



**EPS**

Escola Politècnica  
Superior

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Enginyeria Agroalimentària

**Títol:** Eficiència energètica en filtres de matriu granular per a reg localitzat

**Document:** Memòria

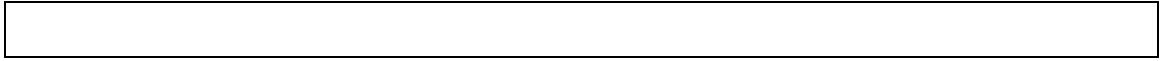
**Alumne:** Nil Tarrés Amargant

**Director/Tutor:** Francesc Ramírez de Cartagena Bisbe

**Departament:** d' Enginyeria Química, Agrària i Tecnologia Agroalimentària

**Àrea:** Enginyeria hidràulica

**Convocatòria** (mes/any): Juny de 2014



# Índex Memòria

---

Resum.....	3
Paraules clau .....	5
Agraïments .....	6
1. Introducció .....	8
1.1. Usos de l'aigua .....	8
1.2. Importància de la filtració en reg per degoteig.....	10
1.3. Funcionament dels filtres de matriu granular.....	11
1.4. Pèrdues de càrrega en els filtres de matriu granular .....	14
1.4.1. Pèrdua de càrrega referida al medi filtrant.....	14
1.4.2. Elements auxiliars del sistema de filtrat de matriu granular .....	15
1.4.3. Importància del medi filtrant en el consum energètic d'un filtre .....	15
2. Objectius .....	16
2.1. Objectiu general .....	16
2.2. Objectius específics .....	16
3. Material i mètodes .....	17
3.1. Obtenció dels medis filtrants .....	17
3.1.1. Sorra sílice: tamisatge .....	18
3.1.2. Vidre ECO filtrant: tamisatge.....	19
3.2. Caracterització del medi filtrant.....	19
3.2.1. Material .....	19
3.2.2. Mètode.....	20
3.3. Instal·lació experimental i assaigs de filtració.....	22
3.3.1. Descripció de la instal·lació experimental.....	22
3.3.2. Característiques dels assajos realitzats .....	27
3.3.3. Procediment experimental.....	29
3.4. Determinació de les pèrdues de càrrega en el filtre .....	30
3.5. Determinació de la conductivitat hidràulica saturada .....	31
3.6. Representació d'equacions característiques a filtració .....	32
3.7. Determinació dels paràmetres de funcionament en el procés de filtració .....	33
3.7.1. Velocitat lineal mitjana i velocitat real de filtració .....	33

3.7.2.	Càrrega hidràulica superficial i volumètrica.....	34
3.8.	Eficiència energètica i cost econòmic .....	35
4.	Resultats i discussió.....	36
4.1.	Característiques granulomètriques del medi filtrant.....	36
4.1.1.	Sorra de sílice .....	36
4.1.2.	Vidre ECO filtrant.....	36
4.2.	Densitat aparent, densitat real i porositat del medi filtrant .....	37
4.3.	Anàlisi de les pèrdues de càrrega produïdes en el filtre .....	37
4.3.1.	Pressions en els manòmetres del filtre .....	38
4.3.2.	Pèrdues de càrrega produïdes en el procés de filtració.....	40
4.3.3.	Pèrdues de càrrega en el procés de contrarentat.....	47
4.4.	Conductivitat hidràulica saturada dels medis filtrants .....	48
4.5.	Equacions de funcionament a filtració.....	49
4.6.	Determinació dels paràmetres de funcionament en el procés de caracterització ....	51
4.6.1.	Determinació de la velocitat real .....	51
4.6.2.	Determinació de la càrrega superficial i volumètrica .....	51
4.7.	Eficiència energètica en el procés de filtració.....	52
4.7.1.	Eficiència dels medis en termes relatius .....	53
4.7.2.	Eficiència dels medis en termes absoluts.....	54
5.	Conclusions .....	55
6.	Bibliografia .....	57

## Resum

Els sistemes de reg localitzat han representat un gran avenç en les tècniques de regadiu. En els darrers anys la instal·lació d'aquest tipus de sistemes ha augmentat, substituint els mètodes més tradicionals. Aquesta tècnica suposa una major eficiència enfront la resta de sistemes, així com també una garantia sanitària.

Aquests sistemes impliquen molts avantatges enfront la resta. Tot i així se'ls associen certes problemàtiques relacionades amb l'obtenció dels emissors i tuberes de distribució.

Per tal de fer front a les obtencions del sistema de conducció i emissors és oportú col·locar tancs de filtratge per tractar l'aigua abans de ser aplicada en el camp. Els filtres de matriu granular són la millor opció, ja que impliquen una gran qualitat de filtratge.

En el present treball s'han caracteritzat físicament 4 medis filtrants, la sorra de sílice i vidre ECO filtrant reciclat en les granulometries compreses entre 0,63-0,75 mm i 0,75-0,84 mm.

Primerament s'han obtingut les fraccions de medi descrites a partir de la fracció inicial en format comercial compresa entre 0,5 i 1 mm mitjançant un procés de tamisatge.

Una vegada finalitzat el procés de tamisat s'ha procedit a la caracterització del medi. En aquest cas s'ha determinat per a cada un d'ells els paràmetres de densitat aparent i real, així com també la porositat, on s'han observat diferències significatives entre materials. Aquestes principalment són degudes a la geometria, ja que al ser més fines, apuntades, irregulars i asimètriques en el vidre ECO filtrant fan que la densitat aparent sigui més baixa i per tant la porositat més elevada.

Amb els quatre medis s'han realitzat diferents assaigs en una estació experimental de filtratge, per a diferents situacions de funcionament, variant paràmetres com l'alçada de columna de medi, funcionament a filtració i a contrarentat, així com també assaigs sense medi filtrant.

Durant els assaigs s'han fet circular diferents cabals compresos entre 0,4 i 1,1 L/s pel filtre, i a partir de cinc manòmetres disposats al llarg del filtre s'emmagatzemaven els valors de pressió de forma contínua al llarg de l'assaig. De manera que a partir de les pressions en cada punt s'han obtingut les pèrdues de càrrega totals i per trams durant el procés de filtració per a diferents condicions i en funció del cabal.

Una vegada tractades aquestes dades, s'han pogut representar les corbes de pèrdua de càrrega per a cada medi per trams i del conjunt. Aquestes s'han pogut comparar i s'ha observat que en el tram del filtre que comprèn la crepina s'hi produeix una pèrdua de càrrega d'entre el 55 i 75 % per granulometria entre 0,63-0,75 mm i d'entre el 70 i 80 % per la granulometria 0,75-0,84 mm respecte la total en el filtre. Per tant s'ha destacat la importància que té el disseny de la crepina sobre la pèrdua de càrrega total del filtre. També s'ha observat que al augmentar el cabal circulat la pèrdua de càrrega en aquest tram augmenta.

També s'ha caracteritzat el comportament del medi a partir de la conductivitat hidràulica saturada referida als diferents medis a partir de la linealització de la pèrdua de càrrega en funció del cabal en el tram d'entremig de la columna de medi, el qual no es veu alterat per fenòmens deguts a la presència d'elements auxiliars. S'ha aïllat el pendent de la recta, el qual correspon amb la conductivitat hidràulica saturada de cada medi i s'ha observat que aquesta està més influenciada per la granulometria del medi que per el material.

Per últim s'ha estudiat el comportament de cada medi en termes d'eficiència energètica. No s'han observat diferències entre materials filtrants en la granulometria compresa entre 0,75-0,84 mm, essent la fracció més eficient. No obstant s'aconsegueix una major eficiència energètica en el vidre ECO filtrant quan es treballa amb la granulometria compresa entre 0,63-0,75 mm, essent un 34 % més eficient que la sorra de sílice per aquesta mateixa granulometria. Aquest fet implica que quan es necessiti un major rendiment en la retenció de partícules fines, el vidre és la opció més adequada.

Energèticament i econòmicament la utilització de medis filtrants amb una major eficiència pot arribar a suposar un gran avenç en l'estalvi d'energia, així com també en la reducció dels costos energètics en els processos de filtració.

## Paraules clau

- Reg localitzat
- Filtració
- Medi filtrant
- Granulometria
- Llei de Darcy
- Cabal
- Pèrdua de càrrega
- Conductivitat hidràulica
- Eficiència

## Agraïments

Vull expressar el meu agraïment a totes aquelles persones i institucions que han fet possible la realització d'aquest treball de fi de grau.

Primerament vull agrair al tutor del projecte, el Dr. Francesc Ramírez de Cartagena per brindar-me la oportunitat de ser partícip d'un projecte d'aquesta envergadura, així com pel temps que hi ha dedicat. D'altre banda també vull agrair i remarcar els coneixements transmesos i la gran tasca realitzada per en Josep Bové, sense la seva ajuda res d'això hagués estat possible.

Vull agrair també a tots el personal docent del Grau en Enginyeria Agroalimentària de la Universitat de Girona, especialment a en Miquel, en Gerard, en Jaume, en Xevi, en Lluís i en Joan, així com la Montserrat, pel seu suport durant tota la carrera i la confiança que m'han sabut transmetre.

A la Maria Gispert i en Giovanni Pardini per donar-me accés al laboratori de sòls, així com també per les facilitats i el bon tracte rebut.

També vull agrair a l'empresa RoyalVerd del Grup Morera per donar-me la oportunitat de compaginar el treball de fi de grau amb les pràctiques a la empresa i tota la confiança, coneixements i suport que m'està aportant, especialment a l'Eudald, en Quim per la seva professionalitat i predisposició a ensenyar, així com també a l'Èric per tots els coneixements que m'ha transmès i la paciència que ha tingut.

Vull agrair especialment als meus pares i família en general per donar-me una oportunitat de realitzar estudis superiors, sabent de l'esforç que això els ha comportat així com també per l'estima i il·lusió demostrada en tot moment. A la meva germana, la Coral, li vull agrair tot el suport que m'ha representat i transmetre-l'hi totes les forces en l'etapa que se-l'hi presenta.

També vull agrair d'una forma molt especial a la meva parella, l'Ainoa, per ser un referent per mi i per tota l'energia, les ganes i estima que m'ha demostrat. L'ànimo també a tirar endavant amb els seus estudis amb molta il·lusió.

També vull agrair els bons moments viscuts i l'ajuda dels meus companys de classe, especialment amb en Ferran i en Miquel, amb els quals hem forjat una gran amistat i els tinc especial estima.

Agrair també a tots els meus amics de la colla, en Pau, en Joan, en Francesc, en Julià, en Radu, en Jordi, l'Aleix i als dos Eduard per totes les experiències viscudes i els moments viscuts i que m'han ajudat a tirar endavant amb més forces. També a l'Aniol i en Marc per tots els moments i l'amistat que m'han brindat.

Agrair també a les persones que formen o han format part d'Esplais de la Garrotxa, segurament sense tots ells mai hagués estat qui sóc. Especialment als Gamossinos, l'Eduard, la Judit, la Berta, l'Àlex i en Ruben, en Marc, en Carlos, en David i la Txell, per ser grans persones i



superar tot el que se'ns posa per davant. També gràcies a la Clara i a la Marta entre molts altres.

A tots vosaltres i a totes aquelles persones o institucions que no he citat i que han participat en la realització d'aquest projecte, a tots ells gràcies.

## 1. Introducció

Aquest projecte de final de carrera s'emmarca en la línia d'investigació sobre "Filtració en sistemes de reg per degoteig" del Grup de Recerca Consolidat de la Generalitat de Catalunya "Enginyeria i Gestió del Reg".

### 1.1. Usos de l'aigua

La disponibilitat d'aigua és un dels factors més importants en qualsevol projecte agrícola perquè condiciona tant la seva productivitat com la seva rendibilitat. La condició d'element primordial de l'aigua és la que fa que tingui també una demanda molt elevada per part d'altres sectors de l'activitat humana. Això confereix a l'aigua un caràcter de bé escàs pel qual s'estableix una competència en la que l'agricultura té, clarament, una posició de desavantatge front a altres activitats que, o bé obtenen un rendiment més elevat de l'aigua utilitzada, com els sectors industrial o de serveis, o tenen prioritat social com l'ús domèstic. (Puig-Bargués, 2003).

Per estalviar aigua en aquest sector cal una transformació de les infraestructures i dels sistemes de regatge. La reducció del consum d'aigua per a usos agrícoles es pot aconseguir substituint els sistemes tradicionals de reg per escolament o inundació, que consumeix molta aigua, per sistemes més moderns que racionalitzen i controlen el consum d'aigua i rendibilitzen la producció agrícola.

A Espanya, i cada vegada més, el sistema de reg majoritari és el localitzat amb un 48,23 % de la superfície, seguit del de gravetat amb un 28,38 % i el d'aspersió amb un 14,95 %, així com el reg amb pivot que suposa un 8,42 % (MAGRAMA, 2013). En la taula 1. es mostren els tipus de regadiu a Espanya.

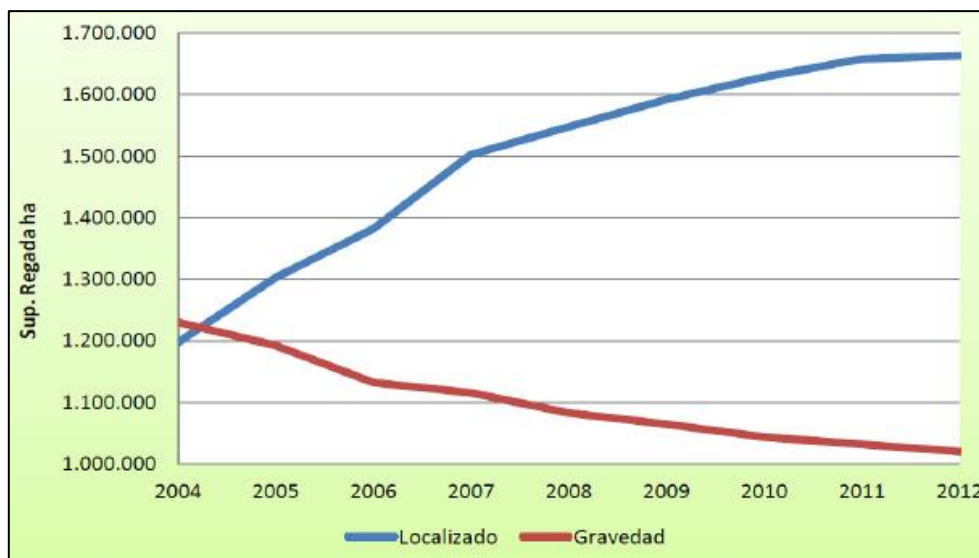
**Taula 1.1. Tipus de regadiu a Espanya, any 2013 (elaboració pròpia a partir de dades del MAGRAMA, 2013).**

Tipus de reg	Superfície [ha]	Superfície [%]
Gravetat	1.004.782	28,38 %
Aspersió	529.215	14,95 %
Reg amb pivot	298.169	8,42 %
<b>Localitzat</b>	<b>1.707.576</b>	<b>48,23 %</b>
Sense informació	816	0,02 %
<b>TOTAL</b>	<b>3.540.560</b>	<b>100 %</b>

A Catalunya la superfície regada amb reg localitzat suposa un 5,02 % (85.720 ha) respecte la total en l'estat.

A la gràfica 2. es pot observar l'evolució oposada que s'ha produït en els sistemes de reg localitzat i de gravetat.

**Gràfica 1.1. Evolució de les superfícies regades per gravetat i reg localitzat a Espanya, anys 2004 – 2012 (MAGRAMA, 2012).**



Aquesta dinàmica en els darrers anys no és casualitat, sinó que està comprovada la seva eficàcia. El sistema de reg localitzat presenta una sèrie d'avantatges en front la resta de sistemes. Els sistemes RLAF (reg localitzat d'alta freqüència) són els sistemes de reg que potencialment permeten aconseguir una major eficiència global (o total) de reg, motiu pel qual poden suposar un major estalvi d'aigua enfront dels sistemes per superfície i per aspersió.

Aquest consisteix en aplicar l'aigua en una zona més o menys restringida del volum de sòl que habitualment ocupen les arrels. Segons Fuentes Yagüe (2003), les seves principals característiques són:

- No es mulla la totalitat del sòl
- S'utilitzen petits cabals a baixa pressió
- L'aigua s'aplica amb alta freqüència

La dotació bruta d'un reg tradicional és d'uns 10.000 m<sup>3</sup>/ha i any, mentre que un reg complet modernitzat es situa sobre els 6.500 m<sup>3</sup>/ha i any, i el reg de suport com a màxim és de 3.500 m<sup>3</sup>/ha i any (Gencat, 2009).

La quantificació del percentatge de les necessitat d'aigua netes del cultiu respecte a les totals dona origen al concepte d'eficiència total de reg. L'eficiència total es compon de l'eficiència de conducció, distribució i aplicació. En un sistema RLAF a l'ésser pràcticament nul·les les pèrdues en la xarxa de conducció i distribució, serà determinant l'eficiència d'aplicació. D'altra banda aquest sistema suposa una garantia des d'un punt de vista sanitari quan s'utilitzen aigües regenerades.

## 1.2. Importància de la filtració en reg per degoteig

Els emissors de degoteig en regs localitzats utilitzen petits orificis o vies de flux amb diàmetres petits per lliurar els baixos cabals requerits. Per tant, estan subjectes a l'obstrucció per partícules, el creixement orgànic, o precipitat químic de l'aigua de reg. Un filtrat eficient i fiable és obligatori per a l'operació de reg per degoteig amb èxit.

La qualitat de l'aigua és una preocupació important en el maneig de sistemes de reg per degoteig. L'obstrucció física, química, així com de contaminants biològics dels emissors pot crear un problema significatiu en el manteniment diari del sistema.

L'aigua que s'utilitzarà en el reg per degoteig requereix del filtrat i, sovint altres formes de tractament. Les partícules de restes de matèria i els creixements orgànics es poden eliminar de l'aigua que entra en la instal·lació utilitzant una filtració adequada. Sovint, es requereix d'un tractament químic per evitar creixements orgànics i/o precipitació química en el sistema de reg.

Existeix una gran varietat de filtres per a l'eliminació d'agents d'obstrucció físics de l'aigua de reg. L'elecció dependrà de l'origen i la quantitat de contaminació prevista en el sistema, així com la dimensió del sistema de reg. Els filtres de malla han de ser una elecció inicial, quan l'aigua es bomba des d'un pou on l'únic requisit de filtració és eliminar les partícules minerals. Aquests són suficients quan hi ha una absència de contaminació orgànica, a més, en general són de baix cost i simples de mantenir. Els filtres d'anella són una alternativa als de malla. D'altra banda, per tal d'eliminar partícules, així com creixements orgànics, es solen utilitzar els filtres de matriu granular (Dorota et al., 1994).

Els filtres de matriu granular són molt efectius per retenir part de les matèries en suspensió, substàncies col·loïdals, matèria orgànica i inclús algues. Poden filtrar a través de diferents alçades de sorra, i poden acumular grans quantitats de contaminants abans que sigui necessària la seva neteja (Keller i Bliesner, 1990). Hi ha factors que afecten el funcionament dels filtres de matriu granular, els quals estan associats a la qualitat de l'aigua, les característiques del medi granular el cabal, així com la caiguda de pressió admissible (Rodrigo, 1997).

Duran-Ros (2008) i Elbana (2011) han demostrat que els filtres de matriu granular aporten una major qualitat de filtratge front a d'altres filtres com el de malles o bé el d'anelles. En aquest sentit, Duran (2008) en un assaig en reg per degoteig amb aigües regenerades, va obtenir una reducció en els sòlids en suspensió del 67% en filtre de sorra, 8,5% en filtre combinat de malla i anelles, 3,3% en filtre d'anelles i 3,1% en filtre de malla, amb diferències significatives al 5% entre la filtració amb sorra i la resta. D'altra banda, Elbana (2011) en un assaig de 1620 h de durada en reg per degoteig enterrat amb aigües regenerades i filtració amb sorra, va aconseguir reduccions del 70% en els sòlids en suspensió i un increment del 16% en l'oxigen dissolt. D'aquests assajos es desprèn que els filtres de sorra tenen la capacitat de suportar

carregues contaminants de major grau que altres tipus de filtres, tot i que la seva instal·lació comporta una inversió més elevada.

En les instal·lacions de reg la col·locació de filtres de malla just a continuació dels filtres de sorra és una pràctica molt freqüent, de manera que es capturen les restes de medi granular (sorra, graves, vidre ECO filtrant...) que puguin ser arrastrades durant el contraretat (Keller i Bliesner, 1990; Pitts, 1993).

### 1.3. Funcionament dels filtres de matriu granular

Els filtres de matriu granular són tancs a pressió plens d'alguns tipus de partícules de matriu granular d'una forma i mida determinada. A la figura 1.1. es poden veure dos processos importants que es donen en aquests filtres: la filtració i el contraretat.

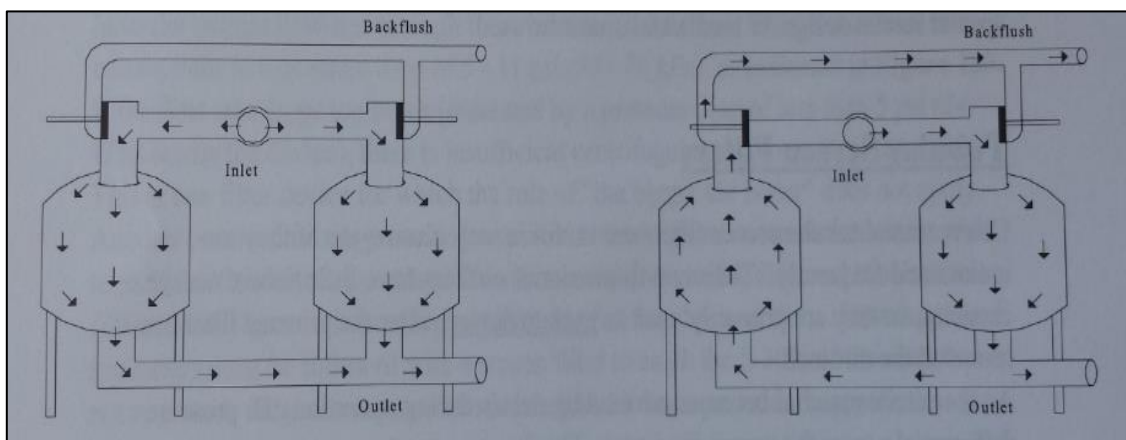


Figura 1.1. Procés de filtració i contraretat en filtres de matriu granular (Burt i Styles, 2007)

Com es pot veure en la figura 1.1., sol ser comú instal·lar dos filtres en paral·lel. En el procés de filtració (esquema esquerre), l'aigua entra als filtres, dins dels quals aquesta travessa el medi i surt a l'exterior per tal de ser conduïda per la xarxa fins al cultiu.

D'altra banda durant el contraretat (esquema dret), l'aigua entra sols per un dels filtres on segueix el funcionament a filtració travessant el medi. Una vegada aquesta aigua surt, una part és distribuïda a la xarxa i una altra part és conduïda fins l'altre filtre on l'aigua segueix el sentit invers de filtració, anomenat contraretat, en el qual aquesta entra dins el tanc i expandeix el medi arrastrant les partícules de matèria retinguda en el medi i netejant-lo, aquestes partícules són retingudes en el filtre de malles que es sol instal·lar abans de l'entrada de l'aigua als tancs de filtració (Burt i Styles, 2007).

Segons Burt i Styles (2007), en l'agricultura són majoria els filtres verticals enfront als horitzontals. El medi filtrant és retingut dins el tanc de filtratge per la crepina, la qual té unes ranures més fines que la granulometria del medi, d'aquesta manera s'evita la sortida o pèrdua de medi, aconseguint així una aigua adequada per el sistema de reg.

La retenció d'impureses en un filtre de matriu granular és un fenomen que succeeix fonamentalment en profunditat. La filtració avança en sentit vertical i a mesura que circula el

medi filtrat s'acumulen les impureses d'aquest en forma de capes, les quals avancen dins el llit de manera que aquest es carrega de sediments de forma constant fins el punt en que l'efluent es torna a enterbolir i el resultat no és l'ideal. També s'observen pèrdues de càrrega a través del filtre, les quals varien al llarg del temps (Pizarro, 1987).

Un cop l'aigua entra dins el filtre és important que aquesta no incideixi de forma directe damunt el medi granular, de manera que s'eviti la creació de xaragalls. La distribució ha de ser uniforme damunt el llit filtrant, ja que si no fos així formarien irregularitats en el medi. També és necessari establir un espai capaç de permetre expansions d'entre un 15 i 25 % del medi filtrant durant els processos de rentat (Haman et al., 1994).

El contrarentat és un procés obligat per aconseguir un bon manteniment de la columna de medi de filtratge. Pot netejar les capes profundes del llit filtrant, però no és suficient per eliminar crostes que es solen formar a la part superior. L'augment de velocitat de contrarentat pot ser una bona solució per resoldre aquesta problemàtica, tot i així també és possible que es situïn grans més fins a la capa superior. Moltes vegades cal actuar de forma manual remonent el llit per tal de procedir a una millor neteja (Pizarro, 1987).

L'alçada de medi filtrant influeix fins un determinat valor, el qual s'anomena espessor crític. Cal remarcar que espessors majors no suposen un augment de la qualitat de la filtració, tot i així impliquen un major temps de contaminació i per tant retarden els processos de manteniment i neteja del filtre (Pizarro, 1987; Rodrigo, 1997).

Les figures 1.2. a 1.4. es mostra el tanc de filtratge en diferents situacions. En la figura 1.2. s'observa el tanc de filtratge ple de medi, sorra de sílice en aquest cas. En la figura 1.3. podem apreciar les crepines disposades al fons del filtre. La seva funció és retenir les partícules del medi dins el filtre. La figura 1.4. mostra la carcassa o exterior del tanc de filtrat.



Figura 1.2. Vista interior del filtre amb medi filtrant granular (Burt, 2010).



Figura 1.3. Cúpula de filtratge, vista interior (Burt, 2010).



Figura 1.4. Cúpula de filtratge, vista exterior (Burt, 2010).

Existeixen diferents tipus de medis de matriu granular, essent els més emprats són la sorra de sílice i el vidre ECO filtrant, la textura dels quals es pot observar en les figures 1.5 i 1.6.



Figura 1.5. Sorra de sílice (Font pròpia, a partir d'una fracció de medi).



Figura 1.6. Vidre ECO filtrant(Font pròpia, a partir d'una fracció de medi).

La sorra de sílice prové de la combinació de sílice i oxigen, la fórmula química de la qual és  $\text{SiO}_2$ . Aquesta es pot trobar en diferents formes a la natura. Abans de comercialitzar-la, és processada i tractada, posteriorment és emmagatzemada i distribuïda en funció de la granulometria de les partícules, paràmetre important i que varia segons quina sigui la finalitat d'ús.

El vidre ECO filtrant es tracta d'un medi de filtració fabricat a partir de vidre reciclat.

## 1.4. Pèrdues de càrrega en els filtres de matriu granular

La pèrdua de càrrega deguda al procés de filtració és un aspecte fonamental. En la fase de disseny de la instal·lació resulta important conèixer-la.

### 1.4.1. Pèrdua de càrrega referida al medi filtrant

La pèrdua de càrrega que té lloc en el filtre varia en funció del medi filtrant, així com la columna (volum) entre d'altres. Per tant s'atribueixen al medi filtrant certes característiques, les quals comporten certs avantatges i inconvenients. Cal conèixer el tipus de medi per tal d'avaluar la pèrdua de càrrega i relacionar-lo amb termes d'eficiència. Molts autors han descrit equacions per representar la pèrdua de càrrega que descriu el sistema de filtratge, tot i així existeixen poques referències que caracteritzin el medi en funció d'aquests paràmetres.

Una vegada l'aigua entra en el medi aquesta es filtra, tot i així també cal considerar la pèrdua de càrrega que aquesta pateix, el medi frena l'avanç de l'aigua. Una de les característiques que descriu la facilitat amb la qual pot ser travessat un medi és la conductivitat hidràulica.

La conductivitat hidràulica representa la capacitat que té un medi per deixar passar aigua a través seu per unitat d'àrea transversal a la direcció del flux.

Darcy (1856) descriu que per un mateix tipus de medi i canviant els valors de les variables es compleix que:

$$Q = K \cdot S \cdot \frac{\Delta h}{\Delta L}$$

On:

- $Q$  = Cabal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $K$  = Conductivitat hidràulica saturada [ $\text{m}/\text{s}$ ]
- $S$  = Secció transversal del medi [ $\text{m}^2$ ]
- $\Delta h$  = Diferència entre mesures de pressió [ $\text{m}$ ]
- $\Delta L$  = Distància entre mesures de pressió [ $\text{m}$ ]
- Gradient hidràulic =  $\frac{\Delta h}{\Delta L}$

La conductivitat hidràulica, és pròpia i característica de cada medi.



En la figura 1.7. es pot apreciar el fonament teòric de la teoria de Darcy aplicada en un filtre de matriu granular, així com les variables que el conformen.

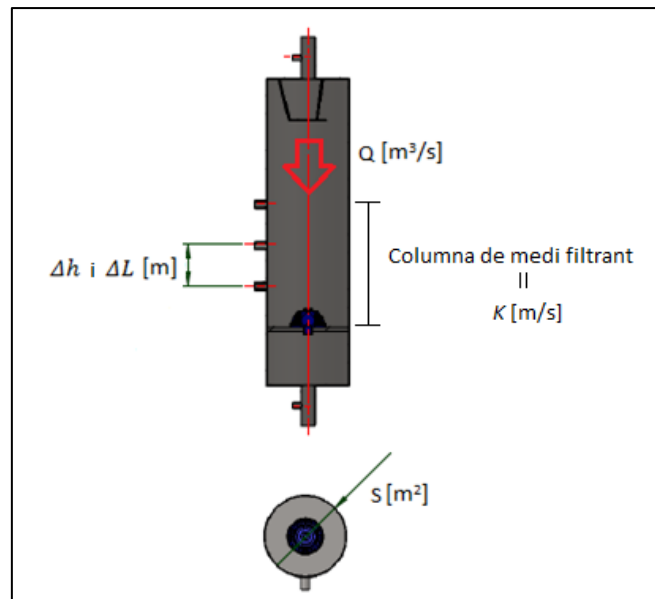


Figura 1.7. Variables contemplades en l'equació de Darcy

#### 1.4.2. Elements auxiliars del sistema de filtrat de matriu granular

Normalment s'assumeix que la pèrdua de càrrega en filtres de matriu granular es deu exclusivament al medi filtrant. Però els elements auxiliars d'aquests filtres, com tuberes d'entrada i sortida i crepines provoquen una pèrdua de càrrega sense contribuir a la filtració de l'efluent. Arbat et al. (2011) han comprovat que aquests elements poden provocar pèrdues de càrrega entorn al 16 % en el conjunt del filtre, posant en evidència la importància de les crepines i l'àrea foradada per on s'evacua l'efluent.

#### 1.4.3. Importància del medi filtrant en el consum energètic d'un filtre

La conductivitat hidràulica està relacionada de forma directa amb l'eficiència energètica d'un medi, ja que la disminució del seu valor repercuteix en un augment de la pèrdua de càrrega del sistema i conseqüentment en una major necessitat energètica, comportant un augment de costos.

Els paràmetres característics del medi, com la densitat real o aparent, així com la porositat, es poden associar amb el coeficient de conductivitat hidràulica.

## 2. Objectius

### 2.1. Objectiu general

Avaluar el comportament de la sorra de sílice i el vidre ECO filtrant reciclat en diferents granulometries com a medis filtrants en relació a les pèrdues de càrrega ocasionades, per tal de poder analitzar el seu comportament energètic.

### 2.2. Objectius específics

L'objectiu general descrit en l'anterior apartat pot dividir-se en varis objectius específics.

- 1- Caracteritzar físicament 4 medis filtrants, la sorra de sílice i vidre ECO filtrant reciclat en les granulometries compreses entre 0,63 – 0,75 mm i 0,75 – 0,84 mm.
- 2- Analitzar en condicions de filtració la pèrdua de càrrega en funció del cabal circulat per diferents trams del filtre i medis filtrants.
- 3- Determinar la conductivitat hidràulica saturada associada a cada medi en l'estat de funcionament de filtració.
- 4- Determinar els paràmetres de funcionament a filtració.
- 5- Avaluar cada medi filtrant amb termes d'eficiència energètica i econòmica.

### 3. Material i mètodes

#### 3.1. Obtenció dels medis filtrants

Els medis de filtratge utilitzats als assajos són la sorra de sílice i el vidre ECO filtrant reciclat. Aquests productes es comercialitzen en una granulometria compresa entre 0,5 i 1 mm, en envasos de 25 kg. Pel desenvolupament dels assajos amb el filtre a escala es requereix de 2 intervals granulomètrics, els compresos entre 0,63 - 0,75 mm i entre 0,75 - 0,84 mm, amb una quantitat aproximada de 15 kg. Per aquest motiu és necessari un procés per a l'obtenció d'aquestes granulometries a partir del producte comercial, que es descriu en els següents apartats.

Una vegada obtingudes les 2 fraccions d'interès s'efectua una prova de tamisatge en cadascuna d'aquestes fraccions i medis de filtratge, com a comprovació. Els resultats d'aquest control es mostren a l'apartat Resultats d'aquest document.

El procediment es realitza al Laboratori de Sòls i Residus de la Unitat de Ciència del Sòl de l'Escola Politècnica Superior de la UdG.

A la Taula 3.1. es mostren les diferents fraccions granulomètriques o intervals que s'obtenen a partir dels tamisos utilitzats, així com la seva denominació.

*Taula 3.1. Fraccions granulomètriques en el procés de tamisatge.*

Interval	Fracció granulomètrica (mm)
I1	0 – 0,63
<b>I2</b>	<b>0,63 – 0,75 mm</b>
<b>I3</b>	<b>0,75 – 0,84 mm</b>
I4	0,84 – 1 mm

Per tant es defineixen quatre medis en funció de la matèria i granulometria, la sorra I2 i I3 i el vidre ECO filtrant I2 i I3.

A la taula 3.2. es defineix la nomenclatura que s'utilitzarà per a definir cada medi.

*Taula 3.2. Nomenclatures de cada medi.*

Medi	Nomenclatura
Sorra de sílice I2 (0,63 – 0,75 mm)	SSI2
Sorra de sílice I3 (0,75 – 0,84 mm)	SSI3
Vidre ECO filtrant I2 (0,63 – 0,75 mm)	VEI2
Vidre ECO filtrant I3 (0,75 – 0,84 mm)	VEI3

### 3.1.1. Sorra sílice: tamisatge

#### 3.1.1.1. Material

El material necessari per dur a terme el procés d'obtenció del medi granular és:

- Separador granulomètric, CISA model PTZ, el qual apareix en la figura 3.1.
- 3 tamisos granulomètrics de 0,63, 0,75 i 0,84 mm.
- Raspall metàl·lic per a la neteja dels tamisos.
- Medis de sorra de sílice en format comercial (mida 0,5 – 1 mm).
- Balança digital, marca AND, model GF-1200 i precisió 0,01 g.
- Sacs de plàstic per separar les fraccions de medi.



Figura 3.1. Separador granulomètric.

#### 3.1.1.2. Mètode

A continuació s'exposa de forma concisa el procediment seguit per obtenir els diferents intervals granulomètrics:

1. Ordenar de major a menor granulometria els tamisos.
2. Omplir el tamís superior amb una quantitat de 500 g de sorra de sílice.
3. Tapar el conjunt dels tamisos i col·locar-lo en el separador granulomètric.
4. Activar el separador granulomètric i fixar un temps de 25 minuts amb l'ajuda del temporitzador a una intensitat de vibració del 70 %.
5. Una vegada s'hagi aturat l'aparell es buiden els diferents tamisos en quatre sacs de plàstic marcats prèviament (I1, I2, I3 i I4) per tal d'evitar barreges de fraccions.
6. Netejar els tamisos amb l'ajuda d'un raspall metàl·lic.
7. Una vegada obtinguda la quantitat de medi necessària aproximadament 15 kg per a cada interval, es realitza un tamisatge en els intervals I2 i I3 d'una mostra de la fracció obtinguda per a comprovar i certificar la granulometria en cada un d'ells.

### 3.1.2. Vidre ECO filtrant: tamisatge

#### 3.1.2.1. Material

El material necessari per dur a terme el procés d'obtenció de medi granular és el mateix que l'exposat a l'apartat 3.1.1.1.

#### 3.1.2.2. Mètode

A continuació s'exposa de forma concisa el procediment seguit per obtenir els diferents intervals granulomètrics en el cas del vidre ECO filtrant:

1. Ordenar de major a menor granulometria els tamisos.
2. Omplir el tamís superior amb una quantitat de 1000 g de sorra de sílice.
3. Tapar el conjunt dels tamisos i col·locar-lo en el separador granulomètric.
4. Activar el separador granulomètric i fixar un temps de 55 minuts amb l'ajuda del temporitzador a una intensitat de vibració del 90 %.
5. Una vegada s'hagi aturat l'aparell es buiden els diferents tamisos en quatre sacs de plàstic marcats prèviament per tal d'evitar barreges de fraccions.
6. Netejar els tamisos amb l'ajuda d'un raspall metàl·lic.
8. Una vegada obtinguda la quantitat de medi necessària aproximadament 14 kg per a cada interval, es realitza el tamisatge en els intervals I2 i I3 d'una mostra de la fracció obtinguda per a comprovar i certificar la granulometria en cada un d'ells.

## 3.2. Caracterització del medi filtrant

Per a cada medi es determina la densitat aparent, la densitat real i la porositat. A continuació s'exposa el material necessari en el procés així com la metodologia. Aquest apartat experimental es realitza al Laboratori de la Secció Departamental de Producció Animal i Enginyeria Agroforestal de l'Escola Politècnica Superior de la UdG.

#### 3.2.1. Material

El material necessari per dur a terme el procés de caracterització és:

- 3 mostres de 400 cm<sup>3</sup> de cada medi (una per cada repetició).
- Balança digital, marca AND, model GF-1200 i precisió 0,01 g.
- Espàtula per tractar el medi.
- Provetes de capacitat 1000 mL.
- Safates metàl·liques.
- Aigua.
- Estufa d'assecatge, marca J.P.Selecta i model 8.2.

### 3.2.2. Mètode

La metodologia descrita a continuació s'aplica en tres mostres diferents, de manera que s'obté una mitjana per a cadascun dels paràmetres, així com la desviació típica.

#### 3.2.2.1. Densitat aparent

Per tal de calcular la densitat aparent del medi, s'aboquen 400 cm<sup>3</sup> de medi (per a cada interval i material) dins una proveta d'1 L de capacitat. És necessari realitzar un bon assentament del medi, colpejant la proveta una vegada el medi ha estat introduït, i de forma posterior s'acaba d'enrasar fins al volum just si és oportú.

Una vegada mesurat el volum es procedeix a pesar-lo per tal de calcular la densitat aparent per a cada repetició realitzada a partir de l'equació:

$$D_{ap} = \frac{P_{vm}}{V_m} \quad (1)$$

On:

- $D_{ap}$ : Densitat aparent (g/cm<sup>3</sup>)
- $P_{vm}$ : Pes volum de medi (g)
- $V_m$ : Volum de medi (cm<sup>3</sup>)

En la figura 3.2. s'observa la proveta amb el medi.



Figura 3.2. Moment del càlcul de  $D_{ap}$ .

#### 3.2.2.2. Densitat real

Es pesen tres mostres de 400 cm<sup>3</sup> de cada medi i es col·loquen dins una proveta. Es procedeix a afegir 400 cm<sup>3</sup> d'aigua, de manera que s'obté una barreja de 400 cm<sup>3</sup> de medi i 400 cm<sup>3</sup> d'aigua dins un mateix recipient.

Es forma una columna on l'aigua omple els espais porosos on hi havia un volum d'aire, de manera que la columna teòrica inicial de 800 cm<sup>3</sup>, ha passat a ocupar un volum inferior (reducció d'entre 1/4 o 1/5 del volum). En les figures 3.3. i 3.4. es mostra el procés descrit.

Sorgeixen diferents paràmetres, els quals aporten informació referent a les característiques del medi, en aquest cas per calcular la densitat real d'aquest. Aquests són:

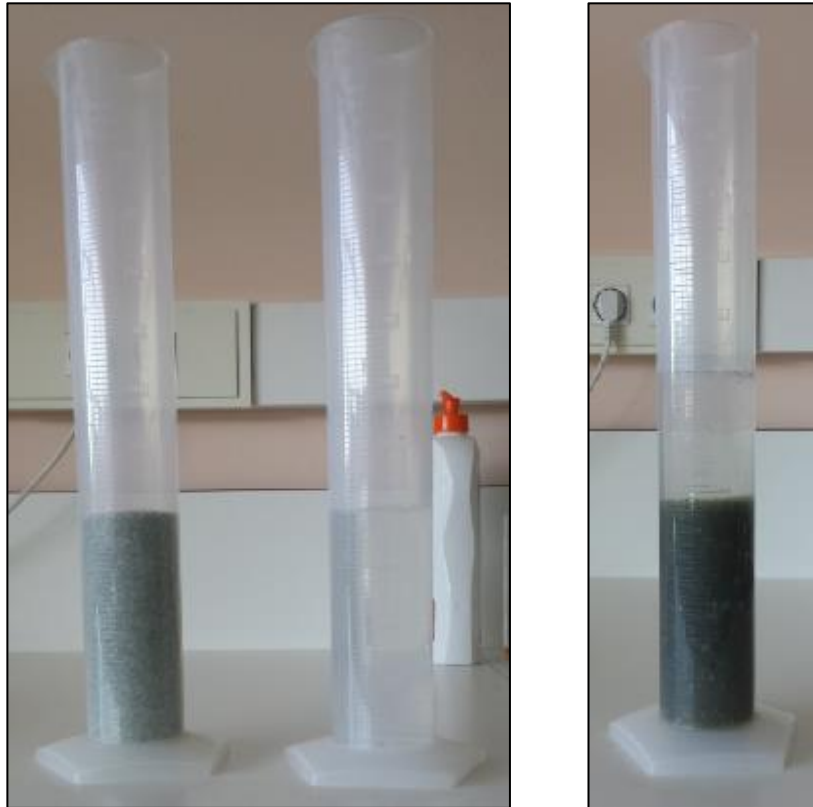
- Volum d'aire = Volum inicial (800 cm<sup>3</sup>) – Volum final (columna de barreja en cm<sup>3</sup>)
- Volum medi sense porus = Volum inicial de medi (400 cm<sup>3</sup>) – Volum d'aire (cm<sup>3</sup>)

Un cop coneguts els volums expressats anteriorment, es pot conèixer el valor de densitat real per a cada repetició, la qual s'obté a partir de l'expressió:

$$D_r = \frac{P_{vm}}{V_{msp}} \quad (2)$$

On:

- $D_r$ : Densitat real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
- $P_{vm}$ : Pes volum de medi (g)
- $V_{msp}$ : Volum de medi sense poros ( $\text{cm}^3$ )



Figures 3.3. i 3.4. Moment de la barreja del medi amb l'aigua.

### 3.2.2.3. Porositat

La porositat ve determinada per l'equació:

$$P = 1 - \frac{D_{ap}}{D_r} \quad (3)$$

On:

- $P$ : Porositat (tant per u)
- $D_{ap}$ : Densitat aparent ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
- $D_r$ : Densitat real ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

### 3.3. Instal·lació experimental i assaigs de filtració

Els assaigs de filtració es realitzen al Laboratori de Mecànica de Fluids del Departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial de l'Escola Politècnica Superior de la UdG. Cal realitzar algunes modificacions en la instal·lació d'assaig per adaptar-la i millorar-la, així com també una neteja dels elements conductors, crepina i filtre de malles on es recull la possible sorra que és arrastrada durant el contrarentat.

Un aspecte molt important i que cal destacar és que l'aigua utilitzada en els assaigs és neta. Tot i treballar amb filtració, cal tenir en compte que és un pas previ al treball a camp, en el qual sols es volen caracteritzar medis i observar el comportament energètic, així com l'eficiència d'aquests.

#### 3.3.1. Descripció de la instal·lació experimental

Els components de la instal·lació, que es mostren a la figura 3.5., són:

- Filtre d'acer inoxidable AISI 304 i dimensions (mm) mostrades en la figura 3.6.
- 5 manòmetres (Keller, rang 0,31 bars, precisió 10 mbar) instal·lats en el filtre, que mesuren i registren la pressió de forma continua.
- Vàlvules reguladores de cabal (MT®).
- Dipòsit pulmó de 500 L de capacitat.
- Bomba centrífuga (ESPA®, model: Prisma 20/4, cabal: 20 – 84 L/min, alçada manomètrica: 50 – 15 m, Potència: 1,15 kWh).
- Comptador volumètric (SENSUS®, precisió 1 mm<sup>3</sup>) permet obtenir el cabal circulant durant un període de temps a partir de les lectures de volum inicial i final d'aquest període.
- Filtre de malles per retenir el medi expulsat del filtre granular durant el contrarentat (Regaber, micratge: 0,5 mm).



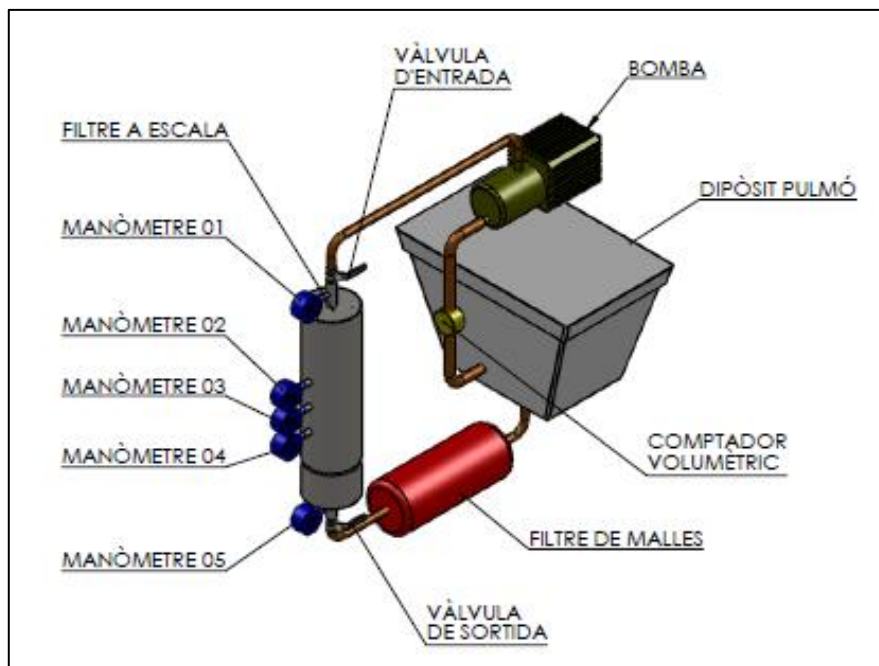


Figura 3.5. Esquema de la instal·lació experimental.

L'aigua entra al filtre per la canonada superior i en surt per la canonada inferior. El filtre disposa d'un deflector a l'entrada per esmorteir el flux d'aigua. D'altra banda i per tal de retenir la sorra del medi filtrant i alhora permetre el pas de l'aigua, el filtre incorpora una crepina, derivada d'un filtre comercial.

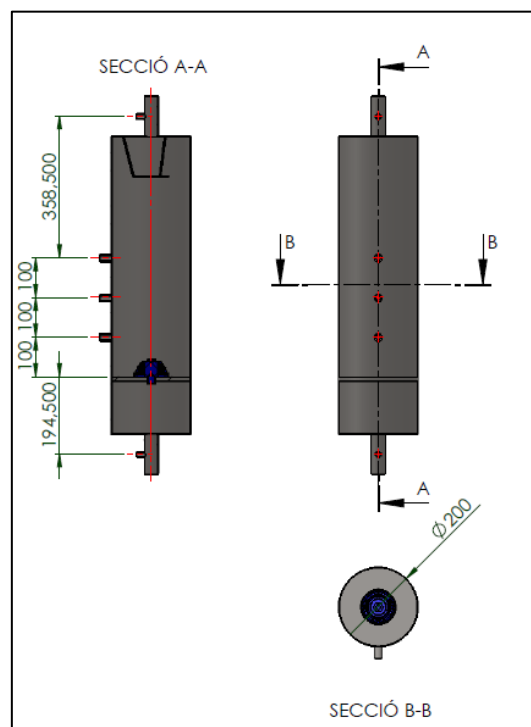


Figura 3.6. Esquema del filtre (dimensions en mm).

En la figura 3.7. es detalla la geometria de la crepina i les seves dimensions en mm. La crepina està fabricada de PE d'alta densitat.

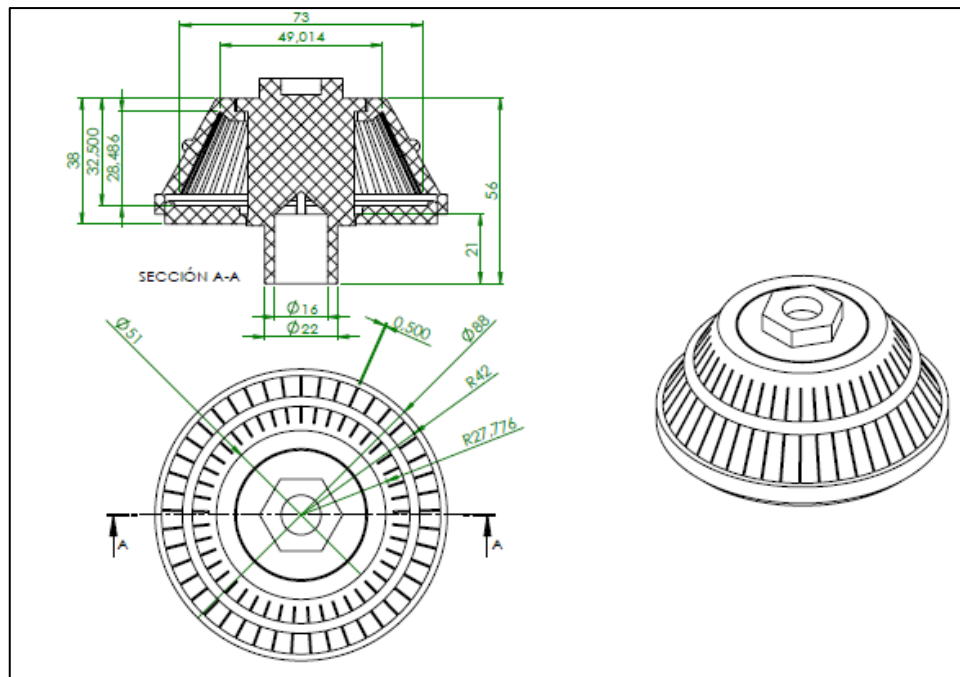


Figura 3.7. esquema de la crepina (dimensions en mm).

En les figures 3.8. a 3.15. es mostren els diferents elements de la instal·lació.



Figura 3.8. Instal·lació experimental de filtratge: vista general.



Figura 3.9. Comptador volumètric.



Figura 3.10. Bomba d'impulsió del circuit.



Figura 3.11. Filtre de malles.



Figura 3.12. Dipòsit de PE de 500 L de capacitat.



Figura 3.13. Interior del filtre de matriu granular.



Figura 3.14. Manòmetres distribuïts en el filtre.



Figura 3.15. Crepina de PE d'alta densitat

### 3.3.2. Característiques dels assajos realitzats

#### 3.3.2.1. *Variables mesurades*

Per a cadascun dels assaigs que es definiran a l'apartat 3.3.2.2. es mesura el cabal circulant i la pressió dels manòmetres instal·lats al filtre. La determinació de cabals s'efectua a partir de les lectures inicial i final del comptador volumètric en un interval de temps de dos minuts. D'altra banda els valors de pressió són presos de forma contínua per els 5 manòmetres disposats al llarg del filtre.

#### 3.3.2.2. *Descripció dels assajos*

Les proves consisteixen en mesurar els valors de pressió produïts en fer circular 10 cabals compresos entre 0,4 i 1,1 L/s aproximadament en la instal·lació, per a diferents combinacions de medi filtrant, variant les alçades de columna de medi i tipus de funcionament o procés (filtració i contrarentat). Per a cada combinació resultant s'efectuen 3 repeticions. La Taula 3.2. mostra el detall de les combinacions assajades.

*Taula 3.3. Assaigs de filtració realitzats a la instal·lació experimental de filtrat amb matriu granular.*

Medi	Alçada de medi filtrant	Procés
<b>SSI2 / SSI3 / VEI2 / VEI3</b>	Alçada 1	Filtració
		Contrarentat
	Alçada 2	Filtració
		Contrarentat
	Alçada 3	Filtració
		Contrarentat

Tinguent en compte que s'assagen 6 combinacions de 30 cabals circulants cadascuna per a cada medi, resulten 180 punts de funcionament per a cada un d'ells.

A més, s'assaja amb el filtre sense medi filtrant, en funcionament a filtració i a contrarentat. Aquestes 2 combinacions, amb 30 cabals circulants per cada cas suposen 60 punts de funcionament sense medi filtrant.

En la figura 3.16. es detallen les diferents alçades establertes al filtre a escala.

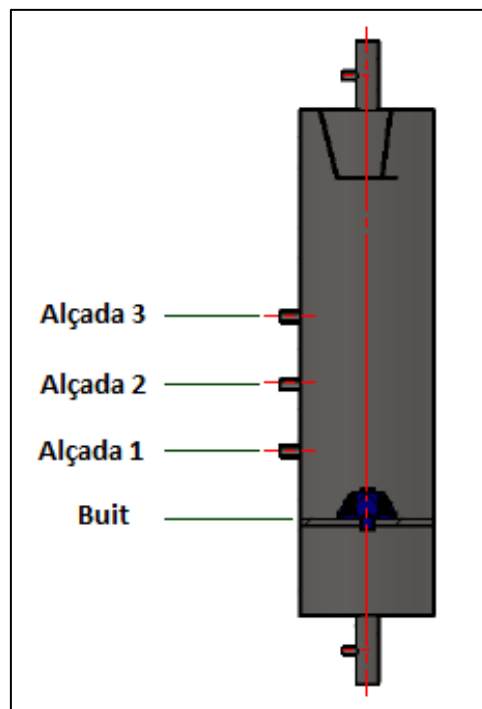


Figura 3.16. Distribució de les alçades que s'estableixen en el filtre.

Les alçades 1,2 i 3 (A1, A2 i A3) en el filtre amb medi de sorra de sílice es corresponen a un pes de 5,10 i 15 kg respectivament i en el medi de vidre ECO filtrant a 4,4, 8,8 i 13,2 kg.

### 3.3.3. Procediment experimental

El procés d'obtenció de dades cal que sigui molt acurat. El procediment consisteix en:

1. Connectar el dipòsit amb la bomba, la bomba amb l'entrada del filtre i la sortida del filtre amb el dipòsit. La connexió s'efectua amb canonades de PVC flexible de 32 mm de diàmetre nominal, amb espiral de reforç d'acer galvanitzat i paret interior i exterior llisa (Springvin®)
2. Accionar la bomba centrífuga i amb aquest component en marxa tancar lleugerament la vàlvula de sortida del filtre per tal que s'ompli el filtre sense deixar cavitats sense fluid.
3. Parar la bomba.
4. Amb el filtre ple d'aigua i la bomba parada, posar en marxa els manòmetres i fixar el valor de pressió a 0 mbar.
5. Posar en marxa la bomba.
6. Obrir en la seva totalitat la vàlvula d'entrada al filtre.
7. Tancar la vàlvula de sortida del filtre fins a assolir un valor de pressió al manòmetre de sortida per sobre dels 4.100 mbar i esperar a que s'estabilitzi la lectura de pressió.

8. Prendre la primera lectura de volum en el comptador volumètric a l'hora que es posa en marxa el cronòmetre. Transcorreguts 2 minuts prendre una segona lectura de volum.
9. Obrir lleugerament la vàlvula de sortida del filtre fent disminuir la pressió de sortida uns 300 mbar i esperar a que la lectura de pressió s'estabilitzi. Amb aquesta acció el cabal circulant dins el filtre augmenta d'acord amb la posició de l'aixeta.
10. Prendre una lectura de volum i transcorreguts 2 minuts prendre la següent mesura de volum.
11. Repetir els passos 8 i 9 un total de deu vegades, fins arribar a uns valors de pressió compresos entre 500 i 600 mbar.
12. Parar els manòmetres.
13. Amb l'ajuda del programa Logger Sig, el qual està sincronitzat amb els manòmetres, descarregar les dades de pressió registrades durant l'assaig i obtenir fitxer Excel.

Aquesta metodologia és aplicable en el procés de filtració i de contrarentat. L'únic aspecte que cal tenir en compte una vegada canviades les canonades d'entrada i sortida és que en tot moment la vàlvula d'entrada ha d'estar oberta i la de sortida només es manipula alhora de prendre lectures.

### 3.4. Determinació de les pèrdues de càrrega en el filtre

La pèrdua de càrrega en el filtre s'avalua en els 4 trams que es mostren a la figura 3.17. a partir de les lectures de pressió dels manòmetres instal·lats a l'inici i al final de cada tram.

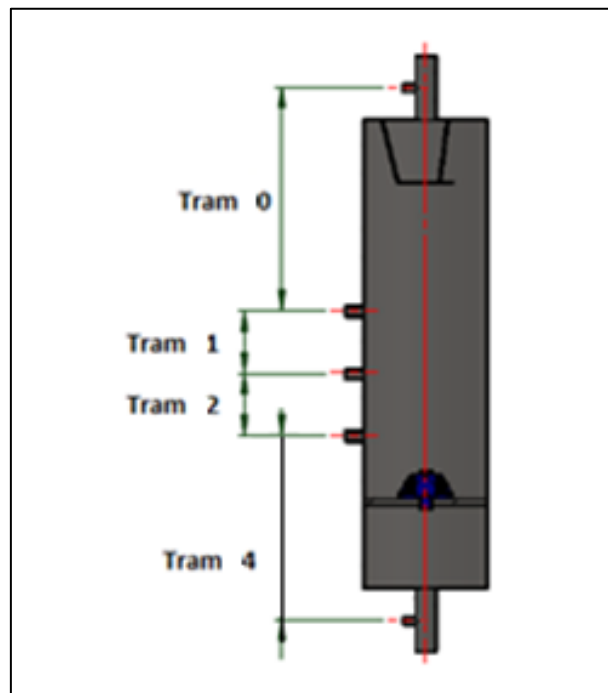


Figura 3.17. Distribució del filtre en trams.



### 3.5. Determinació de la conductivitat hidràulica saturada

La llei de Darcy (1856) regeix el moviment de l'aigua en un medi porós i estableix que el cabal d'aigua circulant es proporcional a la conductivitat hidràulica saturada, a la secció transversal del medi i al gradient hidràulic, d'acord amb l'equació:

$$Q = -K \cdot S \cdot \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (4)$$

On:

- Q: Cabal [m<sup>3</sup>/s]
- K: Conductivitat hidràulica a saturació [m/s]
- S: Secció transversal del medi [m<sup>2</sup>]
- $\frac{\Delta h}{\Delta L}$ : Gradient hidràulic
- Δh: Diferència de pressió [m]
- ΔL: Distància entre mesures de pressió [m]

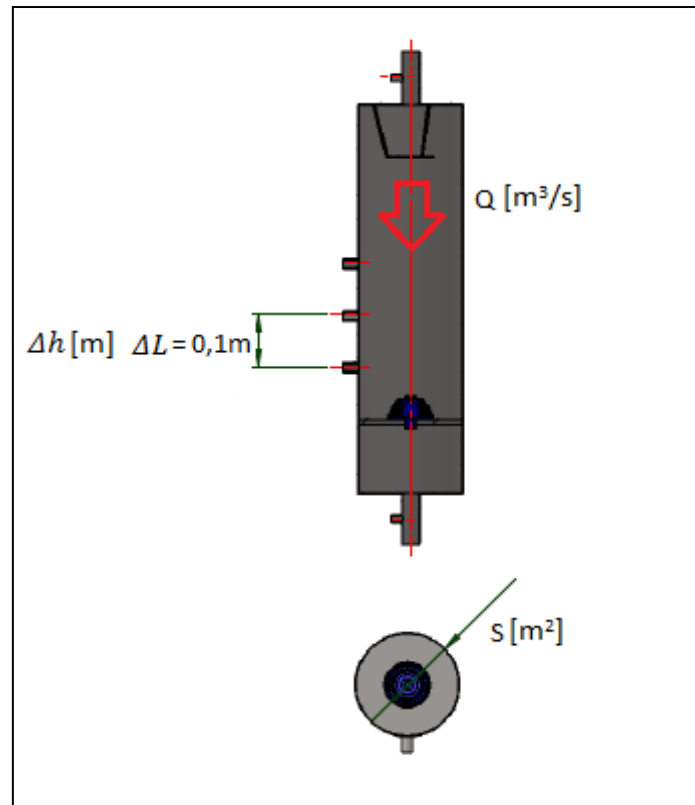
Tenint en compte que la velocitat de l'aigua circulant en el medi (v) és igual al quocient entre el cabal i la secció, l'equació de Darcy adquireix la forma:

$$v = -K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta L} \quad (5)$$

On:

- v: Velocitat de Darcy [m/s]
- K: Conductivitat hidràulica a saturació [m/s]
- $\frac{\Delta h}{\Delta L}$ : Gradient hidràulic

La conductivitat hidràulica per cada medi filtrant es determina en els assajos en que es treballa amb l'alçada 3. El tram en que s'efectuen les mesures de pressió és el comprés entre el manòmetre 03 i 04 (veure figura 3.18.). S'escull aquest tram perquè les condicions de contorn superior i inferior són les més homogènies al estar envoltats ambdós punts de mesura per el medi filtrant. D'aquesta manera s'evita el contacte directe amb l'aigua entrant en la part superior i el possible efecte de la proximitat de la crepina en la part inferior.



**Figura 3.18. Detall del filtre amb indicació de les variables mesurades.**

En l'equació (5), la conductivitat hidràulica saturada és la constant de proporcionalitat lineal entre la velocitat i el gradient hidràulic. Per obtenir el seu valor es calcula per a cadascun dels 4 medis filtrants l'equació lineal d'ajust, coneixent d'aquesta manera el pendent de la recta, equivalent a la conductivitat hidràulica saturada. El coeficient de determinació de la recta permet conèixer la bondat de l'ajust.

### 3.6. Representació d'equacions característiques a filtració

Per tal d'obtenir les equacions de funcionament a filtració es representa la corba característica del conjunt del filtre, així com la dels elements auxiliars en funció dels medis i les diferents alçades d'aquests i es genera una regressió polinòmica. Aquesta regeix la pèrdua de càrrega en el medi en funció del cabal circulat, d'acord amb la següent equació:

$$\Delta h = a \cdot Q^2 + b \cdot Q \quad (6)$$

On:

- $\Delta h$ : Diferència de pressió [m]
- $Q$ : Cabal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- $a$  i  $b$ : constants de la regressió

Aquesta equació permet determinar el comportament a filtració del conjunt medi-elements auxiliars i caracteritzar els diferents escenaris assajats.

D'altra banda, a partir de la linealització de la recta referida al comportament del medi (tram 2) s'aïlla la pèrdua de càrrega i d'acord amb l'equació,

$$\Delta h = a \cdot Q + b \quad (7)$$

On:

- $\Delta h$ : Diferència de pressió [m]
- Q: Cabal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
- a i b: constants de la regressió

s'obté la funció característica de la pèrdua de càrrega en el medi filtrant en funció del cabal circulant.

### 3.7. Determinació dels paràmetres de funcionament en el procés de filtració

#### 3.7.1. Velocitat lineal mitjana i velocitat real de filtració

La velocitat de l'equació de Darcy (Eq. 5), anomenada velocitat de Darcy, velocitat de flux o densitat de flux (m/s) no és la velocitat real de circulació de l'aigua al medi, ja que l'aigua no circula per tota la secció del medi, sinó només per una part d'ell, la corresponent a l'espai porós. Si a més es suposa que l'aigua segueix un camí rectilini, la velocitat lineal mitja es calcularà com:

$$v_{lm} = \frac{v_{Darcy}}{P} \quad (8)$$

On:

- $v_{lm}$ : Velocitat lineal mitjana [m/s]
- $v_{Darcy}$ : Velocitat de Darcy [m/s]
- P: Porositat [%]

A la pràctica l'aigua no segueix el camí rectilini esmentat anteriorment, sinó que el seu recorregut és tortuós, per tant la velocitat real serà superior a la velocitat lineal mitjana. Freeze i Cherry (1979) estableixen un coeficient de tortuositat per la sorra entre 1.0 i 1.18. D'acord amb aquests valors, la velocitat real es calcularà per l'equació:

$$v_r = v_{lm} \times (1.0 - 1.18) \quad (9)$$

On:

- $v_r$ : Velocitat real [m/s]
- $v_{lm}$ : Velocitat lineal mitja [m/s]

### 3.7.2. Càrrega hidràulica superficial i volumètrica

Es determinen les càrregues superficial i volumètrica per la seva utilitat en el dimensionament de filtres, ja que aquests paràmetres són utilitzats per escalar el procés.

La càrrega superficial es correspon amb la velocitat de Darcy i es calcula a partir de l'equació:

$$q_s = \frac{Q}{S} \quad (10)$$

On:

- $q_s$ : Càrrega superficial [m/s]
- $Q$ : Cabal circulant [m<sup>3</sup>/s]
- $S$ : Secció transversal del medi [m<sup>2</sup>]

La càrrega volumètrica es calcula a partir de l'equació:

$$q_v = \frac{Q}{V_m} \quad (11)$$

On:

- $q_v$ : Càrrega volumètrica [s<sup>-1</sup>]
- $Q$ : Cabal circulant [m<sup>3</sup>/s]
- $V_m$ : Volum medi [m<sup>3</sup>]

### 3.8. Eficiència energètica i cost econòmic

Es determina l'eficiència energètica a partir del càlcul de costos econòmics relatius i absoluts en la utilització dels diferents medis de filtració assajats i per l'alçada 3. De manera que permet relacionar el comportament del medi a partir de la pèrdua de càrrega corresponent al tram 2 (veure figura 3.17. i 3.18.).

Per a un cabal circulant de 0,9 L/s es calcula la pèrdua de càrrega referida a cada medi a partir de les equacions exposades a la taula 4.11. obtingudes a partir dels assaigs. D'acord amb l'equació que permet calcular la potència de bombejament,

$$P = \frac{Q \cdot \rho \cdot H}{75 \cdot \eta} \quad (12)$$

On:

- P: Potència del grup de bombejament [CV]
- Q: Cabal circulant [m<sup>3</sup>/s]
- ρ: Pes específic [Kg/m<sup>3</sup>]
- H: Alçada manomètrica o pressió de treball [m]
- η: Rendiment grup bombejament [%]

i considerant unes condicions de treball idèntiques (pes específic del fluid, cabal, rendiment del grup de bombejament i alçada geomètrica) per una situació determinada, la única diferència ve donada per la pèrdua de càrrega que es produeix en el medi, que fa variar els valors de l'alçada manomètrica necessària i conseqüentment de la potència i el cost econòmic del bombejament. Per tant, la comparació entre les diferents pèrdues de càrrega en el medi per un cabal circulant determinat proporcionarà directament una mesura relativa de la eficiència energètica i econòmica.

D'altra banda es calcula el cost econòmic que suposaria treballar amb cadascun dels diferents medis filtrants mitjançant una anàlisi a nivell de Catalunya. A partir de les dades de dosi de reg mitjana aplicada en reg localitzat a Catalunya (dotació bruta [m<sup>3</sup>/ha i any]), superfície de reg localitzat a Catalunya i fixant la temporada de reg de maig a setembre, es calcula el cabal fictici continu durant la temporada. Seguidament, assumint un rendiment mitjà dels grups de bombejament i substituint l'alçada manomètrica per la pèrdua de càrrega en el tram 2 per a cada medi en l'equació (12), es determina la potència necessària requerida o bé, energia consumida, per el medi de filtració. D'acord amb el preu actual del kWh es calcula el cost de l'energia consumida, atenent únicament al medi filtrant.

## 4. Resultats i discussió

### 4.1. Característiques granulomètriques del medi filtrant

Es presenten els resultats del tamisatge de cada medi. Els resultats corresponen a la comprovació de dues mostres d'uns 500 g extretes de cadascun dels medis. Els resultats detallats per a cada medi i repetició es troben a l'Annex 2.

#### 4.1.1. Sorra de sílice

A la taula 4.1. es mostren les fraccions granulomètriques obtingudes corresponents als medis de sorra de sílice una vegada realitzat el procés de tamisat.

*Taula 4.1. Fraccions granulomètriques (mitjana i desviació típica en % en pes) obtingudes del producte SSI2 i SSI3.*

Interval (mm)	SSI2	SSI3
I1 (0,5-0,63)	0,02 (0,00)	0,01 (0,00)
I2 (0,63-0,75)	<b>96,83 (0,00)</b>	1,25 (0,00)
I3 (0,75-0,84)	1,55 (0,00)	<b>96,96 (0,00)</b>
I4 (0,84-1)	1,60 (0,00)	1,78 (0,00)

Com es pot observar, per cadascun dels medis de sorra de sílice, les fraccions I2 i I3 representen respectivament valors propers al 97 % en pes, per tant es conclou que ambdós productes estan caracteritzats amb aproximació suficient a efectes de la seva utilització en els assajos de filtració.

#### 4.1.2. Vidre ECO filtrant

A la taula 4.2. es mostren les fraccions granulomètriques obtingudes corresponents als medis de vidre ECO filtrant una vegada realitzat el procés de tamisat.

*Taula 4.2. Fraccions granulomètriques (mitjana i desviació típica en % en pes) obtingudes del producte VEI2 i VEI3.*

Interval (mm)	VEI2	VEI3
I1 (0,5-0,63)	0,58 (0,00)	0,69 (0,00)
I2 (0,63-0,75)	<b>97,89 (0,00)</b>	4,53 (0,00)
I3 (0,75-0,84)	1,25 (0,00)	<b>93,11 (0,01)</b>
I4 (0,84-1)	0,27 (0,00)	1,67 (0,00)

Com es pot observar, per cadascun dels medis de vidre ECO filtrant, les fraccions I2 i I3 representen valors propers al 98 i 93 % en pes respectivament, per tant es conclou que

ambdós productes estan caracteritzats amb aproximació suficient a efectes de la seva utilització en els assajos de filtració.

## 4.2. Densitat aparent, densitat real i porositat del medi filtrant

Els resultats detallats per a cada propietat analitzada, medi filtrant i repetició es troben a l'Annex 2.

A la Taula 4.3. es presenten els valors mitjans i la desviació típica per a cadascuna de les propietats i medis filtrants.

**Taula 4.3. Densitat aparent, real i porositat (mitjana i desviació típica).**

Medi	Densitat aparent [g/cm <sup>3</sup> ]	Densitat real [g/cm <sup>3</sup> ]	Porositat [%]
SSI2	1,51 (0,00)	2,45 (0,07)	38,3 (0,02)
SSI3	1,54 (0,01)	2,46 (0,08)	37,3 (0,02)
VEI2	1,33 (0,01)	2,46 (0,02)	45,8 (0,01)
VEI3	1,31 (0,02)	2,39 (0,05)	45,0 (0,01)

Dels resultats mostrats a la taula 4.3. es destaca la homogeneïtat dels medis filtrants, d'acord amb el baix valor de la desviació estàndard que han mostrat les 3 propietats analitzades.

La porositat del Vidre ECO filtrant per ambdues granulometries és superior a la porositat de la sorra de sílice. Tenint en compte que el tamany de partícules és el mateix en cada cas i la densitat real molt semblant, les diferències de porositat cal atribuir-les a la diferent geometria de les partícules de cada matèria, que probablement per ser més fines, apuntades, irregulars i asimètriques en el vidre fan que la densitat aparent sigui més baixa i per tant la porositat més elevada.

S'observa també que la porositat no està relacionada amb la granulometria dels medis, el que reforça la hipòtesi anterior que la forma geomètrica de les partícules és la variable més influent en els valors de porositat.

Finalment, la llei de Darcy és una aproximació macroscòpica al moviment de l'aigua al sòl, caldria centrar-se en l'anàlisi microscòpic per tal d'explicar els fenòmens observats, tot i que aquesta tasca no entra dins l'abast del projecte.

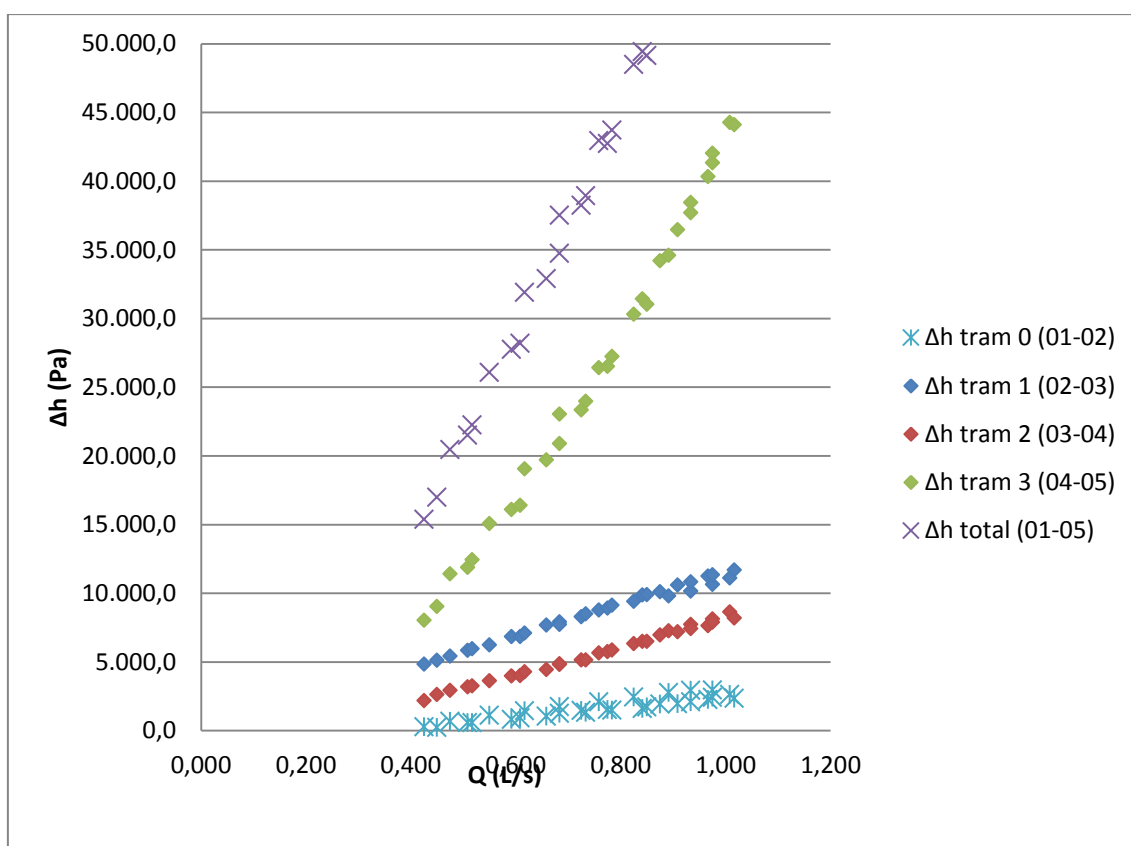
## 4.3. Anàlisi de les pèrdues de càrrega produïdes en el filtre

En tot l'apartat s'analitzen els resultats obtinguts en els assaigs on es treballa amb columna de medi filtrant d'alçada 3 en funcionament a filtració. Es considera que per tal d'avaluar el comportament dels medis filtrants aquesta és la millor situació, ja que és la que aporta un volum de dades més gran, característic i significatiu referent a cadascun d'ells.

### 4.3.1. Pressions en els manòmetres del filtre

Centrant l'atenció en el comportament general del filtre, contemplant que funciona tal i com s'ha descrit en la introducció de l'apartat 4.3. i, observant les taules A.1.38. a A.1.40., A.1.56. a A.1.58 i A.1.74. a A.1.76 de l'Annex 1, es pot apreciar que en el tram 0 s'hi dona un lleuger increment de càrrega per certs valors de cabal, és a dir, que la pressió en el manòmetre 02 és més elevada que la del manòmetre 01. Aquest fenomen pot ser degut a la posició dels manòmetres. Per una part, el manòmetre 01 està molt proper l'aixeta, aspecte no aconsellable per la turbulència que es produeix en l'element singular i que pot afectar la lectura del manòmetre. D'altra banda cal tenir en compte que a l'interior dels filtres poden succeir fenòmens hidràulics relatius a pertorbacions del flux i existència de masses d'aire, que poden interferir en les lectures de pressions.

En les gràfiques 4.1. a 4.4. es mostra la distribució de les pressions en el filtre en funció del medi.



**Figura 4.1. Distribució de la pèrdua de càrrega per trams i total en funció del cabal amb medi SSI2.**



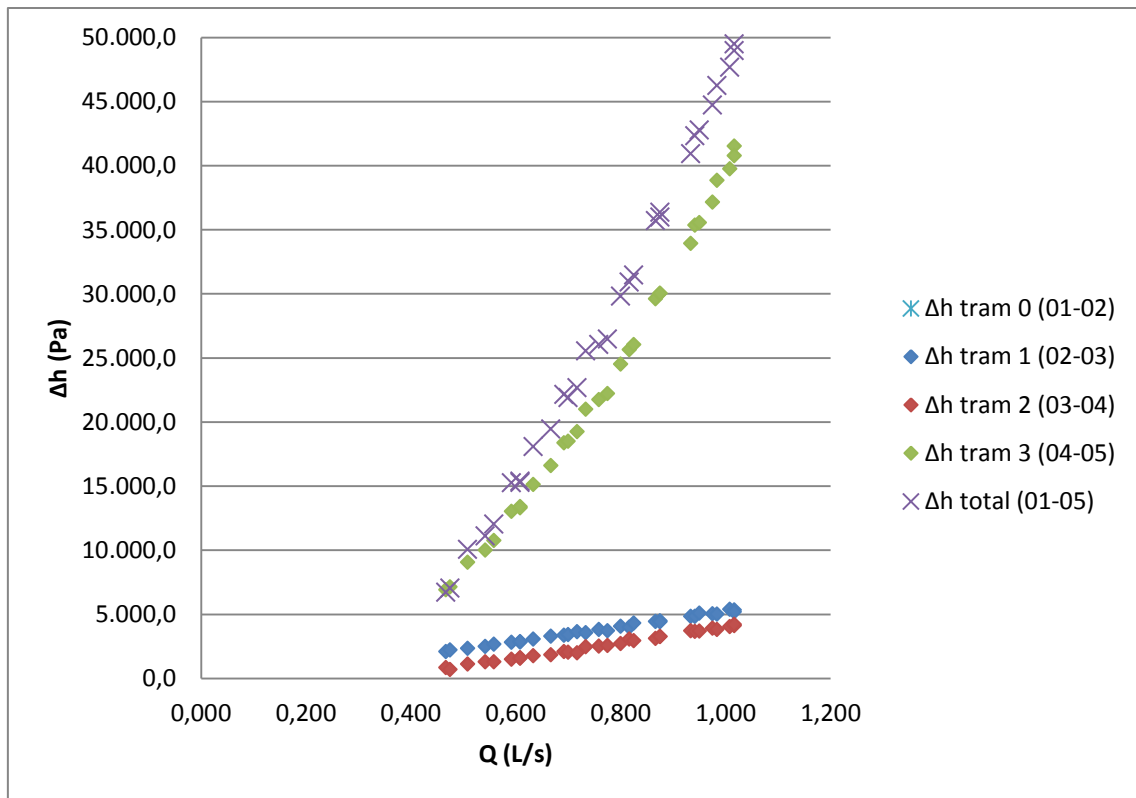


Figura 4.2. Distribució de la pèrdua de càrrega per trams i total en funció del cabal amb medi SSI3.

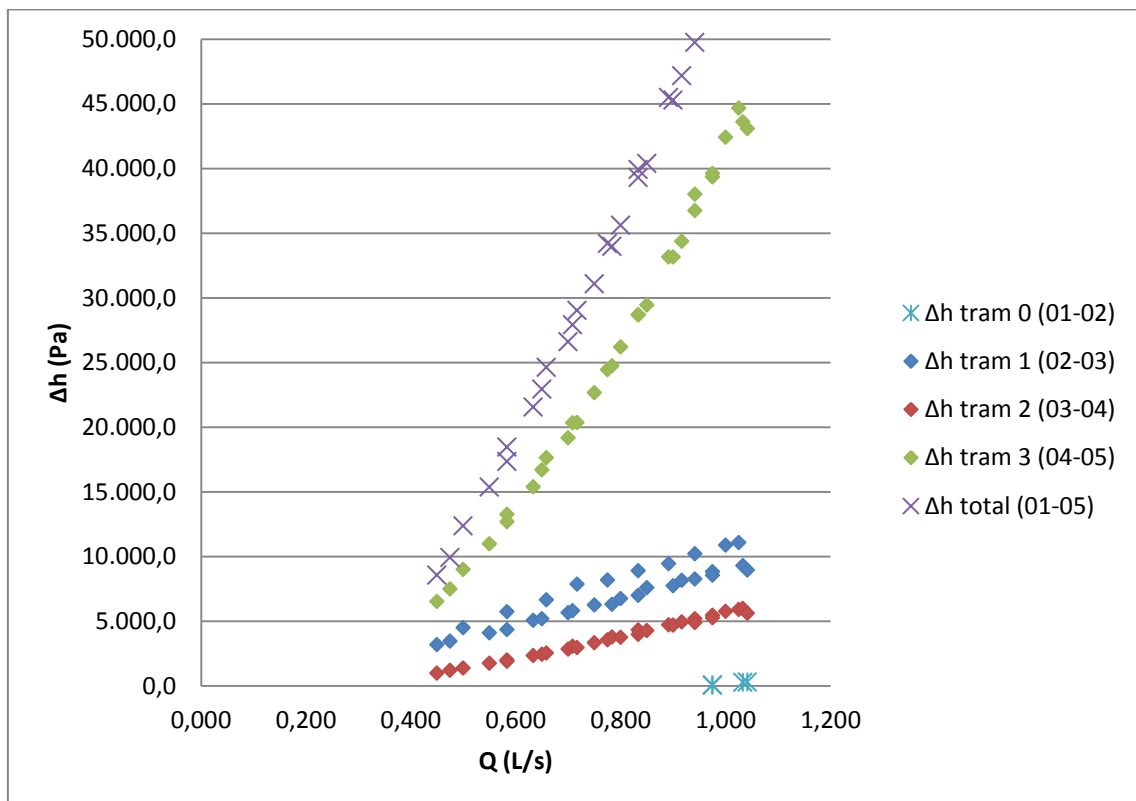
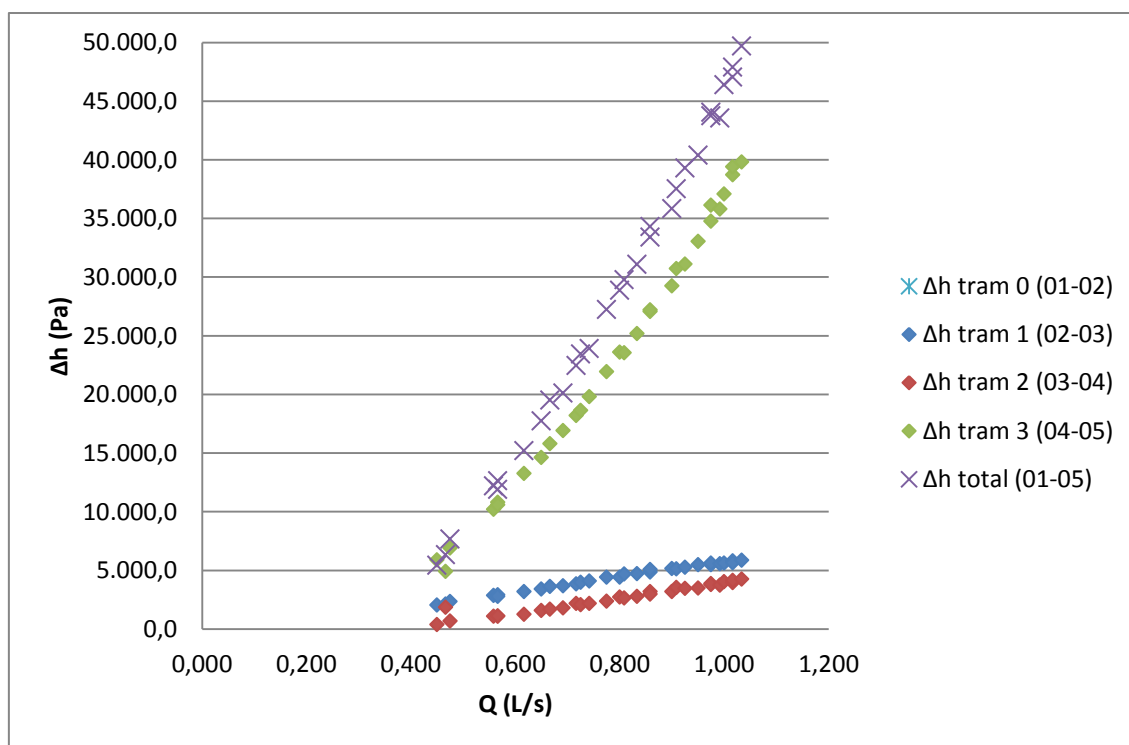


Figura 4.3. Distribució de la pèrdua de càrrega per trams i total en funció del cabal amb medi VEI2.



**Figura 4.4. Distribució de la pèrdua de càrrega per trams i total en funció del cabal amb medi VEI3.**

En les gràfiques s'observa que la corba del tram 0 sols apareix en el medi SSI2 i una part en el VEI2, per tant la pèrdua de càrrega en la resta de punts de VEI2 i dels medis SSI3 i VEI3 en aquest tram pren valors negatius, representant un guany d'energia, la qual cosa no és possible i representa una anomalia.

Tot i ser petita la diferència de pressió entre els manòmetres 01 i 02, es creu oportú optar per depreciar la pèrdua de càrrega que succeeix en el tram 0, de manera que en l'apartat 4.3.2. s'analitzarà el comportament del medi prescindint d'aquest.

D'altra banda també es mostra que l'efecte de la crepina situada en el tram 3. Observem que és el tram on s'hi dóna gran part de la pèrdua de càrrega durant el procés de filtratge.

#### 4.3.2. Pèrdues de càrrega produïdes en el procés de filtració

Atenent al fenomen descrit en l'apartat anterior la pèrdua de càrrega total del medi és la compresa entre els manòmetres 02 i 05, per tant sorgeixen tres trams alhora de distribuir la pèrdua de càrrega en el filtre. (veure figura 3.17.)

La columna de medi en alçada 3 rep l'influència dels elements auxiliars en la seva part superior i inferior produint-se fenòmens hidràulics no relacionats directament amb el comportament del medi. El tram 1 i 3 estan influïts per el contacte directe amb l'aigua i la crepina respectivament. Per això l'únic tram on és possible realitzar una caracterització del medi acceptable és el 2.

En l'Annex 1 s'hi troben les dades recollides de cada medi en la resta d'alçades, així com també els assaigs a contrarentat i sense medi filtrant.

En les Taules 4.4. a 4.7. s'hi exposen les pèrdues de càrrega en cada tram de la columna de medi.

**Taula 4.4. Distribució de la pèrdua de càrrega en la columna de medi corresponent a SSI2 expressada en Pa i de forma percentual.**

Q (L/s)	$\Delta h$ total medi (02-05)	$\Delta h$ tram 1 (02-03)		$\Delta h$ tram 2 (03-04)		$\Delta h$ tram 3 (04-05)	
	[Pa]	[Pa]	% $\Delta h$ respecte total (02-05)	[Pa]	% $\Delta h$ respecte total (02-05)	[Pa]	% $\Delta h$ respecte total (02-05)
0,425	15.086,1	4.852,9	32,2%	2.195,4	14,6%	8.037,8	53,3%
0,450	16.771,6	5.121,2	30,5%	2.622,4	15,6%	9.028,0	53,8%
0,475	19.772,2	5.415,2	27,4%	2.934,9	14,8%	11.422,1	57,8%
0,508	20.917,1	5.837,8	27,9%	3.190,1	15,3%	11.889,2	56,8%
0,517	21.668,9	5.959,6	27,5%	3.264,8	15,1%	12.444,5	57,4%
0,550	24.946,5	6.250,7	25,1%	3.633,4	14,6%	15.062,4	60,4%
0,592	26.925,9	6.837,8	25,4%	3.983,0	14,8%	16.105,0	59,8%
0,608	27.261,0	6.855,4	25,1%	3.998,3	14,7%	16.407,3	60,2%
0,617	30.452,4	7.109,1	23,3%	4.276,6	14,0%	19.066,8	62,6%
0,658	31.850,1	7.690,4	24,1%	4.445,4	14,0%	19.714,3	61,9%
0,683	35.781,9	7.915,6	22,1%	4.815,9	13,5%	23.050,4	64,4%
0,683	33.483,6	7.731,7	23,1%	4.854,8	14,5%	20.897,0	62,4%
0,725	36.769,1	8.295,6	22,6%	5.136,5	14,0%	23.337,0	63,5%
0,733	37.607,5	8.489,3	22,6%	5.135,5	13,7%	23.982,6	63,8%
0,758	40.849,4	8.785,2	21,5%	5.653,5	13,8%	26.410,8	64,7%
0,775	41.187,7	8.923,5	21,7%	5.749,9	14,0%	26.514,3	64,4%
0,783	42.232,2	9.120,8	21,6%	5.865,4	13,9%	27.246,1	64,5%
0,825	46.046,5	9.397,9	20,4%	6.326,9	13,7%	30.321,8	65,9%
0,842	47.804,0	9.873,7	20,7%	6.493,2	13,6%	31.437,2	65,8%
0,850	47.437,8	9.908,0	20,9%	6.497,9	13,7%	31.031,9	65,4%
0,875	51.295,8	10.117,0	19,7%	6.970,2	13,6%	34.208,6	66,7%
0,892	51.652,2	9.795,4	19,0%	7.264,2	14,1%	34.592,6	67,0%
0,908	54.223,4	10.586,1	19,5%	7.184,9	13,3%	36.452,3	67,2%
0,933	55.576,6	10.155,0	18,3%	7.720,1	13,9%	37.701,5	67,8%
0,933	56.689,8	10.820,6	19,1%	7.419,5	13,1%	38.449,7	67,8%
0,967	59.223,4	11.250,7	19,0%	7.639,5	12,9%	40.333,1	68,1%
0,975	60.105,3	10.641,4	17,7%	8.135,2	13,5%	41.328,7	68,8%
0,975	61.262,3	11.332,2	18,5%	7.894,9	12,9%	42.035,2	68,6%
1,008	64.031,0	11.113,0	17,4%	8.645,9	13,5%	44.272,1	69,1%
1,017	63.995,0	11.681,9	18,3%	8.196,4	12,8%	44.116,7	68,9%

**Taula 4.5. Distribució de la pèrdua de càrrega en la columna de medi corresponent a SSI3 expressada en Pa i de forma percentual.**

Q (L/s)	<b>Δh total medi (02-05)</b>	<b>Δh tram 1 (02-03)</b>		<b>Δh tram 2 (03-04)</b>		<b>Δh tram 3 (04-05)</b>	
	[Pa]	[Pa]	<b>% Δh respecte total (02-05)</b>	[Pa]	<b>% Δh respecte total (02-05)</b>	[Pa]	<b>% Δh respecte total (02-05)</b>
0,467	9.893,6	2.108,2	21,3%	864,4	8,7%	6.921,0	70,0%
0,475	10.083,1	2.223,2	22,0%	705,3	7,0%	7.154,6	71,0%
0,508	12.556,0	2.349,6	18,7%	1.137,6	9,1%	9.068,8	72,2%
0,542	13.851,9	2.500,8	18,1%	1.314,9	9,5%	10.036,2	72,5%
0,558	14.742,8	2.672,6	18,1%	1.300,3	8,8%	10.770,0	73,1%
0,592	17.366,6	2.833,2	16,3%	1.498,7	8,6%	13.034,6	75,1%
0,608	17.805,1	2.849,1	16,0%	1.644,9	9,2%	13.311,0	74,8%
0,608	17.879,4	2.877,6	16,1%	1.578,1	8,8%	13.423,7	75,1%
0,633	20.021,4	3.082,8	15,4%	1.788,5	8,9%	15.150,1	75,7%
0,667	21.784,2	3.300,8	15,2%	1.862,5	8,5%	16.620,8	76,3%
0,692	23.866,6	3.370,6	14,1%	2.098,2	8,8%	18.397,9	77,1%
0,700	24.017,8	3.437,8	14,3%	2.057,5	8,6%	18.522,4	77,1%
0,717	24.935,5	3.659,5	14,7%	2.006,7	8,0%	19.269,3	77,3%
0,733	27.073,7	3.593,1	13,3%	2.470,7	9,1%	21.009,9	77,6%
0,758	28.137,0	3.833,1	13,6%	2.532,3	9,0%	21.771,6	77,4%
0,775	28.540,7	3.731,6	13,1%	2.575,0	9,0%	22.234,2	77,9%
0,800	31.327,0	4.069,2	13,0%	2.737,9	8,7%	24.520,0	78,3%
0,817	32.742,1	4.003,8	12,2%	3.092,0	9,4%	25.646,3	78,3%
0,825	33.351,1	4.320,9	13,0%	2.965,0	8,9%	26.065,2	78,2%
0,867	37.226,3	4.465,5	12,0%	3.133,6	8,4%	29.627,2	79,6%
0,875	37.835,7	4.513,9	11,9%	3.273,4	8,7%	30.048,4	79,4%
0,875	37.735,9	4.419,6	11,7%	3.272,1	8,7%	30.044,1	79,6%
0,933	42.531,0	4.858,1	11,4%	3.731,8	8,8%	33.941,2	79,8%
0,942	43.901,9	4.846,0	11,0%	3.693,0	8,4%	35.362,8	80,5%
0,950	44.384,2	5.103,8	11,5%	3.708,7	8,4%	35.571,7	80,1%
0,975	46.151,9	5.055,9	11,0%	3.930,6	8,5%	37.165,3	80,5%
0,983	47.722,2	5.020,3	10,5%	3.841,3	8,0%	38.860,7	81,4%
1,008	49.254,6	5.416,4	11,0%	4.065,7	8,3%	39.772,5	80,7%
1,017	51.010,2	5.346,0	10,5%	4.121,2	8,1%	41.543,0	81,4%
1,017	50.245,6	5.216,9	10,4%	4.241,4	8,4%	40.787,4	81,2%

*Taula 4.6. Distribució de la pèrdua de càrrega en la columna de medi corresponent a VEI2 expressada en Pa i de forma percentual.*

Q (L/s)	$\Delta h$ total medi (02-05)	$\Delta h$ tram 1 (02-03)		$\Delta h$ tram 2 (03-04)		$\Delta h$ tram 3 (04-05)	
	[Pa]	[Pa]	% $\Delta h$ respecte total (02-05)	[Pa]	% $\Delta h$ respecte total (02-05)	[Pa]	% $\Delta h$ respecte total (02-05)
0,450	10686,2	3186,0	29,8%	978,4	9,2%	6521,8	61,0%
0,475	12107,2	3437,5	28,4%	1193,6	9,9%	7476,1	61,7%
0,500	14843,6	4490,1	30,2%	1369,1	9,2%	8984,4	60,5%
0,550	16812,6	4091,2	24,3%	1739,6	10,3%	10981,8	65,3%
0,583	19001,1	4330,8	22,8%	1998,4	10,5%	12671,9	66,7%
0,583	20865,7	5717,4	27,4%	1900,5	9,1%	13247,9	63,5%
0,633	22769,1	5047,2	22,2%	2334,3	10,3%	15387,6	67,6%
0,650	24293,8	5171,0	21,3%	2444,0	10,1%	16678,8	68,7%
0,658	26819,3	6650,5	24,8%	2536,1	9,5%	17632,7	65,7%
0,700	27630,5	5658,1	20,5%	2820,6	10,2%	19151,8	69,3%
0,708	29164,0	5801,7	19,9%	3046,9	10,4%	20315,5	69,7%
0,717	31151,3	7850,4	25,2%	2952,9	9,5%	20348,1	65,3%
0,750	32206,5	6241,8	19,4%	3317,4	10,3%	22647,3	70,3%
0,775	36169,8	8183,9	22,6%	3550,3	9,8%	24435,6	67,6%
0,783	34816,6	6299,0	18,1%	3783,0	10,9%	24734,6	71,0%
0,800	36694,7	6747,7	18,4%	3753,7	10,2%	26193,3	71,4%
0,833	39656,4	6995,1	17,6%	3978,1	10,0%	28683,1	72,3%
0,833	41898,3	8900,5	21,2%	4320,8	10,3%	28676,9	68,4%
0,850	41262,1	7581,5	18,4%	4256,0	10,3%	29424,6	71,3%
0,892	47276,9	9426,3	19,9%	4701,5	9,9%	33149,1	70,1%
0,900	45581,5	7732,4	17,0%	4690,7	10,3%	33158,3	72,7%
0,917	47434,2	8138,9	17,2%	4930,1	10,4%	34365,1	72,4%
0,942	53387,9	10209,6	19,1%	5192,3	9,7%	37985,9	71,2%
0,942	49858,9	8261,3	16,6%	4873,5	9,8%	36724,1	73,7%
0,975	53627,2	8828,0	16,5%	5465,9	10,2%	39333,3	73,3%
0,975	53385,1	8536,7	16,0%	5251,3	9,8%	39597,1	74,2%
1,000	59017,7	10867,6	18,4%	5740,1	9,7%	42409,9	71,9%
1,025	61629,1	11078,4	18,0%	5893,8	9,6%	44656,9	72,5%
1,033	58872,7	9301,1	15,8%	5969,3	10,1%	43602,3	74,1%
1,042	57610,9	8933,2	15,5%	5595,4	9,7%	43082,3	74,8%

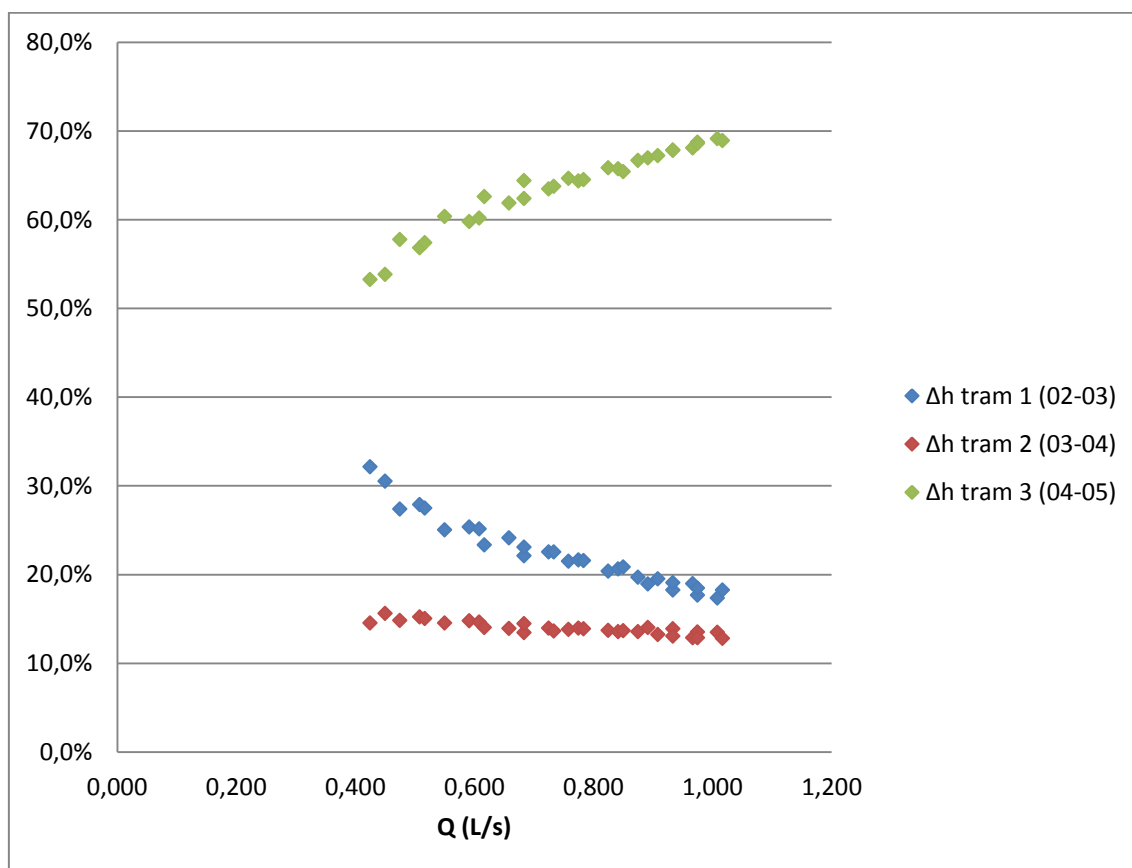
**Taula 4.7. Distribució de la pèrdua de càrrega en la columna de medi corresponent a VEI3 expressada en Pa i de forma percentual.**

Q (L/s)	$\Delta h$ total medi (02-05)	$\Delta h$ tram 1 (02-03)		$\Delta h$ tram 2 (03-04)		$\Delta h$ tram 3 (04-05)	
	[Pa]	[Pa]	% $\Delta h$ respecte total (02-05)	[Pa]	% $\Delta h$ respecte total (02-05)	[Pa]	% $\Delta h$ respecte total (02-05)
0,450	8.366,6	2.068,9	24,7%	402,3	4,8%	5.895,4	70,5%
0,467	8.930,0	2.151,9	24,1%	1.862,9	20,9%	4.915,2	55,0%
0,475	9.976,1	2.361,3	23,7%	690,1	6,9%	6.924,8	69,4%
0,558	14.209,6	2.875,1	20,2%	1.108,8	7,8%	10.225,8	72,0%
0,567	14.837,3	2.920,7	19,7%	1.097,6	7,4%	10.819,1	72,9%
0,567	14.531,2	2.796,5	19,2%	1.127,0	7,8%	10.607,8	73,0%
0,617	17.727,5	3.207,1	18,1%	1.258,7	7,1%	13.261,7	74,8%
0,650	19.629,7	3.418,4	17,4%	1.586,0	8,1%	14.625,3	74,5%
0,667	21.140,1	3.628,1	17,2%	1.710,5	8,1%	15.801,5	74,7%
0,692	22.434,1	3.693,0	16,5%	1.821,3	8,1%	16.919,7	75,4%
0,717	24.250,5	3.853,1	15,9%	2.195,3	9,1%	18.202,1	75,1%
0,725	24.746,1	4.004,9	16,2%	2.095,7	8,5%	18.645,5	75,3%
0,742	26.110,3	4.113,9	15,8%	2.183,8	8,4%	19.812,5	75,9%
0,775	28.750,6	4.428,5	15,4%	2.382,7	8,3%	21.939,4	76,3%
0,800	30.804,4	4.435,9	14,4%	2.745,0	8,9%	23.623,5	76,7%
0,808	30.918,5	4.715,6	15,3%	2.648,8	8,6%	23.554,1	76,2%
0,833	32.718,5	4.739,6	14,5%	2.788,7	8,5%	25.190,1	77,0%
0,858	35.172,9	4.877,7	13,9%	3.207,9	9,1%	27.087,4	77,0%
0,858	35.292,2	5.074,4	14,4%	2.995,9	8,5%	27.221,9	77,1%
0,900	37.652,5	5.177,7	13,8%	3.204,2	8,5%	29.270,7	77,7%
0,908	39.425,3	5.138,1	13,0%	3.563,2	9,0%	30.724,0	77,9%
0,925	39.906,1	5.289,8	13,3%	3.484,3	8,7%	31.132,0	78,0%
0,950	42.056,1	5.494,4	13,1%	3.503,5	8,3%	33.058,3	78,6%
0,975	44.188,5	5.507,6	12,5%	3.897,2	8,8%	34.783,7	78,7%
0,975	45.578,1	5.628,2	12,3%	3.807,1	8,4%	36.142,8	79,3%
0,992	45.145,4	5.585,7	12,4%	3.751,7	8,3%	35.808,0	79,3%
1,000	46.779,9	5.626,9	12,0%	4.060,4	8,7%	37.092,6	79,3%
1,017	48.499,4	5.821,3	12,0%	3.957,0	8,2%	38.721,0	79,8%
1,017	49.233,6	5.650,9	11,5%	4.170,0	8,5%	39.412,7	80,1%
1,033	49.958,5	5.868,5	11,7%	4.276,9	8,6%	39.813,1	79,7%

Els resultats obtinguts mostren la importància dels elements auxiliars i de la crepina. En el tram 3 s'hi produeix gran part de la pèrdua de càrrega amb valors que oscil·len entre el 60 i 80 % respecte la total que es produeix en la columna de medi. Arbat (2013), sols atribueix un 15,4 % de pèrdua de càrrega als elements auxiliars del filtre (4,4 % a les canonades d'entrada i sortida i 11 % a la placa perforada i crepina). Aquesta variació de resultats podria ser deguda a la geometria del filtre, així com també a l'elevat cabal circulant en els assajos, ja que l'augment d'aquest és proporcional a la pèrdua de càrrega en el tram.

En el tram 2 s'observen diferències en la pèrdua de càrrega entre granulometries dels medis. Els resultats mostren que en el filtratge amb els intervals de major granulometria (I3) la pèrdua de càrrega és menor. Si observem la pèrdua de càrrega en forma percentual veiem que el tram 2 a diferència de la resta de trams s'hi dona una major estabilitat. En els trams 1 i 3 els valors oscil·len en rangs més petits, els quals representen entre un 7 i un 15 % respecte la pèrdua de càrrega total de la columna de medi (manòmetre 02 a 05). Per tant considerant les condicions en que es troba aquest tram podem precisar que és adient per a la caracterització del medi que el comprèn.

Per últim, el tram 1 es comporta de manera inversa al tram 3, ja que la pèrdua de càrrega disminueix a mesura que augmenta el cabal. Aquest fet es pot com es pot comprovar en les figures 4.5 a 4.8. on s'observa la tendència que segueix la pèrdua de càrrega en els diferents trams del filtre en cada medi de forma percentual.



*Figura 4.5. Distribució percentual de la pèrdua de càrrega en els trams compresos en la columna de medi SSI2.*

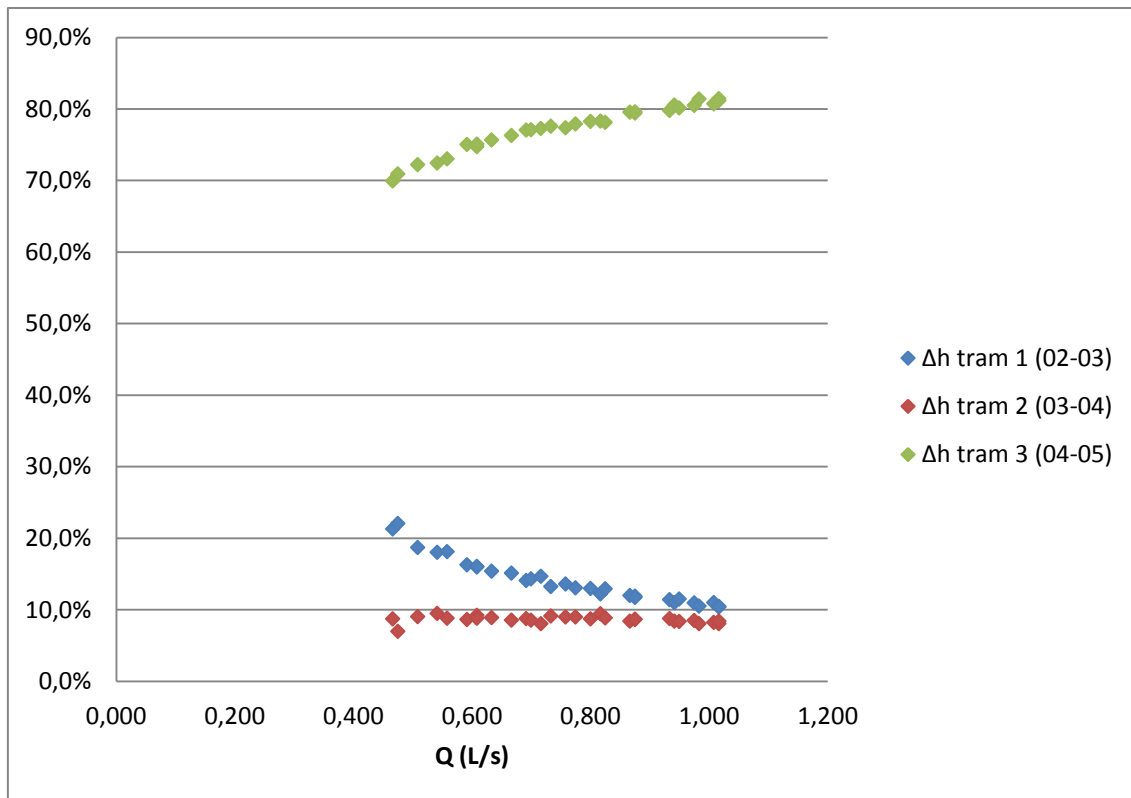


Figura 4.6. Distribució percentual de la pèrdua de càrrega en els trams compresos en la columna de medi SS13.

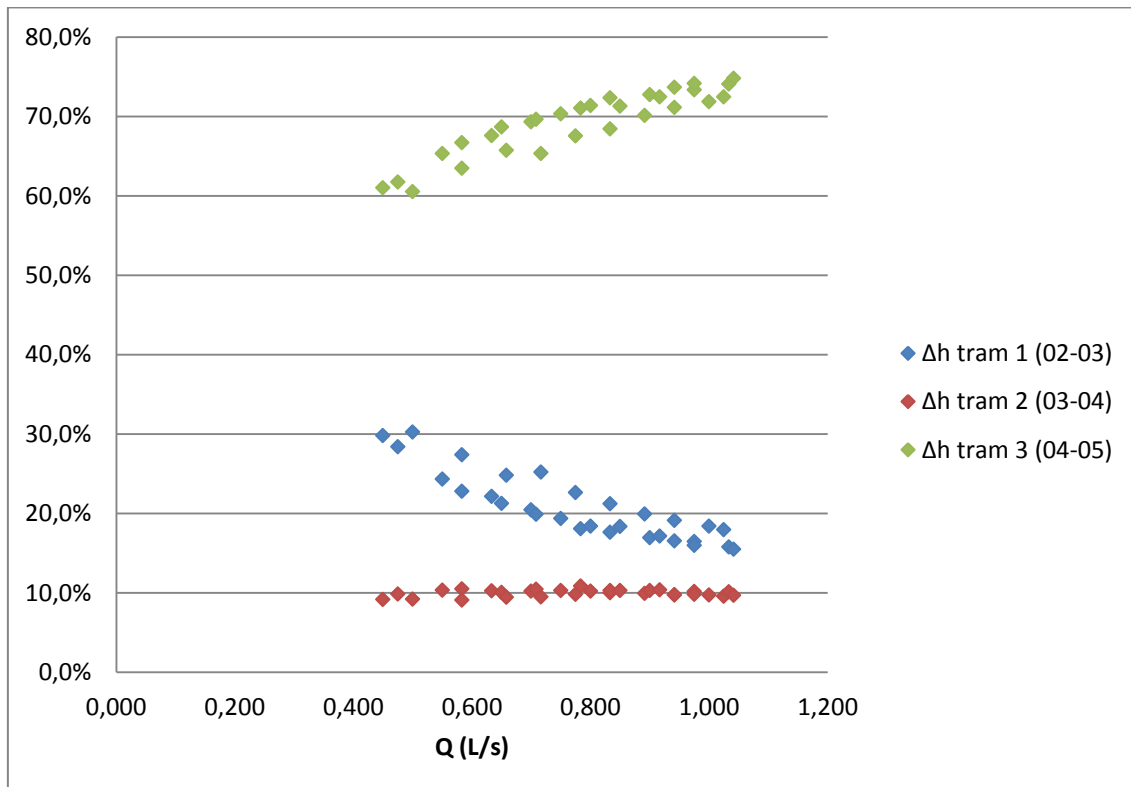
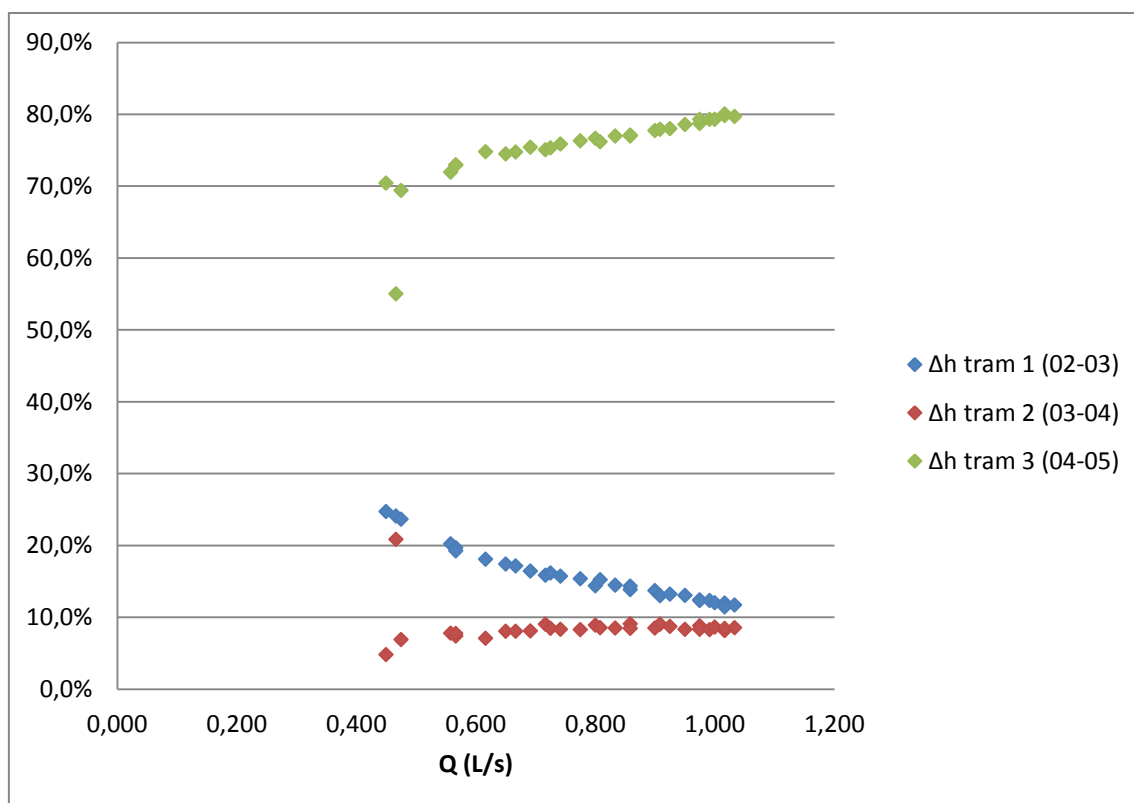


Figura 4.7. Distribució percentual de la pèrdua de càrrega en els trams compresos en la columna de medi VEI2.





**Figura 4.8. Distribució percentual de la pèrdua de càrrega en els trams compresos en la columna de medi VEI3.**

En les gràfiques es comprova la linealitat existent en el tram 2, per tant podem assegurar que aquest tram és característic de cada medi i, a partir d'aquest se'n pot obtenir la conductivitat hidràulica de cadascun d'ells.

També s'evidencia l'efecte que té la granulometria sobre el procés. Es pot observar com en intervals granulomètrics majors hi ha menys pèrdua de càrrega que en els de menor granulometria.

Com s'ha pogut veure en les figures 4.1. a 4.4. la crepina provoca una important pèrdua de càrrega localitzada. Les figures 4.5. a 4.8. mostren que aquesta representa d'entre el 55 i 75 % en granulometries petites (SSI2 i VEI2) i d'entre el 70 i 80 % en granulometries grans (SSI3 i VEI 3), ja que la distribució percentual varia en funció del tamany de partícules del medi.

#### 4.3.3. Pèrdues de càrrega en el procés de contrarentat

En l'Annex 1 es mostren les dades que s'obtenen en els assaigs realitzats amb funcionament a contrarentat. Durant aquest, el llit de medi es fluïditz i s'expandeix produint-se fenòmens hidràulics complexos l'anàlisi dels quals no entra dins l'abast d'aquest projecte.

#### 4.4. Conductivitat hidràulica saturada dels medis filtrants

A l'Annex 2 es detallen els càlculs de la conductivitat hidràulica saturada i en la taula 4.8. es resumeixen els valors obtinguts per a cada medi.

*Taula 4.8. Coeficients de determinació i conductivitat hidràulica saturada (K) obtinguts per a cada medi.*

Medi	R <sup>2</sup>	K [m/s]
SSI2	0,9934	0,0031
SSI3	0,9922	0,0051
VEI2	0,9928	0,0037
VEI3	0,9914	0,0048

Dels resultats de conductivitat hidràulica mostrats en la taula 4.8. en destaca l'alta bondat dels ajusts, els valors del coeficient de determinació (R<sup>2</sup>) són molt propers a 1 i certifiquen la qualitat dels assaigs realitzats.

Com es pot observar en els valors de porositat i conductivitat hidràulica saturada de les taules 4.3. i 4.8., la porositat no està directament relacionada amb la conductivitat hidràulica. D'aquesta manera no es compleix que una major porositat suposi una major conductivitat hidràulica saturada. Probablement cal relacionar la conductivitat hidràulica amb la forma i distribució dels porus. D'altra banda, la compactació que es pot produir en els medis després dels diferents assaigs, l'existència de canals preferencials al pas de l'aigua, la interconnexió entre porus o inclús la presència de bosses d'aire són factors que poden ajudar a explicar el fenomen.

Analitzant la conductivitat hidràulica a cada medi s'observa que quan el tamany de partícula és menor, la conductivitat hidràulica també és menor. Es coneix que quan més petit és el tamany de partícula més gran es la seva superfície específica (àrea superficial de la partícula dividit per massa o per volum) per la qual cosa la resistència al flux és major i per tant la conductivitat hidràulica menor (I2 enfront de l'I3). Per al contrari, tamanyes de partícules més grans produeixen porus més grans, de manera que la conductivitat hidràulica augmenta (I3).

#### 4.5. Equacions de funcionament a filtració

A partir dels assaigs s'obté l'equació polinòmica de funcionament referida a cada medi i alçada d'aquest. A l'Annex 2 es detallen els càlculs i la representació de les regressions polinòmiques generades en cada assaig, d'acord amb l'equació genèrica:

$$\Delta h = a \cdot Q^2 + b \cdot Q \quad (6)$$

On:

- $\Delta h$ : Diferència de pressió [m]
- Q: Cabal [ $m^3/s$ ]
- a i b: constants de la regressió

En les Taules 4.9. i 4.10. es presenten els termes a i b que conformen l'equació de funcionament (6) obtinguda de cada combinació.

**Taula 4.9. Constants de caracterització de funcionament del conjunt medi-elements auxiliars (trams 1, 2 i 3).**

Medi	Alçada medi	a	b	R <sup>2</sup>
<b>Buit (sense medi filtrant)</b>	-	53964,0	- 20463,0	0,9916
<b>SSI2</b>	1	51062,0	- 6538,3	0,9982
	2	53218,0	217,2	0,9986
	3	42667,0	20422,0	0,9975
<b>SSI3</b>	1	45437,0	-3002,0	0,9966
	2	47669,0	- 3989,4	0,9807
	3	49961,0	-851,4	0,9990
<b>VEI2</b>	1	47443,0	-5318,0	0,9988
	2	52243,0	-2481,6	0,9916
	3	54442,0	2469,5	0,9911
<b>VEI3</b>	1	49896,0	-9683,1	0,9985
	2	50033,0	-7221,5	0,9980
	3	48267,0	-1120,5	0,9983

**Taula 4.10. Constants de caracterització de funcionament de la crepina (tram 3).**

Medi	Alçada medi	a	b	R <sup>2</sup>
<b>Buit (sense medi filtrant)</b>	-	51885,0	-16401,0	0,9905
<b>SSI2</b>	1	48630,0	-2208,7	0,9983
	2	48212,0	-4987,0	0,9984
	3	38853,0	4542,2	0,9966
<b>SSI3</b>	1	44880,0	-899,2	0,9972
	2	42948,0	-4723,0	0,9897
	3	44987,0	-5261,9	0,9988
<b>VEI2</b>	1	45942,0	-1821,6	0,9990
	2	46530,0	-4856,5	0,9902
	3	46351,0	-4715,5	0,9969
<b>VEI3</b>	1	48727,0	-6002,9	0,9986
	2	45907,0	-7647,3	0,9980
	3	42907,0	-5541,2	0,9977

D'altre banda en la taula 4.11. es resumeixen els termes a i b que s'obtenen a partir de la linealització del comportament del medi (tram 2), d'acord amb l'equació genèrica:

$$\Delta h = a \cdot Q + b \quad (7)$$

On:

- $\Delta h$ : Diferència de pressió [m]
- Q: Cabal [m<sup>3</sup>/s]
- a i b: constants de la regressió

Aquestes equacions són útils alhora de relacionar els medis amb termes d'eficiència energètica.

**Taula 4.11. Constants de caracterització del medi (tram2).**

Medi	Alçada medi	a	b	R <sup>2</sup>
<b>SSI2</b>	3	10335,0	- 2161,0	0,9934
<b>SSI3</b>	3	6165,8	-2135,2	0,9922
<b>VEI2</b>	3	8564,5	-3015,8	0,9934
<b>VEI3</b>	3	6581,5	-2620,0	0,9914

Es destaquen els alts coeficients de determinació obtinguts en tots els casos quan es treballa amb els cabals de l'assaig (0,4 a 1,1 L/s), el que dona validesa dins aquest rang de cabals a l'aplicació de les equacions obtingudes.

## 4.6. Determinació dels paràmetres de funcionament en el procés de caracterització

### 4.6.1. Determinació de la velocitat real

A l'Annex 2 es detallen els càlculs de la velocitat de Darcy i lineal mitja necessaris per obtenir els rangs màxims i mínims de velocitat real amb els quals es treballa amb els assaigs realitzats i que es resumeixen en la taula 4.12., tinguent en compte el rang de valors que pot comprendre el coeficient de tortuositat en el càlcul d'aquest paràmetre.

*Taula 4.12. Rangs de velocitats de treball en els assaigs amb alçada 3 dels diferents medis considerant el rang de valors que pot comprendre el coeficient de tortuositat.*

Medi	Rang velocitat real [m/h]			
	Mínim		Màxim	
	Coeficient de tortuositat = 1	Coeficient de tortuositat = 1,18	Coeficient de tortuositat = 1	Coeficient de tortuositat = 1,18
SSI2	127,2	150,0	304,2	358,9
SSI3	139,6	167,7	304,2	358,9
VEI2	134,6	158,8	311,6	367,8
VEI3	134,6	158,9	309,2	364,8

Les velocitats obtingudes són molt superiors a les velocitats reals amb les quals es treballa en el filtratge dins l'àmbit agrícola, les quals oscil·len entre 30 i 60 m/h. El fet de treballar amb cabals elevats ha suposat un augment de les velocitats de funcionament. Normalment en l'àmbit agrícola es treballa amb cabals compresos entre els 0,1 i 0,2 L/s.

### 4.6.2. Determinació de la càrrega superficial i volumètrica

A l'Annex 2 es detallen els càlculs de la càrrega superficial (correspon a la velocitat de Darcy) i volumètrica amb què es treballa en els assaigs en alçada 3, i en la taula 4.13. es resumeixen per a cada medi.

*Taula 4.13. Rangs de càrrega superficial i volumètrica amb els quals s'efectuen els assaigs amb alçada 3 dels diferents medis.*

Medi	Càrrega superficial [m/s]		Càrrega volumètrica [s <sup>-1</sup> ]	
	Min.	Màx.	Min.	Màx.
SSI2	0,014	0,032	0,043	0,102
SSI3	0,015	0,032	0,048	0,104
VEI2	0,014	0,033	0,045	0,105
VEI3	0,014	0,033	0,045	0,103

#### 4.7. Eficiència energètica en el procés de filtració

Existeixen certs aspectes o punts claus en el funcionament del filtre, els quals estan relacionats amb termes d'eficiència energètica i són de vital importància alhora de seguir investigant.

Un d'ells és que a mesura que s'augmenta el cabal circulant del circuit augmenta la pèrdua de càrrega localitzada en la crepina i disminueix la de la interfície de l'aigua amb el medi. Aquest comportament es pot observar en les figures 4.5. a 4.8. on s'hi representen els percentatges de pèrdua de càrrega distribuïts en els diferents trams en funció del cabal.

El comportament indicat implica la necessitat de treballar amb cabals menors per tal que es redueixi la pèrdua de càrrega localitzada en la crepina i es distribueixi en el medi, de manera que aquest també assoleixi un major rendiment. Tot i així també cal treballar en la millora del disseny de crepines. Aquests són aspectes claus alhora de aconseguir majors eficiències en el procés de filtració.

Tinguent en compte els resultats obtinguts s'observa un gran marge de millora en quan a eficiència energètica durant els processos de filtrat.

D'altra banda també es poden associar termes d'eficiència energètica als medis de filtratge. Un medi és més eficient quan per un mateix cabal o velocitat de funcionament la pèrdua de càrrega es menor.

En la figura 4.9. s'observen les corbes resistents que segueixen els diferents medis.

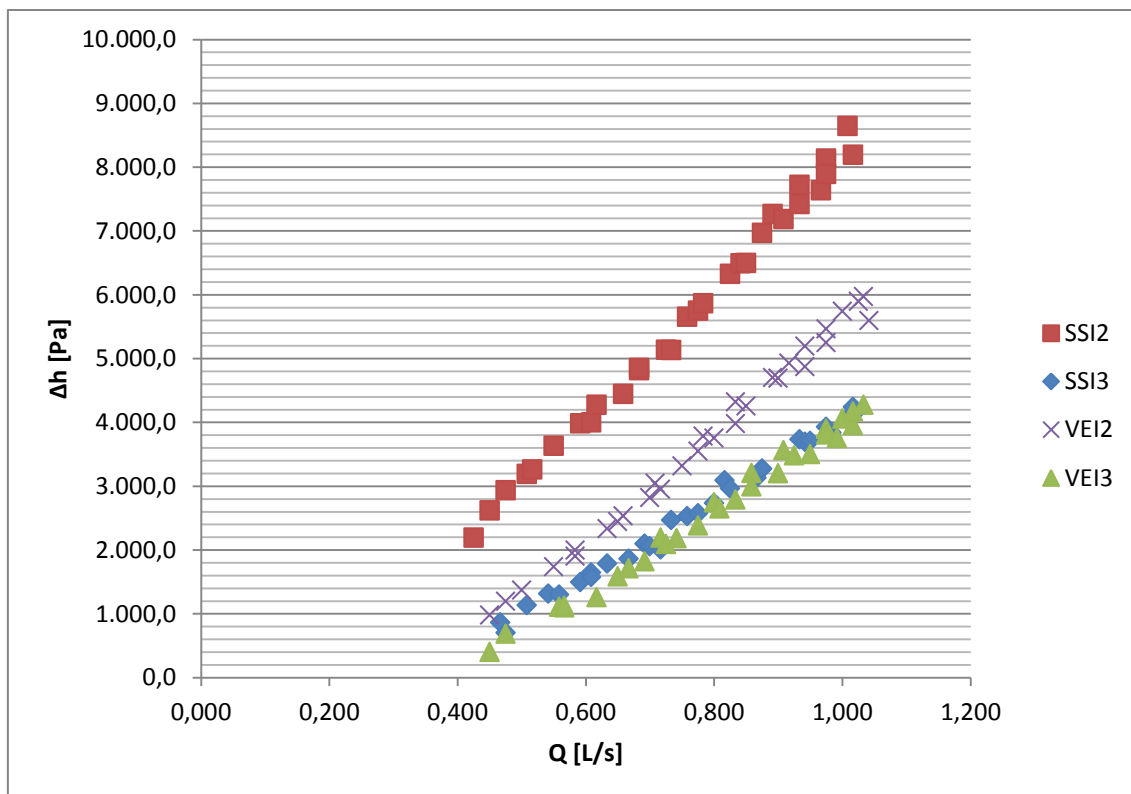


Figura 4.9. Evolució de la pèrdua de càrrega en funció del cabal en els diferents medis.

En intervals granulomètrics baixos (SSI2 i VEI2), s'observa una major eficiència en el vidre ECO filtrant que en la sorra de sílice. Aquest medi s'apropa més a la eficiència de granulometries altes que a la de la sorra més fina, tot i així cal recordar que amb granulometries més fines la qualitat del filtratge és major.

En granulometries més altes (SSI3 i VEI3) no s'aprecia diferència entre les dues matèries. Els resultats mostren similitud en quan a eficiència.

Els comportaments obtinguts es poden relacionar amb el valor de la conductivitat hidràulica del medi, ja que en granulometries petites la diferència entre els valors de  $K$  és major que amb granulometries més grans. Per tant es pot assegurar que la conductivitat hidràulica està directament relacionada amb l'eficiència del medi.

#### 4.7.1. Eficiència dels medis en termes relatius

A partir de les equacions característiques del comportament de cada medi, exposades en la taula 4.11., en resulta la pèrdua de càrrega en funció d'un cabal determinat.

En la taula 4.14. apareixen les pèrdues de càrrega en el medi en funció d'un cabal de 0,9 L/s, comprés entre el rang dels assajats (0,4 – 1,1 L/s).

*Taula 4.14. Pèrdua de càrrega en cada medi corresponent a un cabal de 0,9 L/s.*

Medi	$\Delta h$ tram 2 (Pa)
SSI2	7.140,5
SSI3	3.414,0
VEI2	4.692,2
VEI3	3.303,3

Els resultats mostren que existeix diferència d'eficiències entre medis. Els que presenten una major eficiència són els medis VEI3 i SSI3. Com ja s'ha comentat anteriorment, aquesta ve determinada en funció de la granulometria, tot i així aquesta eficiència sols correspon a termes energètics, cal valorar la qualitat de filtratge entre d'altres per atribuir una eficiència global al medi.

El medi VEI2 presenta valors d'eficiència més propers a fraccions granulomètriques grans. Per tant alhora de treballar amb aigües regenerades podria ser un medi interessant, per una part degut a aquest comportament en termes d'eficiència energètica i per altre part, al tenir granulometria baixa podria tenir una bona qualitat de filtració.

#### 4.7.2. Eficiència dels medis en termes absoluts

El cost de filtració en termes absoluts s'ha calculat en l'àmbit de Catalunya efectuant les següents hipòtesis:

- Dotació bruta anual a Catalunya reg localitzat: 6.500 m<sup>3</sup>/ha i any (Font: Gencat, 2009).
- Superfície regada per reg localitzat: 85.720 ha (Font: Magrama, 2013).
- Temporada de reg: 5 mesos (de maig a setembre).
- Rendiment grup de bombejament: 65 %
- Pressió de treball (H): Alçada manomètrica de la bomba, adoptant com a referent a la pèrdua de càrrega en el medi (tram 2).
- Preu kWh: 0,124107 €/kWh.

A l'Annex 2 es detallen els càlculs de cost en termes absoluts, d'acord amb la metodologia descrita a l'apartat de Material i Mètodes. A la taula 4.15. apareix el cost d'energia consumida durant la filtració, atenent únicament al medi.

Apuntar que es tracta sols d'un supòsit, tot i així aquest serà idèntic en cada cas, de manera que els costos obtinguts seran proporcionals a les pressions de treball obtingudes en l'apartat anterior.

**Taula 4.15. Cost de filtració referent a la energia consumida per a cada medi en el global de sistemes de reg localitzat a Catalunya.**

Medi	Cost temporada de reg ( Maig – Setembre ) [€]
SSI2	213.355
SSI3	102.010
VEI2	140.203
VEI3	98.703

Per tant, l'utilització de granulometries grans (SSI3 i VEI3) suposa més d'un 55 % d'estalvi enfront al medi SSI2 (el de major cost ) i un 30 % d'estalvi front al VEI2. Tot i així cal tenir en compte la qualitat del filtratge, que augmenta en intervals granulomètrics més fins. Conseqüentment, cal seguir estudiant la qualitat del filtratge dels diferents medis proposats per tal d'avaluar l'eficiència global de cadascun. Entre granulometries petites s'aconsegueix una major eficiència energètica en el vidre ECO filtrant, essent un 34 % més eficient que la sorra de sílice per aquesta granulometria.



## 5. Conclusions

A continuació s'indiquen les principals conclusions obtingudes en les condicions en les que s'ha desenvolupat el present treball de fi de gran.

- 1- Els resultats de la caracterització granulomètrica dels quatre medis filtrants mostren una bona uniformitat en la fracció objectiu de cada medi, fet que dona fiabilitat als resultats obtinguts relacionats amb aquest paràmetre.
- 2- Les densitats reals d'ambdós medis són similars, mentre que les densitats aparents presenten diferències. Aquest fet s'explica per la geometria de les partícules, ja que són més fines, apuntades, irregulars i asimètriques en el vidre ECO filtrant.
- 3- La porositat del vidre ECO filtrant és superior a la de la sorra de sílice, estant aquest paràmetre més relacionat amb el material que amb la granulometria.
- 4- La zona del filtre compresa entre l'entrada i la interfície del medi filtrant presenta anomalies hidràuliques que fan que s'invalidin els resultats registrats en aquest tram.
- 5- L'anàlisi de la pèrdua de càrrega en el filtre per trams i cabals circulants entre 0,4 i 1,1 L/s mostra que el tram que comprèn la crepina s'hi produeix d'entre el 55 i 75 % i el 70 i 80 % per granulometria entre 0,63 – 0,75 i 0,75 – 0,84 mm respectivament.
- 6- El resultat de l'apartat anterior mostra la importància que té el disseny de la crepina sobre la pèrdua de càrrega total del filtre.
- 7- La distribució percentual de la pèrdua de càrrega per trams varia en funció del cabal. A l'augmentar el cabal disminueix el percentatge corresponent a la pèrdua de càrrega en la interfície del medi, es manté constant en la capa interior del medi i augmenta en la crepina.
- 8- El tram interior de medi, comprès entre la interfície del medi i la crepina és el més adequat per el càlcul de la conductivitat hidràulica, ja que no està influenciat pels elements auxiliars.
- 9- La conductivitat hidràulica saturada està més influenciada per la granulometria del medi que per el material.
- 10- L'ajustatge de la pèrdua de càrrega en funció del cabal mitjançant una equació polinòmica de segon grau dona coeficients de determinació elevats.
- 11- En termes d'eficiència energètica, no s'observen diferències entre materials filtrants en la granulometria compresa entre 0,75 – 0,84 mm, no obstant s'aconsegueix una

major eficiència energètica en el vidre ECO filtrant quan es treballa amb la granulometria compresa entre 0,63 i 0,75 mm, essent un 34 % més eficient que la sorra de sílice per aquesta granulometria. Aquest fet implica que quan es necessiti un major rendiment en la retenció de partícules fines, el vidre és la opció més adequada.

## 6. Bibliografia

**Arbat, G.; Pujol, T.; Puig-Bargués, J.; Duran-Ros, M.; Barragán, J.; Montoro, L. i Ramírez de Cartagena, F.** 2011. *Análisis del comportamiento hidrodinámico de las crepines en un filtro de arena*. Universitat de Girona, Girona.

**Bucks, D. A.; Nakayama, F. S. i Gilbert, R. G.** 1979. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. *Agricultural Water Management*, 2, 149-162.

**Burt, C.; Styles S.** 2007. Drip and microirrigation design and management for trees, vines, and field crops. 3<sup>a</sup>. Ed. Bioresource and agricultural engineering (BRAE).

**Burt, C.M.** 2010. Hydraulics of commercial sand media filter tanks used for agricultural drip irrigation, IRTC Report N° R 10-001, San Luis Obispo (USA).

**Duran-Ros, M.** 2008. Filtración y uniformidad de riego en los sistemas de microirrigación con efluentes de estaciones depuradoras de aguas residuales. ETSEA, Universitat de Lleida.

**Duran-Ros, M.; Arbat, G.; Puig-Bargués, J.; Barragán, J.; Montoro, L. i Ramírez de Cartagena, F.** 2010. *Assessment of head loss equations developed with dimensional analysis for micro irrigation filters using effluents*, *Biosystems Engineering*: 106, 521-526.

**Elbana, M. A.** 2011. Comparison between surface and subsurface drip irrigation systems using effluents. Ph. D. Dissertation. ETSEA, Universitat de Lleida.

**Freeze, R.A., Cherry, J.A.** 1979. Groundwater. Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.J.

**Fuentes Yagüe, J. L.** 2003. Técnicas de riego. 4<sup>a</sup>. Ed. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: Ediciones Mundi-Prensa, cop.

**GENCAT.** 2009. *Regadiu a Catalunya, Generalitat de Catalunya, Departament estadístiques*, [http://www20.gencat.cat/docs/DAR/DE\\_Departament/DE02\\_Estadistiques\\_observatoris/21%20Aigua/Fitxers%20estatics/2009\\_07\\_RegadiuCatalunya.pdf](http://www20.gencat.cat/docs/DAR/DE_Departament/DE02_Estadistiques_observatoris/21%20Aigua/Fitxers%20estatics/2009_07_RegadiuCatalunya.pdf) [consulta 01/06/2014].

**Haman, D. Z.; Smajstrla, A. G. i Zazueta, F. S.** 1994. Media filters for trickle irrigation in Florida. Agricultural Engineering. Fact Sheet AE-57. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Gainesville.

**Keller, J. i Bliesner, R. D.** 1990. Sprinkle and trickle irrigation. VanNostrand Reinhold, New York.

**MAGRAMA.** 2012. Superfície y rendimientos de cultivos. Informe sobre regadios en España. [http://www20.gencat.cat/docs/DAR/DE\\_Departament/DE02\\_Estadistiques\\_observatoris/21%20Aigua/Fitxers%20estatics/Estudio\\_Regadios\\_2012\\_ESYRCE.pdf](http://www20.gencat.cat/docs/DAR/DE_Departament/DE02_Estadistiques_observatoris/21%20Aigua/Fitxers%20estatics/Estudio_Regadios_2012_ESYRCE.pdf) [consulta 14/05/2014]

**MAGRAMA.** 2013. Superfície y rendimientos de cultivos. Informe sobre regadios en España. Accessible a: [http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/Regadios2013fA\\_tcm7-311944.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/Regadios2013fA_tcm7-311944.pdf) [consulta 14/05/2014]

**Pitts, D. J.; Haman, D. Z. i Smajstrla, A. G.** 1993. Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems. Bulletin 258. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida. Gainesville, Florida.

**Pizarro, F.** 1987. Riegos localizados de alta frecuencia. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.

**Puig-Bargués, J.** 2003. *Utilización de aguas residuales en sistemas de riego localizado: Embozamiento y filtración. Tesis doctoral. UdL.*

**Rodrigo, J.; Hernández, J. M.; Pérez, A. i González, J.F.** 1997. Riego Localizado. Ediciones Mundi-Prensa y MAPA-IRYDA, Madrid.

**Sánchez, F.J.** 2013. Ley Darcy. Accessible a: [http://hidrologia.usal.es/temas/Ley\\_Darcy.pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Ley_Darcy.pdf) [consulta 29/05/2014].