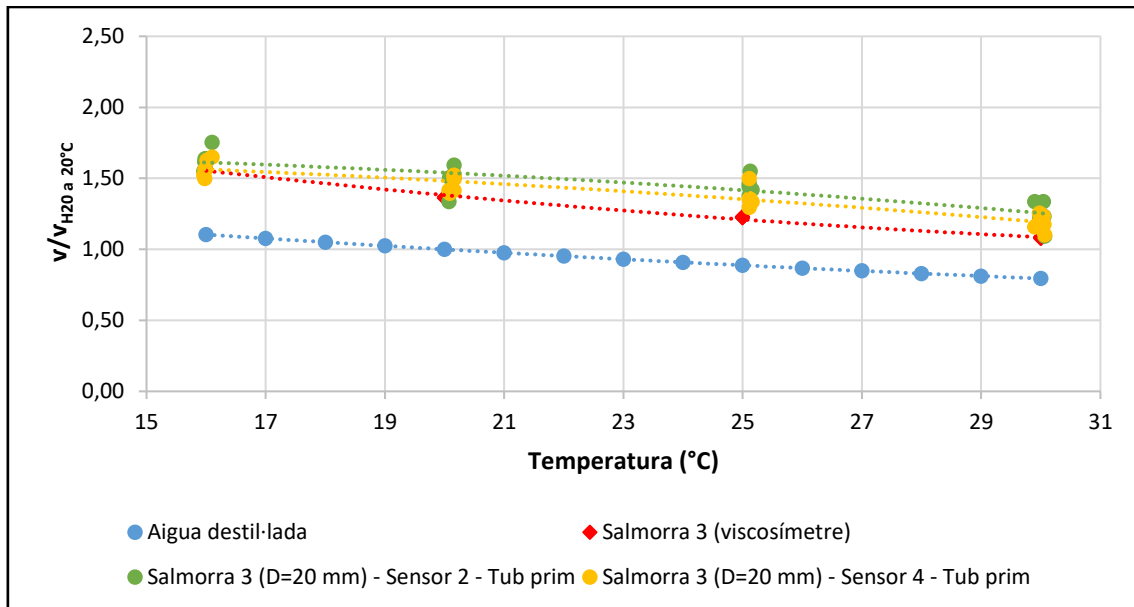
Tot seguit es proven diversos diàmetres fins a aconseguir apropar-se a aquests valors. Per a cada diàmetre provat, es comença des de l'inici del procés dels càlculs, és a dir, des del càlcul dels valors de la rugositat absoluta fins a trobar els valors de la viscositat per a cada temperatura.

Aquest diàmetre aproximat pel qual la corba viscositat-temperatura s'apropa més a l'estimada és de 20 mm. Això suposa una reducció del diàmetre d'1,3 mm, aproximadament un 6,1% respecte al diàmetre inicial.

Al disminuir el diàmetre, les rugositats absolutes també disminueixen. Aquests valors de les rugositats absolutes serien de 0,218 mm pel sensor 2 i de 0,206 mm pel sensor 4.



A continuació es mostren les corbes corresponents al tub prim dels assaigs amb el circuit hidràulic de la salmorra 3 de 261 g/l amb el nou diàmetre de 20 mm comparats amb la corba corresponent de la salmorra 3 determinada amb el viscosímetre:



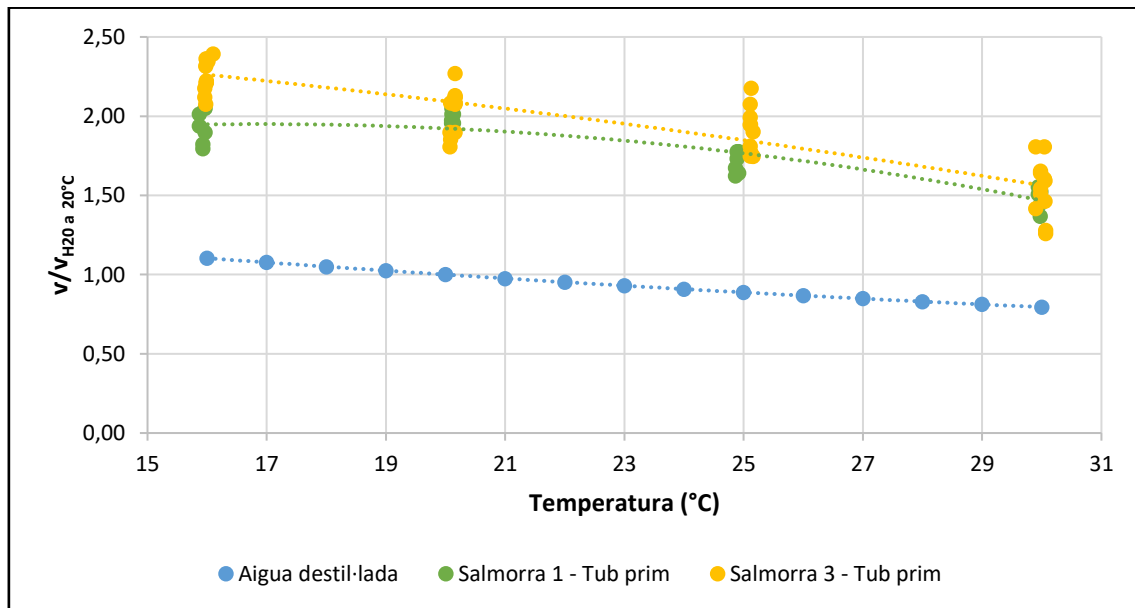
**Figura 65.** Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 3 (261 g/l) en funció de la temperatura pel tub prim i pels dos sensors amb un diàmetre de 20 mm.

Així doncs, aquestes noves corbes (Figura 65) ratifiquen que qualsevol petit canvi en el diàmetre pot fer variar d'una manera molt significativa els resultats finals de la viscositat.

### 9.2.8 COMPARATIVA DE LA SALMORRA 1 I LA SALMORRA 3 PEL TUB PRIM

En aquesta comparativa es pretén visualitzar millor els resultats obtinguts amb el tub prim dels assaigs realitzats amb el circuit hidràulic. Per fer-ho més intel·ligible, es prenen les dades dels dos sensors per formar una sola corba per cada mescla de salmorra.

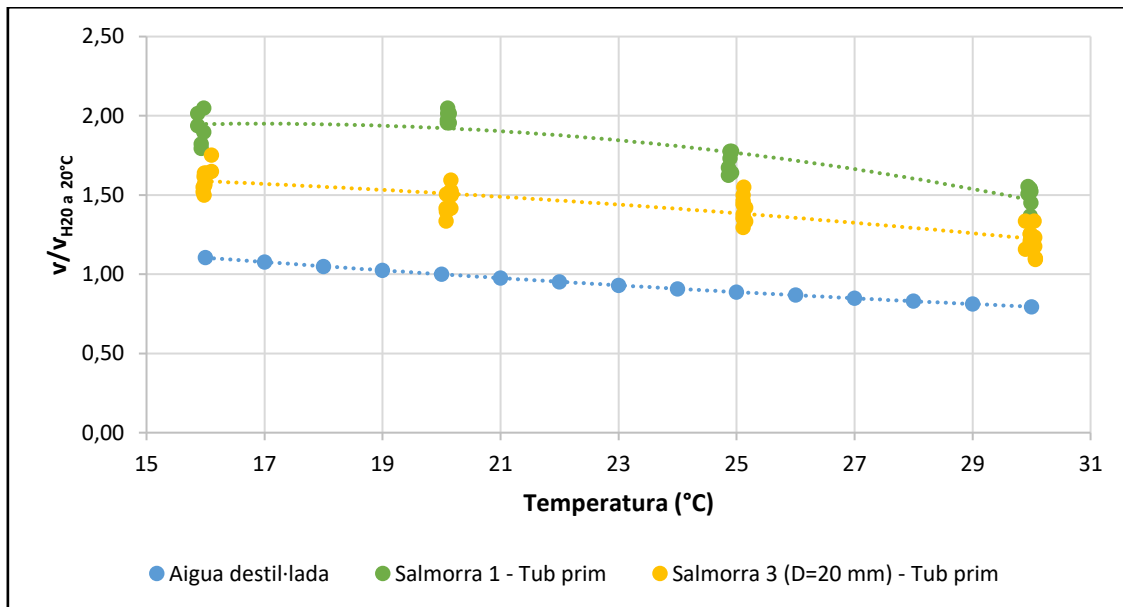
A continuació es mostren els resultats obtinguts de la salmorra 1 (331 g/l) i la salmorra 3 (261 g/l), ambdues amb el diàmetre inicial de 21,3 mm:



**Figura 66.** Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 1 (331 g/l) i de la salmorra 3 (261 g/l) en funció de la temperatura pel tub prim amb el diàmetre inicial de 21,3 mm en els dos casos.

En la Figura 66 es pot apreciar com la corba de la mostra amb major concentració està per sota de la de menor concentració. Aquest fet és contrari a l'esperat en un principi però és explicat pel fenomen de cristallització. En els assaigs amb la salmorra 1, en el tub prim, encara no es veien indicis de cristallització mentre que en els assaigs amb la salmorra 3 aquest fenomen era evident.

A continuació, per les raons explicades en l'apartat 9.2.7, es procedeix a comparar la corba de la salmorra 3 de diàmetre 20 mm amb la corba de la salmorra 1:



**Figura 67.** Viscositat cinemàtica (adimensional) de la salmorra 1 (331 g/l) i de la salmorra 3 (261 g/l) en funció de la temperatura pel tub prim amb el diàmetre inicial de 21,3 mm per la corba de la salmorra 1 i un diàmetre de 20 mm per la corba de la salmorra 3.

La Figura 67 mostra la variació de la viscositat cinemàtica de les dues mostres de salmorra amb la temperatura. Un cop fet el canvi de diàmetre per la salmorra 3, aquesta ja es troba per sota de la corba de major concentració recolzant la teoria de que a major concentració de sal, major és la viscositat.

La corba de la salmorra 1, al trobar-se aquesta en el seu límit de saturació de 331 g/l, és la corba que es pot trobar més a dalt en la gràfica, és a dir, cap mescla de salmorra podria estar per sobre d'aquesta. Totes les altres de menor concentració es trobarien entre aquesta i la corba de l'aigua destil·lada. Un exemple és la corba de la salmorra 3 (261 g/l).

## 10 CONCLUSIONS

A continuació es presenten les conclusions extretes dels assaigs duts a terme i de les seves corresponents anàlisis.

Amb relació a la instal·lació experimental es conclou:

1. La combinació dels diàmetres de les canonades d'acer, el material usat per a aquestes i la diferència de cotes entre els dipòsits principals és la correcta. Aquests procuren una pèrdua de càrrega, una rugositat relativa i uns nombres de Reynolds que permeten situar-se en el règim turbulent intermedi fent possible el càlcul de la rugositat absoluta de les canonades i la determinació de la viscositat de la salmorra.
2. La capacitat del sobreexidor corresponent al dipòsit 1 és la correcta. Tot i així, es produeixen bosses d'aire en la canonada de 10 mm que connecta aquest amb el dipòsit auxiliar. En alguns casos aquestes provoquen algunes dificultats per evacuar bé el líquid.
3. La capacitat del sobreexidor corresponent al dipòsit 2 on es mesura el cabal no és suficient per mesurar correctament aquests quan el cabal és important. En aquest cas, es produeixen fluctuacions de la làmina d'aigua en el sobreexidor quan s'assaja amb el tub de 42,2 mm. Aquestes fluctuacions provoquen una mesura menys precisa per part dels sensors.
4. La massilla de butil, material usat per tancar fuites, no és l'ídoni per assegurar un correcte funcionament d'aquesta instal·lació. Amb aquest s'aconsegueix tancar les fuites però no permanentment (segurament perquè la salmorra és molt corrosiva). En conseqüència, el circuit hidràulic s'ha de buidar per tancar les fuites constantment provocant d'aquesta manera el fenomen de la cristallització.

Amb relació als resultats obtinguts es conclou:

1. És necessària una gran precisió en la mesura de tots els paràmetres geomètrics (diàmetre de la canonada, àrea del sobreexidor, longitud de la canonada, diferència de cota entre els dos dipòsits principals), de les propietats del líquid (densitat i viscositat) i del cabal mesurat pels sensors per obtenir bons resultats. En aquests assaigs, el paràmetre que produeix variacions més importants és la mesura del cabal. Els canvis en el diàmetre, a causa de la cristal·lització de la sal en les parets de les canonades, també provoca errors grollers en els resultats.
2. La dispersió dels resultats finals de la viscositat és provocada principalment per la mesura del cabal. En el cas del tub prim, aquesta dispersió és petita però pel tub gros és molt accentuada a causa de les fluctuacions que es produeixen en la làmina lliure de líquid del sobreexidor. Aquesta gran dispersió és la principal causa per les quals es desestimen els resultats obtinguts amb la canonada de 42,2 mm de diàmetre.
3. La velocitat del flux dins del dipòsit de cua (dipòsit 2) a efectes de càlcul es considera  $v=0$  però a la pràctica, quan s'assaja amb el tub gros, la velocitat del flux en aquest dipòsit no és nul·la. Aquest fet pot ser un dels culpables de les fluctuacions que es produeixen en el sobreexidor on es mesuren els cabals.
4. El mètode emprat per al càlcul dels cabals amb la instal·lació experimental és sensible a les diferents concentracions de sal i als canvis de temperatura, permetent d'aquesta manera la determinació de diferents corbes viscositat-temperatura per a cada concentració. Tot i així, serien necessaris més assaigs que ratifiquessin aquests resultats sense que aquests estiguin afectats pel fenomen de cristal·lització.
5. El valor de la rugositat absoluta de les canonades, el qual és únic per a cada canonada, no pot ser determinat amb precisió a causa de la diferent lectura dels sensors. Com que les mesures de velocitat de pujada del nivell de líquid pel sobreexidor 2 són considerablement diferents per a cada sensor, també ho són els cabals mesurats. Això implica que quan es calcula la rugositat absoluta a partir d'aquests cabals, aquesta sigui diferent segons les dades del sensor que s'utilitzi per al càlcul.

Tot i així, tenint en compte els resultats del tub prim corresponents als dos sensors, s'estima que la rugositat absoluta d'aquesta canonada es trobaria entre els 0,15 mm i els 0,20 mm. Segons Sotelo (1995) aquests valors corresponen a un acer soldat, de qualitat normal i netejat després de molt ús. Això no és ben bé així ja que el tub era nou quan es van fer els assaigs amb aigua destil·lada i segons Sotelo (1995) els valors de rugositat absoluta haurien de trobar-se entre els 0,05 mm i els 0,10 mm. Tot i així, aquest tub es va buscar que fos d'un acer bastant rugós per tal de que fos possible trobar-se en el règim intermedi i, per tant, que fos possible calcular la seva rugositat i, posteriorment, la viscositat de la salmorra.

Pel tub gros no es podria assegurar cap valor de rugositat absoluta a causa de la poca precisió en la mesura dels cabals quan s'assaja amb aquest.

6. La quantitat de sal dipositada en el fons dels dipòsits durant els assaigs amb la mescla de concentració de 331 g/l dóna a entendre que aquesta concentració és la de saturació en aquestes condicions de temperatura i pressió.

Aquest valor difereix gairebé en 30 g/l de la concentració de saturació de 360 g/l calculada en l'estudi dinàmic comentat anteriorment. Els 360 g/l van ser calculats d'una manera teòrica (barrejant un pes de sal amb un volum de líquid coneguts) i no va ser calculat el pes sec ni la densitat. Per tant, no es va tenir en compte l'augment de volum de la mescla quan s'afegeix tanta sal i, per tant, el volum que s'utilitza per al càlcul d'aquesta no és el volum total de la mescla. Si es considerés el volum total de la mescla, aquests 360 g/l, segurament, passarien a ser uns 330 g/l aproximadament.

7. Com que la salmorra 1 amb una concentració de 331 g/l és la concentració de saturació per a aquestes condicions, qualsevol corba viscositat-temperatura de salmorra amb una altra concentració es trobaria entre aquesta i la de l'aigua. Per tant, el valor màxim de viscositat cinemàtica per al rang estudiat de temperatures seria la corresponent a la concentració de 331 g/l a 16°C amb un valor proper als  $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .
8. El fenomen de cristal·lització que apareix en les canonades modifica la rugositat i/o el diàmetre d'aquestes. A partir de l'últim assaig corresponent a la salmorra 1 (331 g/l), realitzat amb el tub gros, els resultats finals dels valors de la viscositat són incorrectes. Per tant, els valors de la viscositat de la salmorra 2 (326 g/l) i de la salmorra 3 (261 g/l) són incorrectes degut al fenomen de la cristal·lització. Per la salmorra 3, només es pot realitzar una estimació del diàmetre equivalent per a obtenir els valors esperats de

viscositat tenint en compte els resultats amb el viscosímetre i els corresponents a la salmorra 1 determinats amb el circuit hidràulic. Aquest es trobaria sobre els 20 mm.

9. Els resultats corresponents al viscosímetre d'Ostwald són més precisos que els del circuit hidràulic. Presenten menys dispersió. A més a més, els resultats són coherents en tot moment entre ells. Les corbes de major concentració es troben per sobre d'aquestes 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 amb la temperatura.
  
10. La tendència de les corbes determinades amb el circuit hidràulic és còncava, tendència que contrasta amb la del viscosímetre la qual és convexa. Aquest fenomen podria ser degut a l'efecte dels sòlids insolubles que es troben en la mescla quan s'assaja amb el circuit hidràulic ja que és la única diferència entre les mostres del model experimental del laboratori i les del viscosímetre. Per concloure que és així, s'haurien de realitzar més assaigs amb diverses mostres de salmorra (diverses concentracions) que ratifiquin aquesta tendència. També seria necessari ampliar el rang de temperatures estudiat per poder observar com continua la tendència d'aquestes corbes. A més a més, s'hauria de comprovar que aquests diferents comportaments de les corbes del circuit hidràulic i del viscosímetre no són deguts al mètode de mesura emprat.

## 11 PROPOSTES

Tenint en compte les conclusions exposades, es presenten diverses propostes amb l'ànima de complementar l'estudi d'aquesta tesina i, d'aquesta manera, poder aconseguir conclusions més segures.

En primer lloc, alguns canvis en la instal·lació experimental són necessaris per millorar els resultats finals. Per començar, si es vol assajar amb cabals importants, com aquest que aporta la canonada de 42,2 mm, és necessari que el sobreeixidor del dipòsit 2 on es mesuren els cabals sigui d'unes dimensions considerablement superiors. D'aquesta manera s'evitaria que les fluctuacions de la làmina lliure de líquid afectessin als sensors situats en el fons d'aquest sobreeixidor. A més a més, es podria aconseguir que la làmina lliure de líquid romangués inalterada i que pugés pel sobreeixidor d'una manera més lenta i constant.

Per evitar també possibles fluctuacions en els dipòsits principals deguts als cabals amb els que es treballa, s'hauria de buscar una millor manera de dissipar l'energia que utilitzant totxanes a les entrades de flux en els dipòsits. Una opció és utilitzar dipòsits de majors dimensions.

D'altra banda, a part de la mesura per volumetria, s'hauria de buscar un altre mètode per poder aforar el cabal per estar més segurs dels resultats obtinguts. La opció que es plantejava en el disseny original de la instal·lació incloïa un cabalímetre. Aquest seria una bona opció però seria necessari trobar una canonada que s'adaptés a aquest i que a la vegada fos possible evacuar tot el líquid del sobreeixidor.

Un altre aspecte important, sobretot si es treballa amb salmorra, són les fuites constants que es produeixen. Per evitar-les és necessari un material més efectiu que la massilla de butil. Hauria de ser un material que s'adaptés millor a l'acer de les canonades i al PVC dels dipòsits, i que fos resistent a un líquid tan corrosiu com la salmorra. Una altra opció és que les canonades i els dipòsits siguin del mateix material per poder-los soldar. Com que la rugositat del PVC és molt petita i no seria possible dur a terme correctament els assaigs desitjats, es podrien construir els dipòsits d'acer. Amb aquesta mesura no s'hauria de buidar entre assaig i assaig d'una mateixa mescla amb la mateixa concentració a causa de les fuites. D'aquesta manera es dificultaria l'aparició de cristalls de sal en les canonades. A més, en el cas de que fos necessari buidar la instal·lació, com ara entre assaigs de mescles amb diferents concentracions de sal, els tubs haurien d'omplir-se d'aigua fins al moment dels assaigs per evitar la cristallització.



A més a més, per millorar la gestió i realitzar els transvasaments de líquid més ràpidament, les canonades que permeten buidar els dos dipòsits principals haurien de ser d'un diàmetre major que aquest que s'utilitza de 10 mm.

Pel que fa als resultats, s'haurien de realitzar més assaigs per a diferents concentracions (sense problemes de cristallització) per poder ratificar el bon funcionament del mètode emprat amb la instal·lació experimental. A més, s'haurien de realitzar assaigs per a més temperatures per poder seguir la tendència de la corba. Aquests també ajudarien a confirmar o desmentir la tendència còncaua de les corbes que s'observa quan s'assaja amb el circuit hidràulic. Si es confirmés, s'hauria de comprovar si aquesta tendència és a causa de l'efecte dels sòlids insolubles que es troben en la mescla de salmorra o és deguda al mètode emprat per a la mesura de la viscositat.

## 12 BIBLIOGRAFIA

- Aqua Rifer. 2016. "Propiedades Físicas Del Agua". (Document Intern).
- Brillas, Enric, Rosa Maria Bastida, Francesc Centellas, and Xavier Domènech. 2004. *Conceptes de termodinàmica química i cinètica*. Barcelona: Publicacions i Edicions de la Universitat de Barcelona.
- Dajnov, V. N. 1982. *Petróleo y gas en las rocas: métodos geofísicos para determinar sus propiedades colectoras y de saturación*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Davison, A. C. and David V. Hinkley. 1997. *Bootstrap Methods and Their Application*. Cambridge: Cambridge University Press.
- E. P. Box, George, J. Stuart Hunter, and William G. Hunter. 2005. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. 2<sup>a</sup> Edició. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Escriu i Paradell, Joan. 1981. "El Col·lector de salmorres de la conca del Llobregat." *Revista Dovella* 16:30–34.
- Graf, Walter Hans. 1984. *Hydraulics of Sediment Transport*. Water Resources Publications.
- International Union of Pure and Applied Chemistry. 1991. "Solubility Data Series. Alkali Metal and Ammonium Chlorides in Water and Heavy Water (Binary Systems)." vol. 47, edited by R. Cohen-Adad and J. W. Lorimer. Oxford: Pergamon Press.
- Larock, B. E., R. W. Jeppson, and G. Z. Watters. 1999. *Hydraulics of Pipeline Systems*. CRC Press.
- Lencastre, Armando. 1998. *Manual de ingeniería hidráulica*. Ediciones de Nafarroako Unibertsitate Publikoa.
- Ostroff, A. G. and A. V. Metler. 1984. "Solubility of Calcium Sulfate Dihydrate in the System NaCl-MgCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O from 28°C to 70°C." *Journal of Chemical Engineering* 29: 42–45.
- Peña Sánchez de Rivera, Daniel. 1987. *Estadística. Modelos y métodos. Volumen 2*. Madrid: Alianza Editorial.
- Plummer, David T. 1994. *Introducció a la Bioquímica Pràctica*. Edicions de la Universitat de Barcelona.

- Raju, K. and G. Atkinson. 1990. "The Thermodynamics of "scale" Mineral Solubilities. 3. Calcium Sulfate in Aqueous NaCl." *Journal of Chemical and Engineering* 35:361-67.
- Rojas Domènech, Neus. 2015. *Estudi experimental del transport a pressió de salmorres*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Sánchez-Juny, Martí, Ernest Bladé, and Jerónimo Puertas. 2005. *Hidràulica*. 1ª Edició. Barcelona: Edicions UPC.
- 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*.
- Sharqawy, Mostafa H., John H. Lienhard V., and Syed M. Zubair. 2010. "Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data." *Desalination and Water Treatment* 16(1-3):354-80.
- Sotelo, Gilberto. 1995. *Hidràulica general*. Mèxic: Limusa.
- Triadú Galí, Arnau. 2016. *Estudi de la dinàmica del transport de dilucions salines d'alta concentració en canonades a pressió*.
- Vidal Vidal, Emma. 2011. *Valorització de Ca, Mg i SO4 en residus salins*. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- ICL Iberia. El col·lector de salmorres, una infraestructura de país. [En línia]. Disponible en: <https://sostenibilitatimineria.wordpress.com/2016/05/09/el-col·lector-de-salmorres-una-infraestructura-de-pais/> [Consulta: 23/12/2016].
- Institució Catalana d'Història Natural. [En línia]. Disponible en: <http://ichn.iec.cat/Bages/impactes/imatges/grans/cimg05.htm> [Consulta: 28/12/2016].
- Leroy Merlin. Bomba de achique Sterwins 1000 DW-3. [En línia]. Disponible en: <http://www.leroymerlin.es/fp/17332854/bomba-de-achique-sterwins-1000-dw-3> [Consulta: 5/11/2016].
- MESSTECH. Transmisor de presión sumergible Mod. MA403. [En línia]. Disponible en: [http://instapli.e.telefonica.net/catalogos/www.instapli.com\\_TRANSMISOR\\_PRESION\\_mod.MA-403.pdf](http://instapli.e.telefonica.net/catalogos/www.instapli.com_TRANSMISOR_PRESION_mod.MA-403.pdf) [Consulta: 29/11/2016].

MESSTECH. Transmisor de presión Mod. XA-700. [En línea]. Disponible en:

[http://instapli.e.telefonica.net/catalogos/www.instapli.com\\_TRANSMISOR\\_PRESION\\_mod.XA-700.pdf](http://instapli.e.telefonica.net/catalogos/www.instapli.com_TRANSMISOR_PRESION_mod.XA-700.pdf) [Consulta: 29/11/2016].

Plataforma Cívica Montsalat. 2005. Denuncia del impacto ambiental de la minería de la potasa de la comarca de Bages (Catalunya, España). [En línea]. Disponible en:

<http://www.lasequia.cat/montsalat/Documentacio/Europa.htm> [Consulta: 20/12/2016].

Plataforma Cívica Montsalat. La minería de sal al Bages. [En línea]. Disponible en:

<http://www.lasequia.cat/montsalat/> [Consulta: 5/01/2017].

Universidad Pablo de Olavide. Práctica 4: Medida de viscosidades y densidades. [En línea].

Disponible en:

<https://www.upo.es/depa/webdex/quimfis/docencia/basesFQ/Pract/cuatroycinco.pdf>  
[Consulta: 5/11/2016].

## ANNEXOS

## ANNEX A: DADES PRESES AL LABORATORI (CIRCUIT HIDRÀULIC)

Els temps que es presenten a continuació corresponen als assaigs realitzats amb el circuit hidràulic. Tots ells disposen d'un temps inicial i un temps final que corresponen als instants quan es tanca i s'obre la vàlvula de la canonada de retorn del sobreeixidor 2 respectivament. Aquests es prenen respecte a un temps base per tal de facilitar el tractament de dades que es realitza posteriorment.

ASSAIG		PROVA 1	PROVA 2	PROVA 3
NOM		A1909_AA_P1_22g	A2109_AA_P2_21g	A2109_AA_P3_24g
CONCENTRACIÓ (g/l)		-	-	-
TEMPERATURA (°C)		22	21	24
<b>Tub prim (3/4')</b>				
<b>Temps base</b>		12:29	10:05	13:08
<b>Cabal</b>	t <sub>i</sub>	35' 54"	12' 53"	19' 00"
	t <sub>f</sub>	38' 00"	15' 04"	21' 20"
	t <sub>i</sub>		15' 30"	21' 45"
	t <sub>f</sub>		17' 50"	23' 50"
	t <sub>i</sub>		18' 15"	25' 10"
	t <sub>f</sub>		20' 10"	27' 15"
<b>Tub gros (1' ½')</b>				
<b>Temps base</b>		15:45	10:46	12:53
<b>Cabal</b>	t <sub>i</sub>	7' 31"	7' 50"	2' 25"
	t <sub>f</sub>	7' 59"	8' 13"	2' 50"
	t <sub>i</sub>		9' 15"	3' 25"
	t <sub>f</sub>		9' 40"	3' 50"
	t <sub>i</sub>		11' 00"	4' 35"
	t <sub>f</sub>		11' 27"	5' 00"

**Taula 39.** Dades recollides al laboratori corresponents a les proves realitzades amb aigua corrent abans dels assaigs definitius.

ASSAIG		1	2	3
NOM		A2309_AD_1_20g	A2309_AD_1_25	A2609_AD_1_16g
CONCENTRACIÓ (g/l)		-	-	-
TEMPERATURA (°C)		20	25	16
<b>Tub prim (3/4')</b>				
<b>Temps base</b>		10:10	13:13	10:54
<b>Cabal</b>	t <sub>i</sub>	26' 30"	19' 15"	18' 05"
	t <sub>f</sub>	28' 40"	21' 40"	20' 25"
	t <sub>i</sub>	29' 15"	22' 15"	20' 55'
	t <sub>f</sub>	31' 30"	24' 30"	23' 15"
	t <sub>i</sub>	32' 00"	25' 00"	23' 45"
	t <sub>f</sub>	34' 05"	27' 05"	26' 10"
<b>Tub gros (1' ½')</b>				
<b>Temps base</b>		10:10	13:13	10:54
<b>Cabal</b>	t <sub>i</sub>	12' 45"	6' 10"	1' 55"
	t <sub>f</sub>	13' 10"	6' 36"	2' 22"
	t <sub>i</sub>	14' 00"	7' 15"	2' 55"
	t <sub>f</sub>	14' 25"	7' 38"	3' 19"
	t <sub>i</sub>	15' 30"	8' 10"	3' 55"
	t <sub>f</sub>	15' 58"	8' 35"	4' 20"

Taula 40. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 1, 2 i 3.

ASSAIG	4	5	6
NOM	A2709_AD_1_30g	A2809_S1_1_12g	A2809_S1_1_16g
CONCENTRACIÓ (g/l)	-	331	331
TEMPERATURA (°C)	30	12	16
<b>Tub prim (3/4')</b>			
Temps base		10:32	
Cabal	t <sub>i</sub>	16' 45''	
	t <sub>f</sub>	19' 25''	
	t <sub>i</sub>	20' 00''	
	t <sub>f</sub>	22' 20''	
	t <sub>i</sub>	22' 45''	
	t <sub>f</sub>	25' 20''	
<b>Tub gros (1' ½')</b>			
Temps base		10:32	10:35
Cabal	t <sub>i</sub>	0' 35''	23' 45''
	t <sub>f</sub>	1' 03''	24' 15''
	t <sub>i</sub>	1' 40''	25' 05''
	t <sub>f</sub>	2' 05''	25' 30''
	t <sub>i</sub>	2' 40''	26' 10''
	t <sub>f</sub>	3' 05''	26' 33''
			13:32
			7' 20''
			7' 48''
			8' 25''
			8' 52''
			9' 35''
			10' 00''

Taula 41. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 4, 5 i 6.



ASSAIG	7	8	9	
NOM	A2809_S1_2_16g	A2909_S1_1_20g	A2909_S1_25g	
CONCENTRACIÓ (g/l)	331	331	331	
TEMPERATURA (°C)	16	20	25	
<b>Tub prim (3/4')</b>				
Temps base	13:32	8:32	11:24	
Cabal	t <sub>i</sub>	33' 20"	20' 40"	24' 40"
	t <sub>f</sub>	35' 45"	23' 20"	27' 05"
	t <sub>i</sub>	36' 10"	23' 45"	27' 30"
	t <sub>f</sub>	38' 25"	26' 10"	29' 55"
	t <sub>i</sub>	38' 50"	26' 35"	30' 20"
	t <sub>f</sub>	41' 20"	28' 55"	32' 40"
<b>Tub gros (1' ½')</b>				
Temps base	13:32	8:32	11:24	
Cabal	t <sub>i</sub>	20' 30"	5' 00"	10' 30"
	t <sub>f</sub>	20' 58"	5' 22"	10' 55"
	t <sub>i</sub>	21' 35"	6' 05"	11' 35"
	t <sub>f</sub>	22' 02"	6' 30"	12' 00"
	t <sub>i</sub>	22' 40"	7' 05"	12' 40"
	t <sub>f</sub>	23' 07"	7' 29"	13' 05"

Taula 42. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 7, 8 i 9.

ASSAIG	10	11	12	
NOM	A0310_S1_1_30g	A1110_S2_1_20g	A1110_S2_2_20g	
CONCENTRACIÓ (g/l)	331	326	326	
TEMPERATURA (°C)	30	20	20	
<b>Tub prim (3/4')</b>				
Temps base	13:14		9:10	
Cabal	t <sub>i</sub>	29' 25"	23' 20"	
	t <sub>f</sub>	32' 05"	26' 15"	
	t <sub>i</sub>	32' 30"	26' 35"	
	t <sub>f</sub>	35' 00"	29' 40"	
	t <sub>i</sub>	35' 25"	30' 00"	
	t <sub>f</sub>	37' 50"	33' 20"	
<b>Tub gros (1' ½')</b>				
Temps base	13:14	9:10	9:10	
Cabal	t <sub>i</sub>	15' 20"	2' 55"	9' 15"
	t <sub>f</sub>	15' 50"	3' 20"	9' 45"
	t <sub>i</sub>	16' 40"	3' 50"	10' 15"
	t <sub>f</sub>	17' 10"	4' 18"	10' 45"
	t <sub>i</sub>	17' 50"	4' 50"	11' 15"
	t <sub>f</sub>	18' 18"	5' 17"	11' 43"

Taula 43. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 10, 11 i 12.

ASSAIG	13	14	15	
NOM	A1110_S2_1_25g	A1410_S2_1_16g	A1410_S2_1_17g	
CONCENTRACIÓ (g/l)	326	326	326	
TEMPERATURA (°C)	25	16	17	
<b>Tub prim (3/4')</b>				
Temps base	12:32	11:54	11:54	
Cabal	t <sub>i</sub>	17' 00''	5' 35''	40' 30''
	t <sub>f</sub>	20' 30''	8' 50''	43' 40''
	t <sub>i</sub>	20' 55''	9' 10''	44' 00''
	t <sub>f</sub>	24' 10''	12' 15''	47' 30''
	t <sub>i</sub>	24' 35''	12' 35''	48' 00''
	t <sub>f</sub>	27' 45''	15' 40''	51' 10''
<b>Tub gros (1' ½')</b>				
Temps base	12:32		11:54	
Cabal	t <sub>i</sub>	4' 20''		26' 20''
	t <sub>f</sub>	4' 50''		26' 50''
	t <sub>i</sub>	5' 20''		27' 25''
	t <sub>f</sub>	5' 45''		27' 57''
	t <sub>i</sub>	6' 15''		28' 30''
	t <sub>f</sub>	6' 45''		28' 59''

Taula 44. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 13, 14 i 15.

<b>ASSAIG</b>	16	17	
<b>NOM</b>	A1710_S2_1_30g	A0211_AA_P3_20g	
<b>CONCENTRACIÓ (g/l)</b>	326	-	
<b>TEMPERATURA (°C)</b>	30	20	
<b>Tub prim (3/4')</b>			
<b>Temps base</b>	15:23	12:02	
<b>Cabal</b>	t <sub>i</sub>	29' 10''	1' 30''
	t <sub>f</sub>	32' 40''	4' 50''
	t <sub>i</sub>	33' 05''	5' 15''
	t <sub>f</sub>	36' 30''	8' 10''
	t <sub>i</sub>	37' 00''	8' 35''
	t <sub>f</sub>	40' 20''	11' 35''
<b>Tub gros (1' ½'')</b>			
<b>Temps base</b>	15:23		
<b>Cabal</b>	t <sub>i</sub>	11' 05''	
	t <sub>f</sub>	11' 35''	
	t <sub>i</sub>	12' 15''	
	t <sub>f</sub>	12' 45''	
	t <sub>i</sub>	13' 20''	
	t <sub>f</sub>	13' 50''	

Taula 45. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 16 i 17.

ASSAIG	18	19	20	
NOM	A0411_AA_1_16g	A0411_AA_1_20g	A0711_AA_1_25g	
CONCENTRACIÓ (g/l)	-	-	-	
TEMPERATURA (°C)	16	20	25	
Tub prim (3/4')				
Temps base	11:07	14:52	14:28	
Cabal	t <sub>i</sub>	9' 25''	18' 50''	1' 05''
	t <sub>f</sub>	12' 50''	22' 20''	4' 30''
	t <sub>i</sub>	13' 20''	22' 55''	5' 05''
	t <sub>f</sub>	16' 10''	26' 00''	8' 00''
	t <sub>i</sub>	16' 45''	26' 40''	8' 35''
	t <sub>f</sub>	19' 20''	29' 50''	11' 30''
	t <sub>i</sub>	20' 00''	30' 25''	12' 00''
	t <sub>f</sub>	22' 45''	33' 20''	15' 00''
	t <sub>i</sub>	23' 20''	33' 50''	15' 40''
	t <sub>f</sub>	26' 00''	36' 55''	18' 35''
	t <sub>i</sub>	26' 40''	37' 25''	19' 15''
	t <sub>f</sub>	29' 30''	40' 30''	22' 15''
Tub gros (1' ½')				
Temps base	11:07	14:52	14:28	
Cabal	t <sub>i</sub>	42' 30''	1' 10''	27' 35''
	t <sub>f</sub>	42' 55''	1' 37''	28' 04''
	t <sub>i</sub>	43' 40''	2' 20''	28' 42''
	t <sub>f</sub>	44' 00''	2' 45''	29' 08''
	t <sub>i</sub>	44' 50''	3' 27''	29' 48''
	t <sub>f</sub>	45' 15''	3' 55''	30' 17''
	t <sub>i</sub>	46' 05''	4' 35''	30' 54''
	t <sub>f</sub>	46' 30''	5' 02''	31' 23''
	t <sub>i</sub>	47' 10''	5' 40''	32' 02''
	t <sub>f</sub>	47' 40''	6' 06''	32' 30''
	t <sub>i</sub>	48' 20''	13' 52''	33' 06''
	t <sub>f</sub>	48' 50''	14' 22''	33' 34''

Taula 46. Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 18, 19 i 20.

ASSAIG		21	22	23
NOM		A0911_AA_1_30g	A1011_S3_1_16g	A1111_S3_1_20g
CONCENTRACIÓ (g/l)		-	261	261
TEMPERATURA (°C)		30	16	20
<b>Tub prim (3/4')</b>				
<b>Temps base</b>		9:07	11:20	10:37
<b>Cabal</b>	t <sub>i</sub>	20' 50''	7' 20''	17' 25''
	t <sub>f</sub>	24' 25''	10' 50''	21' 00''
	t <sub>i</sub>	25' 00''	11' 20''	21' 30''
	t <sub>f</sub>	28' 10''	14' 35''	24' 40''
	t <sub>i</sub>	28' 40''	15' 05''	25' 05''
	t <sub>f</sub>	31' 50''	18' 15''	28' 25''
	t <sub>i</sub>	32' 20''	18' 45''	29' 00''
	t <sub>f</sub>	35' 30''	22' 10''	32' 10''
	t <sub>i</sub>	36' 00''	22' 45''	32' 40''
	t <sub>f</sub>	39' 10''	25' 55''	35' 55''
	t <sub>i</sub>	39' 40''	26' 30''	36' 35''
	t <sub>f</sub>	43' 00''	29' 35''	39' 45''
<b>Tub gros (1' ½')</b>				
<b>Temps base</b>		9:07	11:20	10:37
<b>Cabal</b>	t <sub>i</sub>	4' 15''	37' 30''	5' 34''
	t <sub>f</sub>	4' 42''	38' 01''	6' 05''
	t <sub>i</sub>	5' 18''	38' 40''	6' 41''
	t <sub>f</sub>	5' 48''	39' 10''	7' 12''
	t <sub>i</sub>	6' 26''	39' 45''	7' 49''
	t <sub>f</sub>	6' 56''	40' 15''	8' 20''
	t <sub>i</sub>	7' 31''	40' 52''	8' 55''
	t <sub>f</sub>	8' 00''	41' 21''	9' 25''
	t <sub>i</sub>	8' 36''	41' 56''	10' 00''
	t <sub>f</sub>	9' 06''	42' 26''	10' 32''
	t <sub>i</sub>	9' 41''	43' 01''	11' 07''
	t <sub>f</sub>	10' 10''	43' 31''	11' 28''

**Taula 47.** Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 21, 22 i 23.

<b>ASSAIG</b>	24	25	
<b>NOM</b>	A1111_S3_1_25g	A1511_S3_1_30g	
<b>CONCENTRACIÓ (g/l)</b>	261	261	
<b>TEMPERATURA (°C)</b>	25	30	
<b>Tub prim (3/4')</b>			
<b>Temps base</b>	16:29	9:13	
<b>Cabal</b>	t <sub>i</sub>	33' 30"	17' 15"
	t <sub>f</sub>	37' 10"	20' 50"
	t <sub>i</sub>	37' 40"	21' 25"
	t <sub>f</sub>	40' 50"	24' 50"
	t <sub>i</sub>	41' 20"	25' 20"
	t <sub>f</sub>	44' 40"	28' 40"
	t <sub>i</sub>	45' 30"	29' 05"
	t <sub>f</sub>	48' 45"	32' 25"
	t <sub>i</sub>	49' 15"	33' 00"
	t <sub>f</sub>	52' 45"	36' 25"
	t <sub>i</sub>	53' 15"	36' 55"
	t <sub>f</sub>	56' 45"	40' 15"
<b>Tub gros (1' ½')</b>			
<b>Temps base</b>	16:29	9:13	
<b>Cabal</b>	t <sub>i</sub>	10' 05"	2' 31"
	t <sub>f</sub>	10' 35"	3' 04"
	t <sub>i</sub>	23' 07"	3' 42"
	t <sub>f</sub>	23' 39"	4' 15"
	t <sub>i</sub>	24' 13"	4' 52"
	t <sub>f</sub>	24' 43"	5' 24"
	t <sub>i</sub>	25' 16"	6' 02"
	t <sub>f</sub>	26' 46"	6' 35"
	t <sub>i</sub>	26' 22"	7' 13"
	t <sub>f</sub>	26' 51"	7' 45"
	t <sub>i</sub>	27' 25"	8' 22"
	t <sub>f</sub>	27' 57"	8' 55"

**Taula 48.** Dades recollides al laboratori corresponents als assaigs 24 i 25.

## ANNEX B: DADES PRESES AL LABORATORI (VISCOSÍMETRE D'OSTWALD)

Les dades que es presenten a continuació corresponen als temps mesurats amb el cronòmetre en els assaigs amb el viscosímetre d'Ostwald per a cada mescla d'aigua i salmorra, i per a cada temperatura.

Les dades en color vermell corresponen a dades preses a una temperatura que no corresponia amb la que es volia assajar a causa del ràpid canvi de temperatura del líquid que es produeix durant l'assaig. Aquestes no es tenen en compte en els càlculs posteriors.

Les concentracions que apareixen en les taules corresponen a les mostres de salmorra filtrades, és a dir, sense sòlids en suspensió.

MOSTRA		Aigua destil·lada	Aigua destil·lada	Aigua destil·lada	Aigua destil·lada
CONCENTRACIÓ (g/l)		-	-	-	-
TEMPERATURA (°C)		16	20	25	30
<b>Δ TEMPS</b>	t1	1' 38'' 28	1' 39'' 05	1' 33'' 98	1' 28'' 77
	t2	1' 43'' 08	1' 38'' 75	1' 32'' 01	1' 24'' 89
	t3	1' 41'' 86	1' 40'' 14	1' 31'' 45	1' 24'' 70
	t4	1' 41'' 77		1' 31'' 09	1' 24'' 91
	t5	1' 42'' 08			1' 24'' 57

**Taula 49.** Temps mesurats amb el cronòmetre corresponents als assaigs realitzats amb aigua destil·lada pel viscosímetre d'Ostwald.

MOSTRA		Aigua corrent	Aigua corrent	Aigua corrent	Aigua corrent
CONCENTRACIÓ (g/l)		-	-	-	-
TEMPERATURA (°C)		16	20	25	30
<b>Δ TEMPS</b>	t1	1' 49'' 11	1' 38'' 82	1' 33'' 89	1' 27'' 01
	t2	1' 45'' 23	1' 38'' 82	1' 34'' 30	1' 26'' 25
	t3	1' 45'' 46	1' 39'' 50	1' 33'' 52	1' 24'' 91
	t4	1' 45'' 73	1' 38'' 89	1' 34'' 50	1' 24'' 85
	t5				1' 26'' 25

**Taula 50.** Temps mesurats amb el cronòmetre corresponents als assaigs realitzats amb aigua corrent pel viscosímetre d'Ostwald.



MOSTRA		Salmorra 1	Salmorra 1	Salmorra 1	Salmorra 1
CONCENTRACIÓ (g/l)		330	330	330	330
TEMPERATURA (°C)		16	20	25	30
$\Delta$ TEMPS	t1	2' 55'' 08	2' 44'' 31	2' 33'' 33	2' 20'' 21
	t2	2' 53'' 18	2' 44'' 44	2' 30'' 23	2' 21'' 10
	t3	2' 56'' 41	2' 44'' 08	2' 31'' 40	2' 19'' 52
	t4	2' 55'' 82	2' 43'' 58	2' 30'' 45	2' 19'' 60
	t5				

**Taula 51.** Temps mesurats amb el cronòmetre corresponents als assaigs realitzats amb la salmorra 1 (330 g/l) pel viscosímetre d'Ostwald.

MOSTRA		Salmorra 2	Salmorra 2	Salmorra 2	Salmorra 2
CONCENTRACIÓ (g/l)		323	323	323	323
TEMPERATURA (°C)		16	20	25	30
$\Delta$ TEMPS	t1	2' 48'' 33	2' 41'' 56	2' 29'' 11	2' 18'' 43
	t2	2' 52'' 84	2' 42'' 42	2' 30'' 33	2' 19'' 80
	t3	2' 47'' 76	2' 42'' 26	2' 30'' 88	2' 18'' 45
	t4	2' 48'' 48		2' 30'' 14	2' 17'' 79
	t5	2' 46'' 89			

**Taula 52.** Temps mesurats amb el cronòmetre corresponents als assaigs realitzats amb la salmorra 2 (323 g/l) pel viscosímetre d'Ostwald.

MOSTRA		Salmorra 3	Salmorra 3	Salmorra 3	Salmorra 3
CONCENTRACIÓ (g/l)		262	262	262	262
TEMPERATURA (°C)		16	20	25	30
$\Delta$ TEMPS	t1	2' 22'' 30	2' 15'' 75	2' 06'' 82	1' 55'' 45
	t2	2' 24'' 36	2' 15'' 68	2' 06'' 08	1' 54'' 83
	t3	2' 23'' 94	2' 16'' 10	2' 06'' 09	1' 57'' 25
	t4	2' 23'' 46	2' 17'' 48		1' 55'' 68
	t5				

**Taula 53.** Temps mesurats amb el cronòmetre corresponents als assaigs realitzats amb la salmorra 3 (262 g/l) pel viscosímetre d'Ostwald.