

POLITECNICO DI TORINO

---



Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di Laurea Magistrale

# Flussi pulsati come strumento fluidodinamico per minimizzare l'intasamento delle membrane

Esperimenti di filtrazione e di ricerca sperimentale

**Relatore**  
Prof. Costantino Manes

**Correlatore:**  
Ing. Roberto Bert

**Laureando**  
Marco Andres Falotico

---

Marzo 2022



Alla mia famiglia, per aver sempre creduto in me.  
A me stesso, per aver raggiunto questo sogno.

Fai della tua vita un sogno, e di un sogno, una realtà.  
*Antoine de Saint-Exupéry*



# Ringraziamenti

Vorrei dedicare questo breve spazio a chi ha contribuito al raggiungimento di questo mio grande obiettivo. Alla mia famiglia. Cari mamma e papà: non so da dove cominciare a ringraziarvi. Avete sempre creduto in me, sapevate che ce l'avrei fatta. Grazie per avermi dato tanto in questo capitolo della mia vita. A mia sorella, per esserci stata quando ce n'è stato più bisogno. Alle mie due splendide cuginette, spero che vi sia d'ispirazione un giorno. Ai miei nonni, ai miei zii, a chi non c'è più. A tutti voi va il mio ringraziamento più grande. Alla mia seconda famiglia: i miei amici. Sono sicuro di poter sempre contare su di voi, compagni di avventure incredibili e protagonisti di ricordi che terrò sempre nel cuore. Grazie a voi ho vissuto con più serenità certi momenti di difficoltà, imparando a sfogarmi e a confidarmi. Non riuscirò a citarvi tutti, ma ognuno di voi sa quanto vi voglio bene. Un grazie a chi chi c'è sempre stato e a chi da poco è entrato a far parte della mia vita. Al mio relatore Costantino Manes, per essersi rivelata una bellissima persona ancor prima che un mio professore. Al mio correlatore Roberto Bert, per avermi aiutato in ogni occasione, per la guida e i tanti consigli che ha potuto offrirmi. Di questo lavoro ne vado veramente fiero. A tutti quelli che non ho citato. Vi voglio bene.

# Sommario

Nel presente lavoro di tesi si è studiato sperimentalmente il *membrane clogging* (o intasamento delle membrane) in un circuito idraulico situato presso il Laboratorio di Idraulica "Giorgio Bidone" del Politecnico di Torino, prima a moti stazionari e poi con flussi pulsati, per verificare il raggiungimento di risultati benefici sulla superficie delle membrane con variazioni di frequenza e ampiezza. Seppur con qualche risultato ancora da chiarire i risultati sono confortanti. L'elaborato è così strutturato:

- nel capitolo 1 si introduce il lavoro e si espongono gli obiettivi prefissati;
- nel capitolo 2 si descrivono le componenti che costituiscono il circuito idraulico col quale sono state realizzate le prove, lo schema e le procedure di *set up* per un'installazione ottimale in ogni sua fase;
- nel capitolo 3 segue una descrizione più dettagliata sulle membrane e i processi di filtrazione a membrana;
- il capitolo 4 delinea nel dettaglio le operazioni preliminari e lo svolgimento delle prove, sia quelle a flusso stazionario che a flusso pulsato;
- il capitolo 5 conclude la tesi mettendo a confronto i risultati ottenuti.

# Indice

<b>Elenco delle figure</b>	X
<b>Elenco delle tabelle</b>	XIII
<b>1 Introduzione e scopo del lavoro</b>	1
<b>2 Il circuito idraulico</b>	3
2.1 Schema e descrizione generale . . . . .	3
2.1.1 Il serbatoio d'acqua . . . . .	6
2.1.2 La <i>test section</i> . . . . .	7
2.1.3 Il motore elettrico . . . . .	9
2.1.4 La fotocamera, i sensori e i misuratori . . . . .	12
2.1.5 Il sistema di pompaggio . . . . .	15
2.1.6 Le valvole a sfera, di regolazione e di sfiato . . . . .	17
2.1.7 Le schede di acquisizione dati . . . . .	19
2.2 <i>Set up</i> dell'impianto sperimentale . . . . .	21
2.2.1 Inserimento della membrana . . . . .	21
2.2.2 Fissaggio all'impianto . . . . .	21
2.2.3 Le condizioni idrauliche di progetto . . . . .	22
2.2.4 Ricerca delle condizioni ottimali in flussi pulsati del set up sperimentale . . . . .	27
2.3 Le membrane utilizzate . . . . .	31
<b>3 Le membrane e i processi di filtrazione</b>	32
3.1 Generalità . . . . .	32
3.2 Tipi di membrane . . . . .	34
3.3 Filtrazione a membrana . . . . .	36

<b>4 Prove a flusso stazionario e pulsato</b>	<b>39</b>
4.1 Operazioni preliminari . . . . .	39
4.2 Svolgimento delle prove . . . . .	43
4.3 Prove a flusso stazionario . . . . .	46
4.3.1 Descrizione delle prove . . . . .	46
4.4 Prove a flusso pulsato . . . . .	54
4.4.1 Descrizione delle prove . . . . .	54
<b>5 Conclusioni</b>	<b>68</b>
<b>A Appendice</b>	<b>69</b>
<b>Riferimenti bibliografici</b>	<b>76</b>

# Elenco delle figure

2.1	Proiezione ortogonale generale dell'impianto . . . . .	4
2.2	Prospetto laterale generale dell'impianto dal lato est . . . . .	4
2.3	Vista assonometrica generale dell'impianto . . . . .	5
2.4	Vista assonometrica del cassone dal lato sud-est . . . . .	6
2.5	Fotografia della test section montata sull'impianto . . . . .	7
2.6	Prospetto frontale della test section . . . . .	8
2.7	Motore elettrico Rossato . . . . .	9
2.8	Riduttori Bonfiglioli serie VF-W a vite senza fine, immagine tratta da <a href="http://www.bonfiglioli.com">www.bonfiglioli.com</a> . . . . .	10
2.9	Fotografia del pistone . . . . .	11
2.10	Sezione sull'asse longitudinale del pistone . . . . .	11
2.11	Posizionamento del sensore di pressione sulla test section . . . . .	13
2.12	Fotografia dei sensori di pressione P-30 e P-31. Con attacco al processo affacciato (dx), con attacco al processo con canale di pressione (sx). Immagini tratte da <a href="http://www.wika.it">www.wika.it</a> . . . . .	13
2.13	Funzionamento di un misuratore di portata a ultrasuoni (sx) e misuratore di portata a ultrasuoni AquaTrans AT600, immagini tratte rispettivamente da <a href="http://www.omega.com">www.omega.com</a> e da <a href="http://www.epsas.it">www.epsas.it</a> . . . . .	15
2.14	Localizzazione delle pompe P1 e P2 in proiezione ortogonale . . . . .	16
2.15	Valvola a sfera WAFER della ditta MIVAL, immagine tratta da <a href="http://www.mival.it">www.mival.it</a> . . . . .	17
2.16	Parti costituenti una classica valvola di regolazione a due vie, immagine tratta da <a href="http://www.asvstubbe.it">www.asvstubbe.it</a> . . . . .	18
2.17	Valvola di sfogo dell'aria VA DN 15-50, tratta da <a href="http://www.aliasaxis.it">www.aliasaxis.it</a> . . . . .	19
2.18	Chassis NI cDAQ - 9174, immagine tratta da <a href="http://www.artisanng.com">www.artisanng.com</a> . . . . .	19

2.19	A sinistra il modulo di acquisizione NI 9203, al centro il modulo NI 9361 e a destra la scheda NI 9401, tratte da <a href="http://www.artisan-tg.com">www.artisan-tg.com</a> . . .	20
2.20	Montaggio dei cerchiaggi sulla test section . . . . .	22
2.21	Distanza esterna del pistone inserito nella tubazione dell'impianto .	27
2.22	Segnale di pressione ad ampiezze simmetriche - Prova di benchmark a 0.09Hz e distanza esterna del pistone di 13.3cm . . . . .	28
2.23	Segnale di pressione ad ampiezze non simmetriche - Prova di benchmark a 0.09Hz e distanza esterna del pistone di 14.7cm . . . . .	28
2.24	Andamento quasi-sinusoidale del segnale di velocità - Prova di benchmark alla frequenza di 1Hz e alla distanza esterna del pistone di 15.5cm . . . . .	28
2.25	Andamento non sinusoidale del segnale di velocità - Prova di benchmark alla frequenza di 1.27Hz e alla distanza esterna del pistone di 15.5cm . . . . .	29
2.26	Estratto di segnale di pressione ad ampiezze simmetriche ad alta ampiezza - Prova 10 a 0.09 Hz . . . . .	30
2.27	Estratto di segnale di pressione a bassa ampiezza - Prova 6 a 0.09 Hz	30
2.28	Membrana LY (PES 100,000Da), tratta da <a href="http://www.synderfiltration.com">www.synderfiltration.com</a>	31
3.1	Impianto di demineralizzazione per la produzione di acqua potabile (sx), impianto di dealcolizzazione per la produzione di birra (dx). Immagini tratte rispettivamente da <a href="http://www.membrane.it">www.membrane.it</a> e da <a href="http://www.gea.com">www.gea.com</a> . . . . .	33
3.2	Ossigenatore extracorporeo, immagine tratta da <a href="http://www.medicaexpo.it">www.medicaexpo.it</a>	33
3.3	Diagrammi schematici di membrane isotrope (sx) e anisotrope (dx). Immagini tratte da R.W. Baker. "Membrane Technology and Applications." Wiley, 2004. . . . .	35
3.4	Processo a membrana in cross-flow (sx) e "dead-end" (dx), immagini tratte da <a href="http://www.wikipedia.org">www.wikipedia.org</a> . . . . .	37
4.1	Sostanze additive miscelate all'acqua nel serbatoio . . . . .	40
4.2	Diagrammi triangolari per la definizione della tessitura dei suoli [4]	41
4.3	Controls Palette di LabVIEW . . . . .	43
4.4	Alcune delle fasi di svolgimento delle prove . . . . .	45
4.5	Curve cumulate a flusso stazionario . . . . .	47
4.6	Filtrato assoluto a flusso stazionario . . . . .	49

4.7	Filtrato normalizzato a flusso stazionario . . . . .	51
4.8	Suddivisione delle regioni della test section. . . . .	52
4.9	Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana nelle zone di monte, centro e valle della membrana - Prova 4 a 1.5bar a flusso stazionario . . . . .	53
4.10	Curve cumulate a flusso pulsato - Test 1 a 0.09Hz . . . . .	55
4.11	Curve di filtrato normalizzato e assoluto a flusso pulsato - Test 1 a 0.09Hz . . . . .	56
4.12	Curve cumulate a flusso pulsato - Test 2 a 0.46Hz . . . . .	59
4.13	Curve di filtrato normalizzato e assoluto a flusso pulsato - Test 2 a 0.46Hz . . . . .	60
4.14	Curve cumulate a flusso pulsato - Test 3 a 1.27Hz . . . . .	62
4.15	Curve di filtrato normalizzato e assoluto a flusso pulsato - Test 3 a 1.27Hz . . . . .	63
4.16	Curve cumulate a flusso pulsato - Test 4 a 2.25Hz . . . . .	65
4.17	Curve di filtrato normalizzato e assoluto a flusso pulsato - Test 4 a 2.25Hz . . . . .	66
A.1	Analisi qualitativa di ingiallimento della membrana a flusso stazionario	69
A.2	Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso stazionario . . . . .	70
A.3	Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso stazionario . . . . .	70
A.4	Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso stazionario . . . . .	71
A.5	Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso stazionario . . . . .	71
A.6	Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato	72
A.7	Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato	72
A.8	Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato	73
A.9	Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato	73
A.10	Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato	74
A.11	Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato	74
A.12	Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato	75
A.13	Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato	75

# Elenco delle tabelle

2.1	Geometria del corpo centrale della test section e delle due flange laterali . . . . .	7
2.2	Geometria della pietra porosa . . . . .	8
2.3	Valori di frequenza e di riduzione dei giri del motore elettrico . . . .	10
2.4	Differenze tra le caratteristiche tecniche della pompa n.1 (P1) e la pompa n.2 (P2). Fonte: schede tecniche Lowara . . . . .	16
2.5	Condizioni idrauliche di progetto . . . . .	25
2.6	Caratteristiche tecniche delle membrane Synder LY (PES 100,000Da), Sanitary UF Membrane . . . . .	31
3.1	Ranges dei processi di separazione a membrana . . . . .	37
4.1	Prove eseguite a flusso stazionario . . . . .	40
4.2	Prove eseguite a flusso pulsato . . . . .	42
4.3	Volume totale cumulato di acqua delle prove a flusso stazionario . .	47
4.4	Relazione mAh-litri, per ciascuna vaschetta di raccolta . . . . .	48
4.5	Portata e tempi di svuotamento, per ciascuna vaschetta di raccolta	48
4.6	Valori iniziali e finali di permeato assoluto - prove a flusso stazionario	50
4.7	Valori finali di permeato normalizzato e riduzione della capacità filtrante della membrana LY - prove a flusso stazionario . . . . .	51
4.8	Valori finali di ingiallimento della membrana . . . . .	53
4.9	Volume totale cumulato di acqua - Test 1 a 0.09Hz . . . . .	56
4.10	Valori di filtrato assoluto, normalizzato e di effetto del flusso pulsato rispetto alla Prova 4 a flusso stazionario - Test 1 a 0.09Hz . . . . .	57
4.11	Valori finali di ingiallimento della membrana - Test 1 a 0.09Hz . . .	58
4.12	Volume totale cumulato di acqua - Test 2 a 0.46Hz . . . . .	59

4.13	Valori di filtrato assoluto, normalizzato e di effetto del flusso pulsato rispetto alla Prova 4 a flusso stazionario - Test 2 a 0.46Hz . . . . .	60
4.14	Valori finali di ingiallimento della membrana - Test 2 a 0.46Hz . . . . .	61
4.15	Volume totale cumulato di acqua - Test 3 a 1.27Hz . . . . .	62
4.16	Valori di filtrato assoluto, normalizzato e di effetto del flusso pulsato rispetto alla Prova 4 a flusso stazionario - Test 3 a 1.27Hz . . . . .	63
4.17	Valori finali di ingiallimento della membrana - Test 3 a 1.27Hz . . . . .	64
4.18	Volume totale cumulato di acqua - Test 4 a 2.25Hz . . . . .	65
4.19	Valori di filtrato assoluto, normalizzato e di effetto del flusso pulsato rispetto alla Prova 4 a flusso stazionario - Test 4 a 2.25Hz . . . . .	66
4.20	Valori finali di ingiallimento della membrana - Test 4 a 2.25Hz . . . . .	67

# Capitolo 1

## Introduzione e scopo del lavoro

I sistemi di filtrazione a membrana sono utilizzati in molti settori dell'industria con un'ampia gamma di applicazioni e, sebbene rispetto ad altre tecnologie di separazione richiedano relativamente poca manutenzione, la loro natura è molto soggetta a intasamento o *clogging*. Le possibilità di utilizzo dei filtri a membrana sono dunque ancora limitate non solo dai costi di installazione e manutenzione, ma anche da alcune problematiche inerenti la gestione del sistema stesso, soprattutto quando è necessario trattare grandi quantità di acqua. Un principale problema è il fenomeno del *fouling*, con cui ci si riferisce all'accumulo di materiali indesiderati su superfici solide, che spesso si verifica in ambienti acquosi con accumulo di residui o depositi. Il fenomeno si manifesta con una diminuzione irreversibile del flusso dovuta all'accumulo di particelle, di dimensioni nell'ordine del micron, sulla superficie della membrana e con la precipitazione di soluti tra la superficie e la membrana stessa. Infatti, la contaminazione della membrana (e la sua sostituzione) può incidere notevolmente sul costo del sistema e ridurre l'affidabilità. In base al grado di filtrazione gli impianti che ne beneficiano sono di varie tipologie: microfiltrazione, ultrafiltrazione, nanofiltrazione ed osmosi inversa. Si può concludere pertanto che comprendere le condizioni al contorno del sistema di filtrazione è la base per determinare il dimensionamento del filtro a membrana e qualsiasi lavoro di pretrattamento.

Esistono diverse tecnologie e metodi di prevenzione, che possono variare a seconda del sistema impiegato, oppure dei tipi di contaminanti coinvolti. L'intasamento

può essere evitato mediante pulizie meccaniche, che sfruttano forze fisiche come vibrazioni o lavaggi controcorrente per rimuovere i contaminanti dalla superficie della membrana, oppure pulizie chimiche che consentono la rimozione mediante l'applicazione di detergenti, acidi, antincrostanti, caustici o disperdenti.

Gli obiettivi del seguente lavoro di tesi sono:

- disporre in maniera ottimale il set up sperimentale per imporre i flussi pulsati all'interno di una sezione di test contenente la membrana;
- determinare l'influenza della pressione, sul clogging delle membrane, in flussi stazionari;
- verificare l'efficacia di un flusso pulsato, sul clogging delle membrane, variandone la frequenza e l'ampiezza.

## Capitolo 2

# Il circuito idraulico

Il circuito idraulico è un'opera complessa costituita da tubazioni e macchinari che consentono il flusso di acqua in pressione, le cui condizioni fisiche sono gestite da un PC per mezzo di strumentazioni di controllo e di pompaggio.

### 2.1 Schema e descrizione generale

L'impianto è rappresentato mediante un sistema di riferimento nord-sud-ovest-est in Figura 2.1, dove viene raffigurata la proiezione ortogonale per mezzo della quale verranno indicati i prospetti, le proiezioni e i riferimenti a componenti del sistema. In questa figura si può osservare come l'impianto segua una direzione longitudinale lineare in direzione nord-sud. Infatti è possibile distinguere il serbatoio d'acqua a forma cubica (1), il motore elettrico che genera il flusso pulsato (2), la test section (3) e la tubazione circolare di mandata (4). Per riuscire a identificare gli elementi situati su un piano orizzontale inferiore è riportata di seguito la Figura 2.2, che rappresenta il prospetto laterale est del circuito.

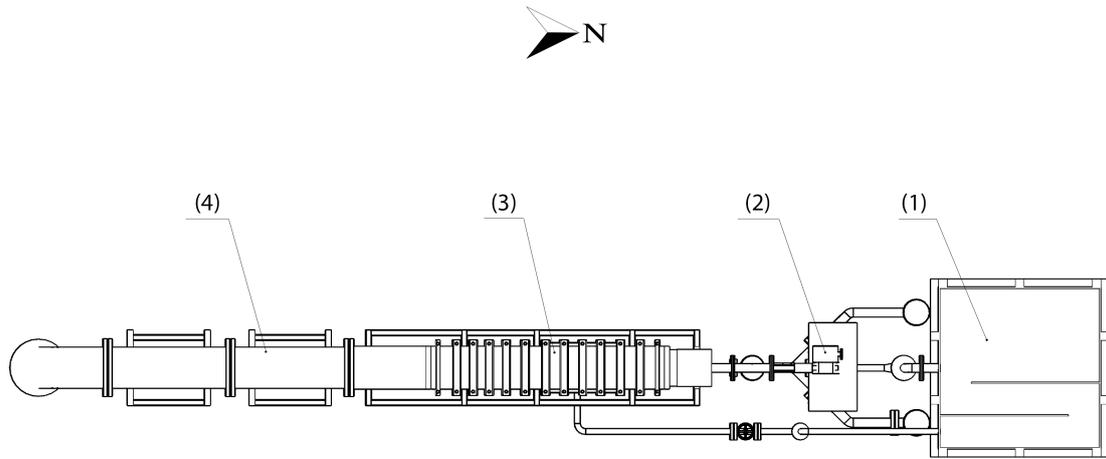


Figura 2.1: Proiezione ortogonale generale dell'impianto

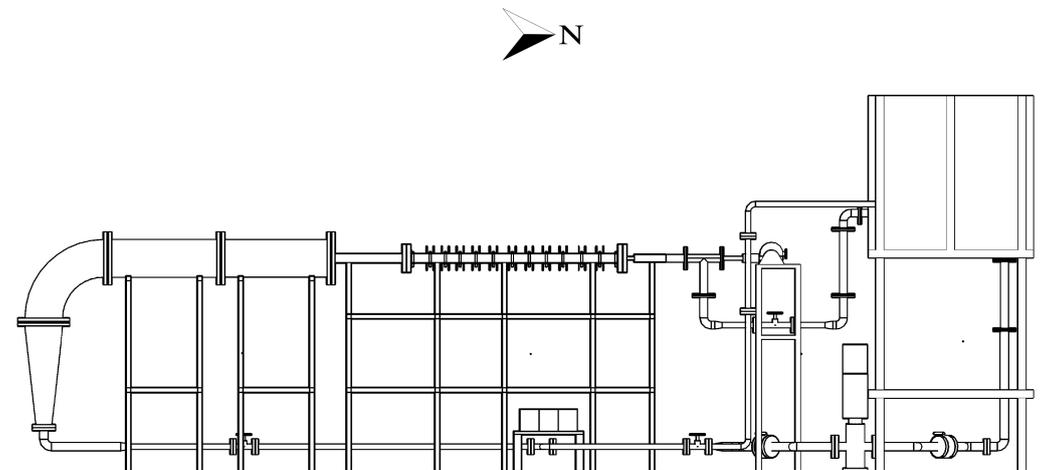


Figura 2.2: Prospetto laterale generale dell'impianto dal lato est

In Figura 2.3 è rappresentata una proiezione assonometrica dell'impianto, orientato in direzione nord-nordovest - sud-sudest, che permette di apprezzare la profondità. Possono distinguersi le due diramazioni di tubi (2) con cui poter scegliere se usare la pompa più piccola da 0.75kW (3a) o la pompa più grande da 4kW (3b). L'acqua viene mandata per gravità alla base dell'impianto da una tubazione verticale (1) che la devia in due canali differenti (2) a seconda della pompa scelta. Successivamente, l'azione della pompa trasmette l'acqua al divergente cilindrico a estrusione semi conica (6) posto a sud, per mezzo della lunga tubazione longitudinale di diametro più piccolo (5) situata a pochi centimetri dal suolo, fino a tutto il resto dell'impianto. Sotto la test section e gli elementi metallici che sorreggono la struttura, vi sono tre vaschette di raccolta (4) dell'acqua filtrata di monte, di centro e di valle, in cui l'acqua permeata dalla membrana giunge tramite piccoli tubicini in PVC flessibili situati alla base della test section.

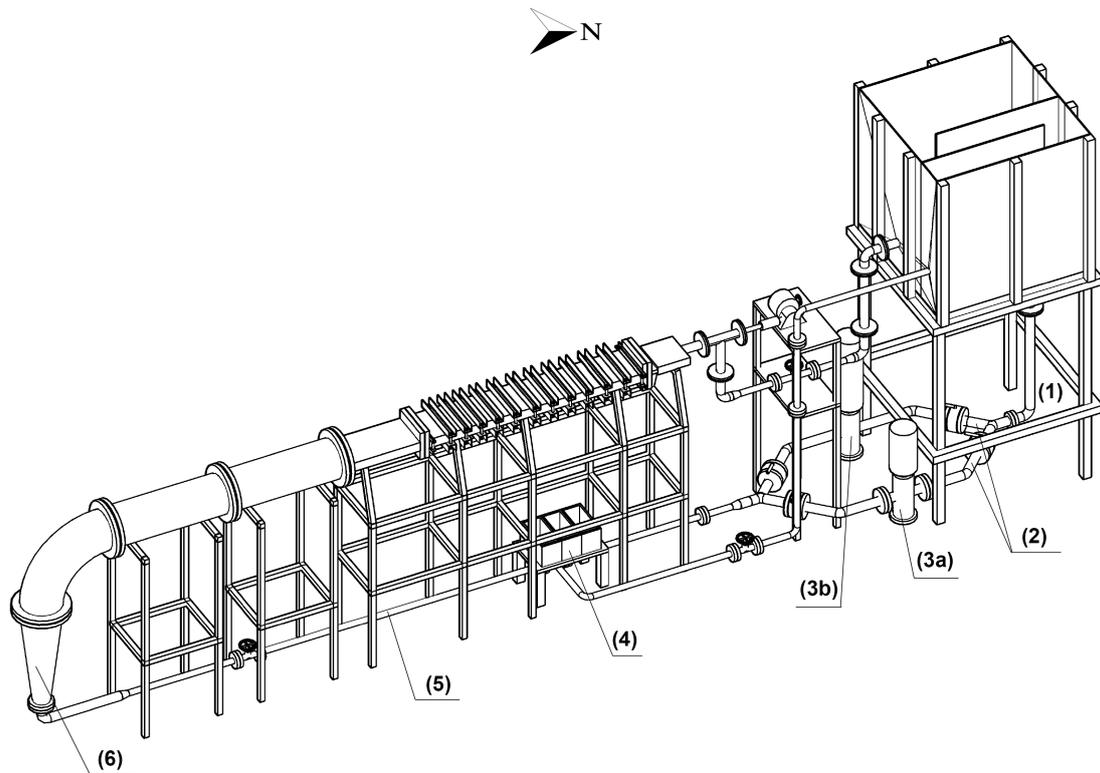


Figura 2.3: Vista assonometrica generale dell'impianto

### 2.1.1 Il serbatoio d'acqua

Il primo elemento che viene descritto, che ha il ruolo di conservazione e di ricircolo dell'acqua nel sistema, è costituito da un cassone metallico del volume di  $1m^3$  che contiene  $0.42m^3$  di acqua durante lo svolgimento delle suddette prove sperimentali (Figura 2.4). L'interno del serbatoio è suddiviso in due parti: una zona più grande (1) in cui sono presenti due ventole elettriche sulla base e una zona di transizione costituita da due lastre metalliche più ravvicinate che creano un percorso obbligato per l'acqua a forma di "S" (2), per far sì che diminuiscano la velocità e la turbolenza quando il fluido fa il suo ingresso a ciclo completato. Le ventole elettriche poste sul fondo del cassone sono alimentate costantemente durante le prove, e hanno la funzione di miscelare in maniera più omogenea con l'acqua le polveri d'argilla e caolino, che sono le sostanze scelte per misurare l'effetto di clogging, nel tempo, sulla superficie della membrana.

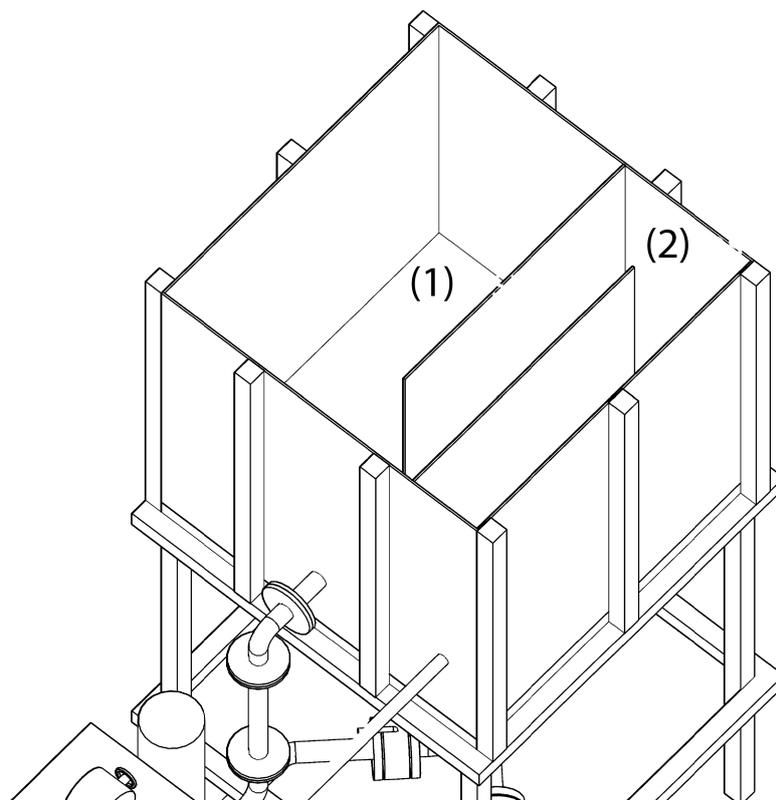


Figura 2.4: Vista assonometrica del cassone dal lato sud-est

### 2.1.2 La test section

Il luogo in cui è riposta la membrana soggetto dei fenomeni di filtrazione sperimentati è un pezzo unico composto in plexiglass, costituito da un pezzo a sezione rettangolare e da due flange di congiunzione con il resto dell'impianto. Le dimensioni dell'oggetto sono riportate nella Tabella 2.1 e in Figura 4.8 è possibile vedere una fotografia del sistema correttamente installato nell'impianto.

Tabella 2.1: Geometria del corpo centrale della test section e delle due flange laterali

	Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Altezza [m]	Pendenza [%]
Corpo centrale	1.20	0.26	0.06	1
Flange	0.02	0.36	0.19	0



Figura 2.5: Fotografia della test section montata sull'impianto

Il corpo centrale della test section è costituito da un parallelepipedo in plexiglass a base rettangolare, suddiviso in due pezzi identici e speculari con asse di simmetria orizzontale parallelo al terreno. In Figura 2.6 è visibile il prospetto frontale dal quale di possono notare tale simmetria, la zona d'ingresso centrale del fluido e la superficie della flangia.

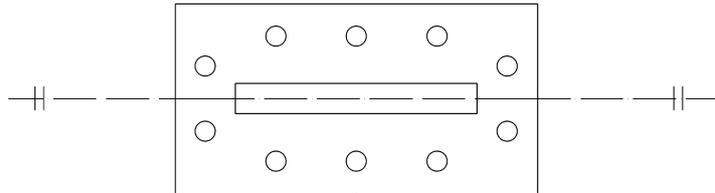


Figura 2.6: Prospetto frontale della test section

All'interno della test section sono presenti la membrana e la pietra porosa, dalle quali filtra l'acqua miscelata ad argilla e caolino, che circola a pressione costante durante le prove.

La pietra porosa è l'oggetto su cui poggia la membrana, realizzata in inox sinterizzato con porosità costante di  $10^{-6}m$  e con dimensioni visibili in Tabella 2.2. Queste caratteristiche permettono che non si verifichino concentrazioni diverse di clogging in punti differenti della pietra porosa, se non per l'effettivo intasamento sulla membrana.

Tabella 2.2: Geometria della pietra porosa

Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Altezza [m]	Pendenza [m]
1.20	0.20	$3.178 * 10^{-3}$	0

A rendere la test section ermetica rispetto a eventuali perdite d'acqua verso l'esterno, dovute alla spinta che la stessa esercita sulle pareti interne quando si trova in moto a pressione costante, vi sono 24 fori filettati (12 per lato) che attraversano

l'intero spessore dei due lati maggiori del corpo centrale della test section, consentendo una chiusura costante lungo il perimetro inferiore e superiore per mezzo di bulloni metallici.

### 2.1.3 Il motore elettrico

Il motore elettrico installato nel sistema idraulico è della ditta Rossato, la cui fotografia è visibile in Figura 2.7.

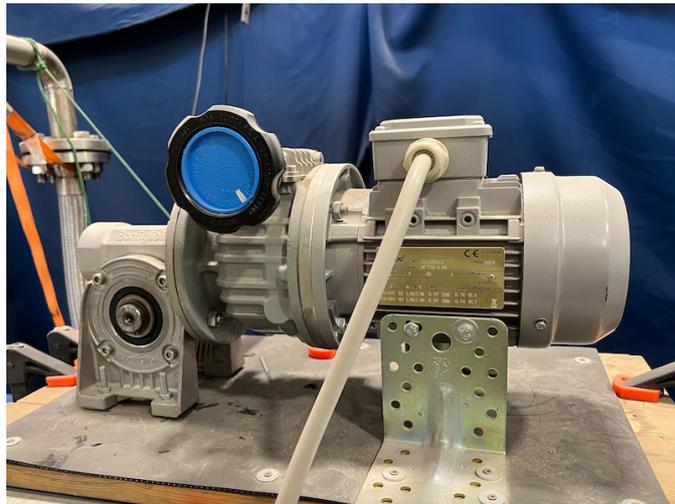


Figura 2.7: Motore elettrico Rossato

A questo tipo di motore sono stati accoppiati due riduttori di frequenza, installati singolarmente in base al valore di frequenza da utilizzare. Si tratta di riduttori Bonfiglioli MVF a 1/36 e a 1/7, facenti parte della serie VF-W visibili in Figura 2.8.



Figura 2.8: Riduttori Bonfiglioli serie VF-W a vite senza fine, immagine tratta da [www.bonfiglioli.com](http://www.bonfiglioli.com)

Le frequenze scelte per effettuare le prove di filtrazione, relative al numero di giri da far variare dopo aver eseguito vari test di benchmark preliminari, sono riportate in Tabella 2.3.

Tabella 2.3: Valori di frequenza e di riduzione dei giri del motore elettrico

	Frequenza [Hz]	Variatore [giri]
Rid. 1/36	0.09	20
	0.46	0
Rid. 1/7	1.27	10
	2.25	1

Fissato il riduttore al motore elettrico, la parte mobile che li collega al resto dell'impianto è il pistone. Un pistone (Figura 2.9) in idraulica è definito come: «la parte mobile di un organo idraulico o pneumatico, governata attraverso un fluido [12]» e, in questo impianto, compie un moto rotante continuo alla frequenza imposta dalla combinazione tra il motore elettrico e il riduttore.



Figura 2.9: Fotografia del pistone

Lo stelo è costituito da un unico corpo rigido progettato su misura, composto da un cilindro pieno in acciaio inox 304 a base circolare e da un secondo cilindro concentrico situato ad una estremità, anch'esso a base cilindrica, di raggio maggiore e tagliato a 45°. Il corpo è rettificato all'esterno e le dimensioni sono riportate in Figura 2.10.

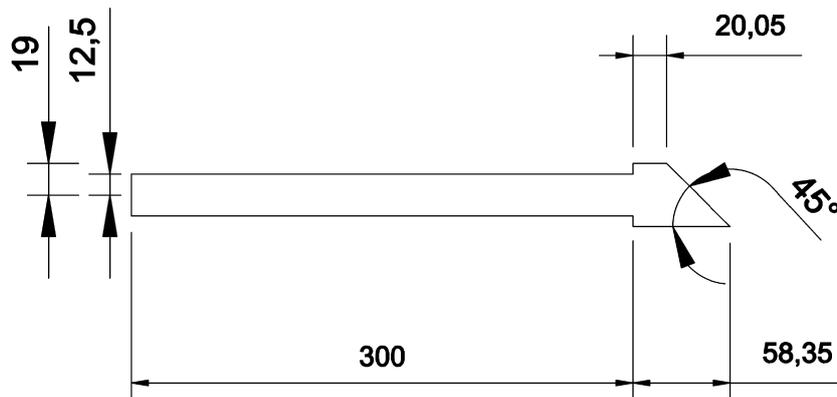


Figura 2.10: Sezione sull'asse longitudinale del pistone

## 2.1.4 La fotocamera, i sensori e i misuratori

### La fotocamera

Al centro della struttura, posta a 3 metri di altezza dal pavimento, è installata una fotocamera Canon EOS 700D supportata da un'ottica EF-S18-55mm f/3.5-5.6 IS STM in grado di effettuare foto temporizzate a intervalli regolari (timelapse). Per queste prove sperimentali si è concluso che potessero essere adatti 15 minuti di intervallo di tempo di cattura delle immagini. L'ambiente di acquisizione è completamente oscurato da teli ed illuminato soltanto da una sorgente a luce continua posta su tutta la direzione longitudinale della test section. L'acquisizione delle fotografie durante l'intero svolgimento delle prove permetterà di valutare, in modo qualitativo, lo sporco della membrana nel tempo, mediante l'ambiente di analisi dati MATLAB.

L'intero processo di acquisizione delle immagini è stato effettuato tramite il software "Canon Digital Photo Professional 4", mentre la correzione del bilanciamento del bianco è stata effettuata in post-produzione con il software "Adobe Lightroom". Si è avuta l'accortezza di acquisire le immagini nel formato RAW poiché questo formato conserva tutte le informazioni grezze e non elaborate dell'immagine fotografata, quindi con il medesimo valore di bilanciamento del bianco per tutte le acquisizioni. In questo modo, impostando la prima foto della serie con il valore di *bianco puro* sulla membrana e sincronizzando tali caratteristiche per tutte le successive foto del timelapse, è possibile visualizzare lo sporco delle membrane che partirà dallo stesso valore di bianco per tutte le prove, rendendole confrontabili.

### Il sensore di pressione

Il sensore di pressione utilizzato nell'impianto è collocato a valle della test section, al centro della superficie superiore prima dell'ultimo cerchiaggio metallico, come visibile in Figura 2.11.

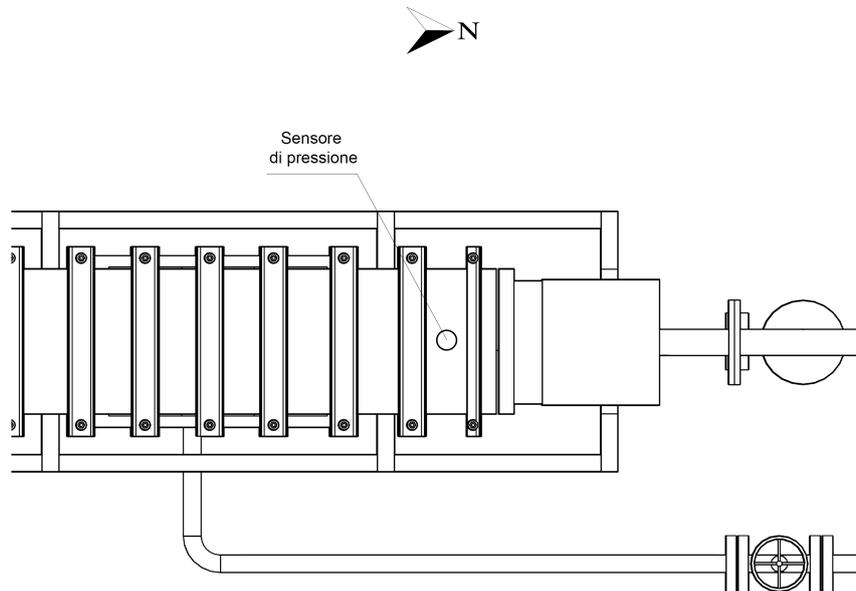


Figura 2.11: Posizionamento del sensore di pressione sulla test section

Il modello del sensore fa parte della categoria P-30 e P-31 dei prodotti dell'azienda WIKA, e tale tipologia è stata sviluppata per misure di precisione con una deviazione di misura massima pari allo 0.05% dello span. Sono sensori veloci, con tasso di misurazione e di uscita fino a 1 kHz, compatti e versatili. In Figura 2.12 è possibile vederne una fotografia.



Figura 2.12: Fotografia dei sensori di pressione P-30 e P-31. Con attacco al processo affacciato (dx), con attacco al processo con canale di pressione (sx). Immagini tratte da [www.wika.it](http://www.wika.it)

## Il misuratore di portata

Il misuratore di portata è uno strumento di misura della portata di un fluido che si basa sulla relazione (2.1):

$$Q = vA \quad (2.1)$$

dove

- $Q$  è la portata in  $m^3/s$ ;
- $v$  è la velocità in  $m/s$ ;
- $A$  è l'area della sezione di flusso in  $m^2$ .

Le caratteristiche del fluido e il tipo di montaggio sono importanti nella scelta del tipo di misuratore di portata da utilizzare, per evitare errori dovuti a un'errata scelta del punto di misura o a condizioni sbagliate, come ad esempio la densità del fluido o la distanza del tratto rettilineo a monte del dispositivo. Il flussometro utilizzato in questo impianto è del tipo ad ultrasuoni ed il suo principio di funzionamento è visibile in Figura 2.13. Viene sfruttato l'effetto della riflessione per cui l'onda sonora, che viene emessa dalla parete verso il centro del tubo e che sarà parzialmente riflessa dalla parete opposta, prenderà un percorso diverso verso il sensore in presenza di un fluido in movimento nel tubo. Dalla misura del tempo trascorso tra l'emissione e l'assorbimento dell'onda si può risalire alla velocità del fluido. Il misuratore di portata utilizzato in questo impianto è il modello AquaTrans AT600, visibile in Figura 2.13. Può essere installato per tubi di varie dimensioni e materiali, e può essere impiegato in modo molto semplice grazie agli attacchi del tipo *clamp-on*. Dal display grafico a cristalli liquidi LCD è possibile visionare le regolazioni in modo molto semplice e intuitivo, con precisioni di lettura nell'applicazione nell'ordine del  $\pm 1\%$  e del  $\pm 0.5\%$  nella precisione di calibrazione sul campo.

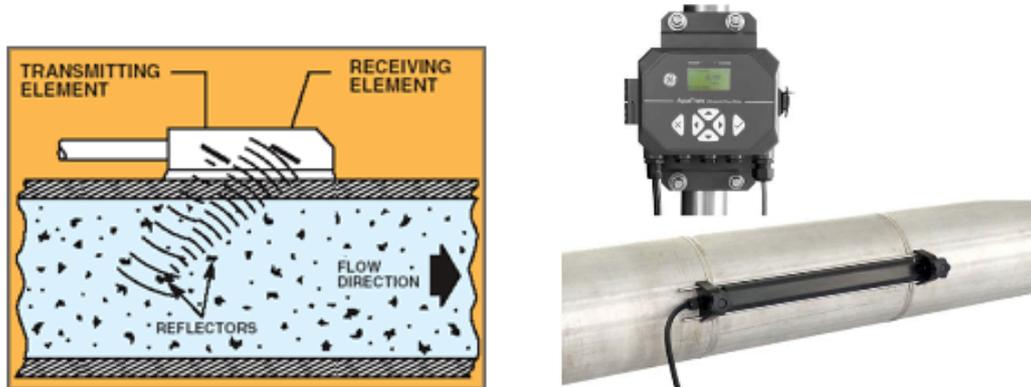


Figura 2.13: Funzionamento di un misuratore di portata a ultrasuoni (sx) e misuratore di portata a ultrasuoni AquaTrans AT600, immagini tratte rispettivamente da [www.omega.com](http://www.omega.com) e da [www.epsas.it](http://www.epsas.it)

### 2.1.5 Il sistema di pompaggio

All'interno dell'impianto sono presenti due sistemi di pompaggio: il primo, che trasmette l'acqua dal serbatoio a tutto il circuito e il secondo, che preleva l'acqua permeata terminata nelle vaschette di raccolta e la riporta nel cassone principale per far ricominciare il ciclo. Del primo sistema, come è visibile in Figura 2.14, vi sono due tipologie di pompe P1 e P2 della ditta Lowara, che differiscono l'una dall'altra per le caratteristiche elencate in Tabella 2.4.

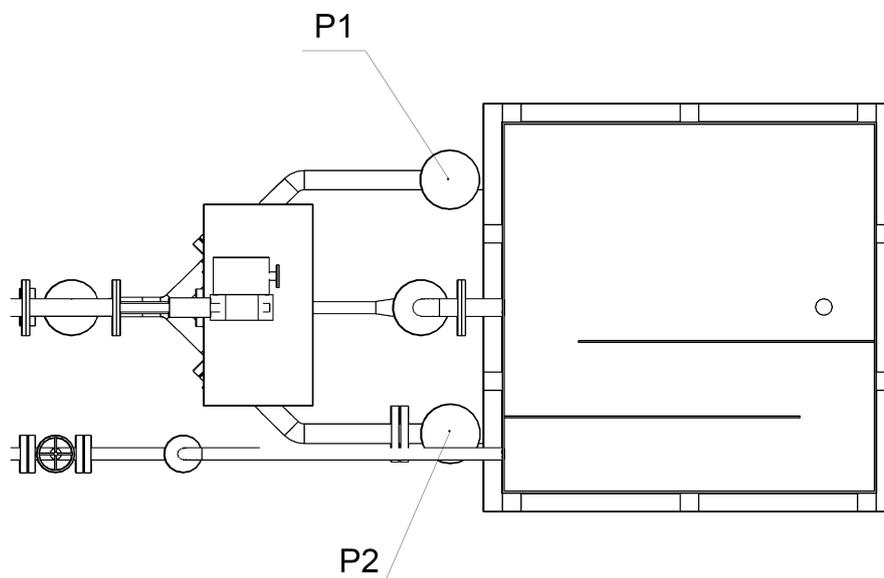


Figura 2.14: Localizzazione delle pompe P1 e P2 in proiezione ortogonale

Tabella 2.4: Differenze tra le caratteristiche tecniche della pompa n.1 (P1) e la pompa n.2 (P2). Fonte: schede tecniche Lowara

	Potenza nominale [kW]	Prevalenza H (Q=0) [m]	Prevalenza H (Q min) [m]	Prevalenza H (Q max) [m]	Velocità [rpm]	Peso [kg]
Pompa 1 (P1)	4	170	174.4	77.2	2910	47
Pompa 2 (P2)	0.75	38	38	16.9	2895	20

Entrambe P1 e P2 permettono il raggiungimento delle condizioni di progetto interne nel sistema alle quali svolgere le prove, pertanto si può scegliere indistintamente se utilizzare la pompa più grande P1 o quella più piccola P2. La gestione del sistema di pompaggio è svolta dal software Delta VFDSOft, con il quale si può testare la connessione tra la pompa e i relativi collegamenti e avviare il *keypad* e da

cui si possono inserire i valori della frequenza con cui si raggiungono le condizioni di progetto. Quest'ultimo passaggio è da eseguire in modo graduale e controllato, per evitare forti picchi di pressione che possono arrecare danni all'impianto.

Le pompe che prelevano l'acqua filtrata nelle vaschette di raccolta sono 3, e si azionano autonomamente quando l'acqua all'interno raggiunge un determinato livello, studiato e calibrato con dei sensori di livello (come spiegato nel Capitolo 4). Al raggiungimento di tale livello i sensori avviano lo svuotamento, per consentire un nuovo ciclo di acqua permeata proveniente dalla membrana nella test section.

## 2.1.6 Le valvole a sfera, di regolazione e di sfiato

### Valvole a sfera

Le valvole a sfera WAFER della ditta MIVAL sono costituite con un corpo in acciaio inossidabile AISI 316, e le sedi di tenuta della sfera sono in PTFE +15% in fibra di vetro. Sono progettate per resistere a temperature di esercizio comprese tra  $-20^{\circ}\text{C}$ ÷ $180^{\circ}\text{C}$  e a una pressione massima di 16 bar. Queste regolano il flusso del fluido da una parte sferica che ruota all'interno del corpo, di apertura genericamente circolare e sezione costante.

Le flange DIN PN16 rendono possibile la connessione alle tubazioni adiacenti alle valvole. In Figura 2.15 è possibile vedere un'immagine della valvola a sfera utilizzata.



Figura 2.15: Valvola a sfera WAFER della ditta MIVAL, immagine tratta da [www.mival.it](http://www.mival.it)

### Valvole di regolazione

Una valvola di regolazione è un dispositivo utilizzato per controllare la portata dei fluidi nei processi industriali. La regolazione avviene impostando la posizione dell'otturatore, tra apertura e chiusura della valvola, ruotando in modo graduale il volantino come mostrato in Figura 2.16. Di questo tipo di valvole esistono modelli a due o a tre vie, e queste ultime si suddividono in valvole miscelatrici (mescolano i due fluidi in ingresso) e valvole deviatrici (che deviano il fluido alle due uscite). I materiali più comuni per i corpi delle valvole sono ghisa grigia e sferoidale (GJL 250 e GJS 500), acciaio al carbonio (WCB) e acciaio inossidabile (CF8M). Precisamente, in Figura 2.16 è mostrato lo schema costitutivo di una classica valvola di regolazione a due vie, come quelle installate in questo impianto. E' costituita dal corpo che contiene il fluido, dalle componenti interne che regolano il flusso e le parti azionanti della valvola che esercitano la forza motrice.

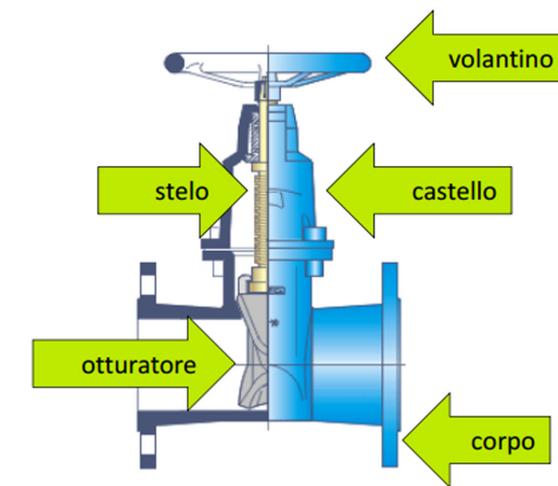


Figura 2.16: Parti costituenti una classica valvola di regolazione a due vie, immagine tratta da [www.asvstubble.it](http://www.asvstubble.it)

### Valvole di sfiato

Le valvole di sfiato o di sfogo dell'aria hanno la funzione di eliminare l'aria immessa insieme al liquido dalle tubazioni. Il modello impiegato nel circuito idraulico, come visibile in Figura 2.17, è il VA DN 15-50 della ditta Aliaxis. E' costituito da un sistema di connessione a giunti filettati senza alcuna parte metallica a contatto

con il fluido, compatibile con acqua potabile e altre sostanze alimentari secondo le normative vigenti grazie alla compatibilità del materiale della valvola in PVC-U.



Figura 2.17: Valvola di sfogo dell'aria VA DN 15-50, tratta da [www.aliaxis.it](http://www.aliaxis.it)

### 2.1.7 Le schede di acquisizione dati

Lo strumento che contiene le schede di acquisizione dati e fa da collegamento tra i sensori e il calcolatore è lo chassis NI CompactDAQ - 9174. La scheda è dotata di quattro slot USB ad alta velocità 2.0, come visibile in Figura 2.18.



Figura 2.18: Chassis NI cDAQ - 9174, immagine tratta da [www.artisan-tg.com](http://www.artisan-tg.com)

Allo chassis sono collegati tre moduli, rispettivamente il NI 9203, NI 9361 e NI 9401. Il primo modulo NI 9203 è costituito da una scheda Compact DAQ, con 8 canali di ingresso di corrente analogici per applicazioni di controllo e monitoraggio ad alte prestazioni. E' dotato di intervalli in ingresso programmabili, di una risoluzione a 16 bit e una velocità di campionamento massima di  $200kS/s$ . Include inoltre una barriera a doppio isolamento canale-terra per la sicurezza e l'immunità ai disturbi. Il secondo e il terzo modulo sono rispettivamente il modello NI 9361 e NI 9401, tutti e tre visibili in Figura 2.19. Queste schede possono essere utilizzate

per implementare sistemi personalizzati e digitali, come contatori e timer, protocolli di comunicazione digitale o di generazione impulsi.



Figura 2.19: A sinistra il modulo di acquisizione NI 9203, al centro il modulo NI 9361 e a destra la scheda NI 9401, tratte da [www.artisan-tg.com](http://www.artisan-tg.com)

## 2.2 *Set up* dell'impianto sperimentale

Il circuito idraulico è una struttura complessa e, prima della fase di accensione e di avvio acquisizione dati, è necessario collocare le varie componenti nelle corrette sedi al fine di non arrecarne danni e svolgere le prove nelle condizioni di progetto ottimali. Per questi motivi, le fasi di set up preliminare sono molto importanti.

### 2.2.1 Inserimento della membrana

Si consideri la test section inizialmente chiusa e smontata dall'impianto. Le due facce rettangolari sono chiuse da 24 barre filettate e bullonate a distanze regolari. Dopo averle svitate e rimosse è permesso il sollevamento e l'apertura della parte superiore, consentendo l'accesso al suo interno dove sono riposte la membrana e la pietra porosa. La membrana, che verrà descritta nel Capitolo 3, deve essere stesa sulla pietra porosa garantendo un'aderenza ottimale, ad esempio bagnandola con dell'acqua prima della stesura. Dopo averla stesa, assicurandosi di non aver lasciato bolle d'aria e di aver utilizzato dei guanti sterili, vengono ritagliati i pezzi sul perimetro dove verranno inserite le barre filettate. Richiusa e avvitata la superficie superiore alla sua controparte inferiore, viene ritagliato e incollato l'eccesso di membrana che sporge a monte e a valle in corrispondenza delle flange rettangolari. Una volta collocata la test section nella sua sede al centro dell'impianto, poggiata sui sostegni metallici e inserite le guarnizioni in gomma sulle flange a monte e a valle, si può procedere alla bullonatura con quelle adiacenti.

### 2.2.2 Fissaggio all'impianto

A ridosso della zona di valle è riposto un sensore di pressione, situato tra due ulteriori rinforzi che sono disposti trasversalmente su tutta la superficie superiore: si tratta di cerchiaggi metallici resistenti alla spinta di parete che l'acqua in pressione esercita sulle superfici superiore e inferiore della test section, per non farla fuoriuscire e per garantire quindi una maggiore sicurezza durante le prove. In Figura 2.20 è rappresentata un'immagine che dimostra la fase di inserimento e collocamento dei cerchiaggi, fissati alle due superfici della test section tramite barre filettate, posti in direzione trasversale rispetto alla direzione di flusso.

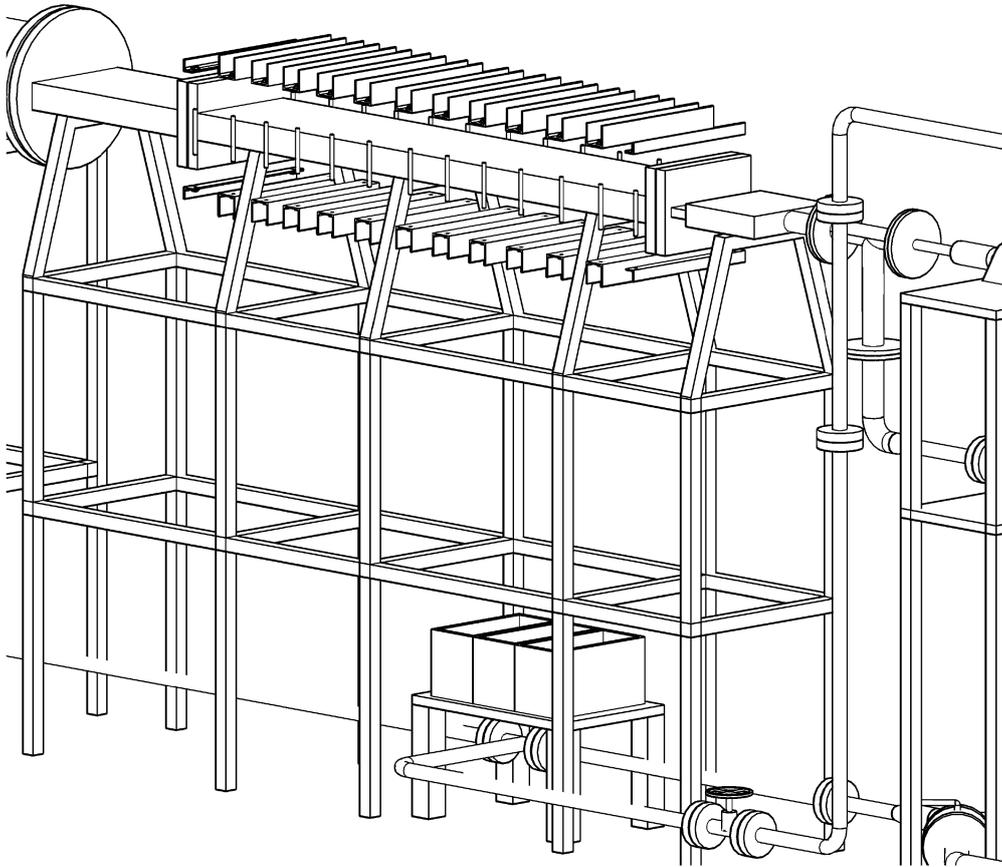


Figura 2.20: Montaggio dei cerchiaggi sulla test section

Sulla parte inferiore della test section fuoriescono dei tubi in PVC che, collegati alle vaschette di raccolta situati in linea rispettivamente alle zone di monte, di centro e di valle al di sotto della struttura, convogliano l'acqua filtrata dalla membrana nella rispettiva vaschetta. In questo modo sarà possibile quantificare e valutare il volume di acqua filtrata nelle specifiche zone della membrana lungo tutta la luce di percorrenza dell'acqua, tra la zona di monte a quella di valle, tramite i software di acquisizione dati. Termina così il processo di installazione della test section nell'impianto.

### 2.2.3 Le condizioni idrauliche di progetto

I parametri fisici di controllo da far mantenere al fluido all'interno del circuito riguardano la pressione  $P$  e la portata  $Q$ , quest'ultima controllata attraverso il

numero di Reynolds espresso dalla (2.2) come:

$$Re = \frac{\rho u_m L}{\mu} \quad (2.2)$$

dove:

- $\rho$  è la densità, in  $kg/m^3$ ;
- $u_m$  è la velocità media di flusso, in  $m/s$ ;
- $L$  è la lunghezza caratteristica del fenomeno considerato che, nel caso di moto di un fluido in una tubazione circolare rappresenta il diametro del tubo, in  $m$ ;
- $\mu$  è la viscosità dinamica, in  $kg/ms$ .

Il numero di Reynolds è un parametro adimensionale che indica la transizione tra il moto laminare e il moto turbolento di un fluido, dipendente dalla portata  $Q$  (2.1) e dunque dalla velocità media  $u_m$  (per condotte a sezione costante). In particolare:

- se  $Re < 2000$ , allora il moto è laminare;
- se  $2000 - 2500 < Re < 4000$ , la turbolenza inizia a formarsi e la zona è definita di transizione;
- se  $Re > 4000$ , allora il moto è completamente turbolento.

La transizione però non è legata solo alla velocità media o alla lunghezza caratteristica del fenomeno (ad es. il diametro del tubo per una tubazione circolare), ma a come interagiscono i seguenti parametri: velocità media, diametro, densità e viscosità del fluido. Si capisce che, coinvolgendo grandezze diverse per descrivere il comportamento di un fluido, fluidi diversi in tubi di diverso diametro (aventi però lo stesso numero di Reynolds) si comportano nello stesso modo: laminare o turbolento. Il significato di questo parametro però è più grande. Esprime il rapporto tra una lunghezza tipica nella scala propria del problema, una velocità nella scala tipica del problema, la densità e la viscosità del fluido. In generale si può scrivere il numero di Reynolds (2.3) come rapporto di una scala di lunghezza ( $L$ ), di velocità ( $u_m$ ) e di viscosità cinematica ( $\nu$ ), ossia:

$$Re = \frac{Lu_m}{\nu} \quad (2.3)$$

con  $\nu$  la viscosità cinematica (2.4):

$$\nu = \frac{\rho}{\mu} \quad (2.4)$$

Nella meccanica dei fluidi è importante non tanto la viscosità dinamica  $\mu$  ma la viscosità cinematica  $\nu$ : moti con lo stesso prodotto di lunghezza e velocità, infatti, hanno lo stesso comportamento meccanico se hanno la stessa viscosità cinematica, indipendente da quanto valgano le due scale.

Per completezza, si noti come il numero di Reynolds sia legato alle forze d'inerzia, vista la comparsa a numeratore della densità  $\rho$  (e quindi la massa), e alle forze viscosive, vista la comparsa a denominatore della viscosità  $\mu$ . Da un punto di vista fisico, pertanto, il numero di Reynolds è il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze d'attrito viscoso (2.5). E' dunque maggiormente comprensibile che a bassi  $Re$  il moto sia di tipo laminare, dove le forze viscosive prevalgono sulle forze d'inerzia, mentre ad alti  $Re$  il moto sia turbolento e le forze d'inerzia prevalgono su quelle viscosive.

$$Re = \frac{F_i}{F_v} \quad (2.5)$$

con  $F_i$  le forze d'inerzia e  $F_v$  le forze viscosive.

In particolare, per il set up sperimentale di questo lavoro di tesi si è sperimentato che, a valori di  $Re = 4000$ , il moto sia completamente turbolento. La velocità media all'interno di un sistema a membrane può essere considerata nell'intorno di  $1m/s$  [6]. In questo modo, applicando la Similitudine di Reynolds (2.6) tra la geometria dei sistemi a membrana reali, in cui lo spessore della camera di alimentazione è di circa  $2mm$  e questo sistema a base infinitamente larga e altezza  $2mm$ , si ottiene:

$$Re = Re^* \quad (2.6)$$

con  $Re^*$  il numero di Reynolds per questo set up sperimentale, nota la (2.2), per sezioni rettangolari:

$$L^* = 4\Omega = 4\frac{A}{P} \quad (2.7)$$

con

- $A$  l'area della sezione rettangolare;
- $P$  il perimetro bagnato della sezione rettangolare.

$$L^* = \frac{4(bh)}{2(b+h)} \quad (2.8)$$

che nel caso di sezione a base infinitamente larga ( $b \gg h$ ), per la (2.8):

$$L^* = 2h \quad (2.9)$$

e dunque:

$$Re^* = \frac{u_m 2h}{\nu} = 4000 \quad (2.10)$$

Con:

- $u_m = 1m/s$ ;
- $h = 2 * 10^{-3}m$ ;
- $\nu = 10^{-6}m^2s^{-1}$ , per l'acqua alla temperatura  $T = 20^\circ C$ .

In Tabella 2.5 sono rappresentate le condizioni idrauliche di progetto alle quali verranno eseguite tutte le prove a flusso stazionario e pulsato.

Tabella 2.5: Condizioni idrauliche di progetto

	Pressione [bar]	Numero di Reynolds [-]
Condizioni di progetto	1.5	4000

Sono stati effettuati dei primi test di benchmark a flusso stazionario da  $1bar$ , da  $1.5bar$  e da  $2bar$  per determinare l'influenza della pressione sul clogging delle membrane in tale regime di flusso. Per raggiungere le condizioni di progetto riportate in Tabella 2.5 si è dovuto intervenire fisicamente su due fattori:

- la frequenza della pompa  $f$  (2.11)

$$f = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (2.11)$$

dove  $\omega_0$  è la velocità angolare, misurata in  $rad/s$

- la regolazione tra apertura e chiusura della valvola di regolazione situata sotto al motore elettrico. Inizialmente è consigliabile lasciare questa valvola il più aperta possibile per evitare che si raggiungano elevati picchi di pressione.

Si può evincere dalla (2.11) come la frequenza sia direttamente proporzionale alla velocità, quindi al numero di Reynolds per la (2.2) e dunque anche alla portata per la (2.1): più viene chiusa la valvola di regolazione e più la pressione aumenta, mentre la velocità e dunque il numero di Reynolds diminuiscono. La precisa combinazione tra regolazione della frequenza della pompa e chiusura della valvola di regolazione permette infine di ottenere e mantenere le condizioni idrauliche di progetto per tutta la durata della prova.

I risultati prodotti da queste prime prove a flusso stazionario saranno visibili nei capitoli successivi, specificatamente dalle Prove 1-5 elencate in Tabella 4.1 nel Capitolo 4.

## 2.2.4 Ricerca delle condizioni ottimali in flussi pulsati del set up sperimentale

Per verificare l'efficacia del flusso pulsato si è variata la distanza di inserimento del pistone e la frequenza alla quale farlo ruotare. Nella fattispecie, dopo numerose prove di ricerca, si è scoperto di ottenere segnali di pressione a flusso pulsato con valori di ampiezza più o meno simmetrici rispetto al valore medio variando la distanza di inserimento del pistone all'interno della tubazione adiacente, e segnali di *velocità media* più o meno sinusoidali al variare dei valori di frequenza del motore (Figura 2.24 e Figura 2.25). Questi test sono serviti a identificare pertanto queste due informazioni, cercando di ottenere segnali di pressione con ampiezze simmetriche e un flusso costante con  $Re = 4000$ . In particolare, si è giunti alla conclusione che la distanza ideale a cui inserire il pistone fosse di  $34.5\text{cm}$ , lasciando i  $13.3\text{cm}$  restanti dei  $35.83\text{cm}$  totali (come visibile dalle quote del disegno CAD in Figura 2.10 nel Capitolo 2) esterni alla tubazione. In Figura 2.21 è possibile vedere una fotografia del pistone correttamente inserito nel circuito, dove sono visibili i  $13.3\text{cm}$  esterni.

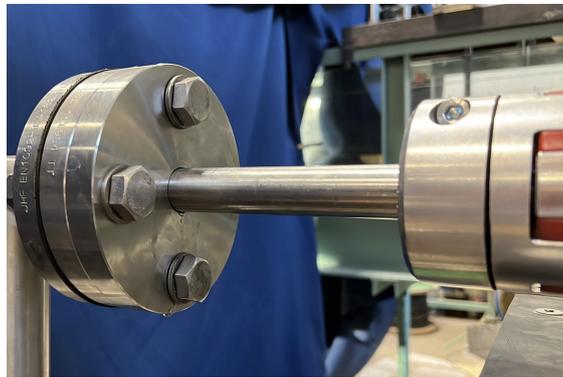


Figura 2.21: Distanza esterna del pistone inserito nella tubazione dell'impianto

In questo modo vengono generate sovrappressioni e depressioni simmetriche rispetto al valore medio di  $1.5\text{bar}$  (Figura 2.22), come invece si è visto non accadere per una prova di benchmark a  $0.09\text{Hz}$  riportata in Figura 2.23 a titolo di esempio, in cui la distanza esterna del pistone era di  $14.7\text{cm}$ .

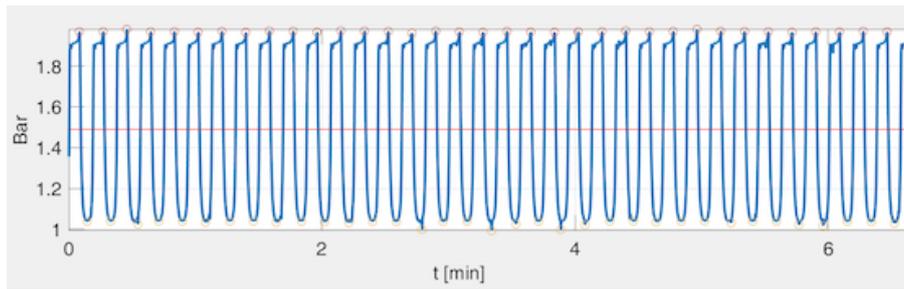


Figura 2.22: Segnale di pressione ad ampiezze simmetriche - Prova di benchmark a 0.09Hz e distanza esterna del pistone di 13.3cm

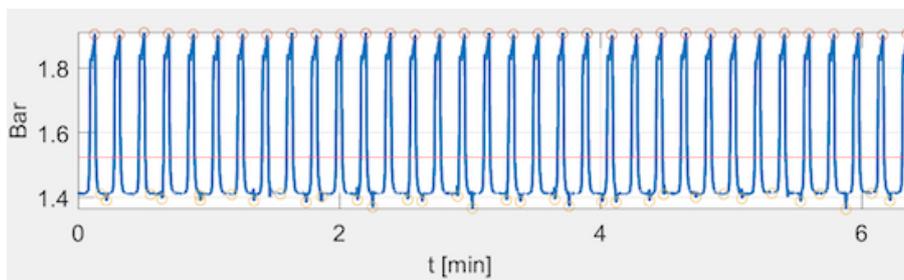


Figura 2.23: Segnale di pressione ad ampiezze non simmetriche - Prova di benchmark a 0.09Hz e distanza esterna del pistone di 14.7cm

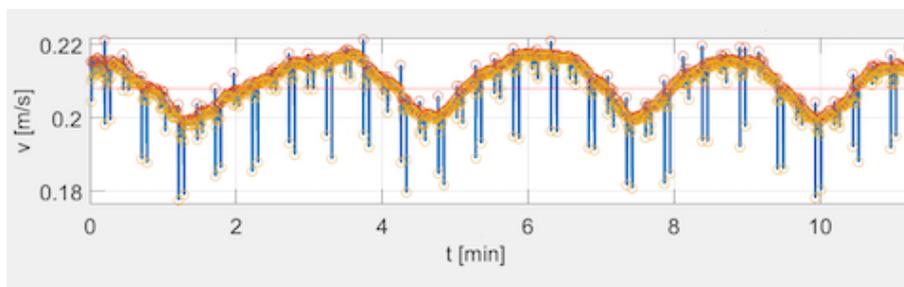


Figura 2.24: Andamento quasi-sinusoidale del segnale di velocità - Prova di benchmark alla frequenza di 1Hz e alla distanza esterna del pistone di 15.5cm

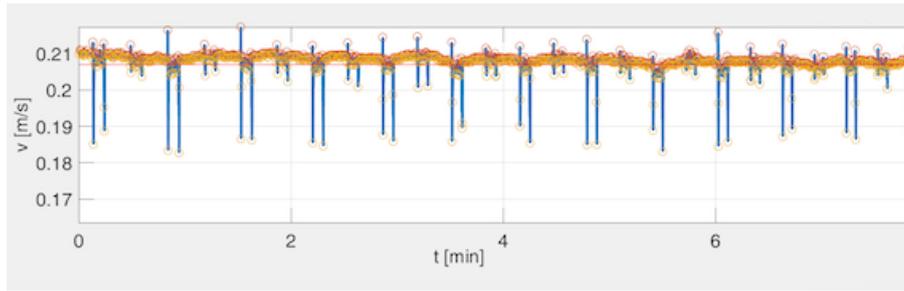


Figura 2.25: Andamento non sinusoidale del segnale di velocità - Prova di benchmark alla frequenza di 1.27Hz e alla distanza esterna del pistone di 15.5cm

Si può notare infatti che l'ampiezza delle sovrapressioni è di molto maggiore rispetto alle depressioni: per valori più piccoli di 13.3cm, si ottengono ampiezze maggiori delle depressioni rispetto alle sovrapressioni, mentre per valori maggiori di 13.3cm viceversa. Le quattro frequenze di rotazione invece, già elencate in Tabella 2.3, rappresentano i migliori quattro valori compresi tra quelli estremi raggiungibili dal motore elettrico, dai riduttori e dal set up sperimentale. Infatti, per altri valori di frequenza il segnale di flusso medio si è rivelato non controllabile per la durata a cui sarebbero state sottoposte le prove finali.

Un segnale pulsato è generalizzato da una forma sinusoidale, caratterizzata da un periodo di tempo  $T_0$  (2.12) misurato in secondi ( $s$ ):

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (2.12)$$

dove  $\omega_0$  è la velocità angolare misurata in  $rad/s$ , e da una frequenza (2.13), che si misura in cicli per secondo (o hertz) e rappresenta l'inverso del periodo di tempo  $T_0$ :

$$f = \frac{1}{T_0} \quad (2.13)$$

Il setup sperimentale, validate le condizioni che consentono di ottenere le condizioni ideali di progetto, ha portato ad avere i seguenti segnali di pressione:

- ad alta ampiezza;
- a bassa ampiezza.

In Figura 2.26 e 2.27 ne vengono rappresentati due a titolo d'esempio. Rispettivamente, il primo è un segnale ad alta ampiezza, il secondo a bassa ampiezza.

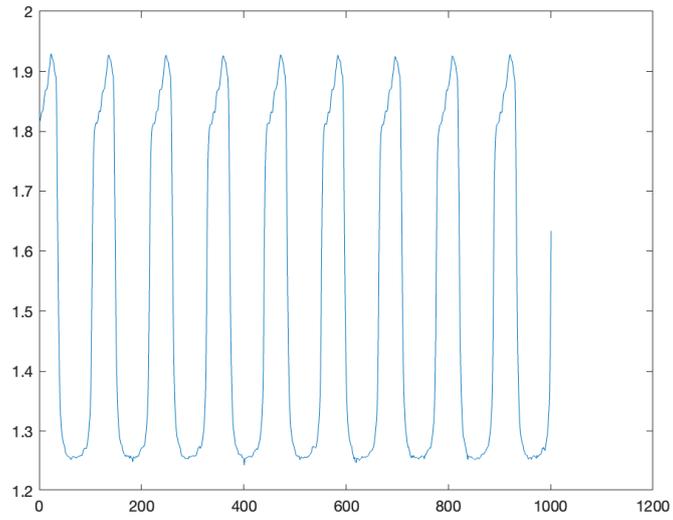


Figura 2.26: Estratto di segnale di pressione ad ampiezze simmetriche ad alta ampiezza - Prova 10 a 0.09 Hz

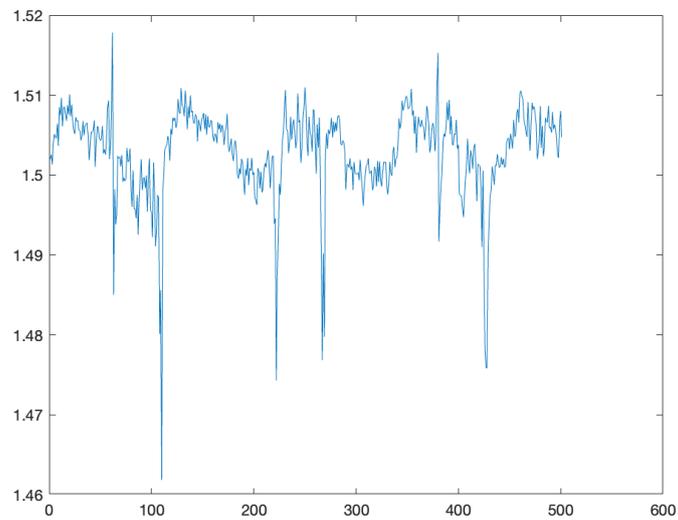


Figura 2.27: Estratto di segnale di pressione a bassa ampiezza - Prova 6 a 0.09 Hz

## 2.3 Le membrane utilizzate

Il tipo di membrana utilizzato, localizzato all'interno della test section sopra la pietra porosa, è della ditta Synder Filtration, precisamente il modello LY (PES 100,000Da) Sanitary UF Membrane, visibile in Figura 2.28 e le cui caratteristiche tecniche sono riportate in Tabella 2.6 .



Figura 2.28: Membrana LY (PES 100,000Da), tratta da [www.synderfiltration.com](http://www.synderfiltration.com)

Tabella 2.6: Caratteristiche tecniche delle membrane Synder LY (PES 100,000Da), Sanitary UF Membrane

	P. max. [bar]	P. min. [bar]	T. max. [°C]	pH T. max [°C]	pH T. max [°C]
Parametri operativi	8.3	0.7	55	3-9	2-10
Parametri di pulizia	8.3	0.7	50	2-11	1.8-11

Le dimensioni dei pori delle membrane sopracitate sono comprese tra 0,01 e 0,1  $\mu\text{m}$ . La pietra porosa su cui è appoggiata la membrana, invece, è in acciaio inox sinterizzato con porosità costante di 10  $\mu\text{m}$ , di dimensioni come in Tabella 2.2

## Capitolo 3

# Le membrane e i processi di filtrazione

Questo capitolo è dedicato ad un inquadramento generale delle membrane, alla loro facile reperibilità nella vita quotidiana, al loro impiego in una grande vastità di settori dell'industria e alla loro classificazione. L'applicazione di maggiore interesse, come oggetto di questa tesi, riguarderà l'utilizzo delle membrane per i cosiddetti *processi a membrana* [13] o *filtrazione a membrana*, di cui questi particolari oggetti costituiscono parte fondamentale.

### 3.1 Generalità

Le membrane fanno parte della nostra quotidianità. E' possibile trovarle, ad esempio, nelle scarpe e negli indumenti che vengono indossati ogni giorno, servono per proteggere e confezionare gli alimenti, per produrre acqua potabile (Figura 3.1), per trattare le acque reflue di processi industriali [9], per il processo di purificazione dell'aria o addirittura trovano impiego nella produzione di vino e birra in impianti di dealcolizzazione (Figura 3.1).



Figura 3.1: Impianto di demineralizzazione per la produzione di acqua potabile (sx), impianto di dealcolizzazione per la produzione di birra (dx). Immagini tratte rispettivamente da [www.membrane.it](http://www.membrane.it) e da [www.gea.com](http://www.gea.com)

Il settore della biomedicina ha investito molto su questo tipo di tecnologia [2]: circa 1,2 milioni di persone con insufficienza renale, infatti, vi si affidano per filtrare o per ossigenare il sangue umano [7]. L'ECMO (Extra Corporeal Membrane Oxygenation) è una tecnica che permette di supportare le funzioni vitali mediante una circolazione extracorporea per mezzo di uno strumento detto "ossigenatore extracorporeo a membrana", rappresentato in Figura 3.2, costituito da una camera di ossigenazione, di una membrana microporosa e da uno scambiatore di calore integrato realizzato da capillari impermeabili, fabbricato con materiali polimerici adeguati per applicazioni mediche. Il compito di questo prodotto è quello di fornire l'ossigeno, rimuovere l'anidride carbonica e riscaldare-raffreddare il sangue durante la procedura, che ha durata limitata.



Figura 3.2: Ossigenatore extracorporeo, immagine tratta da [www.medicaexpo.it](http://www.medicaexpo.it)

I parametri caratteristici della membrana sono:

- il materiale di cui è costituita;
- la sua struttura;
- la porosità  $\phi$ , espressa dalla (3.1) come il rapporto tra il volume dei vuoti (o volume dei pori)  $V_p$  e il volume totale del materiale preso in considerazione  $V_m$ .

$$\phi = \frac{V_p}{V_m} \quad (3.1)$$

Viste le considerazioni sopracitate, i processi a membrana hanno avuto una notevole crescita applicativa e di studio, che ha portato a sviluppare tecnologie sempre più innovative.

## 3.2 Tipi di membrane

Diverse sono le tipologie delle membrane e, riguardo ai processi di filtrazione oggetti di questo progetto di tesi sperimentale, prendono il nome di "filtri a barriera" che trattengono particelle sulla loro superficie separandole dal fluido. La parte attiva di una membrana permette il trasporto di materiale generalmente di tipo polimerico o inorganico e, rispetto alla comune filtrazione, la filtrazione a membrana permette di trattenere particelle di dimensioni di ordini di grandezza minori.

Le membrane possono essere classificate [1]:

1. A seconda del tipo di materiale:
  - organiche o inorganiche;
  - naturali o sintetiche;
  - solide o liquide.

Le membrane naturali e organiche derivano dalla cellulosa, quelle inorganiche sono genericamente ceramiche o metalliche e possiedono una buona resistenza chimica, termica e meccanica, ma sono estremamente fragili. Le membrane inorganiche sono più costose e vengono utilizzate raramente per tipologie di trattamenti specifici.

2. In base alla struttura:

- isotrope;
- anisotrope.

Le membrane isotrope o simmetriche presentano una uniforme dimensione dei pori su tutta la superficie, a differenza di quelle anisotrope che, al contrario, vedono cambiarne la dimensione passando da una superficie all'altra, come visibile in Figura 3.3.

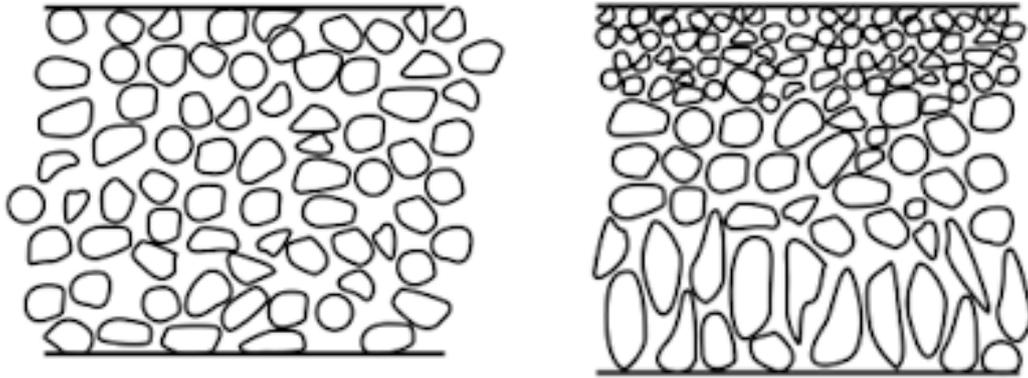


Figura 3.3: Diagrammi schematici di membrane isotrope (sx) e anisotrope (dx). Immagini tratte da R.W. Baker. "Membrane Technology and Applications." Wiley, 2004.

Le membrane anisotrope o asimmetriche sono invece caratterizzate dal possedere uno skin sottile costituente lo strato attivo sulla superficie, mentre gli strati inferiori, caratterizzati da elevata porosità, hanno la funzione di supportare lo strato attivo.

Le particelle inizialmente penetrano all'interno dei pori di dimensioni più grandi, visto il flusso maggiore al loro interno, e questi sono i primi a ostruirsi. Per questo motivo è giustificata la classica rapida diminuzione del flusso nei primi minuti, ad esempio, su membrane di microfiltrazione [1]. La separazione avviene a causa di questa particolare struttura che trattiene le molecole al di sopra di un certo valore di taglio molecolare medio o MWCO ("Molecular weight cut-off"), che esprime il peso molecolare dei composti trattenuti al 90%, il quale si misura in Dalton [3].

Un'altra importante differenza tra le membrane simmetriche e quelle asimmetriche sta nella definizione dei limiti di reiezione: le membrane microporose hanno un limite assoluto, per cui trattengono tutte le particelle con diametro al di sopra di un determinato valore, mentre quelle anisotrope forniscono valori nominali riferiti alle dimensioni delle molecole o al peso molecolare, al di sopra del quale una certa percentuale di soluto della soluzione alimentante viene trattenuto dalla membrana.

La membrana utilizzata per questo lavoro di tesi è una Synder LY (PES 100kDa), membrana per ultrafiltrazione di tipo sanitario che offre un elevato range di MWCO, corrispondente a 100.000Da. Il Dalton (Da) (3.2), è un'unità di misura tecnica per la massa atomica che non fa parte del sistema SI ma viene ancora riconosciuta come unità derivata, talvolta riconosciuto col simbolo *amu* (dall'inglese *atomic mass unit*).

$$1Da = 1.66054 * 10^{27}kg \quad (3.2)$$

### 3.3 Filtrazione a membrana

Il meccanismo di filtrazione a membrana per questo lavoro di tesi è un processo in "cross-flow", come raffigurato a sinistra in Figura 3.4. Questo avviene per via di un flusso di alimentazione che scorre in maniera tangenziale rispetto alla membrana stessa, che la attraversa forzato da un gradiente di pressione [13]. La corrente filtrata, chiamata permeato, è priva di macromolecole. La corrente rigettata o retentata rappresenta la parte di acqua non filtrata, che contiene gli inquinanti concentrati rifiutati dalla membrana. L'alimentazione e la porzione di acqua retentata scorrono dunque parallelamente alla membrana e non perpendicolarmente come invece accade per i processi a flusso ortogonale (o "dead-end"), il cui schema è visibile a destra in Figura 3.4. In quel caso l'alimentazione raggiunge la superficie della membrana in modo ortogonale e il retentato, non potendo scorrere via, si accumula sulla superficie della membrana aumentando la resistenza alla filtrazione e diminuendo dunque il flusso permeato.

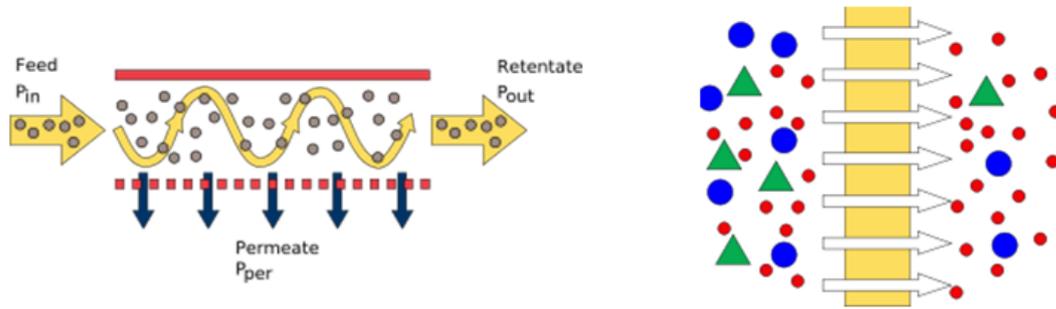


Figura 3.4: Processo a membrana in cross-flow (sx) e "dead-end" (dx), immagini tratte da [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

I processi che si applicano alla separazione di particelle di diverse dimensioni e peso specifico, differiscono per la tipologia della membrana utilizzata, ad esempio a seconda del tipo di materiale o del diametro dei pori e per il campo di pressione a cui è sottoposto il fenomeno [11]. In Tabella 3.1 sono riassunti alcuni dei principali ranges che classificano i processi di separazione a membrana, in cui sono evidenziati inoltre i valori di pressione operativa massima, il grado di porosità delle membrane e delle particelle che esse trattengono.

Tabella 3.1: Ranges dei processi di separazione a membrana

Diametro dei pori	<0.001 [ $\mu\text{m}$ ]	0.001 [ $\mu\text{m}$ ]	0.01 [ $\mu\text{m}$ ]	0.1 [ $\mu\text{m}$ ]	1 [ $\mu\text{m}$ ]
Processo di separazione	osmosi inversa	nanofiltrazione		microfiltrazione	
		ultrafiltrazione			
Particelle rimosse	ioni	colloidi, batteri, virus, zuccheri, proteine		batteri, lieviti, pigmenti, emulsioni	
Grado di porosità	membrane dense			membrane porose	
Pressione operativa massima	150 bar	50 bar	10 bar		5 bar

Una ulteriore classificazione dei ranges dei processi a membrana è data dal valore del MWCO. È stato riscontrato che: «la dimensione media dei pori della maggior parte delle membrane di ultrafiltrazione diminuisce con la diminuzione del MWCO» [3]. Pertanto, la membrana di ultrafiltrazione con MWCO più piccolo dovrebbe

catturare le particelle colloidali più piccole dall'acqua di alimentazione. Tuttavia, l'MWCO è solo un'indicazione approssimativa della capacità della membrana di rimuovere un determinato composto, poiché la forma molecolare, la polarità e l'interazione con la membrana possono influenzare la repulsione. Inoltre, le proprietà della superficie della membrana, come la porosità superficiale e la distribuzione delle dimensioni dei pori, possono influenzare la dimensione apparente delle particelle trattenute. Pertanto, la valutazione MWCO potrebbe non riflettere la dimensione delle particelle conservata.

La crescita e la ricerca di questa emergente tecnologia di filtrazione, adatta alla rimozione di batteri, torbidità e altri microrganismi in sistemi di piccole dimensioni, è di elevata considerazione. Sono tuttavia noti alcuni svantaggi, come il bisogno di pulire chimicamente il filtro, rimuovere i contaminanti trattenuti sul lato ad alta pressione mediante, ad esempio, tecniche di lavaggio per inversione del flusso [10] e la formazione di incrostrazioni (fouling) che è il principale problema che ne impedisce una diffusione ad ampia scala. In generale, si può indicare con il termine fouling «la conseguenza di tutti i fattori che inducono un calo di prestazioni della membrana [8]». L'azione di flussi pulsati sono una tecnica di rimozione dei contaminanti sulla superficie della membrana i cui effetti saranno valutati nel capitolo successivo.

## Capitolo 4

# Prove a flusso stazionario e pulsato

In questo capitolo si andranno ad analizzare le prove eseguite, descrivendo tutte le fasi preliminari di installazione della test section, di avvio e di acquisizione dei dati e i risultati ottenuti, sia per le prove a flusso stazionario che per quelle a flusso pulsato. In particolare si descriverà l'influenza della pressione sul clogging delle membrane a flusso stazionario, in seguito si proveranno a dare risposte sull'eventuale effetto benefico dei flussi pulsati al variare della frequenza e dell'ampiezza rispetto alle prime prove eseguite a flusso stazionario.

### 4.1 Operazioni preliminari

Le prove a flusso stazionario elencate in Tabella 4.1 sono cinque e non prevedono l'accensione del motore elettrico che mette in rotazione il pistone. All'acqua sono miscelati in modo omogeneo 10g di argilla ((a) in Figura 4.1) e 5g di caolino ((b) in Figura 4.1), per tutte le prove tranne che per la seconda a flusso stazionario (Prova 2), in cui sono stati sostituiti da 50g di seeding ((c), come visibile in Figura 4.1).

Tabella 4.1: Prove eseguite a flusso stazionario

	Pressione [bar]	Sostanze additive	Frequenza [Hz]	Durata [h]
Prova 1	1	caolino: 5g argilla: 10g	0	24
Prova 2	1	seeding: 50g		25
Prova 3	1	caolino: 5g argilla: 10g		24
Prova 4	1.5	caolino: 5g argilla: 10g		24
Prova 5	2	caolino: 5g argilla: 10g		24

(a) Argilla verde da 500g  
di [www.celeirointegral.pt](http://www.celeirointegral.pt)(b) Caolino bianco di  
[www.lagrotecnico.it](http://www.lagrotecnico.it)(c) Barattolo da  
100g di seeding da  
[www.dantedynamics.com](http://www.dantedynamics.com)

Figura 4.1: Sostanze additive miscelate all'acqua nel serbatoio

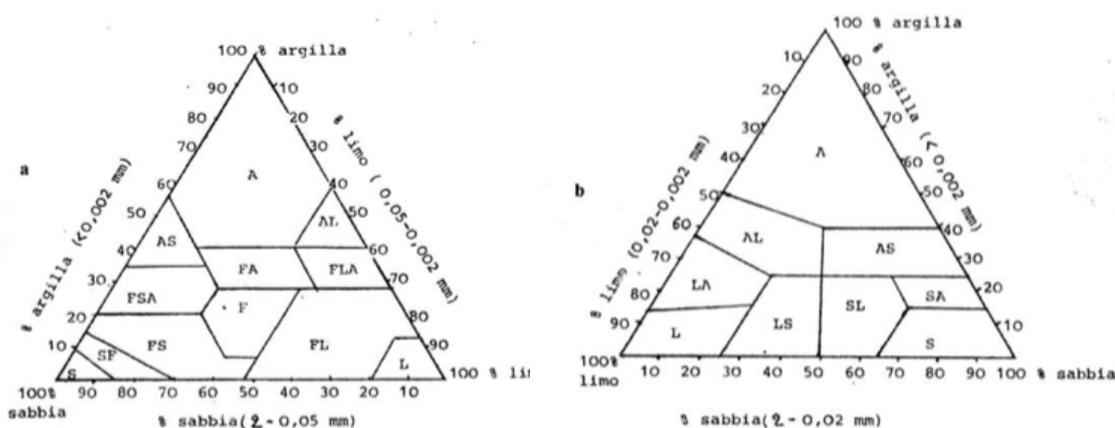
Le particelle di seeding sono sfere di vetro cave con un diametro medio di  $10\mu\text{m}$ , vengono utilizzate per operazioni di indagine sul flusso nei liquidi attraverso:

- visualizzazione del flusso;
- anemometria Laser Doppler;
- velocimetria dell'immagine delle particelle.

Si tratta di particelle traccianti dell'azienda DANTEC DYNAMICS in grado di ottenere informazioni sulla cinetica del moto della sostanza, particolarmente adatte

a generare dispersione della luce, segnali ad alta visibilità ed elevata tracciabilità del flusso.

L'argilla è una roccia sedimentaria clastica estremamente fine, le cui dimensioni dei grani sono inferiori a  $2\mu\text{m}$  di diametro. In Figura 4.2 vi sono rappresentate due tra le scale granulometriche più utilizzate al mondo per la definizione dei limiti delle classi diametriche delle particelle componenti la terra fine in un suolo [4]: la USDA (a) del "United States Department of Agriculture" e la ISSS (b) dell'"Indian Society of Soil Science".



(a) Scala granulometrica USDA

(b) Scala granulometrica ISSS

Figura 4.2: Diagrammi triangolari per la definizione della tessitura dei suoli [4]

Quella distribuita da Celeiro Integral è un prodotto naturale dalle proprietà universalmente provate e riconosciute. Viene utilizzata per svariati scopi e la sua azione risulta rapida ed efficace: aiuta a rimuovere le impurità e le tossine, a rivitalizzare la pelle e stimolare il rinnovamento cellulare. Per gli scopi di questo lavoro di tesi è stata utilizzata, in combinazione al caolino, per creare fouling sulla superficie della membrana. Il caolino è una roccia sedimentaria di tipo clastica (o detritica) e deriva da sedimenti a loro volta derivanti dall'accumulo di frammenti litici di altre rocce alterate e trasportate per mezzo di differenti agenti esogeni. Derivante dalla caolinite, un minerale silicato delle argille, possiede un aspetto decisamente tenero e terroso, solitamente di colore bianco o tendente al grigio. Talvolta è possibile identificarlo in colorazioni diverse se presenti ossidi di ferro [5]. Le prove a flusso

pulsato invece, tutte eseguite alle medesime condizioni di  $1.5\text{bar}$  e  $4000Re$  e con le medesime dosi di caolino e argilla come in quelle a flusso stazionario riportate in Tabella 4.1, sono otto e sono suddivise in base alle ampiezze delle sovrappressioni e delle depressioni generate dal flusso pulsato, come visibile in Tabella 4.2.

Tabella 4.2: Prove eseguite a flusso pulsato

	Pressione [bar]	Ampiezza [-]	Frequenza [Hz]	Durata [h]
Prova 6	1.5	Bassa	0.09	24
Prova 7	1.5		0.46	24
Prova 8	1.5		1.27	24
Prova 9	1.5		2.25	23
Prova 10	1.5	Alta	0.09	24
Prova 11	1.5		0.46	22
Prova 12	1.5		1.27	17
Prova 13	1.5		2.25	20

L'analisi dati prodotta da tali prove permetterà dunque di distinguere l'effetto di un'eventuale diminuzione del clogging tra quella a flusso stazionario di riferimento a  $1.5\text{bar}$ , in cui non vi era alcuna forza meccanica che potesse tentare di diminuirlo, rispetto alle due corrispettive a "bassa" e ad "alta" ampiezza per ognuna delle 4 frequenze. Verranno identificati i test di confronto in:

- "Test 1": Flusso stazionario a  $1.5\text{ bar}$  + flusso pulsato a  $0.09\text{Hz}$  a bassa e ad alta ampiezza;
- "Test 2": Flusso stazionario a  $1.5\text{ bar}$  + flusso pulsato a  $0.46\text{Hz}$  a bassa e ad alta ampiezza;
- "Test 3": Flusso stazionario a  $1.5\text{ bar}$  + flusso pulsato a  $1.27\text{Hz}$  a bassa e ad alta ampiezza;
- "Test 4": Flusso stazionario a  $1.5\text{ bar}$  + flusso pulsato a  $2.25\text{Hz}$  a bassa e ad alta ampiezza.

## 4.2 Svolgimento delle prove

I dati delle prove sono acquisiti dal software *LabVIEW*, su cui sono collegate e gestite tutte le interfacce hardware (sensori, pompe e misuratori) in modo digitale ed automatizzato.

Questo software è un vero e proprio ambiente di programmazione e di sviluppo, orientato all'acquisizione dei dati da parte di strumentazioni elettroniche hardware e all'analisi e all'elaborazione dei segnali. Avviato il programma si può notare di avere il completo controllo delle caratteristiche fisiche interne all'impianto, potendo controllare e intervenire su tutti i sensori e misuratori collegati. L'ambiente è del tipo "grafico ad oggetti" chiamato *G language*, per poter scrivere programmi a forma di diagrammi a blocchi accessibili selezionando *View»Controls Palette*, visibile in Figura 4.3.

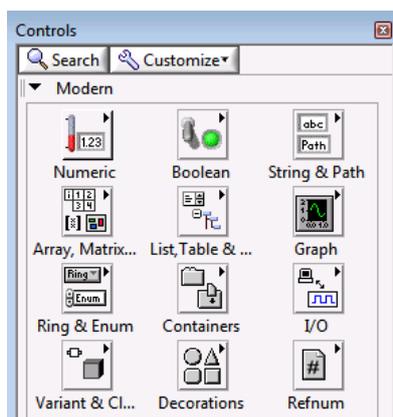


Figura 4.3: Controls Palette di LabVIEW

Le fasi di svolgimento delle prove riguardano:

- l'accensione e l'alimentazione delle varie strumentazioni al quadro generale ((a) in Figura 4.4);
- l'avvio del software di acquisizione dati LabVIEW, di gestione della pompa Delta VFDSOft e di cattura delle immagini Digital Photo Professional 4;
- la verifica dello svuotamento delle vaschette di raccolta e una successiva verifica di completa apertura delle valvole di regolazione, oltre che il collegamento in linea tra le valvole a sfera e la pompa scelta;

- il riempimento del serbatoio con l'acqua, per un'altezza di  $0.42m$ ;
- l'avvio della pompa tramite il tasto "Run" dal KeyPad dell'applicazione Delta VFDSOft ((b) in Figura 4.4);
- l'avvio del Chiller ((c) in Figura 4.4);
- le manovre di raggiungimento delle condizioni di progetto di  $4000Re$  e  $1.5bar$ , mediante apertura/chiusura delle valvole di regolazione, con aumento graduale delle frequenza della pompa dal Keypad ((d) in Figura 4.4).

Raggiunte le condizioni di progetto:

- si procede all'immissione e alla miscelazione omogenea di argilla e caolino con l'acqua;
- si inizia la prova mediante l'acquisizione dei dati su "LabVIEW" e l'acquisizione delle immagini con "Digital Photo Professional 4", premendo i rispettivi pulsanti "Start";
- si controlla l'andamento della prova e si raccolgono i campioni di fluido ogni 8 ore in boccette di vetro di 50ml;
- si termina la prova, l'acquisizione dati su "LabVIEW" e l'acquisizione immagini su "Digital Photo Professional" 4 premendo i rispettivi pulsanti "End" al termine delle 24h di tempo.



(a) Accensione del quadro elettrico e alimentazione alla pompa scelta



(b) Run della pompa dal Keypad DeltaVFD



(c) Accensione e regolazione della temperatura sul Chiller



(d) Chiusura progressiva e graduale della valvola di regolazione

Figura 4.4: Alcune delle fasi di svolgimento delle prove

Per raggiungere le condizioni di progetto, dopo aver alimentato il quadro generale, il Chiller e i PC si devono avviare i software di gestione delle pompe, di acquisizione dati e quello della fotocamera per l'acquisizione delle immagini, rispettivamente Delta VFDSOft, Labview e Digital Photo Professional 4. Mediante il primo software, si avvia il collegamento con la pompa scelta, verificandone la connessione con i collegamenti hardware. Attraverso il Keypad, invece, si può gestire

la frequenza della pompa stessa. LabVIEW è il software con cui vengono mostrati i grafici di andamento delle condizioni fisiche interne del sistema di pressione, temperatura e velocità ed è anche il luogo da cui far cominciare e terminare le prove assegnando il nome e la destinazione di salvataggio sul PC. Dopo aver dato il nome alla prova, verificato il collegamento di tutte le componenti e dopo aver azionato la pompa aumentando in maniera graduale e cautelativa la frequenza, si possono vedere in tempo reale i cambiamenti dei valori di temperatura, pressione e di flusso sui grafici. Il diretto legame tra frequenza della pompa e chiusura/apertura delle valvole di regolazione modifica le condizioni di moto interne al sistema, facendo variare proprio i parametri fisici di interesse. Raggiunte le condizioni di progetto si attende per qualche minuto affinché venga raggiunto un equilibrio nel tempo, apportando opportunamente delle micro regolazioni. Tutti questi dati sono salvati in files di testo all'interno della directory selezionata. Premendo il pulsante verde "Start" su LabVIEW verrà sancito l'inizio effettivo della prova che permetterà di filtrare i dati tra quel momento e quando si cliccherà il pulsante rosso "end", per non considerare nell'analisi dati i momenti di calibrazione e di raggiungimento delle condizioni di progetto. Ogni prova ha come obiettivo temporale la durata di 24h. A intervalli regolari di 8h si prelevano dei campioni di fluido dall'impianto aprendo leggermente una valvola di svuotamento. Questi campioni potranno essere catalogati, seccati e conservati, e mostreranno le caratteristiche chimico-fisiche del fluido in quell'esatto momento della prova.

## 4.3 Prove a flusso stazionario

Le prove a flusso stazionario sono 5: le prime tre sono eseguite alla pressione di 1 bar e le ultime due alla pressione di 1.5 e 2 bar. Per tutte le prove sono state miscelate all'acqua le stesse dosi di argilla e caolino tranne che per la prova numero 2 per cui si è inserito del seeding, come visto in Tabella 4.1.

### 4.3.1 Descrizione delle prove

In Figura 4.5 sono riportate le curve cumulate di filtrato, somma dei volumi d'acqua filtrata nelle vaschette di raccolta di monte, centro e valle, per ogni prova a flusso stazionario, i cui valori finali sono riportati in Tabella 4.3.

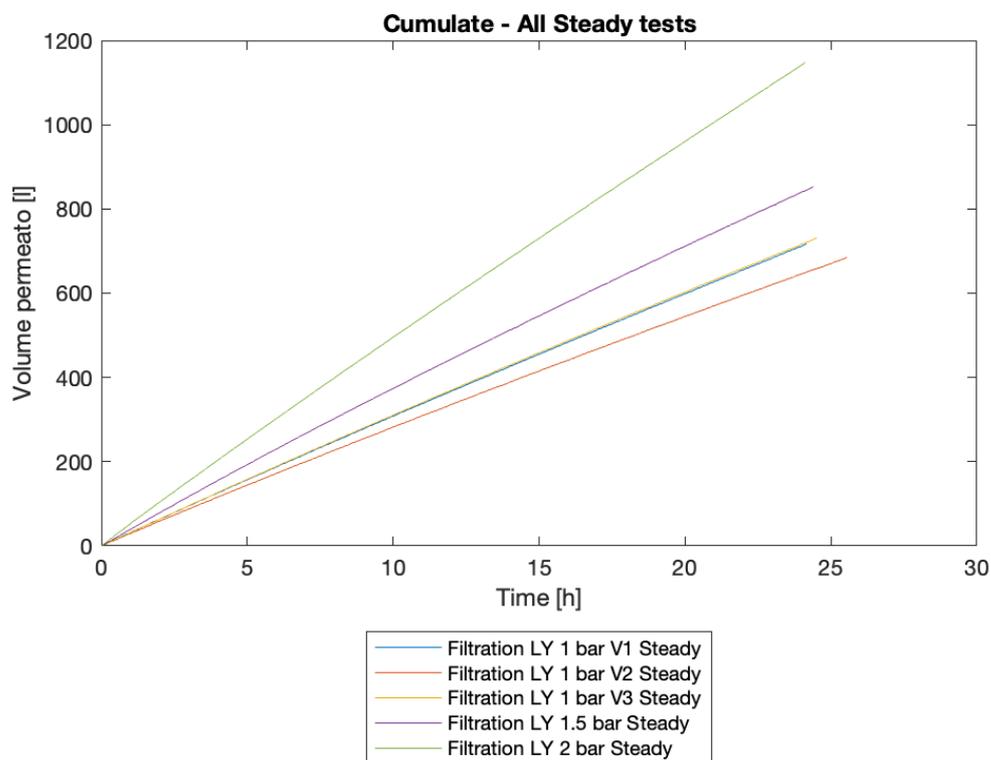


Figura 4.5: Curve cumulate a flusso stazionario

Tabella 4.3: Volume totale cumulato di acqua delle prove a flusso stazionario

	Pressione [bar]	Durata [h]	Cumulata [l]
Prova 1	1	24	717.16
Prova 2	1	25	684.28
Prova 3	1	24	731.00
Prova 4	1.5	24	853.23
Prova 5	2	24	1146.82

Per ottenere queste curve sono state ricavate in primo luogo le curve cumulate di permeato da ciascuna delle tre vaschette di raccolta, sapendo che ogni vaschetta avrebbe immagazzinato 8l di acqua permeata prima di riciclarla all'interno dell'impianto. Tale volume è stato calibrato per mezzo di sensori di livello posti all'interno

delle vaschette, che si azionano e le svuotano quando raggiungono il segnale elettrico di  $20mAh$ . La relazione milliampere-litri è legata da un coefficiente moltiplicativo, riportato in Tabella 4.5 e calcolato come la media di relazioni già calcolate empiricamente.

Tabella 4.4: Relazione mAh-litri, per ciascuna vaschetta di raccolta

	Monte	Centro	Valle
Coefficiente mAh-l [-]	0.9384	0.9389	0.9383

Si è avuta cura di considerare, inoltre, il riempimento delle tre vaschette durante il rispettivo svuotamento delle stesse all'interno del serbatoio, conoscendo il tempo medio di svuotamento e la portata di ciascun canale di monte, centro e valle, i cui valori sono riportati in Tabella 4.5 avendo effettuato ulteriori test di benchmark di tipo empirico in precedenza.

Tabella 4.5: Portata e tempi di svuotamento, per ciascuna vaschetta di raccolta

	Monte	Centro	Valle
Portata [ml/s]	120.81	98.6	101.32
t. medio di svuotamento [s]	91	111.4	108.4

La somma, istante per istante, delle tre curve cumulate di monte, centro e valle costruisce quelle rappresentate in Figura 4.5, il cui procedimento si ripete per tutte le successive prove allegate in Appendice A.

Il permeato rappresenta la frazione di prodotto che attraversa la superficie della membrana, ed è stato calcolato conoscendo il valore di cumulata totale, istante per istante, e la superficie della membrana. La (4.1) esprime l'andamento di permeato assoluto (in  $l/(m^2h)$ ) con  $\Delta t = 1h$ , visibile in Figura 4.6.

$$Permeate = \sum_{i=1}^n \frac{V_{i+1} - V_i}{S\Delta t} \quad (4.1)$$

dove:

- $V$  è il volume cumulato che attraversa la membrana;
- $\Delta t = 1h$ ;
- $S$  è la superficie della membrana (4.2)

$$S = 0.2 * 1.4 = 0.28m^2; \quad (4.2)$$

- $n$  è la durata totale in ore della prova.

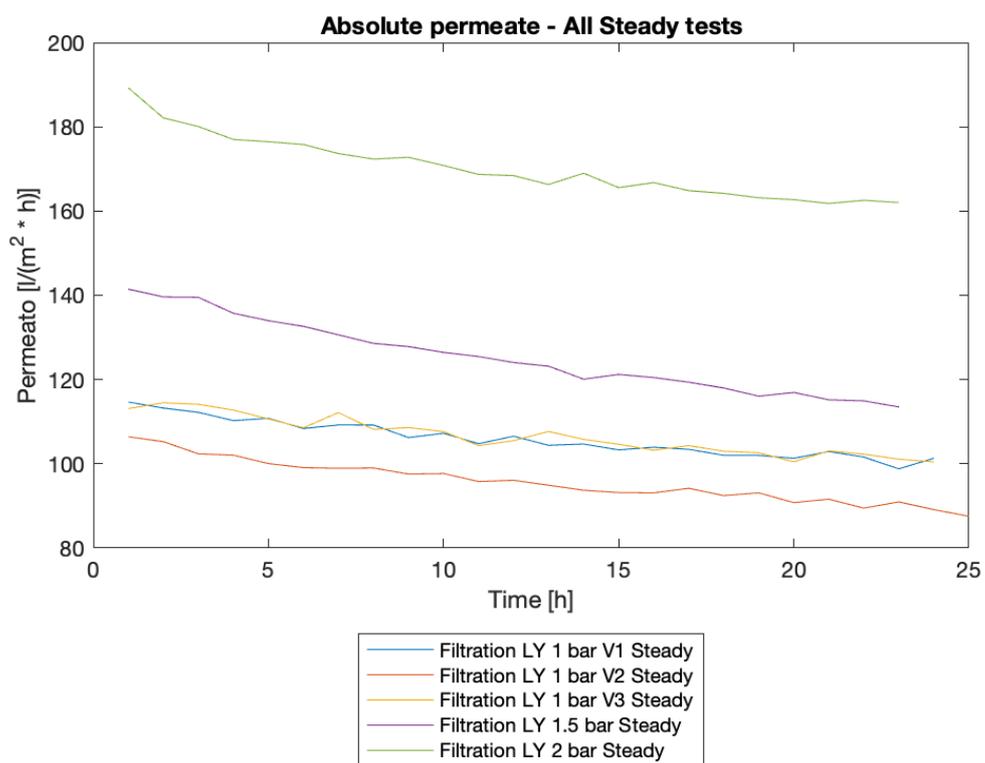


Figura 4.6: Filtrato assoluto a flusso stazionario

Tabella 4.6: Valori iniziali e finali di permeato assoluto - prove a flusso stazionario

	P [bar]	Durata [h]	Permeato iniz. [ $l/(m^2h)$ ]	Permeato fin. [ $l/(m^2h)$ ]
Prova 1	1	24	114.68	101.32
Prova 2	1	25	106.42	87.56
Prova 3	1	24	113.11	100.46
Prova 4	1.5	24	141.45	113.50
Prova 5	2	24	189.25	162.03

In Tabella 4.6 sono riportati i valori iniziali e finali di permeato assoluto, per le prove a flusso stazionario, delle curve rappresentate in Figura 4.6.

Le curve di permeato normalizzato, invece, si ottengono dividendo i valori di permeato assoluto rispetto al primo valore. Permettono di confrontarle con medesime curve effettuate a condizioni diverse per valutarne l'efficienza, dove il valore unitario (parametro adimensionale [-]) rappresenta il valore di capacità massima permeabile dalla membrana alle specifiche condizioni a cui si sta svolgendo la prova, come visibile in Figura 4.7.

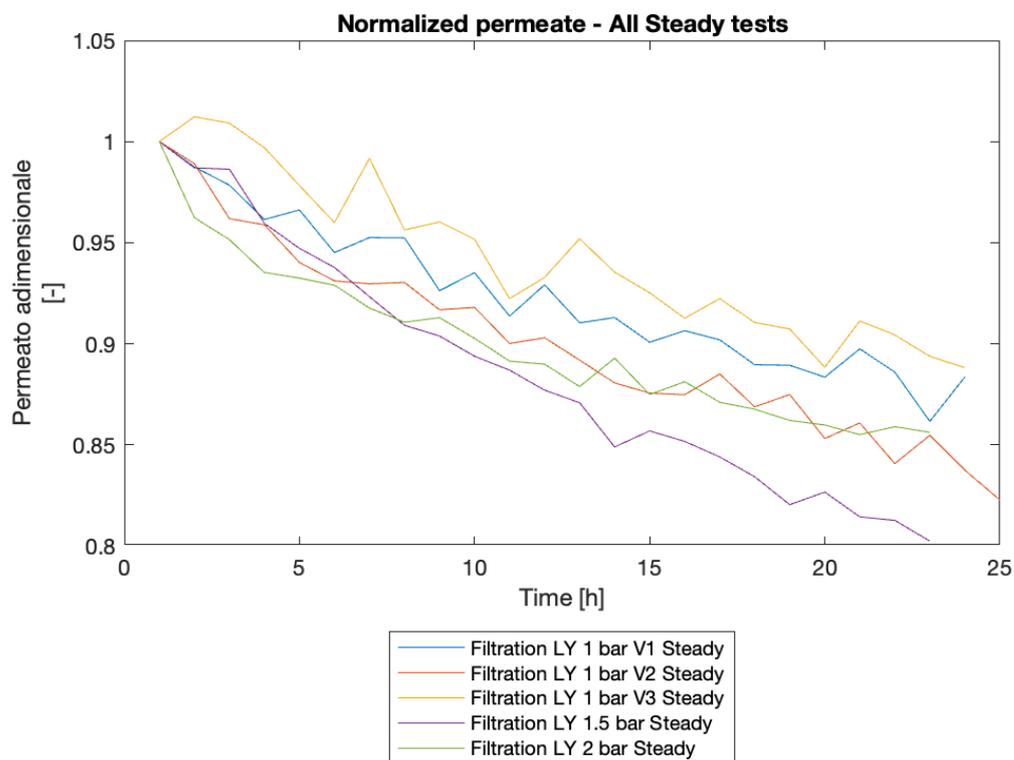


Figura 4.7: Filtrato normalizzato a flusso stazionario

Tabella 4.7: Valori finali di permeato normalizzato e riduzione della capacità filtrante della membrana LY - prove a flusso stazionario

	P [bar]	Durata [h]	Permeato normalizzato finale [-]	Capacità filtrante della membrana [%]
Prova 1	1	24	0.86	-14
Prova 2	1	25	0.82	-18
Prova 3	1	24	0.88	-12
Prova 4	1.5	24	0.80	-20
Prova 5	2	24	0.85	-15

Dalla figura 4.7 si può notare come la curva di permeato adimensionale a  $2\text{bar}$  assuma due pendenze: dalla prima alla settima ora il clogging diminuisce, coerentemente all'intuizione, al di sotto delle prove a  $1\text{bar}$  e a  $1.5\text{bar}$ , mentre dalla settima ora al termine della prova il clogging sembra assestarsi a valori finali compresi tra

le prove a  $1bar$  e a  $1.5bar$ . In Tabella 4.7 sono riportati i valori finali di permeato normalizzato per le prove a flusso stazionario, che esprimono la capacità persa dalla membrana rispetto a quella massima, il 100% riferito al valore unitario del primo valore sul grafico in Figura 4.7.

La test section, visibile in una foto dall'alto in Figura 4.8, è stata suddivisa in 11 regioni rettangolari su cui effettuare l'analisi qualitativa dello sporco nel tempo. Le regioni sono state raggruppate, a loro volta, in tre macro-zone rappresentanti quelle alle quali sono collegate le 3 vaschette di raccolta: la zona di monte, di centro e di valle.

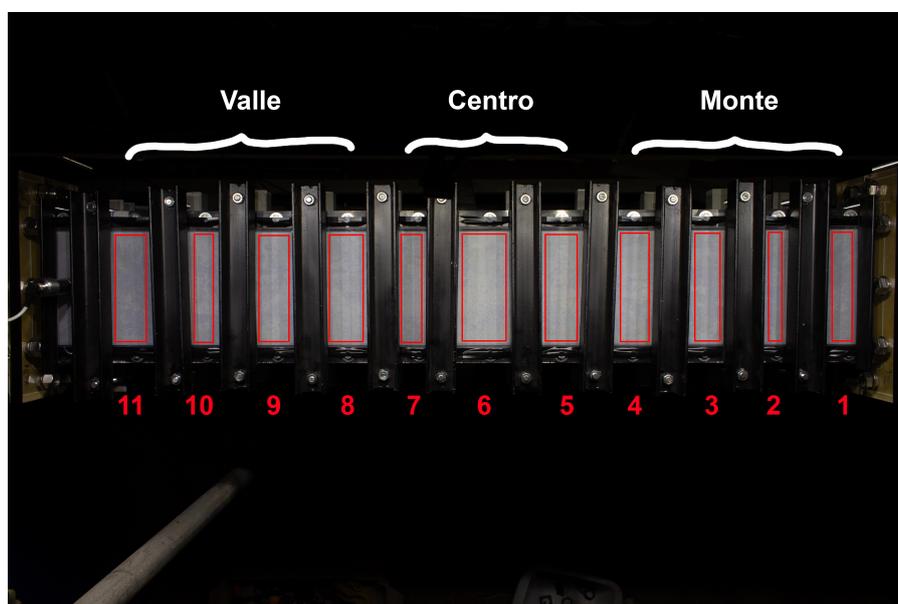


Figura 4.8: Suddivisione delle regioni della test section.

Le immagini sono state acquisite nel formato RAW dalla fotocamera Canon EOS 700D, nel medesimo ambiente (per ogni prova) oscurato completamente da teloni su tutti i lati dell'impianto, con la stessa intensità di luce continua sulla test section. In post-produzione è stato effettuato il bilanciamento del bianco per la prima foto della serie, sincronizzando poi i valori di temperatura su tutte le altre acquisizioni, potendo pertanto apprezzare e confrontare l'ingiallimento della membrana per tutte le successive prove.

Lo sporco delle membrane è visibile in maniera qualitativa tramite la Figura 4.9 in cui vi è rappresentato quello relativo alla prova a flusso stazionario numero 4, a  $1.5bar$ , che rappresenta la prova di confronto con le successive prove

a flusso pulsato eseguite alla medesima pressione. Da questa immagine è chiaro come il valore di giallo aumenti progressivamente fino a raggiungere i valori massimi riassunti in Tabella 4.8.

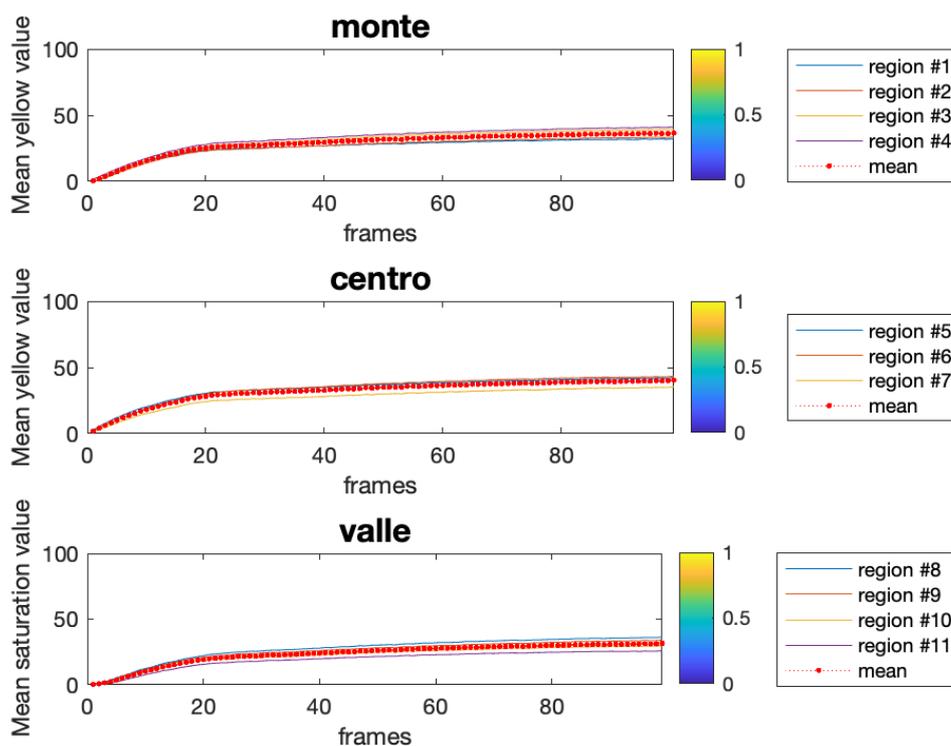


Figura 4.9: Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana nelle zone di monte, centro e valle della membrana - Prova 4 a 1.5bar a flusso stazionario

Tabella 4.8: Valori finali di ingiallimento della membrana

	Monte	Centro	Valle
Ingiallimento [%]	36.62	40.41	31.60

Per ottenere queste curve è stata fatta la media del canale di "Yellow" di ognuna delle 11 regioni, istante per istante, sapendo che la fotocamera scatta 1 foto ogni 15 minuti. Il canale di "Yellow" è stato ottenuto su MATLAB attraverso la funzione "rgb2cmk", che trasformava l'immagine dal profilo RGB (Red, Green, Blue) in

CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Key) in cui "Key" è un termine usato in tipografia per definire il nero.

## 4.4 Prove a flusso pulsato

Le prove a flusso pulsato, come visto in Tabella 4.2, sono 8 e sono tutte eseguite alla pressione di  $1.5\text{bar}$  e  $4000Re$ , con le medesime dosi di caolino e argilla. Per l'intera durata di queste prove è azionato il motore elettrico che mette in rotazione il pistone alla frequenza impostata e, in base alle caratteristiche di questo impianto sperimentale, sono suddivise in bassa e alta ampiezza, come visibile in Figura 2.26 e 2.27 relative ai segnali di pressione.

### 4.4.1 Descrizione delle prove

Il confronto di queste prove viene fatto tra la prova 4 a flusso stazionario a  $1.5\text{bar}$  e le rispettive prove a  $0.09\text{Hz}$ ,  $0.46\text{Hz}$ ,  $1.27\text{Hz}$  e  $2.25\text{Hz}$  a bassa e ad alta ampiezza, definite:

- "Test 1": Flusso stazionario a 1.5 bar + flusso pulsato a  $0.09\text{Hz}$  a bassa e ad alta ampiezza;
- "Test 2": Flusso stazionario a 1.5 bar + flusso pulsato a  $0.46\text{Hz}$  a bassa e ad alta ampiezza;
- "Test 3": Flusso stazionario a 1.5 bar + flusso pulsato a  $1.27\text{Hz}$  a bassa e ad alta ampiezza;
- "Test 4": Flusso stazionario a 1.5 bar + flusso pulsato a  $2.25\text{Hz}$  a bassa e ad alta ampiezza.

#### Test 1: $0.09\text{Hz}$

In Figura 4.10 sono riportate le curve cumulate di filtrato del "Test 1", somma dei volumi d'acqua filtrata nelle vaschette di raccolta di monte, centro e valle, per la Prova 4 a flusso stazionario, la Prova 6 a  $0.09\text{Hz}$  a bassa ampiezza e la Prova 10 a  $0.09\text{Hz}$  ad alta ampiezza. I valori finali sono riportati in Tabella 4.9. Per le stesse prove confrontate, facenti parte del "Test 1", sono rappresentate in Figura 4.11 le

curve di filtrato normalizzato (adimensionale) e assoluto (in  $l/(m^2h)$ ), i cui valori iniziali e finali sono riportati in Tabella 4.10.

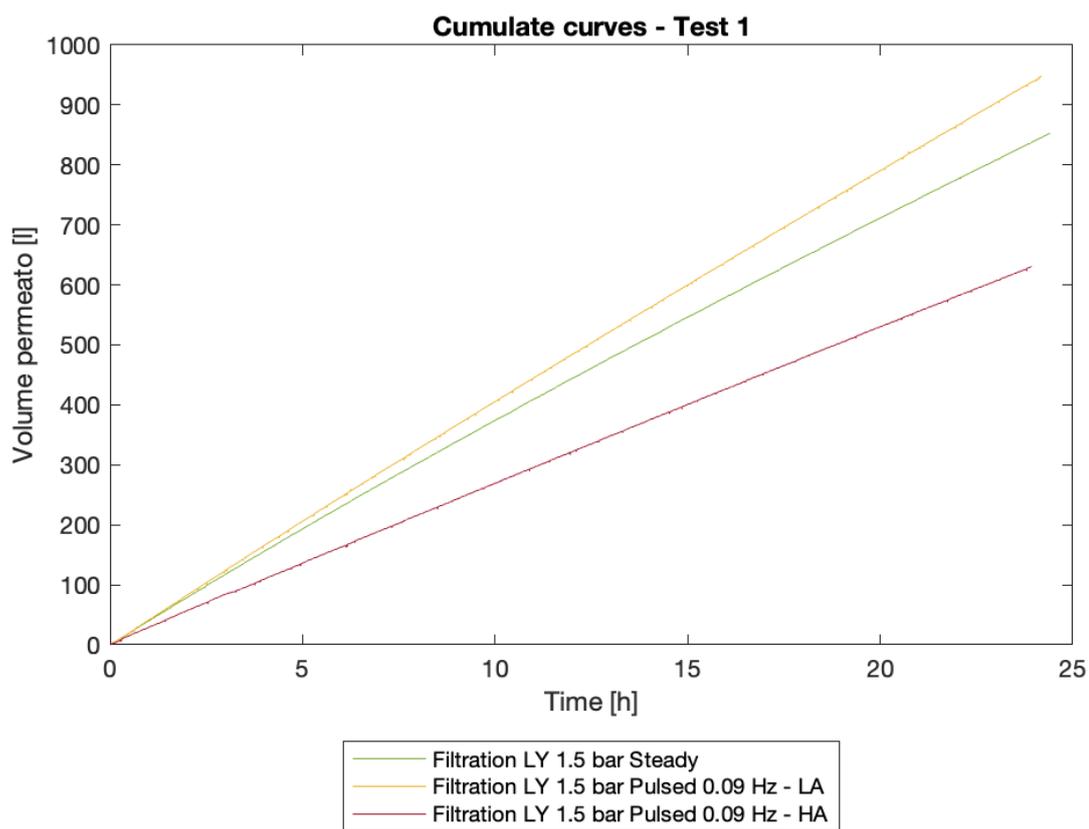


Figura 4.10: Curve cumulate a flusso pulsato - Test 1 a 0.09Hz

Tabella 4.9: Volume totale cumulato di acqua - Test 1 a 0.09Hz

		Pressione [bar]	Durata [h]	Ampiezza [-]	Cumulata [l]
Test 1	Prova 4 Steady	1.5	24	-	853.23
	Prova 6 Pulsed 0.09Hz - L.A.	1.5	24	Bassa	948.43
	Prova 10 Pulsed 0.09Hz - H.A.	1.5	24	Alta	630.30

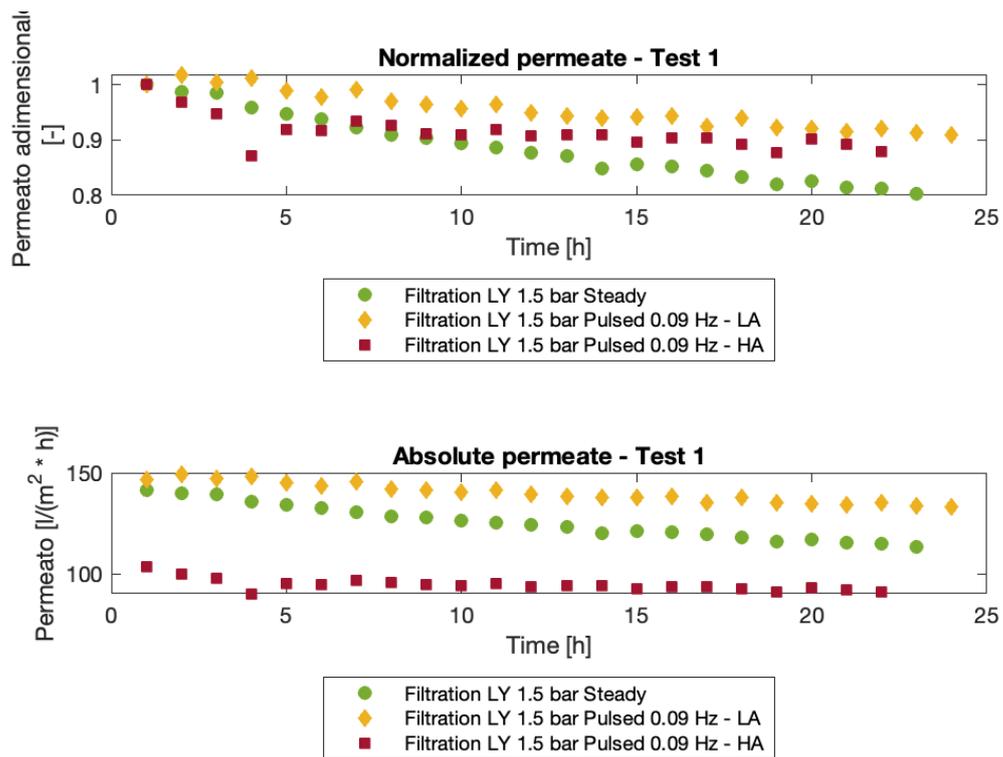


Figura 4.11: Curve di filtrato normalizzato e assoluto a flusso pulsato - Test 1 a 0.09Hz

Tabella 4.10: Valori di filtrato assoluto, normalizzato e di effetto del flusso pulsato rispetto alla Prova 4 a flusso stazionario - Test 1 a 0.09Hz

		Permeato max. [l/(m <sup>2</sup> h)]	Permeato min. [l/(m <sup>2</sup> h)]	Permeato adimens. [-]	Capacità membrana [%]	Effetto pulsato [%]
Test 1	Prova 4 Steady	141.45	113.50	0.80	-20%	-
	Prova 6 Pulsed 0.09Hz - L.A	146.47	133.23	0.91	-9%	+55%
	Prova 10 Pulsed 0.09Hz - H.A	103.34	90.85	0.88	-12%	+40%

Da questi dati si evince come, per quanto riguarda il Test 1, si hanno effetti benefici del flusso pulsato sul clogging delle membrane, sia per basse che per alte ampiezze. Il miglior effetto benefico si ha tuttavia a basse ampiezze, con una riduzione di clogging del 55% (dopo 24 ore) rispetto al flusso stazionario che, a fine prova, riduce le capacità della membrana del 20% rispetto al suo stato iniziale (100%). Non è tuttavia trascurabile l'effetto benefico prodotto dalla prova condotta ad alte ampiezze, che vede ridurre il clogging sulla superficie della membrana del 40% (dopo 22 ore) rispetto quella a flusso stazionario. Dall'analisi di permeato dimensionale, invece, si vede come la prova ad alte ampiezze abbia valori significativamente inferiori rispetto alle prove a flusso stazionario e pulsato a bassa ampiezza.

L'aumento dello sporco sulle membrane relative alle stesse prove è visibile, in modo qualitativo, dall'incremento del valore di "yellowness" nei grafici di analisi delle fotografie catturate in modalità timelapse in Appendice A contestualmente alle prove numero 6 e 10. In Tabella 4.11 sono riportati i valori finali di ingiallimento della suddetta analisi.

Tabella 4.11: Valori finali di ingiallimento della membrana - Test 1 a 0.09Hz

		Ingiallimento max. monte [%]	Ingiallimento max. centro [%]	Ingiallimento max. valle [%]
Test 1	Prova 4 Steady	36.62	40.41	31.60
	Prova 6 Pulsed 0.09Hz - L.A	18.66	22.79	13.72
	Prova 10 Pulsed 0.09Hz - H.A	17.79	20.19	12.09

**Test 2: 0.46Hz**

Analogamente a quelle del "Test 1", vengono riportate di seguito le analisi dati e delle immagini del "Test 2". Questo test confronta la Prova 4 a flusso stazionario, la Prova 7 a 0.46Hz a bassa ampiezza e la Prova 11 a 0.46Hz ad alta ampiezza. In Figura 4.12 sono riportate le curve cumulate di filtrato, i cui valori finali sono riportati in Tabella 4.12. In Figura 4.13, invece, vengono rappresentate le curve di filtrato normalizzato e assoluto, mentre in Tabella 4.13 si riportano i relativi valori iniziali e finali.

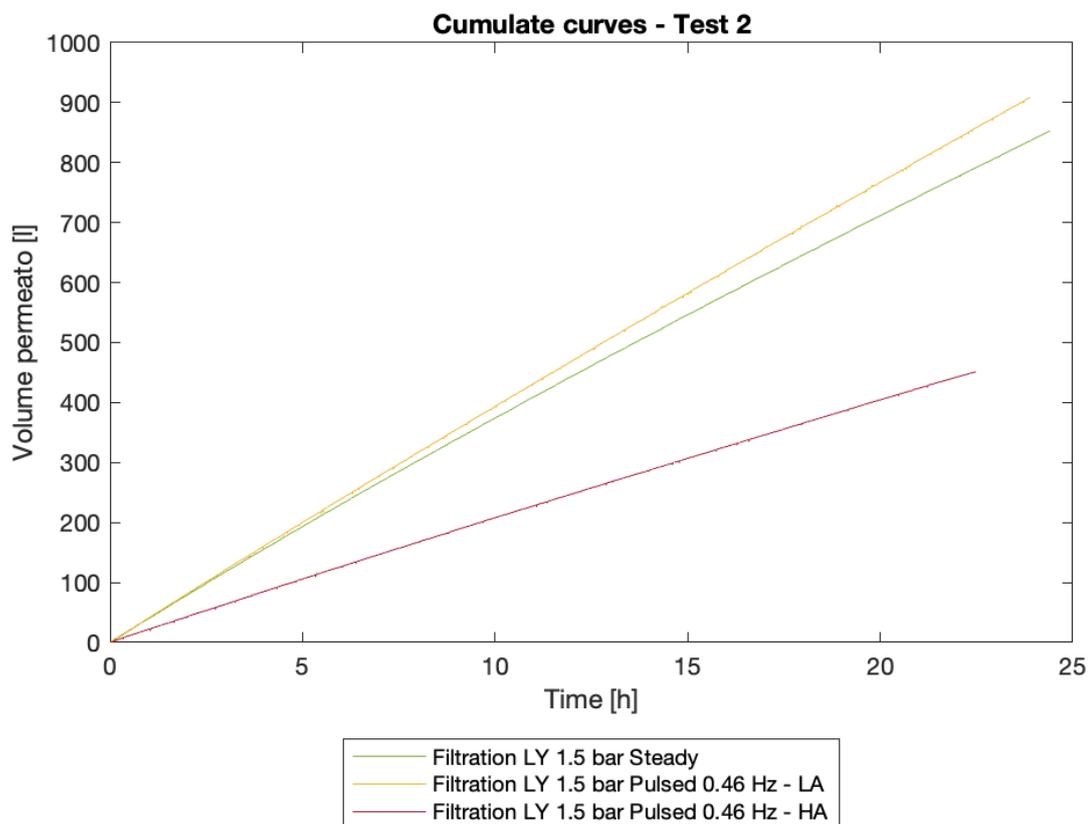


Figura 4.12: Curve cumulate a flusso pulsato - Test 2 a 0.46Hz

Tabella 4.12: Volume totale cumulato di acqua - Test 2 a 0.46Hz

		Pressione [bar]	Durata [h]	Ampiezza [-]	Cumulata [l]
Test 2	Prova 4 Steady	1.5	24	-	853.23
	Prova 7 Pulsed 0.46Hz - L.A.	1.5	24	Bassa	908.89
	Prova 11 Pulsed 0.46Hz - H.A.	1.5	22	Alta	451.01

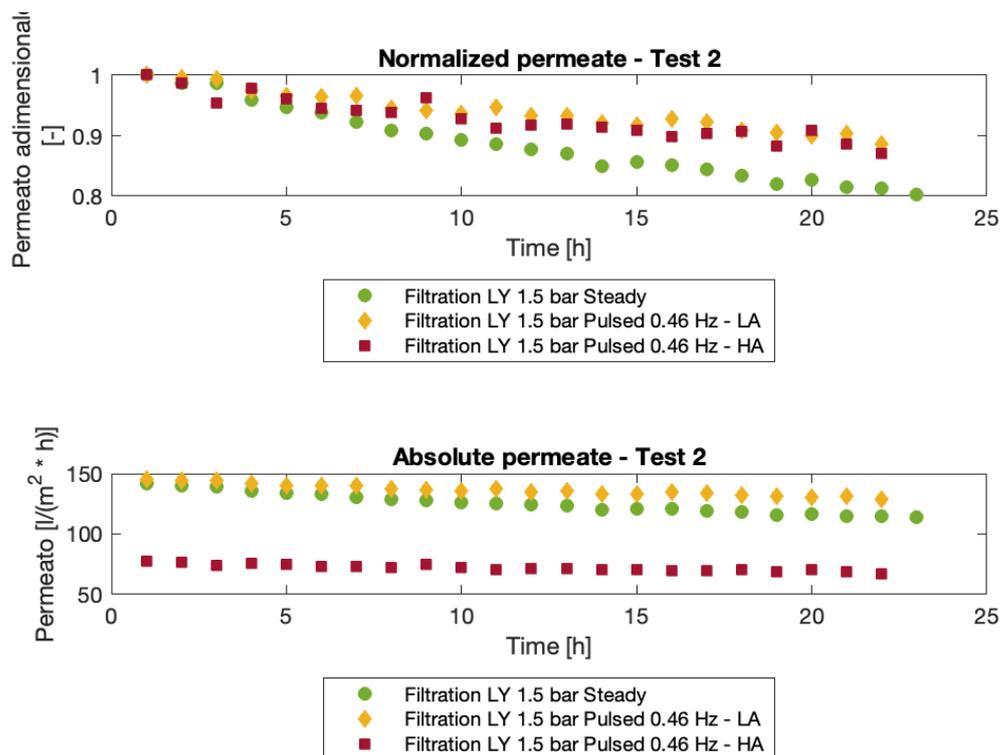


Figura 4.13: Curve di filtrato normalizzato e assoluto a flusso pulsato - Test 2 a 0.46Hz

Tabella 4.13: Valori di filtrato assoluto, normalizzato e di effetto del flusso pulsato rispetto alla Prova 4 a flusso stazionario - Test 2 a 0.46Hz

		Permeato max. [l/(m <sup>2</sup> h)]	Permeato min. [l/(m <sup>2</sup> h)]	Permeato adimens. [-]	Capacità membrana [%]	Effetto pulsato [%]
Test 2	Prova 4 Steady	141.45	113.50	0.80	-20%	-
	Prova 7 Pulsed 0.46Hz - L.A	145.01	128.48	0.89	-11%	+45%
	Prova 11 Pulsed 0.46Hz - H.A	77.40	67.30	0.87	-13%	+35%

Da questi dati si evince come, anche per quanto riguarda il Test 2, si hanno effetti benefici del flusso pulsato sul clogging delle membrane, sia per basse che per alte ampiezze. Il miglior effetto benefico si ha a basse ampiezze, con una riduzione di clogging del 45% (dopo 23 ore) rispetto al flusso stazionario che, a fine prova, riduce le capacità della membrana del 20% rispetto al suo stato iniziale (100%). Non è tuttavia trascurabile l'effetto benefico prodotto dalla prova condotta ad alte ampiezze, che vede ridurre il clogging sulla superficie della membrana del 35% (dopo 23 ore)rispetto quella a flusso stazionario. Dall'analisi di permeato dimensionale, invece, si vede come anche in questo test la prova ad alte ampiezze abbia valori significativamente inferiori rispetto alle prove a flusso stazionario e pulsato a bassa ampiezza.

L'aumento dello sporco sulle membrane relative alle stesse prove è visibile, in modo qualitativo, dall'incremento del valore di "*yellowness*" nei grafici di analisi delle fotografie catturate in modalità timelapse in Appendice A contestualmente alle prove numero 7 e 11. In Tabella 4.14 sono riportati i valori finali di ingiallimento della suddetta analisi.

Tabella 4.14: Valori finali di ingiallimento della membrana - Test 2 a 0.46Hz

		Ingiallimento max. monte [%]	Ingiallimento max. centro [%]	Ingiallimento max. valle [%]
Test 2	Prova 4 Steady	36.62	40.41	31.60
	Prova 7 Pulsed 0.46Hz - L.A	18.35	20.26	11.90
	Prova 11 Pulsed 0.46Hz - H.A	26.34	31.44	21.18

### Test 3: 1.27Hz

Analogamente a quelle del "Test 1" e del "Test 2", vengono riportate di seguito le analisi dati e delle immagini del "Test 3". Questo test confronta la Prova 4 a flusso stazionario, la Prova 8 a 1.27Hz a bassa ampiezza e la Prova 12 a 1.27Hz ad alta ampiezza. In Figura 4.14 sono riportate le curve cumulate di filtrato, i cui valori finali sono riportati in Tabella 4.15. In Figura 4.15, invece, vengono rappresentate

le curve di filtrato normalizzato e assoluto, mentre in Tabella 4.16 si riportano i relativi valori iniziali e finali.

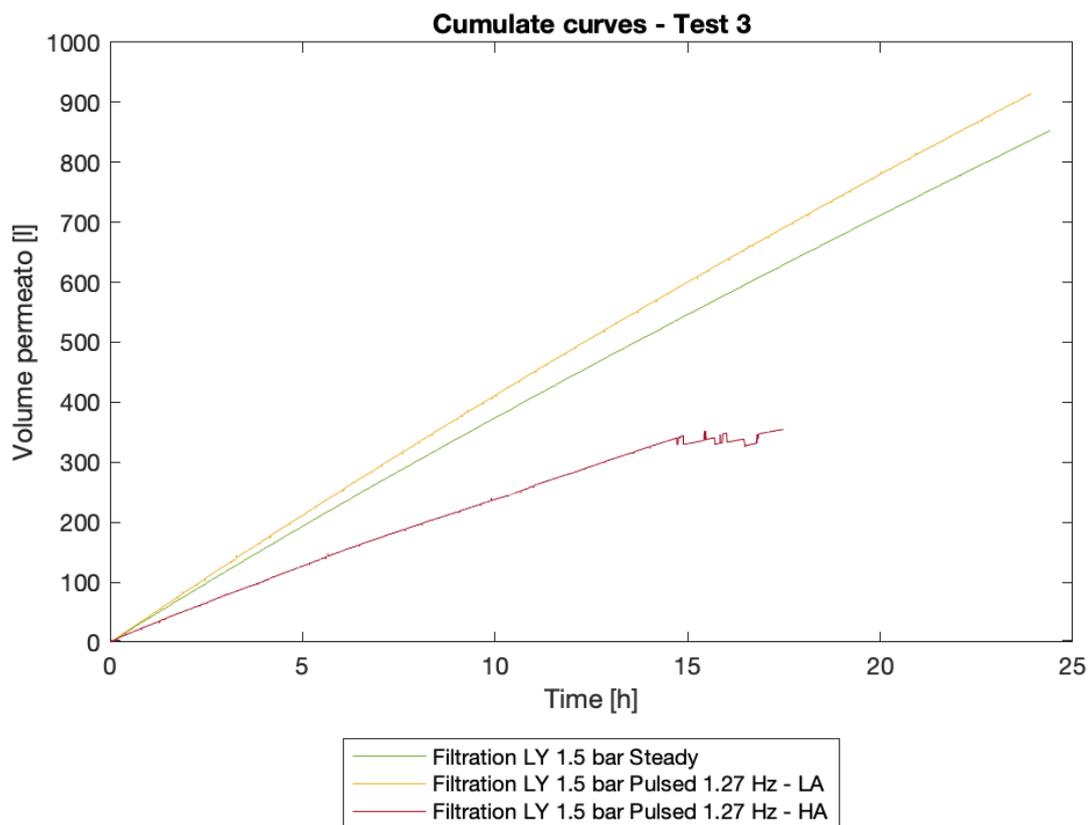


Figura 4.14: Curve cumulate a flusso pulsato - Test 3 a 1.27Hz

Tabella 4.15: Volume totale cumulato di acqua - Test 3 a 1.27Hz

		Pressione [bar]	Durata [h]	Ampiezza [-]	Cumulata [l]
Test 3	Prova 4 Steady	1.5	24	-	853.23
	Prova 8 Pulsed 1.27Hz - L.A.	1.5	24	Bassa	915.36
	Prova 12 Pulsed 1.27Hz - H.A.	1.5	17	Alta	354.99

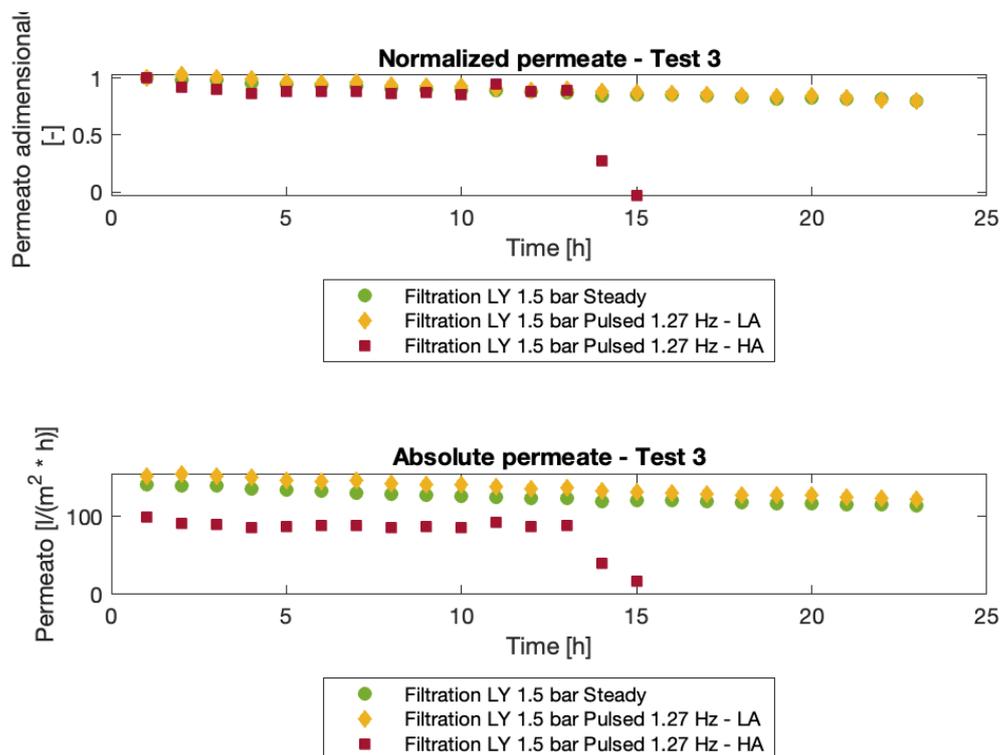


Figura 4.15: Curve di filtrato normalizzato e assoluto a flusso pulsato - Test 3 a 1.27Hz

Tabella 4.16: Valori di filtrato assoluto, normalizzato e di effetto del flusso pulsato rispetto alla Prova 4 a flusso stazionario - Test 3 a 1.27Hz

		Permeato max. [l/(m <sup>2</sup> h)]	Permeato min. [l/(m <sup>2</sup> h)]	Permeato adimens. [-]	Capacità membrana [%]	Effetto pulsato [%]
Test 3	Prova 4 Steady	141.45	113.50	0.80	-20%	-
	Prova 8 Pulsed 1.27Hz - L.A	151.52	121.63	0.80	-20%	0%
	Prova 12 Pulsed 1.27Hz - H.A	99.20	88.46	0.89*	-11%	+45%

\*0.89, conseguente a una riduzione dell'11% della capacità della membrana ad alte ampiezze a 1.27Hz, è da considerarsi alla tredicesima ora.

Da questi dati si evince come, a differenza dei primi due test, si è avuto un problema ad alte ampiezze dopo la tredicesima ora. Considerando pertanto gli effetti prodotti a quell'istante di tempo si può vedere che non si hanno evidenti effetti benefici rispetto alla prova di riferimento a flusso stazionario, se non solo contestualmente alla prova a basse ampiezze che riduce sensibilmente l'effetto del clogging sulle membrane, giungendo dopo 24 ore alla stessa riduzione che si ottiene a flusso stazionario. Dall'analisi di permeato dimensionale, invece, si vede come anche in questo test la prova ad alte ampiezze abbia valori significativamente inferiori rispetto alle prove a flusso stazionario e pulsato a bassa ampiezza.

L'aumento dello sporco sulle membrane relative alle stesse prove è visibile, in modo qualitativo, dall'incremento del valore di "yellowness" nei grafici di analisi delle fotografie catturate in modalità timelapse in Appendice A contestualmente alle prove numero 8 e 12. In Tabella 4.17 sono riportati i valori finali di ingiallimento della suddetta analisi.

Tabella 4.17: Valori finali di ingiallimento della membrana - Test 3 a 1.27Hz

		Ingiallimento max. monte [%]	Ingiallimento max. centro [%]	Ingiallimento max. valle [%]
Test 3	Prova 4 Steady	36.62	40.41	31.60
	Prova 8 Pulsed 1.27Hz - L.A	26.95	31.57	22.48
	Prova 12 Pulsed 1.27Hz - H.A	18.41	23.89	15.34

#### Test 4: 2.25Hz

Analogamente a quelle del "Test 1", del "Test 2" e del "Test 3" vengono riportate di seguito le analisi dati e delle immagini del "Test 4". Questo test confronta la Prova 4 a flusso stazionario, la Prova 9 a 2.25Hz a bassa ampiezza e la Prova 13 a 2.25Hz ad alta ampiezza. In Figura 4.16 sono riportate le curve cumulate di filtrato, i cui valori finali sono riportati in Tabella 4.18. In Figura 4.17, invece, vengono rappresentate

le curve di filtrato normalizzato e assoluto, mentre in Tabella 4.19 si riportano i relativi valori iniziali e finali.

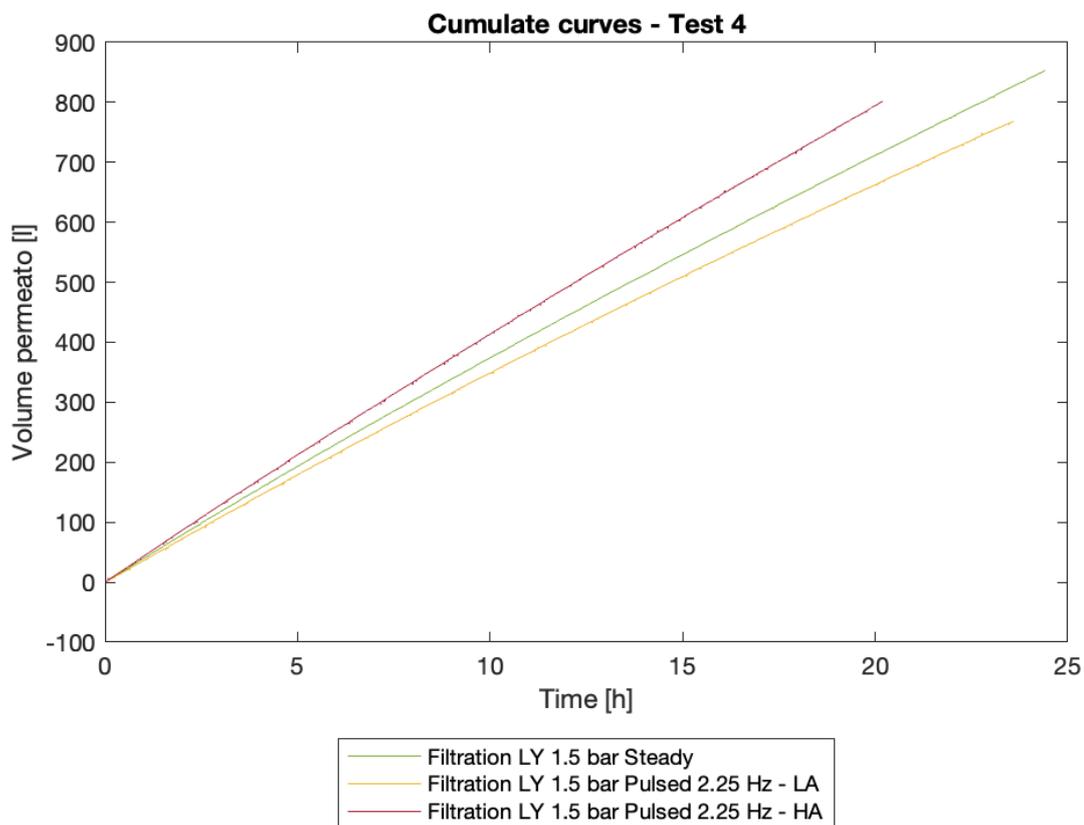


Figura 4.16: Curve cumulate a flusso pulsato - Test 4 a 2.25Hz

Tabella 4.18: Volume totale cumulato di acqua - Test 4 a 2.25Hz

		Pressione [bar]	Durata [h]	Ampiezza [-]	Cumulata [l]
Test 4	Prova 4 Steady	1.5	24	-	853.23
	Prova 9 Pulsed 2.25Hz - L.A.	1.5	23	Bassa	768.65
	Prova 13 Pulsed 2.25Hz - H.A.	1.5	20	Alta	801.94

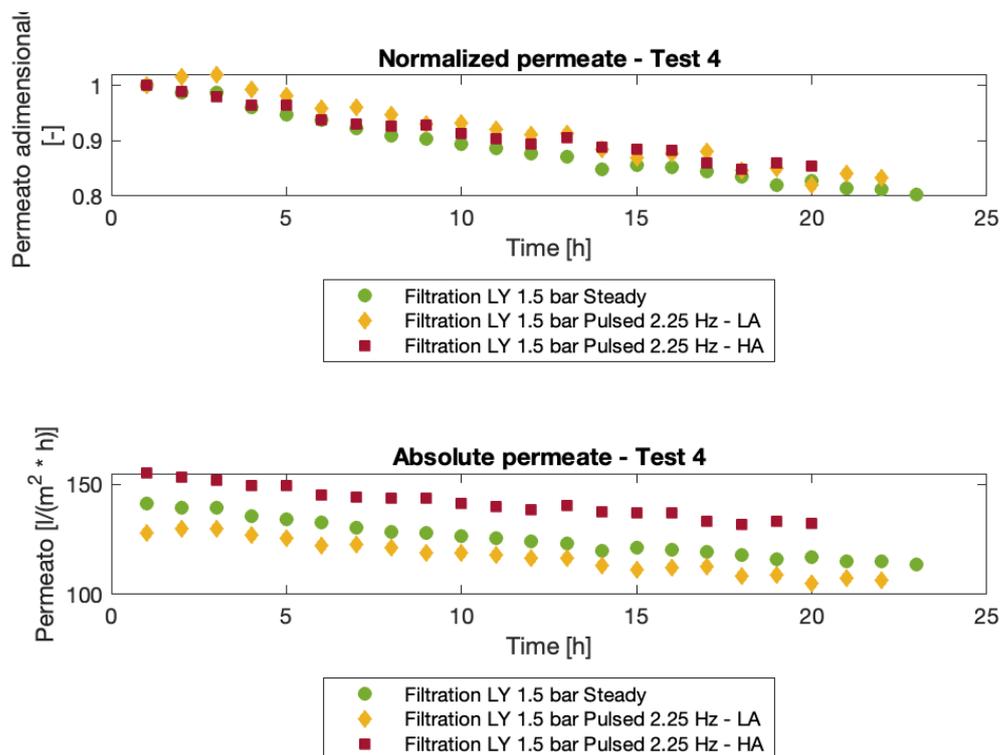


Figura 4.17: Curve di filtrato normalizzato e assoluto a flusso pulsato - Test 4 a 2.25Hz

Tabella 4.19: Valori di filtrato assoluto, normalizzato e di effetto del flusso pulsato rispetto alla Prova 4 a flusso stazionario - Test 4 a 2.25Hz

		Permeato max. [l/(m <sup>2</sup> h)]	Permeato min. [l/(m <sup>2</sup> h)]	Permeato adimens. [-]	Capacità membrana [%]	Effetto pulsato [%]
Test 4	Prova 4 Steady	141.45	113.50	0.80	-20%	-
	Prova 9 Pulsed 2.25Hz - L.A	127.76	106.58	0.83	-17%	+15%
	Prova 13 Pulsed 2.25Hz - H.A	155.01	132.35	0.85	-15%	+25%

Da questi dati si evince infine come, per quanto riguarda il Test 4, al termine delle prove si hanno effetti benefici del flusso pulsato sul clogging delle membrane, sia per basse che per alte ampiezze. Prendendo come riferimento i risultati ottenuti alla ventesima ora (l'ultima disponibile per la prova ad alte ampiezze) il miglior effetto benefico si ha ad alte ampiezze, con una riduzione di clogging del 25% rispetto al flusso stazionario che, a fine prova, riduce le capacità della membrana del 20% rispetto al suo stato iniziale (100%). Non è tuttavia trascurabile l'effetto benefico prodotto dalla prova condotta a basse ampiezze, che vede ridurre il clogging sulla superficie della membrana del 15% (dopo 22 ore) rispetto quella a flusso stazionario. Degna di nota la prova a basse ampiezze che, fino alla tredicesima ora, registrava il miglior effetto benefico rispetto a quella ad alte ampiezze. Infine, dall'analisi di permeato dimensionale si vede come, per quest'unico test, la prova ad alte ampiezze abbia valori superiori rispetto alle prove a flusso stazionario e pulsato a bassa ampiezza.

L'aumento dello sporco sulle membrane relative alle stesse prove è visibile, in modo qualitativo, dall'incremento del valore di "yellowness" nei grafici di analisi delle fotografie catturate in modalità timelapse in Appendice A contestualmente alle prove numero 9 e 13. In Tabella 4.20 sono riportati i valori finali di ingiallimento della suddetta analisi.

Tabella 4.20: Valori finali di ingiallimento della membrana - Test 4 a 2.25Hz

		Ingiallimento max. monte [%]	Ingiallimento max. centro [%]	Ingiallimento max. valle [%]
Test 4	Prova 4 Steady	36.62	40.41	31.60
	Prova 9 Pulsed 2.25Hz - L.A	17.27	22.17	11.80
	Prova 13 Pulsed 2.25Hz - H.A	34.83	37.16	26.82

## Capitolo 5

# Conclusioni

Rispetto all'obiettivo numero 1 ci si può ritenere soddisfatti perchè il set up sperimentale consente di svolgere le prove e valutare gli effetti del clogging a flussi stazionari e pulsati. Rispetto all'obiettivo 2 si è visto che a flusso stazionario, generalmente, fino a  $1.5bar$  il clogging diminuisce. A  $2bar$  invece, contrariamente rispetto alla comprensione intuitiva, il clogging non si riduce in maniera costante ma vede assestare i valori finali di permeato adimensionale tra quelli a  $1bar$  e a  $1.5bar$  (Figura 4.7). Questo risultato è da chiarire con ulteriori studi. Contestualmente all'obiettivo numero 3 si è dimostrato come, per basse frequenze, ci sia una diminuzione del clogging. Infatti, il miglior effetto benefico dei flussi pulsati si è registrato nel "Test 1" a  $0.09Hz$  dove, a basse ampiezze, al termine dell'esperimento si riduce il clogging del 55% rispetto alla prova di riferimento a flusso stazionario. In generale, tutte le frequenze a flusso pulsato apportano effetti benefici, seppur inferiori rispetto a quelle a bassa frequenza, contestualmente alle prove a  $2.25Hz$  in cui l'effetto benefico è al massimo del 25% ad alte ampiezze o alla prova a  $1.27Hz$  a basse ampiezze che, al termine della prova, raggiunge il medesimo effetto che si avrebbe a flusso stazionario. Riguardo ai valori di permeato dimensionale invece, per i primi 3 test, quelli relativi alle prove ad alta ampiezza sono significativamente inferiori rispetto alle prove a flusso stazionario e pulsato a bassa ampiezza, con eccezione fatta per l'ultimo test a  $2.25Hz$  in cui i valori di permeato dimensionale ad alte ampiezze sono maggiori dei due a flusso stazionario e pulsato a basse ampiezze. Rimangono pertanto delle incoerenze contestualmente alle prove ad alte ampiezze che devono essere chiarite da studi futuri.

# Appendice A

# Appendice

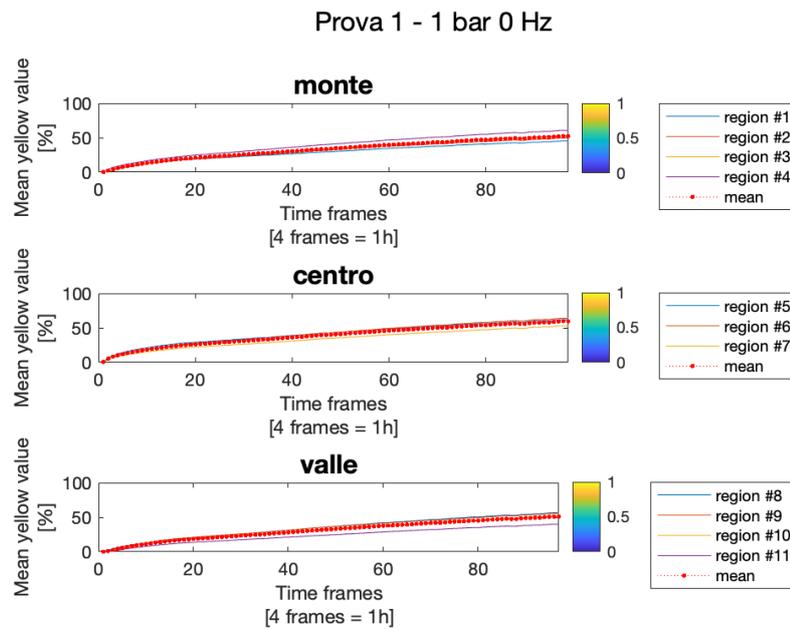


Figura A.1: Analisi qualitativa di ingiallimento della membrana a flusso stazionario

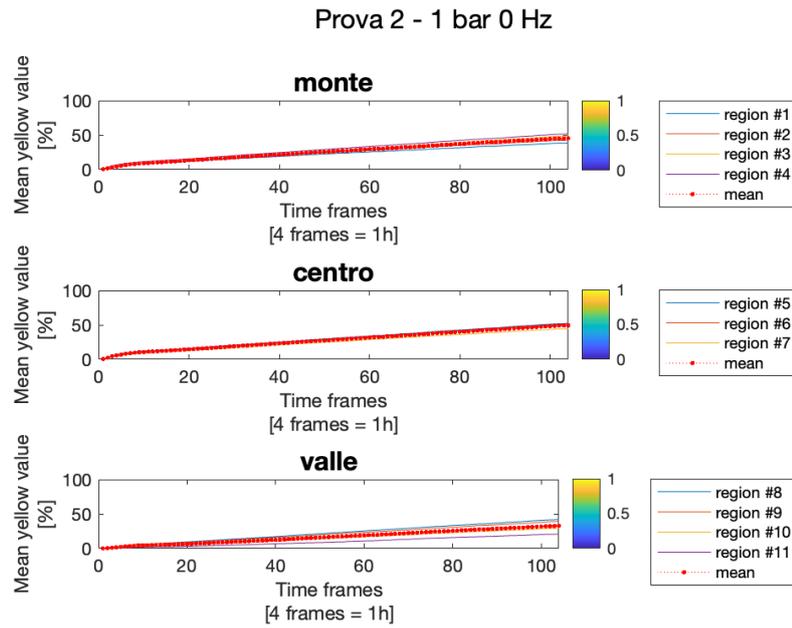


Figura A.2: Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso stazionario

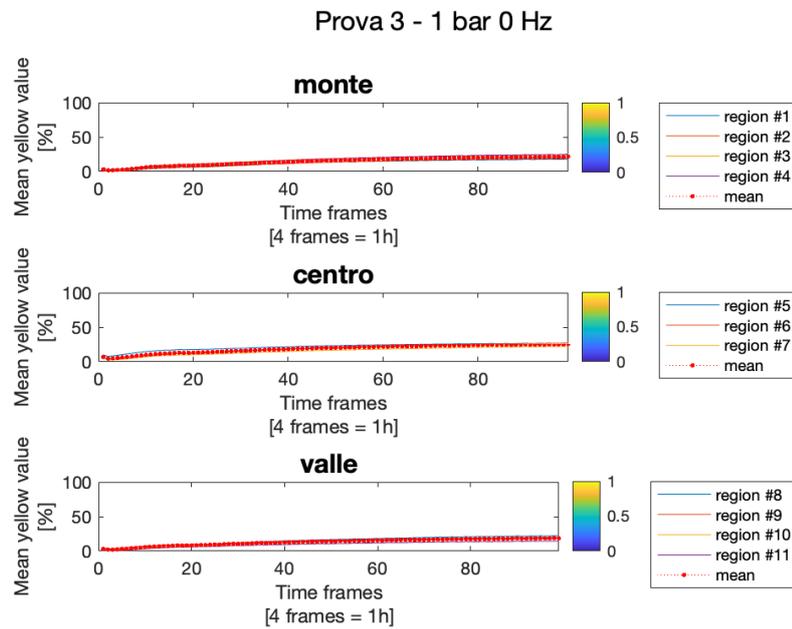


Figura A.3: Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso stazionario

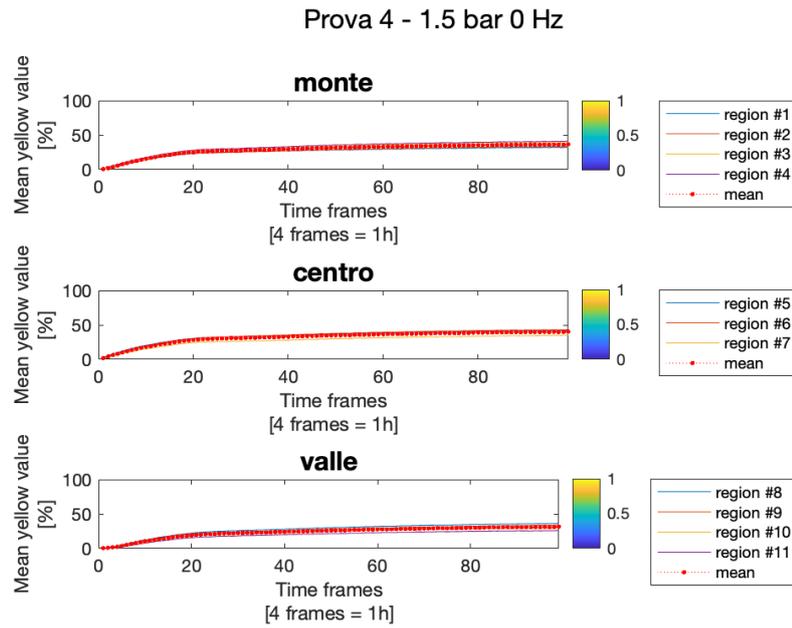


Figura A.4: Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso stazionario

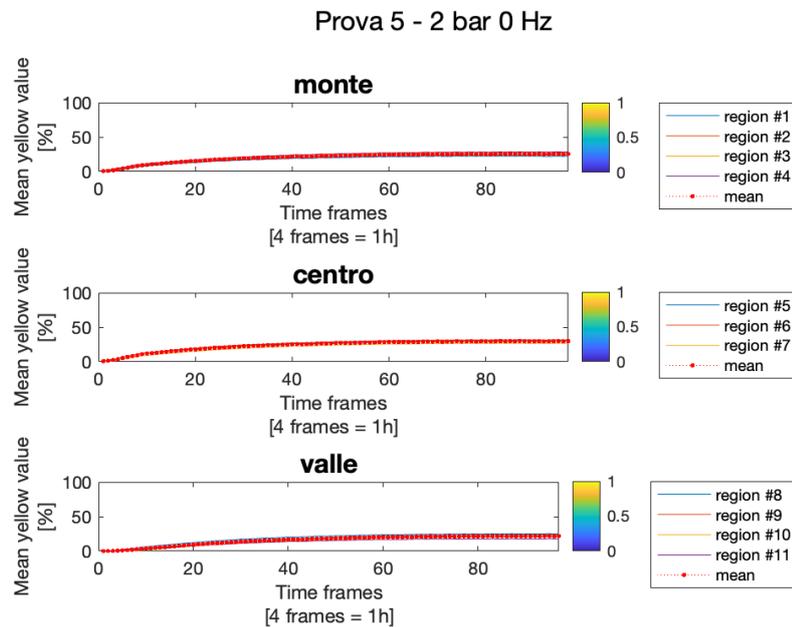


Figura A.5: Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso stazionario

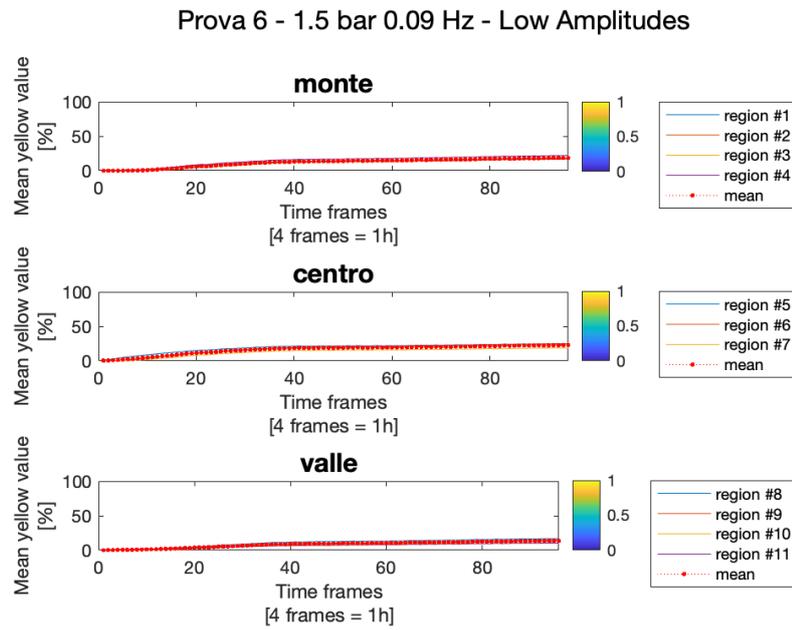


Figura A.6: Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato

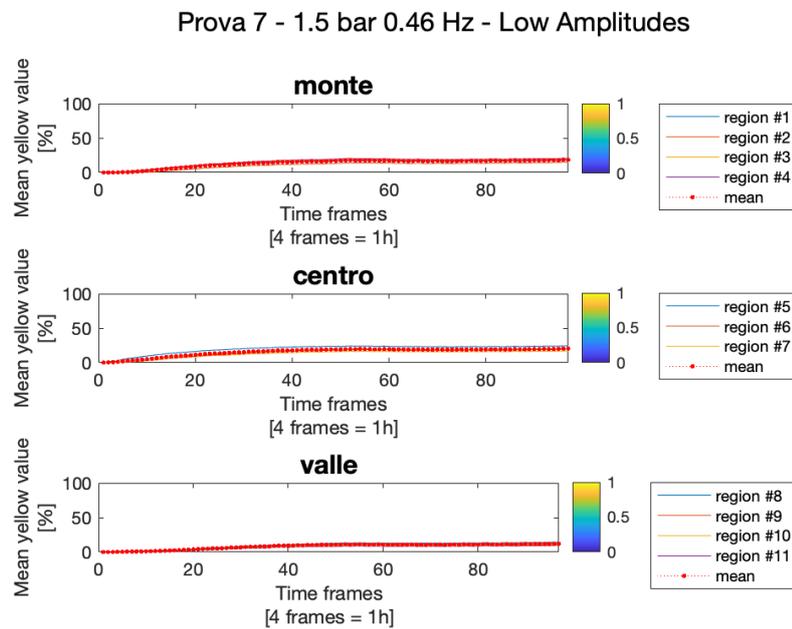


Figura A.7: Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato

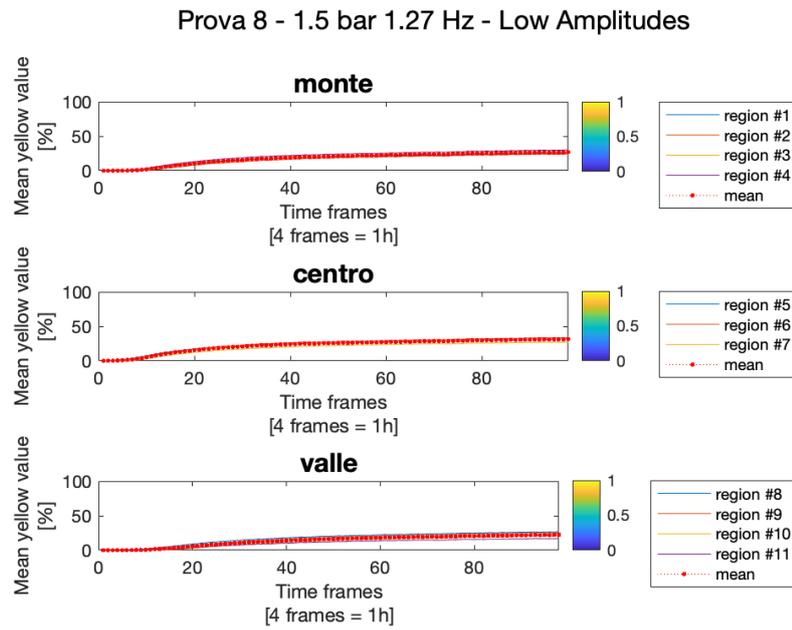


Figura A.8: Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato

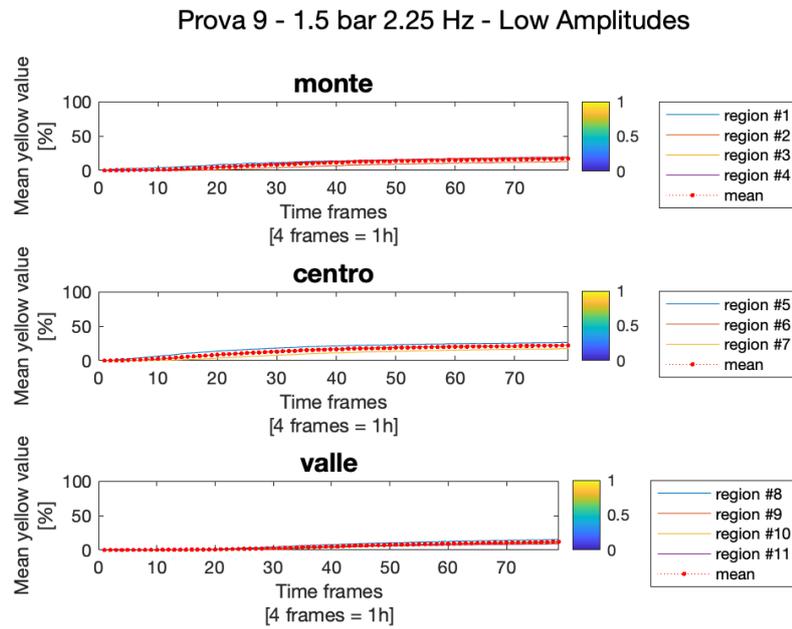


Figura A.9: Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato

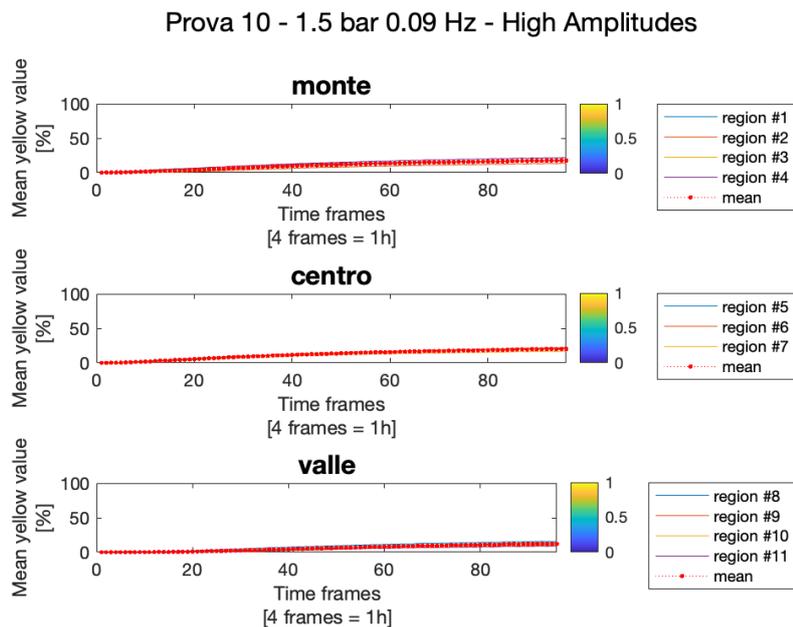


Figura A.10: Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato

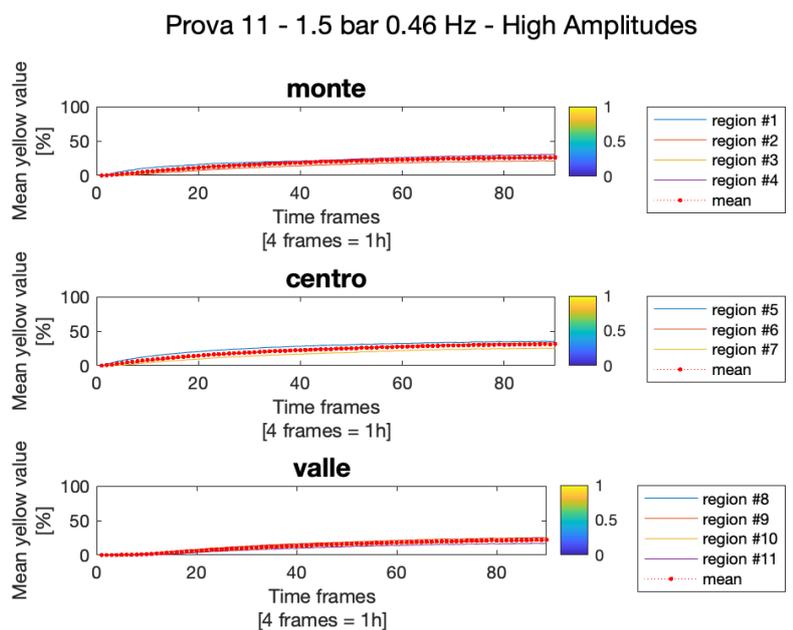


Figura A.11: Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato

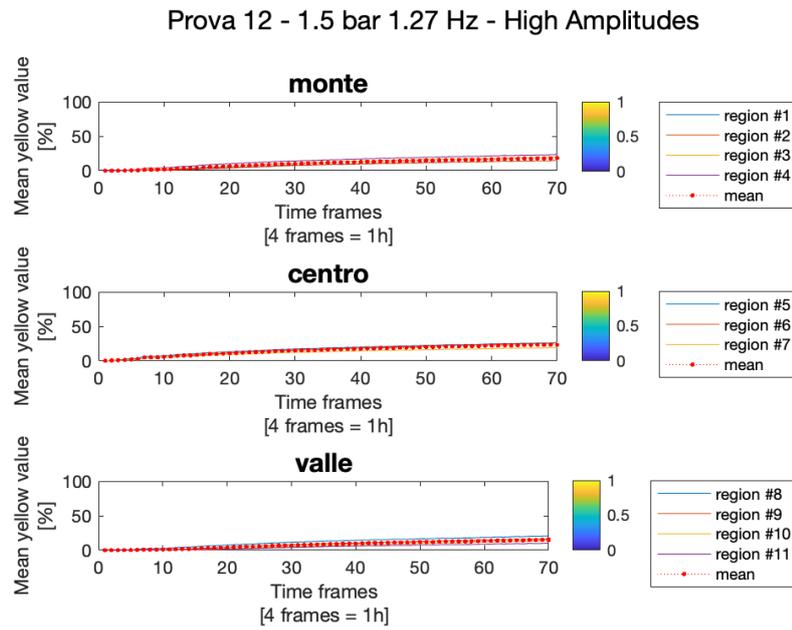


Figura A.12: Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato

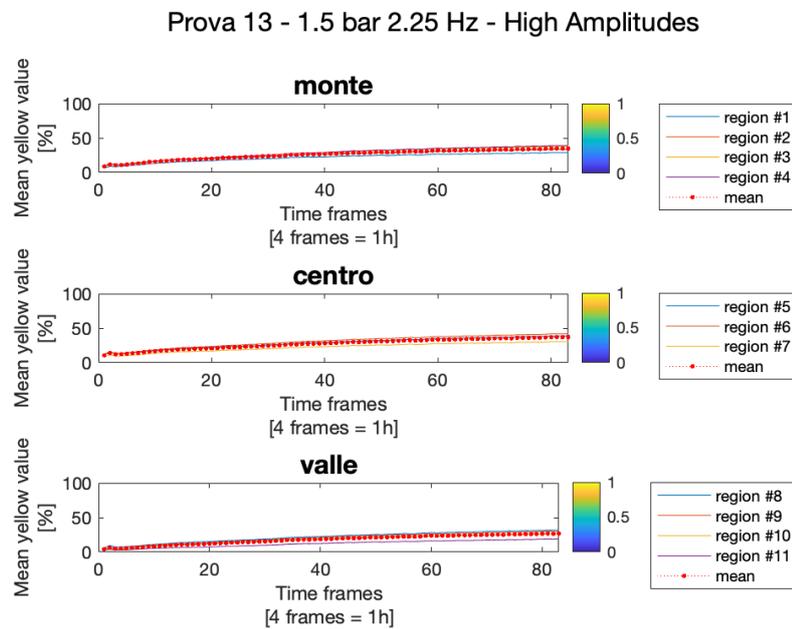


Figura A.13: Analisi qualitativa dell'ingiallimento della membrana a flusso pulsato

# Bibliografia

- [1] R.W. Baker. *Membrane Technology and Applications*. Wiley, 2004. ISBN: 9780470854457.
- [2] M. Bier. *Membrane Processes in Industry and Biomedicine: Proceedings of a Symposium held at the 160th National Meeting of the American Chemical Society, under the sponsorship of the Division of Industrial and Engineering Chemistry, Chicago, Illinois, September 16 and 17, 1970*. Springer US, 2012. ISBN: 9781468419115.
- [3] S.F. Boerlage. *Scaling and Particulate Fouling in Membrane Filtration Systems*. IHE Dissertation. Taylor & Francis, 2001. ISBN: 9789058092427.
- [4] M. Businelli. *Principi di chimica del suolo*. Morlacchi, 2007. ISBN: 9788860740854.
- [5] C. Garavelli e C. Cipriani. *Cristallografia chimica e mineralogia speciale*. Trattato di mineralogia. UTET, 1994. ISBN: 9788802048925.
- [6] K. Konieczny e M. Bodzek. *Ultrafiltration of latex wastewaters*. 1996.
- [7] R. Larsen, E. Morinello e T. Ziegenfuß. *La respirazione artificiale: Basi e pratica*. Springer Milan, 2012. ISBN: 9788847023826.
- [8] Richard M. Mcdonogh, Anthony G. Fane e Christopher J.D. Fell. «Charge effects in the cross-flow filtration of colloids and particulates». In: *Journal of Membrane Science* 43.1 (1989), pp. 69–85. ISSN: 0376-7388.
- [9] V. Naddeo e V. Belgiorno. *Bioreattori a membrane per il trattamento delle acque reflue*. Lulu.com, 2015. ISBN: 9781471750977.
- [10] V. Naddeo, T. Zarra e V. Belgiorno. *Trattamenti biologici avanzati*. Lulu.com, 2012. ISBN: 9781326452988.
- [11] M. Raboni, V. Torretta e G. Urbini. *Ingegneria sanitaria ambientale: Processi e impianti*. Dario Flaccovio Editore, 2015. ISBN: 9788857903583.

## BIBLIOGRAFIA

---

- [12] Wikipedia. *Pistone (idraulica)* — *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online; in data 2-marzo-2022]. 2020.
- [13] Wikipedia. *Processo a membrana* — *Wikipedia, L'enciclopedia libera*. [Online; in data 22-febbraio-2022]. 2022.