POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile – curriculum Idraulica

A.a. 2021/2022

Sessione di Laurea marzo 2022

Metodi meccanici di disinfezione delle acque

Relatore: Candidato:

Prof. Costantino Manes Niccolò Passaniti

ABSTRACT

La cavitazione idrodinamica è un fenomeno che sta riscuotendo sempre maggior interesse nel campo idraulico; in particolare nell'ambito della disinfezione delle acque risulta essere una delle metodologie maggiormente studiate al fine di determinare valide alternative all'utilizzo della clorazione come procedura che garantisca gli standard qualitativi all'acqua per poter essere considerata potabile.

Nel seguente progetto di tesi si è cercato di indagare maggiormente l'efficacia dei fenomeni cavitativi e anche turbolenti nell'abbattimento dei microrganismi quali ad esempio l'Escherichia Coli.

Nel circuito sperimentale utilizzato, il forte salto negativo di pressione necessario alla cavitazione viene ricreato inducendo l'acqua a passare attraverso un foro di piccole dimensioni. L'acqua, all'interno del foro subisce una forte depressione che la porta a bollire; quando poi la pressione viene ristabilita più a valle, le bolle cominciano ad implodere violentemente, generando una miriade di piccoli urti tipici dei fenomeni cavitativi che sembrano avere una buona efficacia sull'abbattimento dei microrganismi.

Gli obiettivi del seguente lavoro sono stati in primis la valutazione dell'effettiva efficacia della cavitazione in ambito battericida anche attraverso il confronto con prove in assenza di questa o con prove denominate di tipologia 'ibrida' in cui venivano combinate insieme nuove e consolidate metodologie. In secondo luogo, è sorto il dubbio se non fossero sufficienti i soli sforzi tangenziali derivanti da fenomeni turbolenti per garantire un abbattimento dei microrganismi e si è dunque indagato tale fenomeno. Da ultimo si è proceduto alla realizzazione di un impianto pilota presso SMAT S.p.A., che lavorasse su scala più ampia e consentisse la valutazione di un'effettiva applicabilità delle evidenze ricavate su piccola scala anche su volumi maggiori.

Le analisi sono state effettuate facendo variare parametri come il numero di cavitazione e il numero di giri all'interno del circuito e sono state effettuate svariate tipologie di prove quali quelle statiche, quelle con sola cavitazione o quelle ibride.

Per la realizzazione delle prove turbolente senza però indurre cavitazione, è stato invece necessario apportare alcune modifiche al circuito di modo che questo risultasse essere in pressione.

Mediamente si è notata una correlazione importante tra tempo di trattamento e concentrazione dei microrganismi finale, andando a determinare un aumento dell'efficacia dell'abbattimento all'aumentare del tempo di trattamento sia nel caso di trattamento con cavitazione che nel caso di sola turbolenza (senza dunque scendere sotto valori di numero di cavitazione inferiori ad 1).

Di contro invece non si è notata una forte influenza del numero di cavitazione sulla capacità di abbattimento e questo ha portato a ipotizzare che bastasse la presenza di cavitazione senza che questa fosse indotta da un salto di pressione importante.

I risultati ottenuti confortano le supposizioni fatte soprattutto per quanto riguarda lo studio dell'abbattimento mediante la sola turbolenza nonostante però siano ancora necessari ulteriori esperimenti per meglio esplicare quelle che ad ora risultano essere supposizioni.

In conclusione, si può affermare che lo studio dei fenomeni turbolenti, seppur con tutta la loro complessità, sembrerebbe avere prospettive promettenti in questo ambito senza dover scomodare la cavitazione che porta inevitabilmente con sé grosse perdite di carico e non sembra avere l'efficacia sperata negli esperimenti eseguiti.

Indice

1 L'acqua come risorsa 16
1.1 La contaminazione dell'acqua 17
1.1.1 I microrganismi presenti 18
1.2 Metodi di disinfezione dell'acqua 21
1.2.1 Metodi chimici 22
1.2.2 Metodi fisici 23
2 Cavitazione 26
2.1 Cavitazione idrodinamica 28
2.1.1 Caratteristiche della cavitazione 30
2.1.2 Dispositivi per la cavitazione 31
2.1.3 La disinfezione mediante cavitazione 35
3 Stato dell'arte 36
4 Metodi sperimentali 39
4.1 Circuito idraulico 39
4.1.1 Serbatoio (punto 1) 43
4.1.2 Strumenti di misura (punti 6, 11, 13) 44
4.1.3 Pompa idraulica 46
4.1.4 Specola 49
4.1.5 Test section 50
4.1.6 Piastra forata 51
4.1.7 Valvola a sfera 52
4.1.8 Scarico 53
4.1.9 Compressore 53

4.1.10 Acquisizione dati 54
4.1.11 Circuito di raffreddamento 55
4.1.12 Strumentazione per prove statiche 57
4.2 Protocolli 59
4.2.1 Prove di ibridazione 59
4.2.2 Prove statiche 66
4.2.3 Prove turbolente 67
4.3 Metodo Colilert-18 71
4.3.1 Introduzione al metodo 71
4.3.2 Protocollo 71
5 Risultati 82
5.1 Prove di ibridazione 84
5.1.1 Id 1- NaClO = 0.05 mg/l 84
5.1.2 Id 1 – NaClO = 0.1 mg/l 85
5.1.3 Id 2 – NaClO = 0.05 mg/l 86
5.1.4 Id 2 – NaClO = 0.1 mg/l 87
5.1.5 Id 3 – NaClO = 0.05 mg/l 88
5.1.6 Id 3 – NaClO = 0.1 mg/l 89
5.1.7 Id 4 – NaClO = 0.05 mg/l 90
5.1.8 Id 4 – NaClO = 0.1 mg/l 91
5.2 Prove statiche 92
5.3 Prove in regime turbolento spinto 93
5.4 Analisi e confronto tra prove 94
5.4.1 Efficacia del pretrattamento 96
5.4.2 Influenza della frequenza 97
5.4.3 Influenza della piastra forata 98

5.4.4 Confronto tra prove turbolente 98

6 Prove di scaling up presso SMAT S.p.A. 100

6.1 Contesto..... 100

6.2 Circuito sperimentale 101

6.2.1 Descrizione del circuito 101

6.2.2 L'impianto pilota 103

6.3 Procedura sperimentale delle prove 112

6.4 Risultati 113

7 Conclusioni e sviluppi futuri 114

8 Bibliografia 116

Elenco delle Figure

Figura 1.1 Carta mondiale con le percentuali di non accesso all'acqua potabile [6] 16
Figura 1.2 Carta dell'assenza dei servizi igienici di base [6] 17
Figura 1.3 Tasso di mortalità dovuto ad acqua non sicura (per 100000 ab.) [13] .. 18
Figura 1.4 Escherichia coli visti al microscopio elettronico 19
Figura 1.5 Riassunto dei microrganismi elencati [16] 21
Figura 1.6 Assorbimento del DNA in funzione della lunghezza d'onda. [22] 24
Figura 1.7 Schema del processo di ultrafiltrazione [23] 25
Figura 2.1 Effetti della cavitazione su un'elica. 27
Figura 2.2 Andamento delle pressioni in un venturimetro [28] 29
Figura 2.3 Formazione di un microgetto a seguito di collasso asimmetrico [31] .. 30
Figura 2.4 Caratterizzazione di thin e thick plate. 32
Figura 2.5 Cavitazione in atto su piastra monoforo 32
Figura 2.6 Tipologie di Venturimetri A) a fessura, B) circolare e C) ellittico [28] . 34
Figura 3.3 Condizioni sperimentali per le prove a quattro fori (rifacimento prove Burzio et al (2020)) [1] 38
Figura 3.4 Caratteristiche idrodinamiche delle prove eseguite per un solo foro .. 38
Figura 4.1 Vista d'insieme del circuito sperimentale 40
Figura 4.2 Schema idraulico semplificato del funzionamento del circuito 41
Figura 4.3 Indicazione dei pezzi componenti il circuito sperimentale 42
Figura 4.4 Pompa elettrica utilizzata per il riempimento del serbatoio 44
Figura 4.5 Sommità graduata e punto di attacco del piezometro installato nel circuito 44
Figura 4.6 A sinistra: sensore ad ultrasuoni per la misurazione della portata; a destra: lettore di portata 45
Figura 4.7 Manometri di monte e di valle durante le prove in regime turbolento45
Figura 4.8 Termocoppia per la misurazione della temperatura dell'acqua nel circuito 46
Figura 4.9 Curve caratteristiche della pompa 47
Figura 4.10 Immagine della pompa utilizzata 48

Figura 4.11 Particolare costruttivo della pompa 48
Figura 4.12 Schermata di gestione a distanza della pompa 49
Figura 4.13 Specola in vetro utilizzata 50
Figura 4.14 Test section utilizzata con piastra forata evidenziata 51
Figura 4.15 Piastra forata utilizzata per indurre cavitazione 52
Figura 4.16 Principio di funzionamento della valvola a sfera a seconda dell'angolo di apertura α 53
Figura 4.17 Compressore Dari Smart 24/210 54
Figura 4.18 Interfaccia grafica del programma utilizzato per le acquisizioni. 55
Figura 4.19 Chiller in funzione 56
Figura 4.20 A sinistra: particolare di una serpentina da inserire nel serbatoio; a destra: collegamenti tra le serpentine per il corretto ricircolo del liquido di raffreddamento. 57
Figura 4.21 Recipiente utilizzato per lo svolgimento delle prove statiche. 58
Figura 4.22 Colorimetro e strumenti utilizzati 58
Figura 4.23 Esempio di flacone di ipoclorito di sodio utilizzato; ogni flacone è stato rivestito di alluminio poiché l'ipoclorito è fotosensibile. 60
Figura 4.24 Riepilogo degli esperimenti di ibridazione effettuati 61
Figura 4.25 Timeline dei campionamenti eseguiti 62
Figura 4.26 Flacone di sodio tiosolfato utilizzato sia per la pulizia del circuito che da inserire nei campioni prelevati (1 ml per campione) 63
Figura 4.27 Esempio di valvola utilizzata per il circuito in pressione 68
Figura 4.28 Particolare dell'attacco tra condotta di adduzione dell'acqua e serbatoio in pressione 69
Figura 4.29 Flacone utilizzato IDEXX 100 ml. 72
Figura 4.30 Pipetta graduata utilizzata 73
Figura 4.31 BiPette utilizzata per gli esperimenti 73
Figura 4.32 Immagine del purificatore per acqua Milli-Q 74
Figura 4.33 Reagenti Colilert-18 utilizzati. 74
Figura 4.34 A sinistra: campione con reagente in fase di dissoluzione; a destra: immagine d'insieme durante il processo di inserimento dei reagenti 75

Figura 4.35 Vaschetta Quanti-Tray/2000 76
Figura 4.36 Sigillatore per vaschette utilizzato (Quanti-Tray sealer). 77
Figura 4.37 A sinistra: Temperatura presente nell'incubatore utilizzato; a destra: vaschette impilate all'interno dell'incubatore. 77
Figura 4.38 Vaschette Quanti-Tray a seguito della fase di incubazione..... 78
Figura 4.39 Vaschetta con lettura dei dati in corso..... 79
Figura 4.40 Confronto tra vaschetta fluorescente (con presenza di E. coli) e non. 80
Figura 4.41 Tabella MPN utilizzata per l'analisi del Quanti-Tray/2000..... 81
Figura 4.42 Schermata del software di analisi per la conta batterica 81
Figura 5.1 Abbattimento id 1.1-1.2-1.3 in termini assoluti. 84
Figura 5.2 Abbattimento 1.1-1.2-1.3 in termini percentuali..... 85
Figura 5.3 Abbattimento id 1.4-1.5-1.6 in termini assoluti. 85
Figura 5.4 Abbattimento id 1.4-1.5-1.6 in termini percentuali..... 86
Figura 5.5 Abbattimento id 2.1-2.2-2.3 in termini assoluti. 86
Figura 5.6 Abbattimento id 2.1-2.2-2.3 in termini percentuali..... 87
Figura 5.7 Abbattimento id 2.4-2.5-2.6 in termini assoluti. 87
Figura 5.8 Abbattimento id 2.4-2.5-2.6 in termini percentuali..... 88
Figura 5.9 Abbattimento id 3.1-3.2-3.3 in termini assoluti. 88
Figura 5.10 Abbattimento id 3.1-3.2-3.3 in termini percentuali..... 89
Figura 5.11 Abbattimento id 3.4-3.5-3.6 in termini assoluti..... 89
Figura 5.12 Abbattimento id 3.4-3.5-3.6 in termini percentuali..... 90
Figura 5.13 Abbattimento id 4.1-4.2-4.3 in termini assoluti..... 90
Figura 5.14 Abbattimento id 4.1-4.2-4.3 in termini percentuali..... 91
Figura 5.15 Abbattimento id 4.4-4.5-4.6 in termini assoluti..... 91
Figura 5.16 Abbattimento id 4.4-4.5-4.6 in termini percentuali..... 92
Figura 5.17 Risultati derivanti dalle prove statiche in termini di abbattimento assoluto. 93
Figura 5.18 Risultati derivanti dalle prove statiche in termini di abbattimento percentuale..... 93
Figura 5.19 Abbattimento percentuale per le prove turbolente effettuate. 94
Figura 5.20 Confronto tra le concentrazioni utilizzate per le prove con id 1. 94

Figura 5.21 Confronto tra le concentrazioni utilizzate per le prove con id 2. 95
Figura 5.22 Confronto tra le concentrazioni utilizzate per le prove con id 3. 95
Figura 5.23 Confronto tra le concentrazioni utilizzate per le prove con id 4. 96
Figura 5.24 Confronto tra prove con e senza il pretrattamento..... 96
Figura 5.25 Confronto tra prove a frequenza variabile e prove a frequenza costante a 45 Hz. 97
Figura 5.26 Influenza della piastra forata sull'efficacia dell'abbattimento. 98
Figura 5.27 Confronto tra prove turbolente svolte da Passaniti e precedenti di Davello (2020). 99
Figura 6.1 vista d'insieme e legenda dell'impianto di potabilizzazione di corso unità d'Italia 101
Figura 6.2 Step caratterizzanti l'impianto..... 102
Figura 6.3 Schema di funzionamento di un chiarificatore tipo CYCLOFLOC in uso presso l'impianto 102
Figura 6.4 Circuito pilota progettato 103
Figura 6.5 Vista dell'interno del serbatoio con agitatore ben visibile 105
Figura 6.6 Misuratore di portata utilizzato..... 106
Figura 6.7 Visione d'insieme e particolare di una valvola a sfera 107
Figura 6.8 Manometro analogico installato 107
Figura 6.9 Vista dall'alto e particolare con fori della piastra forata della specola utilizzata 108
Figura 6.10 Pompa utilizzata nel circuito 109
Figura 6.11 Particolare della pompa installata 110
Figura 6.12 Curve caratteristiche della pompa installata 110
Figura 6.13 Esempio di generatore EY-60P 111
Figura 6.14 Vista d'insieme del sistema di ricircolo e particolare della flangia bullonata 112

Elenco delle tabelle

Tabella 4-1 Elenco dei componenti del circuito 42

Tabella 4-2 Condizioni idrodinamiche nelle quali si sono svolte le prove 59

Tabella 4-3 condizioni idrodinamiche per le prove turbolente 67

Tabella 5-1 Riepilogo prove di ibridazione effettuate 82

Tabella 5-2 Riepilogo prove statiche effettuate 83

Tabella 5-3 Riepilogo prove turbolente effettuate 83

Tabella 5-4 Riepilogo delle condizioni idrodinamiche per le prove turbolente.... 94

Tabella 6-1 Elementi componenti il circuito pilota 104

Tabella 6-2 Riepilogo caratteristiche serbatoio 105

Tabella 6-3 Calcoli relativi alla determinazione del numero di fori necessari. ... 108

Tabella 6-4 Caratteristiche principali generatore installato 111

Tabella 6-5 Condizioni limite di operabilità del generatore 111

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi si basa sull'analisi sperimentale di un circuito per la disinfezione dell'acqua che sia in grado di generare la cavitazione idrodinamica al fine di abbattere gli agenti patogeni. L'intero lavoro si colloca nella scia di continuità rispetto a quanto fatto già dagli ing. Burzio et al. (2020) [1] e Davello (2021) [2] attraverso le loro ricerche in questo ambito.

L'attività di tesi si è svolta per la gran parte presso il laboratorio di idraulica del Politecnico di Torino e solo in piccola parte presso il Centro Ricerche di Smat S.p.A.

Il circuito utilizzato è stato sviluppato principalmente dall'ing. Riccardo Vesipa. La necessità di questo circuito nasce con l'esigenza di voler indagare meglio le potenzialità di alcuni metodi meccanici per la disinfezione dell'acqua al fine di andare a modificare le attuali procedure di potabilizzazione.

Ad oggi, infatti, uno dei metodi maggiormente utilizzati per la disinfezione dell'acqua nei Paesi cosiddetti sviluppati vede l'utilizzo di elementi chimici per l'abbattimento della carica batterica, quali ad esempio, il cloro e i suoi derivati. Questi elementi, oltre a garantire una buona efficacia in termini di disinfezione delle acque, producono di contro anche dei sottoprodotti nocivi e potenzialmente cancerogeni per la salute umana.

Uno degli obiettivi principali di questo lavoro è dunque quello di indagare maggiormente le potenzialità di metodi alternativi, così da evitare il ricorso all'utilizzo di sostanze potenzialmente dannose; metodi che possano poi essere affiancati ai processi standard oppure addirittura sostituirli in un futuro prossimo.

Un altro fattore positivo dell'eliminazione degli elementi chimici dai processi di disinfezione è l'allargamento del campo di applicabilità dei suddetti metodi. È noto infatti come ad oggi, in molti dei Paesi in via di sviluppo, il reperimento di elementi chimici quali il cloro in modo continuativo e sicuro è spesso difficile.

Lo sviluppo di nuove tecnologie potrebbe così garantire a nuove popolazioni la possibilità d'accesso all'acqua, andando contestualmente anche a mitigare fenomeni geopolitici di scala mondiale a cui stiamo assistendo oggi. Sono infatti

sempre di più i cosiddetti 'migranti climatici', persone costrette a scappare dalle loro terre per via della desertificazione o delle catastrofi naturali dovute al cambiamento climatico. Lo sviluppo di nuove tecnologie porterebbe certamente nuove armi per combattere i cambiamenti climatici e con essi anche i grandi flussi migratori a cui stiamo assistendo in questi anni.

L'eliminazione dal processo di potabilizzazione dell'acqua di tutto ciò che è sostanzialmente ad esclusivo appannaggio dei paesi sviluppati, permetterebbe dunque grandi vantaggi su numerosi fronti. In primo luogo, il miglioramento delle condizioni igienico sanitarie porterebbe ad una forte diminuzione di malattie purtroppo ancora troppo comuni come il colera, la malaria o la tubercolosi in regioni quali l'Africa subsahariana, l'Asia centrale o il Sud America. In secondo luogo, sarebbe possibile combattere un grande paradosso che talvolta si vive in queste regioni del mondo: la presenza di acqua ma l'impossibilità di poterla sfruttare vista l'incapacità di trattamento.

È dunque molto importante determinare quali siano gli standard regolamentati che definiscano la qualità dell'acqua. I parametri considerati sono di tipo chimico, fisico e microbiologico ma sicuramente i più nocivi per la salute umana sono gli ultimi citati. Infatti, molto spesso, soprattutto nei paesi sottosviluppati, si va incontro ad una contaminazione fecale con potenziale immissione nel corpo umano di agenti patogeni quali batteri o virus.

Con la presente tesi si cerca dunque di fornire un piccolo contributo allo sviluppo di queste nuove tecnologie ed alla valutazione dell'efficacia nell'abbattimento microbiologico di fenomeni quali la cavitazione e la turbolenza.

In particolare, gli obbiettivi del lavoro sono stati principalmente quattro:

1. La valutazione dell'efficacia della capacità di abbattimento della cavitazione idrodinamica utilizzando campioni di acqua pura con inoculi di Escherichia Coli inseriti all'interno;
2. L'implementazione di metodologie cosiddette 'ibride' di clorazione e cavitazione insieme, al fine di diminuire la concentrazione di cloro da immettere;
3. La valutazione del ruolo della turbolenza nei processi di abbattimento messi a confronto con i risultati provenienti dalla cavitazione idrodinamica;

4. Lo sviluppo di un set di prove in vera grandezza per effettuare uno 'scaling up' delle evidenze sperimentali ricavate dal circuito in piccola scala.

Il circuito, così come è stato pensato e progettato, è in grado di procedere al trattamento di circa 24 litri per ogni ciclo di disinfezione attraverso l'azionamento di una pompa messa in serie con il circuito stesso. La cavitazione è indotta forzando il fluido a passare all'interno di un restringimento realizzato attraverso una piastra forata. Il liquido, durante il passaggio, subisce un aumento di velocità e pressione seguito da un'espansione improvvisa generando il fenomeno della cavitazione idrodinamica.

Ogni esperimento è stato svolto riempiendo il circuito sempre con il solito volume di acqua microfiltrata milliQ e inserendo poi concentrazioni di Escherichia Coli dell'ordine di 10^2 CFU/ml.

Visti i vari parametri che regolano l'efficacia del trattamento, si è proceduto alla realizzazione di varie prove che permettessero una valutazione d'insieme del metodo. Tra i parametri presi in considerazione ci sono stati il numero di cavitazione indotto nell'orifizio, l'efficacia di un pretrattamento di sola circolazione senza aggiunta di cloro o cavitazione, il tempo di esposizione al trattamento e anche la concentrazione di cloro inserita nelle varie prove.

Le prove considerate sono state di tipo statico (in assenza quindi di circolazione) e di tipo dinamico (cavitativo e turbolento) facendo variare i parametri definiti sopra.

I campioni prelevati sono stati infine analizzati in parallelo sia presso un laboratorio esterno sia presso il nostro laboratorio con metodo di conta batterica Colilert-18. Questa doppia analisi è stata effettuata al fine di confrontare i risultati ottenuti e divenire con il tempo indipendenti anche dal punto di vista delle analisi microbiologiche.

L'elaborato è organizzato come segue:

Nel *capitolo 1* si ha un'introduzione sull'importanza dell'acqua come risorsa nel mondo con alcuni dati sulla situazione mondiale in termini di accesso all'acqua e ai servizi igienici di base. Vengono poi elencate le principali malattie trasmissibili attraverso l'acqua ed i diversi agenti patogeni presenti;

Nel *capitolo 2* sono presentati i vari metodi di disinfezione dell'acqua con particolare attenzione alla cavitazione idrodinamica;

Nel *capitolo 3* viene fornita una panoramica sullo stato dell'arte e sul contesto all'interno del quale gli esperimenti si inseriscono;

Nel *capitolo 4* vengono presentate le procedure sperimentali e le strumentazioni utilizzate per le varie prove realizzate in laboratorio e per l'analisi quantitativa dei campioni effettuata con tecnologia Colilert-18;

Nel *capitolo 5* sono presenti i risultati a cui si è pervenuti attraverso le analisi effettuate;

Nel *capitolo 6* viene presentato il lavoro effettuato presso il Centro Ricerche Smat S.p.A. riguardante lo *scaling up* del circuito;

Nel *capitolo 7* sono riportate le conclusioni ed eventuali sviluppi futuri.

1 L'acqua come risorsa

L'acqua è uno dei temi che è maggiormente presente negli Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile (SDGs) all'interno dell'Agenda 2030 redatta dall'ONU. [3]

Il continuo aumento della popolazione mondiale ed il frequente manifestarsi di fenomeni drastici legati ai cambiamenti climatici, donano un'attenzione crescente al tema dell'acqua e di un suo utilizzo sostenibile.

L'obiettivo numero 6 dell'Agenda 2030 riguarda appunto l'*Acqua pulita e servizi igienico-sanitari* di cui ci si impegna a garantirne l'accesso ed una gestione sostenibile. [4] [5]

L'accesso ad un'acqua potabile è fortemente cresciuto dal 1990 ad oggi, permettendone l'accesso a 2.6 miliardi di persone in più. Resta però ad oggi più di mezzo miliardo di persone che non ha accesso a questo tipo di risorsa. Inoltre, solo il 60% della popolazione globale può dire di non vivere in situazioni di scarsità d'acqua ed è prevista una diminuzione di questo valore negli anni.

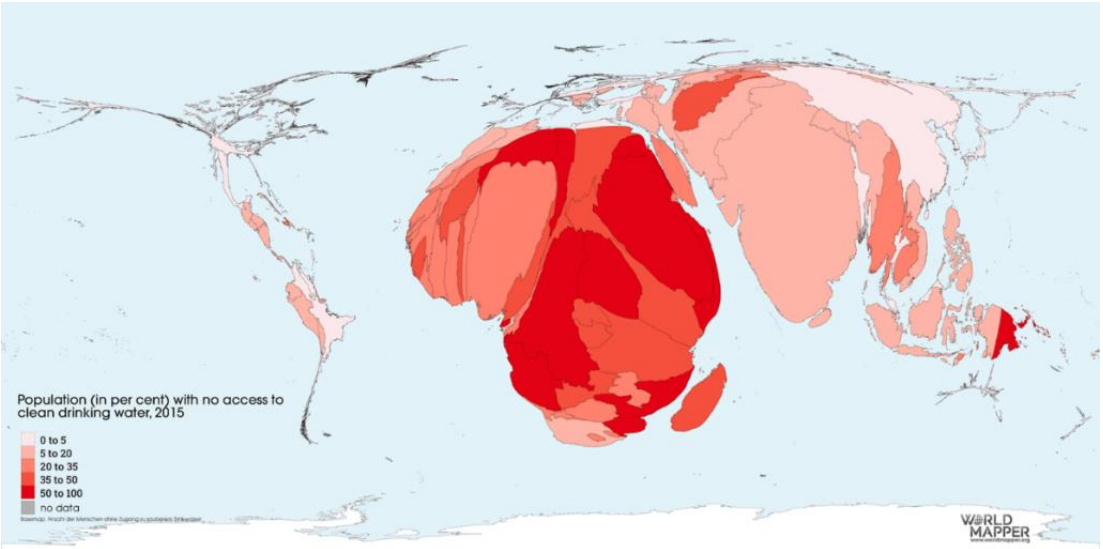


Figura 1.1 Carta mondiale con le percentuali di non accesso all'acqua potabile [6]

A tutto questo si somma la scarsità delle condizioni igienico sanitarie che porta ogni giorno alla morte a causa di malattie diarroiche prevenibili circa mille bambini nel mondo. [7]

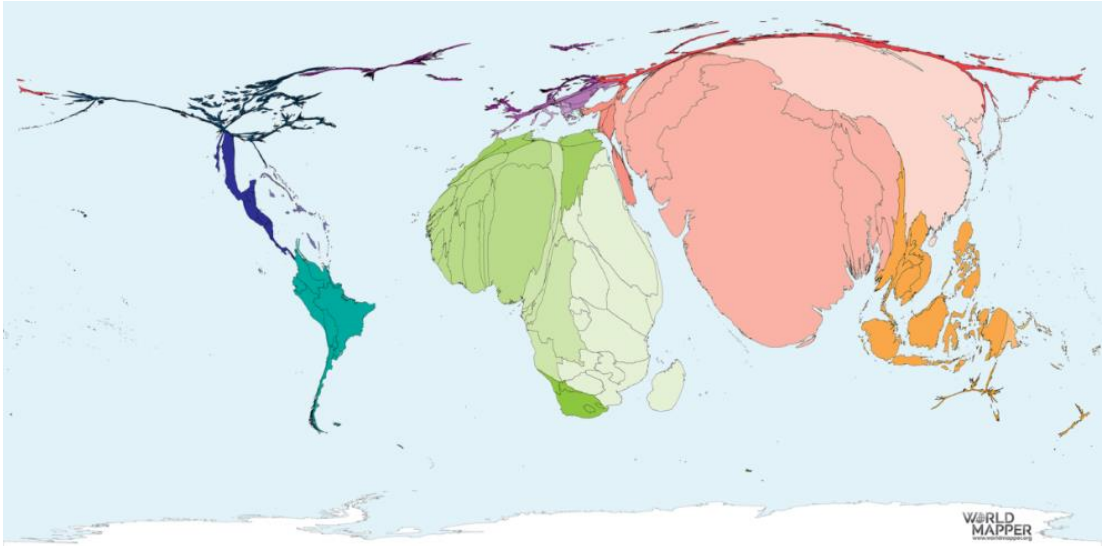


Figura 1.2 Carta dell'assenza dei servizi igienici di base [6]

Le inondazioni e gli altri disastri naturali legati all'acqua portano ogni anno a circa il 70% delle morti per calamità naturali. [8] [9]Inoltre, è bene ricordare che una buona qualità dell'acqua (che rispetti, dunque, gli standard proposti dall' Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS)) garantirebbe necessariamente una decrescita della spesa sanitaria e avrebbe anche delle ricadute positive in ambito economico.

In questo quadro si inserisce dunque l'importanza della disinfezione delle acque e dello sviluppo di tecnologie innovative ad essa connesse ai fini dell'abbattimento della carica patogena dell'acqua.

1.1 La contaminazione dell'acqua

Nelle zone sottosviluppate del mondo è purtroppo comune che l'acqua risulti essere contaminata da deiezioni animale o umane; questo porta ad un rischio elevato di immissione nel proprio organismo di agenti patogeni che possono provocare anche la morte. Nei paesi cosiddetti 'sviluppati' invece questo rischio permane -seppur in quantità molto inferiore- laddove si sia in presenza di impianti difettosi di trattamento acque oppure tubazioni troppo vecchie o con malfunzionamenti. [10]

Come immaginabile, sono numerosissime le malattie infettive connesse ad una ingestione di acqua non potabile, tra cui:

- La **poliomelite**, causa di paralisi diffuse fino alla morte;
- Il **colera**, che si presenta come un'infezione dell'intestino con effetti potenzialmente fatali;
- La **malaria**, che può portare a febbre alta, vomito e persino lo stato comatoso;
- La **dissenteria**, che porta a gravi disidratazioni e principale causa di morte nei luoghi del mondo dove non si riesce ad avere dei servizi igienici adeguati e un accesso all'acqua potabile. [11]

Secondo l'ultimo rapporto dell'Organizzazione Mondiale della Sanità, l'assunzione di acqua inquinata resta la principale causa di morte al mondo; provocando oltre 1,6 milioni di morti ogni anno. [12]

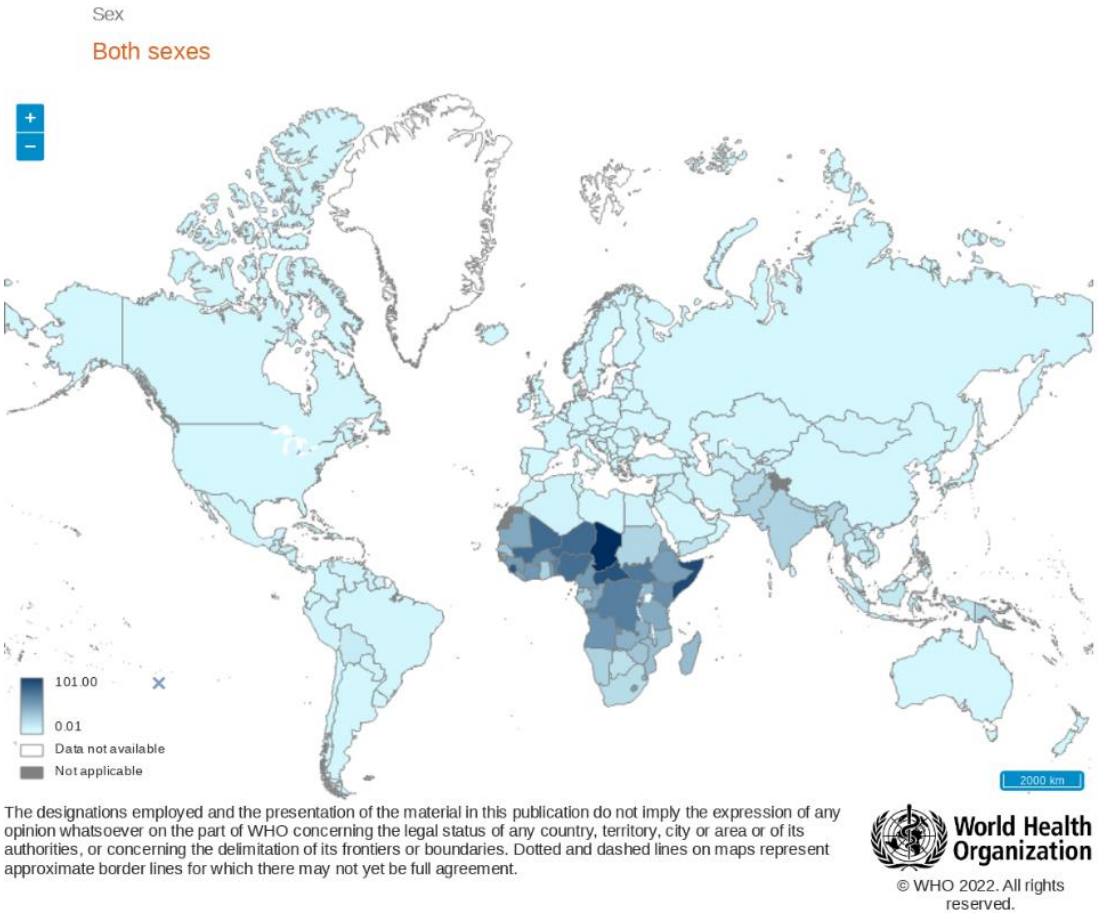


Figura 1.3 Tasso di mortalità dovuto ad acqua non sicura (per 100000 ab.) [13]

1.1.1 I microrganismi presenti

L'acqua in natura è di per sé molto ricca di microrganismi; molti questi risultano essere innocui per la salute umana ma altri presentano dei potenziali rischi. [14] Sono i microrganismi presenti i responsabili della contaminazione dell'acqua e della diffusione degli agenti patogeni attraverso la stessa. Questi si organizzano

principalmente in quattro classi: *batteri, virus, protozoi parassiti* ed *elminti.* [10] Nelle acque superficiali si possono trovare tutti questi agenti patogeni, mentre in quelle freatiche i protozoi parassiti non sopravvivono.

- *Batteri*

I batteri sono microrganismi unicellulari e procarioti che possono talvolta vivere a spese degli altri organismi. In questa categoria ricadono i *Coliformi totali*, responsabili delle contaminazioni più comuni ma non per questo meno pericolosi poiché in grado di dar vita a gravi infezioni. [10]

All'interno dell'intestino umano sono normalmente presenti i *coliformi fecali*, tra questi il più comune (ed anche per questo utilizzato come indicatore della qualità idrica) è l'*Escherichia coli.* La contaminazione a causa di questi batteri avviene sostanzialmente quando del materiale fecale entra in contatto con la falda acquifera o anche solo con la rete acquedottistica laddove presente. Fortunatamente nei confronti di questi patogeni la disinfezione dell'acqua sembra avere una buona efficacia. [3]

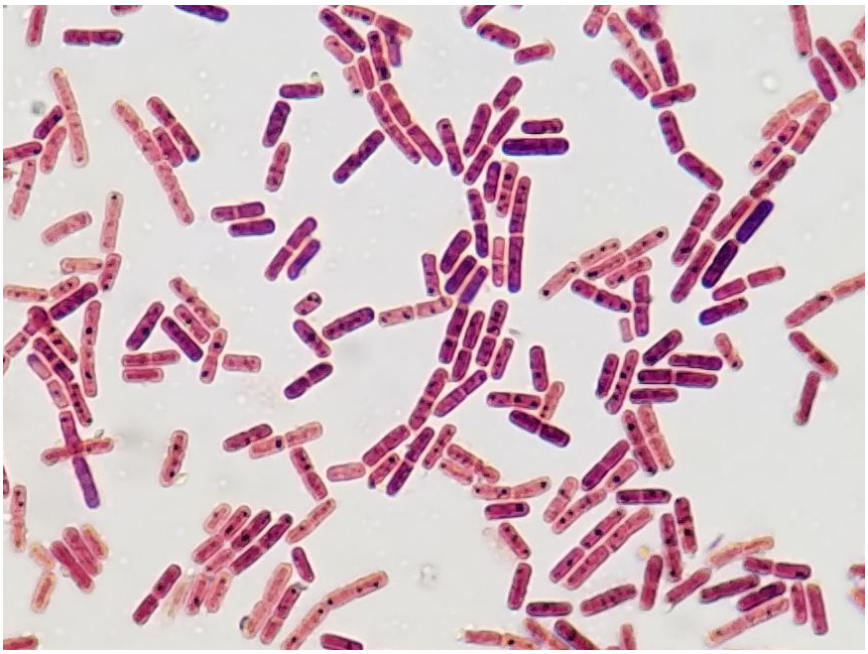


Figura 1.4 Escherichia coli visti al microscopio elettronico

- *Virus*

Sono sostanzialmente dei filamenti di DNA e dunque caratterizzati da dimensioni molto piccole (0.02 – 0.09 μm). La loro dimensione ne rende difficile la rimozione tramite filtrazione e sono molto pericolosi date le loro grandi caratteristiche di resilienza ambientale.

- *Protozoi Parassiti*

Risultano essere i più difficili da abbattere attraverso un trattamento chimico, essendo però di dimensioni maggiori è possibile effettuare un trattamento di tipo meccanico/fisico (filtrazione).

- *Elminti*

Sono organismi parassiti vermiformi che si stima vivano nell'intestino di circa tre miliardi di persone e che di norma però non portano alla morte dell'individuo. [15] Si riassumono in (Figura 1.5) i microrganismi presi in considerazione con i patogeni da essi trasportati e le malattie connesse.

Organismo	Patogeno	Malattia
Batteri	*Vibrio cholerae*	Colera
	Vibrio parahaemolyticus	Gastroeneriti causate da vibrioni
	Salmonella enterica	Febbre tifoide e altre almonellosi gravi
	Sighella	Dissenteria bacillare o sighellosi
	Escherichia coli	Diarree acute e gastroenteriti
Virus	*Adenovirus*	Gastroenterite, polmonite, congiuntivite
	Enterovirus	Gastroenterite, polmonite, meningoencefalite, miocardite
	HAV	Epatite A
	HEV	Epatite E
Protozoi	*Cryptosporidium*	Criptosporidiosi
	Giardia intestinalis	Giardiasi
Elminti	*Dracunculus medinensis*	Dracunculiasi
	Fasciola hepatica, F. gigantica	Gastroenteriti, itterizia, calcolosi biliare

Figura 1.5 Riassunto dei microrganismi elencati [16]

1.2 Metodi di disinfezione dell'acqua

Esistono svariate metodologie di disinfezione sviluppate negli anni per ovviare al problema dell'abbattimento degli agenti patogeni. [17] Lo sviluppo di metodologie differenti è stato ovviamente anche funzione delle tecnologie a disposizione nelle differenti aree del mondo.

Le principali tecniche di disinfezione utilizzano ad oggi delle reazioni chimiche al fine di eliminare le potenziali minacce per la salute umana. Di norma però, si segue un processo standard che inizia con la rimozione dei sedimenti più grossolani e delle componenti flottanti organiche attraverso una coagulazione, sedimentazione e filtrazione del liquido. Solo a questo punto si procede, almeno negli impianti dei paesi cosiddetti 'civilizzati', ad un trattamento di disinfezione chimica se necessario.

Col passare del tempo sono state numerose le sostanze sperimentate per una disinfezione di tipo chimico (quasi sempre dei potenti ossidanti). Le sostanze

ormai più utilizzate sono il cloro (Cl_2), l'ozono (O_3), l'ipoclorito di sodio (NaClO) o il perossido di idrogeno (H_2O_2). [18]

Alla disinfezione chimica si contrappone la disinfezione di tipo fisico, che sfrutta quindi l'azione delle membrane o delle radiazioni ultraviolette.

1.2.1 Metodi chimici

- *Clorazione*

Risulta essere ad oggi il metodo più utilizzato poiché è l'approccio con maggior efficacia ed economicità per giungere ad una eliminazione totale della carica batterica. Il cloro è infatti un ottimo igienizzante ed è anche duraturo nel tempo, il che permette di impedire la ricrescita batterica. [19]

Il suo utilizzo è ottimale per virus e batteri, mentre risulta avere un'efficacia minore per elminti e protozoi parassiti. Di norma viene utilizzato in quantità pari a 2-3 mg/l per ottenere una disinfezione efficace ma ci si può spingere fino ad utilizzarne 5 mg/l. [20] Risultano essere importanti per questo tipo di disinfezione il dosaggio (citato sopra), il tempo di contatto tra cloro e acqua, la temperatura ed ovviamente il pH dell'acqua.

Un trattamento efficace permette di avere una concentrazione di cloro residuo superiore a 0.5 mg/l dopo 30 minuti dal trattamento ed un pH non superiore ad 8. Uno dei principali limiti di questa tecnica è la formazione, a seguito delle reazioni chimiche, di sottoprodotti della disinfezione o DBPs (Disinfection by-product) quali i Trialometani (CHX_3). Tra questi ricordiamo il cloroformio, gli acidi acetici alogenici, il benzene e altri ancora che risultano tossici o cancerogeni per l'uomo [10].

Negli ultimi anni si è dunque cercato di sviluppare tecnologie nuove che possano nel tempo soppiantare o perlomeno affiancare l'utilizzo di reagenti chimici. Il seguente progetto sperimentale si inserisce all'interno di questo filone delle ricerche.

- *Ozonazione*

In questo processo si sfrutta la grande capacità ossidante dell'ozono per attaccare le sostanze organiche e reagire con esse. [21] Il vantaggio principale rispetto alla

clorazione è la limitazione dei sottoprodotti derivanti dalla disinfezione e la non alterazione delle caratteristiche pur mantenendone l'efficacia del trattamento. Il vincolo grosso è invece rappresentato dai costi di questa tecnologia, elemento che ne limita necessariamente l'utilizzo ai paesi più sviluppati.

1.2.2 Metodi fisici

Come anticipato in precedenza sono l'alternativa all'utilizzo di elementi chimici per la disinfezione delle acque. Tra questi metodi, ne presentiamo di seguito due:

- *Radiazione UV*

Tecnologia che sfrutta le capacità di eliminazione dei patogeni dei raggi UV caratterizzati da lunghezze d'onda tra i 210 e 310 mm (Figura 1.6). Attraverso questo processo si va ad attivare una reazione fotochimica che va a colpire direttamente il DNA dei microrganismi. Le radiazioni ultraviolette inibiscono infatti la capacità di riprodursi andando a bloccare la divisione cellulare. [22]

I patogeni non sono quindi eliminati fisicamente ma di fatto viene eliminata la loro capacità di nuocere all'essere umano.

Gli elementi che portano a considerare questa tecnologia come potenzialmente molto valida sono molteplici:

- Efficacia anche in presenza di parassiti (che invece sono molto resistenti ai trattamenti di tipo chimico)
- Basso costo
- Buona applicabilità su larga scala vista la sua praticità di utilizzo
- Ecologia vista l'assenza di elementi chimici esterni che alterino le caratteristiche dell'acqua

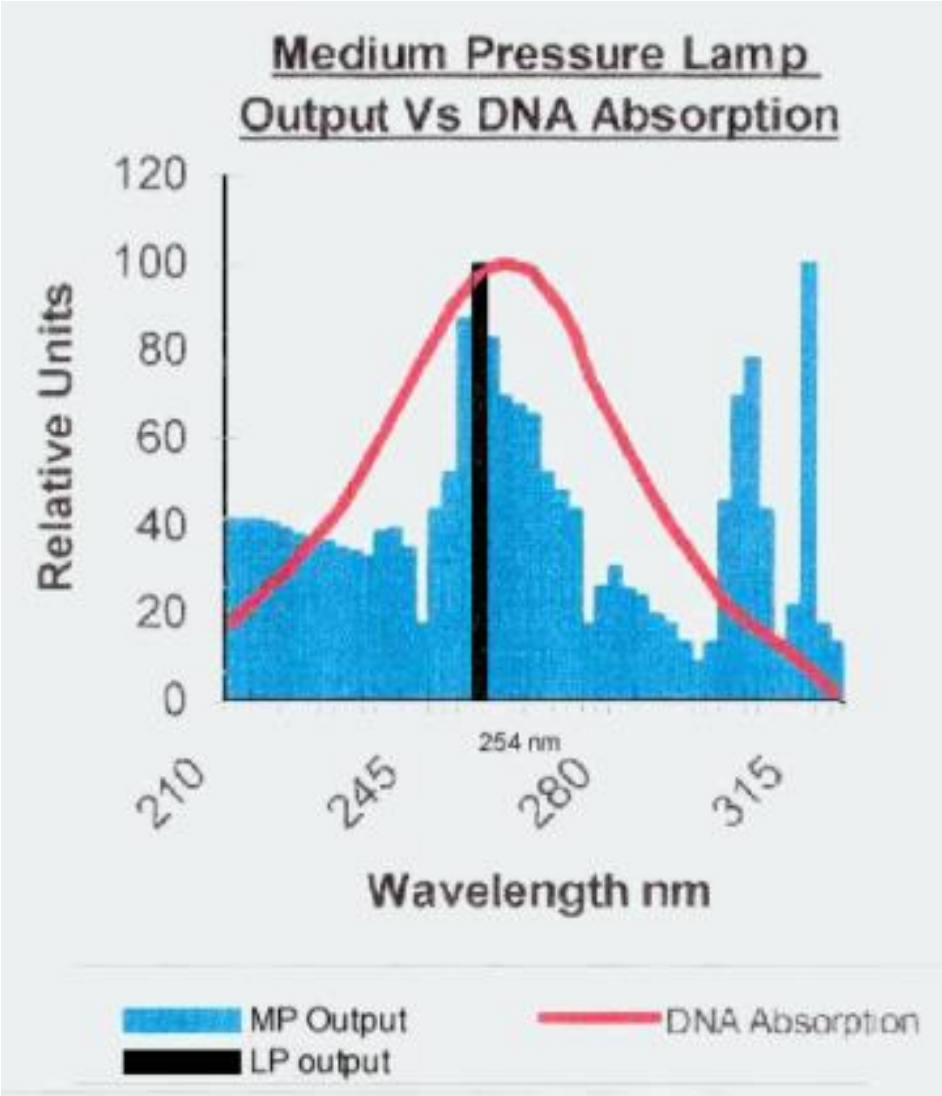


Figura 1.6 Assorbimento del DNA in funzione della lunghezza d'onda. [22]

- *Ultrafiltrazione*

Questa tecnologia si compone sostanzialmente di membrane in polimeri termoplastici caratterizzate da una struttura differenziata. Si va infatti ad inserire un elemento interno filtrante preceduto da una struttura spugnosa che permetta una filtrazione selettiva (Figura 1.7) [23]

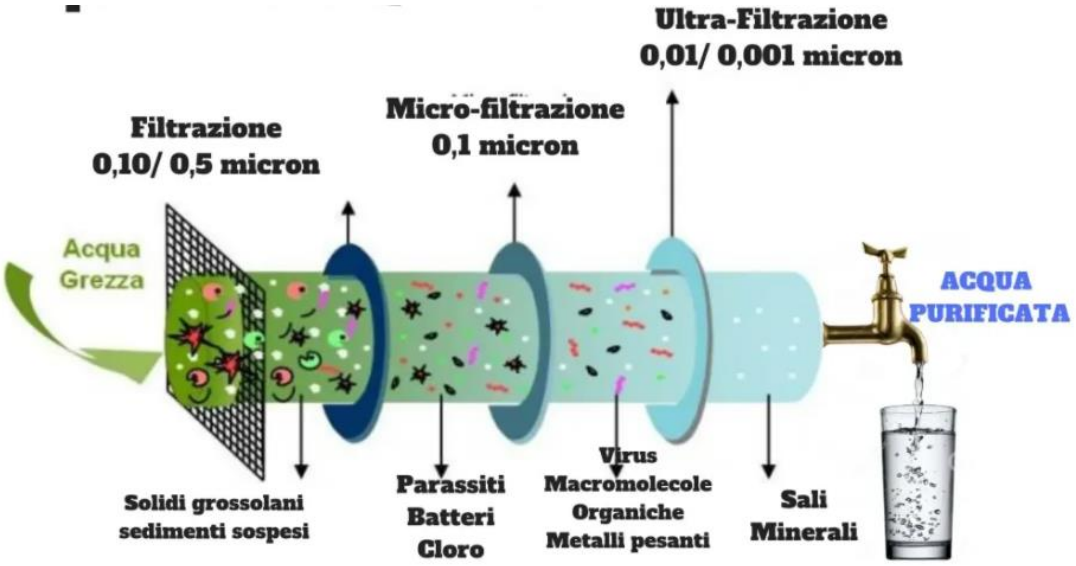


Figura 1.7 Schema del processo di ultrafiltrazione [23]

- <u>*Metodi naturali*</u>

Oltre ai processi fin qui descritti, esistono anche tutta una serie di procedimenti suggeriti dall'OMS per il trattamento domestico delle acque ed il loro stoccaggio sicuro (Household treatment and safe storage, HWTS). Infatti, il maggior limite che presentano le tecnologie fin qui presentate risulta essere la bassa applicabilità in zone del mondo ancora sottosviluppate.

Tra i metodi naturali di disinfezione troviamo:

- Disinfezione solare adatta per le zone con forte radiazione solare quali l'Africa sub-sahariana. Consiste sostanzialmente nello sfruttare i raggi del sole per sterilizzare l'acqua all'interno di bottiglie di plastica trasparente.
- Filtri a sabbia caratterizzati da un'ottima efficacia ma da tempi di trattamento piuttosto elevati. [24] [25]
- Ebollizione ad oggi forse la più utilizzata ed efficace. La maggioranza dei patogeni sono eliminati una volta raggiunti i 100°C.
- Estratti delle piante aggiunti all'acqua in basse concentrazioni per aumentarne in termini visivi e qualitativi le caratteristiche. È uno dei campi di ricerca che sta riscuotendo maggior successo nell'ambito delle disinfezioni a basso costo. [26]

2 Cavitazione

La cavitazione è un fenomeno fisico che si presenta laddove si abbia un abbassamento locale della pressione di un dato liquido fin sotto alla propria tensione di vapore il tutto a tensione costante. Ogni liquido è in grado di disciogliere al suo interno un certo quantitativo di aria in funzione della temperatura e della pressione a cui lo si va a porre. Durante il fenomeno cavitativo si ha la fuoriuscita dell'aria normalmente disciolta in condizioni di temperatura ambiente e pressione atmosferica attraverso la formazione di microbolle. Queste microbolle sono a tutti gli effetti delle piccole cavità di vapore indotte dal forte salto negativo di pressione.

La presenza delle bolle permane finché si ristabilisce la condizione di alta pressione. A questo punto la pressione di vapore non riesce più a contrastare la pressione idrostatica e le bolle implodono generando un forte rilascio energetico con raggio d'azione comparabile alle dimensioni della bolla stessa.

Di norma la cavitazione in idraulica è un fenomeno che si cerca assolutamente di evitare all'interno di turbine e pompe. La presenza di fenomeni cavitativi all'interno di questi strumenti porta alla rottura degli stessi. L'elemento rotto presenta di norma proprio delle caratteristiche forme arrotondate sulle superfici frutto dei picchi di pressione generatisi [27].

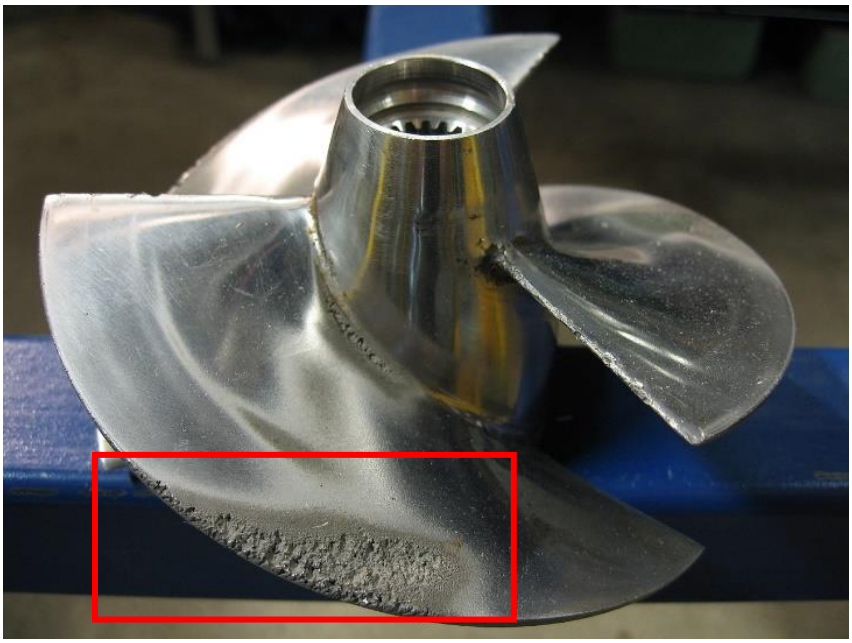


Figura 2.1 Effetti della cavitazione su un'elica.

Negli ultimi anni si sta però cercando di sfruttare queste micro-implosioni in condizioni controllate. I fenomeni che nascono in presenza della cavitazione sono molteplici sia di natura fisica che chimica, tra questi ricordiamo:

- Formazione tramite idrolisi di radicali ossidanti OH;
- Onde d'urto;
- Microgetti;
- Picchi di pressione e temperatura (hotspot);
- Sforzi di taglio.

I campi di applicazione di tali sperimentazioni sono ampi; si studia in ambito petrolchimico per potenziare i processi di affinamento del greggio, nello sviluppo dei nuovi materiali e ovviamente anche nell'ambito del trattamento delle acque (depurazioni e potabilizzazioni).

La cavitazione in un liquido può essere indotta principalmente in due modi: il primo prevede la propagazione di onde di pressione nel liquido in quiete (ultrasuoni) e parliamo dunque di cavitazione acustica (AC); il secondo invece andando a variare in maniera repentina il campo di moto di un fluido in movimento. [28]

- *Cavitazione acustica*

In questo caso la cavitazione è indotta dal passaggio di un'onda ultrasonica caratterizzata, per definizione, da un andamento di tipo sinusoidale. Il liquido

attraversato è dunque sottoposto a dei cicli continui di espansione e compressione con frequenze variabili tra 20 kHz e 1.1 MHz. [29]

Lo sfruttamento di questa tecnologia è però di norma considerato poco vantaggioso nell'ambito della disinfezione visti i costi elevati e l'efficacia raggiunta non proprio ottimale. Questo fenomeno è invece molto studiato in ambito navale per le interferenze che la cavitazione provoca all'utilizzo degli apparecchi come il sonar.

- *Cavitazione idrodinamica*

In questo caso la cavitazione è indotta forzando il liquido a passare attraverso uno o più strumenti che, attraverso la loro geometria, ottimizzano il processo cavitativo. L'energia si esplica in questo caso sottoforma di energia cinetica visto che in questo caso il liquido viene messo in movimento. [30]

Ai fini dello studio nell'ambito della disinfezione idrica la cavitazione idrodinamica risulta essere più efficace rispetto a quella acustica in quanto si riesce a trattare volumi maggiori con costi inferiori.

Il circuito sperimentale oggetto di questa tesi è stato progettato per indurre la cavitazione idrodinamica all'interno di una test-section che ne permettesse lo studio in condizioni controllate.

2.1 Cavitazione idrodinamica

L'abbassamento di pressione utile alla cavitazione idrodinamica (*hydrodynamic cavitation, HC*) viene ottenuto attraverso l'agitazione di un liquido (tramite pompaggio in un circuito o tramite agitazione meccanica) al fine di andare a modificare il campo di moto e indurre delle forti depressioni.

Come già anticipato, il salto negativo di pressione viene ricavato accelerando un liquido attraverso un restringimento (un foro oppure un venturimetro).

Applicando il teorema di Bernoulli, all'aumentare della velocità si ha una diminuzione della pressione fino a giungere ad un valore inferiore alla tensione di vapore dove si ha la formazione delle bolle caratteristiche (Figura 2.2). Via via che si ha poi un ristabilirsi delle condizioni di pressione iniziali si ha dapprima un

aumento della bolla attraverso anche l'inglobamento reciproco tra queste ed in un secondo momento invece si ha l'implosione delle stesse.

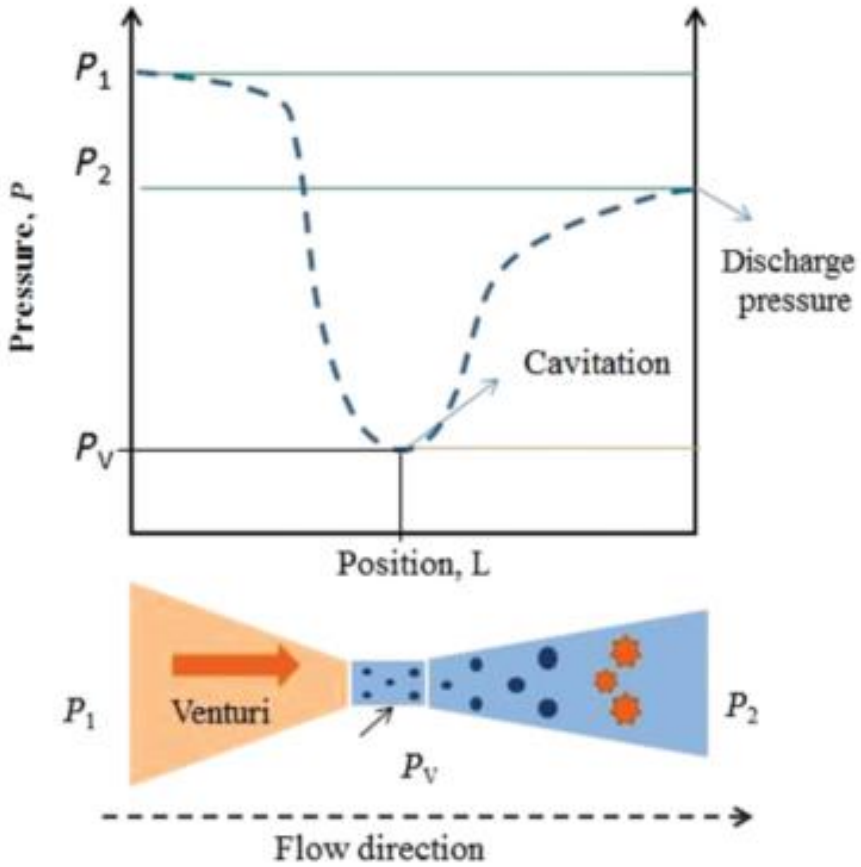


Figura 2.2 Andamento delle pressioni in un venturimetro [28]

Durante l'implosione delle bolle avvengono numerosi fenomeni, tra questi si ha la formazione di 'hotspot', piccoli ambienti all'interno della bolla dove si ha la concentrazione di onde di pressione di intensità molto importante e temperature elevate.

Un altro fenomeno che si manifesta è la formazione di microgetti (Figura 2.3); questi vengono a formarsi nelle bolle in prossimità delle pareti solide che portano ad un collasso asimmetrico della bolla. La parte della bolla più lontana dalla parete viene spinta verso l'interno e fuoriuscendo dal lato opposto, impatta ad alta velocità sulla parete.

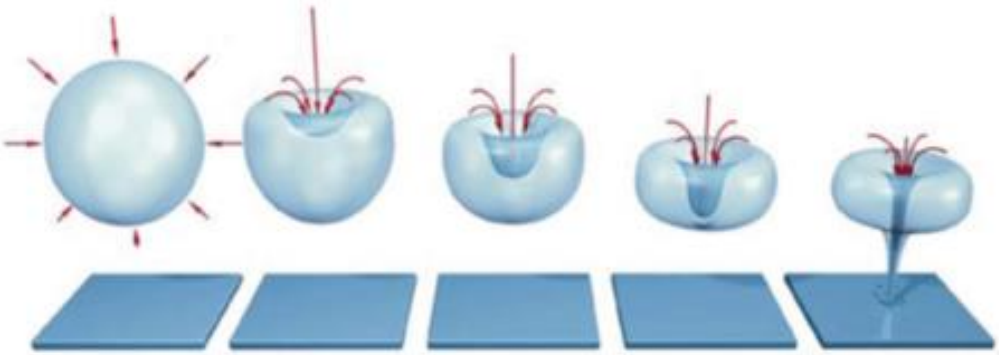


Figura 2.3 Formazione di un microgetto a seguito di collasso asimmetrico [31]

A seguito di quanto affermato è dunque possibile comprendere come il fenomeno della cavitazione idrodinamica risulti potenzialmente un fenomeno distruttivo. L'obbiettivo delle analisi effettuate è dunque quello di sfruttare le sue caratteristiche per sprigionare questa grande in quantità di energia in condizioni controllate.

2.1.1 Caratteristiche della cavitazione

Ai fini della caratterizzazione del fenomeno, è preferibile utilizzare dei parametri adimensionali poiché garantiscono una miglior replicabilità degli esperimenti e quindi un miglior grado di fedeltà alla realtà nella descrizione dei fenomeni. [1]

In questa ottica vengono di norma utilizzati per la definizione delle condizioni idrodinamiche il numero di cavitazione (σ_v) e il numero di Reynolds (Re).

Il numero di cavitazione è appunto un numero adimensionale che permette di descrivere l'intensità del fenomeno:

$$\sigma_v = \frac{P_{valle} - P_{vapore}}{\frac{1}{2}\rho V_0{}^2}$$

Dove con P_{valle} si intende la pressione immediatamente a valle del restringimento, P_{vapore} è la tensione di vapore del liquido in analisi e V_0 è la velocità all'altezza del restringimento. In sostanza il numero di cavitazione è definito come il rapporto tra l'energia di pressione del fluido e la sua energia cinetica. [32]

Il fenomeno cavitativo si innesca per σ_v=1 (stato di 'inizio cavitazione') ma è solo quando questo valore risulta inferiore ad 1 che si hanno manifestazioni importanti.

L'espressione del numero di cavitazione deriva dall'applicazione dell'equazione di continuità secondo il teorema di Bernoulli all'interno di un tubo di Venturi.

$$z_0 + \frac{P_0}{\gamma} + \frac{{u_0}^2}{2g} = z_{valle} + \frac{P_{valle}}{\gamma} + \frac{{u_{valle}}^2}{2g}$$

Andando a considerare due termini alla stessa quota è possibile eliminare i due termini geodetici ed è inoltre possibile assumere la velocità all'interno del restringimento molto maggiore di quella a valle. L'espressione risulta semplificarsi notevolmente e si perviene a:

$$\frac{P_0}{\gamma} + \frac{{u_0}^2}{2g} = \frac{P_{valle}}{\gamma}$$

Quindi si ha che tutto il carico all'interno del restringimento risulta essere pari alla pressione di valle e dunque non siamo in presenza di cavitazione (σ_v>1). [1]

Laddove invece si sia in presenza di cavitazione, parte del carico viene sfruttato nella produzione delle microbolle di vapore. L'equazione che descrive il fenomeno risulterà quindi essere pari a:

$$\frac{P_0}{\gamma} + \frac{{u_0}^2}{2g} > \frac{P_{valle}}{\gamma}$$

Siccome P_0 è la pressione di vapore, avremo σ_v<1. [33]

2.1.2 Dispositivi per la cavitazione

Nel campo delle sperimentazioni è stata indotta la cavitazione con le geometrie più disparate ma le più utilizzate sono le piastre forate (mono e multi-foro) e i tubi di Venturi (anche noti come venturimetri). Ovviamente la tipologia di geometria influenza fortemente i risultati delle analisi; di seguito se ne riportano i concetti chiave.

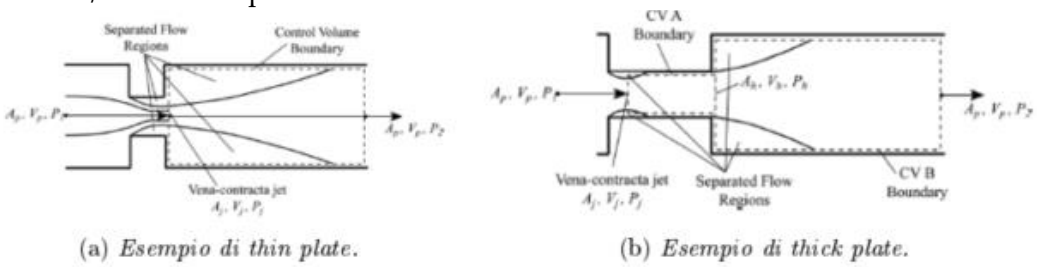
- *Piastra forata o OP (Orifice Plate)*

In questo caso il fluido è forzato a passare attraverso un orifizio che può essere composto di uno o più fori. L'acqua subisce dapprima una forte accelerazione e subito dopo una brusca espansione che porta la vena liquida a distaccarsi dalla parete del foro per poi riattaccarsi subito dopo generando forti dissipazioni energetiche.

Il riattacco della vena fluida può avvenire sia all'esterno del foro (*thin plate*) oppure all'interno dello stesso (*thick plate*) (Figura 2.4).

La differenza tra questi due casi è espressa dal rapporto tra profondità del foro (spessore della piastra) e il diametro del foro realizzato.

- t/d ≤ 2 thin plate
- t/d > 2 thick plate



(a) *Esempio di thin plate.* (b) *Esempio di thick plate.*

Figura 2.4 Caratterizzazione di thin e thick plate.

Con il raggiungimento di alte temperature si ha anche la formazione di radicali liberi OH. Dunque, l'utilizzo della piastra forata è consigliabile laddove siano richiesti dei processi di ossidazione quali ad esempio nel trattamento delle acque reflue per eliminare sostanze organiche ed inorganiche.

Il processo di formazione delle bolle di vapore avviene all'interno degli orifizi; quindi, ai fini di un'accelerazione del processo, è consigliabile aumentare il numero di fori e optare per una piastra multi-foro. [28]

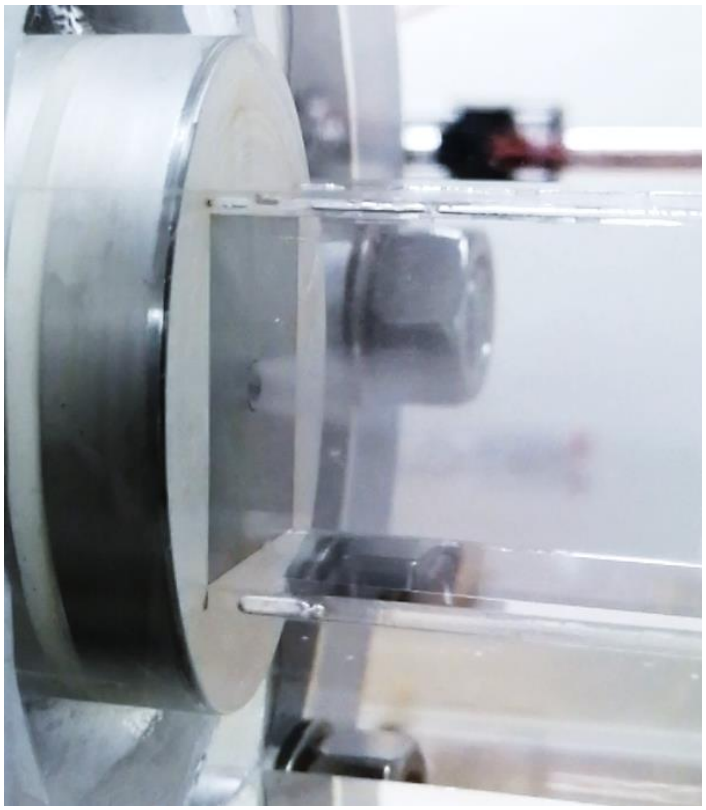


Figura 2.5 Cavitazione in atto su piastra monoforo

I parametri che regolano il fenomeno all'interno della piastra forata sono principalmente quattro e attraverso la loro variazione si modifica il comportamento del processo:

- Numero di fori;
- Disposizione dei fori;
- Geometria dei fori;
- Dimensione dei fori.

Oltre a questi termini si definiscono poi due ulteriori parametri funzione dei quattro espressi precedentemente: α e β.

Il termine α è espresso come il rapporto tra il perimetro del foro e l'area di flusso totale. Questo parametro risulta essere direttamente proporzionale al numero di fori e inversamente proporzionale alla grandezza.

Il termine β è invece espresso come il rapporto tra sezione ristretta e sezione normale. Il suo valore viene definito in funzione dell'utilizzo che si vuole fare della cavitazione, al diminuire del parametro si abbassa anche σ_v e questo porta ad un fenomeno cavitativo più importante. [28]

Ad oggi la piastra forata è il sistema maggiormente utilizzato per generare la cavitazione. I suoi punti di forza sono:

- la sua **economicità**, necessità infatti solamente di una piastra opportunamente forata;
- la **semplicità di progettazione** sfruttando i quattro parametri espressi sopra;

la produzione di un gran quantitativo di **stress di taglio**, che sembrano essere fondamentali per l'abbattimento degli agenti patogeni.

- *Tubo di Venturi*

In questo caso non si hanno brusche variazioni di pressione e velocità del fluido in esame come nel caso precedente. È costituito da un restringimento graduale

Della sezione seguito da una strozzatura ed un allargamento.

Anche con questa tipologia di strumenti risulta che un maggior contorno bagnato garantisce una maggiore efficacia nell'abbattimento degli agenti contaminanti.

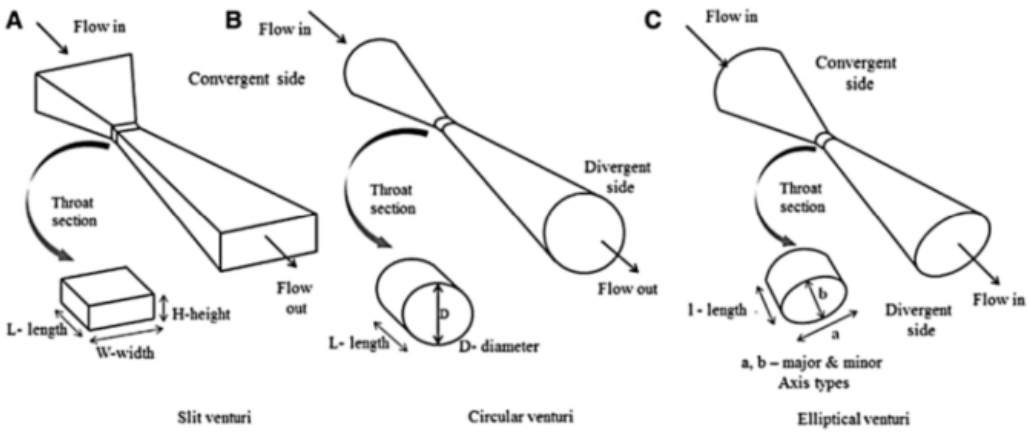


Figura 2.6 Tipologie di Venturimetri A) a fessura, B) circolare e C) ellittico [28]

Attraverso l'utilizzo di un tubo di Venturi i comportamenti che dominano sono principalmente di tipo fisico quali gli sforzi tangenziali, onde di pressione e hotspot visti anche sopra.

Numerosi studi hanno confermato la maggior efficacia nell'abbattimento di microrganismi con dimensioni sufficientemente grandi da poter essere influenzati dagli urti e gli sforzi di taglio.

Lungo il tratto del restringimento le bolle crescono fino a che non entrano nel tratto divergente dove, al ristabilirsi della condizione di equilibrio in termini di pressione, avviene l'implosione delle bolle.

La dimensione delle bolle è funzione della lunghezza del tratto di restringimento (dove si forma la cavitazione e si ha l'accrescimento delle bolle) ed anche dell'angolo di inclinazione del divergente.

La dimensione del restringimento dev'essere non troppo corta per permettere il corretto accrescimento delle bolle e d'altra parte non troppo lunga per evitare che le bolle si dissolvano già dentro il restringimento stesso. Per quanto concerne invece l'angolo di apertura del divergente, dipende dal comportamento che vogliamo aspettarci. Si è visto infatti che per angoli limitati (tra i 5.5° e gli 8.5°) la pressione aumenta in modo molto graduale e si ha un buon accrescimento delle cavità di vapore. Nel caso invece di un angolo troppo elevato si torna in una condizione simile alla piastra forata in cui si ha una rapida espansione con conseguente estinzione del fenomeno cavitativo. [28]

2.1.3 La disinfezione mediante cavitazione

I primi studi effettuati nell'ambito dello sfruttamento della cavitazione idrodinamica per l'inattivazione o l'abbattimento degli agenti patogeni risalgono ai primi anni Settanta. Al tempo, gli esperimenti furono effettuati su di un particolare tipo di lievito (*Saccharomyces cerevisiae*) tra i più complessi da eliminare, ai fini di testare la tecnica in condizioni estreme.

In seguito, numerosi studi sono stati effettuati anche su microrganismi più comuni quali *Alcaligenes Eutrophus*, *Escherichia Coli* (di particolare interesse per il seguente lavoro) e *Legionella Pneumophila;* in tutti questi casi la cavitazione idrodinamica ha dato risultati soddisfacenti in termini di abbattimento come dimostrano gli studi in letteratura [30] [34] [35] [36] [37].

Come già anticipato in precedenza, i reattori utilizzati nelle ricerche in letteratura per indurre la cavitazione sono stati molteplici; è possibile, infatti, trovare reattori a cavitazione idrodinamica pulsata, continua o indotta da taglio oltre che a reattori a cavitazione rotore-statore. I reattori maggiormente utilizzati permangono comunque le piastre forate ed i tubi di Venturi.

Non è ancora bene noto chi sia il vero responsabile dell'abbattimento batterico, se l'implosione delle microbolle derivanti dalla cavitazione oppure la forte turbolenza derivante anch'essa dal regime cavitativo. È noto però certamente che laddove le componenti normali degli sforzi turbolenti raggiungano un'intensità dell'ordine di 10^8-10^9 Pa, si abbia un abbattimento della carica batterica valido per la sterilizzazione degli alimenti [38]. È altresì noto da letteratura [39] che valori degli sforzi tangenziali turbolenti dell'ordine di 10^3 Pa sono sufficienti a garantire la rottura della membrana cellulare di molti microrganismi patogeni.

3 Stato dell'arte

Come già anticipato in precedenza, il seguente lavoro di tesi muove dalle considerazioni ricavate a partire dalle ricerche effettuate da Burzio e Davello attraverso lo stesso circuito e si colloca all'interno del progetto europeo BIOENPRO4TO.

Burzio et al. (2020) [1] partono dall'analisi della letteratura esistente da cui è emerso che in nessun caso gli studi effettuati, seppur numerosi, sfruttavano lo strumento dell'analisi dimensionale per lo studio del problema cavitativo.

L'importanza di questo strumento sta infatti nella possibilità di andare a ridurre il numero di variabili in gioco andando ad introdurre gruppi adimensionali che di fatto comprendano più variabili. In questo modo si ha la possibilità di mettere in relazione anche fenomeni con scale caratteristiche differenti ma accomunati dagli stessi gruppi adimensionali.

Si riportano di seguito le variabili caratteristiche della disinfezione tramite cavitazione idrodinamica individuate nel lavoro di Burzio et al. (2020) [1].

$$C = f\left(C_0, \mu, \rho, \gamma_s, v_h, P_{valle} - P_{vapore}, n_p, L_i\right)$$

dove:

- C è la concentrazione batterica in un certo istante;
- C_0 è la concentrazione iniziale dei batteri;
- μ è la viscosità dinamica dell'acqua;
- ρ è la densità dell'acqua;
- γ_s è la tensione superficiale dell'acqua;
- v_h è la velocità del fluido all'interno del restringimento;
- $P_{valle} - P_{vapore}$ è ovviamente la differenza tra la pressione presente a valle del restringimento e la tensione di vapore dell'acqua;
- n_p è il numero di passaggi attraverso il reattore di cavitazione (piastra forata o tubo di Venturi);
- L_i è l'insieme dei parametri geometrici che caratterizzano il reattore. Tra questi si ricordano il diametro dell'orifizio (d), il diametro della tubazione a monte del restringimento (D), lo spessore (b) della piastra (si ricordino le differenze tra thin e thick plate) ed infine anche il numero di fori n.

Nell'analisi vengono scelte in particolare tre di queste grandezze come fondamentali ρ, v_h e d e vengono ottenuti i seguenti gruppi adimensionali applicando il teorema di Buckingham (anche noto come teorema π), utili per la descrizione di fenomeni di cavitazione idraulica:

$$\frac{C}{C_0} = f_2\left(C_0 d^3, \frac{\rho v_h d}{\mu}, \frac{\rho {v_h}^2 d}{\gamma_s}, \frac{P_{valle} - P_{vapore}}{\rho {v_h}^2}, n_p, \frac{D}{d}, \frac{b}{d}, n\right)$$

In cui troviamo, procedendo da sinistra verso destra, le seguenti grandezze:

- efficienza della disinfezione;
- parametro di concentrazione adimensionale;
- numero di Reynolds (Re);
- numero di Weber (We);
- numero di cavitazione (σ_v);
- numero di passaggi (n_P);
- parametri che descrivono le caratteristiche geometriche del reattore di cavitazione.

Una volta determinati i parametri adimensionali è stata effettuata un'analisi dimensionale dei lavori ricavati dalla letteratura preesistente. Da questa analisi è risultata confermata l'ipotesi che non si fosse lavorato (negli esperimenti precedenti) in termini di gruppi adimensionali.

L'utilizzo dei parametri adimensionali fornisce senza ombra di dubbio maggior forza alle considerazioni scaturite dagli esperimenti. Inoltre, risulta essere anche un ottimo strumento per passare da esperimenti su scala di laboratorio a esperimenti in scala molto più ampia mantenendo costanti i valori adimensionali ricavati nelle prove in precedenza.

Riassumendo le evidenze ricavate da Burzio et al. (2020) [1] nelle sue sperimentazioni (piastra a 4 fori, diametro 2.5 mm) è possibile affermare che:

1. L'efficienza dell'abbattimento microbiologico all'interno del circuito risulta essere funzione del tempo di trattamento; all'aumentare del numero di passaggi effettuati si ha infatti un aumento dell'abbattimento;
2. La concentrazione iniziale C_0 di E. coli nell'inoculo sembra non avere influenza sull'abbattimento almeno in termini adimensionali;
3. Non sembrano esserci le possibilità di effettuare uno scaling up del circuito verso il trattamento di volumi maggiori.

L'ing. Davello (2021) [2] parte in primis con il rifacimento delle prove sostenute da Burzio et al. (2020) [1] (quindi le prove con piastra a 4 fori di diametro 2.5 mm) ed in seguito vengono eseguite anche prove con una piastra monoforo con un diametro pari a 4.5 mm.

Identificativo prova	4F_1	4F_2	4F_3
Parametro		Valore	
F_{pompa} (Hz)	50	50	50
d fori (mm)	2,5	2,5	2,5
n fori (-)	4	4	4
$V_{trattato}$ (l)	20	20	20
C_0 (CFU/100 ml)	$\approx 10^4$	$\approx 10^4$	$\approx 10^4$
T (°C)	/	/	/
P_{monte} (bar)	7,5	7,5	7,5
P_{valle} (bar)	0,0	1,0	2,0
Q (l/s)	0,61	0,61	0,61
n_p (-)	/	/	/
σ_c (-)	0,20	0,40	0,60
Re (-)	77700	77700	75100

Figura 3.1 Condizioni sperimentali per le prove a quattro fori (rifacimento prove Burzio et al (2020)) [1]

Le prove effettuate con la piastra monoforo indagano tre regimi caratterizzati da un numero di cavitazione differente (Figura 3.2) e si differenziano anche per una concentrazione iniziale dell'inoculo C_0 variabile tra 10^2 e 10^4 CFU/100 ml. L'obbiettivo di questa variabilità nelle concentrazioni è quello di stimare l'efficacia del trattamento al variare della concentrazione iniziale per avvalorare o meno le tesi proposte da Burzio et al. (2020) [1].

Caso	Q (l/s)	P_{valle} (bar)	Re (-)	σ_c (-)
1	0,321	2,6	90800	1,71
2	0,321	0,6	90800	0,78
3	0,321	0,1	90800	0,53

Figura 3.2 Caratteristiche idrodinamiche delle prove eseguite per un solo foro

Attraverso i suoi studi [2], l'ing. Davello conclude dunque che:

1. L'efficacia del trattamento di disinfezione tramite cavitazione idrodinamica risulta essere confrontabile nei due casi di piastra monoforo e di piastra a quattro fori;
2. Viene confermata nuovamente la possibilità che possano essere sufficienti i soli sforzi tangenziali turbolenti per l'abbattimento batterico;
3. La concentrazione iniziale sembra avere una certa influenza sulla buona riuscita del trattamento. Si nota infatti come per concentrazioni iniziali inferiori a 103 CFU/100 ml si ha un abbattimento del 100% mentre invece per concentrazioni superiori si giunge al massimo ad un abbattimento del 75%.

4 Metodi sperimentali

Nel seguente capitolo viene presentata la configurazione sperimentale e le varie attrezzature di laboratorio adottate durante le prove.

La gran parte degli esperimenti sono stati svolti attraverso un circuito sperimentale assemblato appositamente presso il laboratorio di cavitazione ricavato all'interno del Dipartimento dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture del Politecnico di Torino.

Il circuito è stato pensato e realizzato principalmente dal ricercatore del Politecnico di Torino ing. Riccardo Vesipa coadiuvato nel tempo per le modifiche da effettuare dagli ingegneri Edoardo Burzio e Roberta Davello [16].

4.1 Circuito idraulico

Il circuito, realizzato appositamente per le prove di disinfezione con cavitazione idrodinamica, si compone principalmente di elementi in acciaio inox 316L (acciaio adatto all'uso alimentare e quindi ad eseguire le prove di disinfezione) ed una test section in grado di accogliere una piastra forata per indurre la cavitazione idrodinamica (Figura 4.1). Gli elementi in acciaio sono tra loro raccordati tramite attacchi flangiati o attacchi maschio-femmina che risultano conformi alla normativa DIN-11851.

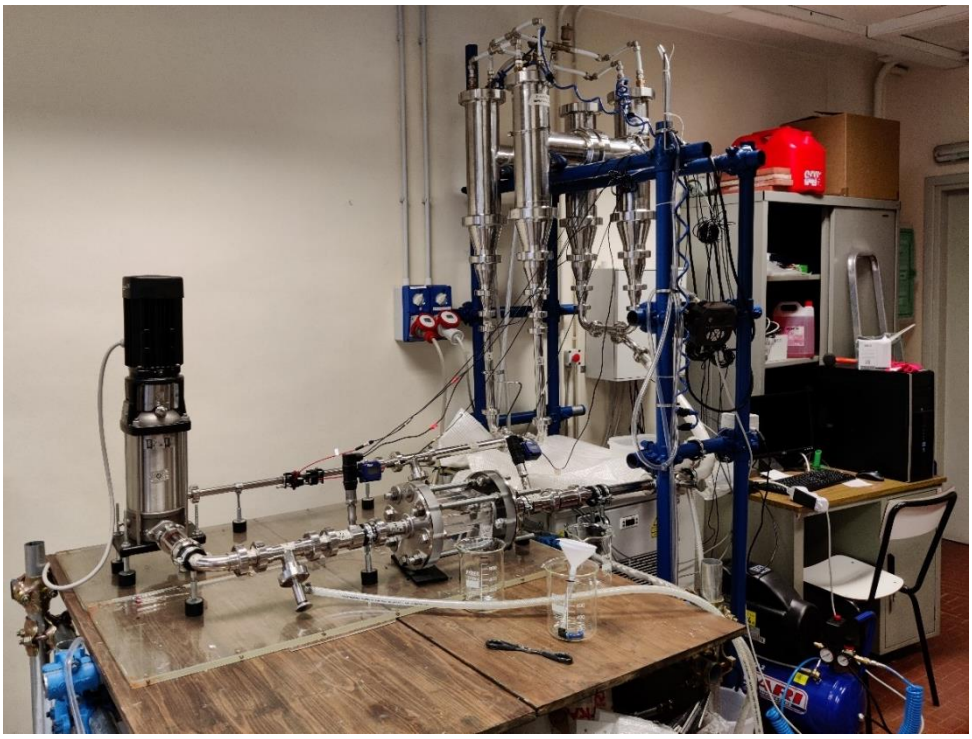


Figura 4.1 Vista d'insieme del circuito sperimentale

Tutti i pezzi sono pezzi appositamente progettati dall'ing. Vesipa ed in seguito realizzati da un'officina specializzata. L'assemblaggio degli elementi costituenti il circuito ha seguito lo schema idraulico riportato in figura (Figura 4.2).

È possibile notare come in realtà i circuiti sono due e si compenetrano tra loro; al circuito idraulico vero proprio in rosso si va a sommare il circuito del sistema di raffreddamento in blu. Il sistema di raffreddamento è sostanzialmente costituito di un apparecchio refrigerante (il chiller) ed una serpentina che viene inserita all'interno del serbatoio al fine di far avvenire lo scambio di calore con il liquido.

Per quanto concerne invece il circuito idraulico, questo è costituito da un serbatoio, seguito da un primo scarico per lo svuotamento (S1) e da un misuratore di portata (M.P.); successivamente viene posta una pompa idraulica (P.I.) ed un secondo scarico a valle della pompa(S2). È presente poi ovviamente la piastra forata (P) e una specola in vetro (SP) che costituiscono il reattore di cavitazione, preceduti e seguiti da due manometri a monte ed a valle del restringimento (rispettivamente M1 e M2). Infine, è presente una valvola a sfera (V) per la gestione della pressione di valle (importante per giungere al numero di cavitazione desiderato) ed un ultimo scarico per il prelievo dei campioni (S3). [36]

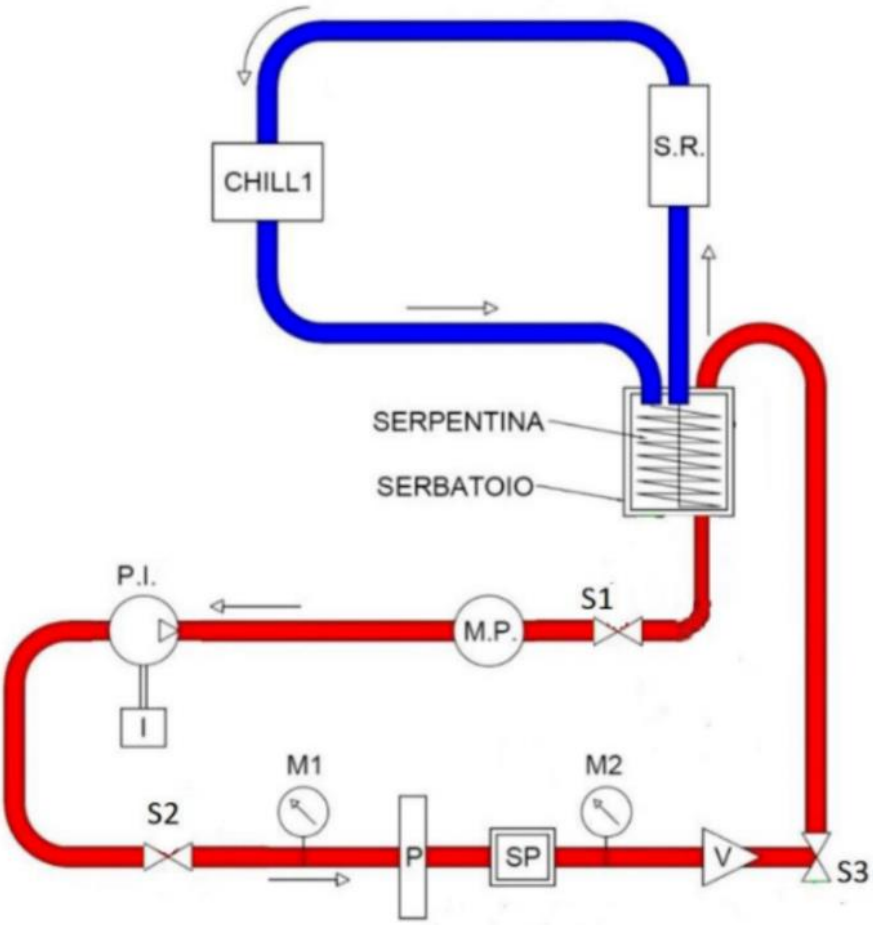


Figura 4.2 Schema idraulico semplificato del funzionamento del circuito

Come è possibile notare già dalla Figura 4.1, l'intero circuito è sostenuto da una struttura in tubi Innocenti che garantiscono stabilità a quello che poi è il piano d'appoggio realizzato in legno e rivestito da una lastra di plexiglass facilmente pulibile e sterilizzabile.

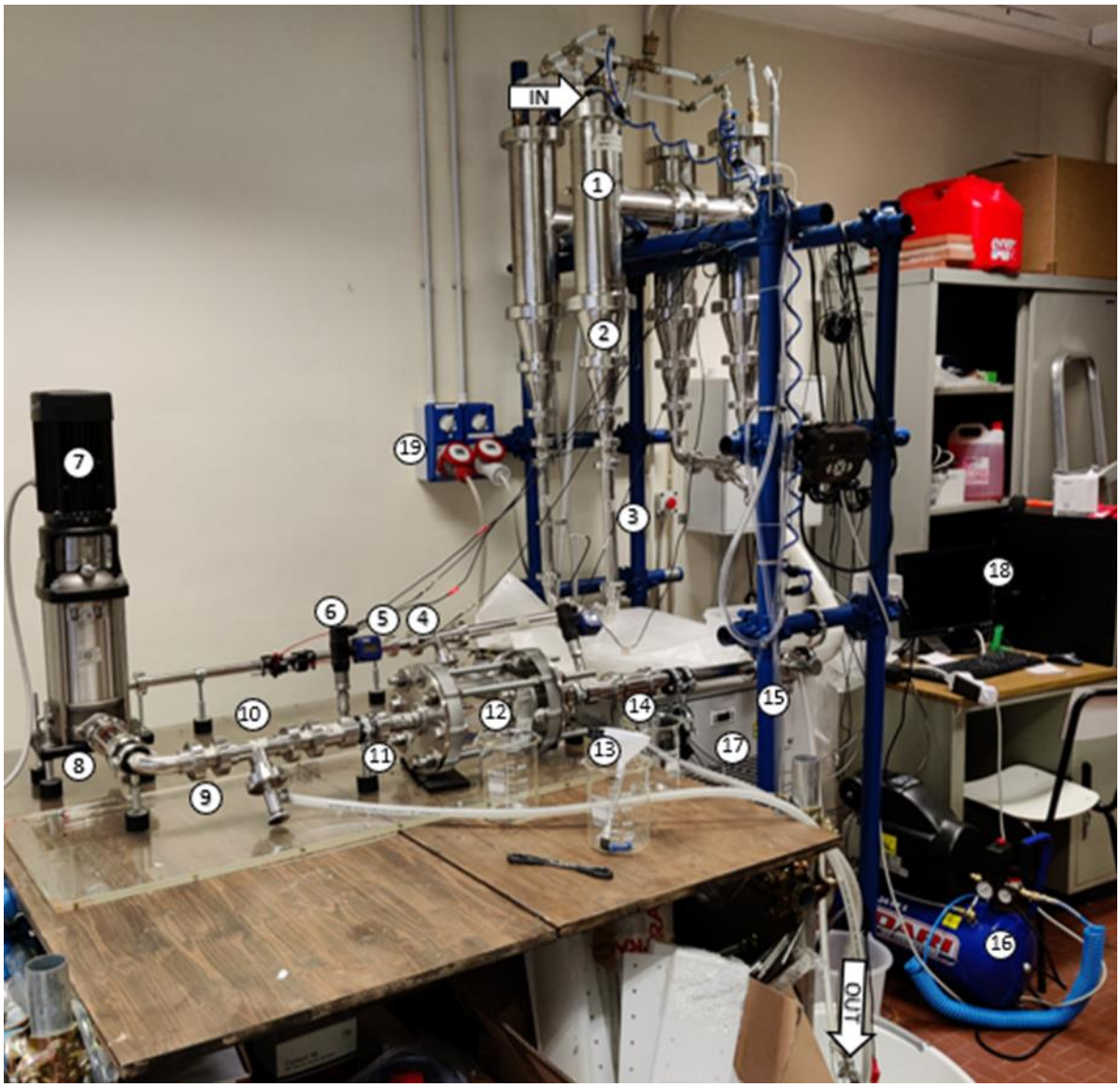


Figura 4.3 Indicazione dei pezzi componenti il circuito sperimentale

Evidenziati in (Figura 4.3) si possono notare i vari elementi componenti il circuito che vengono anche elencati per chiarezza nella tabella seguente (Tabella 4-1).

Tabella 4-1 Elenco dei componenti del circuito

ID	STRUMENTO
1	Serbatoio
2	Serie di raccordi fino a ϕ32mm
3	Tubo ϕ32mm
4	Raccordo ϕ32mm-ϕ20mm
5	Tubo ϕ20mm
6	Misuratore di portata
7	Pompa
8	Specola
9	Accoppiamento maschio-maschio
10	Scarico
11	Manometro di monte

12	Test section / reattore di cavitazione
13	Manometro di valle
14	Valvola a sfera
15	Scarico
16	Compressore
17	Chiller
18	Computer
19	Presa elettrica

4.1.1 Serbatoio (punto 1)

Il serbatoio si compone di quattro cilindri speculari in acciaio inox alimentare raccordati a due a due. L'intero circuito ha un volume complessivo di circa 30 litri al netto del volume delle serpentine immerse al suo interno. Nelle procedure sperimentali si procedeva di norma al riempimento fino a 24 litri, valore che permette il corretto ricircolo dell'acqua facendo in modo che avvenga l'attivazione del ponte di collegamento tra i due cilindri che troviamo in figura.

Il serbatoio, come si nota dalle figure precedenti, è posto a una quota relativa rispetto al resto del circuito pari a circa 1 m. Il suo riempimento viene effettuato attraverso una piccola pompa elettrica in grado di garantire una portata non variabile e pari a 4 l/min. L'approvvigionamento è garantito con tubi in pvc che garantisce gli standard qualitativi alimentari, igienizzati e sigillati dall'esterno che consentano direttamente il riempimento senza l'ingresso di potenziali agenti patogeni esterni (Figura 4.4).

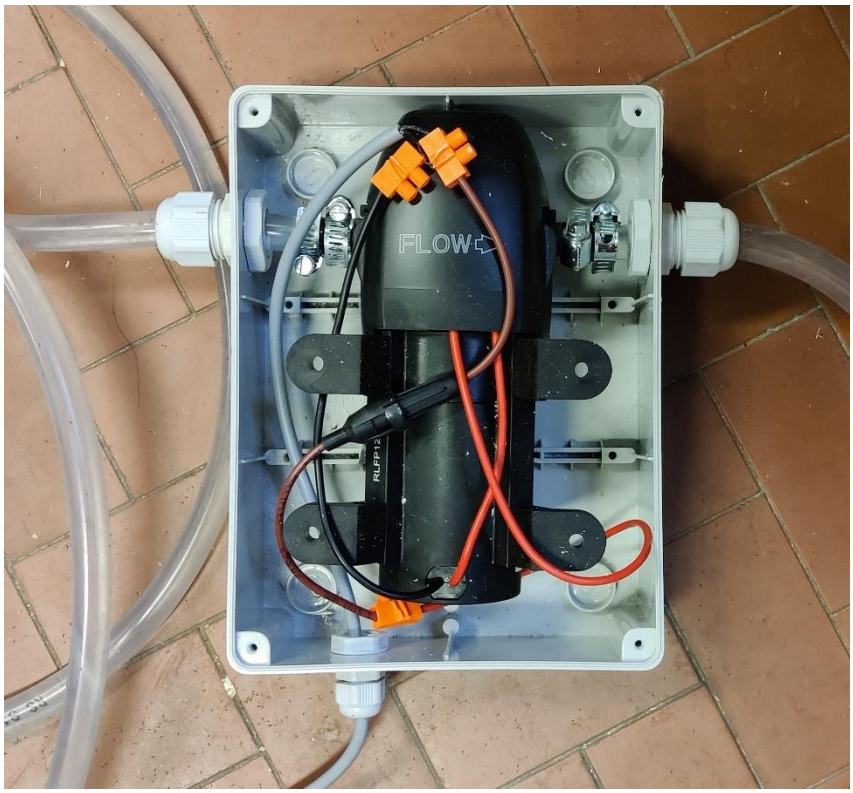


Figura 4.4 Pompa elettrica utilizzata per il riempimento del serbatoio

In quanto il serbatoio non è trasparente, per la fase del riempimento è stato predisposto un piezometro in grado di fornire il livello dell'acqua interno al recipiente tramite il suo collegamento allo scarico S3 (Figura 4.5).

Figura 4.5 Sommità graduata e punto di attacco del piezometro installato nel circuito

4.1.2 Strumenti di misura (punti 6, 11, 13)

All'interno del circuito troviamo alcuni strumenti utili per la misurazione delle caratteristiche idrodinamiche del flusso [40]:

- Misuratore di portata a ultrasuoni con lettore a digitale con accuratezza dell'ordine di ± 0.001 l/s (Figura 4.6);
- Due manometri a membrana posizionati rispettivamente a monte ed a valle del reattore di cavitazione con accuratezza pari a ± 0.01 bar (Figura 4.7);
- Termocoppia per la misurazione della temperatura in tempo reale (Figura 4.8).

Figura 4.6 A sinistra: sensore ad ultrasuoni per la misurazione della portata; a destra: lettore di portata

Figura 4.7 Manometri di monte e di valle durante le prove in regime turbolento

Figura 4.8 Termocoppia per la misurazione della temperatura dell'acqua nel circuito

4.1.3 Pompa idraulica

Il circuito idraulico è stato dotato di una pompa centrifuga. La pompa installata è di tipo multistadio orientata in direzione verticale con bocche di aspirazione e mandata sullo stesso livello (modello ***Grundfos CRN 3-13 A-CA-A-E-HQQE***). L'acciaio a contatto con il liquido con cui è realizzata è del tipo inox AISI 316 che garantisce gli standard qualitativi necessari. Le parti in acciaio, ghisa e alluminio sono dotate di un rivestimento a base epossidica realizzata tramite un processo di elettrodeposizione catodica (CED) che garantisce una pellicola variabile tra i 18 e i 22 μm di spessore. Tutti gli elementi sono opportunamente giuntati o flangiati e la pompa garantisce una massima pressione di funzionamento pari a 25 bar sia alla temperatura minima di funzionamento (-20°C) che alla massima (120°C). La portata massima garantita dal produttore è pari a 3 m^3/h con una prevalenza massima di 85.5 metri di colonna d'acqua.

Durante gli esperimenti effettuati la frequenza di funzionamento è variata tra valori di 15 Hz e valori di 45 Hz anche se, per la fase di lavaggio del circuito, ci si è spinti fino a valori di 50 Hz. Si riportano di seguito la curva caratteristica della pompa, il rendimento e la potenza dissipata per una frequenza pari a 50 Hz fornite dal produttore (Figura 4.9).

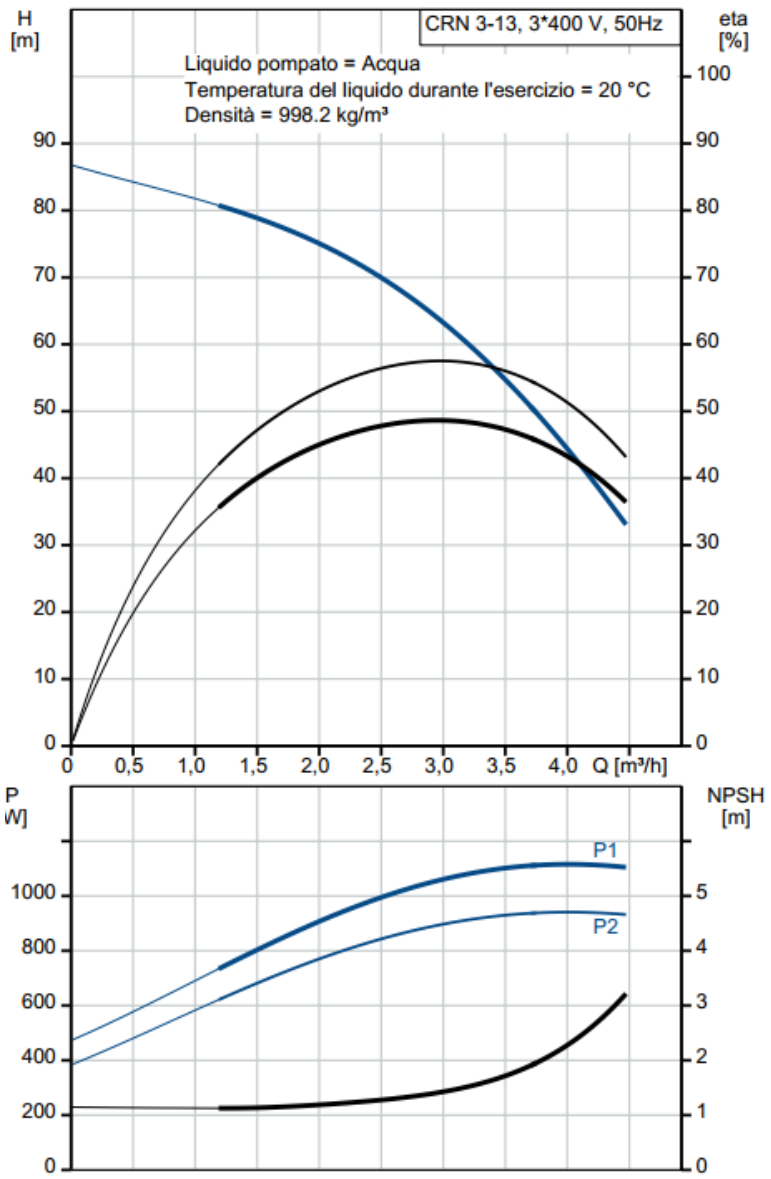


Figura 4.9 Curve caratteristiche della pompa

La potenza nominale della pompa è pari a 1.1 kW garantita da un motore standard IEC tipo 80C a due poli la cui efficienza a pieno carico risulta essere pari all' 82.7 %. Sia la dimensione della bocca di aspirazione che di mandata risulta essere un DN32 in acciaio AISI316. In (Figura 4.11) è possibile notare le dimensioni della pompa utilizzata come fornite dal produttore.

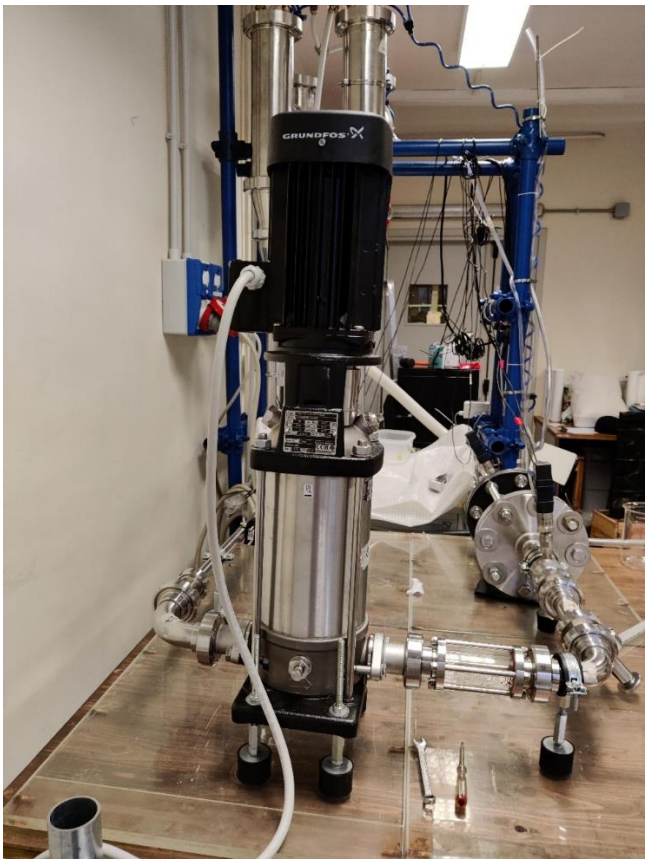


Figura 4.10 Immagine della pompa utilizzata

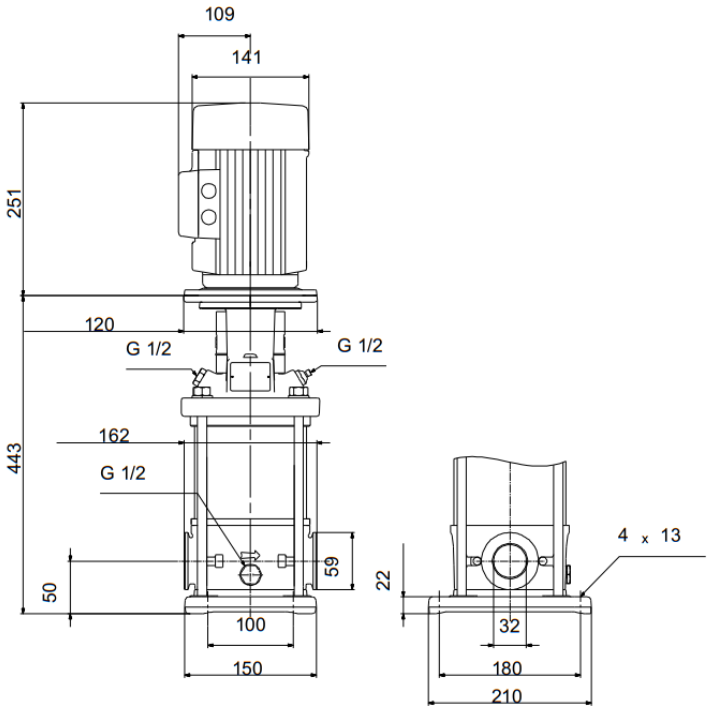


Figura 4.11 Particolare costruttivo della pompa

Per il controllo della portata e del funzionamento della pompa in generale viene utilizzato un inverter che è in grado di modificare la frequenza di funzionamento della pompa fino al raggiungimento delle condizioni necessarie per le

sperimentazioni. È importante che la pompa sia posizionata ad una distanza sufficiente affinché si dissipino le correnti turbolente in uscita dalla stessa prima che il fluido entri nella test section. Proprio con questo fine si è scelto di posizionare la test section ad una distanza di circa novanta diametri dalla pompa stessa.

Figura 4.12 Schermata di gestione a distanza della pompa

4.1.4 Specola

Viene inserita una specola in vetro a valle della pompa al fine di garantire un monitoraggio visivo delle condizioni all'interno del circuito. il suo funzionamento è sostanzialmente legato alla presenza o meno di aria all'interno del circuito che potrebbe portare alla formazione di cavitazione in una zona non voluta (all'interno della pompa) con effetti negativi sulla sua funzionalità.

In presenza di aria si procede ad un'operazione di sfiatatura dell'impianto attraverso un aumento della frequenza di funzionamento della pompa fino a 50 Hz per circa 10-15 minuti di modo che tutta l'aria possa essere trasportata nel serbatoio dove possa venire eliminata essendo questo a pressione atmosferica.

Figura 4.13 Specola in vetro utilizzata

4.1.5 Test section

La test section utilizzata durante le prove risulta essere uno degli elementi di maggior importanza in quanto ospita l'orifizio responsabile della cavitazione.

La presente test section è stata utilizzata in particolare per le prove effettuate con la piastra ad un solo foro come si nota in (Figura 4.14).

La presente sezione di prova si presenta come un unico blocco in plexiglass trasparente cavo all'interno che permettesse il passaggio dell'acqua e di conseguenza anche un controllo visivo dei fenomeni cavitativi in atto.

L'intero elemento si compone di due blocchi caratterizzati da dimensioni e materiali differenti tenuti insieme attraverso flange di diametro pari a 22 cm. All'interno del primo blocco è alloggiata la piastra forata, mentre nel secondo blocco avviene l'espansione e la conseguente dissipazione del fenomeno cavitativo prima di reinsersi all'interno del tubo di diametro 20 mm.

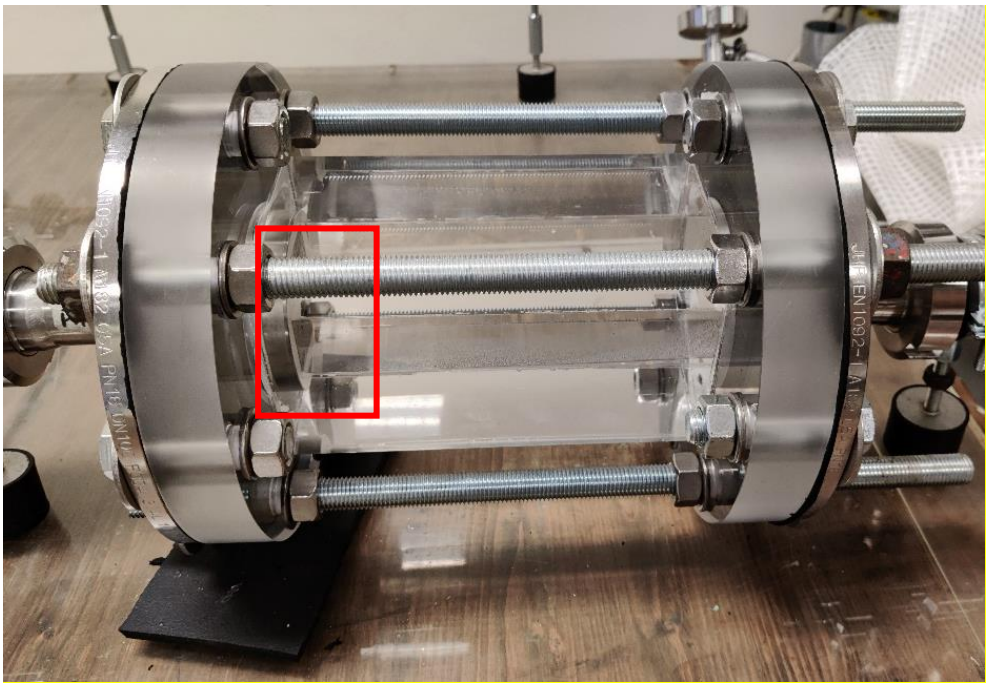


Figura 4.14 Test section utilizzata con piastra forata evidenziata

4.1.6 Piastra forata

L'orifizio è stato realizzato attraverso la fresatura di una piastra circolare in acciaio inox 316 spesso 1 cm e di diametro pari a 5.2 cm (Figura 4.15).

Vista la dimensione tipica dei fori dell'ordine di qualche millimetro, queste dimensioni della piastra alloggiabile hanno permesso la sperimentazione su differenti tipologie di fori in termini di numero e dimensioni degli stessi anche se nel presente lavoro di tesi l'attenzione si è principalmente rivolta alla piastra monoforo.

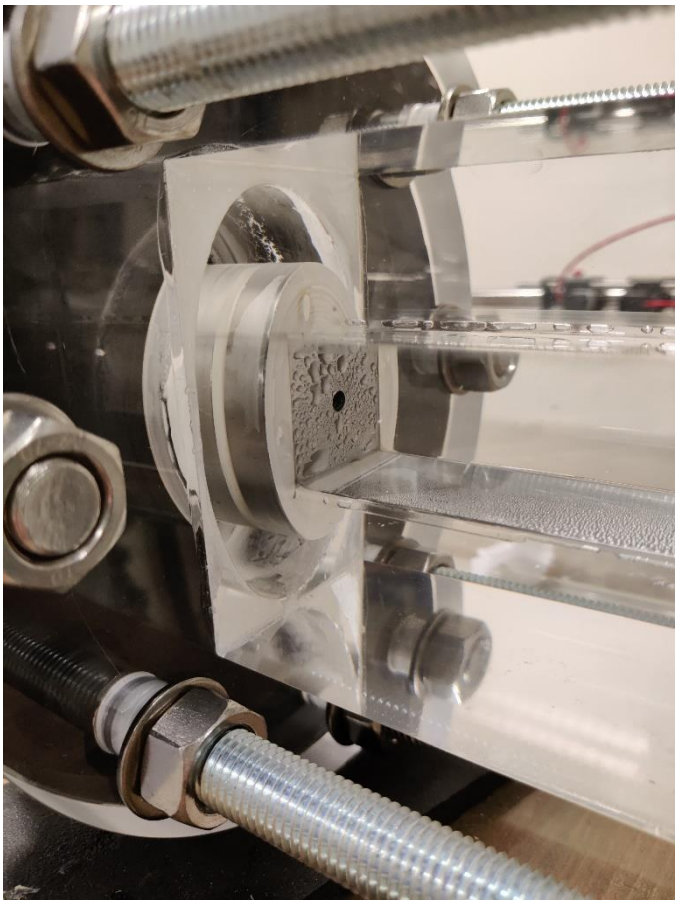


Figura 4.15 Piastra forata utilizzata per indurre cavitazione

4.1.7 Valvola a sfera

Come già anticipato in precedenza, sono stati svolti differenti esperimenti per la valutazione dell'efficacia di differenti regimi cavitativi. Si è dunque reso necessario procedere all'inserimento di una valvola a sfera (Figura 4.16) che permettesse di variare il parametro della pressione di valle, valore che è presente nell'espressione del numero di cavitazione.

Anche questa valvola è realizzata in acciaio AISI 316 ed è fornita di due attacchi maschio-femmina alle estremità.

La presente valvola è ovviamente posizionata a valle della test section al fine di variare la pressione di valle.

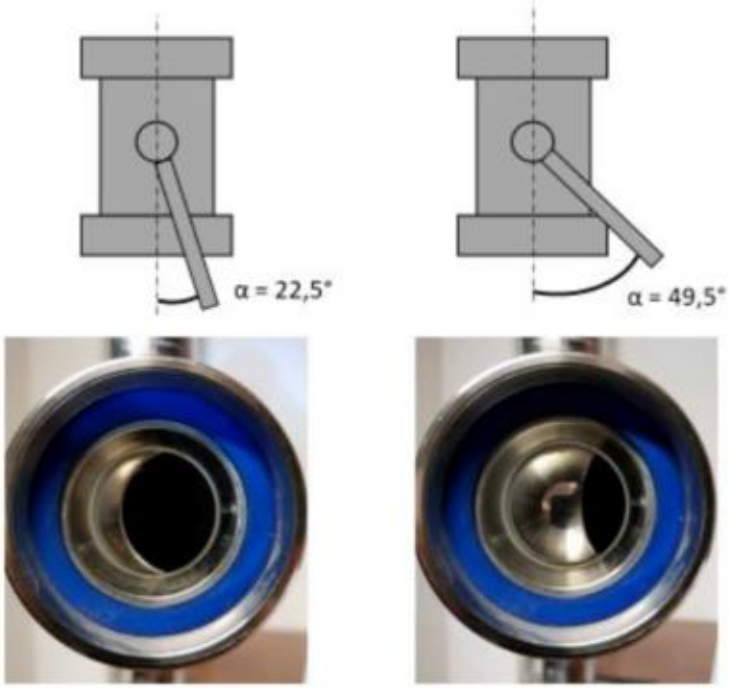


Figura 4.16 Principio di funzionamento della valvola a sfera a seconda dell'angolo di apertura α

4.1.8 Scarico

All'interno del circuito sono presenti tre valvole di scarico che permettessero il completo svuotamento del circuito. Le tre valvole erano collegate a tubi per lo scaricamento che si raccordavano poi in una bacinella. Nella bacinella veniva dapprima trattata l'acqua con ipoclorito di sodio con azione battericida per poi essere smaltita nella rete fognaria.

Due delle tre valvole erano sigillate al tubo di scarico mediante fascette, la terza veniva usata durante l'esecuzione della prova per il campionamento e solo alla conclusione di questa veniva raccordata alle altre per lo scarico (S3 in Figura 4.2).

4.1.9 Compressore

Ai fini dell'utilizzo all'interno delle prove turbolente ma senza indurre un regime cavitativo, è stato utilizzato un compressore come si vede in (Figura 4.17).

È stato scelto un compressore ad aria con motore asincrono da 2 HP e serbatoio da 24 litri (modello '*Dari Smart 24/210*').

È dotato di gruppo pompante lubrificato con cilindro in ghisa, carter e testa in alluminio. L'involucro è realizzato con coperture in plastica che convogliano l'aria per il raffreddamento della testata.

La potenza assorbita è pari a 1.5 kW e l'ingombro complessivo è pari a 58 x 24 x 59 cm per un peso totale di 23 Kg.

Il suo utilizzo è servito per andare a mettere in pressione il circuito, in particolare si è imposto una portata a valle di 2.6 bar di modo che non si entrasse in regime cavitativo.

Figura 4.17 Compressore Dari Smart 24/210

4.1.10 Acquisizione dati

Gli strumenti di misura elettronici per la determinazione dei dati idrodinamici sono poi stati cablati per le successive misurazioni tramite una scheda di acquisizione. Viene infatti inviato dal sensore un segnale elettrico alla scheda, manifestazione della variazione di una determinata grandezza fisica misurata; a questo punto la scheda converte il segnale e lo trasforma in un input digitale recepibile dal computer e quindi leggibile.

I dati in ingresso relativi a temperatura, portata e pressione sia di monte che di valle sono stati acquisiti attraverso il software LabVIEW che ha permesso di

organizzare i dati. I valori in ingresso in continuo sono stati poi mediati eliminando la condizione iniziale considerata 'di assestamento' per la prova.

Queste misurazioni sono risultate di fondamentale importanza per il controllo continuo delle condizioni idrodinamiche durante la prova ed anche come verifica alla fine della stessa.

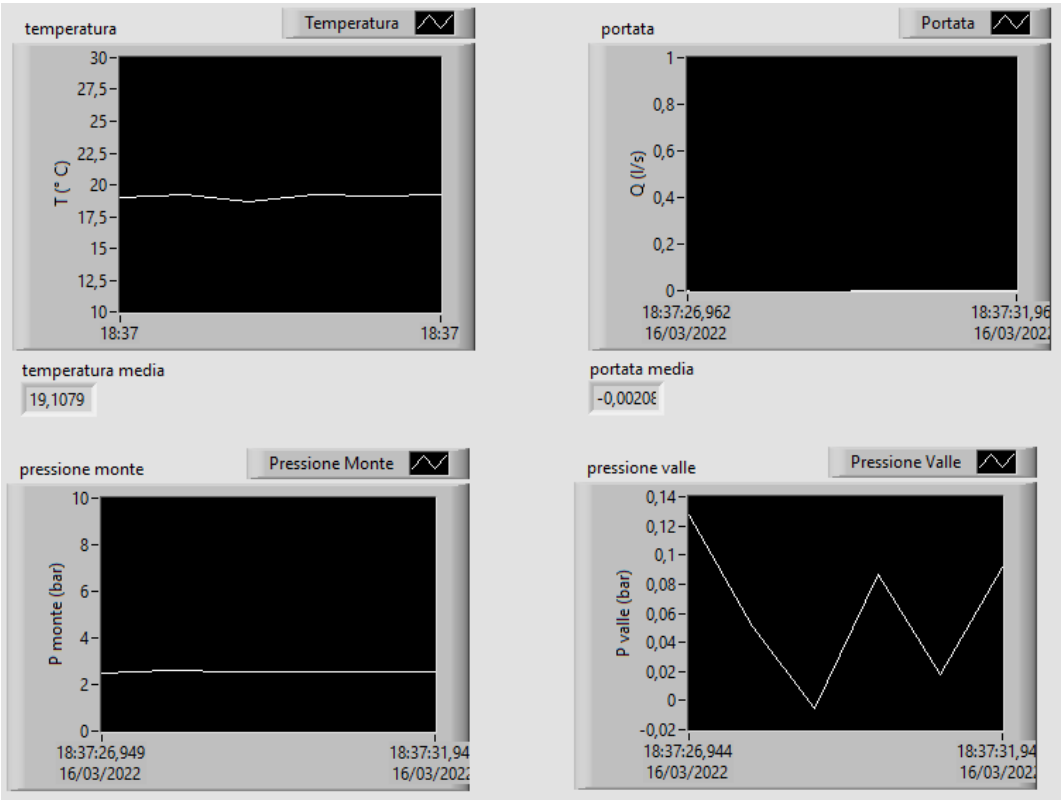


Figura 4.18 Interfaccia grafica del programma utilizzato per le acquisizioni.

4.1.11 Circuito di raffreddamento

Uno dei problemi fondamentali sorti durante la progettazione risultava essere il necessario surriscaldamento a cui era sottoposto il fluido nel tempo; infatti, sia la pompa idraulica che l'agitazione derivante dal processo di cavitazione portano ad un innalzamento delle temperature modificando così le condizioni della prova. Per ovviare a questo problema è stato dunque progettato un sistema di raffreddamento caratterizzato da un chiller (macchina che sfrutta il ciclo frigorifero per sottrarre calore all'acqua (punto 17 in Figura 4.3) e da una serpentina che è stata posta all'interno del serbatoio.

Il fluido refrigerante che circola all'interno delle quattro serpentine (poiché quattro sono i serbatoi cilindrici messi in collegamento, Figura 4.20) è di fatto una miscela

di acqua demineralizzata e glicole propilenico, sostanza utilizzata in molti sistemi di raffreddamento.

Figura 4.19 Chiller in funzione

Figura 4.20 A sinistra: particolare di una serpentina da inserire nel serbatoio; a destra: collegamenti tra le serpentine per il corretto ricircolo del liquido di raffreddamento.

4.1.12 Strumentazione per prove statiche

Al fine di effettuare anche prove in assenza di circolazione (di qui in poi 'prove statiche') per la valutazione degli effetti di un trattamento effettuato con sola immissione di NaClO, è stata progettata una procedura ed una strumentazione apposita che permettesse lo svolgimento delle prove in parallelo con quelle di ibridazione.

- *Serbatoio per prove statiche*

Si è scelto di utilizzare un piccolo serbatoio in plastica alimentare del volume complessivo di 500ml con scala graduata al suo interno ed una accuratezza di 10 ml.

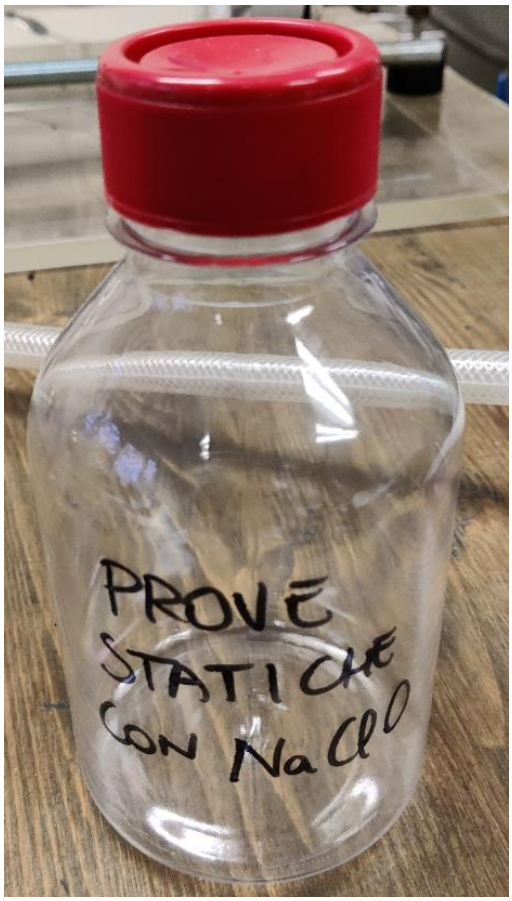


Figura 4.21 Recipiente utilizzato per lo svolgimento delle prove statiche.

- <u>*Misuratore del cloro residuo*</u>

Per la valutazione del cloro libero residuo in acqua a seguito di ogni risciacquo e durante i trattamenti 'ibridi' (ovvero con compresenza di cloro e cavitazione) è stato utilizzato un colorimetro (Figura 4.22).

Figura 4.22 Colorimetro e strumenti utilizzati

Attraverso l'inserimento nel campione prelevato di una sostanza reagente è possibile la valutazione della presenza di cloro libero residuo. Se infatti il campione prelevato assumeva una colorazione rosacea allora questo era sintomo

di una presenza del cloro libero, laddove invece rimaneva trasparente allora il cloro libero era da considerarsi inesistente. Oltre alla verifica di tipo qualitativo e visiva se ne quantificava anche la presenza attraverso l'inserimento del campione all'interno del colorimetro stesso.

4.2 Protocolli

Sono state effettuate diverse tipologie di prove sperimentali all'interno del circuito con acqua contaminata da E.coli. La scelta del batterio da utilizzare è da ricercarsi nel suo essere un elemento comunemente utilizzato nell'ambito della ricerca e anche per il fatto che le precedenti analisi [1] erano state effettuate con questo tipo di batterio. L'Escherichia coli è inoltre un ottimo indicatore della contaminazione fecale, fattore che si rivela fondamentale per la determinazione della qualità di un'acqua.

Di seguito si presenta il protocollo utilizzato per le prove cosiddette di 'ibridazione', in cui all'interno della procedura sperimentale si induceva la cavitazione insieme all'utilizzo di ipoclorito di sodio (NaClO). Lo scopo di queste prove è quello di andare a valutare l'influenza della cavitazione idrodinamica sull'efficacia del disinfettante chimico, la volontà è infatti di provare a capire se sia possibile ridurre la concentrazione di utilizzo dell'ipoclorito di sodio. [18]

I protocolli di seguito presentati saranno dunque quelli relativi alle prove di ibridazione, alle prove cosiddette 'statiche' in assenza di circolazione del fluido ed alle prove in regime turbolento.

4.2.1 Prove di ibridazione

Le condizioni idrodinamiche desiderate ($\sigma_v = 0.53$) sono state raggiunte attraverso una piastra mono foro con un diametro pari a 4.5 mm e attraverso la regolazione della portata e della pressione a valle del restringimento.

Tabella 4-2 Condizioni idrodinamiche nelle quali si sono svolte le prove

Q (l/s)	P_{valle} (bar)	Re (-)	σ_v (-)
0.321	0.1	90800	0.53

Per quanto concerne invece le concentrazioni di NaClO immesse, sono stati effettuati esperimenti con concentrazioni sempre inferiori a quelle di norma

utilizzate negli impianti di potabilizzazione (pari a 0.2 mg/l). In particolare, sono state utilizzate rispettivamente concentrazioni di 0.1 e 0.05 mg/l pari quindi alla metà e ad un quarto rispetto a quelle normalmente utilizzate.

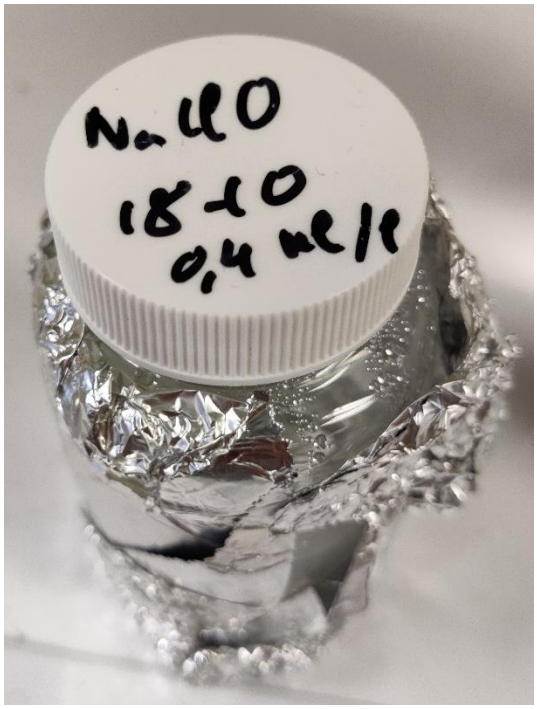


Figura 4.23 Esempio di flacone di ipoclorito di sodio utilizzato; ogni flacone è stato rivestito di alluminio poiché l'ipoclorito è fotosensibile.

Tutto il materiale biologico (e dunque anche la soluzione di NaClO) è stato preparato e fornito da S.M.A.T. S.p.A., società partner del progetto. In particolare, la soluzione di ipoclorito di sodio fornita aveva titolazione al 15% ed è ovviamente stata dosata per ottenere le concentrazioni desiderate nel circuito.

In totale, per quel che riguarda le prove con metodologia 'ibrida' sono state testate quattro configurazioni di prova, ciascuna di queste identificata da un numero identificativo come si può osservare in Figura 4.24. Ciascuna configurazione è stata testata con entrambe le concentrazioni di NaClO prima presentate inserendolo direttamente nel serbatoio. Di ciascuna prova sono sempre state eseguite almeno tre repliche al fine di garantire per ciascuna di esse una buona affidabilità dei risultati.

Per alcune configurazioni di prova (id. 1 e 4) è stato previsto un pretrattamento dell'acqua in analisi. Il 'pretrattamento' consisteva sostanzialmente in 30 minuti di circolazione all'interno dell'impianto in assenza di cavitazione (e dunque pompa che girava a basse frequenze) e di ipoclorito di sodio. Gli obbiettivi del

pretrattamento sono prevalentemente due: in primis escludere il ruolo della pompa centrifuga nell'abbattimento e in secondo luogo valutare l'effetto di un regime turbolento spinto sull'abbattimento stesso.

Id	Tipologia	OP	HC	Pre-trattamento	Durata (min)	[NaClO] (mg/l)	F (Hz)
1	OP+Cl	Si	Si	Si	50	0,05 0,10	15-45
2	OP+Cl	Si	Si	No	20	0,05 0,10	15-45
3	HC+Cl	Si	Si	No	20	0,05 0,10	15-45
4	Cl no OP	No	No	Si	50	0,05 0,10	15-45

Figura 4.24 Riepilogo degli esperimenti di ibridazione effettuati

Di seguito vengono presentate meglio le singole prove effettuate:

- Id 1: iniziale pretrattamento di 30 minuti a 15 Hz, viene poi aggiunto l'ipoclorito di sodio (NaClO) e si hanno 10 minuti a 15 Hz e 10 minuti a 45 Hz (si induce la cavitazione idrodinamica). Durata totale trattamento: 50 minuti;
- Id 2: viene inserito immediatamente l'ipoclorito di sodio, viene poi regolata la pompa su una frequenza di 15 Hz per 10 minuti e poi altri 10 minuti a 45 Hz per indurre la cavitazione idrodinamica. Durata totale trattamento: 20 minuti;
- Id 3: viene inserito immediatamente l'ipoclorito di sodio e viene poi regolata la pompa su una frequenza di 45 Hz per 20 minuti. Durata totale trattamento: 20 minuti;
- Id 4: in questo caso vengono riproposte le procedure seguite nell' Id 1 ma il tutto senza piastra forata, dunque senza indurre la cavitazione idrodinamica ma solo con fenomeni turbolenti spinti. Durata totale trattamento: 50 minuti.

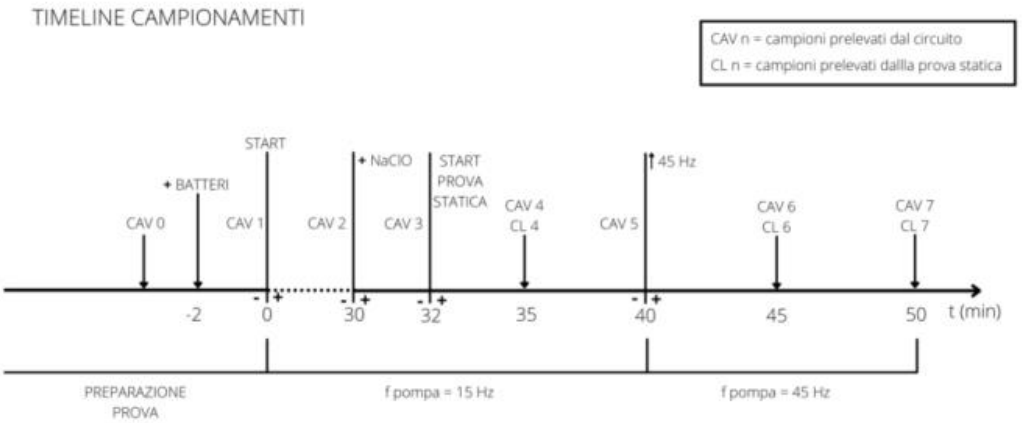


Figura 4.25 Timeline dei campionamenti eseguiti

- <u>*Prove preliminari*</u>

Prima dello svolgimento delle prove vere e proprie sono state condotte alcune prove (di cui non si riportano i risultati) per la valutazione dell'effetto dell'ipoclorito di sodio che poteva rimanere all'interno del circuito.

Il grande utilizzo dell'ipoclorito di sodio nei processi di trattamento acque è infatti anche dovuto alla sua capacità di persistere in acqua anche per lunghi periodi e risultare svolgere dunque la sua azione disinfettante in presenza di potenziali attacchi batterici successivi nella rete. In altre parole, se la concentrazione batterica non è sufficiente a consumare completamente il reagente, questo può rimanere latente e sopprimere dei batteri in un secondo momento.

Dalle prove è emerso infatti che una certa percentuale di ipoclorito permaneva nel circuito e permetteva il verificarsi di un abbattimento batterico anche nelle prove successive senza l'immissione di altro disinfettante chimico.

Si è dunque pensato di modificare la parte del protocollo sperimentale relativa alla sanificazione del circuito e si è inserito un ulteriore step di lavaggio con una soluzione di *sodio tiosolfato* ($Na_2S_2O_3$) al fine di neutralizzare l'azione battericida del cloro.

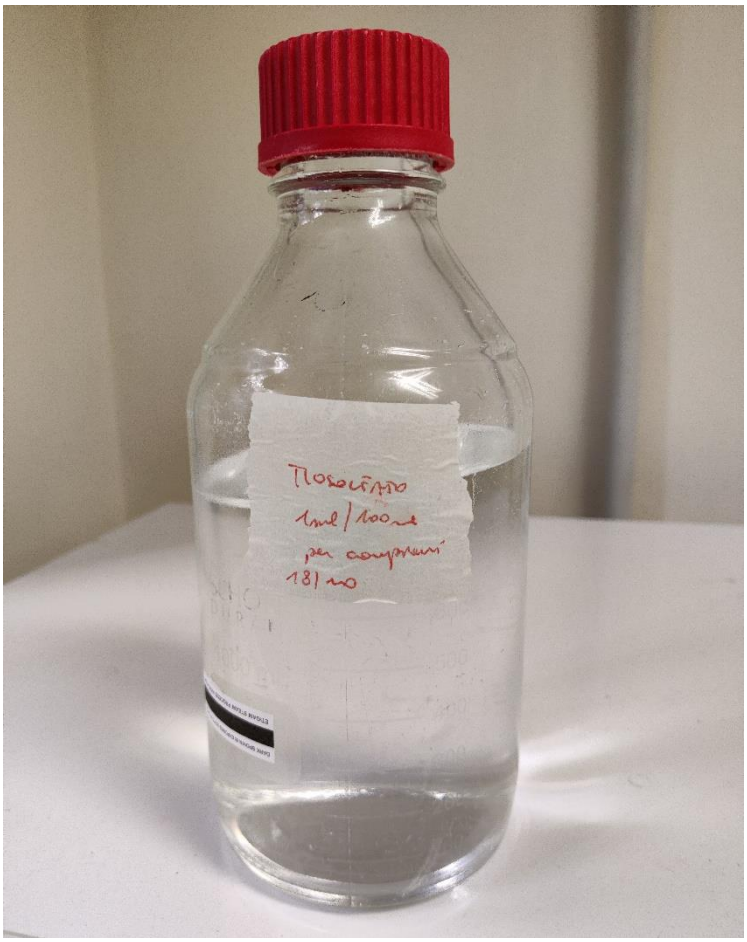


Figura 4.26 Flacone di sodio tiosolfato utilizzato sia per la pulizia del circuito che da inserire nei campioni prelevati (1 ml per campione)

- *Protocollo sperimentale*

Il presente protocollo organizzato in step è stato utilizzato per tutte le prove di ibridazione e presenta di fatto molti elementi in comune anche con quello utilizzato per le prove in regime turbolento spinto.

- *Step 1 – Accensione impianto*

1. Armare il fungo a lato del quadro elettrico;
2. Attaccare alla presa di corrente il misuratore di portata;
3. Accendere l'interruttore della presa a muro a cui è collegato il chiller;
4. Accendere il computer e aprire il programma Labview per l'acquisizione dei dati fluidodinamici;
5. Attaccare l'usb dell'inverter al computer;
6. Aprire il programma Delta VFDsoft per il controllo dell'inverter della pompa da remoto e testare il corretto funzionamento attraverso il pulsante 'test'.

- *Step 2 – Lavaggio iniziale*

Se l'impianto non è stato utilizzato da più di due settimane procedere a un ciclo di sanificazione dell'impianto (vedi pulizia finale).

- *Step 3 – Accensione chiller*

Prima dell'inizio degli esperimenti accendere il chiller mettendo in posizione di ON l'apposito interruttore di modo che venga sempre garantita una temperatura del fluido di 20 ± 0.1 °C.

- *Step 4 – Carico dell'impianto*

Ai fini del riempimento del circuito è necessario svolgere le seguenti attività:

1. Indossare i guanti monouso, gli occhiali e il camice di laboratorio;
2. Chiudere tutti gli scarichi;
3. Collegare il piezometro allo scarico S3 (il più vicino);
4. Aprire il rubinetto inferiore del serbatoio dell'acqua Milli-Q;
5. Inserire il tubo di prelievo in uno dei quattro serbatoi e fissarlo al bordo regolando la fascia stringitubo collocata attorno al serbatoio;
6. Accendere l'interruttore della presa multipla a cui è collegata la pompa per l'acqua ultrapura;
7. Inserire nel serbatoio i primi 23 litri di acqua Milli-Q aiutandosi con il livello segnato dal piezometro tarato;
8. Azionare la pompa del circuito da remoto e portare gradualmente la frequenza a 50 Hz per eliminare le bolle d'aria presenti nel circuito e contestualmente procedere allo sfiato della pompa;
9. Diminuire gradualmente la frequenza della pompa a 10 Hz;
10. Scollegare il piezometro, cercando di non spargere acqua;
11. Spillare il campione zero (CAV n.0) per controllare che non vi sia una concentrazione residua di batteri dalla prova precedente e riporlo in frigorifero;
12. Inserire nel serbatoio la soluzione batterica avendo cura di non formare aerosol;
13. Inserire nel serbatoio il restante mezzo litro di acqua Milli-Q con lo stesso flacone utilizzato per la soluzione con i batteri;
14. Miscelazione a 15 Hz per 2 minuti;
15. Prelevare il campione uno (CAV n.1) e riporlo in frigorifero.

- *Step 5 – Preparazione dell'attrezzatura (contemporaneo a Step 4)*

1. Etichettare ogni flacone per la spillatura dal circuito con la seguente dicitura: data-CAV n.m-ora prelievo, dove n è il numero della prova e m è il numero progressivo del campione;
2. Prelevare 1 ml di soluzione di tiosolfato di sodio e metterlo in ciascun flacone di raccolta;

3. Preparazione della soluzione di NaClO per concentrazioni relative a 0.1 mg/l o 0.05 mg/l.
   - *Step 6 – Trattamento e spillatura campioni*

Per le seguenti operazioni si faccia riferimento alla timeline espressa in (Figura 4.25).

1. Far partire le acquisizioni tramite il software Labview;
2. Se previsto pretrattamento, impostare a questo punto l'inizio della prova e mantenere la frequenza della pompa a 15 Hz per 30 minuti. Trascorso questo tempo prelevare il campione due (CAV n.2);
3. Se il pretrattamento non è previsto, saltare il punto 2 e proseguire con i punti successivi;
4. Versare all'interno del serbatoio la soluzione di ipoclorito di sodio (NaClO);
5. Miscelare a 15 Hz per 2 minuti;
6. Prelevare il campione tre (CAV n.3);
7. Miscelare per 3 minuti e prelevare il campione quattro (CAV n.4);
8. Miscelare per ulteriori 5 minuti e prelevare il campione cinque (CAV n.5);
9. Aumentare la frequenza della pompa a 45 Hz;
10. Attendere 5 minuti e prelevare il campione 6 (CAV n.6);
11. Attendere 5 ulteriori minuti e prelevare il campione 7 (CAV n.7).
    - *Step 7 – Scarico dell'impianto*

1. 1. Dopo aver spillato l'ultimo campione spegnere la pompa, il chiller e fermare l'acquisizione dei dati tramite il software Labview;
2. 2. Svuotare il circuito in una bacinella (serbatoio di scarico) e versare 10 ml di ipoclorito di sodio nel contenitore;
3. 3. Passati 10 minuti, azionare la pompa di sentina e scaricare il refluo in fognatura.
   - *Step 8 – Pulizia finale dell'impianto*

1. Riempire nuovamente il circuito con circa 25 litri di acqua Milli-Q;
2. Preparare una soluzione con 100 ml di perossido di idrogeno in soluzione al 35% (acqua ossigenata, H2O2) e 400 ml di acqua Milli-Q in un flacone da 500 ml;
3. Accendere nuovamente l'inverter e portare la pompa a una frequenza di 15 Hz;
4. Versare gradualmente la soluzione di acqua Milli-Q e perossido di idrogeno nel circuito, in modo da favorire la miscelazione;
5. Lasciar agire la soluzione disinfettante per un'ora;
6. Trascorso il tempo di contatto, spegnere la pompa e svuotare il circuito (non necessita di ulteriore aggiunta di NaClO in bacinella);
7. Svuotare il circuito e scaricare l'acqua in fognatura;

8. Riempire nuovamente il circuito con 25 litri di acqua Milli-Q e avviare la pompa;
9. Aprire uno scarico e contemporaneamente continuare a riempire il circuito cercando di eguagliare le portate in ingresso e in uscita dall'impianto. Si procede con questo bilancio per circa 15 minuti in modo da 'ricambiare' circa due volumi d'acqua nel circuito;
10. Scaricare definitivamente il circuito e lasciare aperti tutti gli scarichi dell'impianto per permetterne l'asciugatura;
11. Pulire tutte le superfici utilizzate nel trattamento con una soluzione di etanolo al 70%;
12. Alla fine di ogni giornata di esperimenti staccare l'alimentazione al quadro elettrico del circuito.

4.2.2 Prove statiche

Questa tipologia di prove è stata svolta in parallelo con le prove appena presentate di tipo 'ibrido'. La volontà, all'atto della progettazione delle procedure sperimentali di queste prove, era quella di andare ad indagare come potesse variare l'efficacia del trattamento di clorazione in presenza o in assenza di circolazione dell'acqua.

Si è dunque scelto di andare a prelevare un quantitativo d'acqua adeguato (circa 500 ml che è il volume del recipiente utilizzato) una volta che all'interno del serbatoio era stata aggiunta la concentrazione di NaClO necessaria alla prova e si era garantito il mescolamento per 2 minuti circa.

Le tempistiche del campionamento hanno seguito quelle proposte dalla timeline dei campionamenti presentata in Figura 4.25. La nomenclatura utilizzata per le prove è stata la seguente: data-CL n.m-ora prelievo, dove n è il numero della prova e m è il numero progressivo del campione.

Dunque, per quanto riguarda gli step in termini di procedure, è possibile che rispetto a quelli appena proposti relativamente alla situazione ibrida, questi varino solamente per quel che concerne il trattamento vero e proprio che di fatto inizia una volta esaurita la fase di mescolamento presentata al punto 5 dello Step 6 e per quanto riguarda la pulizia finale del recipiente utilizzato.

- *Step 6 – Trattamento e spillatura campioni*

1. In concomitanza della spillatura del campione CAV n.3, prelevare un volume necessario al riempimento del contenitore per le prove statiche (500ml);
2. Dopo 3 minuti, prelevare il CL n.4;
3. Attendere 10 minuti e prelevare il CL n.6;
4. Attendere 10 minuti e prelevare il CL n.7.

- *Step 7/8 – Scarico del contenitore e pulizia finale*

1. Svuotare la soluzione rimanente all'interno del serbatoio di raccolta;
2. Trattare l'acqua allo stesso modo di quella proveniente dal circuito;
3. Effettuare il primo di n° 2 risciacqui del contenitore con una soluzione con lo 0.1% di H2O2;
4. Sciacquare con acqua Milli-Q;
5. Effettuare il secondo risciacquo con H2O2;
6. Sciacquare una seconda volta con acqua Milli-Q;
7. Lasciare aperto il contenitore per permettere una completa evaporazione del liquido rimanente.

4.2.3 Prove turbolente

Per quanto concerne le prove effettuate in regime turbolento spinto (Re = 90800, σ_v = 1.78), questo set di prove è stato pensato al fine di indagare l'effettivo ruolo degli stress tangenziali che si vengono a formare senza entrare nel campo della cavitazione idrodinamica ($\sigma_v < 1$) e dunque andando a risparmiare un gran quantitativo di carico che verrebbe altrimenti dissipato nel passaggio tramite un orifizio. In realtà già dalle conclusioni del lavoro svolto da Burzio et al. (2020) [1] si dichiarava quanto fossero promettenti questa tipologia di prove.

È dunque stato pensato un set di quattro prove eseguite nelle condizioni idrodinamiche riassunte nella tabella seguente (Tabella 4-3); ciascuna prova è stata etichettata come 'TURB n.m' dove n è il numero della prova ed m è il numero del campione prelevato.

Tabella 4-3 condizioni idrodinamiche per le prove turbolente

Q (l/s)	P_{valle} (bar)	Re (-)	σ_v (-)
0.321	2.6	90800	1.71

Al fine di indurre un regime turbolento spinto all'interno del circuito senza indurre però la cavitazione, si è reso necessario modificare il circuito procedendo all'inserimento di quattro piastre circolari da porre sulla sommità di ciascun

cilindro del serbatoio del circuito (Figura 4.28). Queste piastre sommitali presentavano inoltre anche delle valvole pensate appositamente per il riempimento del circuito e per lo sfiato dello stesso. Anche la fase di eliminazione dell'aria presente all'interno del circuito si è presentata infatti molto più ardua visto che il circuito non presentava più uno sfiato naturale consistente nel serbatoio. In questo modo è stato possibile mettere in pressione tutto il circuito fino a una P_{valle} pari a 2.6 bar, termine responsabile della variabilità del numero di cavitazione σ_v:

$$\sigma_v = \frac{P_{valle} - P_{vapore}}{\frac{1}{2}\rho {V_0}^2}$$

In realtà la pressione di valle avrebbe potuto essere aumentata anche solo regolando la valvola a sfera già presente a valle della test section, ma questo avrebbe potenzialmente spostato il fenomeno cavitativo all'altezza della valvola dove non avrebbe potuto essere controllato. Con questa nuova configurazione del circuito è dunque stato possibile valutare l'efficacia nell'abbattimento batterico delle sole tensioni tangenziali che si sviluppano in prossimità dell'orifizio.

Figura 4.27 Esempio di valvola utilizzata per il circuito in pressione

Figura 4.28 Particolare dell'attacco tra condotta di adduzione dell'acqua e serbatoio in pressione

- <u>*Protocollo sperimentale*</u>

Per quanto concerne il protocollo adottato per le prove turbolente, questo si è rivelato sostanzialmente uguale a quanto già descritto per le prove di ibridazione per gli step relativi a accensione dell'impianto (step 1), lavaggio iniziale (step 2), accensione del chiller (step 3), scarico dell'impianto (step 7) e pulizia finale dell'impianto (step 8).

Si riportano dunque di seguito gli step 4, 5 e 6 modificati per le prove turbolente.

- <u>*Step 4 – Carico dell'impianto*</u>

1. Indossare i guanti monouso, gli occhiali e il camice di laboratorio;
2. Chiudere tutti gli scarichi;
3. Collegare il piezometro allo scarico S3 (il più vicino);
4. Aprire il rubinetto inferiore del serbatoio dell'acqua Milli-Q;
5. Aprire la valvola sommitale per l'ingresso dell'acqua ultrapura e la valvola di sfiato del circuito;
6. Accendere l'interruttore della presa multipla a cui è collegata la pompa per l'acqua ultrapura;
7. Inserire nel serbatoio i primi 23 litri di acqua Milli-Q aiutandosi con il livello segnato dal piezometro tarato;

8. Azionare la pompa del circuito da remoto e portare gradualmente la frequenza a 50 Hz per eliminare le bolle d'aria presenti nel circuito e contestualmente procedere allo sfiato della pompa;
9. Diminuire gradualmente la frequenza della pompa a 10 Hz;
10. Scollegare il piezometro, cercando di non spargere acqua e chiudere le valvole di sfiato dell'aria;
11. Spillare il campione zero (CAV n.0) per controllare che non vi sia una concentrazione residua di batteri dalla prova precedente e riporlo in frigorifero;
12. Scollegare il tubicino di riempimento circuito e collegarvi il raccordo per l'immissione dei batteri;
13. Inserire nel serbatoio la soluzione batterica avendo cura di non formare aerosol mediante imbuto preventivamente sterilizzato e sciacquato con acqua Milli-Q;
14. Inserire nel serbatoio il restante mezzo litro di acqua Milli-Q con lo stesso flacone utilizzato per la soluzione con i batteri;
15. Chiudere la valvola utilizzata per l'immissione dei batteri e ricollegare il tubo di immissione dell'acqua;
16. Miscelazione a 15 Hz per 2 minuti;
17. Prelevare il campione uno (CAV n.1) e riporlo in frigorifero.

- *Step 5 – Preparazione dell'attrezzatura (contemporaneo a step 4)*

1. Etichettare ogni flacone per la spillatura dal circuito con la seguente dicitura: data-TURB n.m-ora prelievo, dove n è il numero della prova e m è il numero progressivo del campione;
2. Prelevare 1 ml di soluzione di tiosolfato di sodio e metterlo in ciascun flacone di raccolta.

- *Pressurizzazione del circuito (step nuovo)*

1. Collegare il compressore al circuito tramite la valvola apposita;
2. Chiudere le due valvole di sfiato (una in sommità dei serbatoi e una nei pressi del piezometro);
3. Aprire la valvola del compressore;
4. Accendere il compressore fino a che la pressione letta nel manometro di valle non risulta essere pari a 2.6 bar.

- *Trattamento e spillatura campioni*

1. Far partire le acquisizioni tramite il software Labview (start della prova);
2. Effettuare un prelievo di un campione da 100 ml ogni 30 minuti, il primo campionamento lo si ha dopo 30 minuti dell'inizio della prova;
3. Dopo 5 ore fine della prova, fermare l'acquisizione dei dati;
4. Spegnere la pompa;
5. Spegnere il compressore e aprire gli sfiati per l'aria in pressione.

4.3 Metodo Colilert-18

4.3.1 Introduzione al metodo

Nel seguente sotto capitolo si procede alla descrizione delle procedure utilizzate per l'analisi dei dati derivanti dai prelievi di campioni effettuati durante lo svolgimento della prova.

Tra i tanti metodi utilizzati per la conta batterica è stato scelto il metodo Colilert-18. Tale scelta è dipesa sia dalle precedenti analisi effettuate (configurazioni di prova di Burzio et al. (2020) [1] e Davello (2021) [2]) sia per il tipo di ceppo batterico utilizzato. Un' ulteriore fattore che ha fatto propendere verso questa metodologia è stata la semplicità e la rapidità di esecuzione delle analisi. Ciò ha permesso di formare rapidamente il personale nell'esecuzione delle analisi che in breve tempo si è reso indipendente dalla necessità di laboratori esterni.

Il Colilert-18 è un metodo sviluppato dall'azienda IDEXX che rileva simultaneamente i coliformi totali ed Escherichia coli o i coliformi fecali in acqua. È basato su una tecnologia di substrato definito (DST o Defined Substrate Technology) che permette al campione di diventare di colore giallo laddove si rilevi la presenza di coliformi totali. I coliformi totali, infatti, metabolizzando il nutriente indicatore ONPG di Colilert-18, permettono la colorazione della soluzione. Quando invece l'Escherichia Coli metabolizza il nutriente MUG (4-metil-umbelliferil-β-glucuronide e principale fonte di carbonio utile ad E.coli), che viene metabolizzato dagli E. Coli mediante l'enzima β-glucuronidasi, sviluppando una fluorescenza di colore blu.

Le concentrazioni sono rilevabili attraverso le tabelle MPN (Most Probable Number) e variano da 1 UFC (Unità Formanti Colonie) /100 ml fino a 2419.6 UFC/ 100 ml entro 18 ore dall'inizio della prova.

Per la quantificazione della densità batterica sono stati utilizzati dei Quanti-Tray/2000 dell'azienda IDEXX.

4.3.2 Protocollo

Per lo svolgimento delle analisi è stato seguito il seguente protocollo:

- *Prelievo*

Sono stati prelevati campioni di 100 ml di acqua, trattata secondo la tipologia di prova da eseguire, all'interno di contenitori sterili della capacità totale di 120 ml (Figura 4.29). I campioni sono stati inizialmente conservati in frigorifero e solo alla fine della prova sono stati estratti insieme per sottoporli alla procedura di analisi Colilert-18.

Figura 4.29 Flacone utilizzato IDEXX 100 ml.

È stato anzitutto necessario effettuare delle diluizioni per rimanere entro il range di sensibilità del metodo Colilert espresso sopra. Per i campioni prelevati prima dell'inizio della prova, ad esempio, ci si aspettava una sostanziale assenza di abbattimento e dunque si è proceduto ad effettuare diluizioni di 1:10 e 1:100. Le diluizioni sono state effettuate andando a prelevare un campione rispettivamente di 10 e di 1 ml dal campione prelevato di 100 ml e si è poi proceduto al riempimento fino a 100 ml attraverso l'aggiunta di Milli-Q.

Tutte le procedure che richiedessero la quantificazione di volumi liquidi in modo preciso hanno previsto l'utilizzo di una pipetta elettronica BiPette che garantisse le sensibilità cercate. In particolare, sono state utilizzate pipette graduate con precisione di 0.01 ml e capacità variabili tra i 2 e i 10 ml (Figura 4.30 e Figura 4.31).

Figura 4.30 Pipetta graduata utilizzata

Figura 4.31 BiPette utilizzata per gli esperimenti

La Milli-Q è sostanzialmente acqua che ha subito un processo di purificazione e deionizzazione attraverso dei particolari filtri. La concentrazione degli ioni e quindi la qualità dell'acqua è misurata in continuo attraverso la valutazione della resistenza elettrica dell'acqua.

Figura 4.32 Immagine del purificatore per acqua Milli-Q

- <u>*Aggiunta del reagente*</u>

Una volta effettuate le diluizioni, si è proceduto all'aggiunta del reagente. Vengono fornite da IDEXX delle fialette ad uso singolo all'interno delle quali è appunto contenuto il reagente sottoforma di polvere che dev'essere conservata tra i 2 e i 25 gradi centigradi.

Figura 4.33 Reagenti Colilert-18 utilizzati.

Dopo aver inserito il reagente, la soluzione formatasi è stata agitata fino alla completa dissoluzione dello stesso facendo attenzione che non rimanessero agglomerati all'interno.

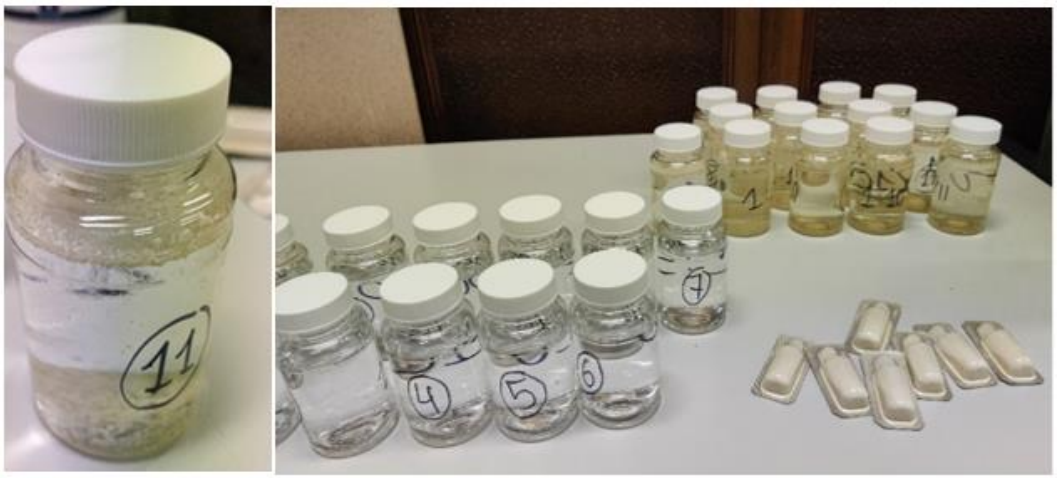


Figura 4.34 A sinistra: campione con reagente in fase di dissoluzione; a destra: immagine d'insieme durante il processo di inserimento dei reagenti

- <u>*Quanti-Tray/2000*</u>

Il metodo di analisi richiede poi che la miscela soluzione/reagente venga inserita all'interno della vaschetta Quanti-Tray/2000. La vaschetta si presenta come un insieme di pozzetti (49 pozzetti grandi e 48 piccoli) che permetteranno poi la conta delle colonie batteriche (Figura 4.35).

Figura 4.35 Vaschetta Quanti-Tray/2000

Una volta riempite le vaschette, queste sono state sigillate attraverso un sigillatore Quanti-Tray Sealer che permette la chiusura ermetica delle vaschette (Figura 4.36).

Figura 4.36 Sigillatore per vaschette utilizzato (Quanti-Tray sealer).

- <u>*Incubazione*</u>

Infine, si è proceduto ad una fase di incubazione di 18 ore a temperatura costante pari a 35 ± 0.5 gradi centigradi all'interno di una macchina incubatrice (Figura 4.37).

Figura 4.37 A sinistra: Temperatura presente nell'incubatore utilizzato; a destra: vaschette impilate all'interno dell'incubatore.

Laddove l'esito della prova fosse di non chiara interpretazione (pozzetto colorato ma con bassa intensità), l'incubazione si protraeva per altre 4 ore fino ad un massimo di 22 ore di modo che venisse dato tempo ulteriore per il manifestarsi della colorazione.

Figura 4.38 Vaschette Quanti-Tray a seguito della fase di incubazione.

- *Lettura dei dati*

La fase di lettura dei dati ha richiesto due passaggi distinti: la fase di conta dei coliformi totali e la fase di conta dei pozzetti con E. coli. Per quanto concerne i coliformi totali, si è proceduto all'individuazione del numero di pozzetti grandi e piccoli che avessero assunto una colorazione gialla marcata andando a barrarli con un pennarello indelebile (Figura 4.39).

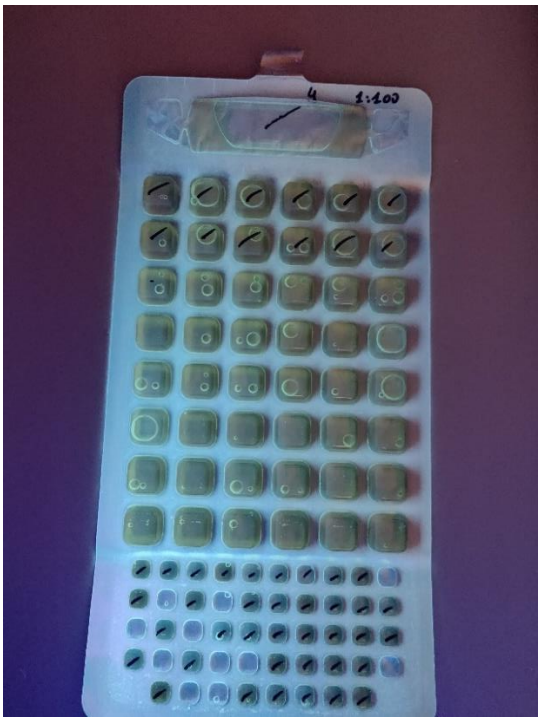


Figura 4.39 Vaschetta con lettura dei dati in corso

Il secondo passaggio è stato possibile previo oscuramento dell'ambiente di lavoro. È infatti necessaria in questa fase la determinazione della fluorescenza dei pozzetti in quanto marker della presenza di E. coli. La stima della fluorescenza è effettuata mediante una lampada a raggi ultravioletti da 6 W, 365 nm (Figura 4.40) andando a barrare ulteriormente il pozzetto caratterizzato da presenza di E. coli.

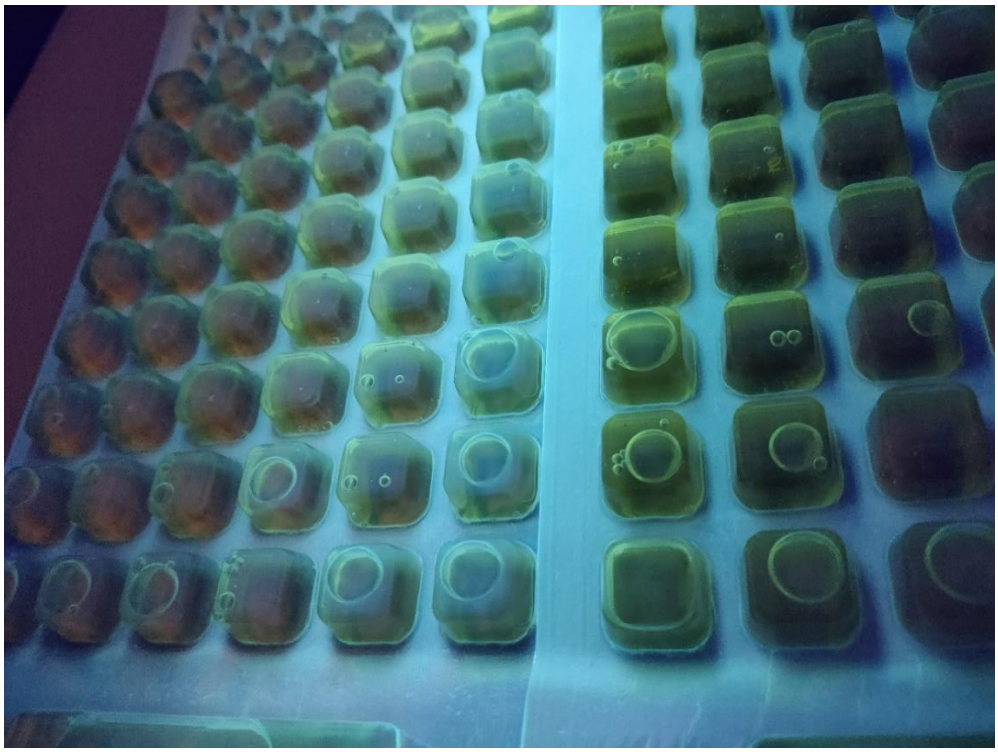


Figura 4.40 Confronto tra vaschetta fluorescente (con presenza di E. coli) e non.

Sia nel caso di coliformi totali che nel caso di E. coli si è infine proceduto alla determinazione del MPN (Most Probable Number) ovvero del più probabile numero di unità formanti colonie (UFC). Il MPN può essere ricavato attraverso delle tabelle fornite dal produttore che mettono in relazione il numero di pozzetti grandi e piccoli illuminati con il valore del MPN. L'utilizzo delle tabelle può avvenire sia per via analitica indagando in prima persona le tabelle oppure attraverso un software che interroga la tabella digitalizzata e fornisce il valore del MPN e fornisce anche un'indicazione sul range di variazione del dato.

IDEXX Quanti-Tray®/2000 MPN Table *(per 100ml)*

# Large Wells Positive	# Small Wells Positive																								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
0	<1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.1	15.1	16.1	17.1	18.1	19.1	20.2	21.2	22.2	23.3	24.3
1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.1	8.1	9.1	10.1	11.1	12.1	13.2	14.2	15.2	16.2	17.3	18.3	19.3	20.4	21.4	22.4	23.5	24.5	25.6
2	2.0	3.0	4.1	5.1	6.1	7.1	8.1	9.2	10.2	11.2	12.2	13.3	14.3	15.4	16.4	17.4	18.5	19.5	20.6	21.6	22.7	23.7	24.8	25.8	26.9
3	3.1	4.1	5.1	6.1	7.2	8.2	9.2	10.3	11.3	12.4	13.4	14.5	15.5	16.5	17.6	18.6	19.7	20.8	21.8	22.9	23.9	25.0	26.1	27.1	28.2
4	4.1	5.2	6.2	7.2	8.3	9.3	10.4	11.4	12.5	13.5	14.6	15.6	16.7	17.8	18.8	19.9	21.0	22.0	23.1	24.2	25.3	26.3	27.4	28.5	29.6
5	5.2	6.3	7.3	8.4	9.4	10.5	11.5	12.6	13.7	14.7	15.8	16.9	17.9	19.0	20.1	21.2	22.2	23.3	24.4	25.5	26.6	27.7	28.8	29.9	31.0
6	6.3	7.4	8.4	9.5	10.6	11.6	12.7	13.8	14.9	16.0	17.0	18.1	19.2	20.3	21.4	22.5	23.6	24.7	25.8	26.9	28.0	29.1	30.2	31.3	32.4
7	7.5	8.5	9.6	10.7	11.8	12.8	13.9	15.0	16.1	17.2	18.3	19.4	20.5	21.6	22.7	23.8	24.9	26.0	27.1	28.3	29.4	30.5	31.6	32.8	33.9
8	8.6	9.7	10.8	11.9	13.0	14.1	15.2	16.3	17.4	18.5	19.6	20.7	21.8	22.9	24.1	25.2	26.3	27.4	28.6	29.7	30.8	32.0	33.1	34.3	35.4
9	9.8	10.9	12.0	13.1	14.2	15.3	16.4	17.6	18.7	19.8	20.9	22.0	23.2	24.3	25.4	26.6	27.7	28.9	30.0	31.2	32.3	33.5	34.6	35.8	37.0
10	11.0	12.1	13.2	14.4	15.5	16.6	17.7	18.9	20.0	21.1	22.3	23.4	24.6	25.7	26.9	28.0	29.2	30.3	31.5	32.7	33.8	35.0	36.2	37.4	38.6
11	12.2	13.4	14.5	15.6	16.8	17.9	19.1	20.2	21.4	22.5	23.7	24.8	26.0	27.2	28.3	29.5	30.7	31.9	33.0	34.2	35.4	36.6	37.8	39.0	40.2
12	13.5	14.6	15.8	16.9	18.1	19.3	20.4	21.6	22.8	23.9	25.1	26.3	27.5	28.6	29.8	31.0	32.2	33.4	34.6	35.8	37.0	38.2	39.5	40.7	41.9
13	14.8	16.0	17.1	18.3	19.5	20.6	21.8	23.0	24.2	25.4	26.6	27.8	29.0	30.2	31.4	32.6	33.8	35.0	36.2	37.5	38.7	39.9	41.2	42.4	43.6
14	16.1	17.3	18.5	19.7	20.9	22.1	23.3	24.5	25.7	26.9	28.1	29.3	30.5	31.7	33.0	34.2	35.4	36.7	37.9	39.1	40.4	41.6	42.9	44.2	45.4
15	17.5	18.7	19.9	21.1	22.3	23.5	24.7	25.9	27.2	28.4	29.6	30.9	32.1	33.3	34.6	35.8	37.1	38.4	39.6	40.9	42.2	43.4	44.7	46.0	47.3
16	18.9	20.1	21.3	22.6	23.8	25.0	26.2	27.5	28.7	30.0	31.2	32.5	33.7	35.0	36.3	37.5	38.8	40.1	41.4	42.7	44.0	45.3	46.6	47.9	49.2
17	20.3	21.6	22.8	24.1	25.3	26.6	27.8	29.1	30.3	31.6	32.9	34.1	35.4	36.7	38.0	39.3	40.6	41.9	43.2	44.5	45.9	47.2	48.5	49.8	51.2
18	21.8	23.1	24.3	25.6	26.9	28.1	29.4	30.7	32.0	33.3	34.6	35.9	37.2	38.5	39.8	41.1	42.4	43.8	45.1	46.5	47.8	49.2	50.5	51.9	53.2
19	23.3	24.6	25.9	27.2	28.5	29.8	31.1	32.4	33.7	35.0	36.3	37.6	39.0	40.3	41.6	43.0	44.3	45.7	47.1	48.4	49.8	51.2	52.6	54.0	55.4
20	24.9	26.2	27.5	28.8	30.1	31.5	32.8	34.1	35.4	36.8	38.1	39.5	40.8	42.2	43.6	44.9	46.3	47.7	49.1	50.5	51.9	53.3	54.7	56.1	57.6
21	26.5	27.9	29.2	30.5	31.8	33.2	34.5	35.9	37.3	38.6	40.0	41.4	42.8	44.1	45.5	46.9	48.4	49.8	51.2	52.6	54.1	55.5	56.9	58.4	59.9
22	28.2	29.5	30.9	32.3	33.6	35.0	36.4	37.7	39.1	40.5	41.9	43.3	44.8	46.2	47.6	49.0	50.5	51.9	53.4	54.8	56.3	57.8	59.3	60.8	62.3
23	29.9	31.3	32.7	34.1	35.5	36.8	38.3	39.7	41.1	42.5	43.9	45.4	46.8	48.3	49.7	51.2	52.7	54.2	55.6	57.1	58.6	60.2	61.7	63.2	64.7
24	31.7	33.1	34.5	35.9	37.3	38.8	40.2	41.7	43.1	44.6	46.0	47.5	49.0	50.5	52.0	53.5	55.0	56.5	58.0	59.5	61.1	62.6	64.2	65.8	67.3
25	33.6	35.0	36.4	37.9	39.3	40.8	42.2	43.7	45.2	46.7	48.2	49.7	51.2	52.7	54.3	55.8	57.3	58.9	60.5	62.0	63.6	65.2	66.8	68.4	70.0
26	35.5	36.9	38.4	39.9	41.4	42.8	44.3	45.9	47.4	48.9	50.4	52.0	53.5	55.1	56.7	58.2	59.8	61.4	63.0	64.7	66.3	67.9	69.6	71.2	72.9
27	37.4	38.9	40.4	42.0	43.5	45.0	46.5	48.1	49.6	51.2	52.8	54.4	56.0	57.6	59.2	60.8	62.4	64.1	65.7	67.4	69.1	70.8	72.5	74.2	75.9
28	39.5	41.0	42.6	44.1	45.7	47.3	48.8	50.4	52.0	53.6	55.2	56.9	58.5	60.2	61.8	63.5	65.2	66.9	68.6	70.3	72.0	73.7	75.5	77.3	79.0
29	41.7	43.2	44.8	46.4	48.0	49.6	51.2	52.8	54.5	56.1	57.8	59.5	61.2	62.9	64.6	66.3	68.0	69.8	71.5	73.3	75.1	76.9	78.7	80.5	82.4
30	43.9	45.5	47.1	48.7	50.4	52.0	53.7	55.4	57.1	58.8	60.5	62.2	64.0	65.7	67.5	69.3	71.0	72.9	74.7	76.5	78.3	80.2	82.1	84.0	85.9
31	46.2	47.9	49.5	51.2	52.9	54.6	56.3	58.1	59.8	61.6	63.3	65.1	66.9	68.7	70.5	72.4	74.2	76.1	78.0	79.9	81.8	83.7	85.7	87.6	89.6
32	48.7	50.4	52.1	53.8	55.6	57.3	59.1	60.9	62.7	64.5	66.3	68.2	70.0	71.9	73.8	75.7	77.6	79.5	81.5	83.5	85.4	87.5	89.5	91.5	93.6
33	51.2	53.0	54.8	56.5	58.3	60.2	62.0	63.8	65.7	67.6	69.5	71.4	73.3	75.2	77.2	79.2	81.2	83.2	85.2	87.3	89.3	91.4	93.6	95.7	97.8
34	53.9	55.7	57.6	59.4	61.3	63.1	65.0	67.0	68.9	70.8	72.8	74.8	76.8	78.8	80.8	82.9	85.0	87.1	89.2	91.4	93.5	95.7	97.9	100.2	102.4
35	56.8	58.6	60.5	62.4	64.4	66.3	68.3	70.3	72.3	74.3	76.3	78.4	80.5	82.6	84.7	86.9	89.1	91.3	93.5	95.7	98.0	100.3	102.6	105.0	107.3
36	59.8	61.7	63.7	65.7	67.7	69.7	71.7	73.8	75.9	78.0	80.1	82.3	84.5	86.7	88.9	91.2	93.5	95.8	98.1	100.5	102.9	105.3	107.7	110.2	112.7
37	62.9	65.0	67.0	69.1	71.2	73.3	75.4	77.6	79.8	82.0	84.2	86.5	88.8	91.1	93.4	95.8	98.2	100.6	103.1	105.6	108.1	110.7	113.3	115.9	118.6
38	66.3	68.4	70.6	72.7	74.9	77.1	79.4	81.6	83.9	86.2	88.6	91.0	93.4	95.8	98.3	100.8	103.4	105.9	108.6	111.2	113.9	116.6	119.4	122.2	125.0
39	70.0	72.2	74.4	76.7	78.9	81.3	83.6	86.0	88.4	90.9	93.4	95.9	98.4	101.0	103.6	106.3	109.0	111.8	114.6	117.4	120.3	123.2	126.1	129.2	132.2
40	73.8	76.2	78.5	80.9	83.3	85.7	88.2	90.8	93.3	95.9	98.5	101.2	103.9	106.7	109.5	112.4	115.3	118.2	121.2	124.3	127.4	130.5	133.7	137.0	140.3
41	78.0	80.5	83.0	85.5	88.0	90.6	93.3	95.9	98.7	101.4	104.3	107.1	110.0	113.0	116.0	119.1	122.2	125.4	128.7	132.0	135.4	138.8	142.3	145.9	149.5
42	82.6	85.2	87.8	90.5	93.2	96.0	98.8	101.7	104.6	107.6	110.6	113.7	116.9	120.1	123.4	126.7	130.1	133.6	137.2	140.8	144.5	148.3	152.2	156.1	160.2
43	87.6	90.4	93.2	96.0	99.0	101.9	105.0	108.1	111.2	114.5	117.8	121.1	124.6	128.1	131.7	135.4	139.1	143.0	147.0	151.0	155.2	159.4	163.8	168.2	172.8
44	93.1	96.1	99.1	102.2	105.4	108.6	111.9	115.3	118.7	122.3	125.9	129.6	133.4	137.4	141.4	145.5	149.7	154.1	158.5	163.1	167.9	172.7	177.7	182.9	188.2
45	99.3	102.5	105.8	109.2	112.6	116.2	119.8	123.6	127.4	131.4	135.4	139.6	143.9	148.3	152.9	157.6	162.4	167.4	172.6	178.0	183.5	189.2	195.1	201.2	207.5
46	106.3	109.8	113.4	117.2	121.0	125.0	129.1	133.3	137.6	142.1	146.7	151.5	156.5	161.6	167.0	172.5	178.2	184.2	190.4	196.8	203.5	210.5	217.8	225.4	233.3
47	114.3	118.3	122.4	126.6	130.9	135.4	140.1	145.0	150.0	155.3	160.7	166.4	172.3	178.5	185.0	191.8	198.9	206.4	214.2	222.4	231.0	240.0	249.5	259.5	270.0
48	123.9	128.4	133.1	137.9	143.0	148.3	153.9	159.7	165.8	172.2	178.9	186.0	193.5	201.4	209.8	218.7	228.2	238.2	248.9	260.3	272.3	285.1	298.7	313.0	328.2
49	135.5	140.8	146.4	152.3	158.5	165.0	172.0	179.3	187.2	195.6	204.6	214.3	224.7	235.9	248.1	261.3	275.5	290.9	307.6	325.5	344.8	365.4	387.3	410.6	435.2

09-63235-01

Figura 4.41 Tabella MPN utilizzata per l'analisi del Quanti-Tray/2000

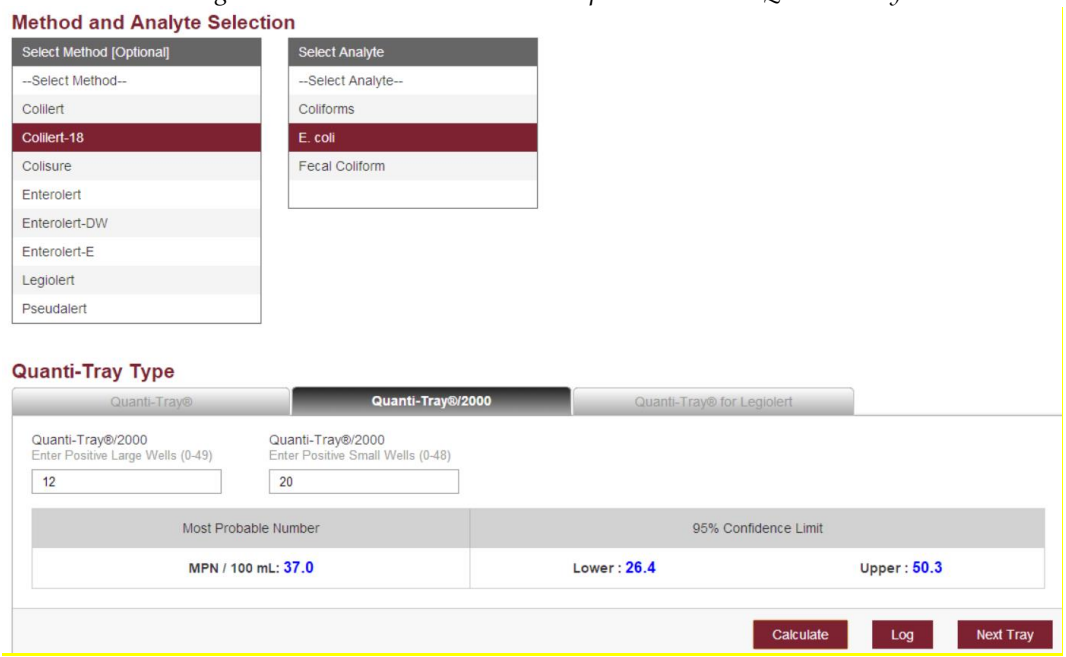


Figura 4.42 Schermata del software di analisi per la conta batterica

5 Risultati

Come già espresso in precedenza, sono stati eseguiti esperimenti in differenti regimi di moto:

- Ibrido con la compresenza di ipoclorito di sodio e cavitazione idrodinamica;
- Statico in assenza di circolazione;
- Turbolento spinto con un numero di cavitazione $\sigma_c = 1.71$.

Nel seguente capitolo verranno dunque presentati i risultati ottenuti attraverso le prove effettuate e verranno inoltre svolti dei confronti tra le varie prove effettuate che permettano poi di giungere alla stesura delle conclusioni.

Vengono anzitutto presentati i risultati ottenuti dalle singole prove e nella seconda parte del capitolo verranno presentati anche i confronti effettuati tra le prove.

Ciascuna prova è caratterizzata da una propria nomenclatura di modo che possano essere riconosciute, nella tabella seguente si riassumono le varie configurazioni testate nel caso della configurazione delle prove di ibridazione.

Tabella 5-1 Riepilogo prove di ibridazione effettuate

	id	**tipologia**	**Pre trattamento**	**durata (min)**	**Concentrazione di NaClO (mg/l)**	**F (Hz)**	**n prova ibrida**
PROVE IBRIDE	**1**	OP+Cl	si	50	0.05 0.1	15-45	1.1-1.2-1.3 1.4-1.5-1.6
	2	OP+Cl	no	20	0.05 0.1	15-45	2.1-2.2-2.3 2.4-2.5-2.6
	3	HC+Cl	no	20	0.05 0.1	45	3.1-3.2-3.3 3.4-3.5-3.6
	4	Cl NO OP	si	50	0.05 0.1	15-45	4.1-4.2-4.3 4.4-4.5-4.6

Per ogni prova di ibridazione è stata poi effettuata in parallelo una prova statica di confronto, nella tabella sottostante vengono elencate le nomenclature utilizzate per ciascuna prova statica corrispondente ad una prova di ibridazione.

Tabella 5-2 Riepilogo prove statiche effettuate

	n prova ibrida	n prova statica
PROVE IBRIDE / PROVE STATICHE	1.1-1.2-1.3 1.4-1.5-1.6	5.1-5.2-5.3 5.4-5.5-5.6
	2.1-2.2-2.3 2.4-2.5-2.6	6.1-6.2-6.3 6.4-6.5-6.6
	3.1-3.2-3.3 3.4-3.5-3.6	7.1-7.2-7.3 7.4-7.5-7.6
	4.1-4.2-4.3 4.4-4.5-4.6	8.1-8.2-8.3 8.4-8.5-8.6

Infine, sono poi state svolte anche le prove in regime turbolento spinto di cui si riassumono nella tabella seguente le caratteristiche.

Tabella 5-3 Riepilogo prove turbolente effettuate

TURB	id prova	Q (l/s)	P_{valle} (bar)	Re (-)	σ_c (-)	n prova
	9	0.32	2.6	90800	1.71	9.1-9.2-9.3-9.4

Riassumendo, sono state svolte una totalità di 52 prove, 24 delle quali sono state svolte in quattro tipologie diverse di regime di ibridazione e altrettante prove statiche.

Ciascuna tipologia di prova verrà di seguito presentata in due principali forme, nella prima si presentano i dati di abbattimento in termini assoluti mentre invece nel secondo grafico proposto per ciascuna prova verranno proposti in termini di abbattimento percentuale (confrontando dunque il valore degli MPN ricavo ad un dato istante con il valore MPN_0 ricavato nel primo campione analizzato).

Per quel concerne le ascisse, i grafici relativi alle prove di ibridazione e statiche sono presentati con il valore dei minuti trascorsi; di contro invece nei risultati relativi alle prove in regime turbolento spinto si è considerato più efficace l'utilizzo del numero di passaggi effettuati dalla test section (n_P). Per la valutazione del numero di passaggi è stata utilizzata la seguente relazione:

$$n_{passaggi} = \frac{Q}{V} t_{trattamento}$$

In cui Q e V sono rispettivamente la portata transitante per la sezione in analisi (valutata con il misuratore di portata) e il volume di acqua trattato nel serbatoio pari a 24 litri; mentre $t_{trattamento}$ è ovviamente il tempo di trattamento preso in considerazione.

5.1 Prove di ibridazione

Sia per le prove di ibridazione che per le prove statiche sono state svolte tre ripetizioni della stessa configurazione considerando in tre il numero minimo di prove da effettuarsi per avere attendibilità dei test effettuati.

5.1.1 Id 1- NaClO = 0.05 mg/l

Le prime tre prove hanno visto l'utilizzo di una concentrazione di ipoclorito di sodio pari a 0.05 mg/l, la presenza di un pretrattamento e una frequenza della pompa variabile come già presentato al capitolo precedente.

parametri trattamento	
[NaClO](mg/l)	0.05
σ_c(-)	0.53
F (Hz)	mista
Pretrattamento	si

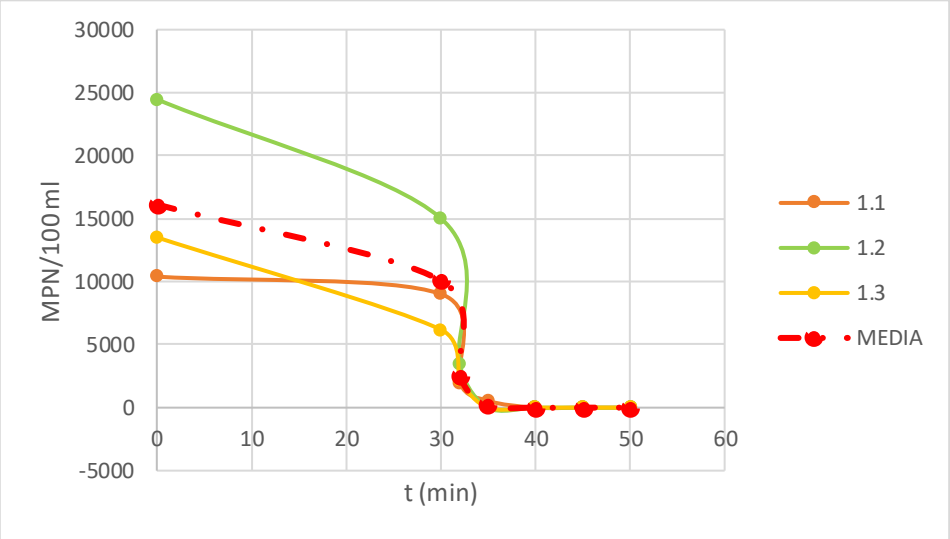


Figura 5.1 Abbattimento id 1.1-1.2-1.3 in termini assoluti.

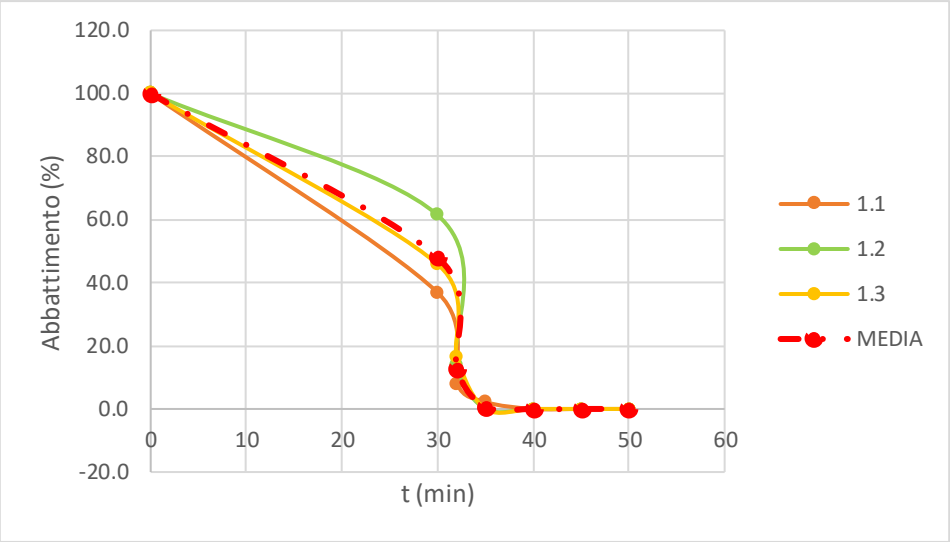


Figura 5.2 Abbattimento 1.1-1.2-1.3 in termini percentuali.

5.1.2 Id 1 – NaClO = 0.1 mg/l

Prove analoghe al caso precedente eccetto per la concentrazione di ipoclorito di sodio che risulta essere doppia.

parametri trattamento	
[NaClO](mg/l)	0.1
σ_c(-)	0.53
F (Hz)	mista
Pretrattamento	si

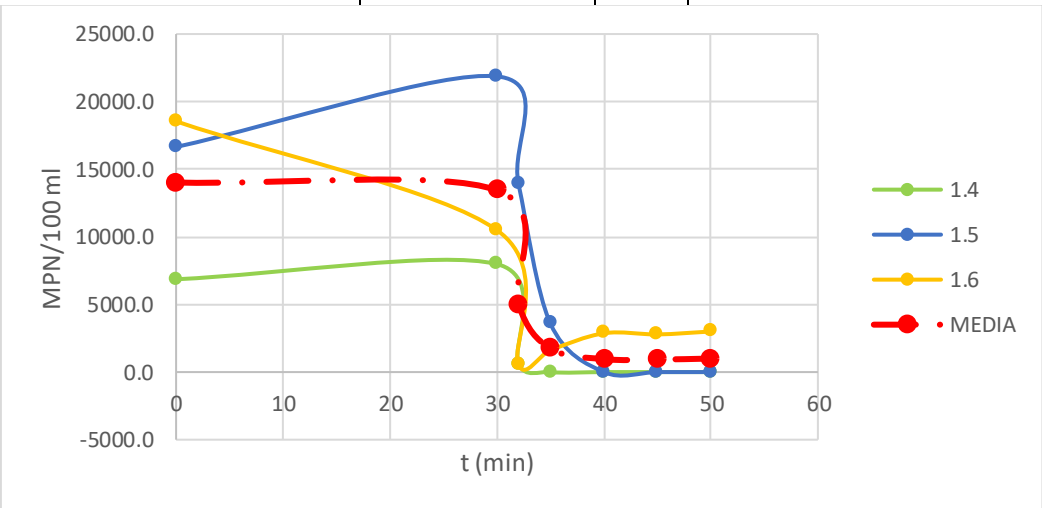


Figura 5.3 Abbattimento id 1.4-1.5-1.6 in termini assoluti.

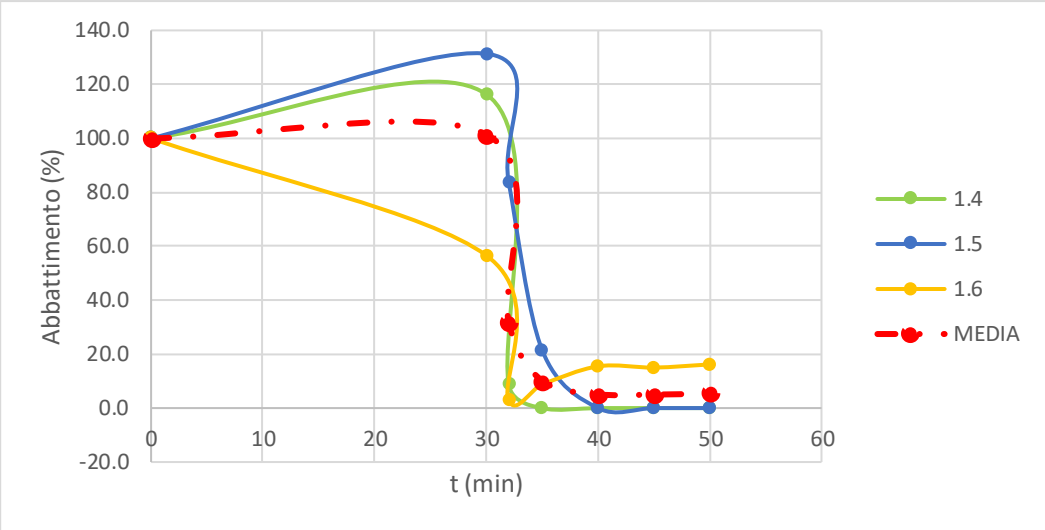


Figura 5.4 Abbattimento id 1.4-1.5-1.6 in termini percentuali.

5.1.3 Id 2 – NaClO = 0.05 mg/l

In questa configurazione di prove si hanno gli stessi parametri idrodinamici della configurazione precedente ma in assenza di pretrattamento (In termini di tempo di trattamento, dunque, le prove sono ridotte di 30 minuti). Anche in questo caso vengono proposti prima i risultati a concentrazione di ipoclorito di sodio inferiore e nel sottocapitolo seguente quelli a concentrazione superiore.

parametri trattamento	
[NaClO](mg/l)	0.05
σ_c(-)	0.53
F (Hz)	mista
Pretrattamento	no

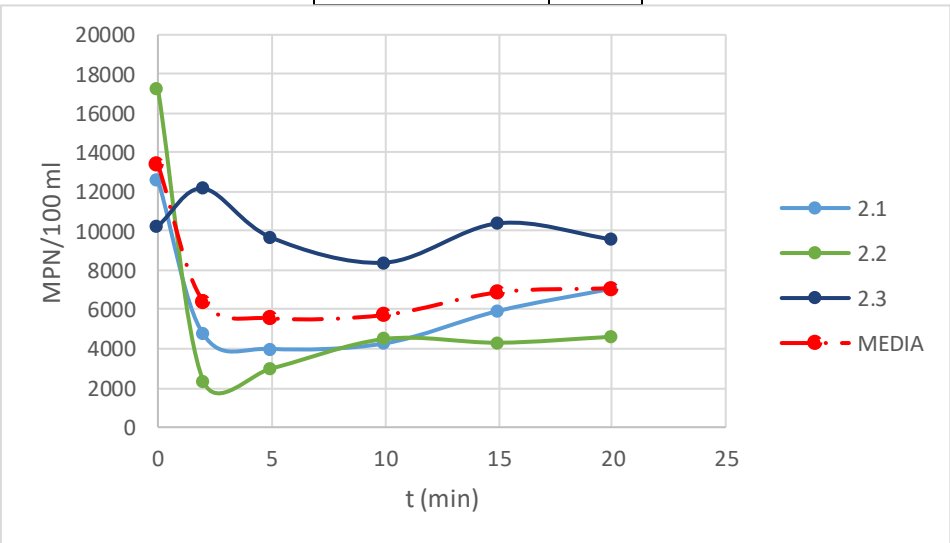


Figura 5.5 Abbattimento id 2.1-2.2-2.3 in termini assoluti.

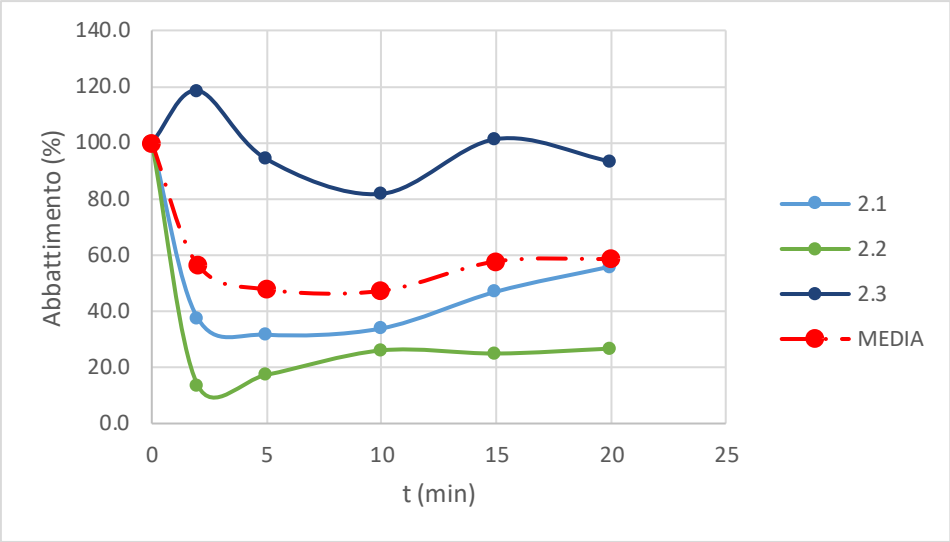


Figura 5.6 Abbattimento id 2.1-2.2-2.3 in termini percentuali.

5.1.4 Id 2 – NaClO = 0.1 mg/l

Prove analoghe al caso precedente eccetto per la concentrazione di ipoclorito di sodio che risulta essere doppia.

parametri trattamento	
[NaClO](mg/l)	0.1
σ_c(-)	0.53
F (Hz)	mista
Pretrattamento	no

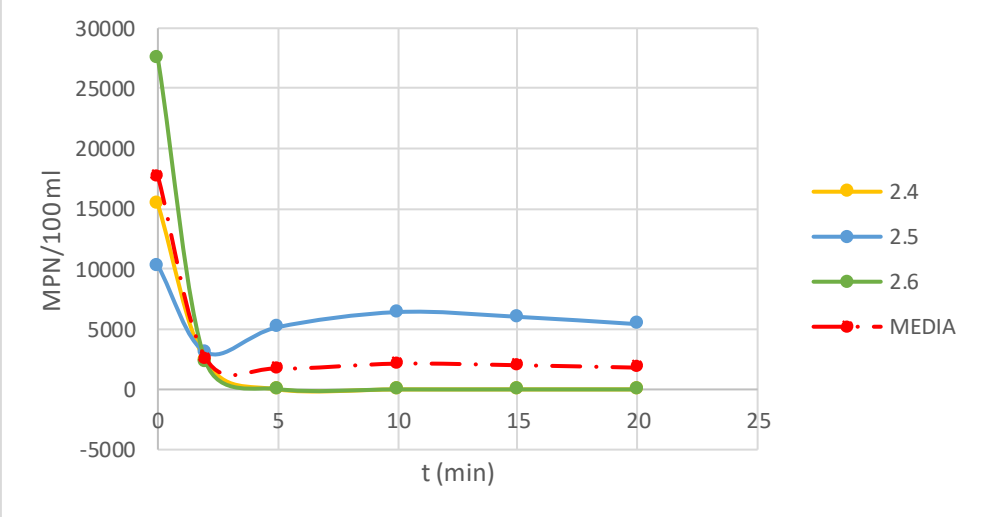


Figura 5.7 Abbattimento id 2.4-2.5-2.6 in termini assoluti.

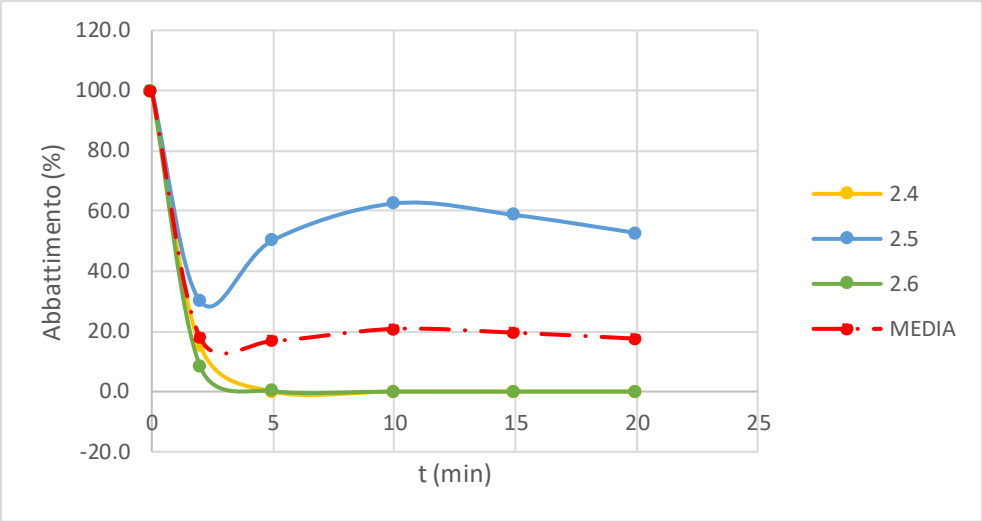


Figura 5.8 Abbattimento id 2.4-2.5-2.6 in termini percentuali.

5.1.5 Id 3 – NaClO = 0.05 mg/l

In questa terza configurazione di prove viene confermata l'assenza del pretrattamento ma la frequenza della pompa non è più variabile durante il tempo di trattamento ma è fin da subito impostata sul valore di 45 Hz.

parametri trattamento	
[NaClO](mg/l)	0.05
σ_c(-)	0.53
F (Hz)	45
Pretrattamento	no

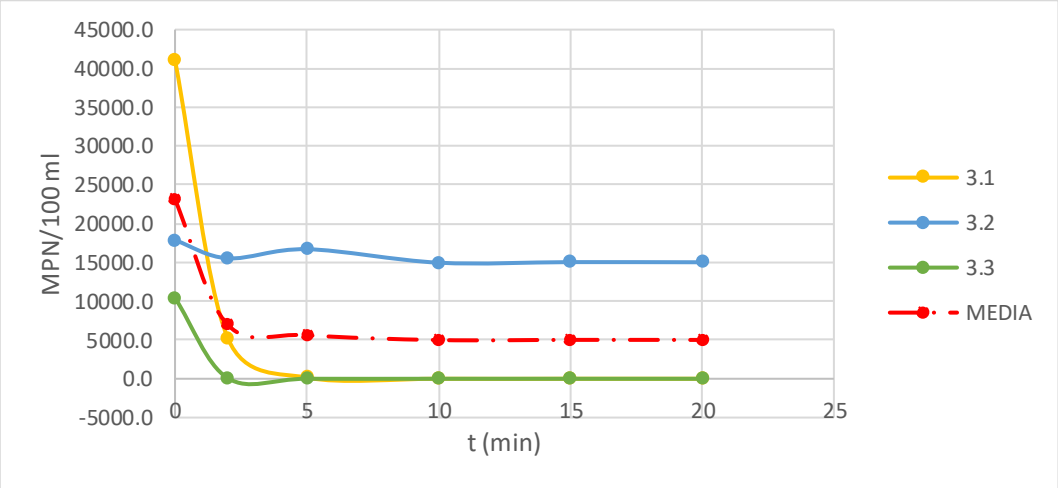


Figura 5.9 Abbattimento id 3.1-3.2-3.3 in termini assoluti.

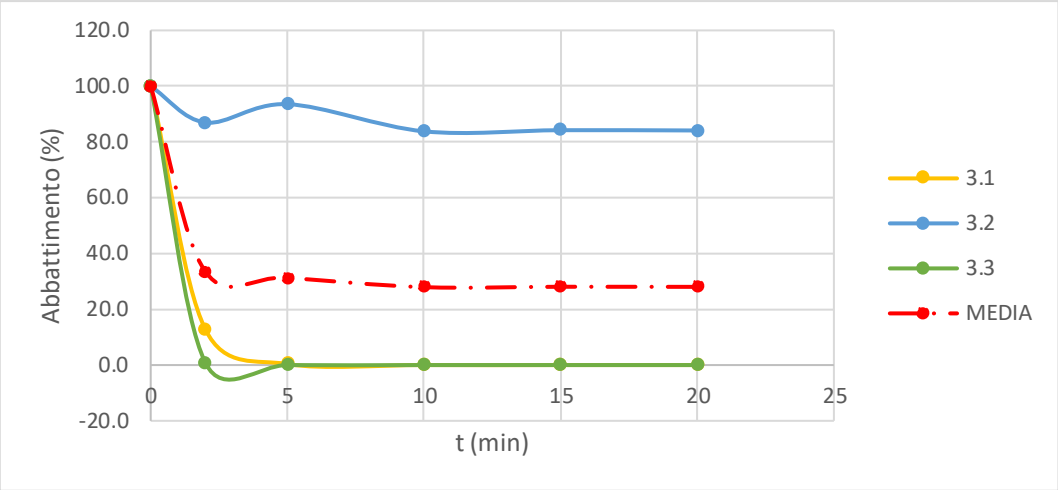


Figura 5.10 Abbattimento id 3.1-3.2-3.3 in termini percentuali.

5.1.6 Id 3 – NaClO = 0.1 mg/l

Di nuovo ciò che varia rispetto al caso precedente è solamente la concentrazione di ipoclorito di sodio.

parametri trattamento	
[NaClO](mg/l)	0.1
σ_c(-)	0.53
F (Hz)	45
Pretrattamento	no

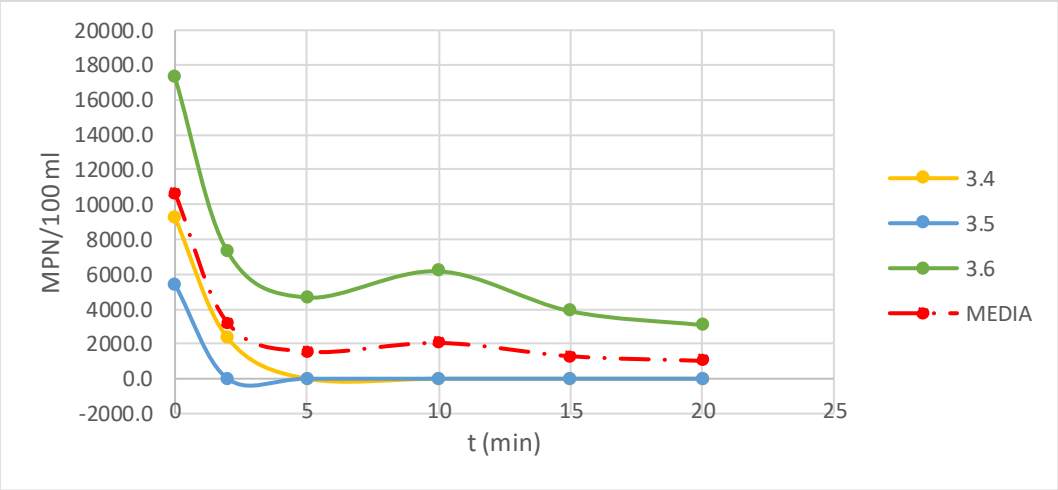


Figura 5.11 Abbattimento id 3.4-3.5-3.6 in termini assoluti.

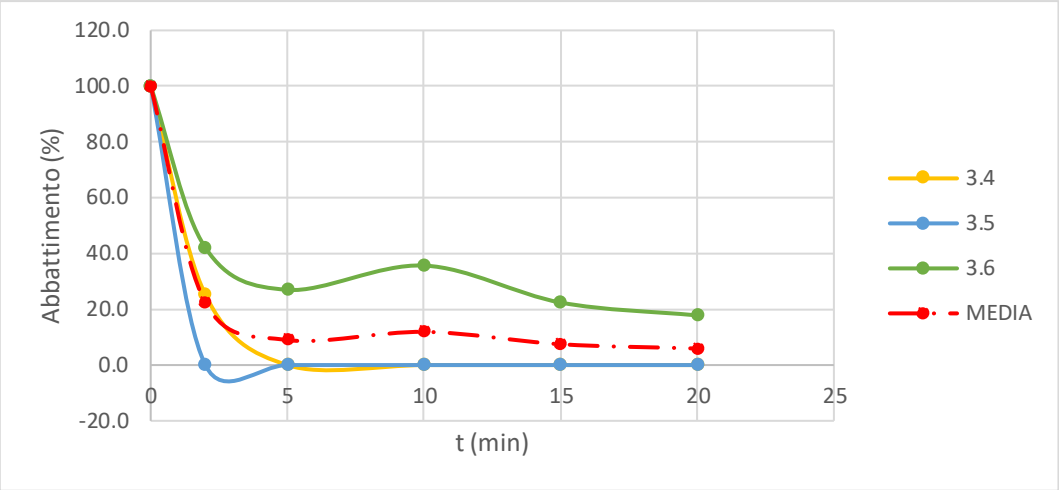


Figura 5.12 Abbattimento id 3.4-3.5-3.6 in termini percentuali.

5.1.7 Id 4 – NaClO = 0.05 mg/l

In questa ultima configurazione presentata si ha l'assenza della piastra forata e dunque l'impossibilità che i venga a formare un regime cavitativo; viene inoltre riproposto il pretrattamento.

parametri trattamento	
[NaClO](mg/l)	0.05
σ_c(-)	-
F (Hz)	mista
Pretrattamento	si

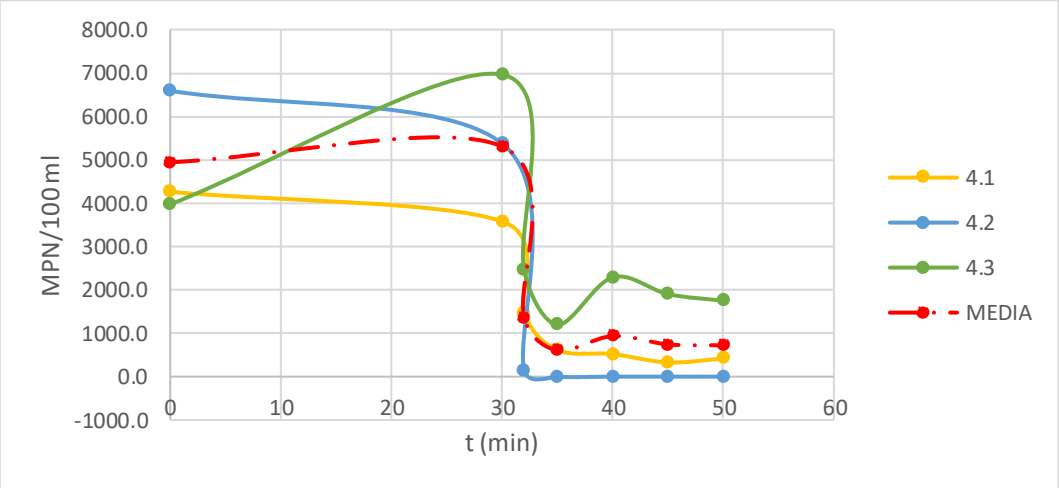


Figura 5.13 Abbattimento id 4.1-4.2-4.3 in termini assoluti.

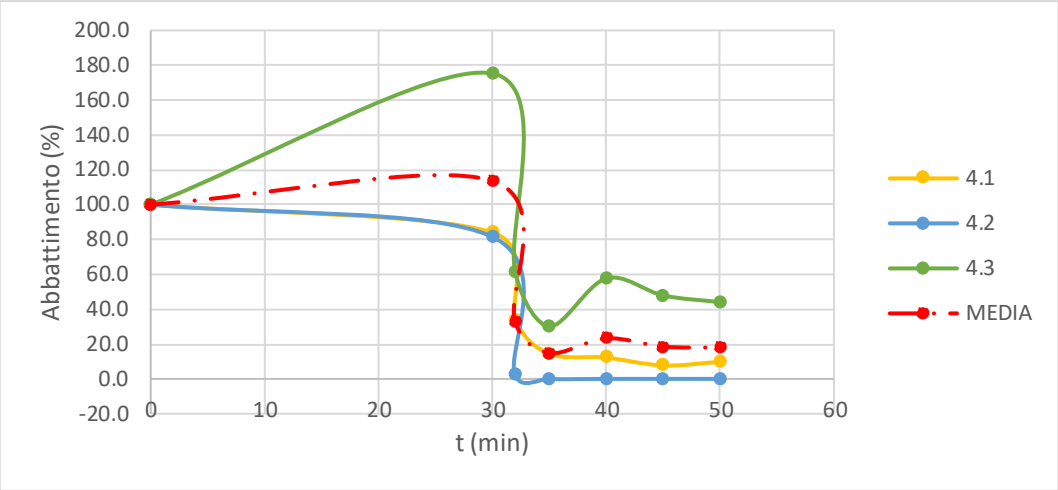


Figura 5.14 Abbattimento id 4.1-4.2-4.3 in termini percentuali.

5.1.8 Id 4 – NaClO = 0.1 mg/l

parametri trattamento	
[NaClO](mg/l)	0.1
σ_c(-)	-
F (Hz)	mista
Pretrattamento	si

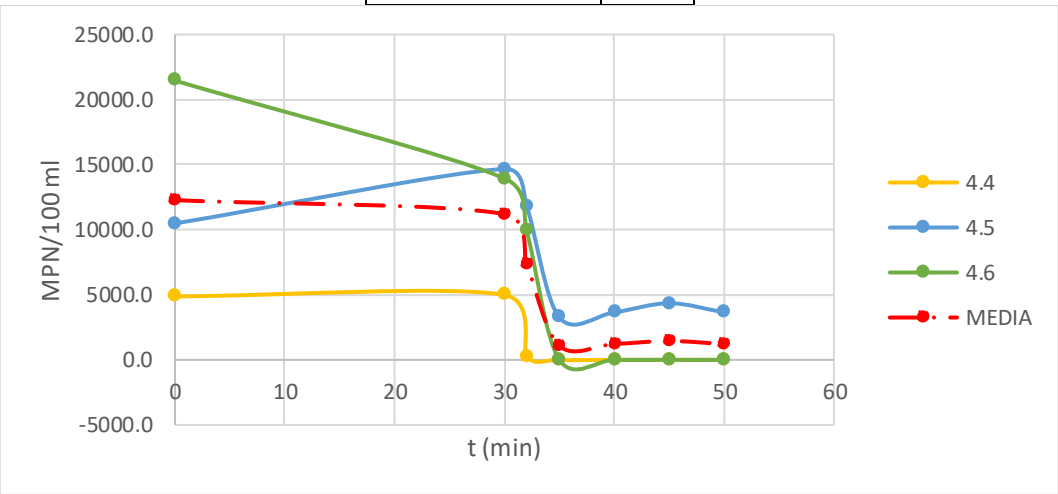


Figura 5.15 Abbattimento id 4.4-4.5-4.6 in termini assoluti.

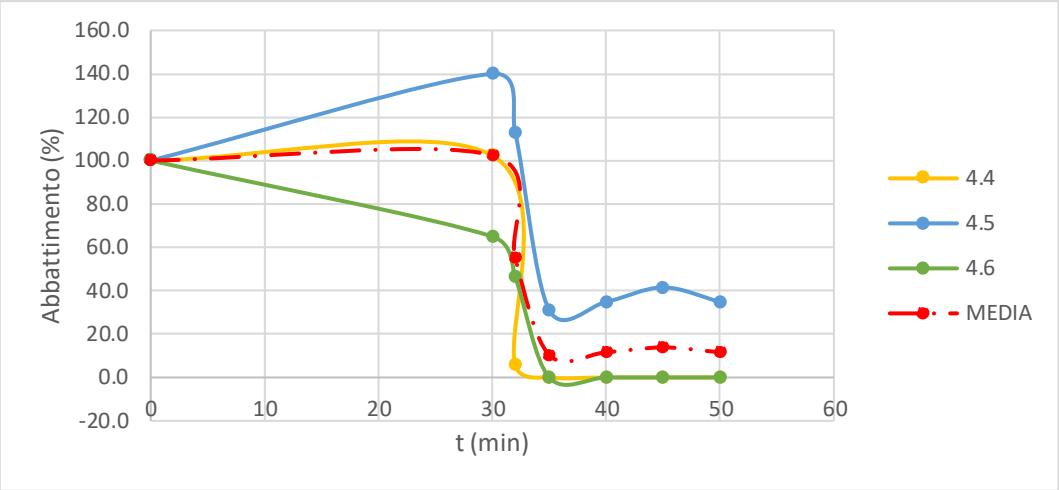


Figura 5.16 Abbattimento id 4.4-4.5-4.6 in termini percentuali.

5.2 Prove statiche

Per quanto riguarda i risultati derivanti dalle prove statiche, questi purtroppo risultano non interpretabili in quanto sostanzialmente tutte le prove forniscono valori nulli per ogni campione analizzato e ad ogni istante di tempo.

Le spiegazioni di questo fenomeno potrebbero comunque essere molteplici:

- La presenza di organismi eterotrofi all'interno dell'acqua che possano portare alla morte quasi istantanea dei batteri di E. coli immessi;
- La contaminazione esterna;
- Il lavaggio non corretto del contenitore in cui vengono effettuate le prove statiche cosicché si abbiano delle rimanenze di NaClO che possano portare ad un sovradosaggio delle concentrazioni di ipoclorito di sodio.

Si riporta di seguito uno dei grafici a titolo esemplificativo dei risultati ottenuti omettendo gli altri grafici in quanto appunto risultano non interpretabili.

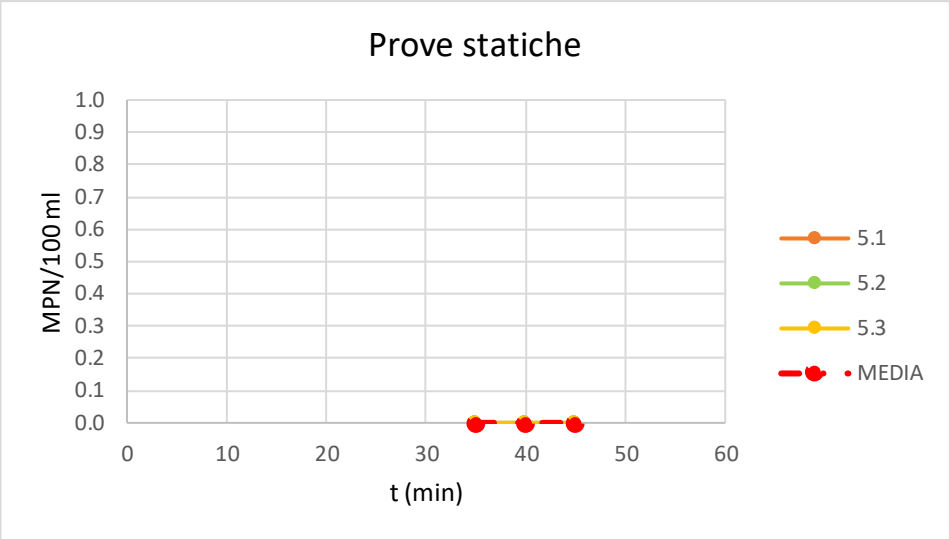


Figura 5.17 Risultati derivanti dalle prove statiche in termini di abbattimento assoluto.

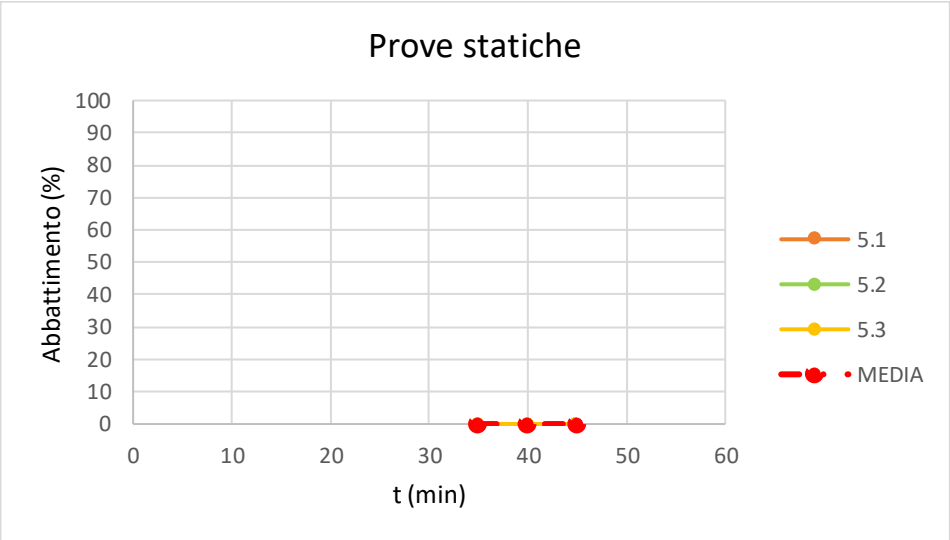


Figura 5.18 Risultati derivanti dalle prove statiche in termini di abbattimento percentuale.

5.3 Prove in regime turbolento spinto

Le ultime prove affrontate in ordine di tempo sono state quelle in regime turbolento spinto. Questa tipologia di prove è stata effettuata al fine di determinare l'influenza dei soli sforzi tangenziali sull'abbattimento batterico.

È stata eseguita una sola configurazione di prove ripetuta per quattro volte e di seguito se ne riportano i risultati e prima una tabella riepilogativa delle condizioni idrodinamiche a cui queste prove sono state effettuate.

Tabella 5-4 Riepilogo delle condizioni idrodinamiche per le prove turbolente

Q (l/s)	P_{valle} (bar)	Re (-)	σ_c (-)
0.32	2.6	90800	1.71

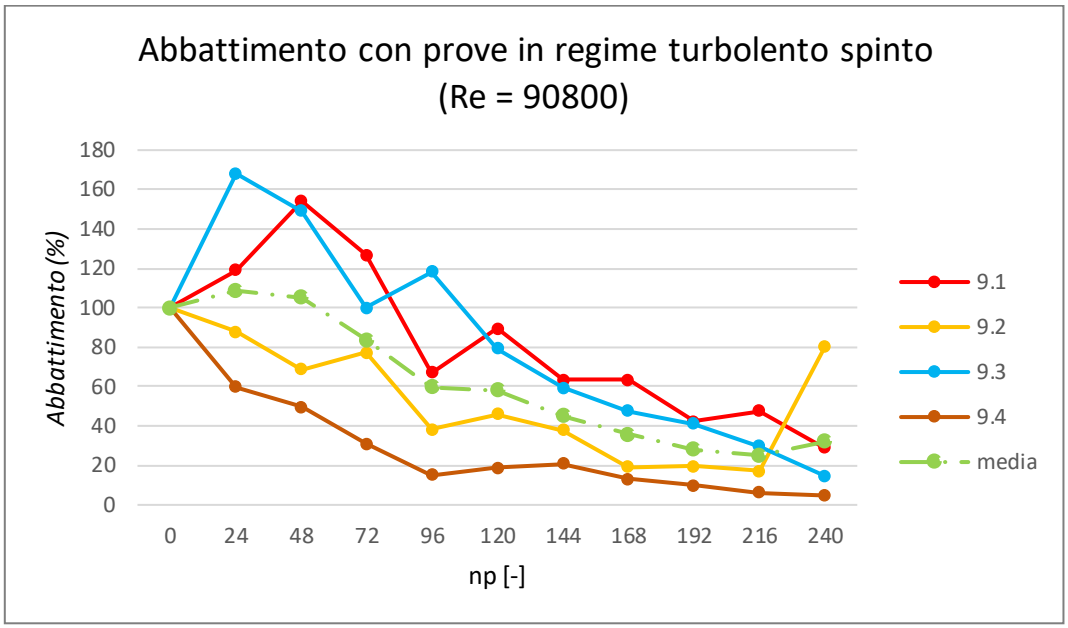


Figura 5.19 Abbattimento percentuale per le prove turbolente effettuate.

5.4 Analisi e confronto tra prove

Di seguito si presentano i confronti effettuati per tutte e quattro le configurazioni di prove ibride tra le due concentrazioni utilizzate.

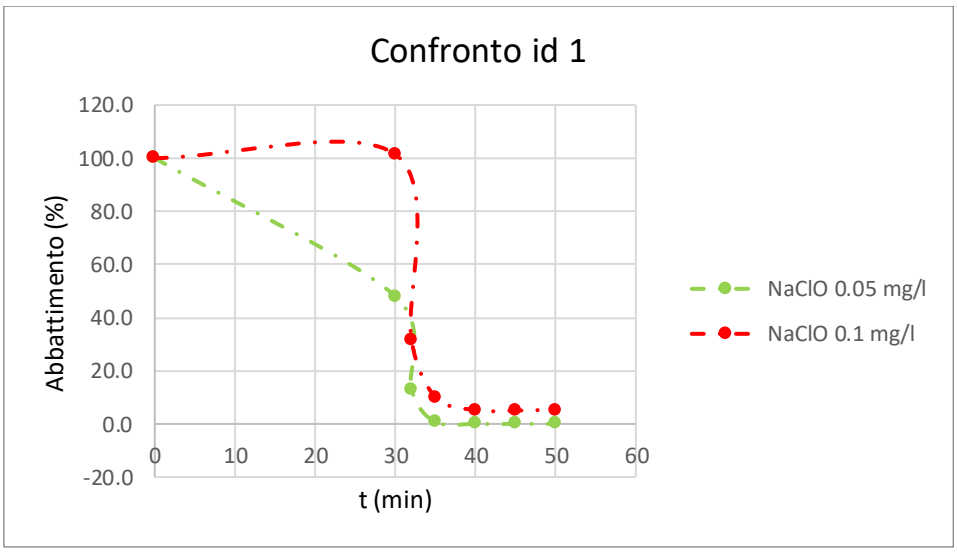


Figura 5.20 Confronto tra le concentrazioni utilizzate per le prove con id 1.

Dalla (Figura 5.20) si nota come non sembrerebbe esserci, almeno in presenza di un pretrattamento a basse frequenze per 30 minuti, un particolare legame tra efficacia dell'abbattimento e concentrazione iniziale di ipoclorito di sodio utilizzato.

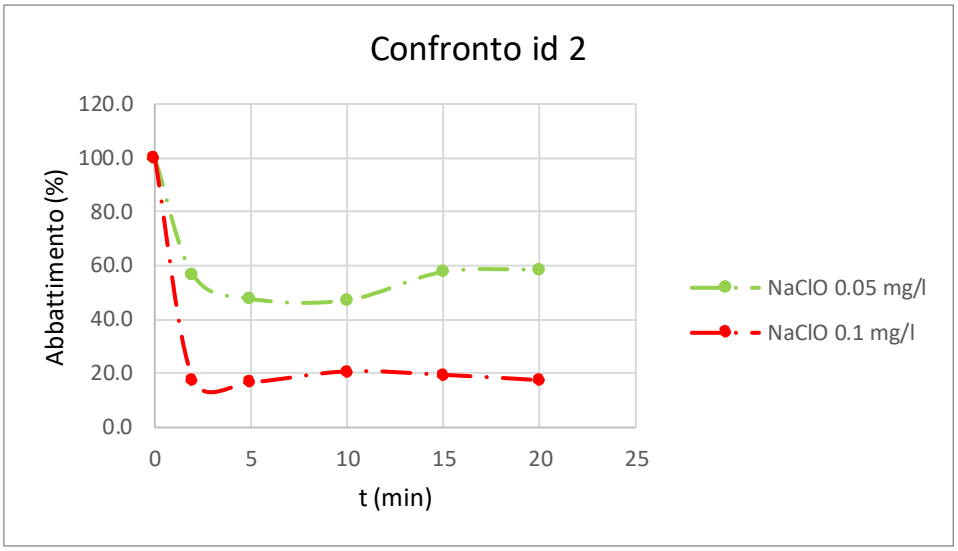


Figura 5.21 Confronto tra le concentrazioni utilizzate per le prove con id 2.

Dall'immagine soprastante (Figura 5.21) si evince come, se in assenza di pretrattamento, la concentrazione iniziale sembra essere influente in termini di abbattimento finale raggiunto. Si nota infatti come inserendo una concentrazione di ipoclorito di sodio pari a 0.05 mg/l non si raggiunga neanche un abbattimento del 50%; con una concentrazione doppia sembra invece che l'abbattimento risulti essere maggiormente efficace, raggiungendo circa l'80%.

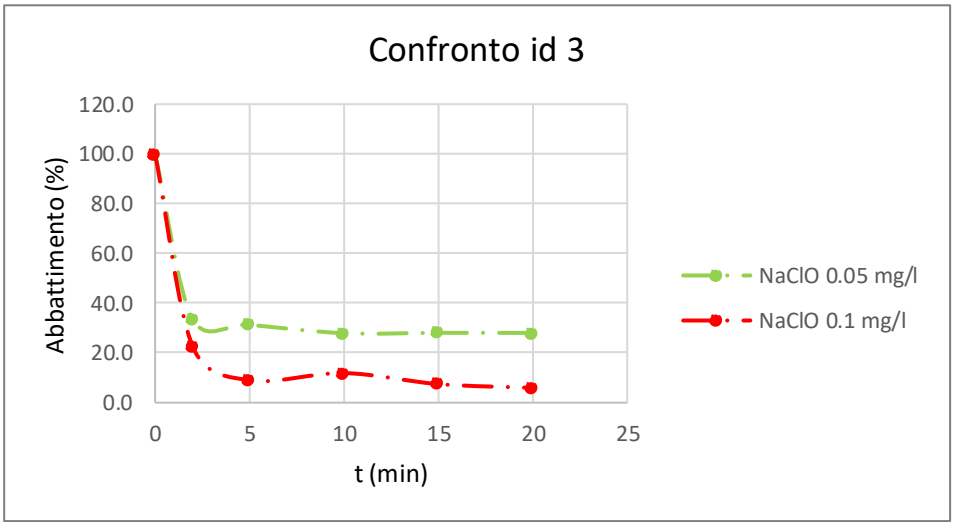


Figura 5.22 Confronto tra le concentrazioni utilizzate per le prove con id 3.

Effettuando un confronto invece nel caso delle prove in assenza di pretrattamento e con una frequenza fissata a 45 Hz, è possibile notare come con la concentrazione minore di NaClO si raggiunga al massimo un abbattimento percentuale del 70% mentre nel caso di una concentrazione raddoppiata l'abbattimento raggiunto arriva al 95%.

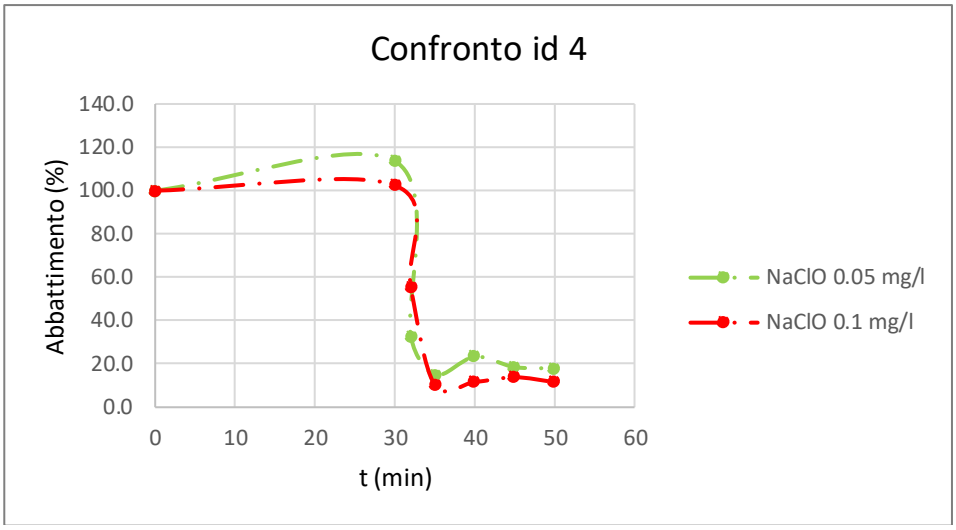


Figura 5.23 Confronto tra le concentrazioni utilizzate per le prove con id 4.

In quest'ultimo confronto effettuato tra concentrazioni diverse nelle stesse configurazioni, si nota come in presenza di pretrattamento ed in assenza di orifizio la concentrazione iniziale non sembra essere così influente sui risultati portando in entrambi i casi ad un abbattimento tra l'80% e il 90%.

Vengono adesso presentati alcuni grafici ricavati dal confronto tra le differenti tipologie di prove fin qui proposte volti a ricavare informazioni relativamente all'efficacia del pretrattamento a basse frequenze, all'influenza della frequenza utilizzata e all'influenza esercitata dalla presenza della piastra sull'abbattimento.

5.4.1 Efficacia del pretrattamento

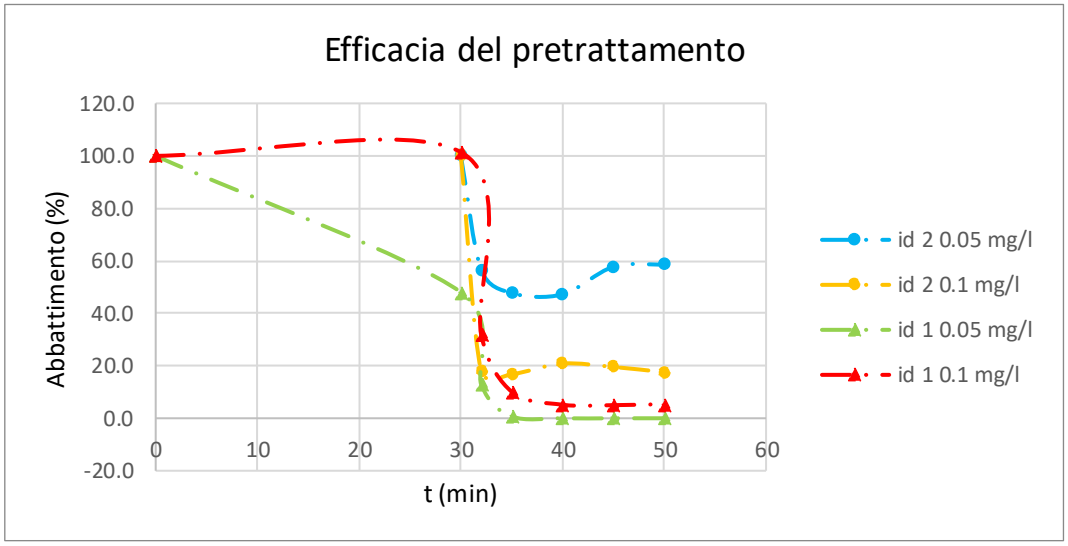


Figura 5.24 Confronto tra prove con e senza il pretrattamento.

In Figura 5.24 è possibile notare come la presenza di un pretrattamento di 30 minuti ad una frequenza della pompa pari a 15 Hz sembri essere fortemente

benefica sui risultati ottenuti in termini di abbattimento soprattutto con basse concentrazioni di ipoclorito di sodio immesse. Si nota infatti come per concentrazioni pari a 0.05 mg/l si passi da un abbattimento del 40% in assenza di pretrattamento (id 2) fino ad un abbattimento totale in presenza di pretrattamento (id 1).

Per quel che concerne invece le concentrazioni di 0.1 mg/l si passa da un valore intorno all'80% fino ad un abbattimento sostanzialmente totale. Il pretrattamento sembra dunque avere un'influenza di circa il 60% per concentrazioni pari a 0.05 mg/l e di circa il 20% per concentrazioni pari a 0.1 mg/l.

5.4.2 Influenza della frequenza

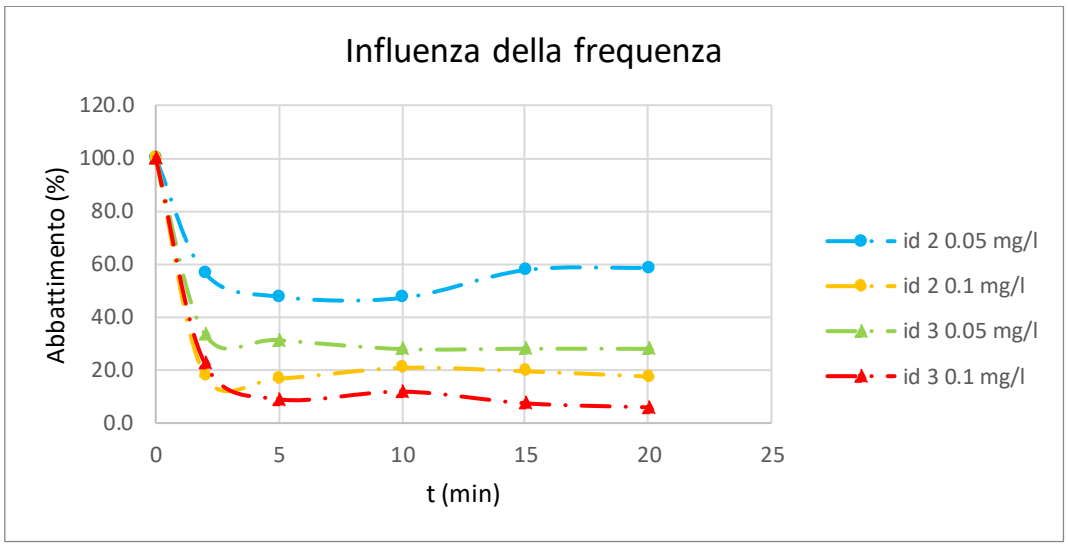


Figura 5.25 Confronto tra prove a frequenza variabile e prove a frequenza costante a 45 Hz.

Nel grafico di Figura 5.25 viene proposto un confronto tra una condizione della frequenza della pompa mantenuta costante (id 3) a 45 Hz (inducendo dunque fin da subito un regime di cavitazione spinto) ed invece una condizione in cui questa è variabile tra una prima fase a 15 Hz ed una seconda a 45 Hz (id 2).

Anche in questo caso le differenze si acutizzano con le concentrazioni inferiori (si ha una differenza di circa il 30% nel caso di concentrazioni di NaClO pari a 0.05 mg/l; mentre la differenza si assottiglia a circa il 10% per concentrazioni pari a 0.1 mg/l). L'abbattimento totale non è però raggiunto in nessuna delle due configurazioni.

5.4.3 Influenza della piastra forata

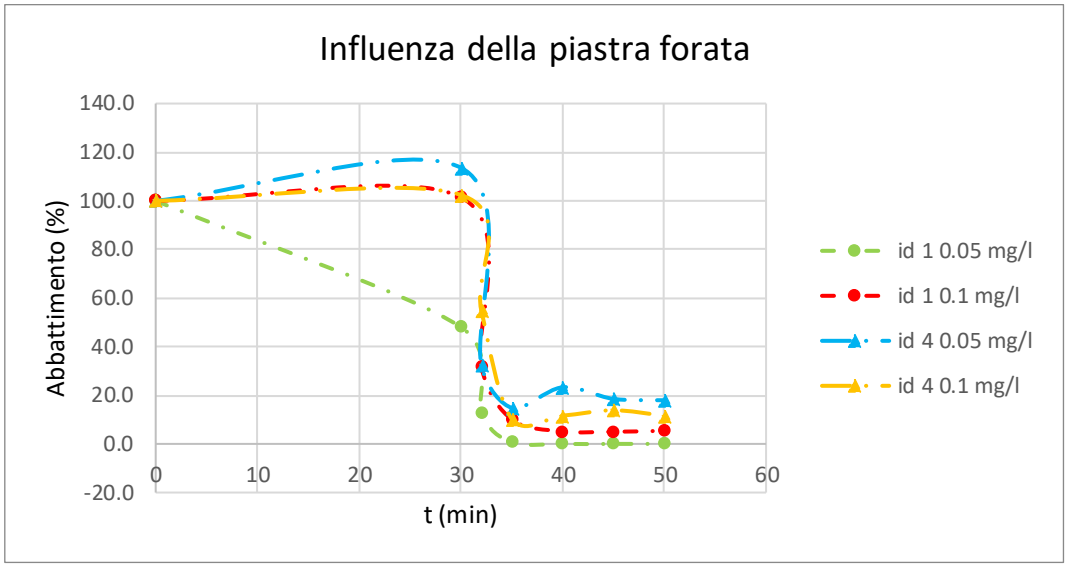


Figura 5.26 Influenza della piastra forata sull'efficacia dell'abbattimento.

In quest'ultimo confronto vengono messi in relazione il primo ed il quarto esperimento effettuato in cui si è sostanzialmente proceduto ad eliminare la piastra forata per proporre un parallelo tra presenza e assenza della stessa mantenendo invariate le altre procedure e condizioni idrodinamiche. L'assenza della piastra porta necessariamente ad una mancata induzione della cavitazione in quanto non si ha più il restringimento che garantisca il salto di pressione.

I risultati sembrano essere sostanzialmente molto simili con una differenza minima in termini di efficienza dell'abbattimento (in tutte le situazioni si supera comunque sempre l'80% di abbattimento percentuale). Tutto ciò potrebbe potenzialmente essere una conferma di quanto emerge anche dalle prove turbolente, ovvero che sembrerebbe esserci un abbattimento efficace anche senza indurre una perdita di carico importante come nel caso della cavitazione.

5.4.4 Confronto tra prove turbolente

Di seguito si propone un confronto tra le prove turbolente effettuate ed i risultati ricavati da Davello nel 2020. I risultati sembrerebbero essere molto promettenti perché di fatto confermano alcune intuizioni già ricavate in passato e rafforzano anche i risultati a cui si era già pervenuti nel 2020.

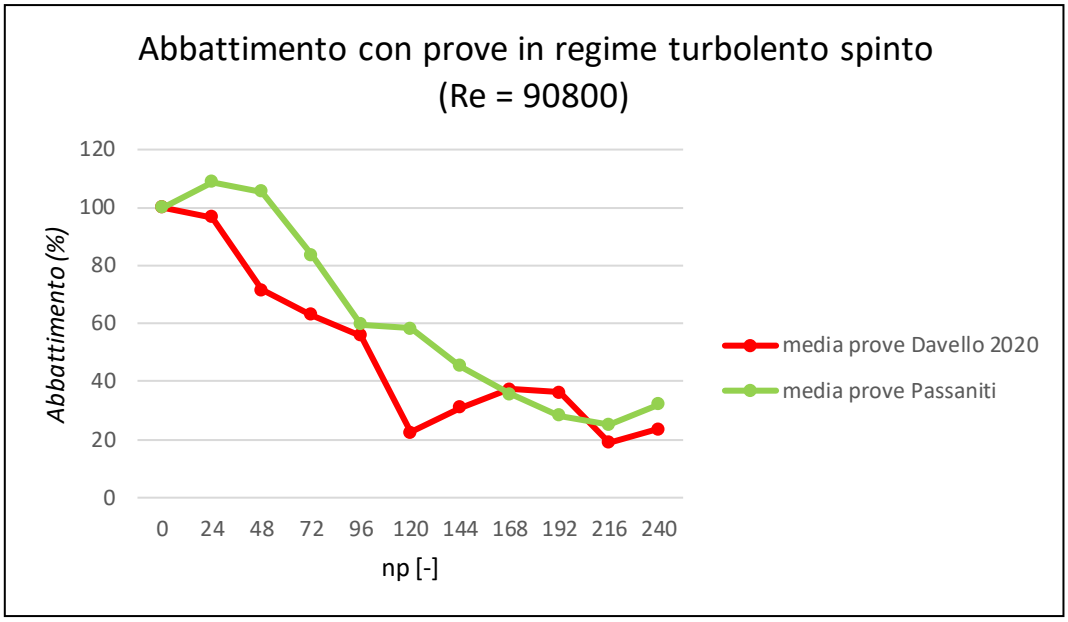


Figura 5.27 Confronto tra prove turbolente svolte da Passaniti e precedenti di Davello (2020).

Come già anticipato le prove sembrano confermare una buona efficacia del trattamento di disinfezione anche in assenza di fenomeni cavitativi e dunque mantenendo il numero di cavitazione maggiore di 1. In particolare, a seguito delle prove con sola turbolenza spinta si ha un abbattimento di circa il 70% che si discosta di meno del 10% da quanto già ricavato da Davello nel 2020.

È necessario però effettuare una precisazione, i risultati derivanti dallo studio di Davello erano sì stati ricavati imponendo le stesse condizioni al contorno (imponendo quindi una pressione di valle pari a 2.6 bar) ma questo era avvenuto attraverso un'altra metodologia. Mentre infatti nel 2020 l'innalzamento della pressione di valle si era avuto agendo attraverso la progressiva chiusura di una valvola a sfera nel circuito, in questo caso si è evitato di aumentare la pressione attraverso dei restringimenti che potessero portare a cavitazione localizzata nei pressi della valvola e si è scelta di aumentare la pressione interna dell'intero circuito.

I risultati ottenuti rafforzano dunque anche le conclusioni ricavate da Davello andando a minare la teoria secondo cui si sarebbe avuto abbattimento (nel 2020) potenzialmente sfruttando dei fenomeni cavitativi indotti involontariamente all'interno della valvola a sfera.

6 Prove di scaling up presso SMAT S.p.A.

6.1 Contesto

A seguito delle prove ibride di utilizzo di cloro e cavitazione effettuate nel laboratorio di idraulica del DIATI (Dipartimento dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture), è stato effettuato lo scale up a scala d'impianto tramite un circuito pilota installato presso un impianto di potabilizzazione dell'acqua. L'esigenza di uno scale up della tecnologia nasce dalla compresenza dei seguenti fattori:

- valutare l'impatto del fattore di scala rispetto alle sperimentazioni effettuate in laboratorio;
- valutare l'efficacia del trattamento su acque non contaminate artificialmente attraverso E. Coli addizionati in laboratorio, ma con carica batterica naturalmente presente;
- valutare le performance di un trattamento in continuo caratterizzato da un singolo passaggio nel reattore di cavitazione.

Le attività sperimentali effettuate in laboratorio sono state eseguite su un circuito dotato di ricircolo, in cui venivano effettuati più passaggi del volume di acqua attraverso il reattore di cavitazione. A differenza dell'impianto di laboratorio, nell'applicazione a scala di impianto si è voluto testare un trattamento "in linea" caratterizzato da un singolo passaggio attraverso il reattore di cavitazione. Questa configurazione rispecchia le caratteristiche tipiche degli impianti a scala reale.

6.2 Circuito sperimentale

6.2.1 Descrizione del circuito

L'impianto pilota presentato in questo capitolo è stato progettato e realizzato di concerto con la società partner del progetto, ovvero la Società Metropolitana Acque Torino S.p.A. (SMAT).

La progettazione e installazione del circuito è stata presa in carico da SMAT S.p.A. L'impianto pilota è stato posizionato presso l'impianto di potabilizzazione del fiume Po. L'obiettivo di questo impianto è trasferire il know-how maturato durante gli esperimenti effettuati in laboratorio ad un sistema a scala reale.

Figura 6.1 vista d'insieme e legenda dell'impianto di potabilizzazione di corso unità d'Italia

Le caratteristiche dell'acqua in ingresso al circuito devono risultare compatibili con il trattamento con reattore di cavitazione. L'acqua deve infatti presentare una bassa torbidità, una carica microbiologica simile a quella testata in laboratorio e deve essere priva di solidi sospesi. [41]

Si è scelto di non utilizzare direttamente quella prelevata dal Po in quanto questa presenta mediamente una carica batterica troppo elevata oltre che ad un quantitativo di solidi sospesi eccessivo per l'applicazione del trattamento.

La scelta è dunque ricaduta sull'utilizzo di acqua in uscita da uno dei tre chiarificatori di tipo CYCLOFLOC presenti nell'impianto sul Po (step 9 in figura 2.1) in quanto risultava essere qualitativamente più adatta ad essere sottoposta a cavitazione idrodinamica.

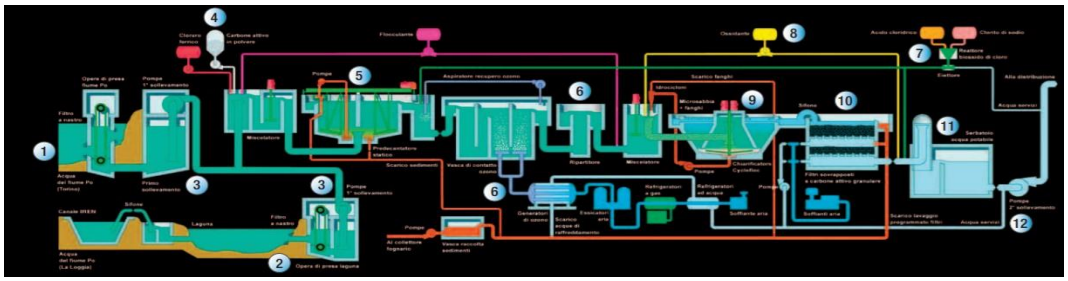


Figura 6.2 Step caratterizzanti l'impianto

Come si evince anche dallo schema dell'impianto, a valle del CYCLOFLOC l'acqua subisce ancora alcuni trattamenti, tra cui si ha una doppia filtrazione ai carboni attivi (step 10) ed il processo di disinfezione finale (step 11). Quest'ultimo avviene attraverso l'immissione di biossido di cloro per garantire una concentrazione di cloro libero pari a 0.2-0.3 mg/l al fine di evitare la formazione di colonie batteriche lungo la rete di distribuzione dell'acqua potabilizzata.

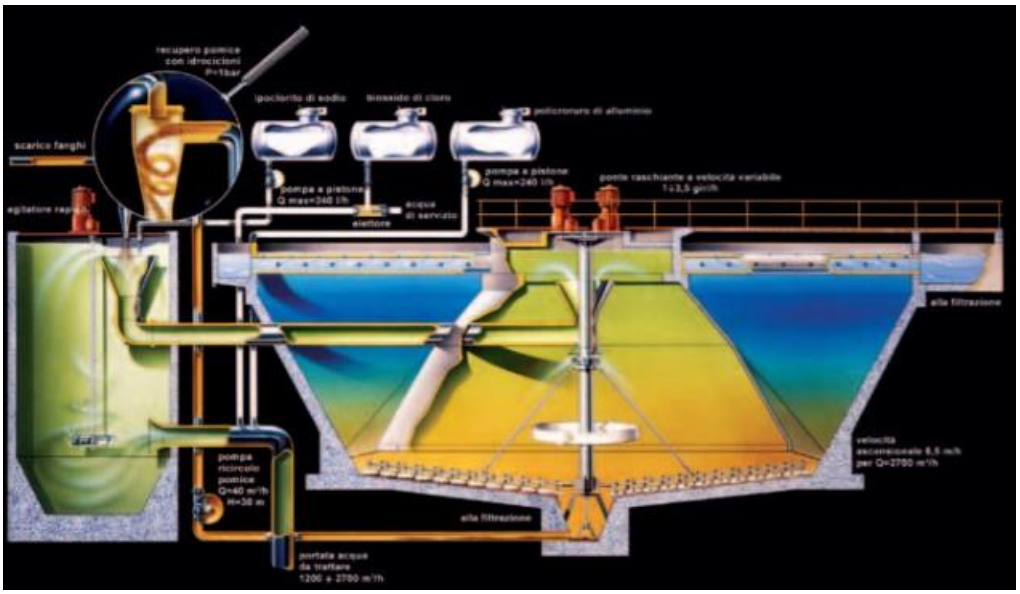


Figura 6.3 Schema di funzionamento di un chiarificatore tipo CYCLOFLOC in uso presso l'impianto

6.2.2 L'impianto pilota

L'impianto pilota viene alimentato attraverso il prelievo di un volume pari a 200 litri stimato con una bilancia posta alla base del serbatoio che permette la pesa dell'acqua in ingresso.

Una volta prelevata l'acqua dal processo di potabilizzazione, questa inizia il suo percorso all'interno del circuito pilota che di fatto presenta un funzionamento molto semplice. L'intero circuito si compone di un serbatoio di stoccaggio del volume di acqua seguito da un restringimento che l'acqua pompata attraversa inducendo così il fenomeno cavitativo e andando poi a reimmettere l'acqua nell'impianto come già espresso al paragrafo precedente.

Figura 6.4 Circuito pilota progettato

Tabella 6-1 Elementi componenti il circuito pilota

ID	Descrizione
1	Serbatoio
2	Valvola a sfera
3	Pompa a vite
4	Misuratore di portata
5	Manometro analogico
6	Specola
7	Sistema di pesatura

Come si può notare in Figura 6.4, l'intero sistema è inserito all'interno di un container di dimensioni standard (2438x2591x6058 mm) dotato di doppia apertura per consentirne agevolmente l'accesso e garantire le attività manutentive. Il peso totale dell'impianto una volta installato risulta essere di circa 11 tonnellate a pieno carico.

Oltre alle strumentazioni evidenziate in Figura 6.4, dietro il serbatoio è stato posto anche un gruppo elettrogeno al fine di garantire il corretto funzionamento delle apparecchiature necessitanti di energia elettrica.

- *Serbatoio*

Si è scelto di utilizzare un serbatoio (punto 1 in Figura 6.4) ad asse orizzontale della capacità di 3 m^3, costituito da due tipologie differenti di acciaio inox. Per le parti che risultano essere a contatto con l'acqua è stato utilizzato un acciaio inox AISI 316L che garantisce una buona resistenza alla corrosione, una elevata rimovibilità batterica e una bassa concentrazione battericida dopo i cicli di ripulitura; per le restanti parti è stato invece utilizzato un acciaio inox AISI 304L.

Il serbatoio si compone di:

- Recipiente principale;
- Agitatore interno.

- *Recipiente principale*

Il recipiente principale risulta essere caratterizzato da un corpo cilindrico ad asse orizzontale che presenta un fondo bombato saldato al fasciame lato motorizzazione e imbullonato sul lato scarico. Le finiture sia interna che esterna sono di tipo 2B e il corpo principale presenta un boccaporto superiore completo di microinterruttore di sicurezza di diametro 500 mm.

Il serbatoio presenta quattro fori: uno per l'ingresso dell'acqua DN100 flangiato, uno aggiuntivo superiore DN50 flangiato, uno scarico di fondo DN125 flangiato ed infine un attacco per lo sfiato superiore.

- *Agitatore interno*

L'agitatore interno è costituito da una spirale di movimentazione adatta all'omogenea miscelazione del liquido laddove si voglia effettuare delle prove con mescolamento, un albero porta spirale azionato da un motoriduttore ed infine dei supporti sia lato motore con guarnizioni a baderna che lato sportello mediante boccola.

Figura 6.5 Vista dell'interno del serbatoio con agitatore ben visibile

Si riassumono nella tabella di seguito (Tabella 6-2) le caratteristiche del serbatoio installato.

Tabella 6-2 Riepilogo caratteristiche serbatoio

Caratteristiche tecniche serbatoio	
Diametro interno [mm]	1430
lunghezza fasciame [mm]	2500
Capacità geometrica [l]	4000
capacità di carico max [l]	3250
Potenza elettrica installata [kW]	30

➢ *Misuratore di portata*

Al fine di valutare la portata transitante è stato installato un misuratore di portata ad ultrasuoni come si nota nella figura sottostante (Figura 6.6).

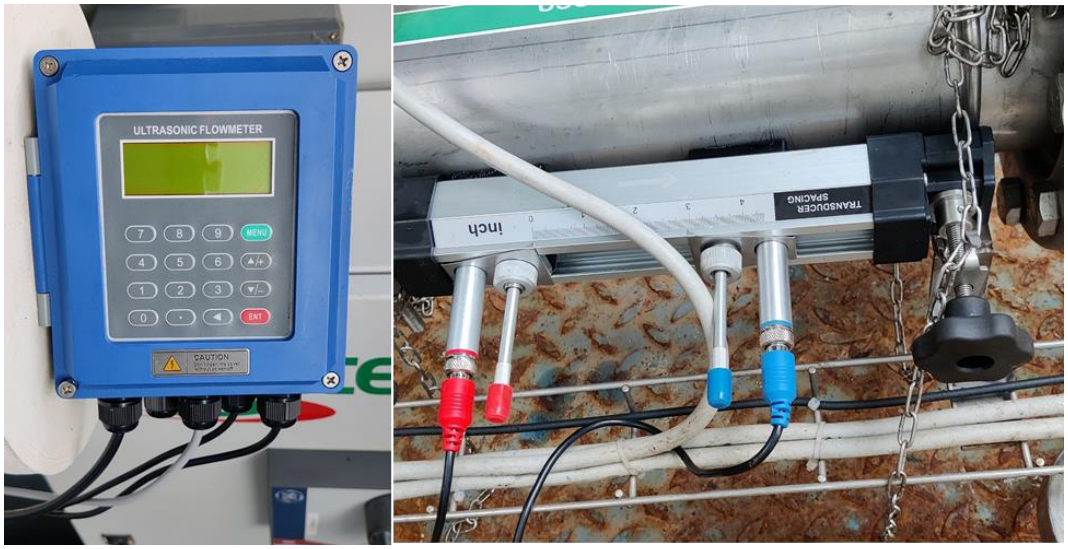


Figura 6.6 Misuratore di portata utilizzato

➢ *Valvole a sfera*

Sono state utilizzate quattro valvole a sfera nel circuito, scelte per minimizzare al massimo le perdite localizzate in prossimità della chiusura. Queste risultano essere fondamentali per la gestione dei flussi all'interno del circuito, in particolare sono state inserite per garantire anche la possibilità di chiudere il circuito ed effettuare così dei test sul fluido ricircolato per un numero prefissato di passaggi al fine effettuare simulazioni simili a quelle effettuate nel circuito sperimentale presso il Politecnico di Torino. La tipologia di valvole utilizzate è del tipo 4" INOX AISI316L filettate con possibilità di azionamento attraverso un attuatore elettrico 24Vdc ON/OFF oppure azionamento manuale attraverso opportuna manovella come si nota in Figura 6.7.

Figura 6.7 Visione d'insieme e particolare di una valvola a sfera

- <u>*Manometri analogici*</u>

All'interno del circuito risulta essere di fondamentale importanza la valutazione delle pressioni in gioco per procedere alla determinazione delle condizioni idrodinamiche da garantire al fine di indurre la cavitazione. A questo scopo sono stati inseriti all'interno del circuito due manometri analogici come si nota in Figura 6.8.

Figura 6.8 Manometro analogico installato

- <u>*Specola*</u>

Per indurre la cavitazione è necessario procedere ad un restringimento di sezione. Questo è stato realizzato attraverso l'utilizzo di una specola similare a quella utilizzata già nel circuito in scala inferiore e realizzata presso il Politecnico di

Torino. È stata utilizzata una piastra forata composta di 9 fori ciascuno con un diametro pari a 2.5 mm.

Figura 6.9 Vista dall'alto e particolare con fori della piastra forata della specola utilizzata

La determinazione del numero di fori da utilizzare è avvenuta attraverso un ragionamento a ritroso partendo dall'imposizione della velocità e facendo variare via via le portate relative alla curva di produzione della pompa. Andando a dividere le portate viavia decrescenti con la velocità imposta per la determinazione della cavitazione si è proceduto alla determinazione dei valori in termini areali di apertura da garantire nella piastra da forarsi. Una volta noti i singoli valori delle aree è stato ricavato il diametro relativo alle situazioni di singolo foro, di 8 fori e di 9 fori. Il valore scelto di 9 fori deriva dal fatto che in questo modo si è potuti andare a realizzare fori della stessa dimensione di quelli che si avevano già nella configurazione in laboratorio e in particolare pari ad un diametro di 2.5 mm. Nella tabella che segue sono i riportati i calcoli effettuati (Tabella 6-3).

Tabella 6-3 Calcoli relativi alla determinazione del numero di fori necessari.

Q(m^3/h)	Q (m^3/s)	A (m^2)	d (mm)	v (m/s)		Q/8	A (m^2)	d (mm)		Q/9	A (m^2)	d (mm)
61.2	0.017	0.0009	32.91	20.00		0.0021	0.00011	11.63		0.00	0.00	3.88
57.6	0.016	0.0008	31.92	20.00		0.0020	0.00010	11.29		0.00	0.00	3.76
54	0.015	0.0008	30.91	20.00		0.0019	0.00009	10.93		0.00	0.00	3.64
50.4	0.014	0.0007	29.86	20.00		0.0018	0.00009	10.56		0.00	0.00	3.52
46.8	0.013	0.0007	28.78	20.00		0.0016	0.00008	10.17		0.00	0.00	3.39
43.2	0.012	0.0006	27.65	20.00		0.0015	0.00008	9.77		0.00	0.00	3.26
39.6	0.011	0.0006	26.47	20.00		0.0014	0.00007	9.36		0.00	0.00	3.12
36	0.01	0.0005	25.24	20.00		0.0013	0.00006	8.92		0.00	0.00	2.97
32.4	0.009	0.0005	23.94	20.00		0.0011	0.00006	8.46		0.00	0.00	2.82
28.8	0.008	0.0004	22.57	20.00		0.0010	0.00005	7.98		0.00	0.00	2.66
25.2	0.007	0.0004	21.12	20.00		0.0009	0.00004	7.47		0.00	0.00	2.49
21.6	0.006	0.0003	19.55	20.00		0.0007	0.00004	6.91		0.00	0.00	2.30
18	0.005	0.0003	17.85	20.00		0.0006	0.00003	6.31		0.00	0.00	2.10
14.4	0.004	0.0002	15.96	20.00		0.0005	0.00003	5.64		0.00	0.00	1.88
10.8	0.003	0.0002	13.82	20.00		0.0004	0.00002	4.89		0.00	0.00	1.63
7.2	0.002	0.0001	11.29	20.00		0.0002	0.00001	3.99		0.00	0.00	1.33
3.6	0.001	0.0000	7.98	20.00		0.0001	0.00001	2.82		0.00	0.00	0.94

- *Pompa idraulica*

È stata installata una pompa tale da fornire le prevalenze sufficienti a garantire le condizioni di cavitazione all'interno del circuito installato. La pompa che si è scelto di installare è una pompa a vite che è posta alla base del serbatoio. il minimo di potenza installabile fornito dal produttore risultava essere pari a 4kW. Di seguito si riportano alcuni disegni costruttivi e le curve caratteristiche della stessa utilizzate per la determinazione della portata in funzione del carico da garantirsi.

Figura 6.10 Pompa utilizzata nel circuito

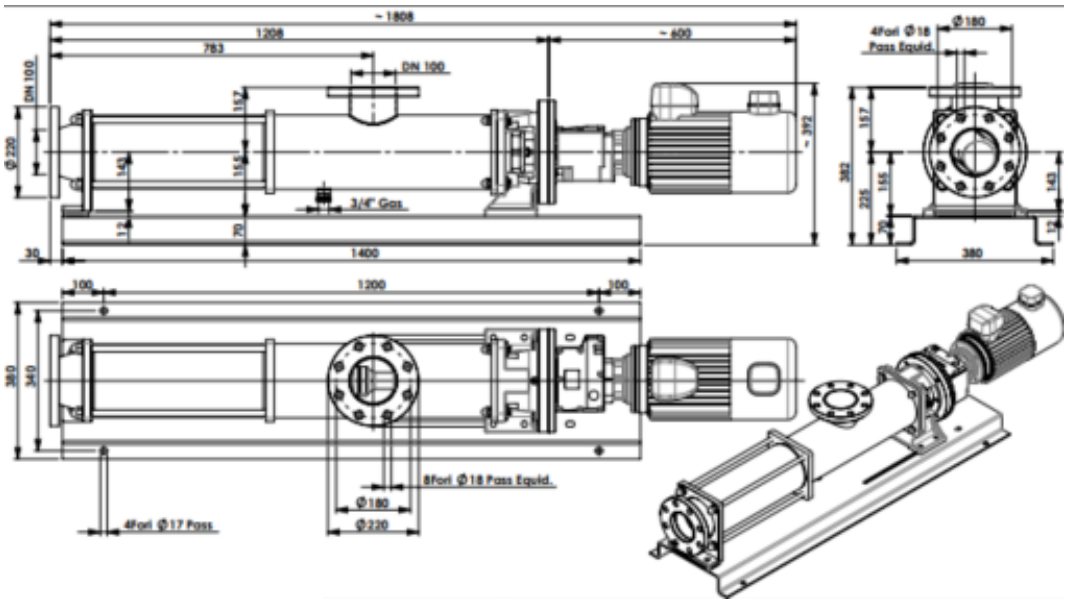


Figura 6.11 Particolare della pompa installata

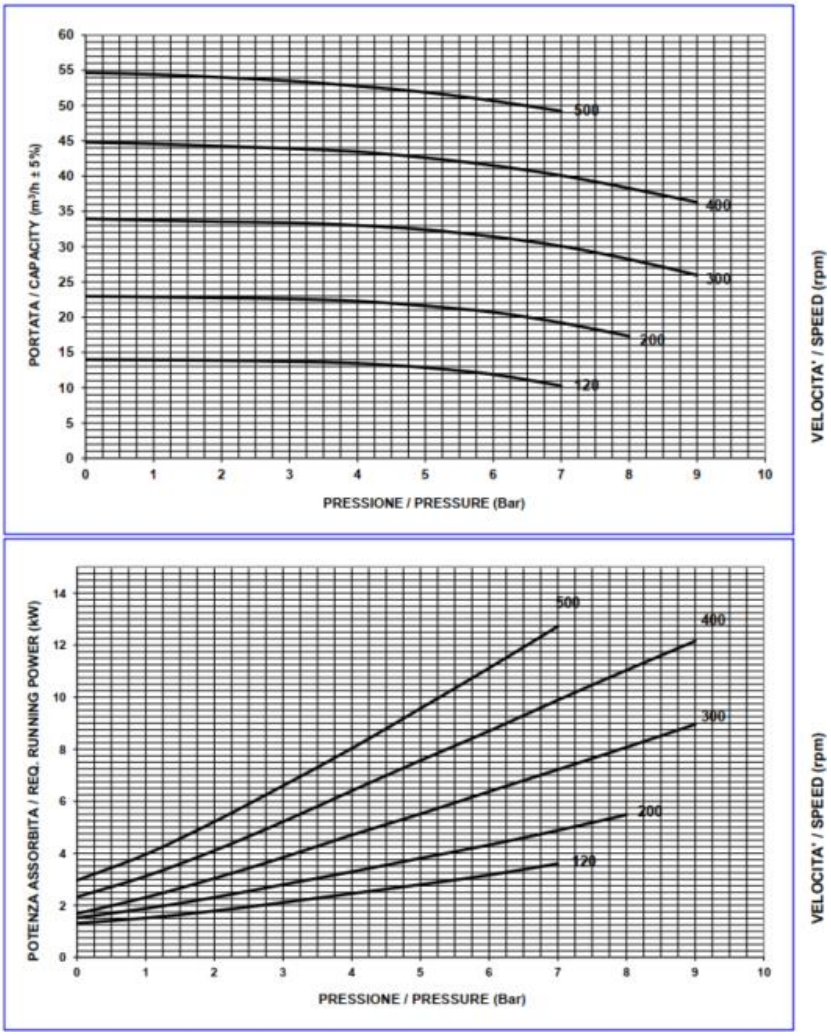


Figura 6.12 Curve caratteristiche della pompa installata

- *Gruppo elettrogeno*

L'impianto pilota non era collegato alla rete elettrica, per cui è stato installato un generatore EY-60P le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 6-4 e in Tabella 6-5.

Figura 6.13 Esempio di generatore EY-60P

Tabella 6-4 Caratteristiche principali generatore installato

EY-60P							
Potenza in continuo		**Potenza in emergenza**		**Peso**	**Dimensioni**		
kVA	kW	kVA	kW	kg	L [mm]	W [mm]	H [mm]
60	48	66	52.8	990	2000	850	1275

Tabella 6-5 Condizioni limite di operabilità del generatore

condizioni ambientali	
Temperatura	40 °C
Altitudine	1000 mslm
Umidità	60%

- *Bilancia*

Per la quantificazione del volume immesso è stato utilizzato un sistema di pesatura collegato ai quattro appoggi del serbatoio. L'intero serbatoio poggia infatti su una piastra che, collegata a opportuni trasduttori funziona da bilancia e permette di pesare il volume inserito. Nota poi la densità media dell'acqua è possibile ricalcolarsi l'effettivo volume inserito in termini di litri.

- *Sistema di ricircolo*

Nell'impianto pilota è stato realizzato un sistema di ricircolo per l'acqua a monte del reattore di cavitazione, per consentire una corretta miscelazione del reagente addittivato. Questo, come si nota anche nella figura (Figura 6.14), permetteva all'acqua di ricircolare all'interno del circuito affinchè si avesse un'opportuna miscelazione. Il sistema è stato progettato utilizzando tubature DN100.

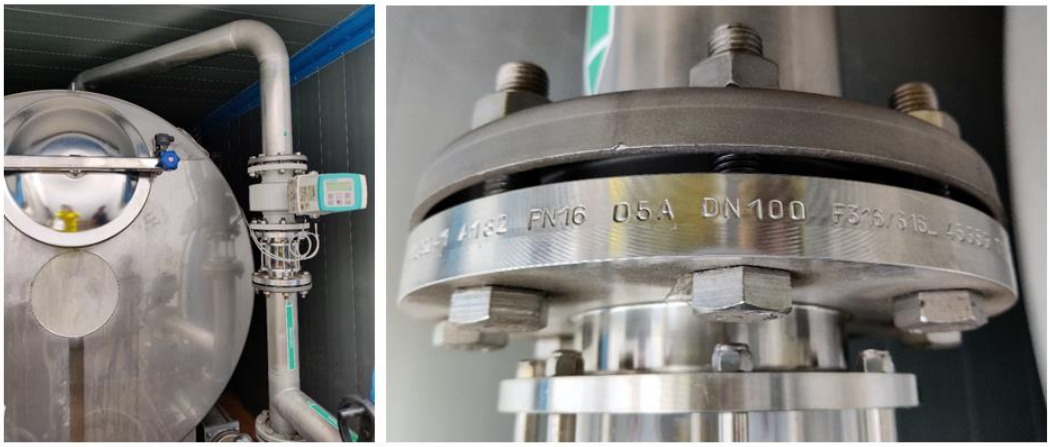


Figura 6.14 Vista d'insieme del sistema di ricircolo e particolare della flangia bullonata

6.3 Procedura sperimentale delle prove

La procedura sperimentale utilizzata è consistita nei seguenti passaggi:

1. Riempimento del serbatoio dell'impianto tramite il sifone dal cyclofloc biologico;
2. Prelievo campione per analisi tramite test ATP della carica batterica presente nell'acqua da trattare;
3. Trattamento con cavitazione del volume di acqua desiderato;
4. Prelievo campione per analisi tramite test ATP della carica batterica residua;
5. Scarico dell'impianto.

Come già anticipato nei paragrafi precedenti il trattamento prevedeva un unico passaggio attraverso il reattore di cavitazione. Al fine di valutare la corretta efficacia del processo di disinfezione sono state svolte le seguenti prove

- *Prova statica senza cloro:*

1. riempimento del serbatoio;
2. analisi della carica batterica al tempo t=0 e a t=15 minuti con mescolatore in movimento;
3. svuotamento del serbatoio.

- *Prova statica con cloro:*

1. riempimento del serbatoio;
2. sub-clorazione a 0.05 mg/l;
3. analisi della carica batterica al tempo t=0, t=10', t=20' e t=30' con sistema di ricircolo in funzione.
4. svuotamento del serbatoio.

- *Prova dinamica senza cloro*

1. riempimento del serbatoio;

2. analisi della carica batterica con singolo passaggio attraverso il reattore di cavitazione;
3. svuotamento del serbatoio.

- *Prova dinamica con sub-clorazione a 0.05 mg/l*

1. riempimento del serbatoio;
2. sub-clorazione a 0.05 mg/l;
3. ricircolo per circa 10′
4. analisi della carica batterica al tempo t=0, t=10′, t=20′ e t=30′ con singolo passaggio attraverso il reattore di cavitazione;
5. svuotamento del serbatoio.

- *Prova dinamica con sub-clorazione a 0.10 mg/l*

1. riempimento del serbatoio;
2. sub-clorazione a 0.10 mg/l;
3. ricircolo per circa 10′
4. analisi della carica batterica al tempo t=0, t=10′, t=20′ e t=30′ con singolo passaggio attraverso il reattore di cavitazione;
5. svuotamento del serbatoio.

6.4 Risultati

I risultati delle prove hanno mostrato una sostanziale non efficacia del trattamento con un singolo passaggio attraverso il reattore di cavitazione.

7 Conclusioni e sviluppi futuri

Dall'interpretazione dei risultati finali, ricavati attraverso la comparazione dei dati ottenuti da tutte le prove effettuate, sono state tratte le conclusioni che vengono presentate in questo capitolo.

Per quanto riguarda il primo degli obiettivi espresso al punto 1 del capitolo introduttivo, è possibile affermare che attraverso gli esperimenti effettuati si confermano le evidenze sperimentali già ricavate nel lavoro espresso da Burzio et al. È infatti possibile affermare che la cavitazione idrodinamica fornisce mediamente un buono strumento all'interno dell'ambito della disinfezione batterica sebbene questa porti con sé un grosso dispendio energetico che risulta non essere ottimale per situazioni caratterizzate da scarso carico idraulico.

Relativamente invece al secondo punto, è possibile affermare che gli esperimenti effettuati sembrano concordare con l'ipotesi secondo cui i trattamenti di tipo ibrido permettano un minor utilizzo di ipoclorito di sodio nella fase di disinfezione delle acque anche se ulteriori test dovrebbero essere effettuati per affinare ancora di più il processo ibrido. In particolare, sembra avere grande efficacia il pretrattamento a bassa frequenza che ha fornito risultati molto promettenti soprattutto con basse concentrazioni. Purtroppo, però non si riesce ancora a raggiungere (se non in pochi casi) il completo abbattimento, pertanto, si consiglia l'utilizzo di ulteriori prove volte ad ampliare il periodo di pretrattamento o anche la durata del trattamento stesso.

Per quanto concerne invece la presenza o meno della piastra forata ed anche della frequenza della pompa, non sembra essere presente una chiarezza di risultati che possa portare a conclusioni certe sebbene permanga la parvenza di una maggior efficacia all'aumentare della frequenza e del tempo di trattamento con alta frequenza ed anche in presenza di orifizio.

Sfortunatamente le prove statiche non hanno fornito risultati interpretabili e questo non ha permesso un confronto con le prove di ibridazione al fine di quantificare il ruolo dell'agitazione dell'acqua nel processo di disinfezione (ad esempio il ruolo nella miscelazione dell'ipoclorito di sodio e se questo avesse una maggior efficacia rispetto alle prove non in movimento).

Passando poi al terzo degli obiettivi esposto nel capitolo introduttivo, è possibile affermare che i risultati ottenuti sono sicuramente tra i più promettenti ottenuti durante il presente lavoro di tesi. Lo studio degli effetti della sola turbolenza ad un regime spinto (Re = 90800) porta con sé grandi prospettive visto anche che conferma il set di prove effettuato da Davello con un abbattimento percentuale che supera il 70%. Purtroppo, il numero limitato di prove effettuate in questo ambito non permette di parlare di evidenze sperimentali bensì solamente di grandi prospettive, ed è per questo che si consiglia sicuramente di proseguire lo studio sfruttando questa tecnologia andando possibilmente a valutare quale sia il valore limite del numero di Reynolds oltre il quale i risultati cessano di essere promettenti.

Infine, relativamente all'ultimo punto degli obiettivi riguardante l'ampliamento a scala maggiore dei risultati ottenuti sul circuito da 24 litri, è possibile affermare che i risultati ottenuti non rispecchiano le aspettative. La motivazione è probabilmente da ricercarsi nei fattori di scala del processo che andrebbero ricalcolati e forse anche nella progettazione di alcuni componenti che non sono stati adeguatamente scalati. Si consiglia dunque, per quel che concerne le prospettive future, di ripartire dalla progettazione del circuito sperimentale iniziando da elementi quali la test section utilizzata.

8 Bibliografia

[1] E. Burzio, F. Bersani, G. Caridi, R. Vesipa, L. Ridolfi e C. Manes, «Water disinfection by orifice-induced hydrodynamic cavitation,» *Ultrasonics - Sonochemistry,* vol. 60, 2020.

[2] R. Davello, «Report interno,» Politecnico di Torino , 2021.

[3] B. Gordon, «Guidelines for drinking-water quality, 4th edition, incorporating the 1st addendum,» World Health Organization, Ginevra , 2017 .

[4] «agenda 2030 sviluppo sostenibile,» [Online].

[5] CESVI Fondazione Onlus, «CESVI,» [Online]. Available: www.cesvi.org.

[6] World Health Organization, «WorldMapper,» [Online]. Available: https://worldmapper.org/.

[7] United Nations Children's Fund (UNICEF) & World Health Organization, «Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017. Special focus on inequalities.,» 2019.

[8] UNCCD, «Migration and desertification,» [Online]. Available: https://catalogue.unccd.int/22_loose_leaf_Desertification_migration.pdf.

[9] M. Ellena, «MIGRANTI CLIMATICI | CAUSE, DEFINIZIONI E NUMERI DI UN FENOMENO IN CRESCITA,» 13 Novembre 2020. [Online]. Available: https://www.lenius.it/migranti-climatici/.

[10] M. Maggi, *Cavitazione idrodinamica: studio sperimentale di una ruota,* Torino : Politecnico di Torino , 2019/2020.

[11] J. Hawthorne, «Critical Facts About Waterborne Diseases In The United States and Abroad,» 15 febbraio 2018. [Online]. Available: https://businessconnectworld.com/2018/02/15/critical-facts-waterborne-diseases-us/.

[12] A. Pruss-Ustun, J. Bartram, T. Clasen, J. M. J. Colford e O. Cumming, «Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene in low-

and middle-income settings: a retrospective analysis of data from 145 countries,» *Tropical Medicine and International Health,* vol. 19, n. 8, pp. 894-905, 2014.

[13] World Health Organization , «WHO,» [Online]. Available: https://www.who.int/.

[14] Ministero della salute , «Trattamenti e potabilizzazione delle risose idriche,» 6 ottobre 2016. [Online]. Available: https://www.salute.gov.it/portale/temi/p2_6.jsp?id=4413&area=acque_potabili&menu=acque.

[15] bio notizie , «Elminti nell'uomo,» [Online]. Available: 14. https://www.bionotizie.com/salute-wellness/elminti-nelluomo-la-classificazione-dei-parassiti-gastrointestinali/.

[16] R. Davello, *Progettazione di un dispositivo per la disinfezione a basso costo dell'acqua con cavitazione,* Torino : Politecnico di Torino , 2018.

[17] D. Maslak e D. Weuster-Botz, «Combination of hydrodynamic cavitation,» *Eng. Life Sci.,* vol. 11, n. 4, pp. 350-358, 2011.

[18] Y. Wang, A. Jia, Y. Wu, C. Wu e L. Chen, «Disinfection of bore well water with chlorine dioxide/sodium hypochlorite and hydrodynamic cavitation,» *Environmental Technology,* pp. 479-486, 2015.

[19] Lenntech, «Disinfettanti,» [Online]. Available: https://www.lenntech.it/disinfezione-acqua/disinfettanticloro.htm#ixzz6FF1Jjygn.

[20] OPPO, «Appunti sulla clorazione,» [Online]. Available: https://www.oppo.it/normative/clorazione.html.

[21] SEPRA, «Generalità sull'ozono,» [Online]. Available: https://www.sepra.it/it/generalita-ozono.html.

[22] Lenntech, «Disinfezione tramite luce UV,» [Online]. Available: https://www.lenntech.it/biblioteca/uv/uv-info.htm.

[23] acquaetica, «Tutto su l'ultra-filtrazione,» [Online]. Available: https://acquaetica.com/ultrafiltrazione/.

[24] M. C. Collivignarelli e al., «Overview of the Main Disinfection Processes for Wastewater and Drinking Water Treatment Plants,» 2017, p. 14.

[25] CAWST, «What is a Biosand filter?,» [Online]. Available: https://www.cawst.org/services/expertise/biosandfilter/more-information.

[26] F. Anwar e U. Rashid, «Physiochemical characteristics of Moringa Oleifera seeds and seed oil from a wild provenance of Pakistan,» *Pakistan Journal of Botany,* 2007.

[27] M. Dular e M. Petkovšek, «On the Mechanisms of Cavitation Erosion – Coupling High,» *Experimental Thermal and Fluid Science,* 2016.

[28] J. Carpenter e al., «Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry,» *Reviews in Chemical Engineering 33,* 2016.

[29] A. Šarc e al, «Can rapid pressure decrease induced by supercavitation efficiently eradicate Legionella pneumophila bacteria?,» in *Desalination and Water Treatment*, 2014, pp. 1-11.

[30] G. Fuda, *Studio sperimentale della disinfezione dell'acqua mediante cavitazione idrodinamica,* Torino: Politecnico di Torino , 2018.

[31] HEVVY, «GAIN IN-DEPTH KNOWLEDGE ON CAVITATION,» 11 settembre 2017. [Online]. Available: https://hevvypumps.com/en-blog/tech-talk/gain-in-depth-knowledge-on-cavitation/.

[32] Saharan e al., Hydrodynamic Cavitation as an Advanced Oxidation Technique for the Degradation of Acid Red 88 Dye, 2011.

[33] M. Badve, M. Bhagar e A. Pandit, «Microbial disinfection of seawater using hydrodynamic cavitation,» in *Separation and Purification Technology 151*, 2015, pp. 31-38.

[34] S. Arrojo e al., «A parametrical study of disinfection with hydrodynamic cavitation,» *Ultrasonics Sonochemistry,* 2008.

[35] S. Sawant e al., Effect of hydrodynamic cavitation on zooplankton: a tool for disinfection, India, 2008.

[36] K. Hammi, *Analisi sperimentale degli effetti indotti dalla cavitazione idrodinamica sul campo di moto a valle di un restringimento ad orifizio,* Torino: Politecnico di Torino , 2019.

[37] L. Mezule, S. Tsyfansky, V. Yakushevich e T. Juhna, «A simple technique for water disinfection with hydrodynamic cavitation: effect on survival of Escherichia Coli,» in *Desalination*, 2009, pp. 152-159.

[38] H. Mùjica-Paz, A. Valdez-Fragoso, C. Samson, J. Welti-Chanes e J. Torres, «High-pressure processing technologies for the pasteurization and sterilization of foods,» *Food and Bioprocess Technology,* p. 969, 2011.

[39] H. Lange, P. Taillandier e J. Riba, «Effect of high shear stress on microbial viability,» *Journal of Chemical Technologt and Biotechnology,* pp. 501-505, 2001.

[40] V. Damato, *Disinfezione dell'acqua per mezzo della cavitazione idrodinamica,* Torino : Politecnico di Torino, 2020.

[41] SMAT s.p.a., «Gli impianti di potabilizzazione del fiume Po,» Torino.