

POLITECNICO DI TORINO
Facoltà d'Ingegneria
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Disinfezione dell'acqua per mezzo della cavitazione idrodinamica

Luglio 2020



Relatore:
Prof. Costantino Manes

Co-relatori:
Prof. Luca Ridolfi
Ing. Riccardo Vesipa

Candidato:
Vito Damato

Sommario

Ringraziamenti	1
Abstract	2
1. Disinfezione dell'acqua	3
1.1 L'importanza della disinfezione delle acque	3
1.2 Microrganismi patogeni presenti nell'acqua	5
1.3 Escherichia Coli	7
1.4 Definizione di disinfezione dell'acqua	8
1.5 Trattamento delle acque	8
1.5.1 Disinfezione per mezzo di sostanze chimiche	9
1.5.2 Disinfezione per mezzo di metodi sfruttanti principi fisici	12
2. Cavitazione	13
2.1 Descrizione del fenomeno	13
2.2 Effetti della cavitazione	15
2.3 Dinamica della bolla	15
2.3.1 Formazione	16
2.3.2 Crescita	17
2.3.3 Collasso	18
2.4 Numero di cavitazione	19
2.5 Classificazione della cavitazione	20
2.5.1 Regimi di cavitazione	20
2.5.2 Tecnologie cavitazionali	21
3. Cavitazione Idrodinamica	26
3.1 Descrizione del fenomeno	26
3.2 Effetti fisici e chimici della cavitazione	29
3.3 Reattori per la cavitazione idrodinamica	31
3.4 Classificazione geometrica dei reattori con piastre ad orifizio	34
3.5 Influenza dei parametri operativi nella cavitazione idrodinamica	36
4. Stato dell'arte	37
4.1 Analisi dimensionale	38
4.2 Effetti del numero di cavitazione e concentrazione iniziale	44

5. Metodo sperimentale.....	50
5.1 Impianto idraulico	53
5.2 Reattori cavitazionali.....	59
5.3 Sistema di raffreddamento	60
5.4 Strumentazione per prelievo campioni e scarico.....	64
5.5 Monitoraggio ed acquisizione dati	66
6. Protocollo sperimentale	72
6.1 Azioni preliminari	72
6.2 Esecuzione delle prove.....	76
6.3 Pulizia finale dell'impianto	64
7. Esperimenti eseguiti.....	79
7.1 Metodo di analisi batteriologica.....	79
7.2 Esperimenti di controllo	83
7.3 Configurazione della geometria del reattore	92
7.4 Esperimenti di disinfezione al varirare del numero di cavitazione	94
7.5 Interpretazione dei risultati.....	101
Conclusioni	104
Bibliografia	105

Lista delle figure

Figura 1.1 – Schema del filtro brevettato da John Gibb per soddisfare il fabbisogno della cittadina di Paisley	3
Figura 1.2 – Mappa riguardante l'utilizzo di acqua potabile	4
Figura 1.3 - Visualizzazione del protozoo Giardia Lamblia.....	6
Figura 1.4 – Abitanti nei bassifondi delle metropoli.	6
Figura 1.5 – Immagine di Escherichia Coli al microscopio.....	7
Figura 2.1 – Fotografia di danno alla girante provocato da cavitazione.....	15
Figura 2.2 - Fotografia di danno alla girante provocato da cavitazione	15
Figura 2.3 – Schematizzazione della dinamica della bolla	16
Figura 2.4 - Schema dei carichi di un flusso che attraversa un restringimento.	17
Figura 2.5 – Sequenza di fotogrammi di un'implosione di una bolla.....	18
Figura 2.6 – Sequenza di fotogrammi di coalescenza di due bolle.....	18
Figura 2.7 – Schematizzazione di degassaggio di una bolla.....	18
Figura 2.8 – Andamento del numero di cavitazione in funzione della vibrazione delle pareti della condotta	19
Figura 2.9 – Schematizzazione delle regioni della supercavità	21
Figura 2.10 – Dinamica della bolla nella cavitazione acustica	22
Figura 2.11 – Fotografia di una vasca ad ultrasuoni	23
Figura 2.12 – Fotografia di una sonda ad ultrasuoni	23
Figura 2.13 – Fotografia di una ultrasonic flow cell.....	24
Figura 3.1 – Descrizione grafica di un flusso in un dispositivo cavitante	27
Figura 3.2 – Andamento dei carichi per i fluidi reali.....	29
Figura 3.3 – Zone di reazione secondo la teoria degli “hot spot”	30
Figura 3.4 – Sequenza temporale del collasso asimmetrico	31
Figura 3.5 – Omogeneizzatore ad alta velocità.....	32
Figura 3.6 – Omogeneizzatore ad alta pressione	32
Figura 3.7 – Reattori con tubi di Venturi	33
Figura 3.8 – Reattori con piastre forate	33
Figura 3.9 – Schematizzazione d'impianto di cavitazione idrodinamica con restrizione della sezione.....	34
Figura 3.10 – Schematizzazione della vena liquida del sistema thin plate.....	35
Figura 3.11 – Schematizzazione della vena liquida del sistema thick plate	35
Figura 4.1 – Risultati delle prove con numero di cavitazione uguale a 0.2	45
Figura 4.2 – Risultati delle prove con numero di cavitazione uguale a 0.4.....	45
Figura 4.3 – Risultati delle prove con numero di cavitazione uguale a 0.65.....	46
Figura 4.4 – Andamenti medi della disinfezione al variare del numero di cavitazione.....	47

Figura 4.5 – Estrapolazione delle leggi esponenziali della disinfezione al variare del numero di cavitazione	48
Figura 5.1 – Fotografia del locale in cui è stato costruito l'impianto cavitazionale.....	50
Figura 5.2 – Fotografia dell'impalcatura e del piano di lavoro in fase di realizzazione su cui poggia l'impianto cavitazionale.....	51
Figura 5.3 – Schematizzazione dell'impianto idraulico cavitazionale utilizzato per gli esperimenti di disinfezione	52
Figura 5.4 – Tubazioni acciaio inox	53
Figura 5.5 – Elemento di raccordo maschio ed elemento di raccordo.....	53
Figura 5.6 – Flangia	54
Figura 5.7 – Guarnizione tra elementi maschio-femmina	54
Figura 5.8 – Guarnizione tra flange	54
Figura 5.9 – Elemento di raccordo a T	55
Figura 5.10 – Chiave per raccordi.....	55
Figura 5.11 – Fotografia di elettropompa centrifuga multistadio verticale Lowara.....	56
Figura 5.12 – Fotografia della valvola a sfera utilizzata.....	57
Figura 5.13 – Fotografia del serbatoio di accumulo	57
Figura 5.14 – Fotografia dello strumento che produce acqua ultrapura e serbatoio di accumulo	58
Figura 5.15 – Schema del sistema idraulico	58
Figura 5.16 – Fotografia specola di vetro	59
Figura 5.17 – Fotografia del reattore cavitazionale	59
Figura 5.18 – Schematizzazione del sistema di raffreddamento.....	60
Figura 5.19 – Fotografia frontale del Chiller utilizzato	61
Figura 5.20 – Fotografia delle serpentine utilizzate.....	62
Figura 5.21 – Fotografia del sistema di raffreddamento fuori dal serbatoio	63
Figura 5.22 – Fotografia del sistema di raffreddamento all'interno del serbatoio.....	63
Figura 5.23 – Fotografia dello scarico con valvola a sfera	64
Figura 5.24 – Fotografia dello scarico con valvola a sfera	64
Figura 5.25 – Fotografia dell'impianto idraulico con le tubazioni di scarico in gomma...65	
Figura 5.26 – Fotografia dei recipienti utilizzati per il trasporto dell'acqua contaminata.65	
Figura 5.27 – Fotografia dei manometri utilizzati	66
Figura 5.27 – Fotografia del piezometro in funzione grazie alla valvola di scarico 3.....	67
Figura 5.29 – Fotografia del misuratore di portata	67
Figura 5.30 – Fotografia della strumentazione per il settaggio delle variabili e per la visualizzazione istantanea della portata	68
Figura 5.31 – Fotografia della termocoppia per la misurazione della temperatura	68
Figura 5.32 – Schematizzazione hardware DAQ.....	69
Figura 5.33 – Scheda acquisizione dati NATIONAL INSTRUMENT NI USB-6009.....	69
Figura 5.34 – Fotografia del quadro elettrico del circuito idraulico e degli strumenti di acquisizione.....	70
Figura 5.35 – Fotografia del cartellone informativo delle avvertenze.....	71
Figura 6.1 – Fotografia del circuito assemblato.....	73
Figura 6.2 – Guanti in nitrile.....	75

Figura 6.3 – Occhiali protettivi.....	75
Figura 6.4 – Sfiato della pompa idraulica.....	75
Figura 6.5 – Carica batterica di E. Coli	76
Figura 6.6 – Recipiente dei campioni prelevati	77
Figura 6.7 – Frigorifero dove vengono conservati i campioni.....	77
Figura 7.1 – Confronto colorimetrico tra comparatore e campione incubato.....	80
Figura 7.2 – Fluorescenza per individuazione degli E. Coli.....	81
Figura 7.3 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 16/12/2019	83
Figura 7.4 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 21/05/2020	84
Figura 7.5 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 11/02/2020	86
Figura 7.6 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 18/02/2020	87
Figura 7.7 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 25/02/2020	88
Figura 7.8 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 10/03/2020	89
Figura 7.9 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 11/03/2020	90
Figura 7.10 – Confronto grafico degli esperimenti con il numero di cav. pari a 0.2.....	91
Figura 7.11 – Confronto grafico degli esperimenti con il numero di cav. pari a 0.4.....	91
Figura 7.12 – Confronto grafico degli esperimenti con il numero di cav. pari a 0.7.....	92
Figura 7.13 – Fotografia della test section con piastra forata evidenziata.....	93
Figura 7.14 – Configurazioni idrodinamiche utilizzate dall'ingegner Caridi per la visualizzazione del campo di moto tramite P.I.V.	94
Figura 7.15 – Rappresentazione grafica dell'esperimento eseguito in data 11/06/2020 ...	95
Figura 7.16 – Rappresentazione grafica dell'esperimento eseguito in data 16/06/2020 ...	96
Figura 7.17 – Rappresentazione grafica dell'esperimento eseguito in data 18/06/2020 ...	97
Figura 7.19 – Rappresentazione grafica dell'esperimento eseguito in data 25/06/2020 ...	98
Figura 7.20 – Rappresentazione grafica dell'esperimento eseguito in data 01/07/2020 ...	99
Figura 7.21 – Confronto grafico tra il primo gruppo di esperimenti ed i risultati ottenuti da Burzio et al.....	101
Figura 7.22 – Confronto grafico tra il secondo gruppo di esperimenti ed i risultati ottenuti da Burzio et al.	103

Ringraziamenti

In queste prime pagine desidero esprimere i miei ringraziamenti ai professori Costantino Manes e Luca Ridolfi che hanno premesso la realizzazione di questo lavoro di tesi.

Nello specifico desidero ringraziare il professor Luca Ridolfi per avermi trasmesso l'interesse per una materia complessa quale l'idraulica grazie al suo entusiasmo espresso durante lo svolgimento delle lezioni.

Ringrazio il professor Costantino Manes che mi ha dato la possibilità di poter imparare come approcciarsi ad attività sperimentali e di mostrarmi come si debbano applicare i concetti teorici appresi durante il percorso di studi.

Un contributo prezioso, senza il quale non si sarebbe potuto svolgere la tesi, è stato fornito dagli Ingegneri Riccardo Vesipa, Roberta Davello, Edoardo Burzio e Giuseppe Caridi che mi hanno supportato nell'apprendere il metodo sperimentale, nell'apprendere il fenomeno fisico oggetto di studio, nella costruzione dell'impianto, nello svolgimento dell'analisi e nell'interpretazione dei risultati.

Vorrei dedicare quest'opera come segno di riconoscimento per il sostegno ricevuto alla mia famiglia, la quale mi ha sempre dato la serenità e la tranquillità nei momenti di difficoltà incontrati durante questo percorso di studi.

Desidero esprimere la mia gratitudine a tutti i parenti che mi sono stati vicini e mi hanno trasmesso spensieratezza. È un onore poter dire di far parte di questa fantastica grande famiglia che non ha mai fatto sentire la sua mancanza nonostante la notevole distanza.

Una dedica particolare va fatta a tutti gli amici con i quali ho potuto condividere esperienze, pensieri, gioie e dolori. Il merito di aver reso felici questi anni trascorsi a Torino è il loro.

Esprimo un ultimo ringraziamento alla società A.S.D Sermig che mi ha concesso di esprimere la mia passione per il futsal per diversi anni. L'attività sportiva espressa con questa società si è rivelata importante per il mio percorso di crescita come persona, e mi ha permesso di apprendere come un gruppo di persone sconosciute ma con una passione comune possa diventare un gruppo di compagni ed amici con i quali si condividono battaglie ed emozioni.

Abstract

Nonostante la Dichiarazione universale dei diritti umani riconosce il diritto all'acqua potabile come un'estensione del diritto alla vita e stabilisce l'imprescindibilità di tale risorsa senza discriminazioni, si stima che circa 1.2 miliardi di persone nel mondo non hanno accesso a fonti idrauliche pulite e che circa 2.4 miliardi di persone non possono usufruire di un adeguato sistema di sanificazione. Si valuta che circa cinque milioni di persone muoiono all'anno a causa di malattie derivanti da acque insalubri.

Attualmente i metodi più diffusi per potabilizzare l'acqua e renderla conforme al consumo umano sono di natura chimica. La scelta è dettata dalla semplicità dell'utilizzo, dalla velocità d'intervento e dalla sua economicità. Tuttavia, recenti studi hanno dimostrato che reazioni tra materiale organico ed agenti disinfettanti producono sottoprodotti di reazione cancerogeni alla salute umana, per cui sono state investite risorse nel ricercare tecniche di disinfezione dell'acqua basati su principi fisici. In questo contesto, la cavitazione idrodinamica è un processo fisico che può essere applicato, in quanto rilascia una notevole quantità energia e permette diverse reazioni chimiche che influiscono sulla distruzione cellulare degli agenti patogeni.

La cavitazione è il fenomeno fisico di formazione, crescita ed implosione di cavità in pochi microsecondi causata da una notevole caduta di pressione, al di sotto della tensione di vapore del liquido. Nella cavitazione idrodinamica la caduta di pressione è originata dal passaggio del fluido attraverso dei restringimenti quali piastre forate o tubi di venturi.

A causa della sua complessità, attualmente il fenomeno della cavitazione è stato descritto soltanto fisicamente, e tutte le pubblicazioni presentate trattano approcci empirici privi di un'analisi dimensionale. Si ha avuto una svolta a questa situazione soltanto nell'ultimo anno con la pubblicazione di Burzio et al. con l'articolo "*Water disinfection by orifice-induced hydrodynamic cavitation*" ad opera del Politecnico di Torino. L'articolo in questione fornisce un approccio empirico basato su un'analisi dimensionale, e permette di poter studiare il fenomeno della cavitazione ed i suoi effetti facendo cambiare un solo parametro idraulico adimensionale.

Sulla base di questa analisi, il lavoro di tesi si è occupato della costruzione dell'impianto cavitazionale, della valutazione dell'idoneità di tale impianto, della redazione di un protocollo sperimentale e dello studio della disinfezione con un reattore a piastra forata ad un foro di 4.5 mm di diametro. È stato scelto questo particolare reattore perché è già fornito di studi puramente idraulici eseguiti dall'ingegner Caridi, e sarà possibile correlare gli studi idraulici con gli effetti sulla disinfezione idraulica.

Questa tesi è stata svolta in collaborazione con la SMAT, la quale ha fornito le cariche batteriche e l'analisi batteriologica.

Capitolo 1

1. Disinfezione dell'acqua

1.1 L'importanza della disinfezione delle acque

Per disinfezione s'intende l'eliminazione di microrganismi patogeni presenti in acqua e potenzialmente dannosi per la salute umana. Questa definizione ha preso piede nel XX secolo, nel quale si è dimostrata una correlazione tra acque non potabili e la presenza di virus e batteri che inducono malattie epidemiologiche come tifo, colera ed epatite.

I primi trattamenti di cui si hanno diverse testimonianze scritte sono quelli riguardanti il riscaldamento dell'acqua. In India è presente un testo datato 2000 a.C., il quale afferma che *“allo scopo di depurare l'acqua è buona norma conservarla in recipienti di rame, esporla alla luce del sole e filtrarla attraverso carboni”*. Si hanno indicazioni simili anche in un testo scritto durante il VI secolo, il Sushruta Sanghita, nel quale è scritto *“l'acqua impura può essere purificata facendola bollire sul fuoco, scaldandola al sole o immergendo un ferro rovente al suo interno”*. Verso il XVII secolo vengono sviluppati i primi filtri. L'italiano Luca A. Porzo ha brevettato un filtro flottante da utilizzare nei corsi d'acqua ed un altro dedicato ai soldati che partecipavano alle campagne militari. Il francese Joseph Amy si dedicò alla realizzazione di un filtro destinato all'uso domestico. Un filtro capace di soddisfare il fabbisogno di un'intera cittadina è stato creato da John Gibb, in Scozia nel 1804. Uno schema è rappresentato dalla figura 1.1. La maggior parte di questi filtri prevedono unità di sedimentazione e filtri multipli in serie di sabbia e ghiaia.

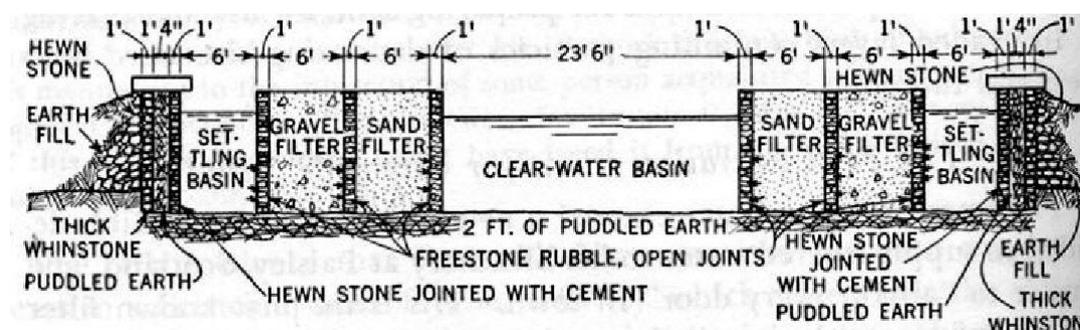


Figura 1.1 – Schema del filtro brevettato da John Gibb per soddisfare il fabbisogno della cittadina di Paisley.
(Fonte: M.N.Baker, *The Quest for Pure Water*)

Nonostante la scoperta dei batteri presenti nell'acqua risalisse al 1600, solo nel 1800 l'inglese John Snow scoprì e dimostrò la correlazione tra questi agenti patogeni e le malattie epidemiologiche, a seguito del colera che colpì la città di Londra nel 1854 che provocò più di 10000 decessi. Attraverso uno studio statistico, il medico elaborò una mappa della città di Londra, nella quale si mostra come l'incidenza del colera era più concentrata in prossimità del pozzo pubblico principale del quartiere di Soho, nel quale era presente acqua contaminata da pozzi neri. A seguito di questo studio si è compresa l'importanza della

disinfezione dell'acqua e sono state eseguite molte ricerche per prevenire la diffusione di malattie e migliorare la qualità dell'acqua. In particolare, nel Novecento si sono studiati trattamenti che impiegano l'utilizzo di disinfettanti, e negli anni Settanta fu scoperto che l'utilizzo di agenti chimici crea sottoprodotti nocivi per la salute dell'uomo, per cui sono stati introdotti dei limiti massimi accettabili nell'acqua potabile.

La problematica più importante dei nostri giorni è quella riguardante l'accesso all'acqua potabile da parte di tutta la popolazione mondiale, in quanto nei Paesi sottosviluppati ed in quelli in via di sviluppo è una delle principali cause di mortalità. Di fatto in questi Paesi, la mortalità causata da malattie che causano epidemie è riconducibile al mancato accesso all'acqua potabile. In queste aree si hanno circa 1.2 miliardi di persone che non hanno accesso all'acqua potabile, 2.4 miliardi di persone che non possiedono un adeguato sistema di sanificazione ed ogni anno muoiono circa 5 milioni di persone a causa di malattie trasmesse da acqua contaminata. I soggetti più a rischio sono anziani, bambini e persone con un sistema immunitario carente. In figura 1.2 viene mostrato l'utilizzo di acqua potabile nel mondo, e si può notare che nelle regioni del medio-oriente e dell'afrika centrale, dove sono presenti equilibri socio-politici precari, si ha una bassa percentuale di approvvigionamento.

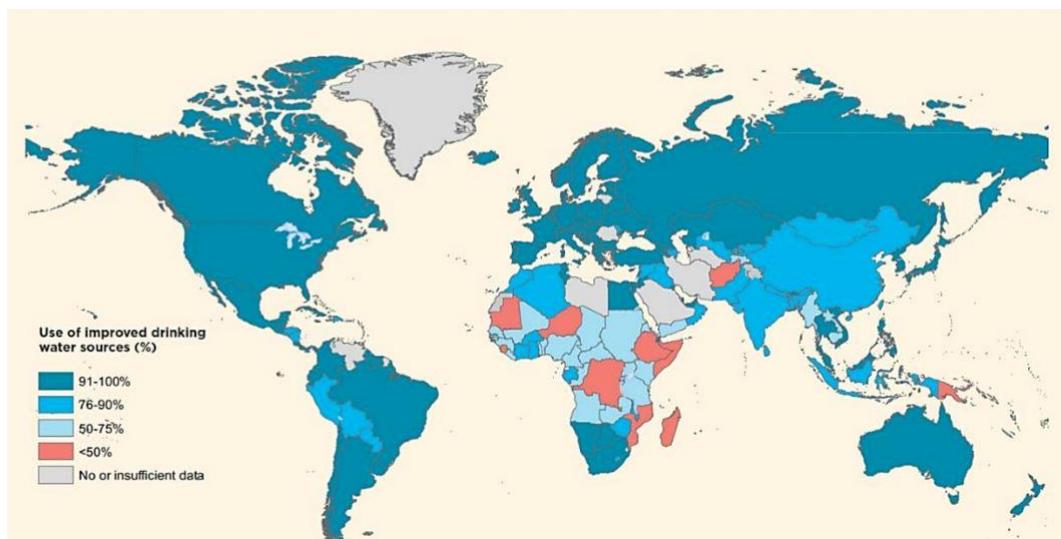


Figura 2.2 – Mappa riguardante l'utilizzo di acqua potabile. (Fonte: The United Nations World Water Development report 4)

Le cause di questa problematica sono perlopiù legate all'insufficienza economica per la costruzione di adeguate infrastrutture, all'essenza di un sistema sanitario basilare ed alla denutrizione, soprattutto infantile. È stato anche fatto presente come l'aspettativa di vita sia più alta nei Paesi sviluppati, dove queste questioni sono risolte per quasi la totalità della popolazione, a testimonianza del fatto che l'accesso ai servizi base sia necessaria per ridurre i tassi di mortalità.

Una soluzione per migliorare l'economia dei Paesi poveri è la realizzazione di sistemi fognari e acquedottistici adeguati, unita con un trattamento soddisfacente di potabilizzazione e di disinfezione delle acque, insieme ad un'educazione della popolazione all'alimentazione corretta ed all'igiene personale.

1.2 Microrganismi patogeni presenti nell'acqua

La conoscenza dei diversi microrganismi patogeni presenti nell'acqua è importante per comprendere come una persona possa contrarre malattie infettive e quali soluzioni si possano adottare per evitare di contrarle. I microrganismi possono essere catalogati in tre categorie ben distinte a seconda delle loro caratteristiche:

1. Batteri

Essi sono organismi unicellulari che possono essere presenti come batteri singoli o sottoforma di catene, fasci, coppie batteriche. Sono presenti sia in acque superficiali che freatiche ed hanno una lunghezza compresa tra 0.4 e 12 μm . Anche se non tutti i batteri sono nocivi per la salute dell'uomo, ci sono alcuni che possono causare malattie mortali quali colera e tifo.

2. Virus

Questi sono organismi presenti sotto forma di germoglio, sfera o striscia. Anche i virus sono presenti sia in acque freatiche che in acque superficiali, ed hanno una lunghezza compresa tra i 0.02 e 0.09 μm . Tutti i virus sono dannosi all'essere umano e possono causare infezioni. Si riproducono soltanto all'interno di cellule ospiti viventi e solitamente lascia il corpo attraverso le secrezioni, le quali possono contaminare l'acqua.

3. Protozoi parassita

Sono organismi unicellulari e si trovano in acque superficiali. Hanno un metabolismo complesso e si alimentano di sostanze nutrienti solide, alghe e batteri presenti in organismi multi-cellulari come gli animali.

L'uomo ha diverse probabilità di essere infettato a seconda del tipo di microrganismo patogeno è entrato in contatto, del modo in cui è trasferito, dalla quantità che è entrata nel corpo, dalla persistenza all'esposizione e dalla resistenza dell'ospite. L'infezione dell'agente patogeno non implica lo sviluppo della malattia. Nei soggetti infettati, si ha la riproduzione degli agenti patogeni e la diffusione del suo organismo si ha per mezzo del sistema circolatorio. La trasmissione dell'infezione tra i soggetti può avvenire tramite secrezioni, saliva, contatto con sangue infetto e deiezioni.

La contaminazione dell'acqua può avvenire tramite ruscellamento superficiale che entra in contatto con microorganismi presenti nelle feci. Tra i più comuni batteri fecali e nocivi di origine animale si hanno le Cisti di Giardia, le spore di Criptosporidio e l'E. Coli. In figura 1.3 si può vedere un'immagine del protozoo Giardia Lamblia.

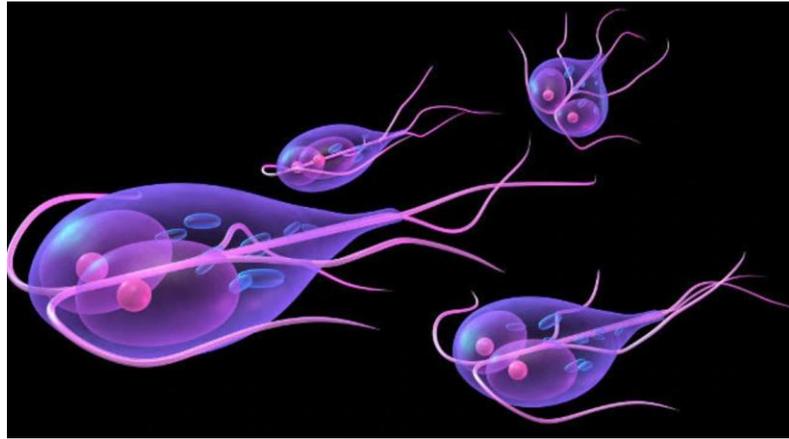


Figura 1.3 – Visualizzazione del protozoo Giardia Lamblia. (Fonte: <https://www.farmacocura.it/>)

Questi ultimi sono usati come indicatori della contaminazione delle acque, in quanto è stata messa in evidenza la correlazione tra l'elevata concentrazione di E. Coli e l'assenza di reti fognarie adeguate. Dal confronto della figura 1.2 con la 1.4 si può notare come la mappa di accesso all'acqua potabile e la tabella del numero di abitanti nei bassifondi delle metropoli rappresentano dati simili. Questo confronto è significativo in quanto in queste vaste aree non è presente un sistema fognario sufficientemente adeguato a smaltire le acque contaminate e di conseguenza l'incidenza di malattie infettive come quella da E. Coli è maggiore.

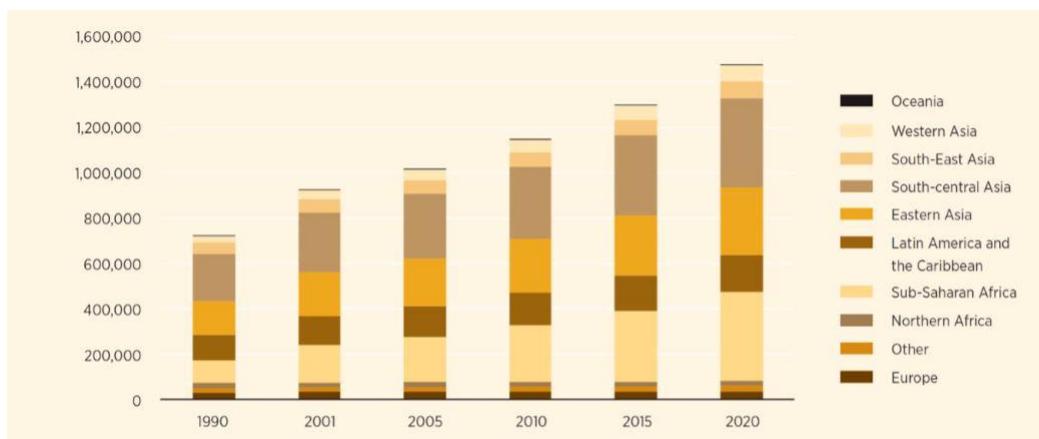


Figura 1.4 – Abitanti nei bassifondi delle metropoli. (Fonte: The United Nations World Water Development report 4)

Altri batteri patogeni e bio-indicatore della purezza dell'acqua sono quelli della Salmonella e del Campilobatterio presenti nelle feci dei polli.

Tra le malattie più letali che si possono contrarre attraverso acqua potabile contaminata si hanno la febbre da tifo, colera ed epatite A ed E. Queste malattie infettive rappresentano il maggiore rischio per la salute dell'uomo. La contaminazione di acqua potabile può anche indurre malattie meno letali come quelle gastrointestinali.

1.3 Escherichia Coli

Tra i diversi agenti patogeni presenti nell'acqua contaminata, la specie batterica Escherichia Coli attualmente è la più nota, in quanto è parte integrante della flora intestinale di molte specie animali a sangue caldo, compreso l'essere umano. Solo alcune specie di batteri appartenente al genere Escherichia sono nocive alla salute umana.

Questi organismi sono a forma di bastoncini e possiedono un'estremità tondeggiante, sono aerobici ed anaerobici facoltativi, non sono sporigeni, sono capsulati e possono produrre pericolose tossine. Sono organismi gram-negativi, cioè si colorano di rosa dopo aver subito una colorazione di Gram, con una sottile parete cellulare. Questi batteri sopravvivono a temperature comprese tra i 10 ed i 45 °C e possiedono numerose ciglia su tutto il corpo. Grazie a delle appendici allungate, il batterio è capace di muoversi. In figura 1.5 è possibile vedere una immagine di Escherichia coli al microscopio.

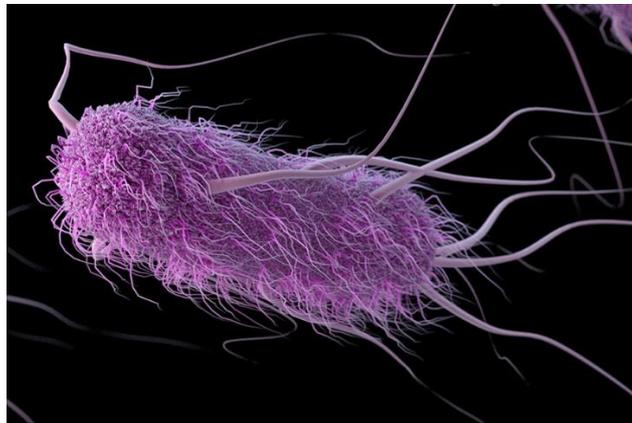


Figura 1.5 – Immagine di Escherichia Coli al microscopio. (Fonte: <https://www.igeasalute.com/>)

L'infezione da Escherichia Coli avviene principalmente da cibo ed acqua contaminata e producono sintomi come diarrea, nausea, vomito e crampi addominali. I soggetti più a rischio, bambini ed anziani, possono sviluppare un'insufficienza renale. Questo batterio è sensibile al calore, per cui i trattamenti con elevate temperature, come la cottura, e con biocidi, come la clorazione chimica, risultano efficaci alla loro uccisione.

Per essere più precisi, questi batteri possono provocare infezione alle vie urinarie, in particolare a quelle femminili, alla ghiandola prostatica, alla cistifellea, a delle ferite subite. Nei soggetti diabetici si possono avere l'infezione di questi batteri nei piedi o nelle piaghe da decubito; mentre nei soggetti più piccoli, come i neonati, l'infezione può scaturire polmoniti e meningiti. Si avrebbero infezioni da E. Coli anche se si dovesse avere una lacerazione dell'intestino, in quanto gli organi adiacenti non sono dotati di specifiche difese. La maggior parte di questi ceppi nocivi ed intestinali producono delle tossine che possono causare la diarrea, e possono essere efficacemente curati con antibiotici.

Non solo i Paesi in via di sviluppo sono soggetti ad infezioni da acqua e cibi contaminati. In America esistono più di 100 ceppi batterici di E. Coli enteromorragici che causano crampi addominali e diarrea, che può diventare emorragica. In alcuni casi questa infezione

si aggrava causando insufficienza renale ed uremia, ed è possibile anche avere dei decessi, in particolare nei soggetti più a rischio. Questi particolari batteri sono molto contagiosi ed i pazienti infetti devono essere isolati. Invece in Europa alcuni ceppi batterici di E. Coli, provenienti da deiezioni bovine, si sono trasmessi attraverso una falda acquifera utilizzata per irrigare i campi ed hanno causato diversi decessi.

Sulla base di tutte queste caratteristiche, nelle ricerche degli ultimi anni sulla disinfezione dell'acqua è stato scelto di eseguire esperimenti di disinfezione su queste specie batteriche, usato come indicatore di contaminazione, affinché si possano avere dei risultati confrontabili tra loro. Tuttavia, nonostante fossero stati usati gli stessi batteri, queste ricerche e sperimentazioni non sono confrontabili tra loro, in quanto non era stata fatta una completa analisi dimensionale, e si sono usati approcci che alterano più parametri contemporaneamente.

1.4 Definizione di disinfezione dell'acqua

La disinfezione dell'acqua si raggiunge nel momento in cui vengono uccisi, disattivati o rimossi i microrganismi patogeni, ponendo fine al loro sviluppo e riproduzione. L'utilizzo di acqua non disinfettata causa la proliferazione di malattie e lo sviluppo di epidemie. Per essere più precisi la disinfezione è l'utilizzo di agenti che uccidono germi e virus e distruggono la potenziale infettività del materiale, ed è solo uno dei tanti trattamenti che l'acqua subisce per diventare potabile.

L'acqua potabile, ovvero acqua priva di microrganismi patogeni e sostanze chimiche dannose per l'uomo, si ottiene a seguito di diversi trattamenti dell'acqua quali: disinfezione iniziale, coagulazione, flocculazione, sedimentazione, filtrazione, disinfezione finale.

La disinfezione più comune si ha per mezzo della corrosione della parete cellulare che si ottiene a seguito dei cambiamenti di permeabilità delle cellule. Questo è possibile in quanto l'alterazione della parete cellulare inibisce la riproduzione degli agenti patogeni. Un altro possibile meccanismo è la demolizione di materia organica presente nell'acqua che induce una mancanza di sostanze nutrienti vitali per la sopravvivenza dei microrganismi. Questo secondo meccanismo si ottiene a seguito di un trattamento con disinfettanti ossidanti.

1.5 Trattamento delle acque

Durante il suo ciclo idrologico, nell'acqua si dissolvono una vasta varietà di sostanze organiche e inorganiche, e la sua varietà dipende dal percorso che l'acqua stessa ha seguito. A causa degli scarti industriali ed agricoli che si sono creati nel corso degli ultimi anni, nell'acqua oltre alla presenza di materia organica, inorganica e minerali, c'è anche la presenza di numerosi agenti inquinanti e nocivi alla salute dell'uomo. Nonostante gli strati del terreno che l'acqua attraversa fungano da filtro, questa azione non è sufficiente a rendere l'acqua conforme all'utilizzo umano, perciò le acque reflue devono essere trattate prima di essere scaricate in un qualunque corpo recettore. Per quanto sia importante trattare

le acque reflue, questo non è sufficiente, ed è indispensabile far seguire all'acqua un ciclo di potabilizzazione che si articola nelle fasi precedentemente elencate, quali: disinfezione iniziale, coagulazione, flocculazione, sedimentazione, filtrazione, disinfezione finale. La scelta dei diversi trattamenti da applicare dipende dalla qualità e composizione dell'acqua. Questi trattamenti si pongono due diversi obiettivi: la rimozione fisica di particelle solide e la disinfezione chimica del materiale organico patogeno.

La rimozione fisica è il primo obiettivo da raggiungere, questo perché le particelle disciolte in acqua hanno la capacità di fungere da substrato per i microrganismi, e di reagire con i disinfettanti, creando così dei sottoprodotti. Per questo motivo la concentrazione di particelle galleggianti non può superare 1 mg/l. Raggiunto tale scopo, è possibile eseguire una disinfezione ottimale rendendo l'acqua potabile. La disinfezione può essere sia fisica che chimica, e nel caso ci dovessero essere disciolte molte particelle chimiche è necessario utilizzare una quantità di disinfettante molto più elevata rispetto agli standard usuali.

Di seguito verranno brevemente descritte le due modalità di disinfezione.

1.5.1 Disinfezione per mezzo di sostanze chimiche

L'utilizzo di sostanze chimiche è la tecnica più comune per disinfettare l'acqua. La scelta del disinfettante non è soltanto dettata dalle sostanze presenti nell'acqua, ma anche dalle diverse disponibilità dei Paesi. Esistono due gruppi di sostanze chimiche antibatteriche: ossidanti e non ossidanti, e l'efficacia dei disinfettanti varia a seconda del tasso di diffusione dell'agente attivo all'interno della parete cellulare dei batteri. Tra le sostanze ossidanti sono presenti il cloro, il cloroammone, il diossido di cloro, l'ozono ed il bromuro; mentre tra quelle non ossidanti sono presenti la formaldeide, gli isocianati, i fenoli clorurati ed i solfuri organici. Di seguito verrà riportata una breve descrizione delle principali sostanze adoperate nella disinfezione a scopo di potabilizzazione. Una trattazione più ampia è stata eseguita nella tesi di Garogano in *“Metodi innovativi per la disinfezione dell'acqua: utilizzo della cavitazione idrodinamica”*.

1. Cloro

Grazie alla particolare efficacia contro i microrganismi patogeni ed al suo basso costo, l'utilizzo del cloro è una delle sostanze chimiche più diffuse nella disinfezione, non solo per scopi di potabilizzazione, ma anche per altri scopi. L'uccisione degli agenti patogeni avviene per mezzo della rottura dei legami chimici delle loro molecole. Il cloro disciolto in acqua forma acido ipocloroso, ed in base al pH, una parte di questo acido si trasforma in ioni ipoclorito, che si scindono in ioni di cloro ed ossigeno. Inoltre, l'acido ipocloroso si può scindere in acido cloridrico ed ossigeno atomico. La parete cellulare dei microrganismi patogeni è di carica negativa, per cui può essere penetrata da tutte le molecole neutre che formano la dissoluzione del cloro in acqua. Il cloro libero e l'ossigeno che si formano durante le reazioni precedentemente elencate hanno un notevole potere disinfettante. La disinfezione con cloro è particolarmente efficace se il pH

dell'acqua è compreso tra 5.5 e 7.5, in quanto si ha una formazione maggiore di acido ipocloridrico che reagisce più velocemente rispetto agli ioni ipoclorito. All'aumentare del pH diminuisce il livello di acido ipocloridrico.

2. Ipoclorito di sodio e Cloroammine

Anche l'ipoclorito di sodio viene impiegato con successo per disinfettare l'acqua. L'ipoclorito di sodio, reagendo con l'acqua, forma acido ipocloroso, il quale a sua volta si scinde in acido ipocloridrico ed ossigeno. Anche in questo caso bisogna fare le stesse considerazioni fatte per la disinfezione attraverso l'utilizzo di cloro, in quanto la disinfezione avviene grazie alla formazione di ossigeno che è di carica neutra.

Nel caso delle cloroammine, la disinfezione avviene attraverso la reazione con gli amminoacidi del DNA batterico. Per questo motivo, nonostante anche le cloroammine siano ossidanti come il cloro, il meccanismo di reazione è più lento ed il valore del pH non influisce sull'efficacia del trattamento.

3. Diossido di cloro

Il diossido di cloro, grazie alla sua elevata solubilità in acqua, che lo rende efficace anche a basse concentrazioni, è una sostanza molto diffusa per la disinfezione. Di fatto questo gas restando disciolto, risulta più efficace di circa 10 volte rispetto al cloro. La reazione tra il diossido di cloro e le sostanze organiche quali amminoacidi ed RNA, inibisce molti processi cellulari. Per la riduzione di materia organica sono necessari 0.5÷2 mg/l di diossido di cloro, mentre per la post disinfezione è necessaria una concentrazione 0.2÷0.4 mg/l. La concentrazione dei sottoprodotti che derivano da queste reazioni è molto bassa, per cui non sussistono pericoli per la salute umana, rendendo il diossido di cloro questa una valida alternativa alle altre sostanze.

4. Ozono

L'ozono disinfetta l'acqua dai microrganismi per mezzo della lisi, ovvero un meccanismo per cui si danneggia la membrana cellulare. Questo meccanismo è possibile grazie all'elevato potenziale di ossidazione. Di fatto quando l'ozono entra nelle cellule, vengono ossidate tutte le loro componenti essenziali come enzimi, proteine, DNA, RNA, e la membrana cellulare si danneggia.

5. Perossido d'idrogeno, perossone ed acido paracetico

Il perossido d'idrogeno è una sostanza che reagisce molto velocemente e consiste nella sua dissociazione in idrogeno ed acqua, non creando alcun sottoprodotto. Attraverso il rilascio dei radicali liberi di ossigeno, che ossidano e disinfettano, gli inquinanti organici vengono decomposti. È una metodologia di disinfezione molto usata negli Stati Uniti.

Il perossone è una miscela di perossido d'idrogeno ed ozono. Utilizzando questa miscela si ha la formazione di idroradicali, particelle molto resistenti che reagiscono o ossidano molte sostanze organiche inquinanti.

L'acido paracetico è una miscela di acido acetico e di perossido d'idrogeno. La disinfezione avviene attraverso l'ossidazione delle membrane esterne delle cellule mediante il trasferimento di elettroni.

6. Ionizzazione rame-argento

Per disinfettare l'acqua, metalli come rame ed argento sono usati in forma ionizzata, di carica positiva. Gli ioni rame formano composti elettrostatici con le pareti cellulari dei microrganismi, alterando così la permeabilità di quest'ultime e facendo cessare l'assorbimento dei nutrienti. A seguito di queste reazioni, si ha l'entrata degli ioni argento, anch'essi di carica positiva, che penetrano nel nucleo e si legano alle varie parti dei microrganismi quali DNA, RNA, enzimi e proteine. La creazione di questi ulteriori legami provoca la morte dei microrganismi patogeni presenti nell'acqua.

L'utilizzo di sostanze chimiche si ha da oltre un secolo, ma solo dagli anni Settanta si è scoperta formazione di sottoprodotti che possono essere nocivi per la salute umana. Questi sottoprodotti sono sostanze organiche e inorganiche che si hanno a causa del rilascio di acido umico ed acido fulvico. Il meccanismo di formazione di queste sostanze non è molto chiaro, per cui è ancora un ambito di ricerca. I principali sottoprodotti derivanti dall'utilizzo di sostanze chimiche per la disinfezione dell'acqua sono riportati in tabella 1.1.

Tabella 1.1 – Sottoprodotti dall'utilizzo di sostanze chimiche per la disinfezione dell'acqua potabile.

Disinfettante	Sottoprodotti di disinfezione organoalogenici	Sottoprodotti di disinfezione inorganici	Sottoprodotti di disinfezione non – alogenici
<i>Cloro o acido ipocloroso</i>	Triometani Acidi acetici alogenici Aloacetoni nitrili Cloro idrato Cloropicrina Clorofenoli N-Cloroammine Alofuranoni Bromidrine	Clorati	Aldeidi Acidi alcanici Benzene Acidi carbossilici
<i>Diossido di Cloro</i>	\	Clorito Clorato	\
<i>Cloroammine</i>	Aloacetoni nitrili Ciano Clorina Cloroammine organiche Cloramino acidi Cloroidrati Alochetoni	Nitrito Nitrato Clorato Idrazina	Aldeidi Chetoni
<i>Ozono</i>	Bromoformio Monobromina acido acetica Dibromina acido acetica Dibromina acetone Ciano bromina	Clorato Iodato Bromato Perossido di idrogeno Acido ipobromoso Epossidi Ozonati	Aldeidi Chetoni Chetoacidi Acidi carbossilici

La tipologia e la quantità di sottoprodotti dipendono dalla tipologia di disinfettante usato, dalla dose immessa, dal residuo di disinfezione che si ottiene e dalle condizioni in cui si esegue la disinfezione quali temperatura, tempo di reazione e pH.

Dagli anni Novanta sono state effettuate diverse ricerche sugli effetti che i sottoprodotti derivanti dalla disinfezione di acqua potabile hanno sull'uomo. Si è potuto scoprire come il Trialometani, il principale sottoprodotto della clorificazione, è cancerogeno ed è bioaccumulativo, cioè l'organismo non smaltisce abbastanza velocemente questa sostanza e si accumula nel tempo dentro i tessuti. Diversi studi hanno evidenziato una correlazione tra l'esposizione ai sottoprodotti della disinfezione chimica ed i tumori alla prostata, alla vescica, ai reni, all'intestino ed all'ano. Per questo motivo le principali istituzioni della salute mondiale hanno imposto dei limiti legislativi a tali sottoprodotti per tutelare il benessere della persona. Tuttavia, i rischi per salute dell'uomo derivante dall'esposizione di queste sostanze sono notevolmente inferiori se paragonati ai rischi derivanti dall'utilizzo di acqua non sufficientemente trattata. Ancora oggi sono presenti ambiti di ricerca che hanno come oggetto la comprensione degli effetti di altri sottoprodotti che la disinfezione chimica crea.

1.5.2 Disinfezione per mezzo di metodi sfruttanti principi fisici

In alternativa all'utilizzo di sostanze chimiche, è possibile effettuare una disinfezione soddisfacente utilizzando metodi che sfruttano principi fisici, che hanno il vantaggio di non formare sottoprodotti. Le tecniche più comuni sono quelle che sfruttano il principio della cavitazione e l'irradiazione di raggi ultravioletti.

La disinfezione per mezzo di irradiazione di raggi ultravioletti sfrutta una radiazione, che possiede una lunghezza d'onda tra i 240 ed i 280 nm, che altera DNA ed RNA e distrugge l'informazione genetica dei microrganismi patogeni. I virus e batteri, a seguito di questa alterazione non sono più in grado di riprodursi. A differenza dell'utilizzo di agenti chimici, questa tecnica è efficace per una gamma più ampia di agenti patogeni ed inoltre è capace di eliminare il cloro e la cloroammine presenti nell'acqua. Di contro, utilizzando questa metodologia, non è possibile rimuovere i composti e le particelle presenti nell'acqua, per cui tale processo viene usato in modo complementare ad altre tecniche per avere una disinfezione di alto livello. Con la nascita di diverse tecniche di disinfezione che prevedono l'utilizzo di raggi ultravioletti, il loro costo è diminuito e molti Stati hanno adottato regolamenti che permettono la fornitura di acqua potabile ottenuta sfruttando questo principio.

La disinfezione per mezzo della cavitazione sarà trattata nel capitolo successivo.

Capitolo 2

2. Cavitazione

Fino alla pubblicazione di Prandit e Joshi del 1993 “*Hydrolysis of fatty oils: effect of cavitation*”, la cavitazione era un fenomeno idraulico conosciuto per i danni che procura alle macchine idrauliche come giranti, eliche o sistemi di propulsione, e la maggior parte degli studi era incentrata su come evitare l’insorgenza di tale fenomeno. La cavitazione si crea ad alte velocità di rotazione, nel momento in cui la velocità periferica delle pale è talmente elevata da causarne una vaporizzazione dell’acqua circostante a causa del crollo di pressione. A seguito della vaporizzazione si ottiene una formazione di bolle, le quali, nel momento in cui vengono ripristinate le ordinarie condizioni di pressione, implodono, causando potenti onde d’urto e picchi locali di pressione e temperatura. Una lunga esposizione dei sistemi idraulici a queste particolari condizioni origina i danni per cui è diventato noto tale fenomeno.

A seguito della pubblicazione prima citata, l’oggetto di studio è cambiato, e si è appreso come sfruttare l’energia rilasciata dall’implosione delle bolle per agevolare i processi chimici, fisici o biologici desiderati. L’applicazione di questo fenomeno ha permesso lo sviluppo di nuove tecniche con una migliore efficienza energetica, permettendo così una riduzione dei costi di elaborazione dei processi voluti.

Processi fisici come la formazione di nanoparticelle, la sintesi di nanoemulsioni, la disinfezione e la disgregazione microbica sono incrementati dagli effetti meccanici e fisici della cavitazione. I processi chimici come disgregazione degli organismi cellulari e sintesi di composti sono incrementati dagli effetti chimici che si hanno a seguito del rilascio di radicali liberi altamente reattivi.

Notate le varie possibilità d’indurre la distruzione cellulare, sempre più ricerche sono incentrate sulla disinfezione dell’acqua a scopo di potabilizzazione, mediante l’utilizzo di una combinazione di cavitazione e disinfettanti chimici, e sulla valutazione quantitativa dell’efficacia germicida su sospensioni acquose di batteri.

2.1 Descrizione del fenomeno

In un liquido in pressione, l’abbassamento locale di pressione fino al di sotto della tensione di vapore del liquido da origine ad un cambiamento di fase, creando delle cavità sferico-toroidali che contengono vapore. Un successivo recupero di pressione causa l’implosione di queste cavità e si ha un notevole rilascio d’energia sotto forma di calore, pressione e turbolenze locali. La cavitazione è definita come il susseguirsi dei fenomeni appena descritti. È un fenomeno simile all’ebollizione, nella quale si ha la formazione di bolle meccanicamente stabili a seguito dell’aumento della tensione di vapore che supera la

pressione del liquido. L'aumento della tensione di vapore è determinato dall'innalzamento della temperatura. Nella cavitazione, a differenza dell'ebollizione, è l'abbassamento della pressione fino al di sotto della tensione di vapore a causare la formazione delle bolle, in quanto la temperatura non subisce alterazioni. Le bolle subiscono due trasformazioni: un aumento di dimensione, favorita dall'abbassamento di pressione; e l'implosione della bolla dettata dal ripristino delle condizioni di pressione originarie.

Sono note diverse metodologie per indurre tali eventi, e le più conosciute per indurre cambiamenti chimici e fisici sono la cavitazione idrodinamica e la cavitazione acustica; mentre altre tecniche per indurre la cavitazione, non sono sufficienti per avere cambiamenti rilevanti.

La cavitazione acustica si genera attraversando il liquido con onde ad ultrasuoni, cioè onde sonore con una frequenza maggiore di 20 Hz, che causano variazioni di pressione. La trasmissione delle onde sonore nel mezzo liquido crea dei cicli d'espansione e di compressione, ed anch'essi attraversano il mezzo liquido. Durante la fase d'espansione si genera una pressione negativa, che causa l'aumento della distanza intermolecolare, e nel momento in cui viene superata una distanza critica, si ha la formazione delle bolle. Successivamente, durante la fase di compressione, la pressione positiva tende a far avvicinare le bolle che si sono create precedentemente, comprimendole, e portandole ad un violento collasso. La fase di collasso è adiabatica, per cui si hanno locali punti ad alta temperatura ed alta pressione.

La cavitazione idrodinamica si ottiene facendo scorrere il liquido attraverso una costrizione, chiamata reattore cavitazionale. Il reattore può avere varie caratteristiche geometriche e fisiche e i più diffusi sono gli orifizi, le piastre multiforate ed i tubi di venturi. Il passaggio per il reattore è la causa della diminuzione di pressione. Esistono anche altri dispositivi, come gli omogeneizzatori, per creare la cavitazione, ma l'elevato dispendio energetico ne impedisce la vasta applicazione.

Il rilascio dell'energia che si ha a seguito dell'implosione delle bolle, da origine a delle regioni, definite "hot spot", nelle quali la temperatura raggiunge i $1000 \div 10000$ K, e la pressione raggiunge i $100 \div 1000$ bar. I fenomeni cavitazionali possono essere stabili o transitori. Se la cavitazione è stabile, si hanno cavità di bassa intensità che oscillano tra alcune posizioni di equilibrio per numerose volte. Se la cavitazione è transitoria, si ha un'espansione delle bolle rispetto alle loro dimensioni iniziali, ed il crollo che ne segue è più violento e oscilla più rapidamente rispetto alla cavitazione stabile.

La cavitazione acustica, che è stata ampiamente studiata, produce un numero elevato di cavità transitorie, e quindi i collassi hanno un'intensità superiore rispetto a quella idrodinamica. Invece, la cavitazione idrodinamica produce una quantità maggiore di cavità, anche se di natura stabile. I risultati più soddisfacenti sono ottenuti cecando di produrre entrambe le cavitazioni simultaneamente ed in modo controllato, ed è possibile ottenerle

nella cavitazione idrodinamica, utilizzando reattori con precise configurazioni geometriche.

2.2 Effetti della cavitazione

Come descritto in precedenza, la cavitazione causa l'aumento locale della pressione e della temperatura, e la creazione di onde d'urto, microgetti, turbolenza ed attrito, le quali provocano tensioni superficiali localizzate molto intense. La ripetizione di questi effetti sulle superfici delle componenti meccaniche idrauliche causa il classico danneggiamento che si è sempre voluto evitare nel corso degli anni. Di fatto la cavitazione è un fenomeno noto soprattutto a causa dei danneggiamenti che crea agli organi meccanici degli impianti idraulici. In figura 2.1 e 2.2 si riportano delle fotografie di danni alle giranti provocati da cavitazione.



Figura 2.1 e 2.2 – Fotografie di danni alle giranti provocati da cavitazione.

Però negli ultimi anni, a seguito di studi più accurati del fenomeno, lo si è potuto utilizzare per l'applicazione di vari processi chimici e fisici, quali la sintesi di nanoparticelle, la nanoemulsificazione, la polimerizzazione di emulsioni, l'estrazione, la lisciviazione, il trattamento delle acque reflue, la depurazione e la disinfezione.

2.3 Dinamica della bolla

Per comprendere a pieno il fenomeno della cavitazione, bisogna sempre tenere a mente la complessità dello stesso, dettata dalle notevoli variabili che lo controllano e dalla difficoltà di controllarle. Le condizioni necessarie, affinché la cavitazione si manifesti, sono tre: la presenza di nuclei, bolle di gas o i vuoti, all'interno del sistema; la caduta di pressione tale da essere al di sotto della propria pressione di vapore saturo; pressione ambientale attorno alle cavità maggiore della pressione di vapore saturo. Un aiuto per apprezzare la complessità è necessario approfondire la dinamica della bolla, la quale, come già descritto in precedenza, si articola in tre fasi: la formazione, la crescita ed il collasso. In figura 2.3 si riporta una schematizzazione semplificata delle tre fasi.

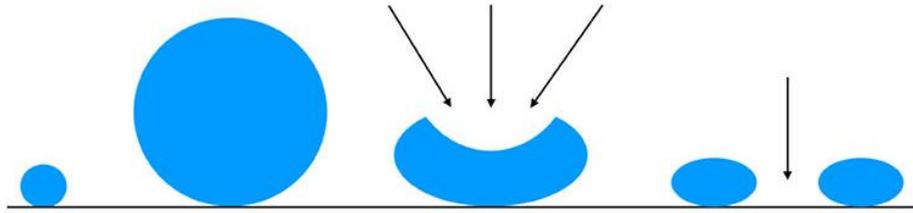


Figura 2.3 – Schematizzazione della dinamica della bolla. (Fonte: <https://www.asvstube.it>)

2.3.1 Formazione

La formazione delle bolle è possibile solo se nel liquido sono presenti nuclei di cavitazione, cioè delle bolle o dei vuoti, i quali sono legati alla normale aerazione della sostanza, alla presenza di contaminanti ed impurità, ed alla rugosità delle tubazioni. Se nel mezzo liquido i nuclei di cavitazione dovessero essere assenti, non si verificherebbero fenomeni come l'ebollizione e la cavitazione, dato che la pressione non potrebbe scendere al di sotto della pressione di vapore saturo. In condizioni ordinarie l'acqua possiede una quantità sufficiente di nuclei per la formazione delle bolle nel momento in cui la pressione scende al di sotto della pressione di vapore saturo. Le dimensioni e le quantità di nuclei sono influenzate dai diversi trattamenti che il liquido ha subito, e dalle condotte in cui ha viaggiato, infatti è possibile controllare queste caratteristiche se l'acqua viene fatta circolare in un sistema di pompaggio chiuso adeguato. Altri fattori importanti che caratterizzano la formazione delle bolle sono le condizioni operative del liquido ed il funzionamento dell'impianto.

Concentrandosi sulle sole caratteristiche del liquido si possono distinguere la cavitazione vaporosa e la cavitazione gassosa.

Nella cavitazione vaporosa la formazione delle bolle è dovuta all'evaporazione del liquido all'interno delle cavità, mentre nella cavitazione gassosa la formazione è dovuta alla diffusione del gas disciolto nel liquido.

La condizione di equilibrio della bolla è l'uguaglianza tra la pressione critica esterna e la tensione di vapore sommata a quattro volte della tensione superficiale diviso il diametro. Per bolle piccole questa differenza dovrebbe essere marcata, ma a causa delle impurezze gassose disciolte nel liquido, questo non si verifica e le bolle di gas possono intrappolarsi nella rugosità della parete. La descrizione di pressione critica data è solo fisica, e numericamente viene valutata sperimentalmente, dato che la stima precisa delle impurità e delle irregolarità delle pareti è impossibile.

Oltre alla presenza dei nuclei, per avere la formazione di bolle, è necessario che la pressione locale scenda al di sotto della tensione di vapore saturo. La pressione locale è data dalla somma di una pressione media, uniforme in una certa regione di fluido, ed una dinamica legata al moto del fluido ed alla formazione di vortici. È possibile controllare la pressione media agendo sull'elevazione, sulla sezione della condotta ed analizzando le perdite localizzate che si hanno lungo il percorso. Per avere la cavitazione in un tubo di venturi ben

progettato, bisognerebbe far scendere la pressione media al di sotto della tensione di vapore saturo, in quanto non si ha un distacco della vena liquida e le turbolenze risultano basse, così come anche le pressioni dinamiche. Tuttavia, è sempre presente uno strato lungo cui si genera la turbolenza, e la cavitazione inizierà al centro di tale strato, dentro piccoli vortici, nei quali la pressione locale è inferiore rispetto a quella media del sistema.

2.3.2 Crescita

Un esempio più adeguato per comprendere la crescita delle bolle è quello riguardante un flusso che attraversa un restringimento localizzato, di cui si può avere una schematizzazione dei carichi in figura 2.4.

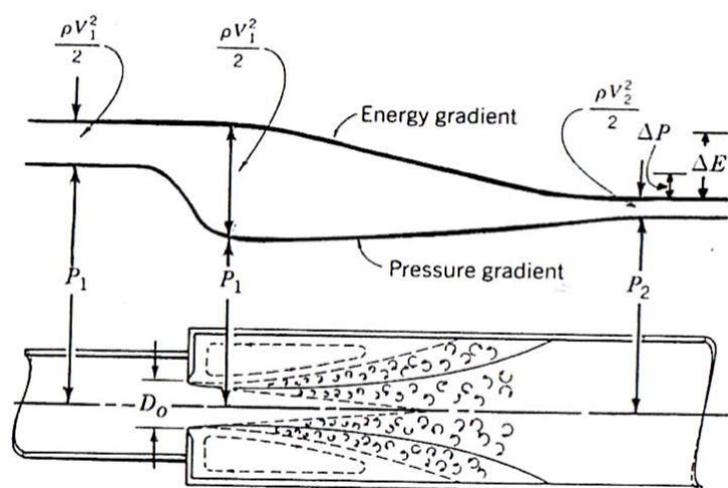


Figura 2.4 – Schema dei carichi di un flusso che attraversa un restringimento. (Fonte: Tullis, 2017)

Nelle sezioni a monte del restringimento si ha una bassa velocità ed un'alta pressione ed in corrispondenza del restringimento si ha una caduta di pressione a causa del notevole aumento della velocità. Dopo il restringimento, il getto si riallarga e si viene a creare uno strato di taglio, con un alto gradiente di velocità, tra il getto e la regione di separazione. Come si può notare nella figura 2.4, a causa di questo gradiente di velocità, si ha la creazione di vortici. Nei vortici, dove si ha un'alta velocità rotazionale, la pressione è minore rispetto a quella che si ha nel getto. Nel momento in cui il nucleo viene intrappolato nei vortici, dove la pressione scende fino al valore di tensione di vapore saturo, si ha una crescita nelle bolle. Un aspetto importante è dato dal tempo in cui il nucleo si trova ad una pressione vicina a quella di tensione di vapore saturo. Di fatto, la bolla deve avere una pressione bassa fintanto che raggiunge il diametro critico, altrimenti non evolve in un evento cavitazionale.

2.3.3 Collasso

Sia nel caso del restringimento, che nel caso del tubo di venturi, a valle di queste due variazioni di sezione, si ha un recupero della pressione, e le bolle subiscono una compressione e quindi implodono. La pressione della bolla è in equilibrio con la tensione di vapore saturo, per cui non appena si ha il recupero della pressione esterna, la bolla implode violentemente. Il recupero della pressione locale può avvenire grazie alla distanza, come nel Venturi, grazie alla dissipazione energetica nei vortici, come negli orifizi, oppure grazie alla diffusione del getto. Nelle zone di cavitazione si hanno temperature di collasso delle bolle attorno ai valori di $5000 \div 10000$ K, e si hanno pressioni di circa 300 atm.

Nelle zone di cavitazione, il collasso della bolla non è l'unica possibilità. La bolla può unirsi ad un'altra bolla, può continuare ad accrescere le sue dimensioni, oppure può frammentarsi in bolle più piccole. I precedenti destini descritti prendono i rispettivi nomi di coalescenza, diffusione rettificata e degassaggio. Nelle figure 2.5, 2.6 e 2.7 si riportano due esempi fotografici di collasso e coalescenza, ed una schematizzazione di degassaggio.

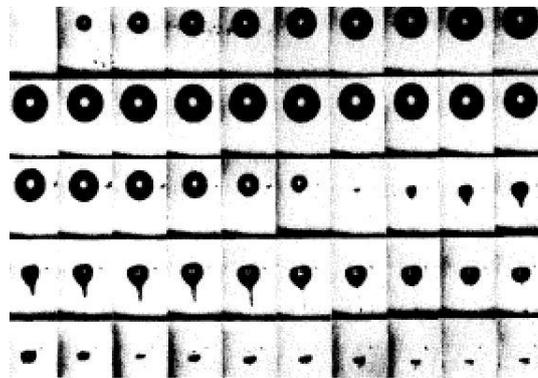


Figura 2.5 – Sequenza di fotogrammi di un'implosione di una bolla. (Fonte: Lauterborn et al., 1985)

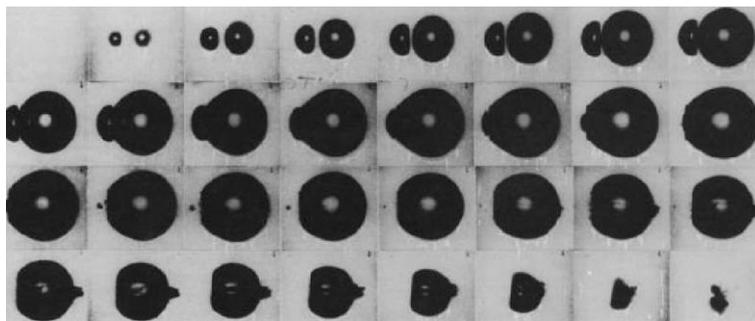


Figura 2.6 – Sequenza di fotogrammi di coalescenza di due bolle. (Fonte: Lauterborn et al., 1985)



Figura 2.7 – Schematizzazione di degassaggio di una bolla. (Fonte: Frost e Sturtevant, 1986)

2.4 Numero di cavitazione

Durante l'analisi fisica della dinamica della bolla si è potuto precisare che il collasso della bolla non è l'unico destino possibile. È possibile quantificare la probabilità che si sviluppi la cavitazione con il numero di cavitazione. Questo numero rappresenta le caratteristiche idrauliche di un dispositivo cavitante, ed è il rapporto tra il cambiamento di pressione e l'energia cinetica. Il numeratore identifica le forze che sopprimono la cavitazione, mentre il denominatore le forze che lo causano. Infatti, l'inizio della cavitazione si ha quando tale valore raggiunge l'unità, e gli effetti cavitazionali diventano più significativi al diminuire di tale valore. Il numero adimensionale di cavitazione viene così definito:

$$\sigma_v = \frac{p_2 - p_v}{0.5\rho v_0^2}$$

Dove:

- σ_v è il numero di cavitazione [-];
- p_2 è la pressione a valle del restringimento [bar];
- p_v è la pressione di vapore del liquido [bar];
- v_0 è la velocità nel restringimento [m/s];
- ρ è la densità del liquido [kg/m³].

Siccome non esiste una soluzione analitica al problema della cavitazione, alcuni fenomeni fisici come rumore, vibrazioni, erosione di pareti solide e perdita di efficienza, sono monitorati per poter quantificare più precisamente la cavitazione. Le vibrazioni della parete della condotta dell'impianto idraulico generate dalla cavitazione sono direttamente proporzionali alla cavitazione, per cui è stato impiegato l'utilizzo degli accelerometri per quantificare l'intensità del fenomeno e correlarla al numero di cavitazione. In figura 2.8 si può vedere un grafico che mostra la correlazione tra le due variabili descritte.

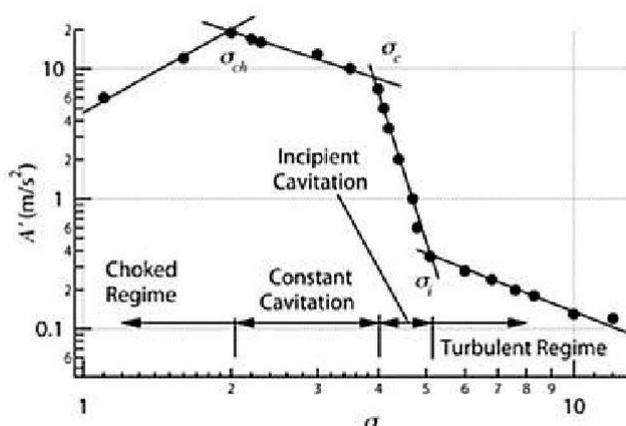


Figura 2.8 – Andamento del numero di cavitazione in funzione della vibrazione delle pareti della condotta.
(Fonte: Maynes et al., 2013)

In questo grafico si possono notare quattro zone ed è conveniente descriverle partendo da destra. Nella prima parte, quella di regime turbolento, non si ha cavitazione, e le accelerazioni sono frutto dell'elevata velocità del flusso e del regime turbolento. In quella

successiva, d'incipiente cavitazione, l'accelerazione aumenta in modo considerevole, e la cavitazione si manifesta solo ad intermittenza. A seguito si ha un regime di cavitazione costante, ed il flusso è completamente cavitazionale. Per finire si ha il "*Choked Regime*", nel quale il flusso viene soffocato, e la cavitazione si manifesta più lontano da dove ha origine. Si può notare come in questo grafico i vari valori di riferimento si riferiscono a quando i diversi regimi iniziano a manifestarsi.

2.5 Classificazione della cavitazione

Può essere utile presentare la cavitazione secondo due criteri: il primo, in funzione dell'energia richiesta per la generazione dei diversi regimi, ed il secondo incentrato sulla tecnologia cavitazionale.

2.5.1 I regimi cavitazionali

I regimi cavitazionali, su cui si basa la prima classificazione, sono tre.

Il primo regime, la cavitazione transitoria, è caratterizzato da un meccanismo di collasso molto violento e veloce, il quale è accompagnato dalla generazione di onde d'urto localizzate e di specie chimiche reattive. Il collasso, ovvero il momento in cui il gas all'interno delle bolle si dissipa nel liquido circostante, rilascia molta energia, causando la sono-luminescenza e l'aumento della temperatura, fino alle migliaia di kelvin, e della pressione, fino alle centinaia di atmosfere.

Il secondo regime, la cavitazione stabile, è caratterizzato dall'oscillazione della dimensione e della forma di piccole bolle, per via della fluttuazione del campo di pressione. Si ha il collasso nel momento in cui l'energia in ingresso diventa insufficiente, il quale è meno violento rispetto al caso precedente. Le oscillazioni volumetriche della bolla causano un flusso, il microstreaming, che possiede uno sforzo di taglio capace di distruggere la membrana cellulare di un agente patogeno.

L'ultimo regime, la supercavitazione, si ottiene se nel sistema viene introdotta una quantità d'energia elevata. In questo regime il numero delle bolle, così come la loro dimensione, aumenta notevolmente, e la fase di vaporizzazione è dominante rispetto al collasso. La maggiore densità di bolle favorisce la coalescenza delle cavità, causando così un'ulteriore crescita delle bolle. Il flusso che si viene a creare a valle dell'orifizio è diviso in tre regioni: nella prima si ha un jet liquido avvolto da una tasca di vapore; nella seconda si ha un collasso di piccole bolle; nell'ultima si hanno tutte le bolle collassate. Tale flusso è rappresentato in figura 2.9.

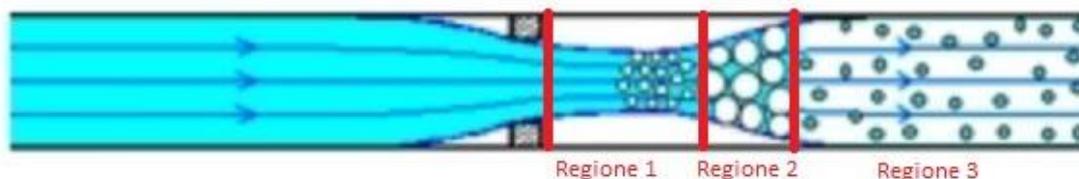


Figura 2.9 – Schematizzazione delle regioni della supercavitazione.

2.5.2 Tecnologie cavitazionali

Lo studio della cavitazione ha reso possibile la creazione di diverse tecnologie in grado di riprodurre il fenomeno. Le tecnologie utilizzate per ricreare la cavitazione, e sulle quali è basata la seconda classificazione, sono quattro: cavitazione acustica, cavitazione ottica, cavitazione particellare e cavitazione idrodinamica.

In acustica si distinguono due intervalli ultrasonori, il “diagnostic ultrasound” ed il “power ultrasoun”.

Il primo intervallo trova importanti applicazioni per misurazioni fisiche. La prima applicazione si ha nel campo navale, per identificare iceberg in mare aperto. La stima della distanza dell'imbarcazione da un iceberg viene eseguita sulla base del tempo intercorrente tra l'emissione di un suono dall'imbarcazione e la ricezione di un eco riflesso. Sulla base di tale ragionamento si è sviluppato il SONAR. Altre importanti applicazioni si trovano in campo medico, ed in particolare per lo sviluppo d'immagini mediante l'utilizzo di ecografie.

Il secondo intervallo trova importanti applicazioni per influenzare attività chimiche mediante la cavitazione. L'applicazione di onde ultrasoniche, caratterizzate da una frequenza compresa tra i 16 kHz ed i 100 MHz, induce delle fluttuazioni sinusoidali di pressione; e se l'ampiezza di tali fluttuazioni è sufficiente per produrre una forte depressione (pressione al di sotto della tensione di vapore saturo), si ha la dissociazione delle molecole e la creazione di microbolle e cavità. La creazione, la crescita ed il successivo collasso di queste microbolle descrive la cavitazione, caratterizzata da un intenso rilascio d'energia localizzato ed un conseguente aumento di pressione e temperatura. La fluttuazione sinusoidale della pressione data dalle onde ultrasoniche permette di descrivere la dinamica della cavitazione acustica in due momenti: quello della rarefazione e quello della compressione. Nella rarefazione, caratterizzata da una pressione negativa, si ha la formazione e la crescita delle microbolle e nella compressione, momento in cui si ristabilisce la pressione, la bolla si comprime fino al collasso. La descrizione della dinamica si ha in figura 2.10.

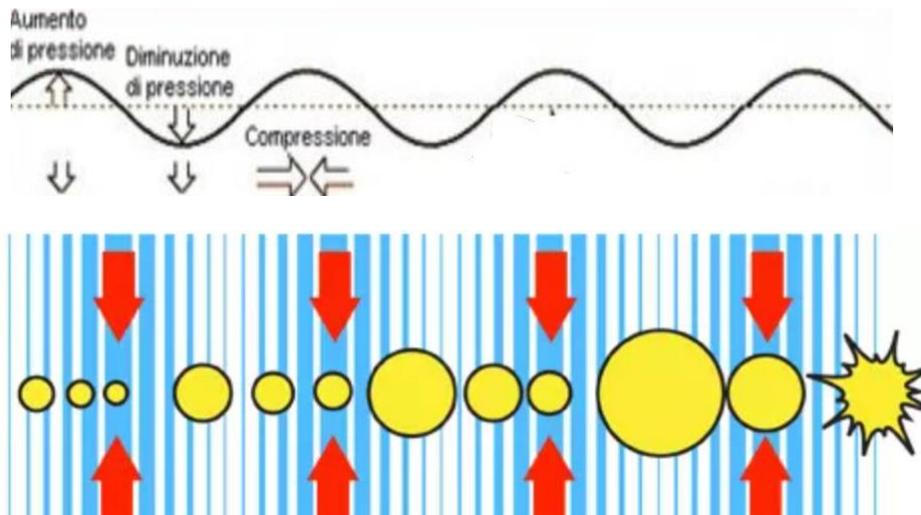


Figura 2.10 – Dinamica della bolla nella cavitazione acustica. (Fonte: <https://www.wellstore.it>)

La cavitazione acustica è utilizzata per la distruzione di una modesta quantità di microrganismi nocivi alla salute dell'uomo.

Le onde ultrasoniche sono create da trasduttori ultrasonori, con la capacità di convertire energia meccanica ed elettrica in suoni ad altra frequenza. Attualmente in commercio esistono tre tipologie di trasduttori: trasduttori a gas, trasduttori a liquido e trasduttori elettromeccanici. I trasduttori a gas sono utilizzati per pulire superfici da particelle fini e per accelerare processi di essiccazione. Tali trasduttori non hanno un'applicazione nel campo chimico, in quanto l'intensità sonora nell'aria non è sufficientemente alta. I trasduttori a liquido creano la cavitazione grazie al getto di un liquido ad alta velocità in un orifizio che impatta su una lamina metallica. In questi trasduttori la cavitazione si può avere a valle dell'orifizio o a seguito della vibrazione della lamina metallica. La pressione nel sistema si controlla agendo sulla velocità e sulle dimensioni dell'orifizio, e per ottimizzare l'azione della lamina si controlla la distanza tra l'orifizio e la lamina stessa. I trasduttori elettromeccanici possono essere piezoelettrici o magnetostrittivi. I trasduttori più comuni sono quelli piezoelettrici, e l'energia elettrica, applicata ad elementi piezometrici, viene convertita in energia meccanica attraverso l'effetto piezoelettrico. Infatti, il materiale piezoelettrico sottoposto ad un campo magnetico varia le sue dimensioni e si mette in vibrazione, creando così l'energia meccanica. Con dei dispositivi di risonanza si amplificano le vibrazioni e l'energia ad esse associata. Questi trasduttori sono fabbricati con materiali ceramici stabili.

I sistemi utilizzati per indurre la cavitazione acustica trattano piccoli volumi e sono costosi, per cui l'investimento in tali sistemi è sostenuto solo per piccole applicazioni. I dispositivi più comuni sono la vasca ultrasonora, la sonda ad ultrasuoni e l'ultrasonic flow cell. La vasca ad ultrasuoni è composta da una vasca in acciaio inossidabile alla cui base sono attaccati dei trasduttori. È un sistema utilizzato per il trattamento dell'acqua e per il lavaggio di strumentazioni chirurgiche. In figura 2.11 si riporta una vasca ad ultrasuoni.



Figura 2.11 – Fotografia di una vasca ad ultrasuoni. (Fonte: <https://www.sogi-tools.com>)

La sonda ad ultrasuoni è composta da una sonda in lega metallica, il cui corno è utilizzato per direzionare gli ultrasuoni creati dal trasduttore. Questo sistema genera un'intensità ultrasonora maggiore rispetto agli altri, ed è massima in corrispondenza della punta della sonda, dove le sollecitazioni di taglio causano il danneggiamento delle pareti cellulari. I volumi che può trattare non sono grandi in quanto l'intensità sonora decresce al crescere della distanza dalla punta della sonda. Ha applicazioni nel campo dell'industria farmaceutica, nei laboratori chimici, nelle biotecnologie e negli istituti di ricerca. Sia per la vasca ad ultrasuoni che per la sonda ad ultrasuoni si utilizzano trasduttori piezoelettrici, con una frequenza che varia tra i 20 ed i 500 kHz. In figura 2.12 si riporta una sonda ad ultrasuoni.



Figura 2.12 – Fotografia di una sonda ad ultrasuoni. (Fonte: Ricucci,2017)

L'ultrasonic flow cell si utilizza per trattare dei volumi maggiori con un'alta intensità ed in continuo. Questo sistema si compone di un trasduttore collegato ad un sistema di ricircolo chiuso, la cui efficienza è condizionata dalla portata e dall'esposizione all'attività cavitazionale del liquido. Lo svantaggio più importante di tale meccanismo è dato dall'alto

consumo energetico per il pompaggio del ricircolo del fluido, che aumenta al crescere della viscosità dell'acqua da trattare. In figura 2.13 si riporta una ultrasonic flow cell.



Figura 2.13 – Fotografia di una ultrasonic flow cell. (Fonte: <https://biobase.en.made-in-china.com/>)

La disinfezione di acqua contaminata mediante cavitazione acustica è la migliore se il criterio utilizzato è l'uccisione di batteri per unità di tempo. Tuttavia, la sua efficienza è locale, in quanto è limitata alla punta del corno; perciò se il parametro di giudizio diventa il tasso di distruzione globale, si preferisce la cavitazione idrodinamica con piastre forate.

Il largo utilizzo che ha avuto la cavitazione acustica ad ultrasuoni ha permesso di determinare i principali fattori fisici e biologici che influenzano l'efficienza dei sistemi utilizzati. Uno di questi è la frequenza. L'aumentare della frequenza riduce il tempo di rarefazione, per cui è necessaria una potenza maggiore per mantenere gli stessi effetti cavitazionali. Nel caso in cui la frequenza dovesse arrivare all'ordine dei megahertz, si avrebbe un'oscillazione del flusso talmente rapida da non permettere la formazione delle bolle cavitazionali. Inoltre, la frequenza è inversamente proporzionale all'attenuazione del suono che aumenta con l'aumentare della distanza. L'attenuazione del suono è data dalla dissipazione dell'energia sonora sotto forma di calore. Anche la viscosità del solvente ha la sua influenza, in quanto l'aumentare della viscosità e della tensione superficiale del fluido indicano un aumento delle forze coesive interne del fluido. Tanto più il fluido è viscoso, tanto più sarà elevata la richiesta energetica per la formazione di microbolle. Un altro fattore importante è la pressione di vapore saturo. Se un liquido è molto volatile le bolle cavitazionali hanno un quantitativo di vapore maggiore, ed i collassi riducono la loro violenza. La temperatura ambientale influenza direttamente la pressione di vapore saturo, per cui un aumento della temperatura ambientale produce gli stessi effetti di un aumento di pressione di vapore saturo. Con un aumento dei consumi energetici è possibile applicare una pressione esterna maggiore che favorisce l'intensità e gli effetti della cavitazione. L'intensità è un fattore direttamente legato all'ampiezza delle vibrazioni prodotte. I gas disciolti presenti nel liquido fungono da nuclei e la cavitazione viene favorita, a scapito dell'intensità, che aumenta se il gas viene rimosso. I fattori biologici che influenzano la cavitazione sono la dimensione e la forma delle cellule, la tipologia di specie e la forza dei legami molecolari tra i batteri. La dimensione e l'allungamento dei batteri sono

inversamente proporzionali alla resistenza agli ultrasuoni, quindi i batteri più compatti e piccoli hanno una migliore resistenza a trazione. Vari studi hanno evidenziato come la sopravvivenza batterica sia influenzata dai legami che i batteri hanno con il mezzo nel quale sono immersi. I batteri con carica polare che sono immersi in un mezzo polare sono più suscettibili alla distruzione in quanto non possono creare legami stabili.

La cavitazione con sistemi ottici si ha sottoponendo il liquido ad un campo di luce, tale per cui si ha la rottura della continuità liquida a causa della ionizzazione multifotonica, caratterizzata dalla formazione di ioni da molecole neutre con l'assorbimento di due o più fotoni. La ionizzazione permette un trasferimento d'energia localizzato, ed in un tempo che va dai microsecondi ai millisecondi, si ha un aumento della temperatura oltre quella di ebollizione. Il liquido riscaldato oltre il suo limite spinodale diventa instabile e si hanno fluttuazioni di densità ed una produzione di bolle che espandono velocemente fino al collasso. Nella cavitazione particellare, la continuità del liquido è rotta dall'utilizzo di particelle energetiche qualsiasi.

La cavitazione idrodinamica è indotta dal passaggio di un fluido attraverso un restringimento. In questo modo l'energia di pressione si trasforma in energia cinetica e la pressione scende al di sotto della tensione di vapore, e si creano bolle e cavità. Il successivo ristabilirsi delle condizioni originarie causa la compressione delle bolle, che implodono. Nel capitolo successivo si avrà una più ampia trattazione di tale fenomeno.

Capitolo 3

3. Cavitazione idrodinamica

Grazie alla maggiore intensità del collasso delle bolle, il fenomeno della cavitazione acustica è più sfruttato rispetto a quella idrodinamica per l'agevolazione dei processi fisici e chimici. Di fatto, i primi studi sulla cavitazione idrodinamica sono stati effettuati verso gli anni Novanta, nei quali si è cercato di distruggere il lievito, uno dei microorganismi più resistenti ed economici. Tali studi, hanno mostrato come la cavitazione idrodinamica sia una valida alternativa a quella acustica, soprattutto se combinata ad agenti chimici, per via della sua economicità e della sua ampia applicabilità. Con l'aumentare del numero di sperimentazioni eseguite, si è notata la maggiore potenzialità su larga scala della cavitazione idrodinamica rispetto a quella acustica. Si è potuta fare questa considerazione in quanto la cavitazione idrodinamica non solo genera cavitazioni transitorie, le quali hanno un potere disattivante dei batteri sufficiente alla distruzione, ma ne produce in notevole quantità, per cui il volume che viene trattato è maggiore rispetto alla cavitazione acustica. Le applicazioni in cui è consolidato l'utilizzo di questa tecnica sono: la sintesi di sostanze chimiche e nanoparticelle, la creazione di nanoemulsioni, il degrado di alcuni inquinanti dell'acqua.

3.1 Descrizione del fenomeno

Il fenomeno della cavitazione idrodinamica è definito come la formazione, la crescita ed il collasso delle bolle in un breve arco temporale all'interno di un reattore. La formazione delle cavità è data dalla presenza di una zona di bassa pressione, che si ottiene dalla combinazione di costrizioni del flusso e portate. Le bolle crescono e raggiungono le massime dimensioni con espansioni isoterme; successivamente, al ristabilirsi delle condizioni originarie, collassano adiabaticamente. Queste trasformazioni danno origine ad uno strato supercritico ad alta temperatura e pressione locale, denominato "hot spot", nel quale avvengono le trasformazioni chimiche e fisiche richieste dai processi.

Il metodo sperimentale più usato per causare una riduzione di pressione all'interno di un circuito idraulico chiuso è l'installazione di piastre forate o tubi di Venturi, i quali riducono la sezione in cui il fluido scorre. In un circuito idraulico chiuso si ha una portata costante, per cui nelle restrizioni, dove si riducono le sezioni, si ha un incremento della velocità ed una diminuzione della pressione, fino a scendere al di sotto della tensione di vapore, causando fenomeni di sonoluminescenza e generazione di cavità. Il ripristino della sezione originaria provoca una riduzione della velocità ed un aumento di pressione, per cui le cavità collassano e viene rilasciata energia. In figura 3.1 si riporta una descrizione grafica del fenomeno, tenendo presente la relazione citata in precedenza, ovvero:

$$Q = Av = cost \rightarrow$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Dove

- Q è la portata [m^3/s];
- A è la sezione [m^2];
- v è la velocità [m/s];

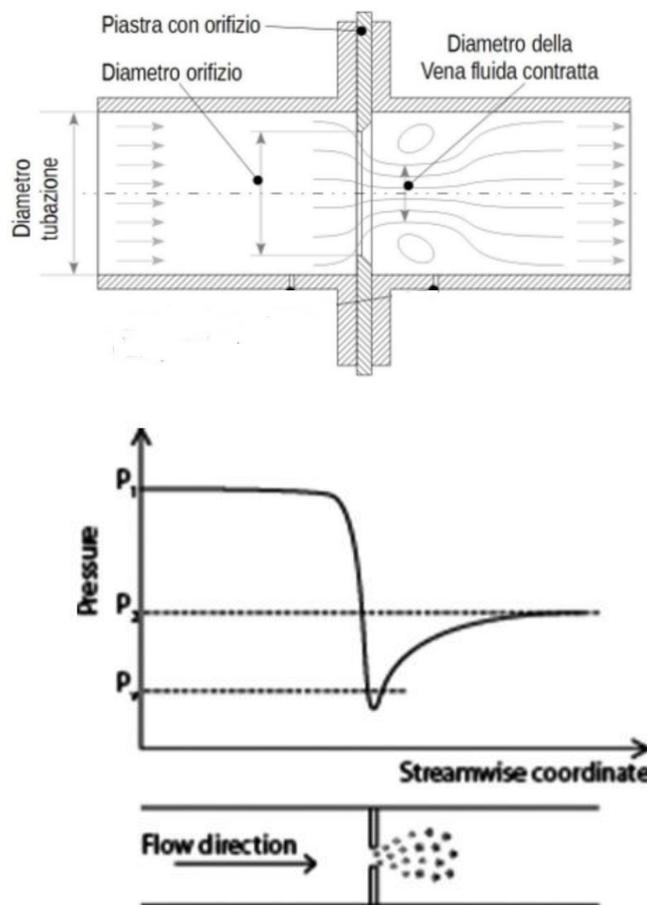


Figura 3.1 – Descrizione grafica di un flusso in un dispositivo cavitante (Fonte: Burzio et al., 2020).

Come si nota dalla figura 3.1, il rilascio d'energia a valle, dove si verifica la separazione dello strato limite, si ripercuote su una perdita di pressione. L'intensità della cavitazione e della turbolenza a valle della piastra forata sono influenzati dalla variazione di pressione; infatti, come già espresso nel capitolo precedente, il parametro idraulico adimensionale che caratterizza un dispositivo cavitante è il numero di cavitazione così definito:

$$\sigma_v = \frac{p_2 - p_v}{0.5\rho v_0^2}$$

Per avere la caduta di pressione desiderata è necessario controllare i parametri idraulici del sistema ed i parametri geometrici del reattore.

In figura 3.1 si può vedere come a valle del restringimento il getto inizia ad allargarsi, per cui tra la regione di separazione ed il getto si crea uno strato di taglio con alti gradienti di velocità, il quale favorisce la formazione di vorticosità. I nuclei cavitazionali restano intrappolati in questi vortici, e se raggiungono il diametro critico vaporizzano. Dopo questi

fenomeni si ha un recupero della pressione dato dalla dissipazione dei vortici e dalla diffusione del getto all'intera sezione.

Per comprendere meglio come la variazione di velocità influenzi la variazione di pressione è utile ricordare il teorema di Bernoulli, che esprime il principio di conservazione dell'energia:

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = cost$$

Dove

- H è il carico totale [m]
- z è l'altezza geodetica [m];
- $\frac{p}{\gamma}$ è l'altezza piezometrica [m];
- $\frac{v^2}{2g}$ è l'altezza cinetica [m].

Le ipotesi alla base del teorema, cioè quelle di fluido ideale ed incompressibile, di sistema chiuso e moto permanente sono verificate nei sistemi idraulici che stiamo analizzando. Dal teorema di Bernoulli si può dedurre che, a parità di altezza geodetica, le variazioni di velocità e pressione sono legate. Per essere più precisi si rimuove l'ipotesi di fluido ideale e si prendono in considerazione gli attriti che si creano tra le particelle e le turbolenze che si creano nelle singolarità del sistema idraulico. Questa precisazione permette di poter analizzare l'andamento della pressione considerando anche le perdite del sistema, che possono essere locali o distribuite. Le prime sono dovute alle turbolenze che si creano nelle singolarità, mentre le seconde sono dovute agli sforzi tangenziali causati dalla viscosità. Il teorema di Bernoulli si riscrive in questo modo:

$$H_A = H_B + \Delta$$

Dove con Δ s'indica la perdita di carico, espressa anch'essa in metri. In conclusione, la pressione non è soltanto influenzata dalla velocità, ma anche dalle perdite di carico; e nel caso di cavitazione con piastra forata, per determinare la pressione a valle del restringimento bisogna tenere in considerazione la variazione di velocità e la perdita localizzata all'ingresso del foro (per sistemi idraulici che hanno le sezioni alla stessa altezza geodetica). In figura 3.2 si riporta un'analisi grafica dell'andamento dei carichi per i fluidi reali.

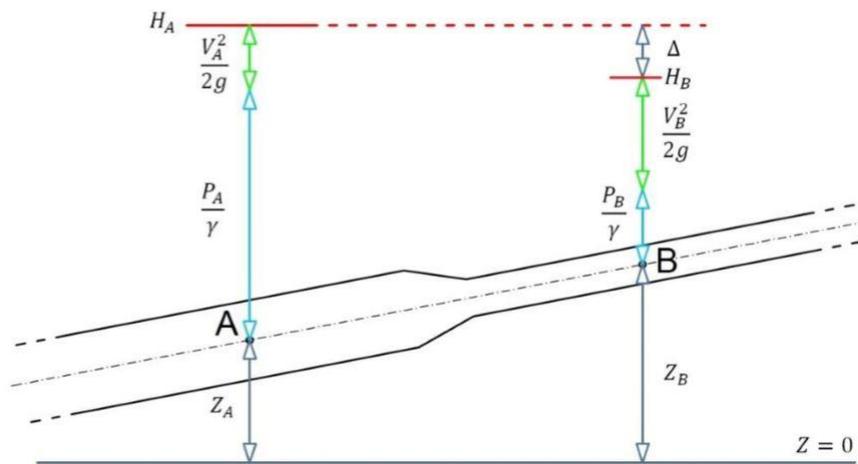


Figura 3.2 – Andamento dei carichi per i fluidi reali. (Fonte: Fuda, 2018)

3.2 Effetti chimici e fisici della cavitazione

La cavitazione, ed in particolare il collasso delle cavità, induce effetti chimici e fisici nelle immediate vicinanze del fenomeno, e grazie a questi effetti si ottengono le trasformazioni desiderate. Il collasso delle cavità può avvenire in due modi, simmetrica o asimmetrica, a seconda delle condizioni al contorno. È importante distinguere, analizzare e riconoscere i tipi di collasso per indurre le trasformazioni desiderate, in quanto gli effetti principali per le due tipologie di collasso sono differenti. Nonostante entrambi i collassi, a parità di variazione di pressione, rilascino la stessa quantità d'energia, questa viene rilasciata in forme diverse a seconda della tipologia di collasso, cioè sotto forma di turbolenza o sotto forma di condizioni estreme di pressione e temperatura.

Se durante il collasso della cavità non sono presenti interfacce di pareti, di particelle o di altre bolle si ha un collasso sferico, per cui simmetrico. Il collasso sferico produce radicali liberi reattivi e pirolisi termica di molecole organiche che sono essenziali per le trasformazioni chimiche. Le reazioni chimiche più favorite sono quelle di ossidazione. Sotto le condizioni di “hot spot” locale si producono, oltre ai radicali liberi, le rotture di molecole di molecole grandi in molecole più piccole. Le trasformazioni chimiche avvengono in due fasi. Nella prima fase le molecole nella cavità subiscono una decomposizione termica durante il collasso, mentre nella seconda le molecole vengono ossidate dalla reazione con i radicali liberi. La teoria degli “hot spot” afferma che ogni cavità agisce come un microreattore, nel quale si creano condizioni di alta temperatura e pressione in un breve periodo. La teoria descrive tre zone di reazione con caratteristiche differenti, come mostrato in figura 3.3.

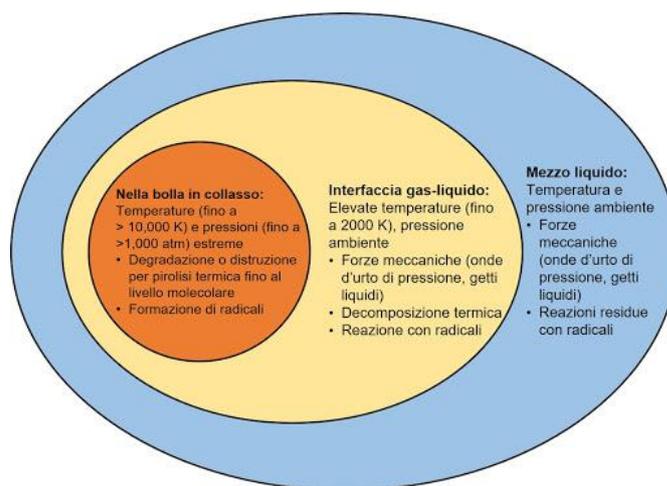


Figura 3.3 – Zone di reazione secondo la teoria degli “hot spot”. (Fonte: Chen, 2012)

Nella regione del nucleo si hanno le condizioni più estreme di temperatura e di pressione, che al collasso raggiungono rispettivamente i 10000 K e le 1000 atm. Nel nucleo le molecole si dissociano in stati più piccoli e vengono prodotti i radicali liberi, che interagiscono con altre molecole dando inizio ad ulteriori reazioni. Nella regione dell'interfaccia della cavità si creano microjet con un taglio elevato ed un'alta turbolenza, e la temperatura raggiunge i 2000 K. La turbolenza favorisce il trasporto dei radicali liberi creati nel nucleo, per cui questa zona è più reattiva rispetto alla zona dove c'è il liquido indisturbato. Anche in questa area le molecole subiscono decomposizione termica e reazioni con i radicali liberi. Nella zona più distante non si hanno particolari condizioni di temperatura e pressione, per cui è presente solo la diffusione dei radicali liberi che reagiscono con le molecole.

Uno degli aspetti più importanti da valutare è la quantificazione di generazione di radicali liberi ed il rendimento delle reazioni. La valutazione si esegue sulla base dell'ossidazione della molecola. Sulla base di queste considerazioni, uno studio ha misurato e migliorato l'efficienza dei dispositivi cavitativi idrodinamici ad orifizio. Anche altri studi dimostrano che la cavitazione idrodinamica induce favore reazioni chimiche grazie al rilascio dei radicali liberi.

Se durante il collasso della cavità sono presenti interfacce di pareti, di particelle o di altre bolle non si ha un collasso sferico, per cui è asimmetrico. In figura 3.4 viene mostrato come per questa tipologia di collasso si producono getti ad alta velocità con un'intensa turbolenza, favorendo così le trasformazioni fisiche.

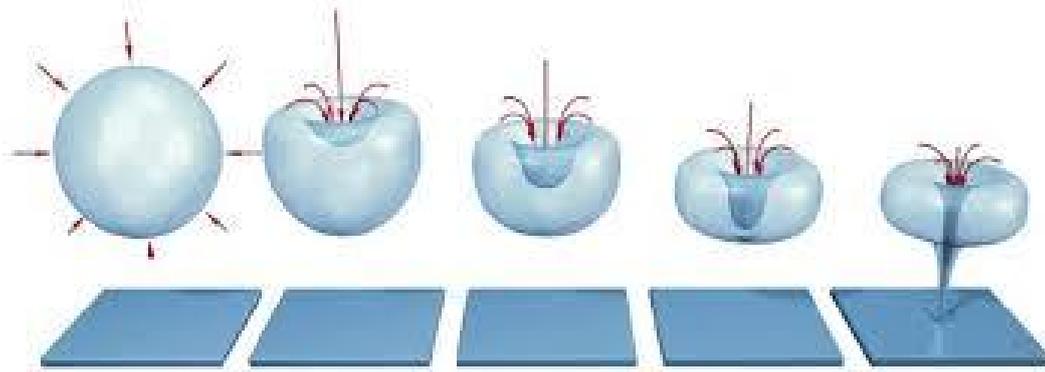


Figura 3.4 – Sequenza temporale del collasso asimmetrico. (Fonte: <https://www.fountainpen.it>)

I fenomeni fisici che sono più avvantaggiati dai collassi asimmetrici sono l'emulsione, la sintesi di nanoparticelle e la disinfezione microbica. Un'altra conseguenza consiste nella facilitazione del trasporto delle specie in sistemi omogenei ed eterogenei. La presenza della cavitazione in un sistema formato da due fasi liquide crea la miscelazione di microlivello riducendo la tensione interfacciale tra due fasi immiscibili, mentre in un sistema formato da una fase liquida e solida viene favorito il trasferimento di massa, in quanto viene rotta la pellicola liquida che circonda il solido. Oltre a questi vantaggi, il collasso asimmetrico migliora l'attività catalitica dei catalizzatori.

La cavitazione idrodinamica può favorire la reazione di fenomeni chimici e i processi fisici controllando opportunamente i parametri geometrici ed il funzionamento dei dispositivi cavitanti, ed in base all'applicazione della cavitazione bisogna ottimizzare queste caratteristiche.

3.3 Reattori per la cavitazione idrodinamica

Gli strumenti attualmente disponibili per indurre la cavitazione sono gli omogeneizzatori, i tubi di Venturi e le piastre forate.

Gli omogeneizzatori sono piccoli dispositivi di miscelazione dell'acqua che grazie all'alta velocità e pressione causano delle forti azioni meccaniche e cavitazionali, e possono trattare soltanto piccoli volumi. In commercio sono presenti omogeneizzatori che inducono miscelano o soltanto grazie all'alta velocità, o soltanto grazie all'alta pressione.

L'omogeneizzatore ad alte velocità è composto da un rotore che permette la miscelazione di sostanze solide all'interno della soluzione acquosa imponendo l'azione centrifuga. L'omogeneizzazione avviene a causa dei tagli, degli urti, delle collisioni e della cavitazione che l'azione centrifuga induce. Il rotore può avere una velocità compresa tra gli 8000 ed i 24000 giri al minuto e possiede un sistema di autoregolazione che permette di mantenere costante la velocità. Maggiore sarà il tempo di trattamento, maggiore sarà la disinfezione che si avrà, ma l'efficienza sarà minore. Questi andamenti sono facilmente spiegabili in quanto con l'aumentare del tempo si ha una maggiore probabilità d'interazione tra i batteri e

le cavità, diminuendo la concentrazione dei batteri; mentre le cavità prodotte restano costanti. In figura 3.5 si può vedere un omogeneizzatore ad alta velocità.



Figura 3.5 – Omogeneizzatore ad alta velocità. (Fonte: Garofano, 2016)

L'omogeneizzatore ad alta pressione è composto da una valvola di omogeneizzazione che rompe le particelle solide fino ad una dimensione inferiore ad un micron, grazie alla turbolenza, cavitazione e forze di taglio indotte dall'altissima pressione. Questo strumento è utilizzato nell'industria cosmetica, alimentare, farmaceutica e lattiero-casearia e per la disinfezione dell'acqua. In particolare, per quest'ultima applicazione si è notato che, se vengono imposte pressioni superiori a 1000 psi, si ha un comportamento simile a quello espresso dall'omogeneizzatore ad alta velocità. In figura 3.6 si può vedere un omogeneizzatore ad alta pressione.



Figura 3.6 – Omogeneizzatore ad alta pressione. (Fonte: Garofano, 2016)

Nei processi di disinfezione dell'acqua esistono dei valori ottimali di velocità o pressione, superati i quali la disinfezione decresce. Questo limite è dato da due motivazioni. La prima è il tempo di residenza dei batteri nella regione cavitazionale che diminuisce all'aumentare della velocità; per cui c'è la possibilità che, con un tempo troppo basso, ci sia solo una paralizzazione dei batteri e non un'uccisione. La seconda è lo sviluppo di supercavitazione, il quale non permette il collasso delle bolle, e quindi la cavitazione. Un altro svantaggio di questi strumenti, oltre al piccolo volume di trattamento, è dato dalla bassa flessibilità sul controllo dell'intensità della cavitazione.

I reattori cavitazionali idrodinamici con tubi di Venturi o piastre forate causano la cavitazione grazie alle riduzioni delle sezioni, anche a diverse condizioni idrauliche di esercizio. I principali vantaggi di queste tipologie di reattori sono il minor costo a parità di efficienza, un rendimento elevato ed un controllo più semplice dei parametri.

La cavitazione con il tubo di Venturi, grazie alla sua configurazione geometrica, è di natura stabile. Durante la progettazione del sistema idraulico è necessario tener conto dei risultati che si desiderano per poter scegliere i parametri geometrici ottimali. In figura 3.7 si riportano alcuni schemi di reattori con tubi di Venturi.

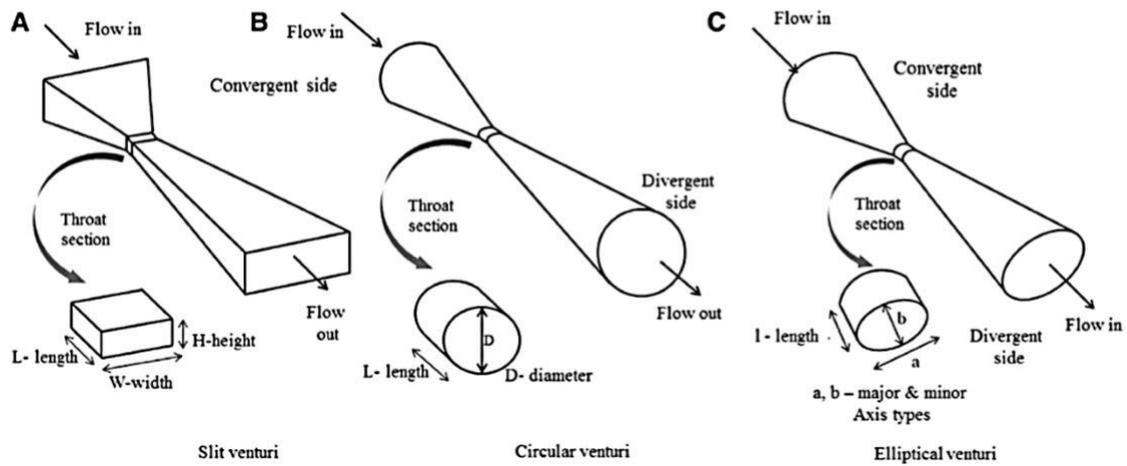


Figura 3.7 – Reattori con tubi di Venturi. (Fonte: Carpenter et al., 2017)

La cavitazione idrodinamica con le piastre forate è transitoria. L'utilizzo di piastre forate permette una maggiore scelta sulla sezione in cui si vuole che il fluido passi, utilizzando fori singoli o multipli, per cui si miglior controllo sull'intensità cavitazionale e sul numero di aventi cavitazionali all'interno del reattore. In figura 3.8 si riportano alcune schematizzazioni di piastre forate usate nei reattori.

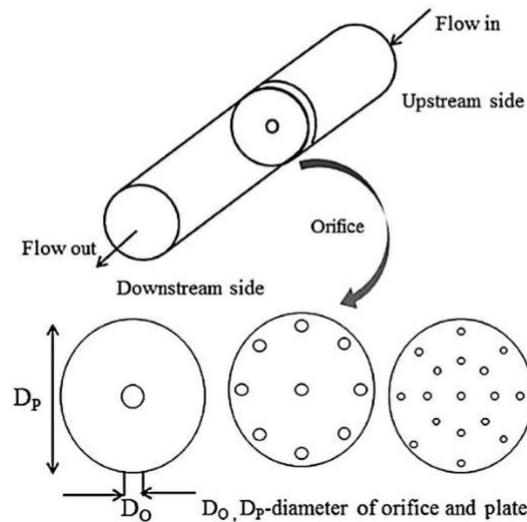


Figura 3.8 – Reattori con piastre forate. (Fonte: Carpenter et al., 2017)

Per avere la cavitazione in queste due ultime tipologie di reattori è necessario far passare il liquido all'interno delle restrizioni, per cui è necessario l'utilizzo di una pompa. Il numero di cavitazione ed il volume trattato sono anche influenzati dalla portata della pompa che si utilizza. I principali impianti idraulici studiati per la disinfezione con cavitazione idrodinamica sono composti da serbatoio di accumulo, pompa, reattore cavitazionale, nanometri, valvole di controllo del flusso e misuratore di portata. In figura 3.9 si riporta uno schema tipico di un impianto per la disinfezione con cavitazione idrodinamica con restrizione della sezione. Nei capitoli successivi si farà un approfondimento di suddetti impianti.

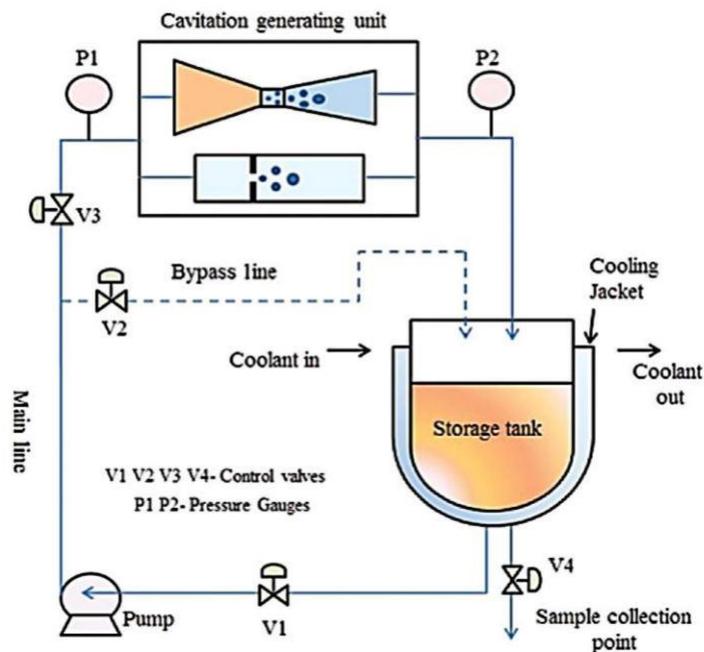


Figura 3.9 – Schematizzazione d'impianto di cavitazione idrodinamica con restrizione della sezione. (Fonte: Carpenter et al., 2017)

3.4 Classificazione geometrica dei reattori con piastre ad orifizio

Il lavoro di tesi prevede l'utilizzo di piastre forate, per cui si procederà alla classificazione di questa tipologia di reattori. La cavitazione che si ottiene è transitoria, per cui questi reattori si usano molto per le trasformazioni chimiche. Uno dei vantaggi più importanti di questi delle piastre è la possibilità di disporre di piastre ad uno o più fori, con diverse forme e dimensioni. Variando queste caratteristiche geometriche è possibile influenzare parametri come il numero di cavità create, il tempo di residenza delle cavità nella zona di bassa pressione, la velocità di recupero di pressione, la traiettoria delle cavità e l'intensità della cavitazione. Il rendimento della cavitazione è fortemente dipendente da questi parametri. La cavitazione con le piastre è un fenomeno fortemente energetico in quanto si ha un rapido collasso delle cavità, determinato dal veloce recupero della pressione a valle della piastra. Le cavità si generano solo sul bordo degli orifizi, per cui la quantità di cavità è legata al numero di orifizi, e si deduce come le piastre multiforate, a parità di area in cui passa il

flusso, siano più efficienti. La miglior efficienza nelle piastre a più fori è determinata dalla quantità maggiore di contorno bagnato che si traduce in strati di taglio più estesi ed un aumento della pressione di collasso. I parametri geometrici descritti si possono rappresentare con tre coefficienti quali il rapporto spessore – diametro, il parametro α ed il parametro β .

Quando il flusso attraversa la piastra forata, e si ha un brusco restringimento di sezione, dentro il foro si forma una vena liquida contratta. Il rapporto spessore – diametro del foro permette di determinare se la vena si riattacca alla parete della piastra oppure alla parete della condotta. Comprendere questo parametro è utile per determinare le perdite di pressione. Se il rapporto tra spessore, indicato come t , ed il diametro del foro, indicato come D , è minore o uguale a due si è in presenza di piastre thin plate, e la vena liquida si riattacca alla condotta. Se invece il rapporto è maggiore di due si è in presenza di piastre thick plate e la vena liquida si riattacca nella piastra. Nelle figure 3.10 e 3.11 si possono vedere le rappresentazioni delle vene liquide nei rispettivi casi di thin plate e thick plate.

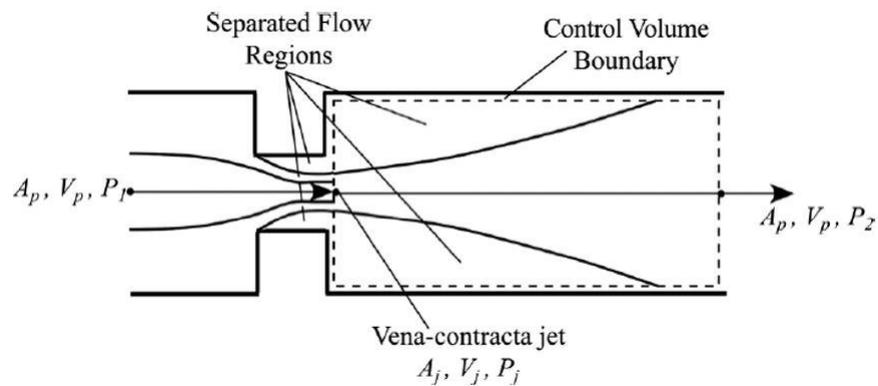


Figura 3.10 – Schematizzazione della vena liquida del sistema thin plate. (Fonte: Garofano, 2016)

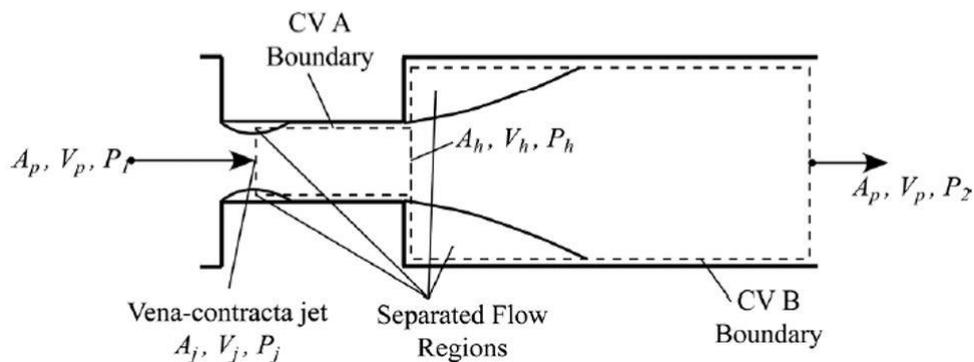


Figura 3.11 – Schematizzazione della vena liquida del sistema thick plate. (Fonte: Garofano, 2016)

Il parametro α rappresenta il rapporto tra il perimetro dei fori e l'area totale dei fori della piastra, per cui è direttamente proporzionale al numero di fori ed inversamente proporzionale alle dimensioni dei fori. Molti studi hanno evidenziato come l'aumentare di α migliora la resa cavitazionale; e a parità di questo parametro è preferibile usare una piastra con molti fori o con forme diverse da quella circolare. Le migliori rese cavitazionali si hanno con un parametro α maggiore di 2.

Il parametro β è il rapporto tra l'area dei fori e l'area della sezione trasversale ed è dipendente dal numero di cavitazione che si desidera e la portata che si vuole utilizzare. Il diminuire dell'area dei fori implica un aumento della velocità del fluido, per cui si ha una diminuzione del numero di cavitazione e quindi una migliore resa cavitazionale. Da questa semplice analisi si può dedurre che al diminuire di β si ha una maggiore intensità di cavitazione.

Per progettare al meglio l'impianto idraulico è necessario ottimizzare i parametri precedentemente descritti in funzione dell'applicazione. Nel caso si decida di utilizzare un reattore con piastra forata è preferibile avere un valore elevato di α , per avere un'elevata intensità, a valori bassi di β , ma non troppo in quanto la caduta di pressione potrebbe essere molto elevata. È consigliabile scegliere β dopo aver stabilito la velocità all'interno dei fori della piastra.

3.5 Influenza dei parametri operativi nella cavitazione idrodinamica

I parametri operativi più importanti che influenzano la cavitazione idrodinamica sono il numero di cavitazione e la pressione in ingresso. La cavitazione è più intensa sia se il numero di cavitazione diminuisce, sia se la pressione in ingresso aumenta. È bene ricordare che questi due parametri sono legati tra loro. Nella maggior parte delle trasformazioni desiderate avere un numero di cavitazione inferiore ad uno aumenta notevolmente il rendimento, purché le condizioni operative siano al di sopra di quelle della cavitazione soffocata. Per molti studi si ha avuta la resa migliore con numeri di cavitazione compresi tra 0.1 e 0.3. Per la specifica applicazione di trattamento delle acque reflue si è trovata la resa ottimale per un numero di cavitazione compreso tra 0.15 e 0.55. Tuttavia, per fluidi altamente viscosi o con una sospensione di particelle solide dell'ordine dei micron è necessario un numero di cavitazione più alto per avere una resa ottimale. Al fine di avere una resa migliore e sulla base di queste considerazioni, è consigliato di considerare prima le caratteristiche del fluido che si sta utilizzando e le applicazioni che si vogliono fare, e solo successivamente individuare i parametri operativi ottimali del sistema.

Capitolo 4

4. Stato dell'arte

Sulla base dei problemi dei Paesi in via di sviluppo e sulla base dell'analisi del fenomeno cavitazione idrodinamica, gli studi più recenti sono focalizzati sull'individuazione di tecniche di disinfezione dell'acqua che possano essere utilizzate da personale poco qualificato e che abbiano dei costi contenuti. La maggior parte dei problemi economici è causata dalla mancanza all'accesso all'acqua potabile, ma le tecniche attuali di potabilizzazione richiedono costi, materiale e personale qualificato che questi Paesi non possono permettersi. Lo sviluppo di tecniche innovative di disinfezione dell'acqua diventa di rilevante importanza per la crescita economica e sanitaria di queste nazioni. Una possibile soluzione a tale problematica è stata individuata nello sviluppo di metodologie di disinfezione e potabilizzazione che sfruttino il fenomeno della cavitazione idrodinamica, il quale ha diversi vantaggi. Come già descritto nei capitoli precedenti, questo fenomeno ha il vantaggio di indurre trasformazioni chimiche e fisiche mediante dispositivi meccanici, e senza il rilascio di sottoprodotti nocivi alla salute umana.

Durante la descrizione fisica del fenomeno si sono poste le attenzioni sulle condizioni necessarie per sviluppare la cavitazione e su come si sviluppa questo evento fortemente dissipativo. In un flusso di un fluido in pressione si sviluppa la cavitazione idrodinamica se si crea una caduta di pressione al di sotto della sua tensione di vapore, e consiste nella formazione, crescita e collasso repentino di bolle. La cavitazione rilascia una notevole quantità d'energia sotto forma di aumento di pressione e temperatura, di generazione di sforzi di taglio e di rilascio di radicali liberi. Questi tre effetti sono le cause principali dell'inattivazione e della distruzione degli agenti patogeni.

Tra i diversi metodi per causare la cavitazione si è scelta la cavitazione idrodinamica in quanto è energeticamente più efficiente, può trattare delle grandi quantità di volumi ed è possibile riprodurla mediante l'utilizzo di una pompa e di un dispositivo meccanico. I dispositivi in questione sono piastre forate, tubi di Venturi o rotor. La caduta di pressione che induce la cavitazione si ha facendo scorrere il fluido attraverso questi restringimenti, in quanto, per la conservazione d'energia, un aumento di velocità implica una diminuzione della pressione.

L'analisi fluido dinamica della cavitazione idrodinamica è molto complessa a causa della grande turbolenza e delle notevoli interazioni che si creano tra le diverse bolle e le pareti della condotta. La complessità è aggravata dall'interazione con sostanze biologiche, delle quali non è possibile dare una descrizione analitica, ma soltanto generica. Purtroppo, a causa di tutte queste complessità, le sperimentazioni sulla disinfezione disponibili in letteratura seguono degli approcci empirici e studi numerici. Fino ad oggi non si è scelto di fare un'analisi dimensionale a causa della difficoltà d'individuare tutti i parametri adimensionali che governano il fenomeno, d'isolare i singoli effetti, di scalare le

dimensioni dei reattori usati in laboratorio per un trattamento di volumi notevolmente maggiori.

La carenza di studi che sfruttano un approccio teorico non permette di confrontare i vari esperimenti che sono stati condotti fino ad ora e non permette di determinare in che modo i parametri adimensionali governino questo fenomeno, per cui non è ancora possibile controllare la cavitazione ed i suoi effetti per le applicazioni desiderate. Oltre alla mancanza di un'analisi dimensionale, non c'è un approccio sperimentale comune. Per esempio, non tutti gli esperimenti di disinfezione dell'acqua con cavitazione idrodinamica indotta da piastre forate utilizzano lo stesso batterio. Il batterio più comune utilizzato è l'Escherichia Coli, a causa della sua notevole diffusione e conoscenza. Tra gli autori che si sono serviti di altri batteri sono presenti Azuma et al. che si sono serviti di *B. subtilis*, *B. Halodunrnas*, *P. Putida*; Sawant et al. che si sono serviti di Zooplancton; Wang ed al. che non hanno fornito l'informazione. Un altro esempio che è possibile fare riguarda l'assenza delle concentrazioni iniziali utilizzate: soltanto nelle pubblicazioni di Arrojo et al., Wang et al., Badve et al., Liu et al. è possibile trovare questa informazione. In quasi tutti questi esperimenti non è possibile sapere dopo quanti passaggi si ottiene un certo grado di disinfezione, infatti solo gli esperimenti di Azuma et al. e di Sawant et al. sono riportate queste precisazioni.

A differenza di tutte queste pubblicazioni, la più recente, ad opera di Burzio et al. si è preoccupata di eseguire un'analisi dimensionale per poter confrontare i risultati di diversi articoli disponibili e per poter eseguire delle sperimentazioni in cui è possibile controllare tutti i parametri adimensionali. Utilizzare un approccio rigoroso gli ha permesso di poter eseguire esperimenti in cui ha potuto far variare un unico parametro adimensionale, lasciando tutti gli altri costanti.

4.1 Analisi dimensionale

Nello studio di problemi complessi come quello della cavitazione idrodinamica è importante eseguire un'analisi dimensionale per poter capire quali sono le caratteristiche idrauliche che governano il problema. Soltanto dopo questa operazione preliminare è conveniente eseguire esperimenti con approcci empirici. L'unico studio che si è occupato di fornire un'analisi dimensionale prima di eseguire delle sperimentazioni è quello descritto nell'articolo di Burzio et al.. L'analisi dimensionale e le sperimentazioni sono incentrate sulla cavitazione idrodinamica ottenuta con dei reattori a piastre forate perché ha una geometria con meno variabili e già diversi studi si sono occupati di analizzare questi tipi di reattori, per cui si sono potuti fare dei confronti.

L'approccio empirico utilizzato nelle sperimentazioni precedenti a quella di Burzio prevedeva di far scorrere un volume fissato di acqua contaminata, con una concentrazione iniziale, in un sistema chiuso, nel quale era presente il reattore. Questi esperimenti riportano le concentrazioni ottenute a seguito di un determinato numero di passaggi nel reattore.

Sulla base della descrizione fisica del fenomeno e di come si sono svolti gli esperimenti in letteratura, si può stabilire che le concentrazioni dei batteri in un liquido in cui si ha cavitazione idrodinamica dipende dai seguenti parametri:

$$C = f(C_0, \mu, \rho, \gamma_s, v_h, P_2 - P_v, n_p, L_i)$$

Dove:

- C indica la concentrazione batterica [CFU/100 ml];
- C_0 indica la concentrazione batterica iniziale [CFU/100 ml];
- μ indica la viscosità cinematica [m²/s];
- ρ indica la densità [kg/m³];
- γ_s indica la tensione superficiale dell'acqua [N/m];
- v_h indica la velocità nell'orifizio [m/s];
- P_2 indica la pressione nella sezione a valle della costrizione [bar];
- P_v indica la tensione di vapore dell'acqua [bar];
- n_p indica il numero di passaggi attraverso il reattore [-];
- L_i indica le caratteristiche geometriche come il diametro d dell'orifizio [mm], il diametro D delle condotte a monte e a valle del reattore [mm], lo spessore b dell'orifizio [mm], il numero n degli orifizi.

Da questa espressione si evince che non è presente una relazione diretta con due parametri importati come la temperatura e la pressione di monte. Non c'è questa relazione perché gli effetti della temperatura influenzano le caratteristiche fisiche del fluido indicate con ρ , γ_s , μ , P_v ; mentre la pressione di monte è legata ai parametri v_h e P_2 . È importante anche puntualizzare come anche in questa espressione non è presente una pressione assoluta, ma una relativa alla tensione di vapore. Si è fatta questa scelta in quanto la dinamica delle bolle, descritta con la formazione, la crescita ed il collasso, è legata a questo valore.

Da questa espressione, che individua tutti i parametri dimensionali del problema, si è applicato il teorema π per individuare tutti i parametri adimensionali. I tre parametri che sono stati scelti per adimensionalizzare il problema sono la densità, la velocità nell'orifizio ed il diametro dell'orifizio. Utilizzando questi parametri si hanno le tre dimensioni fisiche fondamentali di massa [M], spazio [L] e tempo [T]. Non è possibile adimensionalizzare i parametri C e C_0 utilizzando il teorema di Buckingham perché il CFU è una concentrazione batterica che non può essere espressa con le tre dimensioni fisiche fondamentali.

Dopo l'utilizzo del teorema π con i parametri citati si è ottenuta la seguente espressione:

$$Cd^3 = f_2\left(C_0d^3, \frac{\rho v_h d}{\mu}, \frac{\rho v_h^2 d}{\gamma_s}, \frac{P_2 - P_v}{\rho v_h^2}, n_p, L^*\right)$$

Dove in L^* sono espressi i valori adimensionali geometrici quali $\frac{D}{d}$, $\frac{b}{d}$, n .

A seguito di questa analisi si è anche scelto di adimensionalizzare la concertazione, riportandola come una contrazione in funzione della concentrazione iniziale.

Si ottiene così la seguente funzione adimensionale:

$$\frac{C}{C_0} = f_3\left(C_0 d^3, \frac{\rho v_h d}{\mu}, \frac{\rho v_h^2 d}{\gamma_s}, \frac{P_2 - P_v}{\rho v_h^2}, n_p, \frac{D}{d}, \frac{b}{d}, n\right)$$

Dove si può notare che:

- $\frac{C}{C_0}$ indica l'efficienza disinfettante;
- $C_0 d^3$ indica la concentrazione iniziale;
- $\frac{\rho v_h d}{\mu}$ indica il numero di Reynolds nell'orifizio e descrive la turbolenza ed il flusso nel reattore;
- $\frac{\rho v_h^2 d}{\gamma_s}$ indica il numero di Weber, che lega la tensione superficiale con le forze d'inerzia e l'influenza delle bolle;
- $\frac{P_2 - P_v}{\rho v_h^2}$ indica il numero di cavitazione, che quantifica l'intensità della cavitazione;
- $\frac{D}{d}$, $\frac{b}{d}$, n indicano i parametri geometrici e descrivono le caratteristiche del flusso.

Il parametro $C_0 d^3$ è stato scelto arbitrariamente e, per com'è stato rappresentato, indica come l'efficienza dei reattori sia legata alle condizioni iniziali.

Il numero di Reynolds e i parametri geometrici descrivendo le caratteristiche del flusso indicano anche a quale sforzo i batteri vengono sottoposti.

A seguito di questa analisi si è potuto fare un confronto tra i principali esperimenti presenti in letteratura che utilizzano reattori con piastre forate o simili, che riportano sufficienti dettagli e che eseguono una disinfezione su batteri ad (eccezione degli esperimenti eseguiti da Badve et al. che si serve di zooplankton, un materiale biologico più complesso dei batteri). Molti studi hanno scelto di fare sperimentazioni su specie batteriche di *E. Coli* perché è spesso presente nell'acqua contaminata, è molto diffuso, le procedure per misurare la sua concentrazione è regolamentata a livello internazionale, è coltivabile in laboratorio e non è particolarmente dannosa a chi svolge gli esperimenti. Prima di fare il confronto è necessario prima riportare tutti i dati delle sperimentazioni forniti dagli autori. In tabella 4.1 sono riportati tutti i parametri forniti dagli autori delle sperimentazioni più importanti.

Tabella 4.1 – Parametri delle sperimentazioni di cavitazione idrodinamica con reattore a piastra forata o simile.

Authors (year)	Reactor type	Bacteria	Configuration	Holes area [mm ²]	α [mm ⁻¹]	β [-]	Q [l/s]	v_b [m/s]	P_1 [bar]	P_2 [bar]	σ_c	$\sigma_{\Delta P}$	V [l]	t [min]	Initial CFU [CFU/ml]	Final CFU [CFU/ml]	Disinfection efficiency															
Jyoti et al. (2001) [48]	Valve	Coliform	Valve	-	-	-	-	-	1.72	0*	-	0.57*	75	15	4580	3180 ± 10	30% ± 0.22%															
									3.44	0*	-	0.28*	75	15	4280	3780 ± 20	11% ± 0.22%															
									5.17	0*	-	0.19*	75	15	3940	3020 ± 10	23% ± 0.22%															
Kalumuck et al. (2003) [46]	DynaJets*	<i>E. coli</i>	DynaJets*	-	-	-	-	-	4.13-5.17	0	-	0.24*-0.19*	1.5	40	10 ^{8-10⁹}	10 ^{5-10⁶}	3 log															
									10.3	0	-	0.09*	1.5	120	10 ^{8-10⁹}	10 ^{4-10⁵}	5 log															
									10.3	0	-	0.09*	1.5	30	10 ⁷	10 ²	5 log															
Balasundaran et al. (2006) [49]	OP	<i>E. coli</i>	25 × 2 mm 1 × 12 mm 1 × 15 mm 1 × 17 mm 1 × 19 mm 1 × 22 mm	7.85E-05 1.13E-04 1.77E-04 2.27E-04 2.84E-04 3.80E-04	2.00 0.33 0.27 0.24 0.21 0.18	0.14 0.20 0.32 0.41 0.51 0.68	2.99 3.86 5.28 5.57 5.61 5.51	47 34 30 25 20 15	15	0	0	0.13 0.17 0.22 0.32 0.49 0.92	-	20	-	-	-	-														
																			1.26E-04	2.00	4.58	36.4	-	0	0.14	20	-	-				
																			1.28E-04	2.00	4.16	32.5	-	0	0.19	20	-	-				
																			1.28E-04	1.50	4.24	33.1	-	0	0.18	20	-	-				
																			7.85E-05	2.00	2.68	34.1	-	0	0.17	20	-	-				
																			9.82E-05	0.80	3.26	33.2	-	0	0.18	20	-	-				
																			1.54E-04	0.30	5.07	32.9	-	0	0.18	20	-	-				
																			1 × 0.10 + 1 × 0.16	-	-	355.7	900	-	0.154	-	-	1.4 × 10 ¹¹	-	-	-	100% in 3 passes
																			1 × 0.10 + 1 × 0.23	-	-	353.7	800	-	0.037	-	-	-	-	-	-	100% in 5 passes
																			1 × 0.10 + 1 × 0.23	-	-	353.7	800	-	0.037	-	-	-	-	-	-	100% in 6 passes
1 × 0.10 + 1 × 0.23	-	-	353.7	800	-	0.037	-	-	-	-	-	-	100% in 4 passes																			
1 × 0.10 + 1 × 0.23	-	-	353.7	800	-	0.037	-	-	-	-	-	-	100% in 3 passes																			
Sawant et al. (2008) [45]	OP OP OP Valve Valve Pump	Zooplankton	25% open 50% open 75% open 20% open 40% open -	7.85E-05 1.56E-04 2.35E-04 5.73E-06 2.73E-05	0.40 0.29 0.12 -	0.80 1.70 1.30 1.00 1.90 2.80	10 11 6 16 15 -	3.7 3.2 3.1 3.4 3.2 2.9	-	-	5.13 3.94 14.68 1.93 2.02 -	-	50 50 50 50 50 50	-	-	-	-	-	-	79% in 1 pass												
																				75% in 1 pass												
																				82% in 1 pass												
																				57% in 1 pass												
																				33% in 1 pass												
																				28% in 1 pass												
Arrojo et al. (2008) [12]	OP	<i>E. coli</i>	1 × 5 mm 6 × 2 mm 25 × 1 mm 25 × 1 mm 25 × 1 mm 25 × 1 mm	1.96E-05 1.88E-05 1.96E-05 1.96E-05 1.96E-05 1.96E-05	0.80 2.00 4 4 4 4	1.11 1.11 1.11 1.11 1.11 1.11	57 59 57 57 57 57	57 59 57 57 57 57	-	-	-	-	-	50 50 50 50 50 50	120 120 120 120 120 120	10 ⁷ 10 ⁷ 10 ⁷ 10 ² 10 ³ 10 ⁴	-	-	-	-	-	100%										
																						85%										
																						70%										
																						-										
																						-										
																						-										

Authors (year)	Reactor type	Bacteria	Configuration	Holes area [mm ²]	α [mm ⁻¹]	β [-]	Q [l/s]	v_h [m/s]	P_1 [bar]	P_2 [bar]	σ_v	$\sigma_{v,AP}$	V [l]	t [min]	Initial CFU [CFU/ml]	Final CFU [CFU/ml]	Disinfection efficiency		
Loraine et al. (2012) [47]	DynaSwirl*	<i>E. coli</i>	1 × 3.23 mm	8.19E-06	-	-	-	-	2.1	-	-	-	0.47*	2	60	10 ⁶	10 ¹	5 log	
			8 × 1.14 mm	8.17E-06	-	-	-	-	16.5	-	-	-	0.06*	1.8	120	10 ⁶	10 ¹	5 log	
			72 × 0.38 mm	8.17E-06	-	-	-	-	-	5.2	-	-	-	0.19*	2	240	10 ⁶	10	6 log
			1 × 4.5 mm	1.59E-05	-	-	-	-	-	3.45	-	0.33	-	0.28*	-	270	10 ⁷	-	4 log
			1 × 4.5 mm	1.59E-05	-	-	-	-	-	2.1	-	0.5	-	0.47*	-	60	10 ⁷	-	7 log
			1 × 4.5 mm	1.59E-05	-	-	-	-	-	1	-	1	-	0.98*	-	120	10 ⁷	-	4 log
			1 × 3.2 mm	8.04E-06	-	-	-	-	-	2.1	-	0.5	-	0.47*	2	210	10 ³ -10 ⁵ -10 ⁹	10 ²	7 log
			1 × 3.23 mm	8.19E-06	-	-	-	-	-	2.1	-	-	-	0.47	2	60	10 ⁷	10 ²	5 log
			8 × 1.14 mm	8.17E-06	-	-	-	-	-	16.5	-	-	-	0.06*	1.8	90	~ 10 ⁸	~ 10 ⁵	3 log
			8 × 1.14 mm	8.17E-06	-	-	-	-	-	16.5	-	-	-	0.06*	1.8	20	~ 10 ⁷	~ 10 ¹	6 log
Wang et al. (2015) [35]	OP	-	33 × 2 mm	1.04E-04	2.00	0.40	-	-	3.5	-	-	-	0.28*	25	60	10 ³	-	57.30%	
			33 × 2 mm	1.04E-04	2.00	0.40	-	-	4.0	-	-	-	0.24*	25	60	10 ³	-	60%	
			33 × 2 mm	1.04E-04	2.00	0.40	-	-	-	4.5	-	-	-	0.22*	25	60	10 ³	-	67.30%
			33 × 1 mm	2.59E-05	4.00	0.02	-	-	-	4.5	-	-	-	0.22*	25	60	10 ³	-	67%
			33 × 2 mm	1.04E-04	2.00	0.40	-	-	-	4.5	-	-	-	0.22*	25	60	10 ³	-	63%
			20 × 2 mm	6.28E-05	2.00	0.05	-	-	-	4.5	-	-	-	0.22*	25	60	10 ³	-	58%
			17 × 3 mm	1.20E-04	1.33	0.09	-	-	-	4.5	-	-	-	0.22*	25	60	10 ³	-	40%
			1 × 2 mm	3.14E-06	2.71	-	-	-	-	3	-	0.62	-	-	4	-	10 ⁷	-	15%
			1 × 2 mm	3.14E-06	2.71	0.006	0.48	87.8	80	-	80	-	-	-	40	30	10 ⁵	10 ³	98.30%
			1 × 2 mm	3.14E-06	2.71	0.006	0.48	109.8	100	-	100	-	-	-	40	30	10 ⁵	10 ²	99.96%
Filho et al. (2015) [52]	Nozzle	<i>E. coli</i>	1 × 2 mm	3.14E-06	2.71	0.006	0.48	109.8	100	-	-	-	-	40	30	10 ⁵	10 ¹	100%	
			1 × 2 mm	3.14E-06	2.71	0.006	0.48	131.8	120	-	120	-	-	-	40	30	10 ⁵	10 ¹	100%
Liu et al. (2016) [53]	OP	<i>E. coli</i>	49 × 1 mm	3.85E-05	-	0.048	0.56	-	2.5	0	0.92*	0.40*	20	120	1.60 × 10 ³	-	99%		

Come si può notare dalla tabella sono riportati sperimentazioni eseguite con reattori diversi dalla piastra forata, con reattori che hanno una simile configurazione, con valvole, la cui chiusura induce la cavitazione, e con pompe, dopo che è stata valutata la disinfezione causata dalla pompa stessa. Nella tabella sono riportate le diverse configurazioni dei reattori, ovvero l'apertura dalla valvola, oppure la forma, il numero e le dimensioni dei fori delle piastre. Sono riportati anche i parametri geometrici α e β descritti nei capitoli precedenti, il numero di cavitazione, il tempo di trattamento, le concentrazioni iniziali e finali, e l'efficienza disinfettante (la dicitura X log indica di quanti ordini di grandezza è ridotta la concentrazione batterica).

Avendo a disposizione sia l'analisi dimensionale che i dati della letteratura è possibile fare delle considerazioni ed un confronto tra i vari esperimenti. Si è proceduto a manipolare i dati affinché si potesse vedere quali parametri adimensionali idraulici restassero costanti durante le sperimentazioni. Questa operazione, anch'essa riportata nell'articolo di Burzio et al., viene riportata in tabella 4.2.

Tabella 4.2 – Analisi dimensionale sulla letteratura disponibile. (Fonte: Burzio et al., 2020)

Authors (year)	$C_{00}d^3$	$\frac{\rho \omega d}{\mu}$	$\frac{\rho v^2 d}{\gamma}$	$\frac{D}{d}$	$\frac{h}{d}$	$\frac{P_2 - P_1}{\rho v^2}$	n	n_T
Jyoti et al. (2001) [48]	x	x	x	x	x	x	x	x
Kalumuck et al. (2003) (a) [46]	x	x	x	✓	✓	x	x	✓
Kalumuck et al. (2003) (b) [46]	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Balasundaran et al. (2006) [49]	x	x	x	x	x	x	x	x
Balasundaran et al. (2011) [27]	x	x	x	x	x	x	x	x
Azuma et al. (2007) [50]	x	x	x	x	x	x	x	x
Sawant et al. (2008) [45]	x	x	x	x	x	x	x	x
Arrojo et al. (2008) (c) [12]	x	x	x	x	x	x	x	✓
Arrojo et al. (2008) (d) [12]	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Loraine et al. (2012) (e) [47]	x	x	x	✓	✓	x	x	✓
Loraine et al. (2012) (f) [47]	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Wang et al. (2015) (g) [35]	x	x	x	✓	✓	x	x	x
Wang et al. (2015) (h) [35]	x	x	x	x	x	x	x	✓
Badve et al. (2015) [51]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Filho et al. (2015) [52]	x	x	x	✓	✓	x	x	x
Liu et al. (2016) [53]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

In tabella 4.2 i parametri che variano sono indicati con una X, mentre i parametri costanti sono indicati con una ✓. Questo studio mette in evidenza come la maggior parte degli esperimenti, e quindi anche i loro risultati, non siano attendibili in quanto non i parametri adimensionali che governano il problema variano contemporaneamente. Le uniche due sperimentazioni che rispettano l'analisi dimensionale sono quelle di Arrojo et al. e di Loraine et al.. Alla luce di quanto espresso, gli esperimenti riportati in letteratura non permettono di poter analizzare l'influenza del singolo parametro, ma

studiano il problema nel complesso, per cui non è possibile stabilire come il singolo parametro influenzi la disinfezione mediante cavitazione idrodinamica.

Le sperimentazioni più recenti, anch'esse eseguite dagli autori Burzio et al. sono state strutturate al fine di rispettare l'analisi dimensionale e mostrano come l'incidenza del numero di cavitazione e della concentrazione iniziale sulla disinfezione in acqua contaminata da E. Coli.

4.2 Effetti del numero di cavitazione e concentrazione iniziale

Gli esperimenti in questione hanno studiato l'efficienza disinfettante di un reattore a piastra forata con 4 fori circolari da 2.5 mm. In particolare, è stato analizzato l'andamento della concentrazione in funzione della concentrazione iniziale e del numero di cavitazione, all'aumentare del numero di passaggi. Tutti gli altri parametri idraulici e fisici sono stati costanti. Le prove prevedevano di far scorrere un volume d'acqua contaminato noto attraverso un orifizio con l'ausilio di una pompa. Per essere certi che la disinfezione batterica non avvenisse per mezzo della pompa, sono stati eseguiti test preliminari senza il reattore che hanno evidenziato la sopravvivenza dei batteri.

In tabella 4.3 si riportano le caratteristiche di tre gruppi degli esperimenti eseguiti.

Tabella 4.3 – Caratteristiche idrauliche e geometriche dei tre gruppi di test.

σ_v [-]	Configuration	Holes area [m ²]	Q [l/s]	v_h [m/s]	P_1 [bar]	P_2 [bar]	V [l]	t [min]
0.20	4 × 2.5 mm	1.96E-05	0.6	30.5	7.5	0	21	30-360
0.40	4 × 2.5 mm	1.96E-05	0.6	30.5	7.5	1	21	30-120
0.65	4 × 2.5 mm	1.96E-05	0.6	30.5	7.5	2	21	30-240

Come riportato in tabella 4.3, il primo gruppo di prove ha studiato l'efficienza della disinfezione, al variare della concentrazione iniziale, con un numero di cavitazione pari a 0.2. In figura 4.1 sono riportati i risultati.

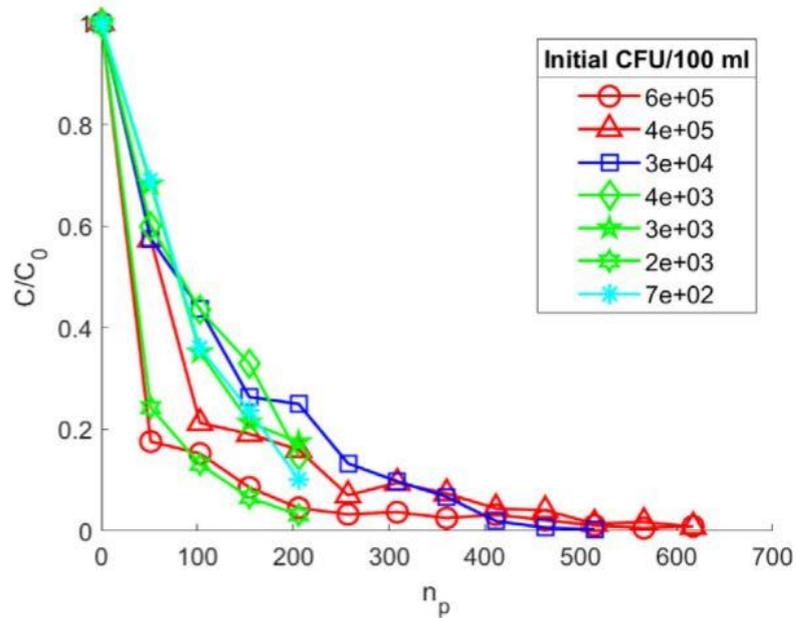


Figura 4.1 – Risultati delle prove con numero di cavitazione uguale a 0.2. (Fonte: Burzio et al., 2020)

Il grafico mostra un set di 7 prove con lo stesso numero di cavitazione ed una diversa concentrazione iniziale, che varia da un ordine di grandezza di 10^5 CFU/100ml ad uno di 10^2 CFU/100ml. Anche il tempo delle prove varia, infatti le prove durano da un minimo di 120 minuti ad un massimo di 360 minuti, il che corrispondono rispettivamente a 205 e 620 passaggi. In tutte le prove i campioni sono stati prelevati ogni 30 minuti.

Il secondo gruppo di prove ha studiato l'efficienza della disinfezione, al variare della concentrazione iniziale, con un numero di cavitazione pari a 0.4. In figura 4.2 sono riportati i risultati.

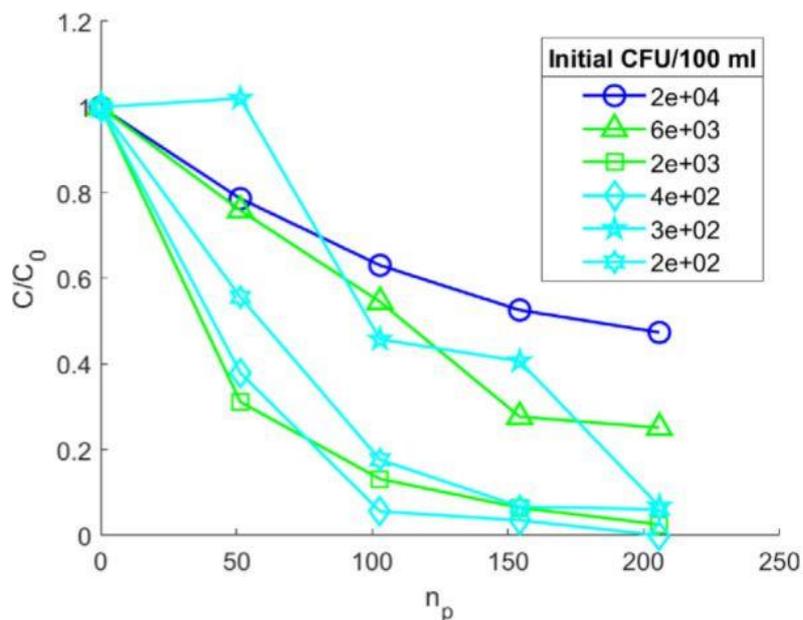


Figura 4.2 – Risultati delle prove con numero di cavitazione uguale a 0.4. (Fonte: Burzio et al., 2020)

Il grafico mostra un set di 6 prove con lo stesso numero di cavitazione ed una diversa concentrazione iniziale, che varia da un ordine di grandezza di 10^4 CFU/100ml ad uno di 10^2 CFU/100ml. Tutte le prove durano 120 minuti che corrispondono a 205 passaggi. In tutte le prove i campioni sono stati prelevati ogni 30 minuti.

L'ultimo gruppo di prove ha studiato l'efficienza della disinfezione, al variare della concentrazione iniziale, con un numero di cavitazione pari a 0.65. In figura 4.3 sono riportati i risultati.

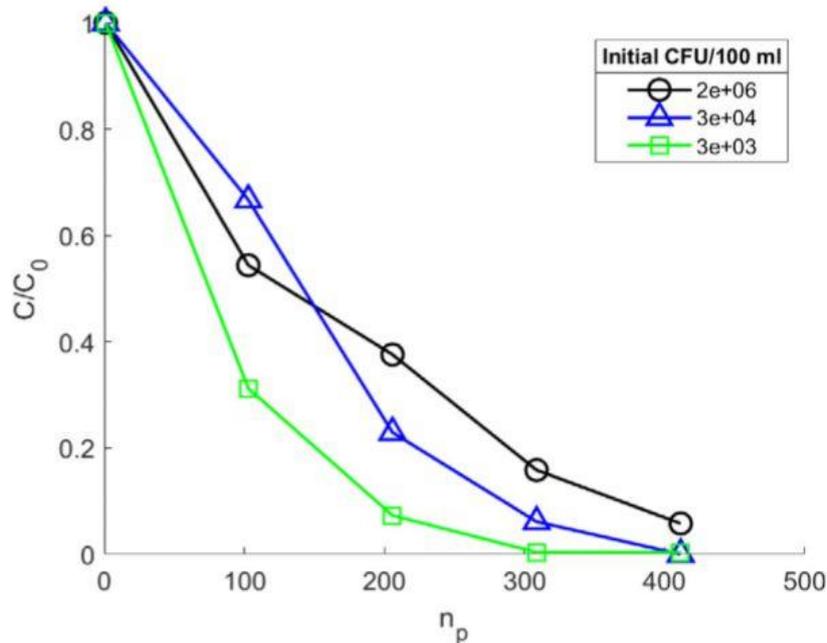


Figura 4.3 – Risultati delle prove con numero di cavitazione uguale a 0.65. (Fonte: Burzio et al., 2020)

Il grafico mostra un set di 3 prove con lo stesso numero di cavitazione ed una diversa concentrazione iniziale, che varia da un ordine di grandezza di 10^6 CFU/100ml ad uno di 10^3 CFU/100ml. Tutte le prove durano 240 minuti che corrispondono a 410 passaggi. In tutte le prove i campioni sono stati prelevati ogni 60 minuti.

In tutti gli esperimenti condotti si può notare come si riduca la concentrazione batterica. Tuttavia, a causa degli ampi intervalli di confidenza delle misurazioni non è possibile identificare significativi andamenti statistici. Inoltre, a differenza di quanto riportato dalla letteratura, non è evidente un chiaro effetto dato dalla concentrazione iniziale, in quanto l'andamento della concentrazione adimensionalizzata sulla concentrazione iniziale è simile. Un altro aspetto importante che queste prove mostrano riguarda l'assenza di un plateau iniziale, interpretato come una frammentazione delle colonie batteriche, piuttosto che come una reale disinfezione. Una possibile spiegazione a questa differenza può essere data dall'elevata differenza di concentrazioni batteriche utilizzate in queste prove.

In virtù di queste considerazioni sono state calcolate le medie e le deviazioni standard delle prove che possiedono lo stesso numero di cavitazione. I risultati sono riportati in figura 4.4.

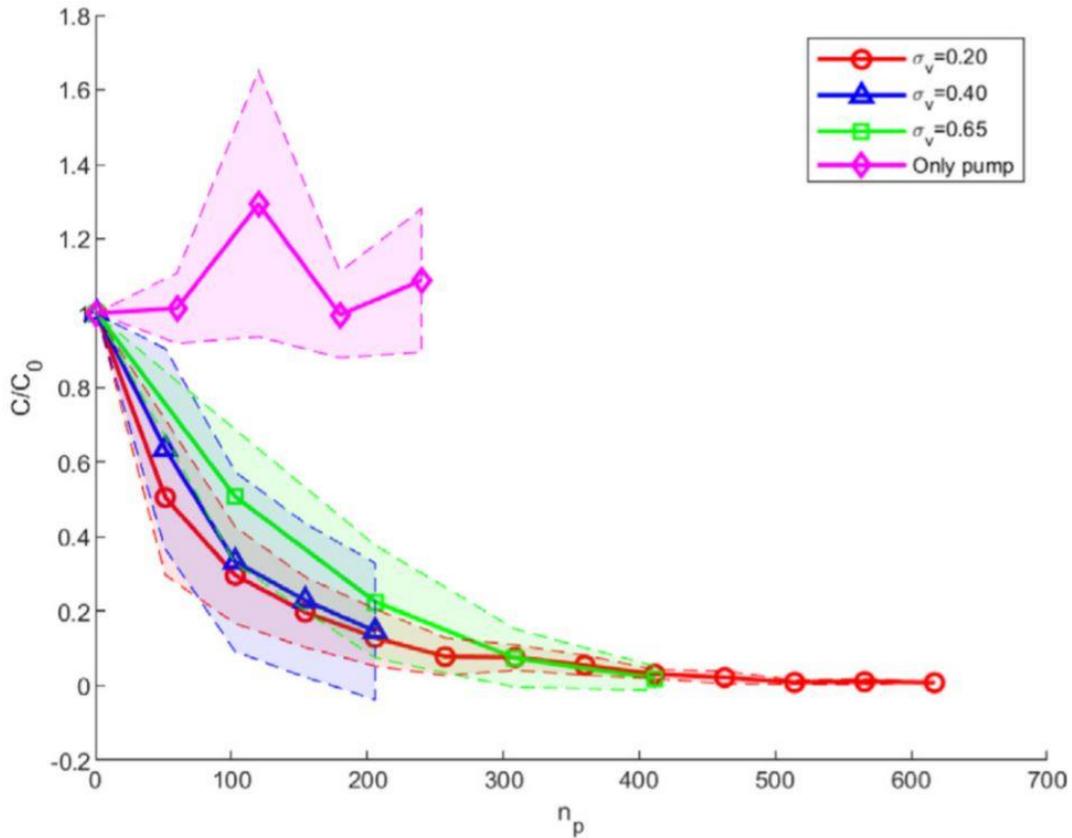


Figura 4.4 – Andamenti medi della disinfezione al variare del numero di cavitazione. (Fonte: Burzio et al., 2020)

La figura 4.4 mostra come la curva che possiede un numero di cavitazione minore scende più rapidamente rispetto alle altre. Questo risultato dimostra che tutte le ipotesi riguardanti la cavitazione siano corrette, ovvero al diminuire del numero di cavitazione si ha un'intensità del fenomeno maggiore, e quindi una disinfezione più efficiente.

Per quantificare questo valore, si sono riportati questi valori in un grafico semilogaritmico, riportato in figura 4.5, in cui si è estrapolata una legge esponenziale del tipo

$$\frac{C}{C_0} = e^{-r n_p}$$

Dove il valore r indica il tasso di riduzione batterica [-];

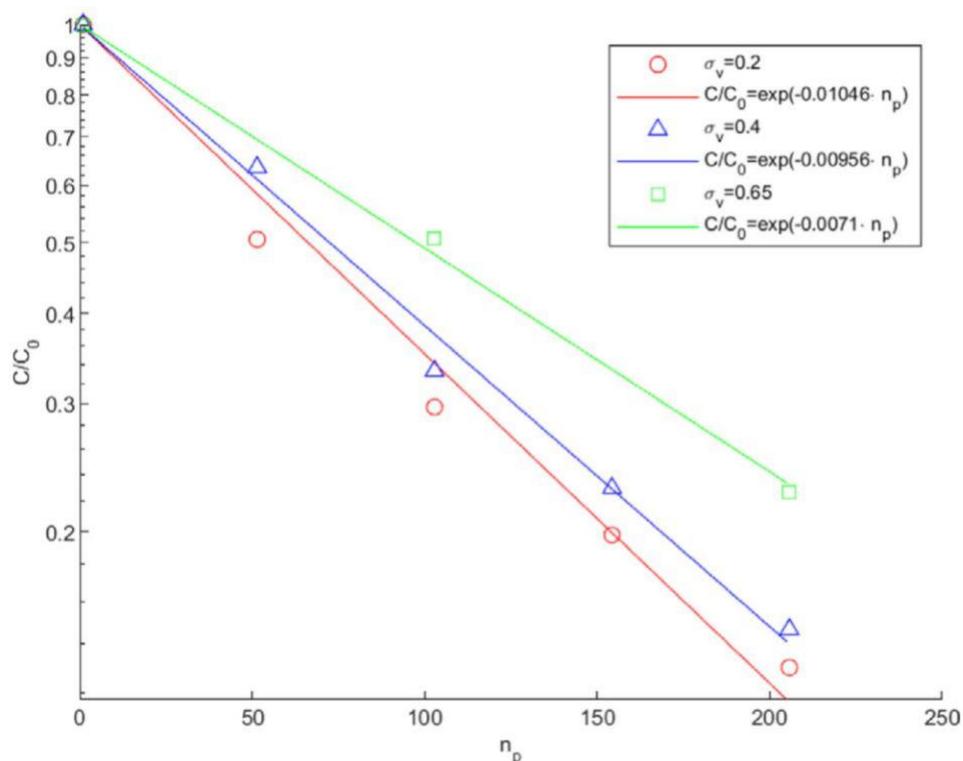


Figura 4.5 – Estrapolazione delle leggi esponenziali della disinfezione al variare del numero di cavitazione. (Fonte: Burzio et al., 2020)

Come si nota dall'equazione precedentemente esposta e dal grafico in figura 4.5, al diminuire del numero di cavitazione si ha un aumento del tasso di riduzione batterica. In tabella 4.5 si riportano i valori dei tassi di riduzione batterica per agevolare la lettura di questi andamenti. In aggiunta è riportato il valore del coefficiente di determinazione R^2 , molto vicino al valore unitario, per mettere testimoniare la bontà del raccordo dei dati.

Tabella 4.4 – Caratteristiche idrauliche e geometriche dei tre gruppi di test.

Cavitation number	$r(10^3)$	R^2
$\sigma_v = 0.2$	10.5	0.980
$\sigma_v = 0.4$	9.56	0.993
$\sigma_v = 0.6$	7.10	0.997

Nonostante si sia potuta compiere un'analisi del fenomeno basata sull'analisi dimensionale, rimangono ancora delle questioni aperte. Una di queste riguarda l'analisi di tutti i fattori che influenzano il problema, infatti non sono state considerate le micro-rugosità o i difetti del foro, così come anche le condizioni di flusso a monte della piastra e la chimica dell'acqua; questo perché sono difficili da indentificare con dei parametri. Per ovviare a queste problematiche, tutti gli esperimenti sono stati eseguiti con lo stesso impianto, la stessa piastra e si è utilizzata acqua ultra pura. Un altro aspetto importate

da considerare è la difficoltà operativa a mantenere costante i parametri adimensionali. Per esempio, il calcolo della velocità nell'orifizio è stato eseguito come il rapporto tra la portata e l'area della sezione contenete la piastra, il che non è corretto per i flussi cavitanti, dove si ha un sistema multifase e bisogna calcolare le velocità medie delle due fasi. La velocità è funzione del numero di cavitazione ed influenza il numero di Reynolds e Weber, per cui c'è una difficoltà operativa nel mantenere costanti i due termini se viene alterato il numero di cavitazione. Non è ancora noto se durante gli esperimenti queste piccole variazioni dei due numeri adimensionali abbiano portato effetti significativi alla disinfezione. L'ultima questione non risolta posta dall'articolo riguarda su quale fenomeno meccanico uccida effettivamente i batteri. Non è noto se i batteri muoiano a causa delle implosioni, della differenza di pressione, o per via degli stress meccanici imposti dall'elevata turbolenza. Fino a quando queste questioni resteranno aperte, sarà difficile progettare dei reattori su grandi scale che favoriscano la disinfezione dell'acqua. Il lavoro di tesi è basato sugli stessi approcci dell'articolo di Burzio et al., utilizzando una piastra forata da un solo foro, al fine di fornire una maggiore quantità di risultati attendibili e di poter quantificare la sensibilità dei microrganismi agli effetti meccanici indotti dai fenomeni cavitativi.

Capitolo 5

5. Metodo sperimentale

Il lavoro di tesi si preoccupa di analizzare gli effetti di alcuni parametri adimensionali, identificati dagli autori Burzio et al., sull'efficienza della disinfezione di acqua contaminata da E. Coli mediante cavitazione idrodinamica. Per fare ciò si è seguito il metodo sperimentale indicato nell'ultima pubblicazione menzionata, in quanto è possibile poter controllare i parametri idraulici adimensionali che governano il fenomeno.

Prima di eseguire le sperimentazioni si è proceduto alla costruzione di un adeguato impianto cavitazionale sperimentale, fornito di un sistema idraulico, un sistema di raffreddamento, un reattore cavitazionale, una strumentazione per prelievo dei campioni ed una strumentazione per il monitoraggio, acquisizione ed elaborazione dei dati.

L'impianto sperimentale è stato costruito in un locale dedicato, all'interno del laboratorio d'idraulica Giorgio Bidone, presso il Politecnico di Torino. La locazione dell'impianto è situata vicino ad un impianto elettrico al fine di fornire l'alimentazione necessaria alla pompa idraulica, alla strumentazione di monitoraggio ed al sistema di raffreddamento dell'impianto. Il locale è mostrato in figura 5.1.



Figura 5.1 – Fotografia del locale in cui è stato costruito l'impianto cavitazionale.

La costruzione dell'impianto sperimentale, eseguita durante i primi mesi della tesi, ha seguito le indicazioni del progetto realizzato dall'ingegner Vesipa Riccardo e dal precedente tesista Hammy Kalid.

Prima di procedere all'assemblaggio delle componenti idrauliche si è proceduto alla costruzione dell'impalcatura su cui poggia la struttura. L'impalcatura è fornita di due piani d'appoggio, uno ad un'altezza di circa 40 cm dal piano di calpestio e l'altro ad un'altezza di circa 2 metri. L'impalcatura è costituita da tubi di metallo uniti da morsetti in acciaio zincato e da delle tavole di legno verniciate ed impermeabilizzate. Le due superfici realizzate hanno una superficie di circa 2x4 metri. Per garantire un'adeguata pulizia del piano di lavoro, sulle tavole di legno sono state poste delle lastre in plexiglass. In figura 5.2 si mostra una fotografia dell'impalcatura e del piano di lavoro in fase di realizzazione.



Figura 5.2 – Fotografia dell'impalcatura e del piano di lavoro in fase di realizzazione su cui poggia l'impianto cavitazionale.

L'impianto idraulico costruito possiede una configurazione simile a quella utilizzata dai precedenti tesisti Garofano, Ricucci e Fuda, ed è possibile visualizzare una schematizzazione della struttura in figura 5.3.

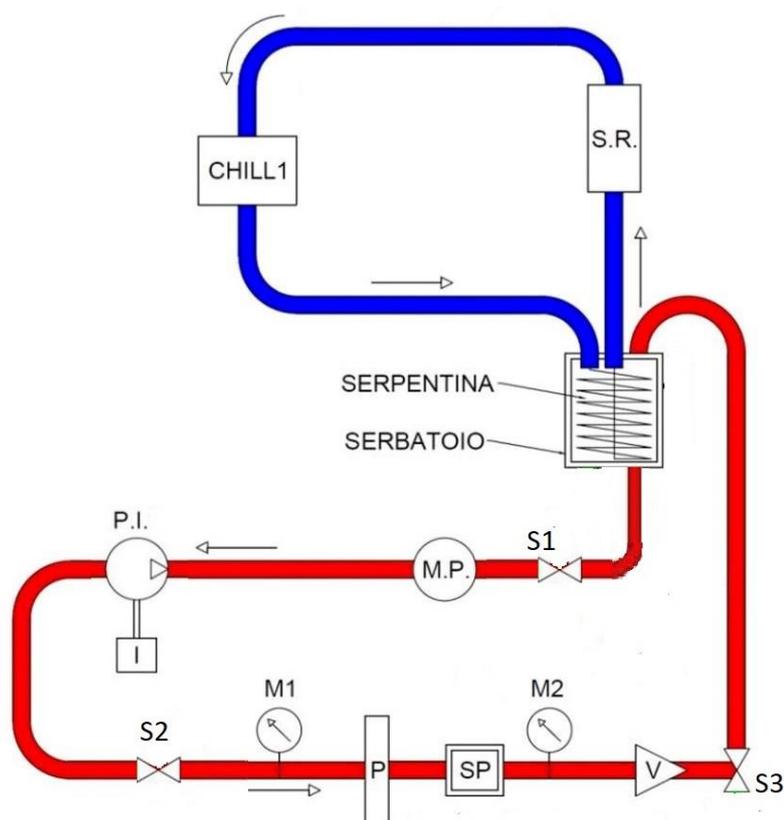


Figura 5.3 – Schematizzazione dell'impianto idraulico cavitazionale utilizzato per gli esperimenti di disinfezione.

La figura 5.3 mostra due circuiti di colore diverso. Quello in rosso è rappresentativo del circuito idraulico attraverso cui s'induce la cavitazione, mentre in blu viene visualizzato il circuito di raffreddamento. Nel circuito utilizzato non c'è un impianto di scarico, e lo svuotamento dell'impianto viene eseguito attraverso i tre scarichi. Per interpretare meglio lo schema, in tabella 5.1 viene riportata la legenda dei codici identificativi.

Tabella 5.1 – Legenda dei codici identificativi dello schema in figura 5.3.

Codice identificativo	Elemento
CHILL	Chiller
I	Inverter
M1	Manometro di monte
M2	Manometro di valle
M.P.	Misuratore di portata
P	Piastra forata
P.I.	Pompa idraulica
S1	Scarico 1
S2	Scarico 2
S3	Scarico 3
SERPENTINA	Serpentina impianto di raffreddamento
SERBATOIO	Serbatoio impianto idraulico
SP	Specola di vetro
S.R.	Serbatoio impianto di raffreddamento
V	Valvola per la gestione della pressione di valle

5.1 Impianto idraulico

L'impianto idraulico è costruito con tubazioni in acciaio inox di un diametro di 32 mm e, come si può vedere dalla figura 5.3, è formato da una pompa idraulica per accelerare il liquido, da una piastra forata per produrre la cavitazione, da una specola di vetro per visualizzare il fenomeno, da una valvola a sfera per controllare la pressione a valle della piastra, da tre rubinetti a sfera per lo scarico dell'impianto ed il raccoglimento dei campioni, da un serbatoio di accumulo in acciaio inox. La scelta del materiale è dettata dalle alte sollecitazioni a cui l'impianto è sottoposto. È importante aggiungere che si è scelto un acciaio inox 316, il quale è un materiale usato solo nell'industria alimentare. Si è fatta questa scelta perché ha la capacità di resistere meglio alle reazioni chimiche che avvengono durante la cavitazione e durante la pulizia del circuito, infatti il circuito precedente, formato da acciaio inox 304, dopo un certo numero di esperimenti ha rilasciato delle quantità di argento che uccidevano i batteri e falsavano gli esperimenti.

I collegamenti tra le tubazioni sono stati eseguiti tramite la saldatura all'estremità di elementi maschi, elementi femmina o flange alle tubazioni. In questo modo si è potuti procedere all'assemblaggio del sistema idraulico tramite avvitiamenti o inserimento di bulloni. In figura 5.4, 5.5 e 5.6 si riportano rispettivamente le immagini di tubazioni di acciaio inox, degli elementi maschi e femmina, e della flangia.



Figura 5.4 – Tubazioni acciaio inox. (Fonte: Fuda, 2018)



Figura 5.5 – Elemento di raccordo maschio (a sinistra) ed elemento di raccordo (a destra). (Fonte: Fuda, 2018)



Figura 5.6 – Flangia. (Fonte: Fuda, 2018)

La tenuta idraulica tra i vari elementi di raccordo è garantita dall'utilizzo di adeguate guarnizioni. In figura 5.7 viene mostrata la guarnizione tra gli elementi maschio-femmina delle tubazioni, mentre in figura 5.8 viene mostrata la guarnizione tra le flange.



Figura 5.7 – Guarnizione tra elementi maschio-femmina. (Fonte: Fuda, 2018)



Figura 5.8 – Guarnizione tra flange. (Fonte: Fuda, 2018)

Per inserire elementi come valvole di scarico e manometri e rubinetti a sfera, sono stati installati dei raccordi a T dotati di elementi racchio o femmina al fine di garantirne l'assemblaggio nell'impianto idraulico. In figura 5.9 si mostra un elemento di raccordo a T.



Figura 5.9 – Elemento di raccordo a T. (Fonte: Fuda, 2018)

Per poter eseguire l'assemblaggio tra i vari elementi utilizzati, si è utilizzata una chiave per raccordi. In figura 5.10 si riporta una chiave per raccordi.



Figura 5.10 – Chiave per raccordi. (Fonte: Fuda, 2018)

La circolazione dell'acqua all'interno dell'impianto è garantita da una elettropompa centrifuga multistadio verticale. In particolare, si tratta della pompa Lowara 3SV1, ed è mostrata in figura 5.11. Per l'alimentazione della pompa è necessaria una corrente di 380 V di corrente. La pompa utilizzata sviluppa una potenza di 1.1 kW, può generare una portata massima di 4.4 m³/h, e fornisce una prevalenza compresa tra 36.8 m e 81 m.



Figura 5.11 – Fotografia di elettropompa centrifuga multistadio verticale Lowara 3SV11.

La regolazione delle giranti viene regolata tramite l'utilizzo di un inverter che permette d'impostare la frequenza di rotazione. Al variare della frequenza di rotazione viene impostata la velocità del motore secondo la legge

$$n_{giri} = \frac{120 f}{n_{poli}}$$

Dove il numero di poli è pari a due. La capacità di variare la frequenza è possibile durante tutto il tempo di marcia del motore, permettendo di avere significativi risparmi energetici, in quanto si ha un utilizzo basato sulle richieste idrauliche desiderate. L'inverter è uno degli elementi più importanti, poiché, agendo sulla frequenza di rotazione è possibile impostare la velocità delle giranti e di conseguenza si possono impostare le condizioni idrauliche di portata e pressione desiderate. In questo modo è possibile impostare le condizioni al contorno per le diverse prove che sono state eseguite.

Un altro elemento altrettanto importante è la valvola a sfera inserita a valle della piastra forata, che permette di regolare la pressione di valle. In particolare, è possibile alzarla chiudendo parzialmente la valvola. In questo modo, in presenza di elevate portate, si facilita l'implosione delle bolle di cavitazione e si evita che queste circolino fino al serbatoio. Con l'ausilio di questo strumento e di un manometro di valle si sono potute impostare le pressioni per le diverse prove che sono state eseguite. Anche la valvola a sfera è realizzata interamente in acciaio inox 316. In figura 5.12 si riporta una fotografia della valvola a sfera utilizzata.

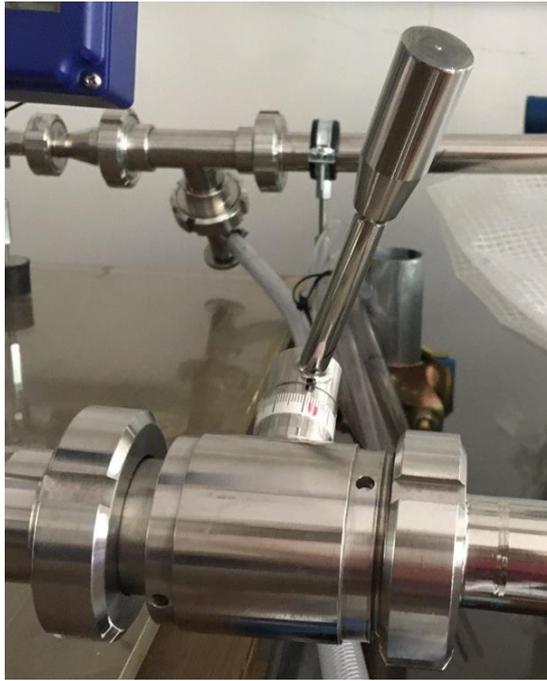


Figura 5.12 – Fotografia della valvola a sfera utilizzata.

L'impianto idraulico costruito è dotato anche di un serbatoio di accumulo, posto ad 'altezza di circa 2 metri dal piano di calpestio. Il serbatoio è stato costruito con 4 raccordi a T di tubazioni in acciaio inox 316, dal diametro di 128 mm ed un'altezza di 50 cm. È stata scelta questa soluzione progettuale per avere la possibilità di poter trattare diversi volumi e di poter realizzare diversi circuiti in futuro. In sommità dei serbatoi non è presente nessuna copertura a causa della presenza del circuito di raffreddamento, e per favorire l'inserimento dell'acqua, dei batteri e dell'acqua ossigenata. Come mostrato in figura 5.3, all'interno del serbatoio sono inserite le serpentine di raffreddamento del circuito. In figura 5.13 si mostra una fotografia del serbatoio descritto.



Figura 5.13 – Fotografia del serbatoio di accumulo.

Nel sistema idraulico viene utilizzata acqua Milli-Q ultrapura per evitare che i vari elementi presente nell'acqua possano alterare gli esperimenti di disinfezione dell'acqua. L'acqua viene ottenuta da un sistema di filtri posti in serie, e viene accumulata in un serbatoio di 100 l. L'immissione di questa acqua nel circuito idraulico avviene per mezzo di una pompa e di una tubazione in gomma che conduce l'acqua alla sommità del serbatoio. In figura 5.14 viene mostrata una fotografia dello strumento che produce l'acqua ultrapura e del serbatoio che la contiene.



Figura 5.14 – Fotografia dello strumento che produce acqua ultrapura e serbatoio di accumulo.

Per riassumere quanto detto in questo capitolo, il sistema idraulico è composto da un serbatoio di accumulo, da una pompa con inverter, da tubazioni e raccordi, tre rubinetti a sfera, e da una valvola a sfera, con all'interno dell'acqua ultrapura Milli-Q. In figura 5.15 viene rappresentato lo schema idraulico costruito.

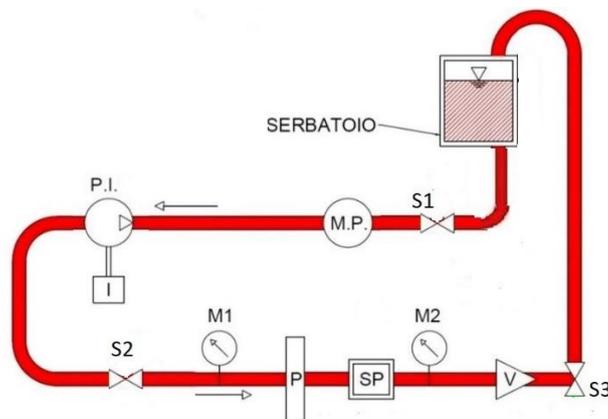


Figura 5.15 – Schema del sistema idraulico.

5.2 Reattori cavitazionali

Il reattore cavitazionale è costituito dall'insieme di piastra forata e struttura in acciaio. I reattori utilizzati durante gli esperimenti sono stati due. Il primo, quello provvisorio, è costituito da una struttura in acciaio inox ed un cilindro di vetro di 32 mm di diametro. Il vetro utilizzato è borosilicato, per cui è resistente agli sbalzi termici, ha un basso coefficiente di dilatazione termica, è dotato di resistenza agli agenti chimici, di robustezza e trasparenza. Tra la struttura d'acciaio e la struttura in vetro è inserita la piastra forata con le adeguate guarnizioni. Questo primo reattore, mostrato in figura 5.16 è stato utilizzato nell'attesa della realizzazione del secondo.

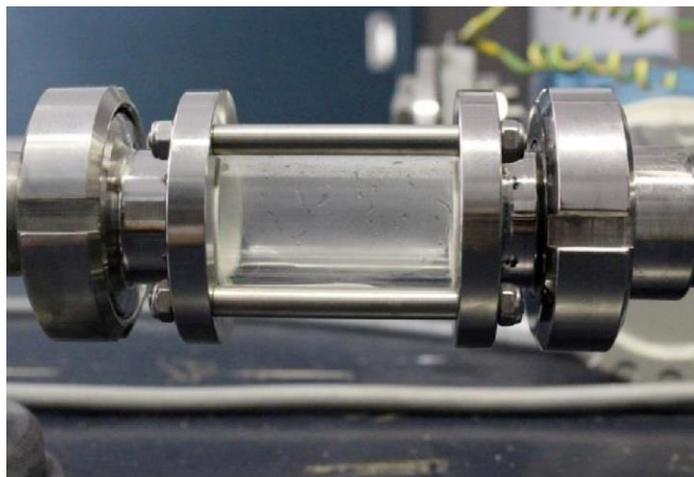


Figura 5.16 – Fotografia specola di vetro.

Il secondo reattore è costituito da due flange in acciaio inox DN32, una struttura in plexiglass e la piastra forata che viene inserita tra i due elementi. Questa struttura più grande permette di visualizzare meglio il fenomeno. Le flange sono state unite alla struttura in plexiglass con 8 bulloni del diametro di 12 mm. Anche questo reattore è unito al sistema idraulico tramite due raccordi femmina. Una fotografia del reattore è mostrata in figura 5.17.

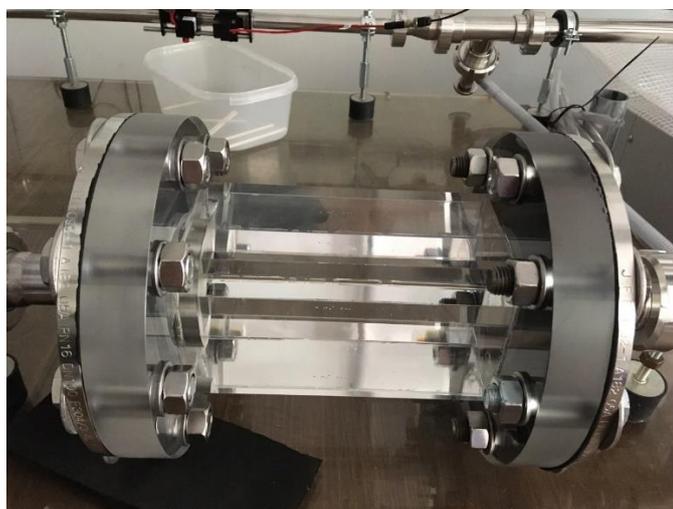


Figura 5.17 – Fotografia del reattore cavitazionale.

I reattori sono le componenti più importanti in quanto è in questa zona che la portata incontra una brusca riduzione della sezione ed aumenta la velocità. L'aumento della velocità causa la caduta di pressione al di sotto della tensione di vapore, per cui si ha l'insorgere del fenomeno della cavitazione idrodinamica.

Entrambi i reattori utilizzati permettono l'inserimento di piastre opportunamente forate, a seconda delle condizioni geometriche che si desidera analizzare.

Nella tesi sono state utilizzate solo due piastre: la prima è una piastra a 4 fori dal diametro di 2.5 mm per verificare che l'impianto funzioni correttamente, la seconda è una piastra ad un foro di 4.5 mm di diametro.

5.3 Sistema di raffreddamento

Come descritto in precedenza, il fenomeno fisico della cavitazione è un processo molto esotermico, per cui durante lo svolgersi delle prove la temperatura aumenta notevolmente fino a superare i 30 °C, temperature in cui i batteri proliferano. Per mantenere costante la temperatura si è predisposto un sistema di raffreddamento costituito da un chiller e da quattro serpentine in acciaio inox e tubazioni in multistrato. Una schematizzazione è riportata in figura 5.18.

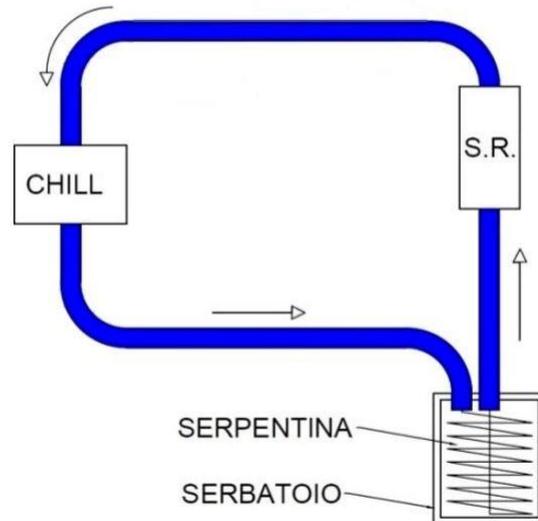


Figura 5.18 – Schematizzazione del sistema di raffreddamento.

Il sistema di raffreddamento refrigera l'impianto idraulico tramite scambio termico. In particolare, nel serbatoio avviene lo scambio di calore tra il liquido refrigerante nelle serpentine e l'acqua contenuta nel serbatoio.

Il chiller utilizzato è una macchina termica che, sfruttando la compressione e l'espansione dei gas refrigeranti, consente di sottrarre calore ad un fluido. Il chiller sfrutta il ciclo frigorifero di Kelvin. Questo ciclo prevede una prima compressione del gas refrigerante per

realizzare il passaggio di stato da gassoso a liquido, seguita da un'espansione realizzando il passaggio di stato da fase liquida a gassosa. Quando torna alla fase gassosa, si ha un'evaporazione del gas che sottrae calore al fluido.

Il chiller è dotato di un compressore, di un evaporatore e di un condensatore per eseguire le trasformazioni di stato necessarie al ciclo frigorifero. È anche dotato di una pompa idraulica per far scorrere il liquido all'interno delle serpentine. Il chiller è alimentato con acqua distillata e liquido antigelo in un rapporto pari 1 a 4, da 400 V di corrente elettrica; inoltre mantiene la temperatura del liquido frigorifero costante attorno al valore di 14 °C. In figura 5.19 si mostra una fotografia del chiller.



Figura 5.19 – Fotografia frontale del Chiller utilizzato.

Il liquido frigorifero parte dal chiller e, per mezzo di tubazioni in gomma e multistrato, scorre nelle serpentine all'interno del serbatoio. All'interno del serbatoio, per mezzo delle serpentine, avviene lo scambio di calore tra il liquido frigorifero e l'acqua, ed in questo modo si mantiene la temperatura dell'impianto idraulico costante, attorno al valore di 17 °C. Le serpentine hanno una forma a spirale e sono in acciaio inox per favore lo scambio di calore e per evitare che possano avvenire reazioni che possano alterare la sopravvivenza dei batteri. Una foto di una serpentina è presente in figura 5.20.



Figura 5.20 – Fotografia delle serpentine utilizzate.

Il collegamento tra questi due elementi è costituito prima da un raccordo in rame seguito da una valvola di non ritorno, per evitare che dopo lo spegnimento del chiller, il liquido frigorifero possa fare il percorso inverso. Alla valvola di non ritorno segue una tubazione in gomma, che ha il vantaggio di essere poco rigida ed ha permesso di spostare il sistema di raffreddamento con maggiore libertà nella posizione desiderata. Dopo che viene raggiunta la quota del serbatoio, il sistema di raffreddamento diventa in multistrato, un materiale che dissipa poco calore. Dalle tubazioni in multistrato si raggiungono le serpentine, e successivamente il liquido esegue il percorso inverso, ovvero arriva alle tubazioni in multistrato, raggiunge le tubazioni in gomma, per poi ritornare nel chiller, dove viene raffreddato. Nei punti più alti del percorso di mandata e ritorno sono presenti due valvole di sfogo per l'aria, al fine di non avere bolle d'aria nel sistema di raffreddamento. In figura 5.21 si riporta una fotografia del sistema di raffreddamento fuori dal serbatoio, ed in figura 5.22 si riporta una figura dell'impianto all'interno del serbatoio.



Figura 5.21 – Fotografia del sistema di raffreddamento fuori dal serbatoio.



Figura 5.22 – Fotografia del sistema di raffreddamento all'interno del serbatoio.

5.4 Strumentazione per prelievo e scarico

Il sistema idraulico, come già descritto è dotato di tre valvole di scarico, per poter prelevare i campioni durante le prove, e per poter pulire il circuito alla fine degli esperimenti.

I tre scarichi sono presenti nei punti più bassi del sistema, il quale è leggermente inclinato per favorire lo scorrimento dell'acqua durante il processo di svuotamento dell'impianto. Il sistema è stato pensato per evitare che siano presenti ristagni d'acqua all'interno del circuito quando non viene utilizzato. I punti dove sono stati inseriti gli scarichi sono subito dopo il serbatoio, subito dopo la pompa e dopo il reattore cavitazionale. Gli scarichi sono delle valvole a sfera realizzate con lo stesso materiale dell'impianto idraulico. Le valvole a sfera sono le più comode per prelevare i campioni con una certa frequenza. In figura 5.23 si riporta una fotografia degli scarichi con le valvole a sfera.



Figura 5.23 – Fotografia dello scarico con valvola a sfera.

Il prelievo dei campioni avviene aprendo la valvola e facendo scorrere l'acqua nel portacampioni riportato in figura 5.24.



Figura 5.24 – Fotografia dello scarico con valvola a sfera.

A fine dell'esperimento, alle valvole a sfera vengono aggiunte delle tubazioni in gomma per far scaricare tutta l'acqua utilizzata in appositi recipienti. In questo modo è possibile trasportare l'acqua negli appositi locali di smaltimento di acque contaminate in sicurezza, e senza contaminare altri elementi e strumenti. In figura 5.25 e 5.26 si riportano le fotografie

dell'impianto con le valvole dotate delle tubazioni in gomma per lo scarico, e le fotografie dei recipienti utilizzati.



Figura 5.25 – Fotografia dell'impianto idraulico con le tubazioni di scarico in gomma.



Figura 5.26 – Fotografia dei recipienti utilizzati per il trasporto dell'acqua contaminata.

5.5 Monitoraggio ed acquisizione dati

Per poter impostare le condizioni al contorno delle prove, e per poter controllare che queste non varino durante lo svolgimento dell'esperimento, sono stati installati diversi strumenti di monitoraggio per le diverse variabili. Gli strumenti in questione sono due manometri, un piezometro, un misuratore di portata ed un termometro. Gli strumenti utilizzati hanno tutti la capacità di trasferire i dati in continuo ad una scheda di acquisizione, e per mezzo di un computer è possibile elaborare le informazioni ottenute.

Per controllare le pressioni a monte ed a valle del reattore, e valutare così la caduta di pressione, sono stati utilizzati due manometri elettronici. I manometri in questione sono in acciaio inox e presentano all'interno una sottile membrana legata ad una resistenza. La variazione di pressione altera la dimensione della membrana, la quale si dilata ed altera la resistenza dello strumento elettronico. Dopo una calibrazione, dallo strumento si può leggere in continuo la misurazione della pressione, legata all'alterazione della resistenza. È importante conoscere questi valori per controllare in ogni momento che il numero di cavitazione non vari durante l'esecuzione delle prove. Questi strumenti hanno una precisione dell'ordine dei millibar e possono misurare pressioni che variano dai 160 millibar ai 16 bar. In figura 5.27 si riporta una figura dei manometri utilizzati.



Figura 5.27 – Fotografia dei manometri utilizzati.

Il piezometro viene utilizzato per monitorare il livello dell'acqua presente all'interno del circuito e del serbatoio. Conoscere il livello è importante perché ad esso è associato il volume contenuto nel circuito idraulico, e tramite la seguente equazione è possibile conoscere il numero di passaggi in funzione del tempo di trattamento.

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

Dove Q e V sono rispettivamente la portata nel circuito ed il volume d'acqua trattato.

Il piezometro, costituito da un tubo cristal per alimenti, viene montato prima dell'inizio della prova e viene smontato dopo aver spillato il primo campione. È stata fatta questa scelta perché si è scelto di montare il piezometro sulla terza valvola a sfera per lo scarico dell'impianto. La scelta della posizione è legata alla facilità di lettura ed alla possibilità di mantenere fermo il tubo all'impalcatura che regge il serbatoio tramite dei portagomma. Il piezometro in questione funziona con la valvola di scarico aperta seguendo il principio dei vasi comunicanti, ed è stata opportunamente tarata ad un'altezza che indica i 21 l d'acqua presenti nel circuito e serbatoio. In figura 5.28 viene mostrata una figura del piezometro montato funzionante.



Figura 5.28 – Fotografia del piezometro in funzione grazie alla valvola di scarico 3.

Per misurare la portata di un circuito che trasporta all'interno acqua ultrapura si è utilizzato un misuratore di portata che funziona tramite segnali. Lo strumento presenta all'interno dei componenti che lanciano il segnale all'interno del fluido, e sulla base della distanza che il segnale percorre per tornare al proprio sensore, si misura la portata. Il misuratore di portata, mostrato in figura 5.29, è stato inserito a metà tra il serbatoio e la pompa, per avere un flusso con meno turbolenze possibili.

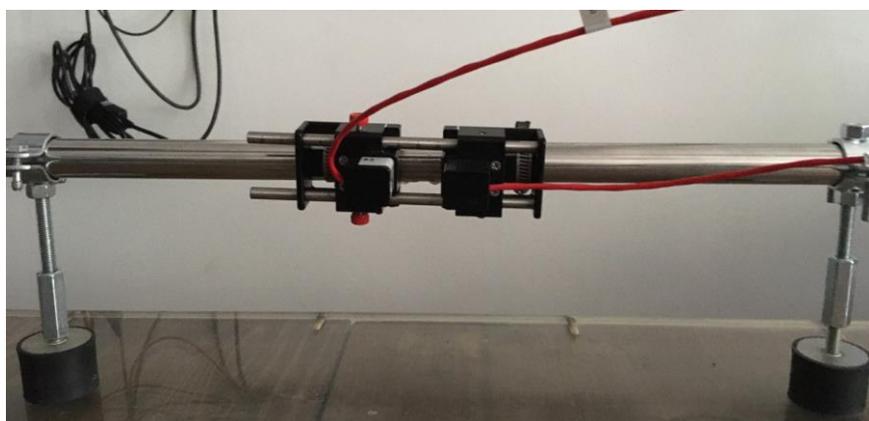


Figura 5.29 – Fotografia del misuratore di portata.

Questo apparecchio è dotato di una strumentazione per impostare le unità di misura, le dimensioni ed i materiali delle tubazioni, le costanti e indicazioni su come eseguire la misura. La strumentazione in questione, mostrata in figura 5.30 è dotata anche di un display per avere una lettura immediata.



Figura 5.30 – Fotografia della strumentazione per il settaggio delle variabili e per la visualizzazione istantanea della portata.

Inoltre, dalla strumentazione è possibile portare le misurazioni ad una scheda di acquisizione per l'elaborazione delle informazioni ottenute durante gli esperimenti.

La conoscenza della portata è importante per conoscere la velocità presente all'interno del foro, e per poter conoscere il numero di Reynolds del sistema.

Per il monitoraggio della temperatura è stata utilizzata una termocoppia a contatto con la tubazione del circuito idraulico. Avendo la struttura in acciaio inox, un materiale che è ad alta conduttività termica, la temperatura misurata dalla termocoppia può essere interpretata come la temperatura dell'acqua nel sistema idraulico. Lo strumento, mostrato in figura 5.31, trasferisce i dati alla scheda di acquisizione, e non permette di visualizzare la temperatura.

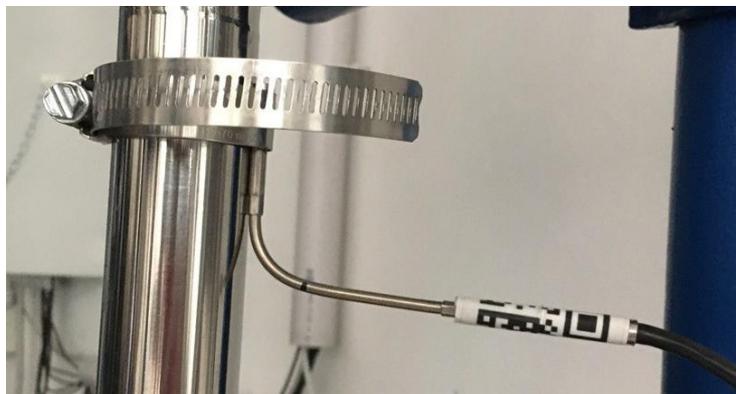


Figura 5.31 – Fotografia della termocoppia per la misurazione della temperatura.

La conoscenza della temperatura è importante per conoscere la pressione di vapore saturo, la viscosità dinamica del liquido e l'attività biologica dei batteri. Per conoscere la temperatura durante gli esperimenti, è stato creato un apposito programma al computer.

Tutti i sensori elettronici utilizzati sono sistemi DAQ basati su pc. Questi sistemi sono composti da sensori, hardware di misura DAQ ed un computer programmabile, e permettono di poter utilizzare funzioni avanzate di visualizzazione, elaborazione e connettività in modo efficace e flessibile.

L'hardware DAQ è l'interfaccia tra il computer ed i segnali che si vogliono misurare. Questi particolari hardware digitalizzano i segnali analogici affinché il computer possa interpretarli. Tutti i dispositivi DAQ sono composti da un circuito di condizionamento del segnale, da un Analog-to-Digital-Converter ed un bus di collegamento al computer. Il circuito di condizionamento gestisce il segnale affinché si possa adattare all'ingresso di un ADC, e può essere composto da un amplificatore, un attenuatore o dei filtri. L'ADC è un chip che fornisce la rappresentazione di un segnale analogico in un determinato momento. Più precisamente un ADC acquisisce un campionamento periodico del segnale analogico all'intervallo stabilito. Il computer bus trasferisce il campionamento dei segnali al computer, il quale poi rielabora il segnale originale. In figura 5.32 è riportata una schematizzazione di un hardware DAQ.



Figura 5.32 – Schematizzazione hardware DAQ.

I dispositivi DAQ si collegano al computer tramite uno slot, riportato in figura 5.33, chiamato scheda di acquisizione dati.



Figura 5.33 – Scheda acquisizione dati NATIONAL INSTRUMENT NI USB-6009.

La scheda di acquisizione usata è una NATIONAL INSTRUMENT NI USB-6009. Questa scheda possiede un sistema Input/Output analogico e digitale ad un costo accessibile. Il collegamento della scheda di acquisizione al computer è eseguito tramite cavo USB. L'elaborazione e la visualizzazione delle informazioni sul computer avvengono con il software LabView della NATIONAL INSTRUMENT.

Per rendere possibile il funzionamento della pompa, dell'inverter e di tutti gli strumenti di monitoraggio ed acquisizione dei dati, è stato installato nel locale un apposito quadro elettrico. Il quadro, come mostrato in figura 5.34, è dotato di un interruttore di accensione generale in alto a destra e di un sistema di ponteggi a basso voltaggio in fondo a sinistra, al quale sono allacciati gli strumenti di misurazione. In alto a sinistra si può vedere l'inverter ed in basso a destra è presente lo strumento per l'elaborazione dei dati della termocoppia. Lo strumento arancione è l'alimentatore della pompa. Il quadro elettrico non viene mai aperto e, nel caso dovessero accadere dei malfunzionamenti, è dotato di un pulsante d'emergenza che interrompe il flusso elettrico.

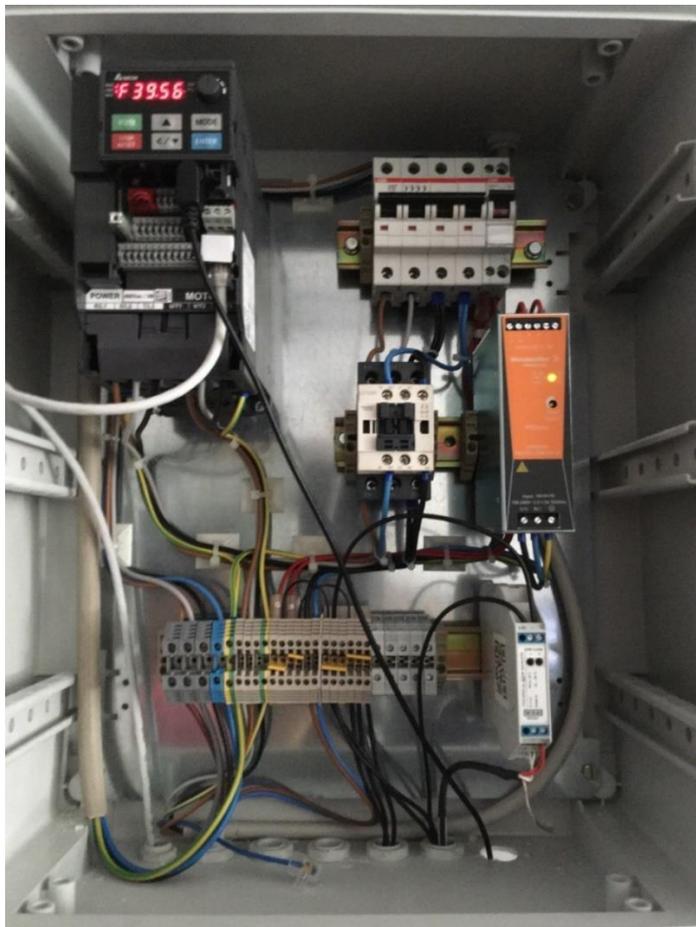


Figura 5.34 – Fotografia del quadro elettrico del circuito idraulico e degli strumenti di acquisizione.

Il chiller non è collegato al quadro mostrato in figura 5.34 perché necessita di una potenza elevata. Pertanto, è stata inserita una presa industriale trifasica dedicata al solo funzionamento dello strumento di raffreddamento dell'impianto.

Per garantire gli adeguati standard di sicurezza, all'ingresso del locale in cui è presente il circuito di cavitazione è affissa una cartellonistica informativa delle avvertenze e dei dispositivi di protezione individuale da utilizzare. Inoltre, l'accesso non è consentito a tutti gli utenti, ma solo al personale autorizzato ed istruito. In figura 5.35 si mostra il cartellone descritto.



Figura 5.35 – Fotografia del cartellone informativo delle avvertenze.

Capitolo 6

6. Protocollo sperimentale

Tutti gli esperimenti eseguiti durante il lavoro di tesi hanno seguito un protocollo sperimentale ben definito, al fine di definire le capacità disinfettive dell'impianto cavitazionale costruito. Per fare tale valutazione, il circuito permette il settaggio dei parametri adimensionali idrodinamici sfruttando la possibilità di poter impostare configurazioni impiantistiche precise. Lo scopo principale delle prove è quello di approfondire gli studi condotti da Burzio et al..

Gli esperimenti eseguiti sono classificabili in due gruppi. Il primo riguarda tutti gli esperimenti di controllo. Sono prima stati svolti degli esperimenti di sopravvivenza dei batteri, dove è stata valutata la funzionalità dell'impianto, l'affidabilità del metodo di analisi batteriologica e la presenza di disinfettante residuo. In seguito, sono stati eseguiti degli esperimenti di disinfezione con un reattore cavitazionale a piastre forate a 4 fori dal diametro di 2.5 mm per controllare che la configurazione del circuito sia accettabile. Il secondo gruppo di esperimenti sono mirati alla valutazione della disinfezione con un reattore a piastra forata ad un foro dal diametro di 4.5 mm.

Il protocollo sperimentale che è stato eseguito in tutti gli esperimenti ha lo scopo di poter ripetere gli stessi esperimenti anche a distanza di tempo, senza alterare i risultati.

Il protocollo sperimentale, che tutte le prove hanno dovuto seguire, si può sintetizzare in tre passaggi quali azioni preliminari all'esecuzione delle prove, esecuzione degli esperimenti e pulizia finale dell'impianto. Tutte le prove hanno seguito le seguenti operazioni nell'ordine in cui verranno presentate.

6.1 Azioni preliminari

Le prime azioni da compiere sono quelle di lavaggio delle singole componenti idrauliche con un detersivo comune e non aggressivo per stoviglie, e quelle di asciugatura di tali componenti con carte assorbenti. A seguito dell'asciugatura, si procedere all'assemblaggio dei pezzi del circuito idraulico, come descritto nel capitolo 5 e come riportato in figura 6.1.



Figura 6.1 – Fotografia del circuito assemblato.

Come mostra la figura 6.1 le componenti da montare e numerate sono:

- 1) Tubo \varnothing 32;
- 2) Scarico;
- 3) Riduzione \varnothing 32-20;
- 4) Tubo \varnothing 20;
- 5) Misuratore di portata;
- 6) Allargamento \varnothing 20-32;
- 7) Curva;
- 8) Pompa;
- 9) Specola;
- 10) Curva;
- 11) Accoppiamento maschio-maschio;
- 12) Scarico;
- 13) Accoppiamento m-m;
- 14) Manometro di monte;
- 15) Specola-reattore;
- 16) Manometro di valle;
- 17) Accoppiamento m-f (saldato);

- 18) Valvola a sfera;
- 19) Tubo Ø 32;
- 20) Scarico

A seguito dell'assemblaggio del circuito, si procede ad accendere tutte le componenti dell'impianto. Si arma il fungo al lato del quadro elettrico, ruotandolo nel verso della freccia, per alimentare il quadro elettrico. In seguito, si attacca la presa di corrente del misuratore di portata e se ne verifica il corretto funzionamento. Successivamente si accende l'interruttore della presa a muro a cui è collegato il chiller. Dopo questi passaggi si procede ad accendere il computer, ad aprire il programma LabView per l'acquisizione dei dati fluidodinamici, e ad aprire il programma Delta VFDsoft per utilizzare l'inverter della pompa.

Nel caso in cui l'impianto non dovesse essere stato utilizzato per più di due settimane, è necessario procedere alla sanificazione dello stesso seguendo le procedure indicate nel capitolo 6.3 di pulizia finale dell'impianto.

Prima dell'inizio delle prove si riempie il serbatoio del chiller con il fluido refrigerante costituito da una miscela di acqua demineralizzata e glicole propilenico, e si accende attraverso l'apposito interruttore per evitare che gli incrementi di temperatura del fluido possano incidere sulla vitalità dei batteri, alterando così i risultati. In questo modo si garantisce che la temperatura non superi mai i 30°C, temperatura discriminante per l'interruzione di qualunque esperimento che preveda l'utilizzo di cariche batteriche.

Dopo aver assemblato l'impianto, ed aver acceso tutte le componenti elettriche del circuito, si procede al carico dell'impianto.

Come azione preliminare si procede ad indossare gli appositi dispositivi di protezione individuale quali guanti monouso, occhiali protettivi e camice di laboratorio per evitare un possibile contatto con la miscela acqua-batteri o con i reagenti usati per il lavaggio del circuito idraulico.

I guanti monouso, riportati in figura 6.2, sono composti di nitrile, un materiale di origine sintetica derivante dalla polimerizzazione dell'Acrylonitrile e del Butadiene. Questi guanti hanno una resistenza meccanica e chimica superiore ai guanti in lattice, pur mantenendo le ottime caratteristiche di elasticità, sensibilità ed ergonomia. Non presentano polveri, per cui sono ideali ad evitare le contaminazioni dei campioni.



Figura 6.2 – Guanti in nitrile.



Figura 6.3 – Occhiali protettivi.

Per caricare l'impianto idraulico si devono chiudere tutti gli scarichi, collegare il piezometro allo scarico più vicino ed aprirlo, aprire il rubinetto inferiore del serbatoio dell'acqua Milli-Q, inserire il tubo di prelievo nel serbatoio ed accendere l'interruttore della presa a cui è collegata la pompa.

Durante il primo gruppo di esperimenti l'impianto deve contenere 21 l, mentre nei successivi l'impianto deve contenere 23 l. Per garantire tali volumi, nel serbatoio s'inseriscono prima 20 litri d'acqua con l'ausilio del piezometro appositamente tarato per segnare tale quantità. I restanti litri verranno inseriti nei passaggi successivi.

Dopo aver riempito il serbatoio si scollega il piezometro e si procede ad azionare la pompa del circuito da remoto, portandolo gradualmente alla frequenza di 50 Hz, al fine di eliminare le bolle d'aria presenti nel circuito. Per eliminare tutta l'aria presente, si sfiata gradualmente la pompa, come mostrato in figura 6.4, fino alla frequenza di 50 Hz.

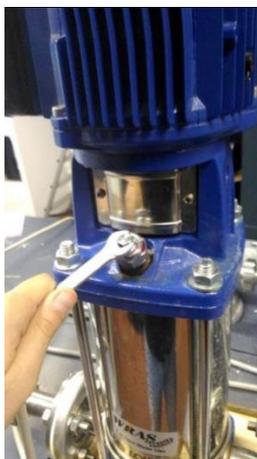


Figura 6.4 – Sfiato della pompa idraulica.

Dopo aver eliminato le bolle d'aria, si diminuisce gradualmente la frequenza della pompa, fino a 15 Hz per poter inserire nel circuito la carica batterica ed iniziare gli esperimenti.

6.2 Esecuzione delle prove

Quando sono state eseguite tutte le azioni preliminari si procede all'esecuzione delle prove.

S'inscrive un litro di acqua milli-Q con la carica batterica di E. Coli più altri due litri senza carica batterica, avendo cura di non formare aerosol, e si mantiene la pompa alla frequenza di 15 Hz per cinque minuti per permettere la miscelazione dei batteri. Il litro con la carica batterica fornito dalla SMAT è riportato in figura 6.5.



Figura 6.5 – Carica batterica di E. Coli.

Al termine dei cinque minuti viene prelevato il campione etichettato con data-ora-numero campione- temperatura, con numero campione pari a zero. Il campione in questione stabilisce la quantità iniziale di batteri presenti.

Una volta aver spillato il campione iniziale, s'impostano i parametri per l'esecuzione della prova, ed in particolare si aumenta la frequenza gradualmente fino al raggiungimento del numero di cavitazione desiderato. Per eseguire questo passaggio con precisione sono state costruite le curve idrauliche del circuito. In questo modo si è controllato che gli altri parametri idraulici adimensionali non variassero.

Dopo aver impostato tutti i parametri, si manda in esecuzione il programma di acquisizione dati LabView, e si preleva un campione ogni 30 minuti, fino al raggiungimento del numero di campioni desiderato. I campioni si ottengono prelevando circa 20 ml d'acqua dal circuito nel recipiente sterile monouso ermeticamente chiuso e riportato in figura 6.6.



Figura 6.6 – Recipiente dei campioni prelevati.

Tutti i campioni che vengono prelevati sono riposti in un apposito frigorifero per mantenerlo alla temperatura di 4°C. Il giorno seguente tutti i campioni della prova vengono portati alla SMAT mediante l'utilizzo di una borsa termica, per permettere l'analisi batteriologica. Il frigorifero in cui vengono conservati i campioni è riportato in figura 6.7.



Figura 6.7 – Frigorifero dove vengono conservati i campioni.

A termine dell'esperimento si procede allo scarico dell'impianto, spegnendo l'inverter, bloccando il programma di acquisizione dati LabView, ed aprendo i tre scarichi del circuito. Il circuito viene svuotato in delle taniche, e viene sanificata con l'aggiunta di ipoclorito di sodio. Le taniche con il liquido refluo successivamente vengono scaricate in fognatura. Tutti i dati acquisiti con LabView verranno poi successivamente elaborati con Matlab per analizzare la variabilità dei parametri idraulici all'interno del circuito.

6.3 Pulizia finale dell'impianto

Una volta terminato l'esperimento, l'impianto idraulico necessita di essere disinfettato per poter essere nuovamente utilizzabile senza alterare la bontà delle prove successive. Per la rimozione delle cariche batteriche residue è stato pensato un apposito protocollo di pulizia del circuito.

Per pulire l'impianto s'introducono nel circuito 23 l di acqua milli-Q e si prepara una soluzione di 100 ml di perossido d'idrogeno 130 volumi e 400 ml di acqua milli-Q.

Successivamente si accende l'inverter della pompa e lo si porta ad una frequenza di 15 Hz, una frequenza tale che favore la miscelazione. Infatti, in questo momento viene inserita la soluzione acqua-perossido d'idrogeno nel circuito. La soluzione disinfettante viene fatta agire per un'ora. Trascorsa l'ora in questione, viene spento l'inverter e si scarica l'acqua nelle taniche, per poi portarla in fognatura.

Dopo aver disinfettato l'impianto, si effettua un lavaggio con acqua milli-Q a 30 Hz per venti minuti. In seguito, si preleva un campione per determinare la concentrazione residua di perossido tramite misura fotometrica. Successivamente si procede a scaricare l'impianto nella fognatura tramite le taniche. Questi ultimi passaggi di lavaggio vengono effettuati fino a quando non si ottiene una concentrazione di perossido d'idrogeno pari a zero.

Finito il lavaggio dell'impianto, si lasciano aperti gli scarichi e si scollegano la pompa ed il reattore, per permetterne l'asciugatura del circuito.

Tutte le superfici dei piani di lavoro e le zone venute a contatto con la soluzione batterica vengono pulite con una soluzione di etanolo al 70%.

Nel caso in cui si verificasse uno spargimento accidentale della miscela acqua-batteri si applica la seguente procedura:

1. Asciugare con della carta assorbente, fino a completa rimozione dell'acqua;
2. Gettare la carta assorbente usata nell'apposito bidone per rifiuti biologici;
3. Sterilizzare la superficie entrata in contatto con la miscela con una soluzione di alcool etilico;
4. Sciacquare la superficie con acqua e asciugare.

Tutte queste procedure di pulizia con etanolo non possono essere eseguite sul reattore in plexiglass perché c'è il rischio di opacizzazione di quest'ultimo.

Alla fine di ogni giornata di esperimenti si deve premere il fungo per staccare l'alimentazione al quadro elettrico del circuito.

Capitolo 7

7. Esperimenti eseguiti

Il lavoro di Tesi presentato ha lo scopo di indagare l'efficacia disinfettiva dell'impianto di cavitazione progettato ed installato presso il Laboratorio di idraulica Giorgio Bidone del Politecnico di Torino. Il progetto, nato dalla collaborazione tra Politecnico e SMAT, è oggi giunto allo studio degli effetti cavitazionali su particolari cariche batteriche: gli E. coli.

Tutto il lavoro di tesi è incentrato sull'analisi di questi effetti, sulla base di quanto pubblicato da Burzio et al..

SMAT, partner del progetto, ha svolto un ruolo essenziale per quanto riguarda la fornitura delle cariche batteriche, oltre che nelle analisi bio-chimiche; proprio i risultati di queste ultime sono stati utili per orientarsi nello studio di nuove. Tutti gli esperimenti sono codificati secondo la sigla "Exp(numero)", per una più chiara identificazione.

Il presente capitolo mira a descrivere e comparare in maniera completa ed esaustiva le diverse tipologie di esperimenti, ponendo l'attenzione su parametri fondamentali e sull'influenza che questi hanno sul risultato ottenuto.

7.1 Metodo di analisi batteriologica

Per l'enumerazione degli E. coli presenti nei campioni è stata seguita la procedura ISO 9308-2:2012 che utilizza il metodo Colilert-18/Quanti-Tray, messo appunto dalla IDEXX Laboratories.

Colilert utilizza la Defined Substrate Technology (DST) per rilevare i coliformi totali e l'E. coli nell'acqua. Il metodo è basato sulla tecnologia enzimatica batterica che, mediante l'idrolisi del substrato diagnostico batterico fluorogene e cromogene, segnala la presenza dei batteri. Il test Colilert-18 utilizza due indicatori, ONPG (o-Nitrofenile β -D galattopiranozid) e MUG (4metilumbelliferil- β -D-glucuronide). L'indicatore ONPG scioglie mediante l'enzima β -Dgalattosidasi i batteri coliformi, la cui presenza è evidenziata dalla colorazione gialla del campione che appare nei pozzetti di prova. La presenza dei batteri coliformi viene confermata dopo un periodo di incubazione di 18-22 ore ad una temperatura di $44,5 \pm 0,2^\circ\text{C}$. Il substrato MUG viene sciolto dagli Escherichia coli in combinazione con l'enzima β -D-glucuronide. Osservato sotto una lampada UV il 4-MU (4-metil-umbelliferil) assume un colore blu fluorescente. La presenza di E. coli viene evidenziata dopo un periodo di incubazione di 18-22 ore a $35 \pm 0,5^\circ\text{C}$.

Poiché la maggior parte dei non coliformi non ha questi enzimi, non è in grado di crescere ed interferire. I pochi non coliformi che hanno questi enzimi vengono selettivamente soppressi dalla matrice specificamente formulata del Colilert. Sfruttando queste specifiche caratteristiche, non si necessita di prove di conferma, si ottengono i risultati in tempi più rapidi e con maggiore accuratezza, e si minimizzano i falsi positivi ed i falsi negativi.

Il metodo analitico descritto nella ISO 9308-2:2012 viene utilizzato per la determinazione di *E. coli* nelle acque destinate o da destinare al consumo umano e in quelle ad uso ricreativo. La ISO segue il metodo QuantiTray basata sul MPN (Most Probable Number) e permette di determinare simultaneamente la concentrazione di *Escherichia coli* e coliformi in un determinato volume di acqua; questo mediante una stima statistica calcolata in funzione del numero di pozzetti positivi e negativi. Il nuovo metodo sfrutta una caratteristica intrinseca dei batteri analizzati: gli *E. coli*, metabolizzando il nutriente indicatore MUG, producono fluorescenza nei pozzetti quando esposti ad una lampada a luce ultravioletta; i coliformi, metabolizzando il nutriente indicatore ONPG, producono una colorazione giallastra dei pozzetti.

Il Colilert-18 fornisce i propri risultati dopo appena 18 ore di incubazione; tuttavia, in caso di ambiguità sull'interpretazione della colorazione e della fluorescenza, è possibile prolungare questa fase di altre 4 ore, senza comunque superare le 22 ore complessive. Terminata l'incubazione si procede al riconoscimento dei pozzetti positivi e negativi, relativamente alla Presenza/Assenza (PA) dei batteri. Per i coliformi, le condizioni interpretative dei pozzetti sono riportate in Tabella 7.1.

Tabella 7.1 – Interpretazione colorimetrica dei risultati.

Aspetto	Risultato
Colore giallo meno intenso del comparatore quando viene incubato a $35\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ o a $44,5\pm 0,2^{\circ}\text{C}$	Negativo per coliformi totali ed <i>E. coli</i> ; negativo per coliformi fecali
Colore giallo uguale o più intenso del comparatore quando viene incubato a $35\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	Positivo per coliformi totali
Colore giallo uguale o più intenso del comparatore quando viene incubato a $44,5\pm 0,2^{\circ}\text{C}$	Positivo per coliformi fecali
Colore giallo e fluorescenza uguali o più intensi del comparatore quando viene incubato a $35\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	Positivo per <i>E. coli</i>

In figura 7.1 si riporta un confronto colorimetrico tra un comparatore ed un campione.



Figura 7.1 – Confronto colorimetrico tra comparatore e campione incubato.

Per gli E. coli occorre individuare la fluorescenza dei pozzetti con una luce a raggi ultravioletti da 366 nm, entro circa 13 cm dal campione in un ambiente non illuminato. La luce UV deve essere diretta verso il campione in direzione opposta agli occhi dell'operatore. In figura 7.2 si riporta la fluorescenza per il riconoscimento degli E. Coli.

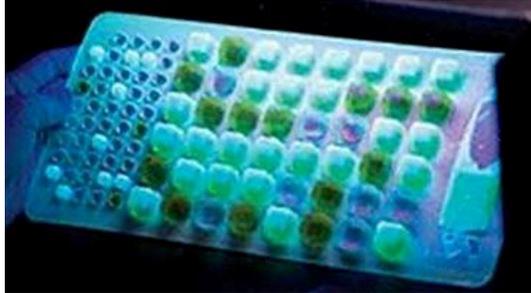


Figura 7.2 – Fluorescenza per individuazione degli E. Coli.

A questo punto si può procedere all'enumerazione Quanti-Tray dei pozzetti risultati positivi; in caso di utilizzo di varie diluizioni, il risultato va sempre riportato nella forma MPN/100 mL. Per una corretta conta si consulta la tabella 7.2 relativa al test con 51 pozzetti.

Tabella 7.2 – Enumerazione Quanti-Tray per le valutazioni di MPN/100 mL.

Tabella MPN Quanti -Tray [®] a 51 pozzetti			
N° di pozzetti positivi in un campione da 100 ml	Numero più probabile	Limiti fiduciali del 95% inferiore	Limiti fiduciali del 95% Superiore
0	< 1	0	3,7
1	1	0,3	5,6
2	2	0,6	7,3
3	3,1	1,1	9
4	4,2	1,7	10,7
5	5,3	2,3	12,3
6	6,4	3	13,9
7	7,5	3,7	15,5
8	8,7	4,5	17,1
9	9,9	5,3	18,8
10	11,1	6,1	20,5
11	12,4	7	22,1
12	13,7	7,9	23,9
13	15	8,8	25,7
14	16,4	9,8	27,5
15	17,8	10,8	29,4
16	19,2	11,9	31,3
17	20,7	13	33,3
18	22,2	14,1	35,2
19	23,8	15,3	37,3
20	25,4	16,5	39,4
21	27,1	17,7	41,6
22	28,8	19	43,9
23	30,6	20,4	46,3
24	32,4	21,8	48,7
25	34,4	23,3	51,2
26	36,4	24,7	53,9
27	38,4	26,4	56,6
28	40,6	28	59,5
29	42,9	29,7	62,5
30	45,3	31,5	65,6
31	47,8	33,4	69
32	50,4	35,4	72,5
33	53,1	37,5	76,2
34	56	39,7	80,1
35	59,1	42	84,4
36	62,4	44,6	88,8
37	65,9	47,2	93,7
38	69,7	50	99
39	73,8	53,1	104,8
40	78,2	56,4	111,2
41	83,1	59,9	118,3
42	88,5	63,9	126,2
43	94,5	68,2	135,4
44	101,3	73,1	146
45	109,1	78,6	158,7
46	118,4	85	174,5
47	129,8	92,7	195
48	144,5	102,3	224,1
49	165,2	115,2	272,2
50	200,5	135,8	387,6
51	> 200,5	146,1	infinito

7.2 Esperimento di controllo

Poiché lo scopo dello studio è quello di stabilire l'efficienza disinfettiva dell'impianto di cavitazione, il primo passo è stato stabilire che l'impianto, in assenza di reattore cavitazionale, non influisse sulla vitalità degli E. coli. Sono stati perciò eseguiti due esperimenti di controllo in assenza di piastra forata. La procedura seguita durante l'esecuzione di queste prove è la stessa degli esperimenti eseguiti con il protocollo sperimentale descritto nel paragrafo precedente. L'unica differenza si ha nella test section, la quale non possiede la piastra forata.

I due esperimenti di controllo sono stati eseguiti ad una distanza di tempo di diversi mesi, in quanto c'è stata un'interruzione degli esperimenti durante il periodo di lockdown a causa dell'emergenza Covid-19.

Il primo esperimento di controllo è stato eseguito il 16/12/2019.

La durata dell'esperimento è stata di 30 minuti ed è stato svolto con una frequenza dell'inverter pari a 20 Hz. I risultati della prova sono riportati in tabella 7.3 e sono rappresentati graficamente nella figura 7.3.

Tabella 7.3 – Risultati prova di controllo in data 16/12/2019.

Campione	Tempo Trascorso [min]	T[°C]	MPN/100ml	% Carica residua [-]
0	0	18°C	178.5	100
1	10	14°C	172.3	97
2	20	13.7°C	209.8	118
3	30	14.5°C	156.5	88

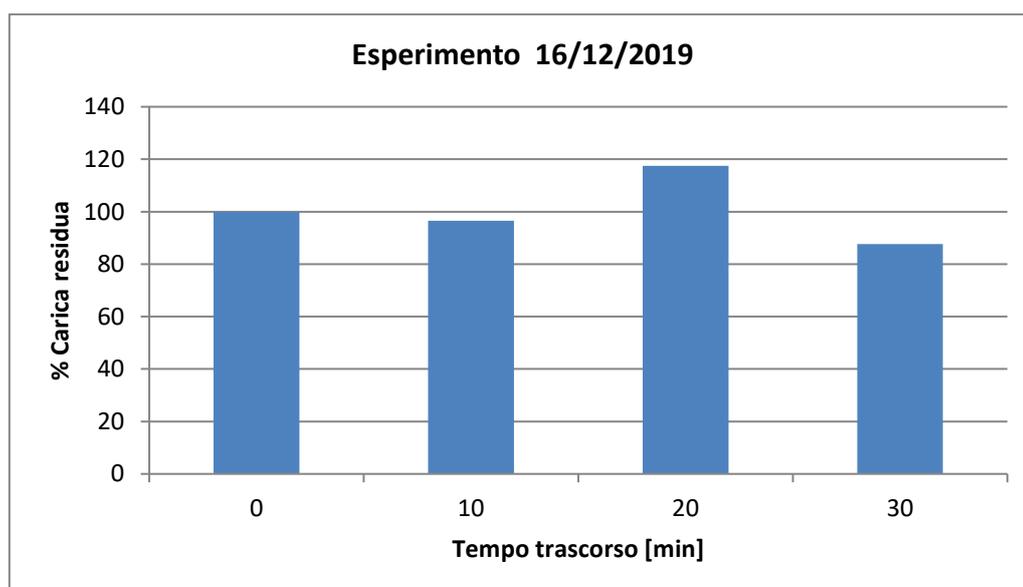


Figura 7.3 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 16/12/2019.

Il secondo esperimento di controllo è stato eseguito il 21/05/2020, per avere la certezza che durante il periodo d'inutilizzo del circuito non siano avute alterazioni inaspettate dello stesso.

Anche in questo caso la durata dell'esperimento è stata di 30 minuti ed è stato svolto con una frequenza dell'inverter pari a 20 Hz. I risultati della prova sono riportati in tabella 7.4 e sono rappresentati graficamente nella figura 7.4.

Tabella 7.4 – Risultati prova di controllo in data 21/05/2020.

Campione	Tempo Trascorso [min]	T[°C]	MPN/100ml	% Carica residua [-]
0	0	18°C	19350	100
1	10	14.6°C	38730	200
2	20	14°C	24810	128
3	30	13.9°C	36540	189
4	40	13.7	28510	147

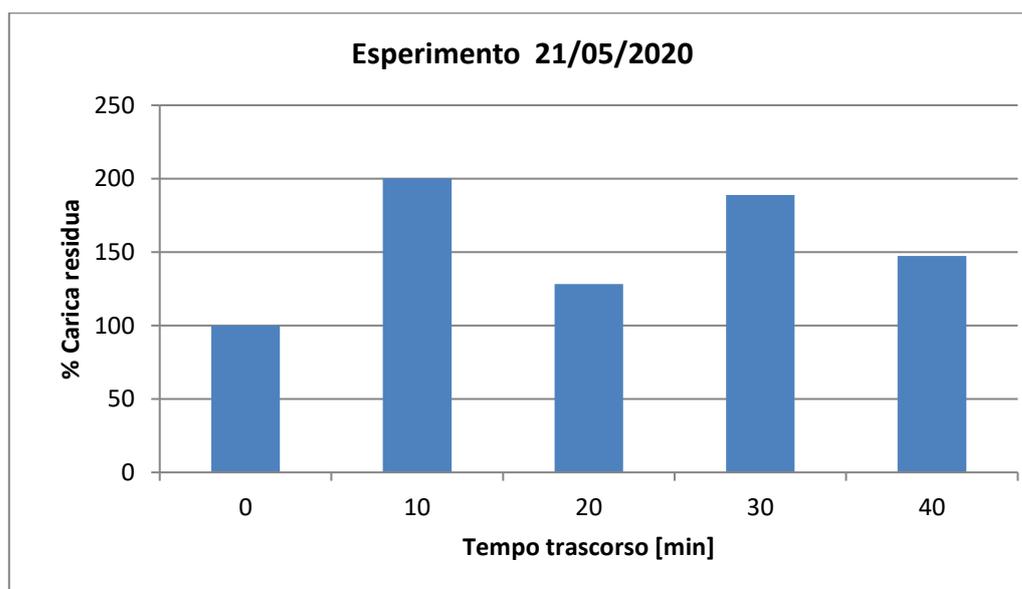


Figura 7.4 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 21/05/2020.

In entrambi gli esperimenti si ha la conferma della sopravvivenza dei batteri, in quanto non è presente nessun abbattimento della carica batterica. È possibile visualizzare la variabilità dei risultati, in quanto essendo analisi batteriologiche sono soggette ad elevata variabilità. Durante queste prove è stata anche riportata la temperatura per verificare il corretto funzionamento del chiller e che non ci sia un aumento della temperatura durante l'esecuzione delle prove.

Dopo aver verificato l'influenza del circuito sulla vitalità della carica batterica in assenza di reattore cavitazionale, sono stati riprodotti gli esperimenti condotti dagli autori Burzio et al. per controllare la bontà di quello che è stato descritto nell'articolo pubblicato.

Gli esperimenti condotti da Burzio et al. sono stati condotti con una piastra forata con 4 fori da 2.5 mm ed uno spessore di 16 mm. Il diametro della condotta è pari a 32 mm.

Pertanto, i parametri geometrici adimensionali del reattore sono i seguenti:

$$\alpha = \frac{4 \pi 2.5 \text{ mm}}{4 \pi \frac{2.5^2}{4} \text{ mm}^2} = 1.6 \text{ mm}^{-1}$$

$$\beta = \frac{4 \pi \frac{2.5^2}{4} \text{ mm}^2}{\pi \frac{32^2}{4} \text{ mm}^2} = 0.024$$

$$\frac{t}{D_{\text{foro}}} = \frac{16 \text{ mm}}{2.5 \text{ mm}} = 6.4 > 2 \text{ thick plate}$$

Sulla base di quanto riportato nel capitolo 4, gli esperimenti condotti sul nuovo circuito devono avere gli stessi parametri adimensionali affinché si possa fare un confronto dei risultati e dell'abbattimento. Avendo costruito un circuito simile a quello degli autori Burzio et al., si è utilizzato un reattore con la stessa configurazione geometrica.

Sono stati eseguiti cinque esperimenti di verifica con tre diverse configurazioni idrauliche.

I primi due esperimenti eseguiti hanno la seguente configurazione idraulica:

- Frequenza della pompa pari a 50 Hz;
- Pressione di monte pari a 7.4 bar;
- Pressione di valle pari a 0.1 bar;
- Volume di acqua Milli-Q con carica batterica utilizzata pari a 21 l;
- Portata pari a 0.14 l/s;
- Velocità dell'acqua nel foro pari a 30 m/s;
- Numero di Reynolds pari a 75127;
- Pressione di vapore saturo pari a 0.0233 bar;
- Numero di cavitazione pari a 0.2;
- Temperatura pari a 16 °C.

Il primo esperimento condotto in data 11/02/2020 ha una concentrazione batterica iniziale del MPN pari a 40210/100 ml. I risultati della prova sono riportati in tabella 7.5 e sono rappresentati graficamente nella figura 7.5. I risultati sono espressi in numero di passaggi, il parametro adimensionale del tempo.

Tabella 7.5 – Risultati prova di controllo in data 11/02/2020.

Campione	Tempo Trascorso [min]	# Passaggi [-]	MPN/100ml	% Carica residua [-]
0	0	0	40210	100
1	30	47	37815	94
2	60	95	43810	109
3	90	142	26515	66
4	120	189	24440	61
5	150	237	15755	39
6	180	284	10595	26
7	210	332	10450	26
8	240	379	6120	15
9	270	395	8150	20

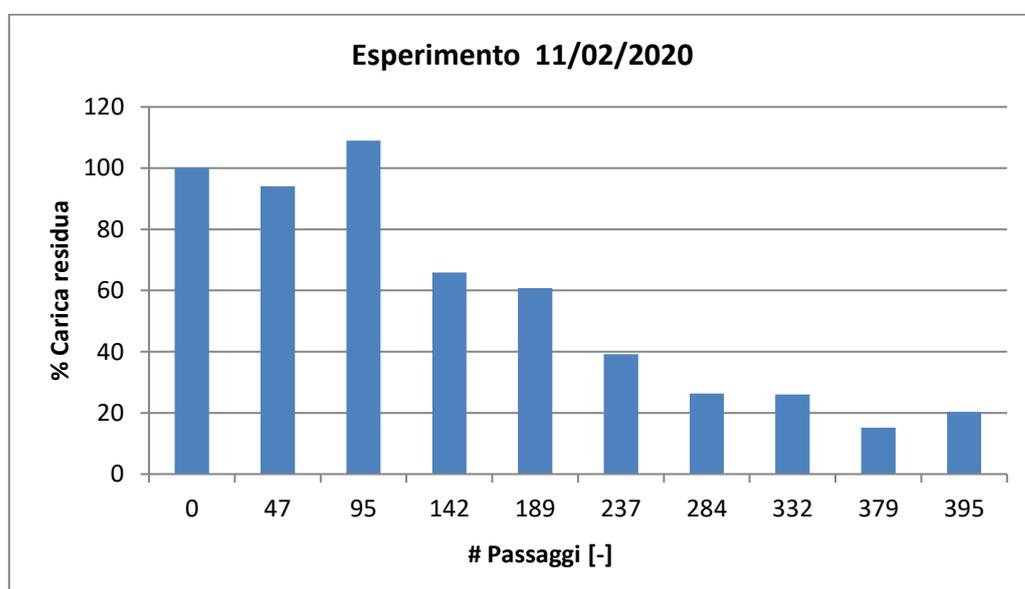


Figura 7.5 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 11/02/2020.

Il secondo esperimento condotto in data 18/02/2020 ha una concentrazione batterica iniziale del MPN pari a 17230/100 ml. I risultati della prova sono riportati in tabella 7.6 e sono rappresentati graficamente nella figura 7.6.

Tabella 7.6 – Risultati prova di controllo in data 18/02/2020.

Campione	Tempo Trascorso [min]	# Passaggi [-]	MPN/100ml	% Carica residua [-]
0	0	0	17230	100
1	30	47	9590	24
2	60	95	7120	18
3	90	142	6500	16
4	120	189	5940	15
5	150	237	8840	22
6	180	284	7490	19
7	210	332	6200	15
8	240	379	6380	16
9	270	395	8090	20

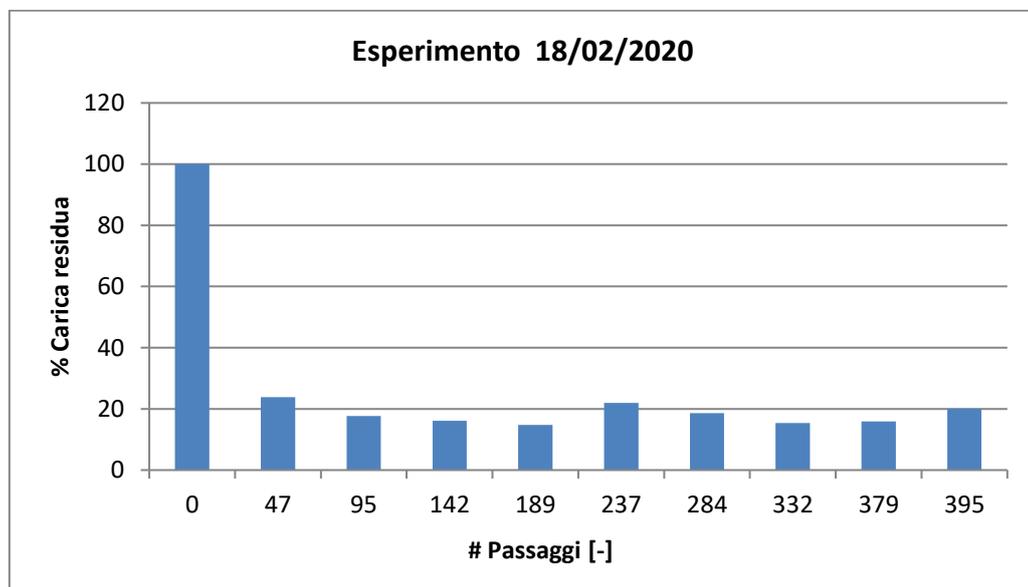


Figura 7.6 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 18/02/2020.

Il secondo gruppo di esperimenti eseguiti hanno la seguente configurazione idraulica:

- Frequenza della pompa pari a 50 Hz;
- Pressione di monte pari a 7.4 bar;
- Pressione di valle pari a 1 bar;
- Volume di acqua Milli-Q con carica batterica utilizzata pari a 21 l;
- Portata pari a 0.14 l/s;
- Velocità dell'acqua nel foro pari a 30 m/s;
- Numero di Reynolds pari a 75637;
- Pressione di vapore saturo pari a 0.0233 bar;
- Numero di cavitazione pari a 0.4;
- Temperatura pari a 16 °C.

Il primo esperimento condotto in data 25/02/2020 ha una concentrazione batterica iniziale del MPN pari a 67700/100 ml. I risultati della prova sono riportati in tabella 7.7 e sono rappresentati graficamente nella figura 7.7.

Tabella 7.7 – Risultati prova di controllo in data 25/02/2020.

Campione	Tempo Trascorso [min]	# Passaggi [-]	MPN/100ml	% Carica residua [-]
0	0	0	67700	100
1	30	47	43200	107
2	60	95	36400	91
3	90	142	29200	73
4	120	189	17500	44
5	150	237	9800	24
6	180	284	9700	24
7	210	332	16100	40
8	240	379	0	0
9	270	395	1000	2

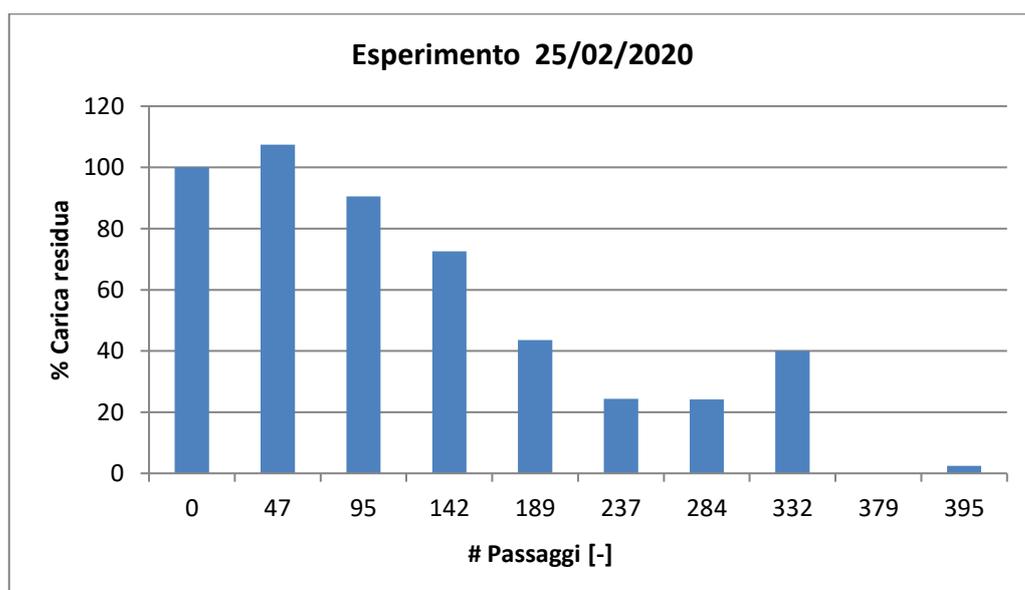


Figura 7.7 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 25/02/2020.

Il secondo esperimento condotto in data 10/03/2020 ha una concentrazione batterica iniziale del MPN pari a 600/100 ml. I risultati della prova sono riportati in tabella 7.8 e sono rappresentati graficamente nella figura 7.8.

Tabella 7.8 – Risultati prova di controllo in data 10/03/2020.

Campione	Tempo Trascorso [min]	# Passaggi [-]	MPN/100ml	% Carica residua [-]
0	0	0	600	100
1	30	47	610	102
2	60	95	400	67
3	90	142	300	50
4	120	189	100	17
5	150	237	200	33
6	180	284	400	67
7	210	332	100	17
8	240	379	200	33
9	270	395	0	0

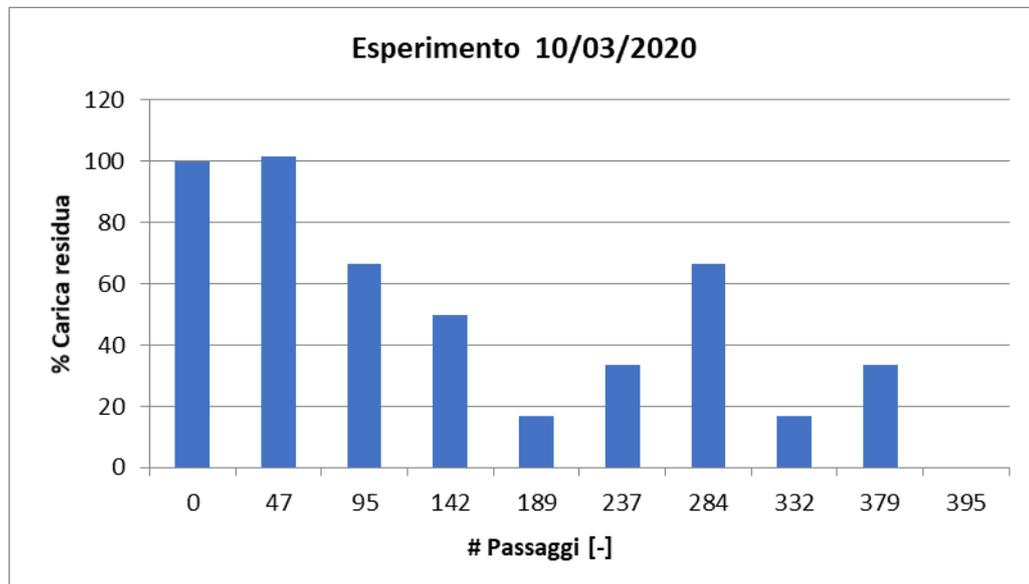


Figura 7.8 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 10/03/2020.

L'ultimo esperimento eseguito ha la seguente configurazione idraulica:

- Frequenza della pompa pari a 50 Hz;
- Pressione di monte pari a 7.4 bar;
- Pressione di valle pari a 2 bar;
- Volume di acqua Milli-Q con carica batterica utilizzata pari a 21 l;
- Portata pari a 0.14 l/s;
- Velocità dell'acqua nel foro pari a 29.6 m/s;
- Numero di Reynolds pari a 74107;
- Pressione di vapore saturo pari a 0.0233 bar;
- Numero di cavitazione pari a 0.7;
- Temperatura pari a 16 °C;
- Carica batterica iniziale del MPN pari a 198765/100 ml.

L'esperimento è stato condotto in data 11/03/2020. I risultati della prova sono riportati in tabella 7.9 e sono rappresentati graficamente nella figura 7.9.

Tabella 7.9 – Risultati prova di controllo in data 11/03/2020.

Campione	Tempo Trascorso [min]	# Passaggi [-]	MPN/100ml	% Carica residua [-]
0	0	0	198765	100
1	30	47	251630	127
2	60	95	200745	101
3	90	142	208665	105
4	120	189	238930	120
5	150	237	217730	110
6	180	284	217730	110
7	210	332	228130	115
8	240	379	266430	134
9	270	395	379580	191

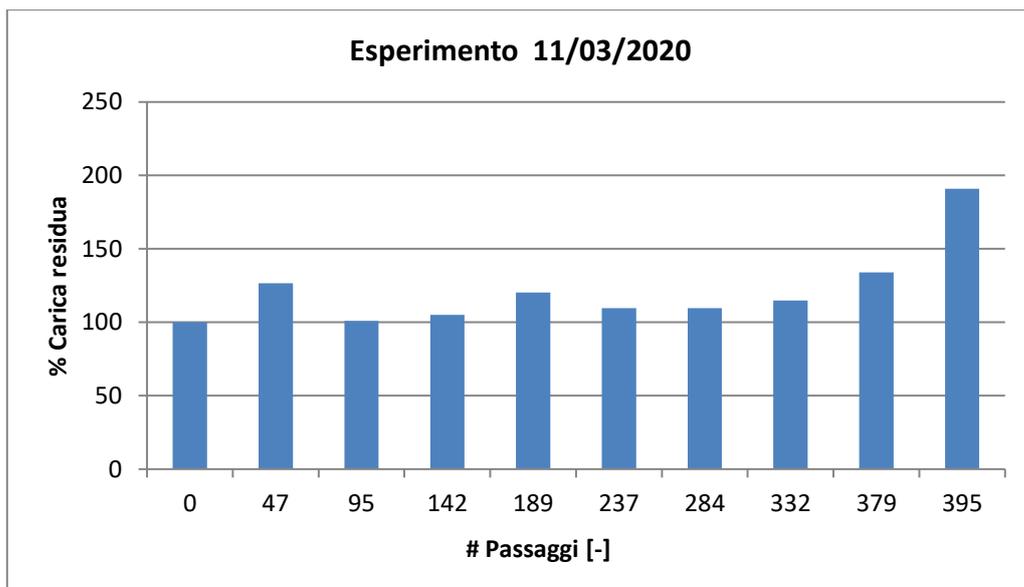


Figura 7.9 – Rappresentazione grafica esperimento di controllo in data 11/03/2020.

Per interpretare i risultati ottenuti è stato fatto il confronto con i risultati di Burzio et al. per le tre diverse configurazioni idrauliche.

In figura 7.10 viene mostrato il confronto dei risultati ottenuti avendo il numero di cavitazione pari a 0.2.

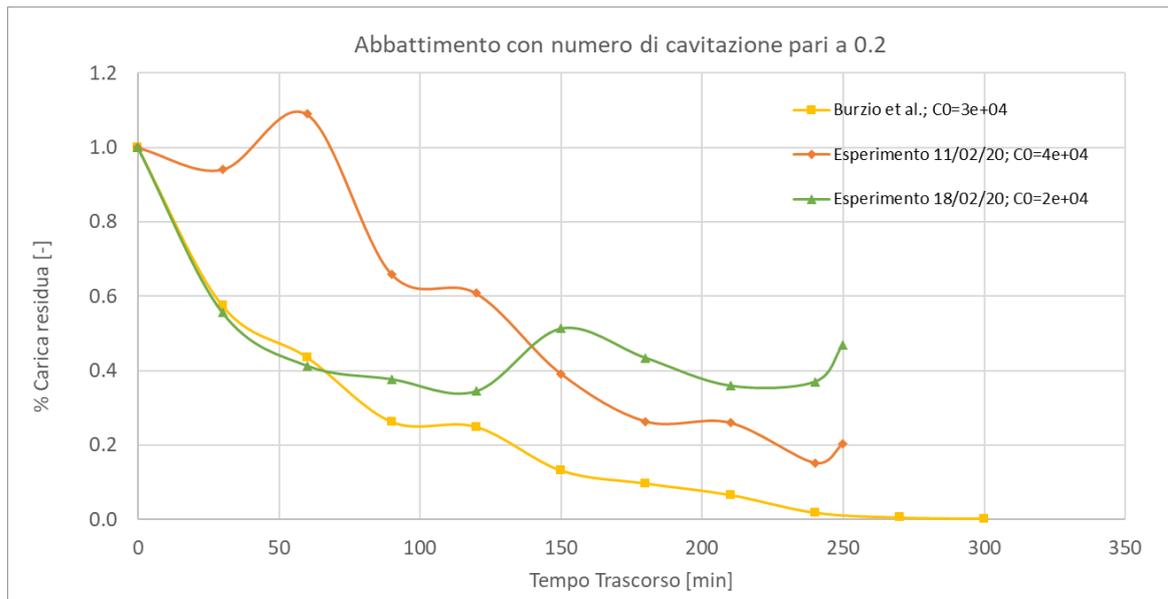


Figura 7.10 – Confronto grafico degli esperimenti con il numero di cavitazione pari a 0.2.

Si può notare che il confronto è stato fatto nel tempo, un parametro dimensionale. È stato possibile utilizzare questo parametro perché è stata utilizzata una configurazione idraulica molto simile ed è stata trattata la stessa quantità di volume.

In questi due esperimenti si può notare come sia presente un trend positivo di abbattimento, nonostante la variabilità dell'analisi batteriologica. La differenza tra le diverse curve può essere data dalla diversa concentrazione batterica iniziale.

In figura 7.11 viene mostrato il confronto dei risultati ottenuti avendo il numero di cavitazione pari a 0.4.

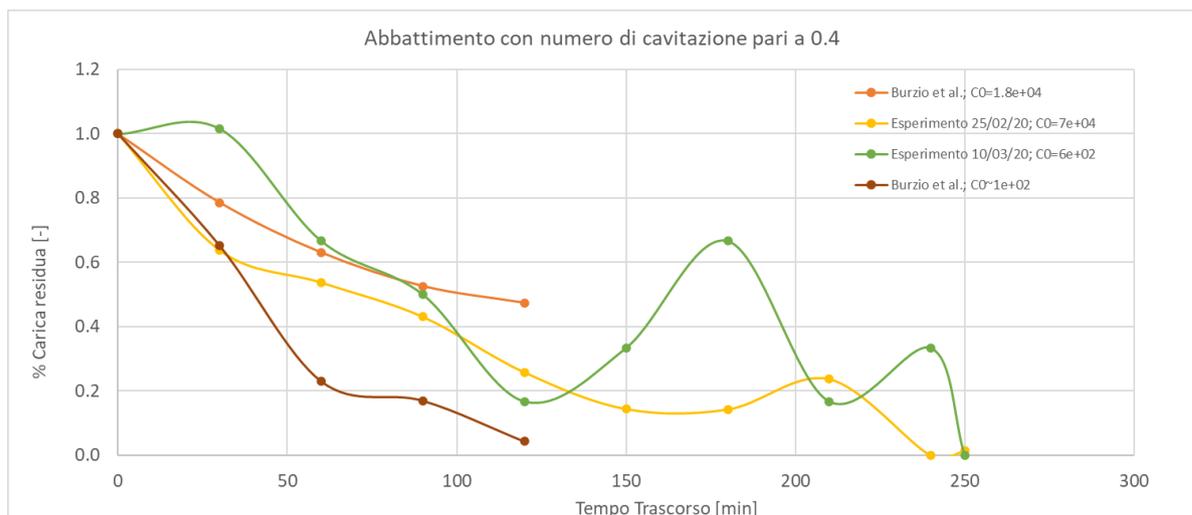


Figura 7.11 – Confronto grafico degli esperimenti con il numero di cavitazione pari a 0.4.

Anche in questo caso si può notare che il confronto è stato fatto nel tempo per le stesse motivazioni descritte in precedenza.

Nei due esperimenti è presente un trend positivo di abbattimento più marcato. A differenza di quanto eseguito nei primi due esperimenti, le concentrazioni batteriche iniziali sono le stesse di Burzio et al., e pertanto, è possibile notare un andamento simile. La piccola differenza tra le curve è data dalla sola variabilità delle analisi batteriologiche.

In figura 7.12 viene mostrato il confronto dei risultati ottenuti avendo il numero di cavitazione pari a 0.7.

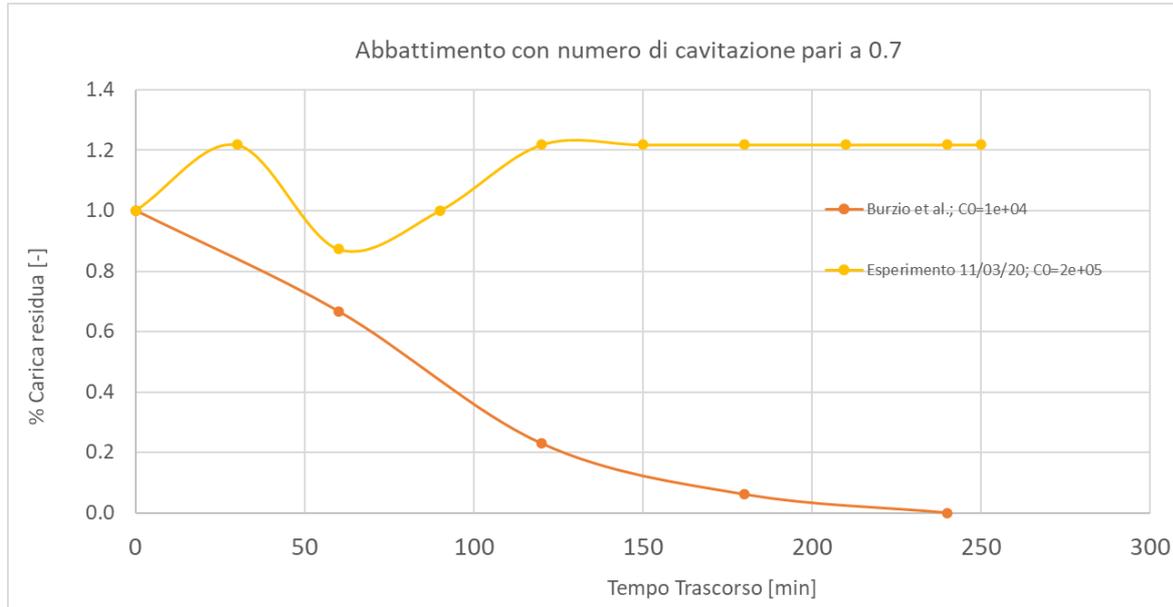


Figura 7.12 – Confronto grafico degli esperimenti con il numero di cavitazione pari a 0.7.

Il confronto è stato fatto nel tempo per le stesse motivazioni descritte in precedenza.

In questa situazione non è presente alcun abbattimento, a differenza di quanto riportato nei risultati di Burzio et al.. La motivazione più plausibile può essere ricondotta a degli errori di esecuzione della prova, o nell'analisi batteriologica inadeguata all'analisi di concentrazioni così elevate, oppure nell'inadeguatezza del circuito ad abbattere concentrazioni batteriche iniziali troppo elevate. Pertanto, sarà necessario condurre ulteriori approfondimenti.

Nel complesso, l'esecuzione delle prove di controllo ha dimostrato come il circuito costruito ed il protocollo sperimentale ideato sia adeguato all'esecuzione di altri esperimenti con reattori di diverse configurazioni geometriche e diverse configurazioni idrauliche.

7.3 Configurazione della geometria del reattore

A seguito del buon esito delle prove di controllo si è proceduto alla valutazione della disinfezione della carica batterica con un reattore a piastra forata con un solo foro da 4.5 mm di diametro. Si è fatta questa scelta in quanto è già stata condotta un'analisi dall'ingegner Caridi. In particolare, si è occupato dell'acquisizione delle immagini del

campo di moto della cavitazione tramite la tecnica P.I.V., ovvero Particle Image Velocimetry. La nuova test section, riportata in figura 7.13, è costituita da un blocco di plexiglas con alloggiamento per la piastra forata.

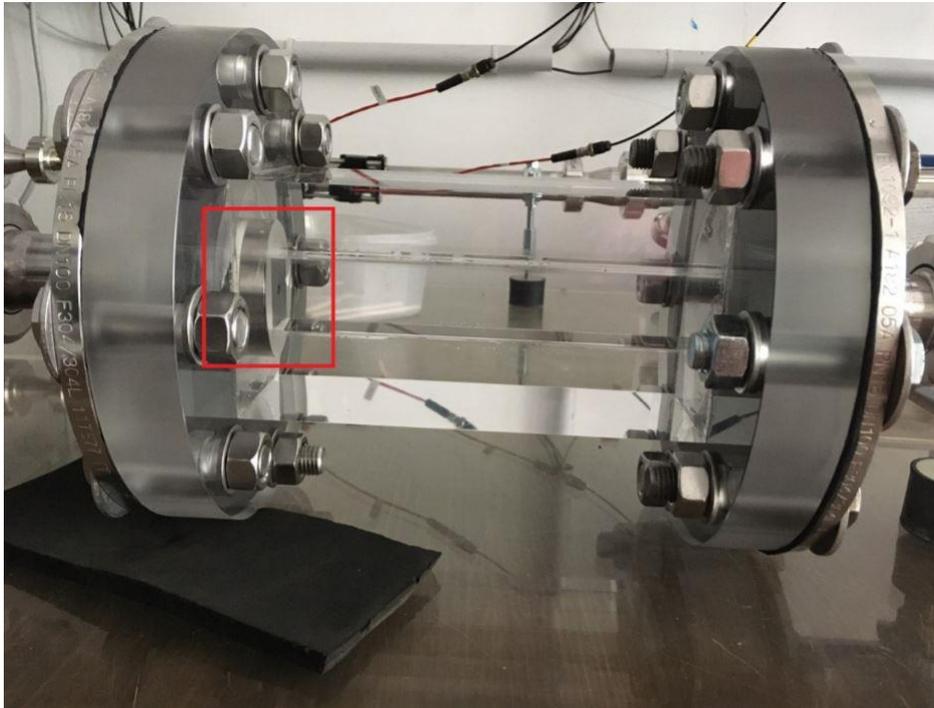


Figura 7.13 – Fotografia della test section con piastra forata evidenziata.

I nuovi parametri geometrici adimensionali del reattore sono i seguenti:

$$\alpha = \frac{\pi \cdot 4.5 \text{ mm}}{\pi \cdot \frac{4.5^2}{4} \text{ mm}^2} = 0.88 \text{ mm}^{-1}$$

$$\beta = \frac{\pi \cdot \frac{4.5^2}{4} \text{ mm}^2}{\pi \cdot \frac{32^2}{4} \text{ mm}^2} = 0.019$$

$$\frac{t}{D_{\text{foro}}} = \frac{16 \text{ mm}}{4.5 \text{ mm}} = 3.5 > 2 \text{ thick plate}$$

Anche in questi nuovi esperimenti si devono avere gli stessi parametri idrodinamici adimensionali affinché si possa fare un confronto tra i risultati dell'abbattimento e la visualizzazione del campo di moto studiata dall'ingegner Caridi.

Gli esperimenti condotti saranno incentrati sullo studio dell'inibizione della carica batterica al variare del numero di cavitazione, mantenendo il numero di Reynolds costante.

In particolare, verranno analizzate le configurazioni idrodinamiche mostrate in figura 7.14.

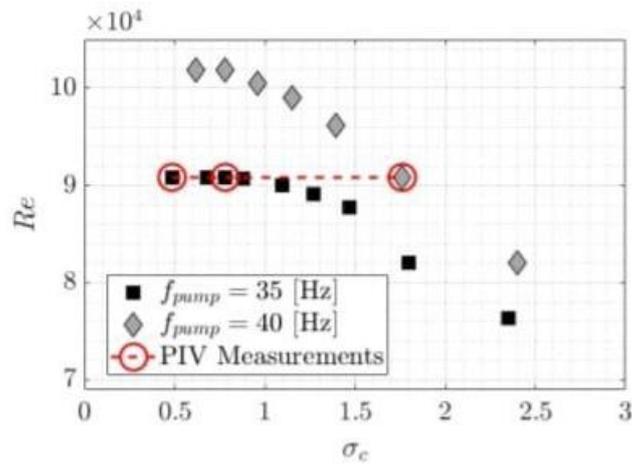


Figura 7.14 – Configurazioni idrodinamiche utilizzate dall’ingegner Caridi per la visualizzazione del campo di moto tramite P.I.V..

7.4 Esperimenti di disinfezione al variare del numero di cavitazione

Il nuovo set di esperimenti si prefigge lo scopo di analizzare come un campo di moto in un reattore cavitazionale influenzi la disinfezione della carica batterica tramite cavitazione idrodinamica.

Affinché si possa fare questa analisi è stato necessario riprodurre le configurazioni idrodinamiche studiate dall’ingegner Caridi, mostrate nella figura 7.14.

Le tre diverse configurazioni idrauliche che sono state analizzate dall’ingegner Caridi sono riportate in tabella 7.10.

Tabella 7.10 – Configurazioni idrauliche studiate dall’ingegner Caridi.

Case	f_{pump} [Hz]	\dot{Q} [l/s]	p_1 [bar]	p_2 [bar]	Re	σ_c
1	40	0.321	5.3	2.6	90,800	1.71
2	35	0.321	4.0	0.6	90,800	0.78
3	35	0.321	4.0	0.1	90,800	0.53

Per poter indagare sull’interazione del campo di moto sulla disinfezione è necessario che le prove della disinfezione della carica batterica abbiano siano ripetibili e che i risultati abbiano una variabilità accettabile. Pertanto, per ogni caso analizzato dall’ingegner Caridi sono stati condotti tre esperimenti di disinfezione della carica batterica.

Si ricorda che il prerequisito per poter indagare sull’interazione è l’uguaglianza dei parametri adimensionali che influenzano sulla cavitazione.

Il primo gruppo di esperimenti ha la stessa configurazione idrodinamica del caso 3 analizzato da Caridi, e nello specifico si ha:

- Pressione di monte pari a 3.1 bar;
- Pressione di valle pari a 0.1 bar;
- Volume di acqua Milli-Q con carica batterica utilizzata pari a 24 l;
- Portata pari a 0.32 l/s;
- Velocità dell'acqua nel foro pari a 21 m/s;
- Numero di Reynolds pari a 90000;
- Pressione di vapore saturo pari a 0.0233 bar;
- Numero di cavitazione pari a 0.53;
- Temperatura pari a 20 °C.

Il primo esperimento condotto in data 11/06/2020 ha una concentrazione batterica iniziale del MPN pari a 16500/100 ml. I risultati della prova sono riportati in tabella 7.11 e sono rappresentati graficamente nella figura 7.15. I risultati sono espressi in numero di passaggi, il parametro adimensionale del tempo.

Tabella 7.11 – Risultati della prova eseguita in data 11/06/2020.

Campione	Tempo Trascorso [min]	# Passaggi [-]	MPN/100ml	% Carica residua [-]
0	0	0	16500	100.0
1	30	21	10190	61.8
2	60	42	6830	41.4
3	90	63	8130	49.3
4	120	84	6130	37.2
5	150	104	8130	49.3
6	180	125	7800	47.3
7	210	146	8330	50.5
8	240	167	5560	33.7
9	250	188	5200	31.5

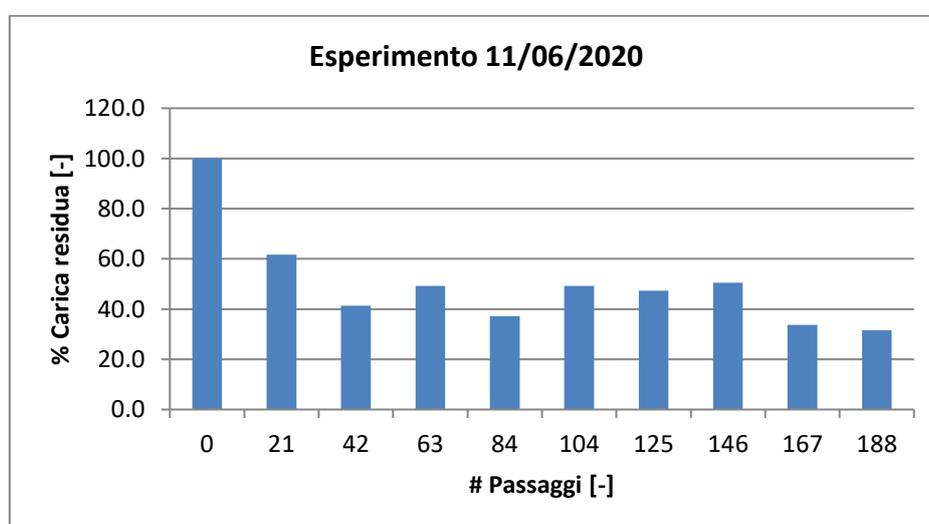


Figura 7.15 – Rappresentazione grafica dell'esperimento eseguito in data 11/06/2020.

Il secondo esperimento condotto in data 16/06/2020 ha una concentrazione batterica iniziale del MPN pari a 2966/100 ml. I risultati della prova sono riportati in tabella 7.12 e sono rappresentati graficamente nella figura 7.16.

Tabella 7.12 – Risultati della prova eseguita in data 16/06/2020.

Campione	Tempo Trascorso [min]	# Passaggi [-]	MPN/100ml	% Carica residua [-]
0	0	0	2966.5	100.0
1	30	24	802	27.0
2	60	48	828.5	27.9
3	90	72	289.5	9.8
4	120	96	205.5	6.9
5	150	121	256.5	8.6
6	180	145	148.5	5.0
7	210	169	87.5	2.9
8	240	193	110	3.7
9	270	217	205	6.9
10	300	241	65.5	2.2

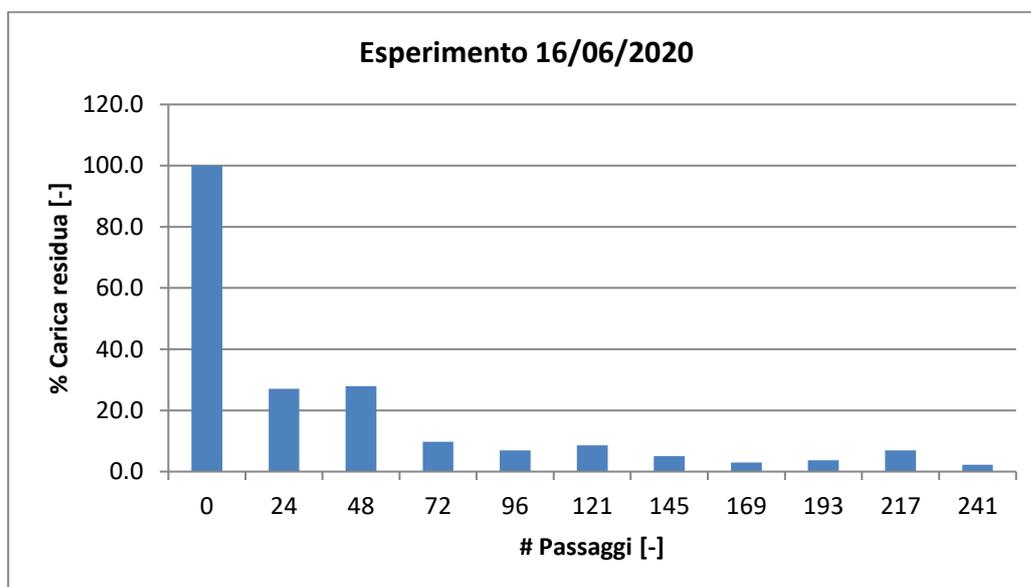


Figura 7.16 – Rappresentazione grafica dell'esperimento eseguito in data 16/06/2020.

Il terzo esperimento condotto in data 18/06/2020 ha una concentrazione batterica iniziale del MPN pari a 75520/100 ml. I risultati della prova sono riportati in tabella 7.13 e sono rappresentati graficamente nella figura 7.17.

Tabella 7.13 – Risultati della prova eseguita in data 18/06/2020.

Campione	Tempo Trascorso [min]	# Passaggi [-]	MPN/100ml	% Carica residua [-]
0	0	0	75520	100.0
1	30	24	51730	68.5
2	60	48	41380	54.8
3	90	72	35440	46.9
4	120	96	45720	60.5
5	150	121	26355	34.9
6	180	145	31635	41.9
7	210	169	20645	27.3
8	240	193	30765	40.7
9	270	217	19885	26.3
10	300	241	21040	27.9

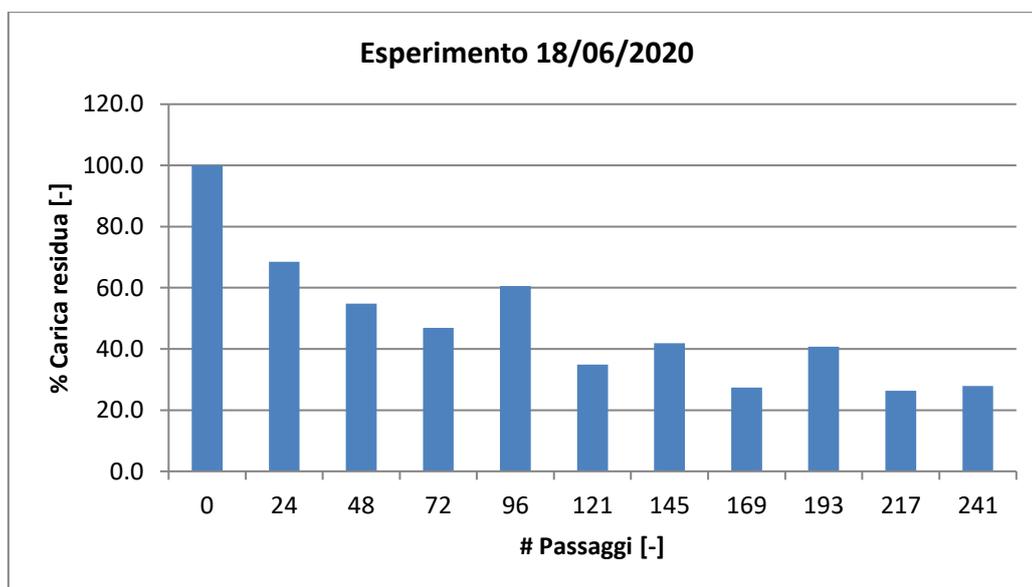


Figura 7.17 – Rappresentazione grafica dell'esperimento eseguito in data 18/06/2020.

Il secondo gruppo di esperimenti ha la stessa configurazione idrodinamica del caso 2 analizzato da Caridi, e nello specifico si ha:

- Pressione di monte pari a 3.1 bar;
- Pressione di valle pari a 0.6 bar;
- Volume di acqua Milli-Q con carica batterica utilizzata pari a 24 l;
- Portata pari a 0.32 l/s;
- Velocità dell'acqua nel foro pari a 20.3 m/s;
- Numero di Reynolds pari a 91000;
- Pressione di vapore saturo pari a 0.0233 bar;
- Numero di cavitazione pari a 0.77;
- Temperatura pari a 20 °C.

Il primo esperimento condotto in data 22/06/2020 ha una concentrazione batterica iniziale del MPN pari a 9896/100 ml. I risultati della prova sono riportati in tabella 7.14 e sono rappresentati graficamente nella figura 7.18. I risultati sono espressi in numero di passaggi, il parametro adimensionale del tempo.

Tabella 7.14 – Risultati della prova eseguita in data 22/06/2020.

Campione	Tempo Trascorso [min]	# Passaggi [-]	MPN/100ml	% Carica residua [-]
0	0	0	9896	100.0
1	30	24	9269	93.7
2	60	48	11101.5	112.2
3	90	72	9535.5	96.4
4	120	96	6380.5	64.5
5	150	121	6450	65.2
6	180	145	5540.5	56.0
7	210	169	8287	83.7
8	240	193	5091.5	51.5
9	270	217	4597.5	46.5

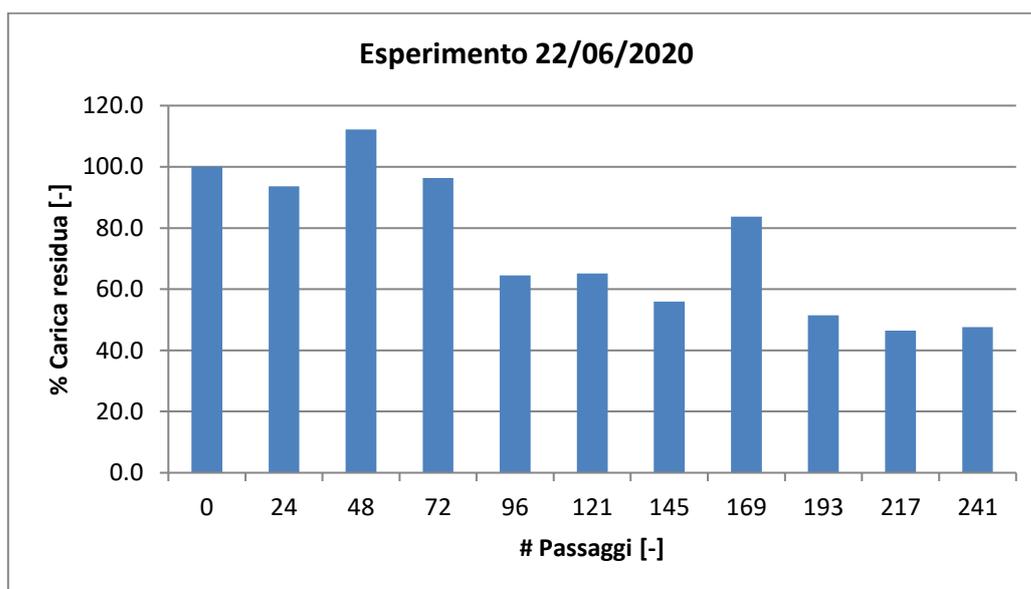


Figura 7.18 – Rappresentazione grafica dell'esperimento eseguito in data 22/06/2020.

Il secondo esperimento condotto in data 25/06/2020 ha una concentrazione batterica iniziale del MPN pari a 1293/100 ml. I risultati della prova sono riportati in tabella 7.15 e sono rappresentati graficamente nella figura 7.19.

Tabella 7.15 – Risultati della prova eseguita in data 25/06/2020.

Campione	Tempo Trascorso [min]	# Passaggi [-]	MPN/100ml	% Carica residua [-]
0	0	0	1293	100.0
1	30	24	913.5	70.6
2	60	48	807	62.4
3	90	72	771.5	59.7
4	120	96	558.5	43.2
5	150	121	484	37.4
6	180	145	687	53.1
7	210	169	325.5	25.2
8	240	193	160.5	12.4
9	270	217	26	2.0
10	300	241	67.5	5.2

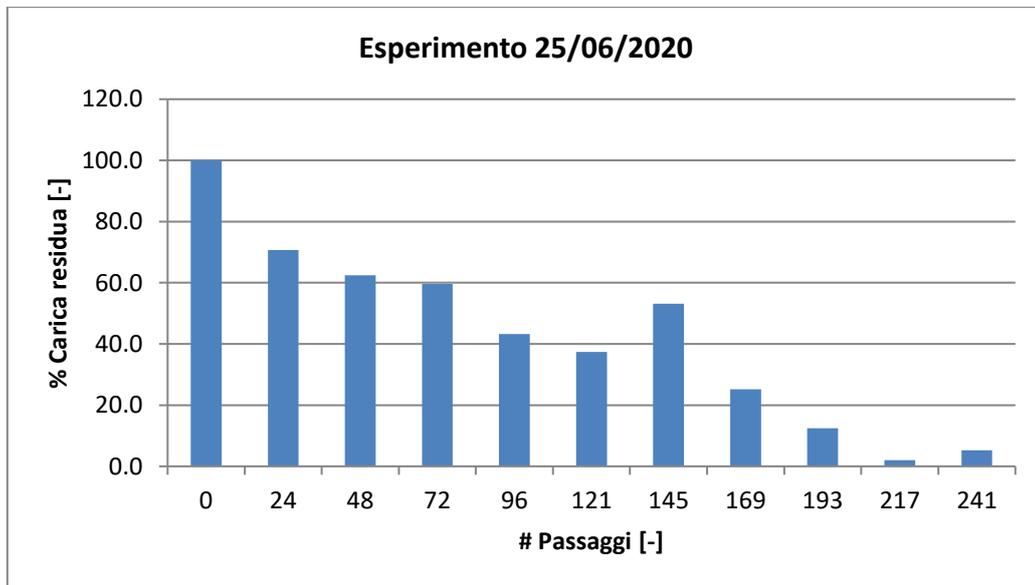


Figura 7.19 – Rappresentazione grafica dell'esperimento eseguito in data 25/06/2020.

Il terzo esperimento condotto in data 01/07/2020 ha una concentrazione batterica iniziale del MPN pari a 6867/100 ml. I risultati della prova sono riportati in tabella 7.16 e sono rappresentati graficamente nella figura 7.20.

Tabella 7.16 – Risultati della prova eseguita in data 01/07/2020.

Campione	Tempo Trascorso [min]	# Passaggi [-]	MPN/100ml	% Carica residua [-]
0	0	0	6867	100.0
1	30	24	3448	50.2
2	60	48	3873	56.4
3	90	72	6131	89.3
4	120	96	4884	71.1
5	150	121	3255	47.4
6	180	145	3654	53.2
7	210	169	3448	50.2
8	240	193	2603	37.9
9	270	217	2909	42.4
10	300	241	1723	25.1

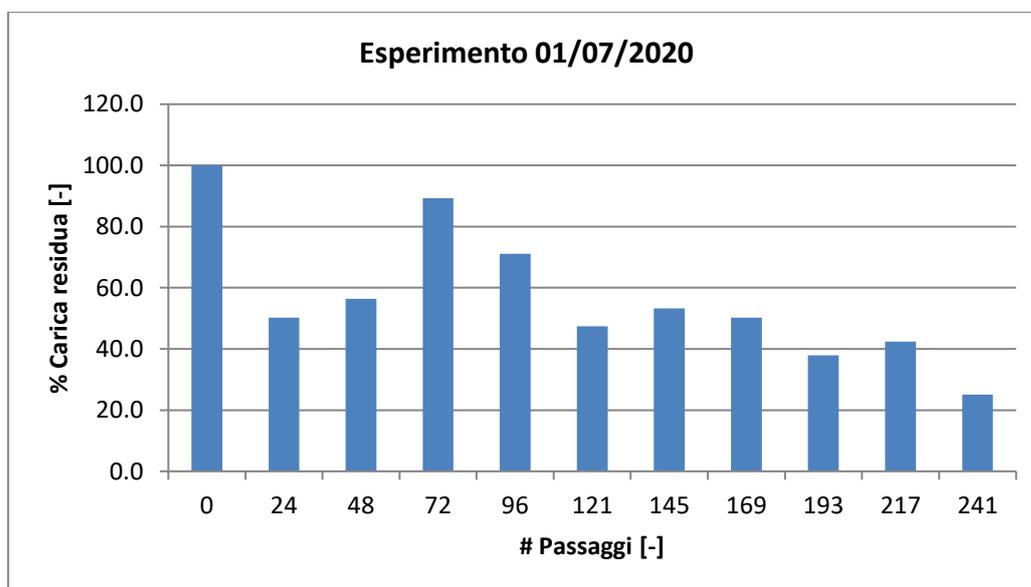


Figura 7.20 – Rappresentazione grafica dell'esperimento eseguito in data 01/07/2020.

L'ultimo gruppo di esperimenti ha la stessa configurazione idrodinamica del caso 1 analizzato da Caridi, e nello specifico si ha:

- Pressione di monte pari a 3.1 bar;
- Pressione di valle pari a 2.6 bar;
- Volume di acqua Milli-Q con carica batterica utilizzata pari a 24 l;
- Portata pari a 0.32 l/s;
- Velocità dell'acqua nel foro pari a 20.2 m/s;
- Numero di Reynolds pari a 91000;
- Pressione di vapore saturo pari a 0.0233 bar;
- Numero di cavitazione pari a 1.7;
- Temperatura pari a 18 °C.

A causa della mancanza di tempo e di alcuni problemi tecnici, non si sono potuti avere i risultati di questo ultimo gruppo di prove, le quali verranno svolte a breve.

7.5 Interpretazione dei risultati

Nella figura 7.21 si riporta un confronto tra i risultati di abbattimento della carica batterica del primo gruppo di esperimenti e la media dell'abbattimento della carica batterica ottenuta dagli autori Burzio et al..

In ordinata viene rappresentata la concentrazione batterica residua. La curva rossa rappresenta l'esperimento svolto in data 11/06/2020, la curva blu rappresenta l'esperimento svolto in data 16/06/2020, la curva verde rappresenta l'esperimento svolto in data 18/06/2020 e la curva azzurra rappresenta la media degli esperimenti eseguiti nello studio di Burzio et al.

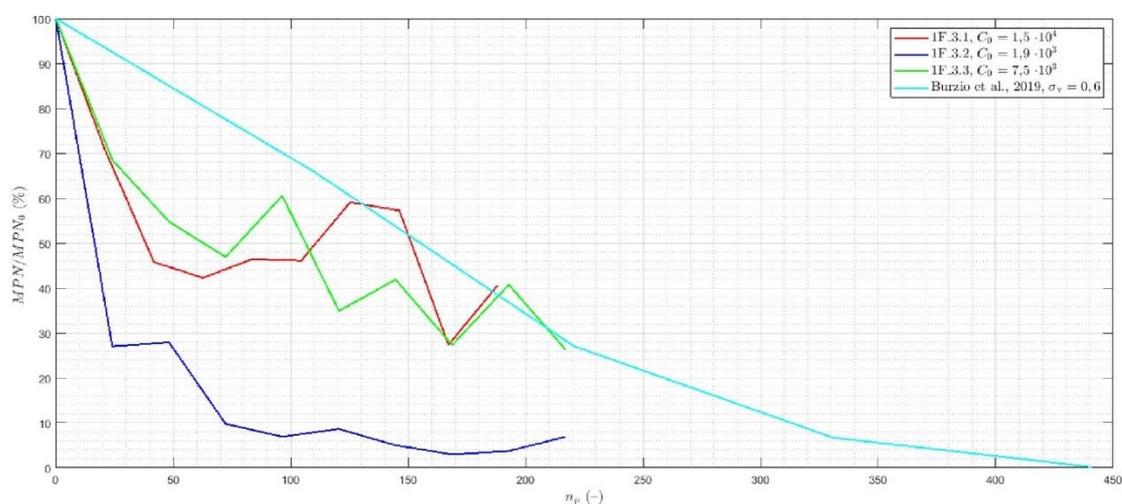


Figura 7.21 – Confronto grafico tra il primo gruppo di esperimenti ed i risultati ottenuti da Burzio et al..

Per prima cosa, bisogna evidenziare che i risultati di abbattimento di Burzio et al. sono per una piastra a quattro fori ed hanno le stesse condizioni iniziale di concentrazione batterica; invece, le prove eseguite con un foro solo non hanno lo stesso ordine di grandezza. Inoltre, si segnala che per la prova eseguita il 16/06/2020, l'inoculo di batteri era stato preparato sei giorni prima e non il giorno stesso dell'esperimento, per testare la vitalità dei batteri anche diversi giorni dopo la preparazione. Per tutte le prove si segnalano con le condizioni degli esperimenti svolti con la P.I.V. si hanno delle differenze nel numero di Reynolds inferiori al 5%; nel numero di cavitazione c'è una differenza di circa il 5% per le prove eseguite il 11/06/2020 ed il 16/06/2020 e nessuna differenza per la prova eseguita il 18/06/2020. Per tutte le prove, quindi, si può affermare che le condizioni idrodinamiche siano praticamente le stesse di quelle degli esperimenti eseguiti con la P.I.V.

Dai risultati delle analisi batteriche si può osservare che:

1. l'utilizzo di un inoculo preparato diversi giorni prima dell'esecuzione della prova comporta una diminuzione della concentrazione iniziale dei batteri, ma non incide sulle concentrazioni rilevate nei campioni d'acqua trattata con cavitazione idrodinamica prelevati dal circuito;

2. osservando la figura 7.21 si può notare che la percentuale di batteri residua per le prove a un foro è superiore rispetto a quella ottenuta con quattro fori, tranne che per la prova eseguita il 16/06/2020 e rappresentata in blu, in cui anche con meno passaggi si raggiunge un abbattimento quasi totale;

3. gli esperimenti eseguiti in data 11/06/2020 ed in data 18/06/2020, rappresentati rispettivamente con le curve rossa e verde, presentano invece delle concentrazioni residue più alte, ma bisogna tenere presente che il numero di passaggi n_p è minore.

In base a queste osservazioni, emerge che l'abbattimento nella prova eseguita il 16/06/2020 è da attribuire alla cavitazione idrodinamica e non all'aver usato un inoculo non fresco, in quanto la durata del trattamento con la cavitazione idrodinamica è molto minore rispetto al tempo che è stato necessario per avere il decadimento rilevato nella concentrazione iniziale dopo sei giorni dalla preparazione della soluzione batterica "madre". Inoltre, l'efficacia della cavitazione idrodinamica è sensibile alla concentrazione iniziale dei batteri in acqua. In particolare, per concentrazioni iniziali dell'ordine di 10^3 si ottiene un abbattimento prossimo al 100%, e per concentrazioni iniziali dell'ordine di 10^4 si raggiunge al massimo il 30%. Nonostante le oscillazioni nelle curve, per concentrazioni iniziali dell'ordine di 10^4 (che possono essere ricondotte anche alle incertezze del metodo di analisi della concentrazione batterica e al fatto che si ha a che fare con organismi vivi, per questo poco controllabili), si ha un andamento decrescente che fa supporre una reale efficacia del trattamento con la cavitazione idrodinamica anche a concentrazioni più alte, ma che è poco apprezzabile vista la breve durata del trattamento rispetto alle prove con quattro fori.

Nella figura 7.22 si riporta un confronto tra i risultati di abbattimento della carica batterica del secondo gruppo di esperimenti e la media dell'abbattimento della carica batterica ottenuta dagli autori Burzio et al..

In ordinata viene rappresentata la concentrazione batterica residua. La curva rossa rappresenta l'esperimento svolto in data 22/06/2020, la curva blu rappresenta l'esperimento svolto in data 25/06/2020, la curva verde rappresenta l'esperimento svolto in data 01/07/2020 e la curva azzurra rappresenta la media degli esperimenti eseguiti nello studio di Burzio et al.

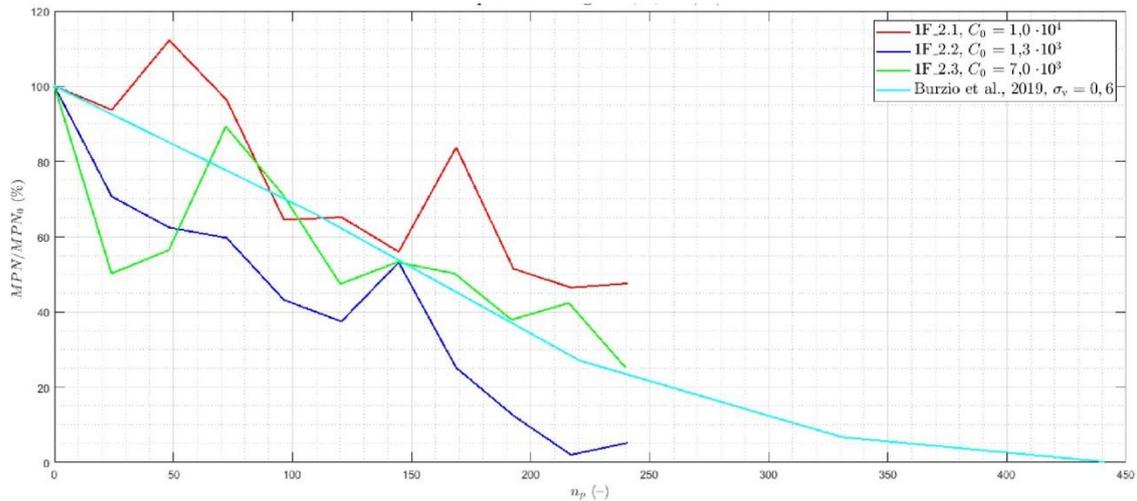


Figura 7.22 – Confronto grafico tra il secondo gruppo di esperimenti ed i risultati ottenuti da Burzio et al..

Per tutte e tre le prove si riscontrano differenze nel numero di cavitazione e nel numero di Reynolds inferiori al 5 % con le condizioni degli esperimenti con la P.I.V. e pertanto i regimi idrodinamici possono considerarsi praticamente gli stessi.

Di queste tre prove, solo quella svolta in data 22/06/2020 è stata eseguita con un inoculo fresco, mentre per le altre due la soluzione di batteri era stata preparata nei giorni precedenti la prova. Osservando la figura 7.22 si può notare che l'andamento di tutte le curve è molto oscillante, ma si vede chiaramente una tendenza discendente; e che la prova svolta in data 25/06/2020, rappresentata con una curva blu, presenta l'abbattimento maggiore, con una concentrazione residua prossima allo zero, mentre la prova in data 22/06/2020, rappresentata con una curva rossa, presenta l'abbattimento minore.

Sulla base di queste osservazioni si pone la questione di capire se i risultati ottenuti in termini di abbattimento per le tre prove, a parità di condizioni idrodinamiche, siano in qualche modo influenzati dalla concentrazione iniziale dei batteri oppure dall'età dei microorganismi stessi, oppure da entrambe le variabili: infatti la prova svolta in data 25/06/2020 presenta la concentrazione iniziale minore ma anche l'età dell'inoculo maggiore, viceversa per la prova svolta in data 22/06/2020. Dallo studio di Burzio et al. è emerso che la concentrazione iniziale non incide sull'abbattimento finale, per cui le differenze nella concentrazione residua potrebbero essere dovute ad una maggiore sensibilità al trattamento con cavitazione idrodinamica da parte dei batteri più "vecchi", ma questa rimane al momento un'ipotesi che deve essere dimostrata.

Conclusioni

Il lavoro di tesi svolto ha permesso di dimostrare la bontà di quanto pubblicato degli autori Burzio et al., riportando come anche in questo circuito, utilizzando gli stessi parametri idraulici adimensionali, si siano ottenuti gli stessi risultati di disinfezione dell'acqua. Gli esperimenti svolti in seguito hanno confermato quanto già riportato in letteratura, ovvero che ad un numero di cavitazione minore corrisponde un'intensità cavitativa maggiore e quindi una distruzione batterica maggiore. Gli esperimenti svolti con il reattore a piastra forata a 4.5 mm di diametro sono pochi per cui i risultati ottenuti devono essere integrati con altre prove al fine di ottenere una quantità tale da poter stabilire i reali effetti di disinfezione.

Lo studio eseguito pone diverse questioni aperte quali la valutazione della strozzatura prodotta dalla valvola a valle del reattore, la valutazione su quale effetto fisico prodotto dalla cavitazione svolga un ruolo disinfettante rilevante, la valutazione di altri reattori, la valutazione dell'attività biologica, come sia possibile riprodurre il fenomeno su larga scala, e su come questo possa integrare le attuali tecniche di disinfezione.

Bibliografia

- [1] **Albanese L.; Ciriminna, R.; Meneguzzo, F.; Pagliaro, M.** Energy efficient inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* via controlled hydrodynamic cavitation - 2015.
- [2] **Ambulgekar, G. V.; Samant, S. D.; Pandit, A. B.** Oxidation of alkylarenes using aqueous potassium - 2005.
- [3] **Arrojo, S.; Benito, Y.; Martínez Tarifa, A.** A parametrical study of disinfection with hydrodynamic cavitation - 2008.
- [4] **Arrojo, S.; Benito, Y.** A theoretical study of hydrodynamic cavitation - 2008.
- [5] **Badve, M. P.; Bhagat, M. N.; Pandit, A. B.** Microbial disinfection of seawater using hydrodynamic cavitation - 2015.
- [6] **Bagal, M. V.; Gogate, P. R.** Wastewater treatment using hybrid treatment schemes based on cavitation and Fenton chemistry: a review - 2014.
- [7] **Baker, M. N.** The Quest for Pure Water. American Water Works Association - 1948.
- [8] **Balasundaram, B.; Harrison, S. T. L.** Optimising orifice geometry for selective release of periplasmic products during cell disruption by hydrodynamic cavitation - 2011.
- [9] **Balasundaram, B.; Harrison, S. T. L.** Study of physical and biological factors involved in the disruption of *E. coli* by hydrodynamic cavitation - 2006.
- [10] **Bartosch, S.; Mansch, R.; Knotzsch, K.; Bock, E.** CTC staining and counting of actively respiring bacteria in natural stone using confocal laser scanning microscopy. *J. Microbiol* - 2003.
- [11] **Brennen, C. E.** Fundamentals of Multiphase Flows. Cambridge University Press - 2005.
- [12] **Brennen, C. E.** Fundamentals of Multiphase Flows. Cambridge University Press - 2005.
- [13] **Burzio, E.; Bersani, F.; Caridi, G.C.A.; Vesipa, R.; Ridolfi, L. Manes, C.** Water disinfection by orifice-induced hydrodynamic cavitation - 2020.
- [14] **Carpenter, J.; Badve M.; Rajoriya S. G.; Saharan, V.K.; Pandit, A.B.** Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry - 2017.
- [15] **Cataldo F.** Ultrasound-induced cracking and pyrolysis of some aromatic and naphthenic hydrocarbons - 2000.

- [16] **Chakinala, A. G.; Bremner, D. H.; Gogate, P. R.; Namkung, K. C.; Burgess, A. E.** Multivariate analysis of phenol mineralization by combined hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing - 2008.
- [17] **Crudo, D.; Bosco, V.; Cavaglia, G.; Mantegna, S.; Battaglia, L.; Cravotto, G.** Process intensification in food industry: hydrodynamic and acoustic cavitation for fresh milk treatment. - 2014.
- [18] **Cudina, M.** Detection of cavitation phenomenon in a centrifugal pump using audible sound - 2003.
- [19] **Dalfré Filho, J. G.; Pereira Assis, M.; Borri Genovez, A. I.** Bacterial inactivation in artificially and naturally contaminated water using a cavitating jet apparatus - 2015.
- [20] **Dalfré Filho, J.G.; Genovez, A. I. B.; Silva, L. V. C.** Evaluating Damage of Concrete Hydraulic Structures Caused by Cavitation. Recent developments on hydraulic structures - 2006.
- [21] **Doulah, M. S.; Hammond, T. H.; Brookman, J. S. G.** A hydrodynamic mechanism for the disintegration of *Saccharomyces Cerevisiae* in an industrial homogenizer - 1975.
- [22] **Dular, M.; Delgosha, O. C.** Thermodynamic effects during growth and collapse of a single cavitation bubble - 2013.
- [23] **Fuda G.** Studio sperimentale della disinfezione dell'acqua mediante cavitazione idrodinamica - 2018.
- [24] **Garofano, M.** Metodi innovativi per la disinfezione dell'acqua: utilizzo della cavitazione idrodinamica - 2016.
- [25] **Gogate, P. R.; Kabadi, A. M.** A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. Biochemical Engineering - 2009.
- [26] **Gogate, P. R.; Patil, P. N.** Combined treatment technology based on synergism between hydrodynamic cavitation and advanced oxidation processes - 2015.
- [27] **Goss, W.A.; Deitz, W.H.; Cook, T.M.** Mechanism of action of nalidixic acid on *Escherichia coli* - 1964.
- [28] **Gutierrez, J. M.; Gonzalez, C.; Maestro, A; Sole, I.; Pey, C. M.; Nolla, J.** Nano-emulsions: new applications and optimization of their preparation - 2018.
- [29] **Harrison, S., & Pandit, A.** The disruption of microbial cells by hydrodynamic cavitation. - 1992.
- [30] **Heinemann, H.; Spelght, J. G.** The chemistry and technology of petroleum, 4th ed., USA: Taylor and Francis Group LLC - 2006.

- [31] **Henglein, A.** Chemical effects of continuous and pulsed ultrasound in aqueous solutions - 1995.
- [32] **Jyoti, K. K.; Pandit, A.B.** Water disinfection by acoustic and Hydrodynamic cavitation - 2001.
- [33] **Jyoti, K. K.; Pandit, A.B.** Drinking water disinfection techniques - 2012.
- [34] **Kell, D.B.; Kaprelyants, A.S.; Weichart, D.H.; Harwood, C.R.; Barer, M.R.** Viability and activity in readily culturable bacteria: a review and discussion of the practical issues, Antonie van Leeuwenhoek - 1998.
- [35] **Koval I., L. S.** Ultrasonic intensification of the natural water and sewage disinfection - 2011.
- [36] **Lee, I.; Han, J.** Simultaneous treatment (cell disruption and lipid extraction) of wet microalgae using hydrodynamic cavitation for enhancing the lipid yield - 2015.
- [37] **Lisle, T.J.; B.H. Pyle, B.H.; McFeters, G.A.** The use of multiple indices of physiological activity to assess viability in chlorine disinfected Escherichia coli O157:H7 - 1999.
- [38] **Maddikeri, G. L.; Gogate, P. R.; Pandit, A. B.** Intensified synthesis of biodiesel using hydrodynamic cavitation reactors based on the interesterification of waste cooking oil. Fuel - 2014.
- [39] **Mahulkar, A.; Pandit, A. B.** Ed. Analysis of hydrodynamic and acoustic cavitation reactors - 2010.
- [40] **Malavasi Stefano** On cavitation occurrence in perforated plates - 2014.
- [41] **Mezule, L.; Tsyfansky, S.; Yakushevich, V.; Juhna, T.** A simple technique for water disinfection with hydrodynamic cavitation: Effect on survival of Escherichia coli - 2009.
- [42] **Milly, P. J.; Toledo, R. T.; Kerr, W. L.; Armstead, D.** Hydrodynamic cavitation: characterization of a novel design with energy considerations for the inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in apple juice - 2008.
- [43] **Oppel, T.** CAV-OX – Cavitation oxidation process - 1994.
- [44] **Pandit, A. B.; Joshi, J. B.** Hydrolysis of fatty oils: effect of cavitation - 1993.
- [45] **Pinjari, D. V.; Pandit, A. B.** Cavitation milling of natural cellulose to nanofibrils - 2010.
- [46] **Prajapat, A. L.; Gogate, P.R.** Intensification of depolymerization of aqueous guar gum using hydrodynamic cavitation - 2015.

- [47] **Prüss-Üstün, A.; Bos, R.; Gore, F.; Bartram, J.** Safer Water, Better Health: Costs, Benefits and Sustainability of Interventions to Protect and Promote Health - 2008.
- [48] **Ramisetty, K. A.; Pandit, A. B.; Gogate, P. R.** A novel approach of producing oil in water emulsion using hydrodynamic cavitation reactor - 2014.
- [49] **Ricucci, F.** Cavitazione idrodinamica come metodo innovativo per la disinfezione delle acque - 2017.
- [50] **Rodriguez, G.G.; Hipps, D.; Ishiguro, K.; Ridgway, H.F.** Use of a fluorescent redox probe for direct visualization of actively respiring bacteria - 1992.
- [51] **Saharan, V. K.; Pandit, A. B.; Satish Kumar, P. S.; Anandan, S.** Hydrodynamic cavitation as an advanced oxidation technique for the degradation of acid red 88 dye - 2012.
- [52] **Sainte Beuve, R.; Morison, K. R.** Enzymatic hydrolysis of canola oil with hydrodynamic cavitation - 2010.
- [53] **Šarc, A.; Stepišnik-Perdih, T.; Petkovšek, M.; Dular, M.** The issue of cavitation number value in studies of water treatment by hydrodynamic cavitation - 2017.
- [54] **Save, S. S.; Pandit, A. B.; Joshi, J. B.** Save, S. S.; Pandit, A. B.; Joshi, J. B. - 1994.
- [55] **Save, S. S.; Pandit, A. B.; Joshi, J. B.** Use of hydrodynamic cavitation for large scale cell disruption - 1997.
- [56] **Sawant, S. S.; Anil, A. C.; Krishnamurthy, V.; Gaonkar, C.; Kolwalkar, J.;**
- [57] **Khandeparker, L.; Desai, D.; Mahulkar, A. V.; Ranade, V. V.; Pandit, A. B.** Effect of hydrodynamic cavitation on zooplankton: A tool for disinfection - 2008.
- [58] **Schaule, G.; Flemming, H.; Ridgway, H.** Use of 5-cyano-2,3-ditolyl tetrazolium chloride for quantifying planktonic and sessile respiring bacteria in drinking water - 1993.
- [59] **Scherba, G.; Weigel, R.M.; O'Brien Jr., W.D.** Quantitative assessment of the germicidal efficacy of ultrasonic energy, Appl. Environ - 1991.
- [60] **Senthilkumar, P.; Sivakumar, M.; Pandit, A. B.** Experimental quantification of chemical effects of hydrodynamic cavitation - 2000.
- [61] **Sharma, S. D.; Mani, K.; Arakeri, V. H.** Cavitation noise studies on marine propellers - 1990.
- [62] **Sivakumar, M.; Tang, S. Y.; Tan, K.W.** Cavitation technology – a greener processing technique for the generation of pharmaceutical nanoemulsion - 2014.
- [63] **Testud, P.; Moussou, P.; Hirschberg, A.; Aurégan, Y.** Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe - 2007.

- [64] **Torredimare M.** Hydrodynamic cavitation and measurement of bubbles implosion - 2018.
- [65] **Tullis, J. P.** Hydraulics of Pipelines: Pumps, Valves, Cavitation, Transients - 1989.
- [66] **United Nations** The United Nations world water development report 4 - 2017.
- [67] **Wang, Y.; Jia, A.; Wu, Y.; Wu, C.; Chen, L.** Disinfection of bore well water with chlorine dioxide/sodium hypochlorite and hydrodynamic cavitation - 2015.
- [68] **World Health Organization** WHO Seminar Pack for Drinking-water Quality-disinfection - 1996.
- [69] **World Health Organization** Enterohaemorrhagic Escherichia coli - 2005.
- [70] **World Health Organization** Global Health Observatory (GHO): Water, Sanitation and Hygiene - 2014.
- [71] **Wu, Z.; Shen, H.; Ondruschka, B.; Zhang, Y.; Wang, W.; Bremner, D. H.** Removal of bluegreen algae using the hybrid method of hydrodynamic cavitation and ozonation - 2012.