



**POLITECNICO DI TORINO**

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE**

**STUDIO SPERIMENTALE DELLA  
DISINFEZIONE DELL'ACQUA MEDIANTE  
CAVITAZIONE IDRODINAMICA**

**Relatori**

Prof. Costantino Manes

Prof. Luca Ridolfi

Ing. Riccardo Vesipa

Dott.ssa Francesca Bersani (SMAT)

**Candidato**

Gianluca Fuda

Luglio 2018



*Ogni ostacolo, ogni muro di mattoni, è lì per un motivo preciso.  
Non è lì per escluderci da qualcosa,  
ma per offrirci la possibilità di dimostrare  
in che misura ci teniamo.  
I muri di mattoni sono lì per fermare le persone  
che non hanno abbastanza voglia di superarli.  
Sono lì per fermare gli altri.*

Randy Pausch  
Last Lecture: Achieving Your Childhood Dreams  
Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania  
18 settembre 2007



## Sommario

RINGRAZIAMENTI.....	VII
DEDICATO A .....	IX
STUDIO SPERIMENTALE DELLA DISINFEZIONE DELL'ACQUA MEDIANTE CAVITAZIONE IDRODINAMICA .....	15
1. INTRODUZIONE .....	17
2. GENERALITÀ SULLA DISINFEZIONE DELLE ACQUE .....	23
2.1. Cenni storici.....	23
2.2. Panoramica mondiale.....	26
2.3. Definizione di disinfezione dell'acqua .....	29
2.4. Trattamento dell'acqua .....	30
2.5. Condizioni per una disinfezione ottimale dell'acqua .....	30
2.6. Sostanze batteriche presenti nell'acqua.....	31
2.7. Malattie infettive ed acqua insalubre.....	32
2.7.1. Epidemie di colera negli anni 2000.....	38
2.8. Sostanze chimiche usate per la disinfezione dell'acqua e sottoprodotti di reazione .	41
2.8.1. Cloro .....	41
2.8.2. Ipoclorito di sodio.....	42
2.8.3. Cloroammine .....	42
2.8.4. Diossido di cloro .....	42
2.8.5. Ozono .....	43
2.8.6. Perossido di idrogeno.....	43
2.8.7. Altre tecniche basate sull'utilizzo di sostanze chimiche .....	44
2.8.8. I sottoprodotti della disinfezione chimica .....	45
2.9. Modello matematico di Chick-Watson per la valutazione della disinfezione .....	50
2.10. Disinfezione in ambito civile per l'uso domestico.....	51
2.10.1. Approvvigionamento delle acque.....	51
2.10.2. Impianto di potabilizzazione SMAT Torino .....	52
2.11. Metodi fisici per la disinfezione dell'acqua.....	57
2.11.1. Luce UV.....	57

2.11.2.	Metodi sfruttanti la cavitazione.....	58
3.	LA CAVITAZIONE.....	59
3.1.	Potenzialità della cavitazione: perché studiarla.....	59
3.2.	Riguardo la cavitazione.....	62
3.2.1.	Descrizione del fenomeno .....	62
3.2.2.	Effetti negativi della cavitazione .....	64
3.3.	Dinamica dello sviluppo della bolla .....	65
3.3.1.	Formazione delle bolle: nuclei di cavitazione .....	65
3.3.2.	Caduta di pressione per la cavitazione .....	67
3.3.3.	Vorticità e turbolenza .....	68
3.3.4.	Fase di recupero della pressione .....	69
3.4.	Definizione del Numero di cavitazione.....	71
3.5.	Fenomeni cavitazionali: osservazioni fotografiche .....	73
3.5.1.	Configurazioni delle cavità in una turbopompa o all'interno di un'elica.....	73
3.5.2.	Origine dei vortici cavitazionali.....	74
3.6.	Classificazione basata sugli effetti cavitazionali.....	77
3.7.	Classificazione basata sulla tecnologia cavitazionale.....	78
3.7.1.	Cavitazione acustica .....	78
3.7.2.	Cavitazione ottica e particellare .....	85
3.7.3.	Cavitazione idrodinamica .....	85
4.	CAVITAZIONE IDRODINAMICA.....	87
4.1.	Generazione della cavitazione.....	89
4.1.1.	Perdite di carico.....	91
4.2.	Effetti indotti dalla cavitazione .....	93
4.3.	Reattori per la cavitazione idrodinamica .....	96
4.3.1.	Omogeneizzatori .....	96
4.3.2.	Piastre forate e tubi di Venturi .....	98
4.4.	Criteri geometrici per dispositivi ad orifizio o a piastre multiforate .....	100
4.4.1.	Thin e thick plate .....	101
4.4.2.	$\alpha$ , il rapporto tra il perimetro dei fori e l'area totale del flusso .....	103
4.4.3.	$\beta$ , il rapporto tra l'area dei fori e l'area della sezione trasversale del tubo .....	103

4.4.4.	Effetto di altri parametri operativi della HC.....	104
4.4.5.	Ottimizzazione della configurazione geometrica e dei parametri operativi .....	105
4.5.	Applicazione della HC nei processi chimici .....	105
4.5.1.	Reazioni di ossidazione.....	106
4.5.2.	Idrolisi degli oli .....	107
4.5.3.	Reazioni di depolimerizzazione .....	108
4.5.4.	Lavorazione del greggio.....	110
4.5.5.	Reazione di transesterificazione: sintesi di biodiesel.....	111
4.5.6.	Trattamento delle acque reflue .....	112
4.5.7.	Trattamento delle acque di zavorra .....	115
4.6.	Applicazione della HC nei processi fisici .....	117
4.6.1.	Sintesi di nanomateriali .....	117
4.6.2.	Produzione di prodotti biologici .....	120
4.6.3.	Effetto di altri disinfettanti in combinazione con la HC .....	122
4.6.4.	Industrie alimentari .....	123
4.6.5.	Distruzione delle cellule microbiche.....	125
5.	CASI STUDIO: ESPERIMENTI CON <i>ESCHERICHIA COLI</i> IN LETTERATURA .....	133
5.1.	Cosa sono gli <i>Escherichia coli</i> : diffusione e pericolosità .....	134
5.2.	Arrojo et al., 2007.....	138
5.2.1.	Effetti fisici e chimici della HC.....	138
5.2.2.	Procedura sperimentale .....	138
5.2.3.	Design della camera di cavitazione.....	139
5.2.4.	Configurazioni impiantistiche più efficienti .....	140
5.2.5.	Influenza della pressione di scarico .....	142
5.2.6.	Influenza della concentrazione iniziale di CFU.....	143
5.3.	Mezule et al., 2009 .....	145
5.3.1.	Ceppi batterici utilizzati e preparazione dei campioni.....	145
5.3.2.	Trattamento del campione .....	146
5.3.3.	Analisi dei campioni con metodo CTC e DVC .....	147
5.4.	Dalfré Filho et al., 2015 .....	151
5.4.1.	Configurazione dell'impianto .....	152

5.4.2.	Fasi dello studio .....	153
5.4.3.	Risultati delle analisi .....	154
6.	IMPIANTO SPERIMENTALE PER L'INDUZIONE DELLA CAVITAZIONE IDRODINAMICA .....	161
6.1.	Sistema idraulico .....	168
6.1.1.	Tubazioni, raccordi e tappi di chiusura .....	168
6.1.2.	Pompa idraulica per indurre la cavitazione idrodinamica.....	171
6.1.3.	Inverter.....	172
6.1.4.	Manometri per il monitoraggio delle cadute di pressione.....	173
6.1.5.	Serbatoio di accumulo .....	174
6.1.6.	Misuratore di portata .....	176
6.1.7.	Piezometro .....	177
6.2.	Reattore cavitazionale.....	178
6.2.1.	Piastra forata per l'induzione della cavitazione .....	178
6.2.2.	Specola di vetro .....	180
6.2.3.	Valvola a sfera .....	181
6.2.4.	Luci: lampada e puntatore laser .....	182
6.3.	Impianto di raffreddamento.....	183
6.3.1.	Chiller .....	184
6.3.2.	Serpentina di raffreddamento .....	186
6.3.3.	Pompa idraulica del circuito di raffreddamento .....	187
6.3.4.	Serbatoio di raccolta.....	187
6.3.5.	Raccordo a T e valvola a sfera.....	188
6.4.	Sistema di scarico e prelievo dei campioni .....	189
6.5.	Altra strumentazione.....	192
6.5.1.	Termometro .....	192
6.5.2.	Fonometro.....	193
6.5.3.	Scheda di acquisizione dati.....	196
7.	PROCEDURE SPERIMENTALI .....	199
7.1.	Esperimenti di disinfezione.....	200
7.1.1.	Accensione impianto di raffreddamento .....	201
7.1.2.	Montaggio piastra forata e serraggio .....	202

7.1.3.	Caricamento impianto e mescolamento.....	203
7.1.4.	Impostazione frequenza e pressione di valle.....	205
7.1.5.	Prelievo campioni .....	205
7.1.6.	Disinfezione e risciacquo impianto .....	207
7.1.7.	Disinfezione locale.....	210
7.2.	Registrazioni con fonometro .....	211
7.2.1.	Posizionamento e collegamento alla DAQ.....	211
7.2.2.	Registrazioni .....	214
7.3.	Esperimenti di controllo .....	215
7.3.1.	Esperimenti senza piastra forata .....	215
7.3.2.	Triplicati.....	216
7.3.3.	Cloro residuo .....	217
8.	ESPERIMENTI DI DISINFEZIONE .....	219
8.1.	Metodo di analisi batterica <i>Colilert</i> .....	219
8.1.1.	Principi del metodo .....	220
8.1.2.	Strumentazione e procedura <i>Quanti-Tray</i> .....	220
8.1.3.	Interpretazione dei risultati <i>Colilert</i> .....	221
8.2.	Esperimenti di controllo .....	224
8.2.1.	Esperimenti in assenza di piastra forata .....	224
8.2.2.	Controllo sui triplicati .....	227
8.2.3.	Controllo del cloro residuo .....	228
8.3.	Configurazione dei parametri geometrici del reattore.....	230
8.4.	Esperimenti in funzione del numero di cavitazione.....	230
8.4.1.	Influenza della valvola a sfera per numero di cavitazione 0,6 .....	248
8.4.2.	Variazioni di temperatura.....	252
8.5.	Esperimenti in funzione della concentrazione batterica .....	253
8.6.	Registrazioni fonometriche .....	255
8.6.1.	Cenni teorici .....	255
8.6.2.	Valutazione dello spettro di potenza.....	256
8.6.3.	Cavitazione della valvola a sfera .....	259
8.6.4.	Evoluzione del fenomeno di cavitazione lungo la condotta.....	260

9. CONCLUSIONI .....	261
9.1. Evidenze riscontrate e risultati ottenuti .....	261
9.2. Questioni aperte.....	262
BIBLIOGRAFIA.....	263

# RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro di Tesi è il coronamento di un'impegnativa carriera universitaria iniziata e conclusa presso il Politecnico di Torino. Desidero ringraziare alcune delle persone che hanno contribuito alla riuscita di questo percorso, con preziosi consigli ed immancabili aiuti:

al Prof. Luca Ridolfi, per il sostegno durante tutto l'arco del lavoro e l'impareggiabile passione nella ricerca, per avermi trasmesso, fin dal primo incontro, l'entusiasmo per gli studi di laboratorio ed aver alimentato costantemente la curiosità, va il mio più sentito ringraziamento;

al Prof. Costantino Manes, per le spiegazioni di statistica ed acustica, per la presenza sempre importante ed il contributo nell'interpretazione dei risultati, oltre che per gli incoraggiamenti e le gratificazioni ad ogni passo compiuto va la mia riconoscenza;

all'Ing. Riccardo Vesipa, per avermi accompagnato durante i primi cruciali passi dello studio, per avermi spronato a migliorarmi e aver condiviso la passione per i lavori da cantiere, va un grazie di cuore;

all'Ing. Edoardo Burzio, per i preziosi consigli, per aver condiviso quotidianamente il lavoro in laboratorio, con leggerezza e passione, va il mio in bocca al lupo per il proseguimento dei suoi studi accademici;

a Marco Torredimare, spalla infaticabile e aiuto prezioso negli studi fonometrici, per l'aiuto enorme nella programmazione e nell'elaborazione dei dati e per la pazienza avuta, va il mio più sentito incoraggiamento per la sua carriera universitaria;

al Prof. Paolo Cortese, per avermi insegnato cosa significhi il "lavoro di zappa" fin dal corso di Analisi I: *"Ragazzi, dovete costruirvi un sogno; e per costruirlo bisogna tirarsi su le maniche"* – 5 ottobre 2011, prima lezione al Politecnico di Torino.



# DEDICATO A

Ogni opera che si rispetti necessita di essere dedicata a qualcuno. La scelta è stata semplice e dettata dal cuore.

A Concetta e Cosimo,

genitori esemplari, esempi granitici nella vita. Un grazie infinito per avermi permesso di realizzare questo sogno con i vostri mille sacrifici. Grazie per il supporto e soprattutto per la pazienza, una delle forme più alte d'amore.

A Martina,

sorella, amica e confidente. Spalla sempre presente con la discrezione di chi sa capirti in ogni momento. Adesso avremo qualche sera in più da dedicare insieme alle nostre serie tv. Ricorda sempre: Nino Frassica ti guarda dalla scatola dei cereali.

A Mirko,

amico, fratello e instancabile compagno di viaggio. Difficilmente le parole potrebbero rendere giustizia ai vent'anni affrontati sempre fianco a fianco. Rimane una certezza: se io comincio una frase, tu sai come concluderla. Sempre.

Un grazie di cuore va alla mia famiglia, che ha sempre creduto in me.

Un pensiero speciale va a Gianni e Palma, la mia famiglia bis.

Un abbraccio va ad alcune persone speciali che mi hanno sempre sostenuto in questi anni: Arianna, la mamma in più quando è servito; Alessandra, la sorella terroncella; Ka, Pissò e Titti, amici storici mai andati via; Manu, penfriend di una vita.

Un ringraziamento va a tutti coloro che hanno condiviso con me, per un'ora o per qualche anno, questo percorso; grazie ai colleghi del Poli, che non cito uno ad uno per non commettere qualche dimenticanza.

Infine, questo lavoro è dedicato anche al Poli, perno attorno al quale sono ruotati questi ultimi anni: è stato ostacolo e opportunità, scoramento e stimolo, gratificazione, orgoglio, testardaggine, ma soprattutto una grande ed impegnativa prova. Una prova oggi finalmente superata. L'occasione per realizzare un sogno.



**STUDIO SPERIMENTALE DELLA  
DISINFEZIONE DELL'ACQUA MEDIANTE  
CAVITAZIONE IDRODINAMICA**



## 1. INTRODUZIONE

*“È ormai tempo di considerare l’accesso all’acqua potabile e ai servizi sanitari nel novero dei diritti umani, definito come il diritto uguale per tutti, senza discriminazioni, all’accesso ad una sufficiente quantità di acqua potabile per uso personale e domestico [...] allo scopo di migliorare la qualità della vita e della salute.*

*Gli stati nazionali [...] dovrebbero fare i passi necessari per assicurare che questa quantità sufficiente di acqua sia di buona qualità, accessibile economicamente a tutti e che ciascuno la possa raccogliere ad una distanza ragionevole dalla propria casa.”*

**Ufficio dell’ Alto commissariato delle Nazioni Unite per i diritti umani, settembre 2007**

Il 28 luglio 2010 l’Assemblea Generale ONU (*General Assembly GA/10967*) ha adottato una risoluzione che invita gli Stati e le organizzazioni internazionali a fornire risorse finanziarie e capacità costruttive e tecnologiche per rafforzare gli sforzi al fine di garantire acqua potabile pulita, sicura e accessibile a tutti, per soddisfare i bisogni personali primari e le esigenze sanitarie.

Il diritto all’acqua è universalmente riconosciuto quale estensione del diritto alla vita affermato dalla Dichiarazione universale dei diritti umani, e stabilisce l’imprescindibilità di tale risorsa relativamente alla vita umana, senza discriminazione alcuna, così come sottoscritto dalle risoluzioni dall’ Assemblea Generale nel 2015. Tali considerazioni si inquadrano nel più ampio respiro dell’Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile elaborata dall’ONU.

Ogni anno circa cinque milioni di persone muoiono a causa di malattie derivanti da acque insalubri. Di questi 1,5 milioni sono bambini sotto i cinque anni di vita, più esposti e vulnerabili: un numero di vittime maggiori rispetto alle conseguenze complessive di AIDS, morbillo e malaria. Si stima che 1,2 miliardi è il numero di persone nel mondo che non ha accesso a fonti idriche pulite e sicure, mentre 2,4 miliardi è il numero di persone che non può usufruire di un adeguato sistema di sanificazione.

Ad oggi i trattamenti più utilizzati per rendere l’acqua conforme al consumo umano sono quelli di natura chimica, basati sull’utilizzo di particolari agenti biocidi (ad esempio cloro, perossido di idrogeno, ozono, ecc.) che, reagendo con le sostanze o i batteri presenti all’interno dell’acqua, ne determinano l’uccisione o l’ossidazione in maniera tale da rendere l’acqua adeguata rispetto a determinati standard qualitativi stabiliti dalla legge. I motivi di questa scelta sono molteplici: praticità nello stoccaggio, semplicità di utilizzo, velocità di intervento.

Tuttavia, a partire dagli anni settanta, gli studi hanno dimostrato che parte delle reazioni tra agente disinfettante e materiale organico possono produrre sottoprodotti di reazione cancerogeni, definiti dall'acronimo *THM*. L'esposizione prolungata nel tempo suggerisce un fenomeno di bioaccumulo nei tessuti che incide nelle percentuali di manifestazione di alcune forme tumorali. Inoltre, l'utilizzo di sostanze chimiche che caratterizzano l'acqua con odori e sapori funge spesso da deterrente per il consumo dell'acqua fornita dagli acquedotti, favorendo l'acquisto di acqua minerale in bottiglia ed incrementando significativamente la spesa pro capite annua.

A tal proposito, negli ultimi cinquant'anni si sono moltiplicati gli investimenti riguardanti lo sviluppo di sistemi di disinfezione dell'acqua basati su tecniche di natura fisica, quali radiazioni UV, membrane, cavitazione. Tali metodi garantiscono l'assenza totale di sottoprodotti di reazione cancerogeni, ma non risultano ad oggi sostenibili dal punto di vista economico – energetico; in particolare la cavitazione idrodinamica si pone come un processo fisico-chimico dall'elevato potenziale. La cavitazione è definita come un fenomeno di formazione, crescita e collasso di microbolle o cavità che si verificano in pochi milli/microsecondi in più posizioni all'interno del reattore, rilasciando una grande quantità di energia in un breve lasso di tempo. Questa tecnologia, se opportunamente sfruttata, può migliorare la resa di numerose trasformazioni chimiche, come reazioni di ossidazione, rottura di composti ad alto peso molecolare in molecole più piccole, idrolisi di olio, reazioni di transesterificazione, e di processi di natura fisica, quali l'emulsione, la sintesi di nanoparticelle e la distruzione cellulare. La cavitazione idrodinamica (HC) si è dimostrata in diversi studi una tecnologia robusta, a basso costo e scalabile a livello industriale.

Pur supportando l'efficacia nei trattamenti citati, la letteratura non fornisce spiegazioni esaustive sui fenomeni che influenzano maggiormente le differenti applicazioni. È ampiamente stato dimostrato che la HC origina una serie di fenomeni fortemente energetici quali turbolenza, sforzi di taglio, getti ad alta velocità legati al collasso delle cavità e *hot spots* localizzati caratterizzati da alti valori di pressione e temperatura, generazione di radicali ossidrilici fortemente ossidativi; resta tuttavia da dimostrare quanto i differenti fenomeni influiscano nelle reazioni.

In diverse pubblicazioni (*Gogate e Kabadji, 2009; Mezule et al., 2009*) la HC è risultata una valida alternativa ai biocidi nel trattamento di cianobatteri e di alghe nei corpi idrici superficiali (*Wang et al., 2013*). L'implosione asimmetrica delle cavità sulla superficie dei microrganismi rompe la parete cellulare e ne inibisce la crescita (*Sawant et al., 2008*); ulteriori studi (*Arrojo et al., 2007; Dalfré Filho et al., 2015*) hanno dimostrato l'efficacia della tecnologia nei processi di disinfezione di acqua inquinata da *Escherichia coli* e batteri coliformi.

Nel solco tracciato dalle ricerche internazionali pone le sue basi la collaborazione tra Politecnico di Torino e SMAT (Società Metropolitana Acque Torino) volta a sviluppare ed ottimizzare un processo di disinfezione che sfrutti le potenzialità della cavitazione idrodinamica. Tale metodo si pone come il maggiormente sostenibile da un punto di vista economico per un impiego su larga scala. Lo sviluppo di impianti di dimensioni contenute, che possano abbattere la carica batterica in maniera relativamente rapida ed economica, eliminando o limitando l'utilizzo di agenti chimici per la disinfezione, è lo scopo principale della ricerca che si inserisce nel lavoro di Tesi intitolato *“Studio sperimentale della disinfezione dell'acqua mediante cavitazione idrodinamica”*. Tale progetto ha affrontato un importante sviluppo nell'arco degli ultimi due anni, grazie al prezioso contributo dei precedenti tesisti (Garofano, 2016; Ricucci, 2017) che hanno provveduto a dimensionare l'impianto e ad effettuare le prime prove di natura idraulica e chimica. Gli esperimenti di ossidazione hanno analizzato il tasso di degradazione del reattivo organico (Blu di Metilene) introdotto nell'impianto, mentre gli esperimenti di disinfezione sono stati effettuati sull'acqua del Po contaminata da Escherichia coli e coliformi e fornita dalla SMAT.

Durante lo studio presentato nei prossimi capitoli, SMAT ha svolto un ruolo chiave, sia come fornitore di acqua ultrapura e cariche batteriche, sia dal punto di vista delle analisi chimico – fisiche, supportando quotidianamente la ricerca con indicazioni fondamentali di carattere biologico. Tali suggerimenti hanno permesso di apportare diverse modifiche sia per quanto concerne la configurazione impiantistica che per le procedure cui attenersi durante gli esperimenti.

Modificando le condizioni al contorno, si è voluto valutare l'efficienza disinfettiva del reattore cavitazionale per comprendere quali siano gli effetti principali responsabili della distruzione batterica, con il fine ultimo di riuscire a controllarne lo sviluppo. Il presente lavoro di Tesi, cominciato nel marzo 2017, si pone i seguenti obiettivi:

1. la progettazione e l'esecuzione degli esperimenti di disinfezione mediante cavitazione idrodinamica, con cariche batteriche fornite dal partner SMAT, volti a studiare l'effetto del numero di cavitazione sull'efficienza dell'abbattimento;
2. la progettazione e l'esecuzione di esperimenti volti a correlare l'intensità di cavitazione con le caratteristiche del segnale acustico prodotto dall'implosione delle bolle generate dal reattore;
3. la predisposizione di eventuali modifiche all'impianto esistente;
4. l'elaborazione dei dati riguardanti le analisi chimico – batteriche, eseguite presso i laboratori SMAT, e le registrazioni fonometriche, al fine di stabilire le configurazioni ottimali dell'impianto e verificare la ripetibilità degli esperimenti;
5. l'elaborazione di un quadro riassuntivo dei risultati, al fine di circostanziare gli eventuali successi ottenuti e fornire le basi per ulteriori indagini future.

La Tesi si articola in 9 capitoli, all'interno dei quali verranno illustrati i principali aspetti riguardanti l'importanza della potabilizzazione delle acque, la descrizione del fenomeno della cavitazione, con un focus particolare sulle applicazioni della cavitazione idrodinamica, la disamina di esperimenti disinfettivi analoghi a quelli proposti presso il laboratorio di idraulica del Politecnico di Torino, al fine di trovare un'eventuale corrispondenza con la letteratura esistente, la descrizione dell'impianto, comprensiva delle modifiche apportate, la definizione del protocollo sperimentale, l'analisi dei dati chimico – biologici ed acustici ottenuti, le conclusioni dello studio.

Il Capitolo 2 è dedicato alle generalità sulla disinfezione delle acque; dopo una panoramica storica e mondiale, saranno trattati in maniera diffusa i motivi e l'importanza di una corretta depurazione, con un focus sulle più rappresentative epidemie degli anni 2000 originati dall'acqua insalubre, per poi affrontare la descrizione dei metodi chimici di disinfezione, la tipologia di approvvigionamento e la struttura impiantistica di potabilizzazione di SMAT a Torino ed infine i principali metodi fisici per il trattamento dell'acqua.

Il Capitolo 3 affronta il fenomeno della cavitazione, con una descrizione accurata del fenomeno, degli effetti cavitazionali generati, delle principali grandezze in gioco, definendo inoltre i parametri utilizzati per quantificarne lo sviluppo, come ad esempio il *Numero di cavitazione*. Si propone inoltre una classificazione tecnologica della cavitazione.

Il Capitolo 4 è dedicato interamente alla cavitazione idrodinamica e fornisce una panoramica dettagliata delle tipologie di reattori e dei parametri geometrici utili al dimensionamento, per finire con una descrizione delle principali applicazioni nei processi chimici e fisici.

Nel Capitolo 5 vengono proposti alcuni studi presenti in letteratura caratterizzati dall'utilizzo di acqua contaminata da *Escherichia coli*, fornendo un metro di paragone rispetto agli esperimenti eseguiti durante il presente lavoro di Tesi.

Il Capitolo 6 è dedicato alla descrizione dell'impianto di cavitazione ubicato presso il Laboratorio di idraulica "Giorgio Bidone" del Politecnico di Torino; vengono inoltre affrontate le modifiche e le migliorie eseguite rispetto alla configurazione utilizzata da *Garofano (2016)* e *Ricucci (2017)*.

Il Capitolo 7 riepiloga le procedure sperimentali utilizzate negli esperimenti di disinfezione, nelle operazioni di registrazione con il fonometro e negli esperimenti di controllo effettuati.

Nel Capitolo 8 vengono esposti e discussi approfonditamente i risultati degli esperimenti di disinfezione e controllo, oltre che l'analisi delle registrazioni acustiche.

Infine il Capitolo 9 è dedicato alle conclusioni ed ai suggerimenti per l'approfondimento degli studi presentati.

La sfida che si presenta davanti al nostro tempo è quella di riuscire a fornire uno strumento di depurazione delle acque efficiente, privo di sottoprodotti chimici, economicamente sostenibile per poter rendere l'acqua potabile accessibile anche nei paesi in via di sviluppo ad una percentuale di popolazione sempre maggiore. Il vero vantaggio di un sistema che sfrutta il principio della cavitazione idrodinamica sarebbe quello di fornire più micro-impianti distribuiti sul territorio, che necessitano quindi di limitate opere infrastrutturali per l'approvvigionamento degli insediamenti umani.



## 2. GENERALITÀ SULLA DISINFEZIONE DELLE ACQUE

### 2.1. Cenni storici

La disinfezione dell'acqua è una tecnica di trattamento che ha lo scopo di eliminare i microrganismi patogeni contenuti nell'acqua e potenzialmente dannosi per la salute umana. Diffusasi enormemente nel corso del secolo scorso, la potabilizzazione dell'acqua ha permesso di ridurre drasticamente il numero di casi epidemici legati a malattie come il tifo ed il colera.

Le prime testimonianze scritte di nozioni legate alla depurazione dell'acqua sono individuabili nell'antica India. Nell'Ousruta Sanghita, testo sanscrito datato 2000 a.C., si 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”*. Nel Sushruta Samhita, un antico testo sanscrito di medicina, datato intorno al VI secolo a.C. e considerato tra i primi e maggiori testi riguardanti lo studio dettagliato della medicina e della chirurgia, è possibile trovare alcune basilari indicazioni di trattamento: *“l'acqua impura può essere purificata facendo bollire sul fuoco, scaldandola al sole o immergendo un ferro rovente al suo interno. [...] Essa può anche essere purificata per mezzo di filtrazione attraverso sabbia e ghiaia per poi essere messa a raffreddare”* (M.N. Baker, *“The Quest for Pure Water”*, American Water Works Association, 1948).

Nonostante la scoperta dell'esistenza dei batteri, ad opera dell'ottico e naturalista olandese Antoni van Leeuwenhoek, risalisse alla metà del 1600, fu solo verso la fine del secolo e l'inizio di quello successivo che cominciarono ad essere brevettati i primi filtri per acqua ad uso domestico. Il primo filtro multiplo fu sviluppato nel 1685 dal fisico italiano Luca Antonio Porzo. Il filtro era costituito da un'unità di sedimentazione e da una di filtri multipli a sabbia. Il suo impiego era dedicato ai soldati sul campo di battaglia, per migliorare la qualità delle acque che potevano essere trovate durante le campagne militari. Negli studi di Porzo compare anche un prototipo di filtro flottante, a forma di scafo, da utilizzare direttamente lungo i corsi d'acqua.

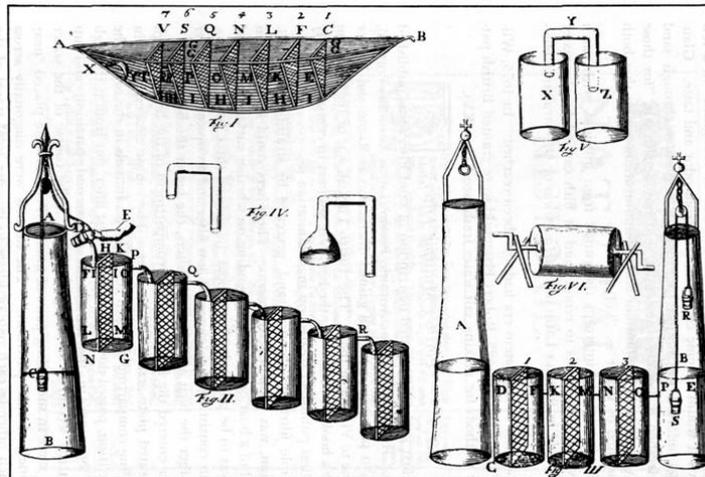
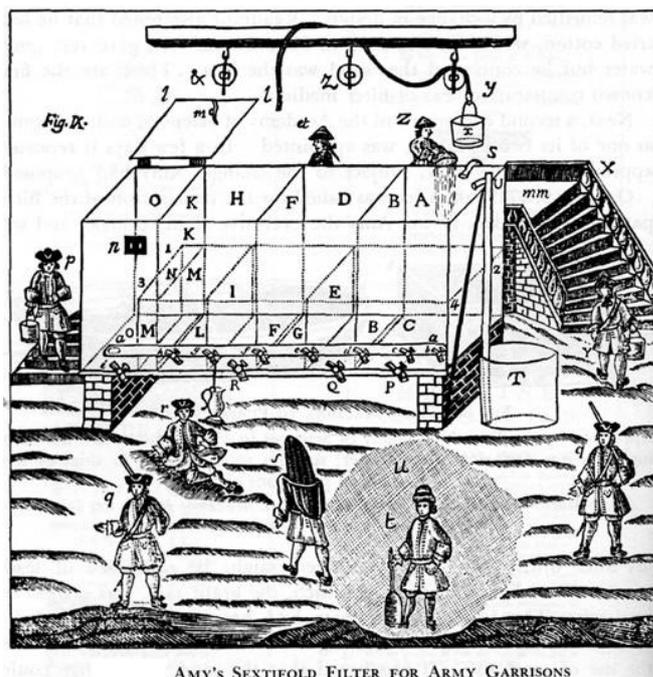


Figura 2.1 – Filtro multiplo di Porzio. In figura sono mostrate tre tipologie di filtri: uno flottante e due da terraferma, per l'acqua potabile. Immagine tratta da "Militis in Castro Sanitate Tuenda", 1685 (Fonte: M.N. Baker, "The Quest for Pure Water")

Successivamente, nel 1746, il francese Joseph Amy depositò il brevetto per un filtro applicabile nelle abitazioni. A partire dal 1750 tali filtri trovarono una discreta diffusione, venendo impiegati sia in ambito civile che militare. Un sistema misto di lana, spugna e carbone da legna svolgeva il compito di filtrazione.



AMY'S SEXTIFOLD FILTER FOR ARMY GARRISONS

Figura 2.2 – Illustrazione di un modello di filtro messo a punto da Amy destinato all'uso in campo militare (Fonte: M.N. Baker, "The Quest for Pure Water")

Il primo filtro su larga scala fu costruito presso la cittadina di Paisley, in Scozia, nel 1804. Messo a punto da John Gibb, attraverso il filtro transitava l'intero quantitativo di acqua necessario a soddisfare i bisogni della popolazione. Anche in questo caso il principio sfruttato era l'azione filtrante di sabbia e ghiaia, che agivano tramite filtri in serie.

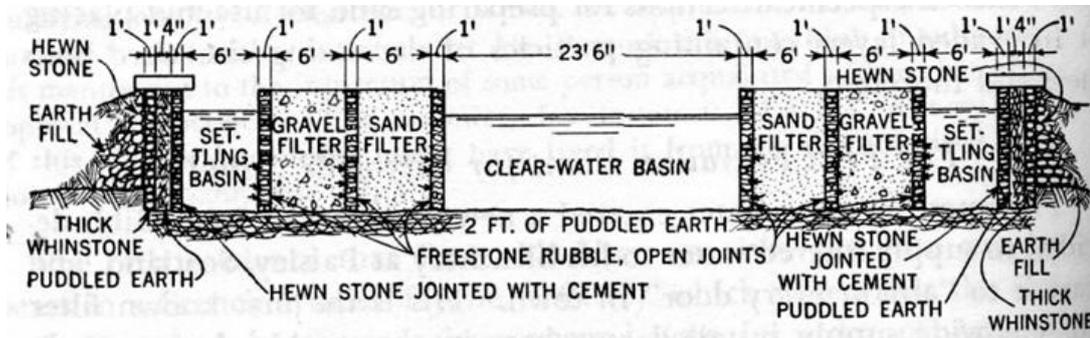


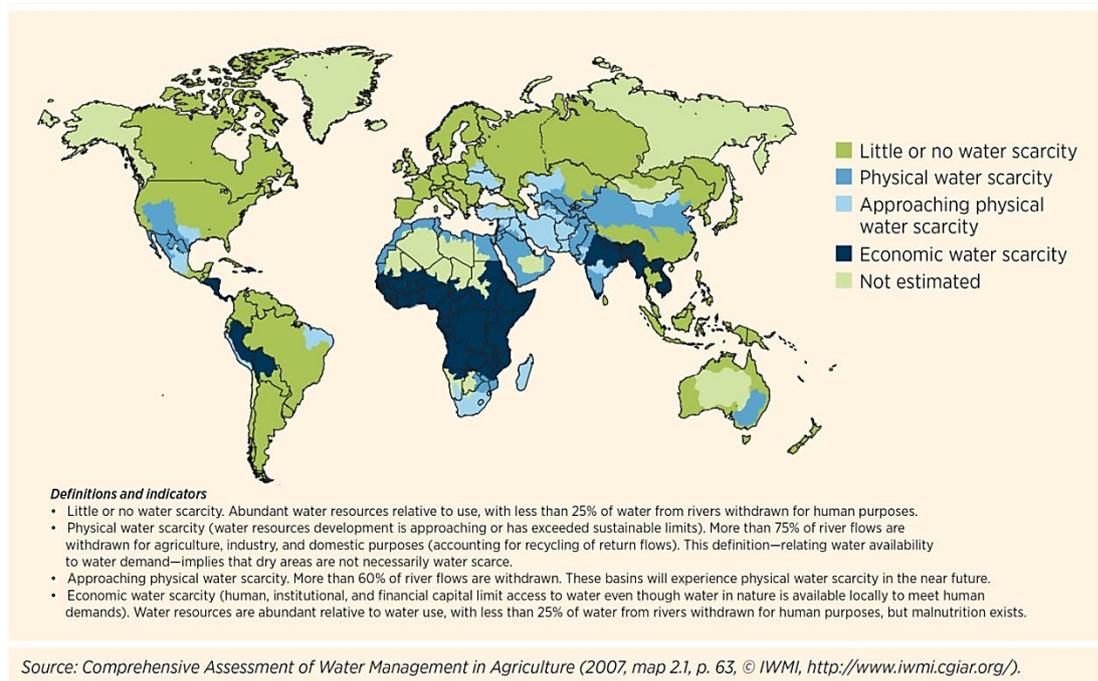
Figura 2.3 – Schema del filtro messo a punto presso la cittadina di Paisley, in Scozia, nel 1804 (Fonte: M.N. Baker, "The Quest for Pure Water")

Tuttavia la scoperta dei microrganismi venne considerata una pura curiosità scientifica e ad essi non venne attribuito subito il ruolo di agenti patogeni. Fu solo verso la metà dell'Ottocento che il medico inglese John Snow scoprì che l'epidemia di colera che aveva investito Londra nel 1854, provocando più di 10.000 morti, era dovuta al pompaggio di acqua inquinata da un pozzo situato nei pressi del quartiere di Soho, nel West End della capitale. All'epoca il sistema fognario della città di Londra era del tutto inadeguato per poter soddisfare l'afflusso di popolazione che dalle campagne si spostava verso la città. In particolare interi quartieri, tra i quali quello di Soho, smaltivano gli escrementi mediante l'utilizzo di pozzi neri. Tale antefatto fu causa dell'inquinamento del principale pozzo pubblico utilizzato nell'area, localizzato nei pressi della pompa pubblica di distribuzione dell'acqua su Broad Street (oggi Broadwick Street). Snow fece anche un solido uso della statistica per illustrare il collegamento tra la qualità della sorgente d'acqua e i casi di colera. I suoi sforzi per collegare l'incidenza del colera alle fonti geografiche potenziali si concentrarono nel creare quello che è conosciuto come un diagramma di Voronoi o tassellatura di Dirichlet. Egli elaborò una pianta della città, mappando le località più vicine alle singole pompe d'acqua, ricavandone delle aree che racchiudevano le abitazioni in prossimità della fonte di approvvigionamento. La sezione della mappa di Snow che rappresentava le aree della città dove la sorgente di acqua disponibile più vicina era la pompa di Broad Street comprendeva la maggior parte dei casi di colera. La sola anomalia significativa fu quella riguardante i monaci dell'adiacente monastero; nessuno infatti aveva contratto il colera. La bassa incidenza della malattia era facilmente spiegabile con il consumo massiccio di birra che i monaci producevano, la quale, soggetta al trattamento di pastorizzazione, smetteva di essere un veicolo di trasmissione del colera.

Da questo momento in poi lo sviluppo di filtri sempre più avanzati impegnò diversi studiosi. Un enorme passo avanti nell'ambito della sanificazione dell'acqua è stato compiuto nel corso del XIX secolo, quando sono stati scoperti gli effetti dei disinfettanti sull'acqua; a partire dai primi anni del Novecento le aziende fornitrici di acqua hanno cominciato ad usarli per migliorare la qualità dell'acqua e per prevenire la diffusione di massa delle malattie.

## 2.2. Panoramica mondiale

Ai giorni nostri le maggiori problematiche vengono riscontrate nei paesi in via di sviluppo e sono riassumibili in due categorie: carenza del bene primario, cioè l'acqua, e problemi di tipo economico, quindi investimenti nelle infrastrutture. Ciò significa che spesso o non vi è abbastanza disponibilità di acqua potabile pulita o mancano adeguate reti acquedottistiche e sistemi fognari; senza tralasciare i casi in cui le due problematiche coesistono.



**Figura 2.4 – Mappa riguardante la scarsità d'acqua e di risorse economiche a livello globale (Fonte: *The United Nations World Water Development report 4, 2017*)**

Un'ulteriore disamina può essere fatta quindi riguardo alla percentuale di acqua trattata disponibile nei vari paesi. I risultati sono esattamente sovrapponibili alla figura precedente. Le situazioni più delicate si riscontrano nei paesi dell'Africa centrale e nella regione del medio oriente, dove le condizioni politico – sociali vivono equilibri delicati.

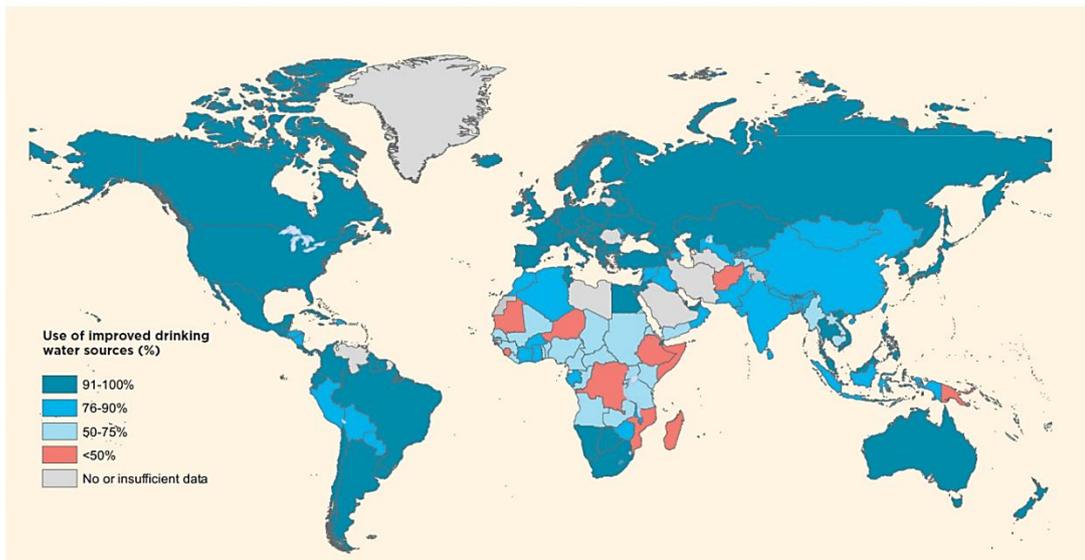
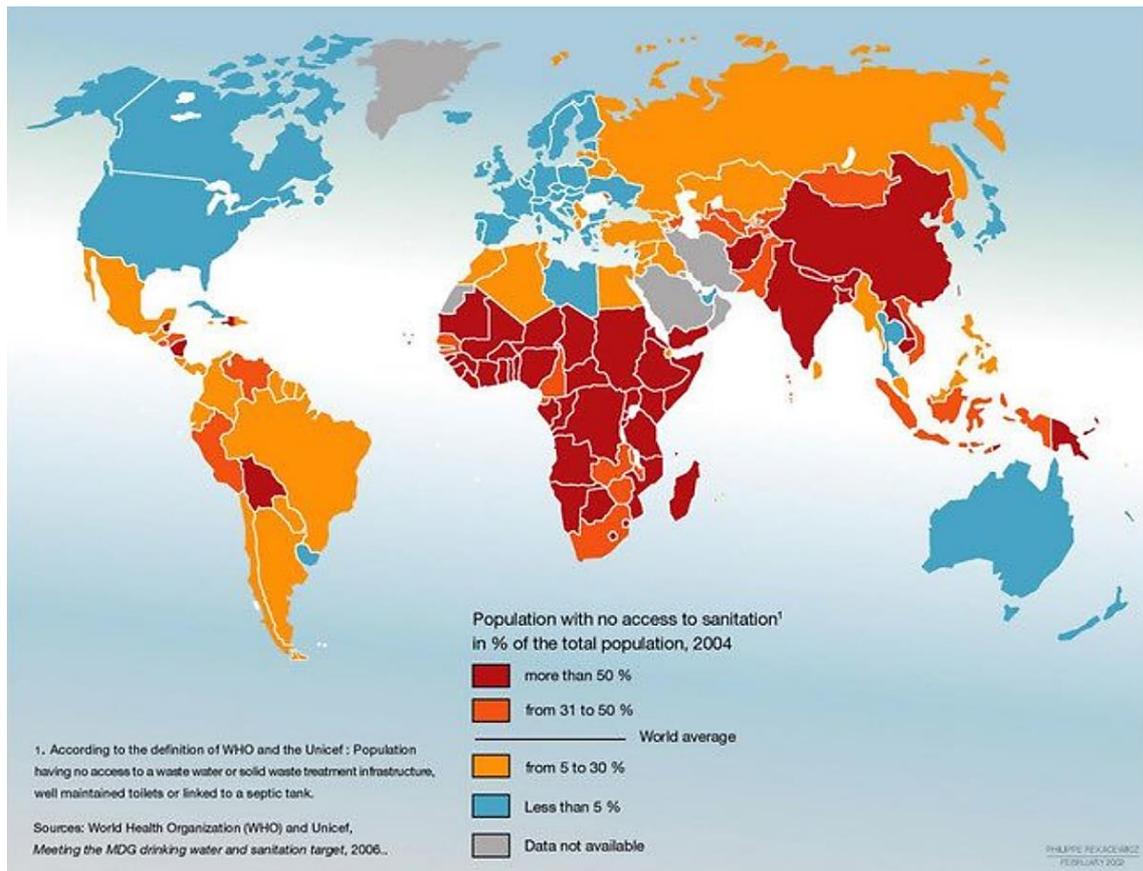


Figura 2.5 – Uso dell'acqua potabile nel mondo (Fonte: *The United Nations World Water Development report 4, 2017*)

La principale conseguenza è la diffusione di malattie portate dall'acqua che causano epidemie diffuse, colpendo in particolar modo i soggetti più esposti: bambini, anziani e persone affette da carenze del sistema immunitario. Nonostante tifo e colera siano ad oggi malattie curabili, nei paesi in via di sviluppo le condizioni sanitarie carenti sono causa di migliaia di morti all'anno.

La maggiore parte dei microrganismi patogeni viene rimossa per mezzo di tecniche di trattamento delle acque, come la coagulazione, la flocculazione, la sedimentazione e la filtrazione, ma come fase finale dei trattamenti si usa aumentare la disinfezione dell'acqua potabile attraverso adeguate tecniche chimico-fisiche. Esistono vari disinfettanti, che uccidono o disattivano i microrganismi patogeni; per quanto riguarda gli agenti chimici, possiamo menzionare i cloruri contenenti sostanze come il perossido, il bromo, l'argento-rame e l'ozono. I sistemi fisici sono quelli sfruttanti gli UV o gli ultrasuoni. Tutti i disinfettanti presentano benefici e svantaggi e possono essere usati per la disinfezione dell'acqua a seconda delle circostanze.

Oltre che per la potabilizzazione dell'acqua, la disinfezione può anche essere applicata nelle piscine, nelle torri di raffreddamento o nei sistemi fognari per il trattamento dei fanghi. Le piscine in particolare contengono una grande varietà di contaminanti, originati in gran parte dai bagnanti. Per impedire il contagio da parte di microrganismi patogeni, l'acqua delle piscine deve essere disinfettata: essa viene ricircolata e depurata prima di essere restituita alla piscina. Tale depurazione include necessariamente la disinfezione.



**Figura 2.6 – Popolazione senza accesso alle strutture igienico-sanitarie (Fonte: WHO/Unicef, 2006)**

Le torri di raffreddamento sono usate per il raffreddamento dell'acqua di processo; dopo tale fase l'acqua può essere riutilizzata per altri scopi. All'interno delle torri di raffreddamento ci sono condizioni ambientali ideali per lo sviluppo e la proliferazione dei microorganismi. Lo sviluppo di biofilm è uno dei maggiori problemi nelle torri di raffreddamento, perché ciò promuove la corrosione ed ostruisce il sistema. Un ulteriore problema riscontrato, che si manifesta in maniera analoga nei sistemi di ventilazione, è lo sviluppo dei batteri della legionella. La diffusione di tali batteri avviene attraverso gli aerosol e può causare la legionellosi, una malattia dalle complicanze serie, simile alla polmonite. Molti paesi dispongono ora di norme giuridiche le quali stabiliscono che lo sviluppo dei batteri di legionella nelle torri di raffreddamento dovrebbe essere evitato tramite la disinfezione dell'acqua di raffreddamento.

Tuttavia, nonostante gli indubbi vantaggi, nei primi anni Settanta fu scoperto che l'utilizzo di disinfettanti chimici può portare alla formazione di sottoprodotti di reazione potenzialmente nocivi e cancerogeni per la salute dell'uomo. In seguito a questa scoperta presero piede le prime ricerche sullo sviluppo e sugli effetti sulla salute umana di tali sottoprodotti. Oggi esistono degli standard qualitativi che stabiliscono quali siano i livelli massimi dei sottoprodotti

della disinfezione accettabili nell'acqua potabile. Sono stati inoltre rianalizzati i metodi che consentono di ridurre la concentrazione dei sottoprodotti di disinfezione nell'acqua potabile, come studiato da *Jyoti e Pandit (2012)*.

### 2.3. Definizione di disinfezione dell'acqua

La disinfezione dell'acqua consiste nella rimozione, disattivazione o uccisione dei microrganismi patogeni presenti: essi sono distrutti o disattivati, con conseguente fine del loro sviluppo e della loro riproduzione. Quando tali microrganismi non sono rimossi dall'acqua potabile, l'uso della stessa causa il proliferare di malattie e lo sviluppo di estese epidemie. La disinfezione non consiste nella sterilizzazione in quanto non tutti i batteri vengono uccisi; a tal proposito è bene non confondere le seguenti definizioni:

- *Degerminazione*: utilizzo di agenti chimici e fisici per ridurre la concentrazione di microrganismi e virus con lo scopo di controllare, disinfettare e sterilizzare.
- *Sterilizzazione*: utilizzo di una serie di agenti che uccidono tutti i microrganismi e virus.
- *Disinfezione*: utilizzo di agenti che uccidono germi e virus e distruggono la potenziale infettività del materiale.

I processi di trattamento dell'acqua sono articolati in più fasi, distinguibili in: disinfezione, coagulazione, flocculazione, sedimentazione, filtrazione e una seconda disinfezione. Il risultato del trattamento è l'acqua potabile, definita come un'acqua priva di microrganismi patogeni e sostanze chimiche dannose per la salute dell'uomo.

La disinfezione avviene comunemente tramite diversi meccanismi: la corrosione della parete cellulare dei microrganismi, per cambiamenti nella permeabilità delle cellule, tramite l'attività di enzimi o protoplasma (a causa di un mutamento strutturale negli enzimi) come affermano *Jyoti e Pandit (2004)*. Questi disturbi nell'attività cellulare inibiscono la capacità di moltiplicarsi propria dei microrganismi inducendoli a morire. I disinfettanti ossidanti inoltre demoliscono la materia organica presente nell'acqua, causando una mancanza di sostanze nutrienti essenziali per la sopravvivenza dei microrganismi.

Esistono due gruppi di sostanze chimiche antibatteriche: gli agenti ossidanti e gli agenti non ossidanti. Gli ossidanti bioacidi includono cloro, cloroammine, diossido di cloro, ozono, bromuro e certi composti organici contenenti bromuro. I bioacidi non ossidanti includono formaldeide, isocianati, fenoli clorurati e solfuri organici. *Jyoti e Pandit (2012)* hanno osservato che l'efficacia dei vari composti disinfettanti dipende dal tasso di diffusione dell'agente attivo all'interno della parete cellulare dei batteri.

## **2.4. Trattamento dell'acqua**

L'acqua che viene trattata per uso potabile contiene una grande varietà di altre sostanze in relazione al percorso che l'acqua stessa ha effettuato durante il suo naturale ciclo idrologico. Una delle proprietà principali dell'acqua è quella di dissolvere facilmente al suo interno altre sostanze: l'acqua che precipita a terra durante gli eventi atmosferici dissolve sostanze, particelle e gas come l'ossigeno, che si possono trovare nell'aria. Quando successivamente l'acqua superficiale circola sul terreno dissolve altre sostanze, come granelli di sabbia, materia organica, microrganismi e minerali; l'acqua che penetra nel terreno e diventa acqua freatica contiene spesso grandi quantità di minerali disciolti, come conseguenza del contatto con i terreni e le rocce. Inoltre, le attività umane, come l'agricoltura o lo scarico di rifiuti industriali e acque nere causano la presenza nell'acqua di un certo numero di sostanze inquinanti.

L'acqua ha la capacità di auto-depurarsi grazie ad una serie di processi biologici che permettono di rimuovere molti agenti inquinanti. Quando l'acqua si deposita sul terreno, gli strati del suolo esercitano una azione filtrante: i contaminanti vengono distrutti, o rimangono intrappolati nello strato di terreno. Tuttavia la capacità auto-pulente dell'acqua non è abbastanza forte da produrre acqua potabile, pulita e conforme all'utilizzo umano, a causa della quantità e della varietà di inquinanti industriali ed agricoli che sono entrati nell'acqua superficiale e freatica nel corso degli anni. Negli anni '70 fu scoperto che gli scarichi industriali e fognari erano la principale causa della contaminazione dell'acqua; a seguito di tale scoperta furono prese immediatamente delle contromisure per prevenire l'inquinamento dell'acqua stessa. Ad oggi le acque reflue devono soddisfare determinati standard, imposti da una normativa giuridica, prima di poter essere scaricate in un qualsiasi corpo idrico recettore: per rispettare gli standard imposti dalla legge si rende necessario trattare l'acqua prima di convogliarla verso un corso d'acqua o in mare. Nonostante tali misure, l'acqua ha spesso ancora bisogno di un trattamento di disinfezione prima di essere conforme all'uso potabile. Il tipo di trattamento prescelto dipende molto dalla sua composizione e dalla sua qualità. Si distinguono due fasi: la rimozione fisica delle particelle solide, principalmente minerali e materiale organico, e la disinfezione chimica con l'uccisione o disattivazione dei microrganismi.

## **2.5. Condizioni per una disinfezione ottimale dell'acqua**

La disinfezione dell'acqua potabile, come precedentemente descritto, è legata a numerosi altri trattamenti; un'adeguata disinfezione può essere raggiunta soltanto quando l'acqua è già stata depurata preliminarmente fino a un certo livello. Le particelle disciolte e galleggianti devono essere rimosse prima di qualunque altro intervento, sia perché possono reagire con i disinfettanti e formare sottoprodotti di disinfezione sia perché costituiscono un substrato per i microrganismi, i quali sono più difficili da rimuovere dall'acqua quando avviene l'assorbimento di particelle galleggianti.

Le concentrazioni di particelle galleggianti in acqua devono essere basse quando viene realizzata la disinfezione, preferibilmente inferiori a 1 mg/L. Anche le sostanze chimiche rilasciate in acqua dall'azione umana o per via naturale possono influenzare la disinfezione, reagendo con i disinfettanti; ciò rende necessaria una concentrazione molto più alta di disinfettante per rimuovere correttamente i microorganismi.

## 2.6. Sostanze batteriche presenti nell'acqua

La maggior parte dei microrganismi patogeni è rimossa dall'acqua durante le prime fasi di depurazione. Tuttavia, la disinfezione è ancora necessaria per impedire che l'acqua potabile possa essere ancora nociva per la salute dell'uomo. I microrganismi patogeni possono essere divisi in tre categorie: batteri, virus e protozoi parassita. I batteri ed i virus possono esistere sia in acqua superficiale che in acqua freatica, mentre i protozoi parassita si trovano principalmente in acqua di superficie. Ne distinguiamo le caratteristiche principali (Garofano, 2016):

- **batteri**: sono organismi unicellulari, a forma di sfera, spirale o asta. Possono esistere come batteri singoli o in catene batteriche, coppie o fasci. I batteri sono la forma vivente più abbondante sulla terra. Hanno una lunghezza compresa tra 0,4 e 14  $\mu\text{m}$  e una larghezza di 0,2 – 12  $\mu\text{m}$ . Non tutti i batteri risultano dannosi per l'organismo e possono svolgere un ruolo importante in vari processi: alcuni scindono la materia organica e svolgono un fondamentale ruolo ecologico, mentre altri favoriscono il metabolismo umano. Tuttavia esistono batteri fortemente dannosi perché possono provocare malattie potenzialmente letali quali colera e febbre tifoide;
- **virus**: sono organismi che possono causare infezioni e che si riproducono soltanto all'interno di cellule ospiti viventi; quando tali virus si trovano al di fuori di tali cellule ospiti diventano inattivi. I virus hanno la forma di un germoglio, una sfera o di una striscia e sono così piccoli (fra 0,02 e 0,09  $\mu\text{m}$ ) che possono passare attraverso i filtri che bloccano i batteri. Al contrario dei batteri, i virus non sono naturalmente presenti nel corpo umano. Quando la gente è infettata da un virus esso di solito lascia il corpo attraverso le secrezioni e quando ciò avviene l'acqua può contaminarsi. Quando l'acqua non viene completamente disinfettata, la gente può quindi essere colpita dall'azione di un virus;
- **protozoi parassita**: sono organismi unicellulari dotati di un metabolismo e un'alimentazione molto complessa e si alimentano di sostanze nutrienti solide, alghe e batteri che sono presenti in organismi multi-cellulari, come gli esseri umani e gli animali. Le *cisti di Criptosporidio* e le *cisti di Giardia* si possono trovare nelle acque di tutto il mondo come conseguenza dell'inquinamento fecale. Sotto forma di cisti gli agenti patogeni sono resistenti alla disinfezione con cloro. I protozoi parassita possono essere rimossi tramite l'applicazione del diossido di cloro o la filtrazione.

## 2.7. Malattie infettive ed acqua insalubre

Le probabilità di infezione per l'uomo dipendono dal tipo di agente patogeno, dal modo in cui è trasferito, dalla dose, dalla persistenza infettiva del microrganismo e dalla resistenza della persona che è infettata. Con il termine dose infettiva viene definito il numero di microrganismi che devono entrare nel corpo prima che si generi la malattia; questa dose è molto bassa per i virus ed i protozoi parassita. I bambini piccoli, gli anziani e gli ammalati hanno una resistenza inferiore alle malattie e per questo motivo sono più vulnerabili. Quando una persona è infettata, gli agenti patogeni si moltiplicano all'interno del suo organismo e si diffondono veicolati principalmente dal sistema circolatorio, comportando un aumento del rischio di malattia. È da osservare che non tutte le persone infettate da un agente patogeno si ammalano. I soggetti che si ammalano diffondono la malattia più facilmente, principalmente attraverso le secrezioni, la saliva, le deiezioni, il contatto diretto con sangue infetto.

Quando l'acqua ruscella in superficie, raccoglie tutte le sostanze presenti, trasportandole e liberandole altrove. Anche i microrganismi contenuti nelle feci animali e umane possono interagire con i corpi idrici all'interno di tale meccanismo. Basti pensare che anche una sola goccia di feci contiene milioni di microrganismi. Nelle feci degli animali di allevamento ci possono essere milioni di batteri; tra i più comuni ricordiamo *Escherichia Coli*, *cisti di Giardia*, e spore di *Criptosporidio*. Nella Figura 2.7 è riportata una fotografia al microscopio di una colonia batterica di *Escherichia Coli*.

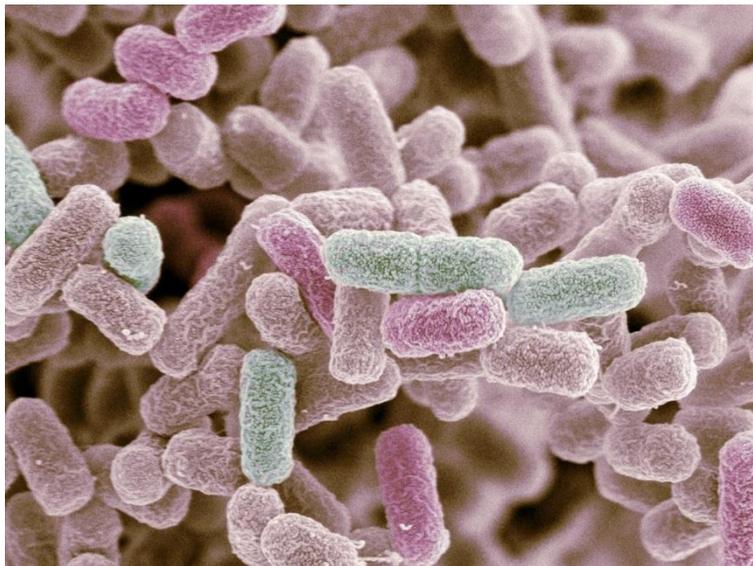
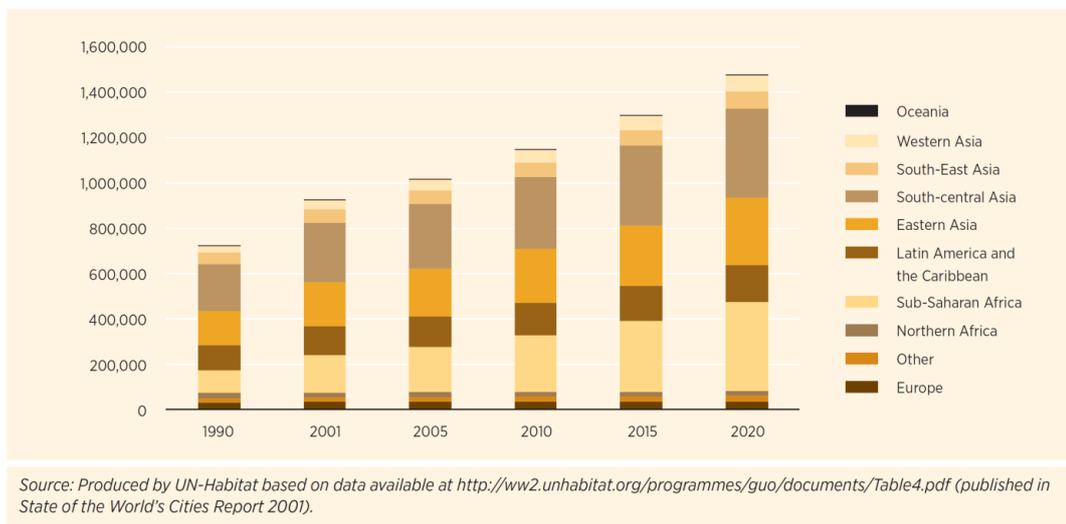


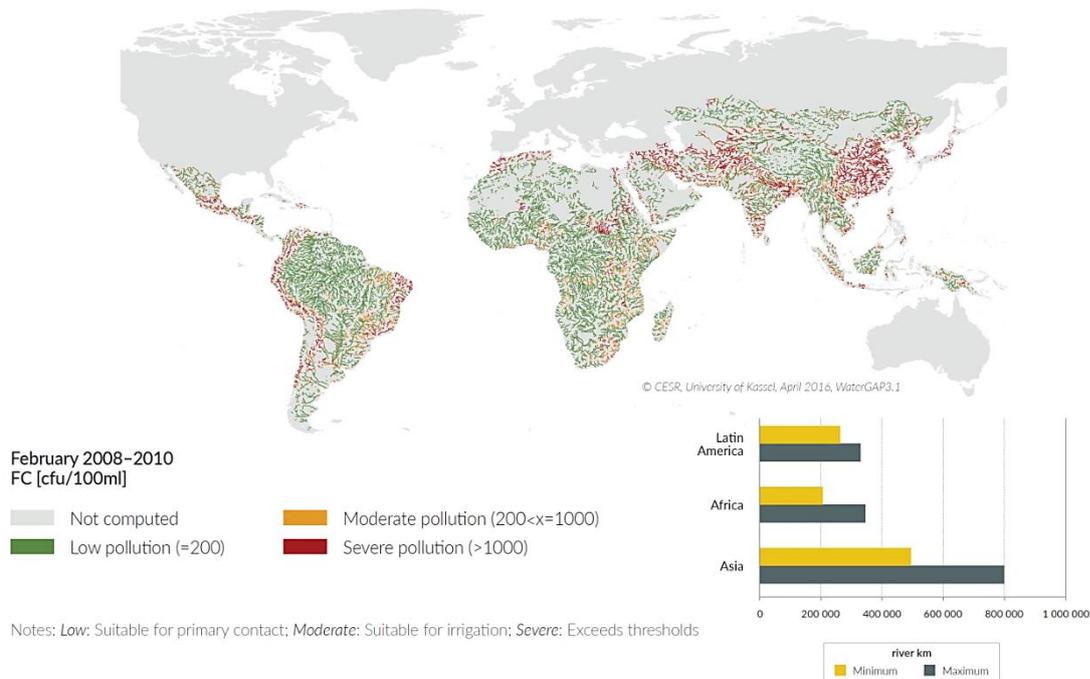
Figura 2.7 – Vista al microscopio elettronico di una colonia batterica di *Escherichia Coli* (Fonte <http://www.sciencephoto.com>)

Proprio gli *Escherichia Coli*, essendo batteri di origine fecale, vengono usati come marcatori per determinare il grado di contaminazione delle acque. Nei report periodici delle Nazioni Unite dedicati allo studio delle risorse idriche globali, noti come “The United Nation world water development report”, si pone l’attenzione al problema della contaminazione delle acque. Tra i vari motivi che stanno alla base il più importante per quanto riguarda la concentrazione di *Escherichia Coli* è certamente l’assenza di reti fognarie adeguate, in particolar modo nei paesi meno sviluppati del centro Africa, nella regione sub – Sahariana, e nei paesi asiatici con un elevato numero di abitanti. In questo ultimo caso, le infezioni da *Escherichia Coli* si sviluppano in particolar modo nelle aree più disagate delle grandi metropoli, dove le condizioni sanitarie sono pressoché assenti.



**Figura 2.8 – Numero di abitanti nei bassifondi delle metropoli, in migliaia. L’analisi parte dagli anni ‘90 e presenta una proiezione al 2020 (Fonte: *The United Nations world water development report 4, 2017*).**

È possibile osservare una stretta correlazione tra numero di abitanti che vive nei bassifondi delle grandi metropoli e inquinamento delle acque da *Escherichia Coli*. In particolar modo, oltre alle regioni precedentemente citate, si osserva che la quarta regione per numero di abitanti nei bassifondi è costituita dalla macro area contenente America Latina e dalla regione caraibica. Con riferimento a queste aree geografiche, nella figura seguente sono indicate le concentrazioni di *Escherichia Coli* nel periodo 2008 – 2010.



\* Bar charts show minimum and maximum monthly estimates of river stretches in the severe pollution class per continent in the period from 2008 to 2010.

**Figura 2.9 – Concentrazione di batteri coliformi fecali per Africa, Asia e America Latina (Fonte: UNEP, 2016).**

Altre fonti di inquinamento delle acque sono l'agricoltura e l'allevamento; in particolare per la prima facciamo riferimento a pesticidi e sostanze chimiche utilizzate, per il secondo alle deiezioni animali. Nelle feci dei polli possono essere presenti batteri patogeni quali *salmonella* e *campilobacterio*. Quando si applicano fertilizzanti al terreno, la pioggia può portare sostanze chimiche e batteri nell'acqua superficiale o nell'acqua freatica, inducendo i microrganismi a contaminare la stessa.

Le stesse acque reflue derivanti da insediamenti e città non possono essere scaricate dalla rete fognaria nell'ambiente senza essere preliminarmente trattate. La maggior parte, una volta depurate, viene convogliata nei corpi idrici ricettori: fiumi, laghi ed oceani. Tuttavia, eventi atmosferici molto intensi possono inondare le fognature, facendo defluire l'acqua non trattata nei corpi idrici superficiali o nelle falde freatiche.

Non tutti i Paesi depurano l'acqua prima di scaricarla in un qualsiasi corpo idrico recettore, in quanto, soprattutto nei Paesi in via di sviluppo, mancano impianti di sanificazione e quindi l'acqua reflua può contaminare l'acqua ad uso potabile. È da osservare anche che non tutti i microrganismi patogeni presenti nell'acqua provengono dalle feci. Per esempio la legionella, che può essere comunemente trovata nelle acque ad uso domestico, trova il suo habitat naturale nelle acque stagnante e nei rami morti degli impianti, dove si moltiplica facilmente ed entra in circolo nel sistema di distribuzione idrico.



Figura 2.10 – Ricostruzione di un cluster di batteri di *Legionella* (Fonte: <https://www.cleanroomtechnology.com>)

Le malattie infettive, causate da batteri patogeni, virus e protozoi parassita presenti nell'acqua, rappresentano il maggiore rischio per la salute dell'uomo. Il contatto con questi microrganismi avviene attraverso l'acqua potabile contaminata. Alcuni microrganismi patogeni trasportati dall'acqua possono causare malattie gravi o finanche mortali; classici esempi sono la febbre da tifo, il colera e l'epatite A o E. Altri microrganismi inducono malattie meno pericolose; le complicazioni gastrointestinali sono le più diffuse. Nei report diffusi dalle Nazioni Unite è possibile vedere come la febbre tifoide sia endemica negli stessi paesi in cui il trattamento delle acque è carente e l'accesso alle prestazioni sanitarie è fortemente deficitario.

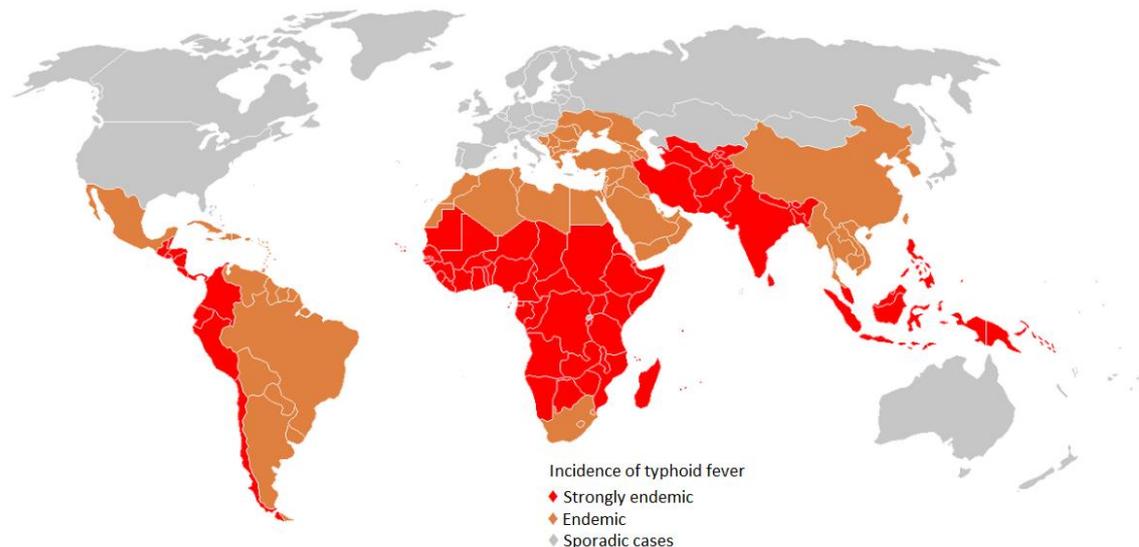
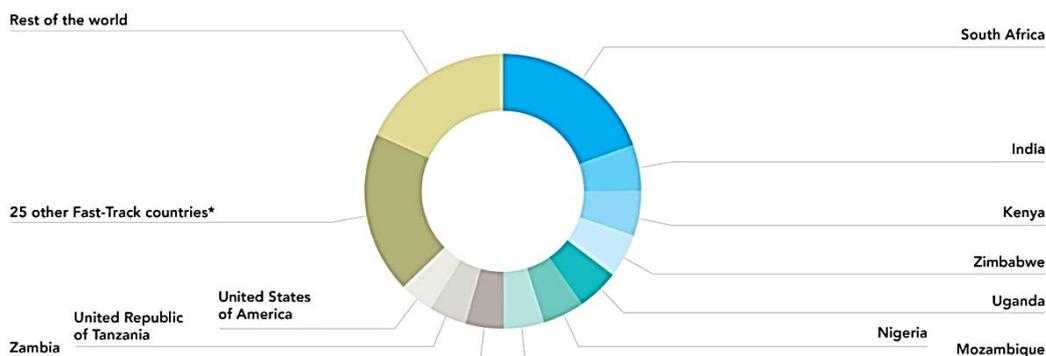


Figura 2.11 - Diffusione febbre tifoide nel mondo (Fonte: <https://en.wikipedia.org>)

In tutto il mondo 1,2 miliardi di persone non hanno accesso a fonti di acqua potabile pulita e 2,4 miliardi sono privi di un adeguato sistema di sanificazione. Ogni anno 5 milioni di persone muoiono a causa di malattie portate dall'acqua.

Nei Paesi sviluppati, il contagio è evitato tramite la depurazione dell'acqua potabile e tramite misure igienico – sanitarie adeguate; tuttavia anche in questi Paesi, non mancano casi in cui le persone si ammalano a causa di batteri trasportati dall'acqua. A tal proposito negli ultimi anni sono stati sviluppati interventi mirati per debellare la legionella dai rami morti degli impianti idraulici o dalle acque stagnanti in scaldabagni e serbatoi che nel periodo estivo diventano habitat perfetto per lo sviluppo di tali batteri, soprattutto presso scuole e palestre che risultano raramente frequentate.

Nei Paesi in via di sviluppo, le malattie portate dall'acqua sono un problema di grande rilievo, legato sia alle difficoltà economiche per la costruzione di infrastrutture, sia ad un sistema sanitario pressoché inesistente: mancano antibiotici e antipiretici; perfino le vaccinazioni basilari sono affidate al sostegno delle organizzazioni internazionali. Gli infettati vanno incontro ad una debilitazione che espone inevitabilmente a nuove infezioni e malattie. Alla mancanza di medicine si affianca il problema della denutrizione, che colpisce in maniera maggiore soprattutto i bambini. La comparsa e la diffusione capillare dell'*HIV* nei Paesi in via di sviluppo ha aggravato una situazione già drammatica, compromettendo l'efficienza del sistema immunitario di milioni di persone.



\* The Fast-Track countries include the 10 displayed on this chart, plus Angola, Botswana, Brazil, Cameroon, Chad, China, Côte d'Ivoire, Democratic Republic of the Congo, Ethiopia, Ghana, Haiti, Indonesia, Iran (Islamic Republic of), Jamaica, Lesotho, Malawi, Mali, Myanmar, Namibia, Pakistan, South Sudan, Swaziland, Russian Federation, Ukraine and Viet Nam.

Figura 2.12 – Diffusione HIV/AIDS nel mondo (Fonte: report UNAIDS, 2016)

Secondo il rapporto 2016 di UNAIDS, sono circa 25,5 milioni le persone contagiate da *HIV* che vivono nel continente africano. Garantire a queste persone la disponibilità di acqua potabile le protegge da complicazioni dagli esiti nefasti. È interessante notare come il numero di malati sia fortemente diffuso nel sud – est asiatico e nell'area caraibica. A testimonianza del fatto che le condizioni sanitarie, la disponibilità di acqua potabile e l'alimentazione siano fattori che concorrono in sinergia sull'aspettativa di vita. Nei paesi sviluppati i morti per *AIDS* vanno

fortemente diminuendo, grazie a nuove cure e a fattori ambientali favorevoli. Una tendenza purtroppo non rispettata nelle regioni più disagiate del globo.

	People living with HIV (all ages)		New HIV infections (all ages)	
	2010	2015	2010	2015
<b>Global</b>	33.3 million [30.9 million–36.1 million]	36.7 million [34.0 million–39.8 million]	2.2 million [2.0 million–2.5 million]	2.1 million [1.8 million–2.4 million]
<b>Asia and Pacific</b>	4.7 million [4.1 million–5.5 million]	5.1 million [4.4 million–5.9 million]	310 000 [270 000–360 000]	300 000 [240 000–380 000]
<b>Eastern and southern Africa</b>	17.2 million [16.1 million–18.5 million]	19.0 million [17.7 million–20.5 million]	1.1 million [1.0 million–1.2 million]	960 000 [830 000–1.1 million]
<b>Eastern Europe and central Asia</b>	1.0 million [950 000–1.1 million]	1.5 million [1.4 million–1.7 million]	120 000 [110 000–130 000]	190 000 [170 000–200 000]
<b>Latin America and the Caribbean</b>	1.8 million [1.5 million–2.1 million]	2.0 million [1.7 million–2.3 million]	100 000 [86 000–120 000]	100 000 [86 000–120 000]
<b>Middle East and North Africa</b>	190 000 [150 000–240 000]	230 000 [160 000–330 000]	20 000 [15 000–29 000]	21 000 [12 000–37 000]
<b>Western and central Africa</b>	6.3 million [5.2 million–7.7 million]	6.5 million [5.3 million–7.8 million]	450 000 [350 000–560 000]	410 000 [310 000–530 000]
<b>Western and central Europe and North America</b>	2.1 million [1.9 million–2.3 million]	2.4 million [2.2 million–2.7 million]	92 000 [89 000–97 000]	91 000 [89 000–97 000]

Figura 2.13 – Casi di HIV per regione geografica (Fonte: report UNAIDS, 2016)

Due ulteriori casistiche nelle qual l'acqua inquinata gioca un ruolo importante nella diffusione di malattie sono i conflitti militari ed i disastri naturali, quali inondazioni e terremoti. Per migliorare il progresso economico dei Paesi in via di sviluppo si rende necessario gestire correttamente la contaminazione dell'acqua e la diffusione delle malattie contagiose. Ciò si può realizzare con il trattamento dell'acqua potabile, la costruzione di un adeguato sistema fognario, con il trattamento delle acque reflue e di fognatura e con l'educazione della gente all'igiene personale ed alimentare.

Un'altra importante osservazione è che le vie di infezione mutano nel corso degli anni. Negli ultimi vent'anni è comparso un certo numero di malattie patogene, anche nei Paesi sviluppati, che non si possono evitare con un tradizionale trattamento dell'acqua. Per esempio, nel 1993 a Milwaukee, negli Stati Uniti, 400.000 persone si sono ammalate usando acqua potabile contaminata dalle cisti del *Criptosporido* mentre nel corso dell'anno 2000, 2.300 persone si sono ammalate a Walkerton, in Canada, a causa della *E. coli O157-H7*. Altri microorganismi patogeni che si possono trovare nell'acqua potabile sono *caliciviruses*, batteri di *Eliobacter*, *Micobatteri* e *Giardia Lambia*. In futuro emergeranno più organismi patogeni che si spargeranno attraverso l'acqua, a causa dell'espansione agricola, della crescita della popolazione, delle grandi migrazioni e dei cambiamenti climatici. Possono anche proliferare nel tempo nuove forme di malattia a causa di uno sviluppo della resistenza alla disinfezione che possono manifestare i microrganismi organici.

### 2.7.1. Epidemie di colera negli anni 2000

Una delle principali conseguenze dell'inquinamento delle acque da parte di batteri di origine fecale è la diffusione del colera. Nonostante i progressi tecnologici e sanitari, ampie regioni del globo hanno affrontato anche nel nuovo millennio estese pandemie, che hanno provocato decine di migliaia di morti. A tal proposito si offre una panoramica dei casi più rappresentativi, per origine, modalità di diffusione, numero di perdite umane.

#### 2.7.1.1. Zimbabwe, 2008



Figura 2.14 – Stato dello Zimbabwe

Sviluppatisi a partire dall'agosto del 2008, e in seguito diffusasi largamente nelle regioni limitrofe dell'Africa subsahariana, l'epidemia di colera che ha colpito lo Zimbabwe affonda le sue radici nel degrado delle infrastrutture igieniche e sanitarie a seguito della crisi economica e dell'iperinflazione che hanno colpito il paese a partire dal 2006. Il collasso del sistema acquedottistico e di quello fognario, in concomitanza con l'arrivo della stagione delle piogge, ha provocato la contaminazione delle riserve di acqua con batteri fecali. L'inefficiente sistema

sanitario ha portato a quasi 80 mila casi di contagio in soli sei mesi. Nel dicembre 2008 il governo locale ha dichiarato lo stato di emergenza nazionale, chiedendo aiuto alla comunità internazionale. Tra la fine del 2008 e gli inizi del 2009, l'epidemia si era diffusa nelle aree limitrofe di Zambia, Sudafrica, Botswana, Malawi, Repubblica Democratica del Congo e Mozambico. L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha mantenuto uno stretto monitoraggio fino al gennaio 2010, a causa dell'insorgenza di nuovi focolai nel Paese. Ad oggi il colera viene considerato una malattia endemica nello Zimbabwe: nonostante l'epidemia si sia in seguito placata totalmente, continuano a registrarsi centinaia di casi all'anno. Secondo il rapporto dell'OMS del 10 gennaio 2010, ad un anno e mezzo dall'inizio dell'epidemia, si stimavano 98741 contagi e 4293 morti a causa del colera.

### 2.7.1.2. Haiti, 2010



Figura 2.15 – Haiti

Nel gennaio 2010 Haiti fu scossa da un violento terremoto che compromise edifici ed infrastrutture. Per lunghi periodi l'acqua non fu trattata prima di essere consumata, a causa delle carenze di infrastrutture igienico – sanitarie funzionanti ed il fiume Meille divenne la fonte di approvvigionamento diretto per milioni di persone. A soccorrere il Paese che stava attraversando un frangente storico delicato fu direttamente l'ONU, che inviò alcuni contingenti di caschi blu. Uno di questi, composto da forze nepalesi, pose il campo proprio lungo le rive del corso d'acqua. In quel periodo, però, in Nepal era in corso un'epidemia di colera. I rifiuti di origine umana, scaricati dal campo direttamente nel fiume Meille, furono all'origine del

contagio e dell'epidemia conseguente. Furono 770 mila le persone infettate e più di 9 mila i morti. Inoltre, secondo le stime della maggioranza degli esperti, il colera non si presentava ad Haiti da decenni; la popolazione era quindi particolarmente vulnerabile, perché priva delle difese immunitarie per contrastarlo.

### 2.7.1.3. Yemen, 2017



Figura 2.16 – Yemen

Nello Yemen, la guerra a sfondo religioso tra Sunniti e Sciiti, appoggiati rispettivamente da Arabia Saudita e Iran, ha messo in ginocchio il Paese. L'epidemia di colera esplosa a maggio ha portato in soli due mesi a 200 mila i casi di contagio, con una media di 5 mila nuovi casi al giorno. Secondo le Ong e l'OMS, in Yemen ci troviamo di fronte alla più grave epidemia in atto nel mondo. La patologia si è diffusa in quasi tutti i governatori del Paese dilaniato dalla guerra. A giugno erano già morte più di 1.300 persone, di cui un quarto bambini. Il collasso dei sistemi idrici ed igienico – sanitari impedisce a 14,5 milioni di persone l'accesso regolare all'acqua ed ai servizi igienici. L'aumento dei tassi di malnutrizione ha indebolito la salute dei bambini, rendendoli più vulnerabili alla malattia. La situazione nel Paese è lontana dallo stabilizzarsi, vista la posizione strategica per i commerci petroliferi all'interno del Golfo.

## 2.8. Sostanze chimiche usate per la disinfezione dell'acqua e sottoprodotti di reazione

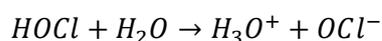
La principale tecnica utilizzata per la disinfezione dell'acqua è quella che si avvale dell'ausilio di sostanze chimiche, le quali, in virtù delle loro caratteristiche, sono in grado di rendere inattivi o uccidere i microrganismi nocivi per l'uomo presenti nell'acqua. A parità di capacità disinfettante, alcune sostanze sono preferite in determinate regioni rispetto ad altre per motivi di approvvigionamento e disponibilità. I paragrafi seguenti, ampiamente trattati in *Garofano, 2016, "Metodi innovativi per la disinfezione dell'acqua: utilizzo della cavitazione idrodinamica"*, costituiscono un quadro riassuntivo delle principali sostanze impiegate nella disinfezione dell'acqua ad uso potabile.

### 2.8.1. Cloro

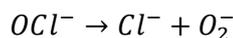
Il cloro è una delle sostanze chimiche maggiormente usate per la disinfezione dell'acqua. Può essere applicato per la disattivazione della maggior parte dei microorganismi e risulta essere particolarmente efficace contro quelli patogeni; è inoltre relativamente poco costoso e persistente. Usato in varie applicazioni, dall'acqua potabile all'acqua delle piscine e per il trattamento dell'acqua reflua, il cloro uccide gli agenti patogeni rompendo i legami chimici delle loro molecole. Quando viene disciolto in acqua, si forma acido ipocloroso:



A seconda del valore del pH, una parte degli acidi ipoclorosi si trasforma in ioni ipoclorito:



Essi si scindono in ioni di cloro e ossigeno:

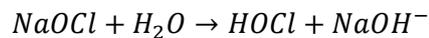


L'acido ipocloroso ( $HOCl$ , che è elettricamente neutro) e gli ioni ipoclorito ( $OCl^-$ , elettricamente negativi) formano cloro libero quando sono legati insieme, realizzando la disinfezione. Le due sostanze hanno un comportamento diverso; l'acido ipocloroso è più reattivo ed è un disinfettante più forte rispetto all'ipoclorito ed inoltre è scisso in acido cloridrico ( $HCl$ ) ed ossigeno atomico ( $O_2$ ) il quale è un potente disinfettante. Le proprietà di disinfezione del cloro in acqua si basano sul potere ossidante degli atomi di ossigeno liberi e sulle reazioni di sostituzione del cloro. La parete cellulare dei microorganismi patogeni è caricata negativamente e può essere penetrata dall'acido ipocloridrico neutro, piuttosto che dallo ione ipoclorito caricato negativamente: essi muoiono o soffrono di disturbi riproduttivi.

È molto importante tenere sempre presente che l'efficacia della disinfezione è funzione del pH dell'acqua. La disinfezione con cloro avviene preferibilmente quando il pH è compreso fra 5,5 e 7,5; infatti l'acido ipocloridrico reagisce più velocemente degli ioni ipoclorito ( $OCl^-$ ) ed è l'80-100% più efficace. Il livello di acido ipocloridrico diminuisce quando il pH è più alto. Infatti con un pH pari a 6 il livello di acido ipocloridrico è dell'80%, mentre la concentrazione degli ioni ipoclorito è del 20%. Quando invece il livello di pH è pari a 8, avviene il contrario, mentre se il pH è 7,5, le concentrazioni dell'acido ipocloridrico e degli ioni ipoclorito sono uguali.

### 2.8.2. Ipoclorito di sodio

L'ipoclorito di sodio è un composto che può essere efficacemente usato per la depurazione dell'acqua. È usato su larga scala per applicazioni industriali, rimozione degli odori e disinfezione dell'acqua. Attraverso l'aggiunta di ipoclorito di sodio all'acqua, si ha la formazione dell'acido ipocloroso:



L'acido ipocloroso si divide in acido ipocloridrico ( $HCl$ ) e ossigeno ( $O_2$ ); come detto per il cloro, l'atomo di ossigeno è un agente ossidante molto forte. L'ipoclorito di sodio è efficace contro batteri, virus e funghi. L'efficacia di disinfezione dell'ipoclorito di sodio è la stessa del cloro.

### 2.8.3. Cloroammine

È stato scoperto, all'inizio del ventunesimo secolo, che l'odore ed il sapore dell'acqua potabile possono essere migliorati grazie all'utilizzo delle cloroammine. Queste vengono anche utilizzate come agente disinfettante dell'acqua e risultano essere efficaci quanto il cloro per la disattivazione dei batteri e di altri microrganismi, anche se il meccanismo di reazione è più lento. Le clorammine, come il cloro, sono ossidanti: reagiscono direttamente con gli aminoacidi nella disattivazione del DNA batterico e distruggono i gusci che proteggono i virus. Diversamente da quanto succede con il cloro, il valore di pH non interferisce sull'efficacia delle clorammine.

### 2.8.4. Diossido di cloro

Il diossido di cloro è soprattutto usato come candeggiante, mentre come disinfettante è efficace anche a basse concentrazioni, grazie alle sue proprietà. Una di queste è l'elevata solubilità relativa nell'acqua, soprattutto in quella fredda; il diossido di cloro non si idrolizza quando entra nell'acqua, ma rimane un gas dissolto in soluzione e risulta essere circa 10 volte più solubile in acqua rispetto al cloro. Il trattamento dell'acqua potabile è una delle

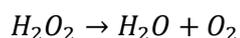
applicazioni principali del diossido di cloro. Grazie alle sue capacità biocide, il diossido di cloro è usato oggi anche in altri settori industriali, come per esempio disinfezione delle acque reflue, trattamento delle acque di processo industriali, disinfezione dell'acqua delle torri di raffreddamento, trattamento industriale dell'aria, produzione e trattamento di derrate alimentari e ossidazione degli scarichi industriali. Le sostanze di natura organica presenti nelle cellule batteriche reagiscono con il diossido di cloro, inibendo parecchi processi cellulari; in particolare reagisce direttamente con gli amminoacidi e l'RNA nelle cellule. Per la preossidazione e la riduzione delle sostanze organiche sono necessari da 0,5 a 2 mg/L di diossido di cloro ed un tempo di contatto compreso fra i 15 ed i 30 minuti; la qualità dell'acqua determina il tempo di contatto necessario. Per la post disinfezione, si applicano invece concentrazioni fra 0,2 e 0,4 mg/L. La concentrazione residua dei sottoprodotti è molto bassa e non sussistono rischi per la salute umana.

### **2.8.5. Ozono**

A causa del suo alto potenziale di ossidazione, l'ozono ossida i componenti della parete cellulare dei batteri. Una volta che l'ozono è entrato nelle cellule, ossida tutte le componenti essenziali (enzimi, proteine, DNA, RNA). Quando la membrana cellulare è danneggiata la cellula si distrugge; tale meccanismo è noto come lisi.

### **2.8.6. Perossido di idrogeno**

Il perossido di idrogeno, comunemente conosciuto come "acqua ossigenata", viene utilizzato per medicare e disinfettare le ferite, ma può anche essere utilizzato per la disinfezione dell'acqua essendo un forte ossidante, più potente del cloro, del diossido di cloro e del permanganato di potassio. Negli Stati Uniti, il perossido di idrogeno è usato sempre più frequentemente per impedire la formazione di colore, gusto, corrosione e scaling della degradazione dell'inquinante (ferro, manganese, solfati) e dei microrganismi presenti nell'acqua. Il perossido di idrogeno reagisce molto velocemente dissociandosi in idrogeno e in acqua, senza la formazione dei sottoprodotti. Il meccanismo di disinfezione è basato sul rilascio di radicali liberi di ossigeno:



Gli inquinanti sono decomposti dai radicali liberi dell'ossigeno che hanno sia l'abilità di ossidare che di disinfettare.

### **2.8.7. Altre tecniche basate sull'utilizzo di sostanze chimiche**

Sono di seguito riportati rapidi cenni circa altre tecniche utilizzate per la disinfezione dell'acqua basate sull'utilizzo di sostanze chimiche ma meno diffuse rispetto alle precedenti.

#### **2.8.7.1. Ionizzazione rame-argento**

Metalli come rame e argento possono essere usati in forma ionizzata per la disinfezione dell'acqua. Gli ioni di rame elettricamente caricati ( $Cu^{2+}$ ) e contenuti nell'acqua vanno alla ricerca di particelle di polarità opposta, come batteri, virus e funghi; tali ioni di rame formano composti elettrostatici con le pareti cellulari dei microorganismi, le quali sono caricate negativamente. Questi composti alterano la permeabilità della parete delle cellule e provocano la cessazione dell'assorbimento dei nutrienti. Gli ioni di rame penetrano la parete delle cellule e di conseguenza provocano l'entrata degli ioni di argento ( $Ag^+$ ). Questi ultimi penetrano il nucleo dei microrganismi e si legano alle varie parti delle cellule, come DNA ed RNA, alle proteine cellulari ed agli enzimi respiratori, provocando l'immobilizzazione di tutti i sistemi di sopravvivenza nelle cellule.

#### **2.8.7.2. Bromo**

Il bromo può essere usato per la disinfezione nei processi di depurazione (piscine e torri di raffreddamento) mentre non è usato per la disinfezione dell'acqua potabile; infatti reagisce troppo rapidamente con le sostanze organiche e non risulta essere persistente, oltre a conferire uno sgradevole gusto di medicinale. Nelle piscine, il bromo è usato contro la formazione e lo sviluppo delle alghe, dei batteri e degli odori.

#### **2.8.7.3. Perossone**

Il perossone è una miscela di perossido di idrogeno ed ozono e si configura come una nuova sostanza chimica per il trattamento di terreni, acque freatiche e acque reflue inquinate. Può anche essere applicato nella disinfezione dell'acqua potabile. Il processo a base di perossone sfrutta l'ozono ( $O_3$ ) insieme al perossido di idrogeno ( $H_2O_2$ ). Durante la disinfezione tramite perossone si formano particelle molto resistenti, i cosiddetti idroradicali i quali reagiscono o ossidano la maggior parte delle sostanze inquinanti organiche presenti in soluzione.

#### **2.8.7.4. Acido peracetico**

L'acido peracetico ( $C_2H_4O_3$ ) è una miscela di acido acetico ( $CH_3COOH$ ) e perossido di idrogeno ( $H_2O_2$ ) in soluzione acquosa. Come disinfettante ossida le membrane esterne delle cellule dei microorganismi mediante trasferimento di elettroni, inducendone rapidamente la disattivazione.

### **2.8.8. I sottoprodotti della disinfezione chimica**

La disinfezione chimica dell'acqua potabile è stata applicata per più di un secolo. Durante gli anni settanta, studiosi americani hanno scoperto la formazione di sottoprodotti di disinfezione che risultarono essere nocivi per la salute umana. Dopo tale scoperta, fu realizzata un'ampia ricerca sulle origini dei sottoprodotti di disinfezione, sugli effetti sulla salute e sulle procedure per impedirne la formazione durante il processo di disinfezione.

#### **2.8.8.1. Tipologie di sottoprodotti e loro formazione**

I sottoprodotti della disinfezione sono sostanze chimiche, organiche ed inorganiche, che si possono formare durante la reazione di un disinfettante con il materiale organico naturalmente presente nell'acqua, a causa del rilascio di sostanze quali acido umico e acido fulvico. Nella Tabella 2.1 sono riportati i principali sottoprodotti derivanti dell'utilizzo di sostanze chimiche per la disinfezione dell'acqua.

Nel 1971 lo scienziato americano *Bellar* scoprì che il cloroformio era assente nell'acqua del fiume Ohio usata per la produzione di acqua potabile. Tuttavia, il cloroformio risultò invece presente nell'acqua potabile proveniente dagli impianti di depurazione dell'acqua; ciò provò la formazione dei sottoprodotti di disinfezione durante la clorazione. Si possono trovare in letteratura poche informazioni sulle strutture chimiche degli acidi umici e degli acidi fulvici e per tale motivo il meccanismo di formazione degli stessi rimane ancora poco chiaro.

**Tabella 2.1 – Elenco dei sottoprodotti derivanti dall'utilizzo di una determinata sostanza chimica utilizzata per la disinfezione dell'acqua (Garofano, 2016)**

Disinfettante	Sottoprodotti di disinfezione organoalogenici	Sottoprodotti di disinfezione inorganici	Sottoprodotti di disinfezione non – alogeni
<i>Cloro o acido ipocloroso</i>	Trialometani Acidi acetici alogenici Aloacetoni-trili 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-trili 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 Epossi Ozonati	Aldeidi Chetoni Chetoacidi Acidi carbossilici

### 2.8.8.2. Fattori influenzanti la formazione di sottoprodotti della disinfezione chimica

La formazione di sottoprodotti della disinfezione dipende da molti fattori; i principali sono:

- tipologia di disinfettante;
- dose di disinfettante;
- residuo di disinfezione;
- condizioni di disinfezione: tempo di reazione, temperatura e pH.

Quando la dose ed il residuo del disinfettante sono più alti, si formano maggiori sottoprodotti di disinfezione. Quando il tempo di reazione è più breve, si possono formare maggiori concentrazioni di trialometani (*THM*) ed acidi acetici alogenici (*HAA*). Quando il tempo di reazione è più lungo, certe forme temporanee di sottoprodotti della disinfezione possono trasformarsi in altri prodotti, come l'acido acetico di tribromina o bromoformio. Quando la temperatura aumenta, le reazioni avvengono più velocemente, e richiedono una maggiore concentrazione di cloro per raggiungere una disinfezione adeguata; ciò causa la formazione di sottoprodotti della disinfezione più alogenici. Un aumento della temperatura incrementa inoltre la decomposizione degli acidi acetici di tribromina. Quando il livello di pH è elevato, si formano più ioni ipoclorito, provocando una diminuzione nell'efficacia della disinfezione

tramite il cloro. A valori più elevati di pH, corrisponde una maggiore concentrazione di THM, mentre una maggiore produzione di HAA si ha quando il valore del pH decresce. I livelli di trialometani in acqua potabile sono spesso più alti nella rete di distribuzione che presso le aziende di produzione dell'acqua potabile.

### **2.8.8.3. Effetti dei sottoprodotti della disinfezione chimica sulla salute**

Il principale sottoprodotto della clorificazione come processo di trattamento dell'acqua è la formazione dei Trialometani (*THM*); il termine si riferisce alla somma delle concentrazioni di cloroformi, di bromodichlorometano, dibromodichlorometano e bromoformio. Il più noto effetto dell'esposizione a THM è la sua potenzialità cancerogena. Molti sottoprodotti della disinfezione sono bio-accumulativi; ciò significa che essi non vengono smaltiti in maniera sufficientemente rapida dall'organismo e possono accumularsi nel tempo all'interno dei tessuti. La ricerca si è incentrata sui seguenti temi oggetto di analisi epidemiologiche e tossicologiche:

- studi circa gli effetti dell'acqua potabilizzata chimicamente sulla salute degli esseri umani, atti a valutare gli effetti derivanti da lunghe esposizioni a piccole dosi;
- studi sulla tossicità dei sottoprodotti della disinfezione, condotti attraverso esperimenti su animali da laboratorio.

Nel 1991, uno studio dell'Agenzia Internazionale per Ricerca sul Cancro (*IARC*) mise in luce una certa difficoltà nel trovare un rapporto diretto fra lo sviluppo del cancro ed il consumo di acqua clorurata. La principale difficoltà risulta essere quella di isolare il rischio cancerogeno, associato ai soli sottoprodotti della disinfezione chimica, da fattori umani come il fumo, il cibo, l'alcool, la condizione socio-economica e la predisposizione ereditaria.

Un'ulteriore analisi derivante da vari studi compiuti negli anni a seguire mostra che esiste una correlazione tra l'esposizione ai sottoprodotti della disinfezione presenti nell'acqua potabile ed il cancro umano anale, vescicale e prostatico. Il 9% di tutti i casi di cancro alla prostata ed il 15 % dei casi di cancro anale sono attribuibili ai sottoprodotti clorurati dell'acqua potabile disinfettata chimicamente, per un totale di circa 10.000 nuovi casi annui.

Il rischio di cancro alla prostata aumenta in seguito ad una lunga esposizione ad acqua potabile clorurata. Nel 1990 in Colorado (Stati Uniti) venne realizzata una ricerca riguardante il rapporto fra l'acqua potabile disinfettata con cloro o clorammine ed i casi di cancro alla prostata. Lo studio fu condotto su 327 persone affette da tale patologia e i dati furono confrontati con quelli di 261 persone che soffrivano di un'altra tipologia di cancro. Sulla base di interviste e dati statistici forniti, fu redatto un profilo di esposizione all'acqua potabile. Questo studio indicò l'esistenza di una relazione diretta fra gli anni di esposizione all'acqua potabile clorurata e lo sviluppo del cancro alla prostata: dopo un'esposizione di trenta anni il rischio di cancro risultò essere 1,8 volte maggiore rispetto ad un caso di assenza di esposizione. Ad oggi si può

affermare che una percentuale tra il 14 ed il 16% di casi di cancro alla prostata è causato dai sottoprodotti della disinfezione.

Un analogo studio condotto in Finlandia ha ricercato una relazione tra l'esposizione prolungata alle sostanze cancerogene contenute nell'acqua potabile e lo sviluppo di alcune forme di cancro. Lo studio è stato condotto esaminando una popolazione di 732 pazienti con cancro alla prostata e di 703 pazienti con cancro ai reni. Analizzando la qualità dell'acqua bevuta dai pazienti ed i trattamenti ai quali la stessa è stata sottoposta, è stato registrato un rapporto fra l'esposizione ai sottoprodotti ed il rischio di cancro renale negli individui di sesso maschile, mentre per le donne questa relazione non è risultata significativa. Per ambo i sessi è risultato invece esserci una relazione fra l'esposizione ai sottoprodotti cancerogeni ed il cancro della vescica.

La ricerca sulla relazione tra i sottoprodotti della disinfezione dell'acqua potabile ed il cancro intestinale indica che esiste un rischio elevato correlato a tale forma tumorale. In Ontario (Canada) *Marret e King (1995)* hanno condotto uno studio su 5000 individui, di cui 950 affetti da varie tipologie di cancro (alla vescica/prostata, intestinale o anale). Fu molto importante esaminare anche i dati relativi alla concentrazione dei trihalometani in acqua e tenere in considerazione anche le abitudini di consumo dei soggetti sottoposti allo studio. Dalla ricerca emerse che le persone esposte a concentrazioni di sottoprodotti cancerogeni superiori a 50 µg/L avevano un rischio 1,5 volte più grande di sviluppo di cancro intestinale.

Nel 1998, nello Iowa (Canada), fu realizzato uno studio su 685 pazienti affetti da cancro intestinale. Venne preliminarmente valutata la concentrazione di trihalometani presenti nell'acqua potabile. Tuttavia questo studio non mostrò un rischio elevato di cancro intestinale; il diverso risultato di questa ricerca può essere una coincidenza o essere causato da una diversa composizione dell'acqua potabile o da altri fattori.

I rischi per la salute dei sottoprodotti della disinfezione sono minori se confrontati ai rischi per la salute associati alle malattie portate dall'acqua; il rischio per la salute dovuto alla possibile presenza di microrganismi patogeni nell'acqua potabile non adeguatamente trattata è circa 100.000 – 1.000.000 di volte superiore al rischio cancerogeno dovuto ad una lunga esposizione nel tempo ai sottoprodotti della disinfezione. Tuttavia tali rischi non possono essere ignorati, a causa del vasto numero di persone esposte; esiste ancora un gran numero di sottoprodotti della disinfezione chimica che devono essere identificati e studiati per comprendere appieno quali siano le conseguenze ed i rischi per la salute umana.

#### **2.8.8.4. Legislazione mondiale ed europea riguardo la concentrazione di sottoprodotti nell'acqua disinfettata chimicamente**

Alcuni sottoprodotti della disinfezione sono considerati nocivi dai ministeri della sanità in vari Paesi; cloroformio, dibromoclorometano ed il bromoformio sono ritenuti probabilmente cancerogeni, mentre il diclorobromometano, il dicloroacetonitrile e gli idrati clorali, sono classificati come possibilmente cancerogeni. Le istituzioni sulla salute di tutto il mondo hanno stabilito gli standard relativi alla massima concentrazione dei sottoprodotti della disinfezione che possono essere presenti nell'acqua potabile (*Garofano, 2016*).

- Unione Europea

Nella *Direttiva Europea sull'acqua potabile (98/83/EC del 1998)*, lo standard massimo per trialometani è fissato a 100 µg/L.

- WHO (World Health Organization)

L'Organizzazione Mondiale per la Sanità, *WHO*, definisce degli standard separati per i vari trialometani:

- Bromodiclorometano (*BDCM*) 60 µg/L
- Bromoformio 100 µg/L
- Cloroformio 200 µg/L

- USA

L'EPA si è occupata della regolamentazione degli standard massimi dei sottoprodotti della disinfezione negli Stati Uniti dal 1979. Nel 1996 la legislazione sull'acqua potabile fu modificata ed il Congresso chiese all'EPA di regolamentare i nuovi standard per i disinfettanti ed i sottoprodotti della disinfezione. Tale revisione fu incentrata sulla riduzione del rischio per la salute legato ai sottoprodotti della disinfezione e sulla qualità microbiologica dell'acqua. Lo standard relativo alla concentrazione totale di trialometani fu fissato a 80 µg/L.

## 2.9. Modello matematico di Chick-Watson per la valutazione della disinfezione

Il modello matematico di Chick-Watson è il più utilizzato per determinare l'inattivazione batterica da parte degli agenti disinfettanti chimici. La legge del modello suddetto è la seguente

$$\ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -kC_{dis}^{n_{cw}}t$$

con

$N/N_0$ , il rapporto tra il numero di organismi presenti al tempo  $t$  e quelli presenti al tempo  $t_0$

$N_0$ , numero iniziale di organismi

$N$ , numero di organismi sopravvissuti al tempo  $t$

$t$ , durata del trattamento di disinfezione

$C_{dis}$ , la concentrazione di disinfettante

$n_{cw}$ , costante empirica

$k$ , il tasso di morte

Se il logaritmo del numero di microrganismi sopravvissuti viene rappresentato in funzione del tempo di esposizione all'agente disinfettante, si può ottenere una linea retta la cui inclinazione definisce il tasso di morte; quest'ultimo parametro indica la frazione di popolazione iniziale sopravvissuta dopo il periodo di trattamento.

Le principali ipotesi che stanno alla base del modello sono:

- la concentrazione di disinfettante  $C_{dis}$  è costante durante tutto il periodo di trattamento  $t$ ;
- i microrganismi devono appartenere ad un unico ceppo.

Il tasso di morte  $k$  riflette la velocità con la quale la disinfezione avanza all'interno del sistema, e l'esponente  $n_{cw}$  riflette la dipendenza dalla concentrazione  $C_{dis}$  di ossidante utilizzato.

## 2.10. Disinfezione in ambito civile per l'uso domestico

Stabilito cosa sia la disinfezione e quali siano i meccanismi che si esplicano, si illustra schematicamente in questo paragrafo il processo di potabilizzazione utilizzato presso l'impianto SMAT di Torino.

Per potabilizzazione dell'acqua si intende l'insieme di operazioni necessarie per rendere l'acqua conforme all'uso domestico ed in particolare al consumo umano. La potabilizzazione, insieme al trattamento delle acque reflue, rappresentano i due trattamenti che costituiscono i campi di applicazione della disinfezione in ambito civile. In questa sede analizzeremo solamente il trattamento di potabilizzazione.

### 2.10.1. Approvvigionamento delle acque

Le acque grezze, prelevate attraverso bottini di presa, gallerie drenanti, traverse, sifoni, pozzi o torri di presa necessitano di una serie di trattamenti per renderle conformi al consumo umano. La conformità deriva dal rispetto di standard chimico-fisici, dalla presenza di sostanze disciolte e di sostanze patogene. Il processo con il quale è possibile rendere l'acqua conforme rispetto al consumo umano è detto potabilizzazione e si compone di una moltitudine di trattamenti, ognuno dei quali ha un preciso scopo e compito.

Se si prende come esempio la città di Torino, l'acqua grezza è prelevata tramite apposite pompe dal corso d'acqua (nel caso di SMAT tale struttura è localizzata sulla sponda sinistra del Po, a monte della confluenza con il torrente Sangone) oppure da appositi pozzi o da bacini di lagunaggio (per Torino è ubicato all'interno del comune di La Loggia, nella prima cintura). Negli ultimi anni sta andando riducendosi la percentuale di acqua captata tramite pozzi, sia per problematiche di inquinamento degli stessi, sia per non arrecare ulteriori problematiche alle falde acquifere, che risentono ormai dello stress idrico legato allo sfruttamento e ai fattori climatici che hanno fortemente limitato le precipitazioni negli ultimi anni.

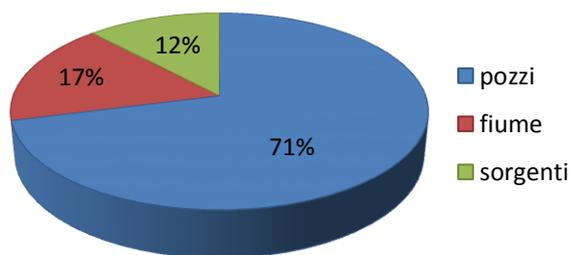


Figura 2.17 – Ripartizione approvvigionamento idrico Torino e cintura (dati SMAT)

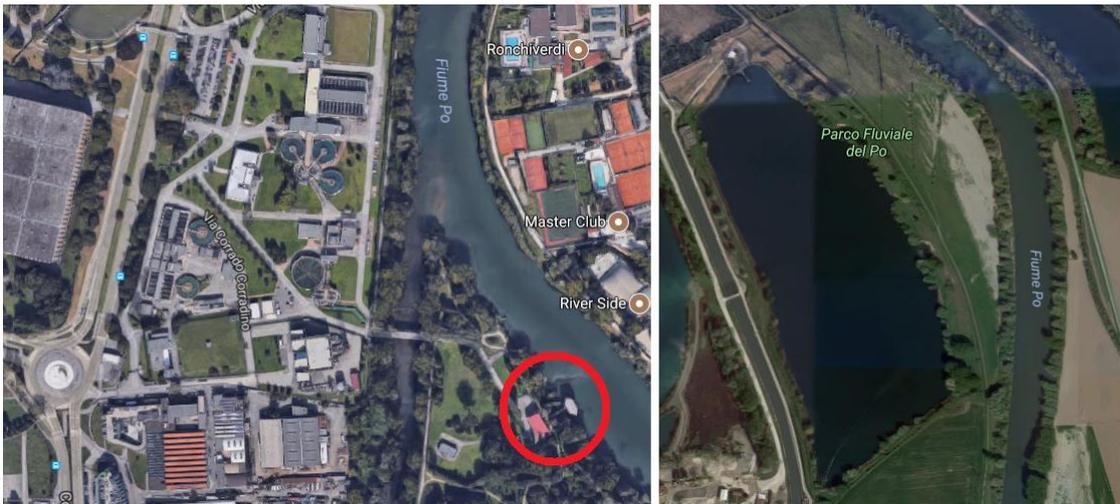


Figura 2.18 – Punti di prelievo acque grezze. A destra è evidenziata la struttura di presa in alveo. A sinistra vista del bacino di lagunaggio. (Fonte: Google Maps)

In generale l'acqua grezza che viene prelevata, a seconda che sia superficiale o sotterranea, necessita di trattamenti diversi in virtù di caratteristiche chimico-fisiche differenti. Il contatto con l'atmosfera delle acque superficiali favorisce la presenza di ossigeno disciolto nell'acqua, il quale è un importante ossidante naturale; la presenza dell'ossigeno favorisce la formazione di un ambiente ossidante e conseguentemente la presenza nell'acqua di specie chimiche in forma ossidata. Le acque di falda, invece, a causa dell'assenza di contatto con l'atmosfera, creano ambienti riduttivi. Le principali sostanze riscontrabili nelle acque di falda sono ferro e manganese, idrogeno solforato in aree vulcaniche e solfati soprattutto vicino a zone con attività termale.

### 2.10.2. Impianto di potabilizzazione SMAT Torino

Noto quanto detto finora, gli impianti di potabilizzazione hanno caratteristiche diverse a seconda che l'acqua da trattare sia superficiale o sotterranea; nella Tabella 2.2 sono riportate le principali peculiarità dei due impianti di trattamento.

Tabella 2.3 – Caratteristiche di un impianto di potabilizzazione per acque superficiali e sotterranee (Garofano, 2016)

Impianti per le acque superficiali	Impianti per le acque sotterranee
Omogenei	Molto diversificati
Strutture impegnative in termini di volume e superficie	Poco impegnativi dal punto di vista delle strutture
Inseriti in una rete di acquedotto integrato, strutture centralizzate di trattamento	Reti locali di ridotta estensione
Schema generale di funzionamento idraulico a gravità (a pelo libero, all'aperto o al coperto)	Schemi idraulici in pressione (strutture chiuse)
Necessità di controllo sofisticato della qualità dell'acqua in ingresso	Controllo meno sofisticato

A titolo di esempio, si procede ad una breve descrizione dell'impianto di potabilizzazione che rifornisce la città di Torino. La SMAT, Società Metropolitana Acque di Torino, gestisce reti idriche, impianti di potabilizzazione e di trattamento delle acque reflue fra i più grandi e tecnologicamente avanzati in Europa. Prima in Italia ad utilizzare acqua di origine fluviale per la produzione di acqua potabile, oggi gestisce un impianto riconosciuto come punto di riferimento di assoluta avanguardia che può potabilizzare fino a 2.500 litri al secondo di acqua prelevata dal fiume Po.



Figura 2.19 – Impianto di potabilizzazione delle acque presso la SMAT, Torino (Fonte: <http://www.smatorino.it>)

Il complesso dispone di tre impianti:

- *Po1* e *Po2*, realizzati tra il 1959 ed il 1964 con una capacità produttiva totale di 86.400 m<sup>3</sup>/giorno (1 m<sup>3</sup>/s);
- *Po3*, entrato in servizio nel 1981, con una capacità produttiva di 130.000 m<sup>3</sup>/giorno (1,5 m<sup>3</sup>/s).

Nel dicembre 1994 ha avuto inizio la prima fase della sperimentazione di un processo di lagunaggio finalizzato al miglioramento della qualità delle acque derivate dal fiume Po, con il compito di omogeneizzare le caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua in ingresso all'interno dell'impianto di trattamento. Il programma di monitoraggio attuato da SMAT ha evidenziato come il lagunaggio permetta di ottenere un ulteriore miglioramento delle caratteristiche qualitative dell'acqua potabilizzata e contemporaneamente un risparmio dei reagenti chimici impiegati nei processi di trattamento.

Si analizza di seguito il sistema di potabilizzazione utilizzato nell'impianto *Po3*, il più moderno e avanzato dell'intero complesso.

- Opera di presa fluviale. L'acqua del Po è prelevata attraverso un'opera di presa fluviale, a forma di torre esagonale, costruita nell'alveo stesso del fiume poco a monte della confluenza col torrente Sangone. La captazione avviene attraverso quattro bocche di presa profonde protette da griglie, paratoie e sgrigliatori automatici. Successivamente l'acqua è fatta passare attraverso filtri a nastro di rete metallica, con maglie di 6 mm<sup>2</sup>, che trattengono le impurità più grossolane. Il lavaggio automatico, effettuato con potenti getti di acqua, provvede a rimuovere le impurità trattenute dai filtri. All'opera di presa è collegata la stazione di primo sollevamento, equipaggiata con 5 elettropompe: l'acqua passa ad un collettore e da questo alle condotte che si collegano al successivo fabbricato di predecantazione.
- Predecantazione e dosaggio di carbone attivo in polvere. Il predecantatore statico a flusso orizzontale è costituito da un bacino circolare del diametro di 33 m della superficie utile di circa 850 m<sup>2</sup> ed è equipaggiato con un raschiatore di fondo rotante per la rimozione meccanica dei fanghi. La sua funzione è quella di alleggerire il carico in arrivo al chiarificatore durante le punte di trasporto solido in corrispondenza alle piene del fiume. In questi casi è anche prevista la possibilità di aggiungere un additivo atto a favorire la decantazione (sali di ferro o di alluminio). È stato inoltre realizzato un impianto per il dosaggio di carbone attivo in polvere da immettere nell'acqua all'ingresso degli impianti di trattamento. Il carbone in polvere svolge la funzione di rimozione dei microinquinanti organici presenti nell'acqua greggia e di abbattimento delle molecole responsabili di gusti e odori sgradevoli.



Figura 2.20 – Predecantatore statico e silos di stoccaggio del carbone attivo (Fonte: <http://www.smatorino.it>)

- Disinfezione con biossido di cloro. Nella camera di carico all'uscita del predecantatore può essere attuata, in alternativa all'ozonazione, una fase di ossidazione a biossido di cloro ottenuto in un impianto di produzione che utilizza clorito di sodio e acido cloridrico.

- Ozonazione. L'ozono esplica un'efficace azione disinfettante nei confronti di batteri e virus e inoltre porta all'ossidazione e alla conseguente rimozione del ferro e del manganese, nonché alla distruzione di molti microinquinanti come pesticidi, fenoli, detergenti. Per conseguire questi risultati l'ozono deve essere utilizzato con una concentrazione in acqua pari a 1-2 mg/l e con un tempo di contatto di 5-10 minuti. L'impianto di produzione di ozono comprende 4 generatori di ozono composti da 558 tubi dielettrici, con capacità di produzione di 8 kg/h ciascuno e sfrutta l'aria prelevata. L'aria ozonata è quindi introdotta nell'acqua da trattare per insufflaggio, attraverso una rete di piastre in ceramica porosa collocate sul fondo delle camere di contatto. Il contatto tra acqua e aria ozonata con la conseguente soluzione dell'ozono nell'acqua avviene sulla superficie delle innumerevoli bollicine che si formano sul fondo delle vasche e che quindi risalgono in superficie. La parte di aria ozonata in eccesso è recuperata dalle camere di contatto nella parte superiore e rimessa in ciclo.



Figura 2.21 – Impianto di produzione dell'ozono (Fonte: <http://www.smatorino.it>)

- Chiariflocculazione con sistema CYCLOFLOC. La torbidità dell'acqua prelevata è dovuta essenzialmente alla presenza dei colloidali. I colloidali sono delle sostanze che possiedono una carica elettrica superficiale che impedisce che questi si possano avvicinare ed aggregare tra di loro, sedimentando successivamente. La chiariflocculazione è un trattamento che, mediante l'aggiunta di elettroliti (sali metallici) le sostanze colloidali vengono destabilizzate (ovvero la carica superficiale viene annullata) e precipitano insieme agli idrossidi che si formano per la reazione dei sali con gli ioni  $OH^-$ . La fase finale del progetto dell'impianto prevede la messa in funzione di cinque chiarificatori tipo CYCLOFLOC disposti a stella attorno ad un partitore centrale. Ogni CYCLOFLOC è preceduto da un torrino di miscelazione ove avviene l'introduzione del policloruro di alluminio ed eventualmente dell'ossidante. Il sistema consiste nell'aggiunta di microsabbia che appesantisce i fiocchi di idrossido di alluminio e facilita la precipitazione dei fanghi sul fondo del bacino, equipaggiato con raschiatori metallici rotanti a 4 braccia. Dal fondo del bacino i fanghi misti alla microsabbia vengono

asportati mediante elettropompe che li spingono in speciali dispositivi a cono detti idrocycloni, ove, per effetto della forza centrifuga, la parte argillosa più leggera viene separata dalla microsabbia più pesante che precipita sul fondo dove viene recuperata e rimessa in ciclo. Dopo la separazione i reflui vengono pompati al grande impianto di trattamento delle acque reflue della SMAT sito a circa 20 chilometri. I pregi principali del sistema CYCLOFLOC consistono in un elevato rendimento del processo di chiarificazione, con acqua in uscita assolutamente limpida e di qualità costante. Durante la chiariflocculazione un ulteriore trattamento di ossidazione mediante ipoclorito di sodio consente l'eliminazione dell'ammoniaca e dei composti azotati derivati. Recentemente l'applicazione di tale trattamento è stato ridotto in modo sostanziale favorendo l'introduzione nel ciclo di potabilizzazione di processi biologici naturali, che non richiedono l'intervento di reagenti chimici. Tali processi si svolgono sia nei bacini di chiarificazione, sia prevalentemente all'interno dei filtri a carbone, ed hanno il vantaggio di non formare composti del cloro indesiderati per la salute umana.



Figura 2.22 – Sistema Cyclofloc (Fonte: <http://www.smatorino.it>)

- Doppia filtrazione su carbone attivo granulare. La filtrazione dell'acqua avviene su due batterie filtranti a letti sovrapposti di sei unità. Ogni unità è a sua volta composta da due celle elementari a pianta rettangolare. La velocità nominale di filtrazione è di 6 m/h, in senso verticale. I filtri superiore e inferiore, costituiti ciascuno da uno strato filtrante di carbone granulare di altezza di 0,80 m, sono destinati a completare il processo di chiarificazione, assicurando il trattenimento delle particelle in sospensione ancora eventualmente presenti nell'acqua decantata. In aggiunta, la filtrazione permette l'affinamento della qualità dell'acqua attraverso l'eliminazione di gusti e odori sgradevoli, la rimozione delle sostanze organiche microinquinanti e l'abbattimento di un'eventuale colorazione residua. Il lavaggio del filtro a carbone superiore è previsto di norma ogni 24 ore; il lavaggio avviene in controcorrente, con aria e acqua. Per il filtro inferiore il lavaggio è previsto ogni 6 giorni di funzionamento, con durata e modalità uguali a quello superiore.



Figura 2.23 – Filtri a carbone attivo granulare (Fonte: <http://www.smatorino.it>)

- Serbatoi di compenso e disinfezione finale. Dopo la filtrazione l'acqua passa in un primo serbatoio dal quale attingono le pompe di lavaggio dei filtri. Le pompe di sollevamento alla rete di distribuzione, prelevano l'acqua dal serbatoio di compenso, posto in serie al primo. Nel serbatoio di compenso viene effettuata la disinfezione finale con biossido di cloro tale da determinare nell'acqua erogata un contenuto di cloro attivo compreso tra 0,2 e 0,3 mg/l. Questa disinfezione è necessaria per garantire che non si possano formare colonie batteriche lungo la rete di distribuzione.

## 2.11. Metodi fisici per la disinfezione dell'acqua

A fianco delle tecniche di disinfezione basate sull'utilizzo di sostanze chimiche sono state sviluppate nel corso degli anni una serie di metodi che sfruttano dei principi fisici, con l'obiettivo di non avere i classici sottoprodotti nocivi tipici della disinfezione che si avvale di sostanze chimiche. Nei sottoparagrafi successivi è riportata la descrizione dei più comuni metodi fisici utilizzati per la disinfezione dell'acqua.

### 2.11.1. Luce UV

La radiazione ultravioletta germicida, in inglese "Ultraviolet germicidal irradiation" (UVGI), è un metodo di sterilizzazione che usa la luce ultravioletta alla lunghezza d'onda UV-C, per modificare il DNA o l'RNA dei microorganismi e quindi impedire a quest'ultimi di riprodursi o di essere dannosi.

È utilizzata in una varietà di applicazioni, per esempio la disinfezione di cibo, acqua e aria. La disinfezione dell'acqua con l'ultravioletto consiste in un processo esclusivamente fisico, non chimico. La radiazione UV-C in particolare, con una lunghezza d'onda nella banda dai 240 ai 280 nanometri, attacca direttamente il vitale DNA dei batteri, dei virus e di altri microorganismi. La radiazione inizia una reazione fotochimica che distrugge l'informazione genetica contenuta nel DNA. I batteri perdono la loro capacità di riprodursi e sono distrutti. Anche i parassiti come il Cryptosporidia e il Giardia, che sono estremamente resistenti ai disinfettanti chimici come il cloro, sono efficacemente eliminati (>99,9%) con una potenza ridotta (<10 mJ/cm<sup>2</sup>). L'UV può anche essere utilizzato per rimuovere il cloro e le clorammine dall'acqua; questo processo è chiamato fotolisi, e richiede una dose più alta rispetto a quella per la normale disinfezione. I microorganismi sterilizzati non vengono rimossi dall'acqua. La disinfezione UV non rimuove i composti organici, inorganici e le particelle presenti nell'acqua. Comunque, il processo di ossidazione UV può essere usato contemporaneamente per distruggere le tracce di contaminanti chimici e fornire una disinfezione di alto livello, come avviene nel più grande impianto del mondo per il riutilizzo dell'acqua potabile in Orange County, California. Nel corso degli anni, i costi dell'UV sono diminuiti quando i ricercatori hanno sviluppato e usato nuovi metodi basati sull'UV per disinfettare le acque. Attualmente, molti Stati hanno adottato regolamenti che permettono la disinfezione delle loro forniture di acqua potabile con questa tecnologia. La disinfezione UV non lascia tracce, sostanze chimiche o residui nell'acqua trattata. È veloce e pulita, e nessun batterio, virus o muffa è immune ad essa. Nella Figura 2.24 è possibile vedere un esempio di trattamento dell'acqua mediante radiazioni UV.



Figura 2.24 – Trattamento di disinfezione dell'acqua mediante radiazioni UV (Garofano, 2016)

### **2.11.2. Metodi sfruttanti la cavitazione**

La cavitazione può essere efficacemente sfruttata per la disinfezione dell'acqua. Essa può essere indotta per via acustica o idrodinamica. I metodi di disinfezione basati sulla cavitazione verranno abbondantemente sviluppati nel Capitolo 3 ad essi dedicato.

### 3. LA CAVITAZIONE

La cavitazione è un fenomeno idraulico noto soprattutto per i danni procurati agli apparati meccanici di impianti idraulici o sistemi di propulsione, quali giranti o eliche. Numerosi studi sulla cavitazione hanno evidenziato le potenzialità di tale fenomeno per numerose attività in ambito industriale, farmaceutico e civile. La Tesi in particolare tratta l'applicazione della cavitazione idrodinamica per la disinfezione dell'acqua potabile contaminata con Escherichia coli; a tal proposito risulta essenziale comprendere cosa sia la cavitazione, quali siano le dinamiche di sviluppo e quali gli effetti che essa genera in un sistema idraulico, sia per quanto concerne le reazioni fisiche che per i risvolti di tipo chimico. Il presente capitolo cercherà di affrontare tutti questi aspetti in maniera esaustiva

#### 3.1. Potenzialità della cavitazione: perché studiarla

Nell'ultimo decennio, la tecnica della cavitazione è stata ampiamente studiata, ed è stata applicata con successo in vari processi fisici, chimici e biologici. Questa nuova tecnica, non solo produce le trasformazioni volute, ma riduce anche il costo totale di elaborazione ed è risultata più efficiente dal punto di vista energetico rispetto a molte altre tecniche convenzionali.

In particolare, la cavitazione idrodinamica è stata esplorata da molti ricercatori negli anni successivi alla prima pubblicazione sull'idrolisi degli oli grassi di Pandit e Joshi (*Pandit AB, Joshi JB. Hydrolysis of fatty oils: effect of cavitation, 1993*). Prima di questa pubblicazione, la maggior parte degli studi riguardanti la cavitazione nei sistemi idraulici era concentrata per evitarne lo sviluppo. Da un punto di vista tecnologico, per secoli il fenomeno era noto soprattutto per il danneggiamento che provoca alle macchine idrauliche quali pale di eliche o pompe (*Jennings, 2010*). A velocità di rotazione molto elevate, la velocità periferica delle pale aumenta fino a che la pressione collassa causando la vaporizzare dell'acqua circostante, con conseguente formazione di bolle. Quando queste bolle esplodono (a seguito del ripristino di una pressione elevata a valle del punto di origine e sviluppo), vengono a crearsi particolari condizioni: una potente onda d'urto e picchi locali di pressione e temperatura, che sono responsabili del danneggiamento degli organi meccanici.

Il concetto fondamentale che ha preso piede è quello di sfruttare l'energia rilasciata dalle bolle in modo da agevolare i vari processi chimici e fisici voluti. Nella cavitazione idrodinamica, il fenomeno è generato da una combinazione di costrizione del flusso e da opportune condizioni di pressione-velocità, che sono monitorati in modo tale da generare degli hot spots. Ciò permette all'intero processo di funzionare in condizioni ambientali diverse di temperatura e

pressione, mentre la generazione di cavitazione avviene solo localmente, in corrispondenza di un reattore cavitazionale, che può avere configurazioni geometriche e caratteristiche fisiche varie.

La cavitazione offre quindi un immenso potenziale per il miglioramento di vari processi fisici e chimici in modo che questi siano efficienti dal punto di vista energetico (*Gogate e Kabadi, 2009*). Gli effetti meccanici o fisici di cavitazione, come microgetti ed alta turbolenza locale, sono i principali responsabili dell'intensificazione di processi fisici come la sintesi di nanoemulsioni, la formazione di nanoparticelle, la disgregazione microbica e la disinfezione. Al contrario, gli effetti chimici, come la generazione di radicali liberi altamente reattivi in ambiente acquoso, sono i principali responsabili dell'intensificazione di processi chimici come la sintesi di vari composti, la degradazione degli inquinanti dell'acqua, ecc. Tra le varie applicazioni, uno degli usi più importanti e promettenti è la disgregazione cellulare. Numerosi studi hanno riguardato la disintegrazione tramite ultrasuoni di cellule batteriche, virus, funghi e cellule animali, anche per il recupero di materiale intracellulare appositamente prodotto. Tra le varie possibilità disponibili per indurre la distruzione cellulare, i metodi idromeccanici come la cavitazione rivestono una grande importanza. Esempi di bioproduct intracellulari estratti tramite cavitazione sono gli enzimi industriali (invertasi prodotta da lievito), enzimi terapeutici (*L-Asparaginasi* prodotta dalle specie della famiglia *Erwinia*) e aggregati proteici. Questi effetti possono essere sfruttati anche in ambito civile, per il trattamento delle acque.

Come riportato da *Garofano, 2016*, l'effetto della cavitazione idrodinamica sulla vitalità cellulare dei batteri è stato dimostrato a fini depurativi nel brevetto CAV-OX di *Oppel (1994)*. Questo processo utilizza cavitazione idrodinamica, radiazioni UV e perossido di idrogeno per ossidare composti organici presenti in acqua mediante i radicali idrossilici e idroperossidici. Successivamente, i composti organici si degradano in anidride carbonica, acqua, alogenuri, e in alcuni casi, acidi organici.

La cavitazione può essere generata in un mezzo liquido sia attraverso la variazione del flusso in cui il liquido scorre, conosciuto come cavitazione idrodinamica (HC) o attraversando il liquido con onde ad ultrasuoni, noto come cavitazione acustica (AC). Le altre modalità di generazione della cavitazione, come cavitazione ottica e particellare, sono in genere utilizzati per la cavitazione a singola bolla, e non possono essere utilizzate per indurre eventuali cambiamenti fisici o chimici nella maggior parte soluzione. Si propone una breve descrizione delle due tecnologie sopra citate:

- cavitazione acustica (AC). In questa tecnica, le variazioni di pressione nel liquido sono influenzate dalle onde sonore, di solito ultrasuoni (frequenza > 20 kHz). L'energia acustica è generata dalla trasmissione di onde ultrasoniche che consistono in cicli di rarefazione e compressione che viaggiano attraverso il mezzo liquido. Nel ciclo di rarefazione (espansione), viene sviluppata una grande pressione acustica negativa, che aumenta la distanza intermolecolare, e le cavità si formano là dove si supera la distanza molecolare critica. Nel ciclo di compressione, la pressione acustica positiva spinge le cavità ad unirsi e le comprime, portandole infine ad un violento crollo. La fase finale del collasso è di natura adiabatica e, quindi, localmente produce condizioni di alta temperatura ed alta pressione.
- Cavitazione idrodinamica (HC). La cavitazione è generata mediante variazioni di pressione in un fluido che scorre, costringendolo a passare attraverso una costrizione del tubo. La variazione della pressione attraverso il passaggio in restringimenti quali tubi di venturi, orifizi o piastre multiforate con diverse geometrie, porta alla generazione di cavità (Gogate e Kabadi, 2009). La HC può anche essere prodotta mediante rotazione meccanica di un oggetto all'interno di un liquido. Sebbene ci siano altri dispositivi come omogeneizzatori ad alta velocità, omogeneizzatori ad alta pressione e rotor ad alta velocità, che possono creare condizioni di cavitazione, le loro applicazioni sono limitate a causa del costo elevato dell'energia coinvolta. Orifizi e tubi di Venturi sono invece segnalati come i dispositivi di cavitazione più diffusi ed efficienti per generare la HC.

In entrambi i metodi di cavitazione, quando le cavità collassano, si creano regioni dette "hot spot" con temperatura locale nell'intervallo di 1.000-10.000 K e pressioni di 100-1.000 bar (Gogate, 2011). I fenomeni cavitazionali possono essere di due tipi: stabili e transitori. Nella cavitazione stabile, si formano cavità a bassa intensità oscillante che oscillano tra alcune posizioni di equilibrio per numerosi cicli acustici. In cavitazione transitoria, le cavità si espandono moltiplicando la loro dimensione iniziale prima del loro crollo violento ed oscillano più rapidamente, generando condizioni locali di elevata temperatura/pressione. È stato segnalato che la AC produce principalmente il collasso di cavità ad alta intensità, a causa della generazione di un numero più elevato di cavità transitorie (Gogate e Pandit, 2004). La HC produce per lo più collassi di cavità a bassa intensità rispetto alla AC, ma viene generato un numero maggiore di cavità a causa della sua configurazione geometrica. Si è visto inoltre che la HC può generare entrambi i tipi di cavitazione, stabile e transitoria, e che ciò dipende principalmente dalla geometria del dispositivo cavitante. I migliori risultati di cavitazione possono essere raggiunti generando entrambi i tipi di cavitazione simultaneamente ed in modo controllato. Negli ultimi due decenni, la AC è stata ampiamente studiata (frequenze e potenza diverse, modalità ad impulsi e continua) per la sua applicazione in vari processi chimici e fisici come la sintesi di nanoparticelle, la nanoemulsificazione, la polimerizzazione di emulsioni, la sintesi chimica mediante reazione di ossidazione, l'estrazione e la lisciviazione, il trattamento delle acque reflue (Weavers et al., 1998; Goel et al., 2004; Abbasi e Asl, 2008; Hamadaoui e Naffrechoux, 2008; Pinjari e Pandit, 2011; Ladola et al., 2014; Ramisetty et al.,

2015). La maggior parte degli studi iniziali sull'efficacia depurativa della cavitazione idrodinamica sono stati effettuati su lieviti, come dimostra il lavoro di ricerca di *Doulah et al. (1975)*. In particolare si è utilizzato il *Saccharomyces cerevisiae*, uno lievito facilmente reperibile ed una delle fonti più economiche di biomassa microbica. Studi precedenti (*Edebo, 1969*) hanno dimostrato che il lievito è uno dei microrganismi più difficili da inattivare e, quindi, un metodo idromeccanico funzionante con il lievito ha buone possibilità di distruggere facilmente anche altri tipi di organismi, tanto che è stato spesso utilizzato per testare attrezzature di distruzione cellulare (*Doulah et al., 1975*). Oltre che sul lievito, la cavitazione idrodinamica è stata testata per studiare la rottura anche di altre tipologie di batteri. *Harrison (1990)* ha inattivato con successo colonie di *Alcaligenes eutrophus*. Dai primi anni duemila, la ricerca sull'uso della cavitazione idrodinamica per la disinfezione dell'acqua sta lentamente guadagnando slancio. In particolare, il focus della ricerca è utilizzare la cavitazione idrodinamica in combinazione con altri disinfettanti chimici, in modo da ottimizzare economicamente i processi disinfettanti (*Jyoti e Pandit, 2000, 2004, 2012*). Altre recenti ricerche hanno effettuato una valutazione quantitativa dell'efficacia germicida della cavitazione su sospensioni acquose di batteri (*E. Coli, S. Aureus, B. Subtilis e P. Aeruginosa*), funghi e virus.

### **3.2. Riguardo la cavitazione**

La cavitazione è un fenomeno complesso, largamente studiato ed investigato; negli anni sono inizialmente emersi gli aspetti negativi, legati ai danni procurati agli apparati quali giranti di pompe idrauliche o eliche. Solo successivamente sono emerse le potenzialità sopra descritte, legate all'applicazione in vari processi di natura chimica e fisica. Di seguito verrà fornita una descrizione quanto più esaustiva delle origini del fenomeno.

#### **3.2.1. Descrizione del fenomeno**

Possiamo definire la cavitazione come un fenomeno di natura fisico – chimica che consiste nella formazione di zone di vapore, o di vuoto, all'interno di un fluido. Queste cavità, in seguito ad un successivo recupero di pressione, implodono generando una serie di fenomeni fortemente energetici. Il fenomeno di formazione delle bolle avviene a causa dell'abbassamento locale di pressione ad un valore inferiore alla tensione di vapore del liquido stesso, il quale subisce un cambiamento di fase da liquido a gas, formando cavità sferico-toroidali contenenti vapore. Queste, implodendo, generano un forte rilascio energetico sotto forma di calore, pressione e turbolenze locali. Le stime riguardanti le temperature e le pressioni registrate nel liquido a causa della cavitazione sono in continua evoluzione, ma si assestano sulle migliaia di gradi centigradi e migliaia di atmosfere in pochi microsecondi, con jet localizzati di acqua a velocità di oltre 100 m/s, come osservato da *Khanna et al., 2012*.

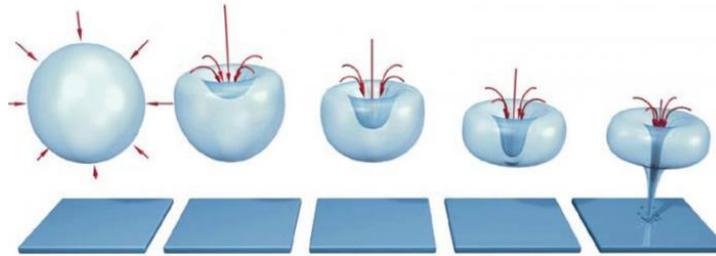


Figura 3.1 – Evoluzione nel tempo della cavità contenente vapore (Garofano, 2016)

La dinamica del processo è simile a quella dell'ebollizione, dove l'aumento di temperatura causa un incremento della tensione di vapore fino a superare la pressione del liquido, creando una bolla meccanicamente stabile, con il vapore all'interno in equilibrio con la pressione del liquido circostante. Durante la cavitazione, invece, è la pressione del liquido a decrementare bruscamente, mentre la temperatura rimane costante. La pressione scende sotto la tensione di vapore, portando alla formazione delle cosiddette bolle di cavitazione. Queste seguono due fasi di trasformazione: nella zona/periodo di bassa pressione idrostatica aumenta di dimensione, perché la pressione di vapore prevale su quella idrostatica; nella zona/periodo di alta pressione, la pressione di vapore causa l'implosione della bolla, non essendo più sufficiente a contrastare la pressione idrostatica, e la bolla giunge repentinamente all'implosione.

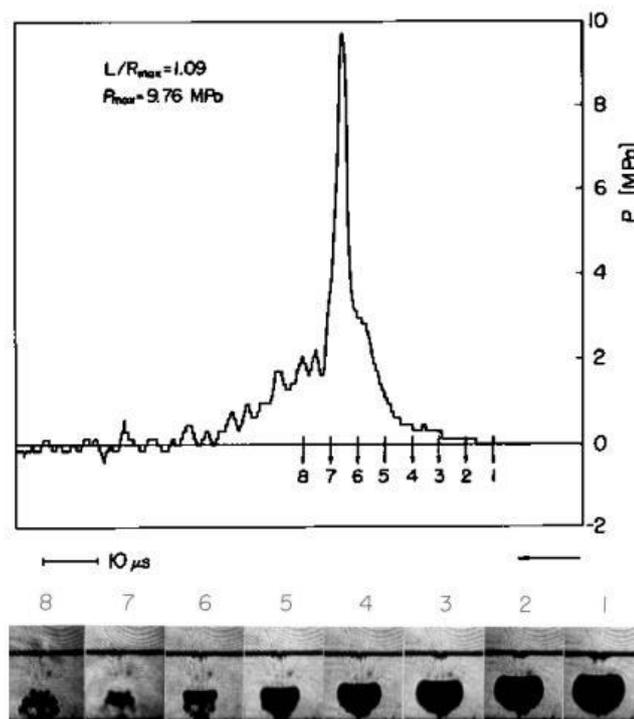


Figura 3.2 - Serie di fotografie di una bolla in cavitazione durante il collasso con la relativa traccia di pressione. Il tempo corrispondente a ogni fotografia è contrassegnato con un numero di traccia (Schima et al., 1983)

### 3.2.2. Effetti negativi della cavitazione

Da un punto di vista tecnologico, la cavitazione è un fenomeno fisico noto soprattutto per gli effetti negativi che provoca sugli organi meccanici e sulle macchine idrauliche. Le rapide implosioni delle bolle generano localmente altissime pressioni e temperature, causando il danneggiamento delle superfici. Le conseguenze sono una notevole perdita di efficienza, l'emissione di rumore e il danneggiamento dei componenti, specie in valvole, eliche e pompe. L'analisi del fenomeno della cavitazione (dalle condizioni di innesco al suo sviluppo) è notevolmente complessa a causa del gran numero di fattori coinvolti (natura del liquido, temperatura, impurità, cause provocanti la riduzione della pressione, ecc.). Inoltre, l'incremento stesso di temperatura facilita ulteriormente il fenomeno, poiché la diretta conseguenza è l'aumento della pressione di vapore. Il crollo della bolla è un processo violento che genera onde d'urto e microgetti di liquido ad alta velocità, oltre che attrito e turbolenza. Le tensioni superficiali localizzate sono molto intense e la ripetizione di questi fenomeni fortemente energetici, variabili e ripetuti nel tempo, genera nei pressi di una superficie solida i danni caratteristici dello stress a fatica.

La cavitazione è un fenomeno indesiderato in diversi campi applicativi, dalle eliche alle pompe, dai motori diesel alle valvole. È inoltre curioso notare come particolari organismi acquatici, quali tonni e delfini, vengano limitati nella loro velocità di avanzamento dalla cavitazione che si sviluppa in corrispondenza di coda e pinne, causando abrasioni e ferite. Lo studio di questi fenomeni altamente energetici ha posto le basi per il loro sfruttamento tecnologico, come discusso ampiamente nel presente capitolo.



Figura 3.3 – Esempi di danni prodotti dalla cavitazione a eliche e giranti di pompe idrauliche

### 3.3. Dinamica dello sviluppo della bolla

Come descritto da *Tullis (2007)*, sono tre le condizioni fondamentali per cui la cavitazione può manifestarsi:

- Presenza, all'interno del sistema, dei nuclei, indispensabili per la vaporizzazione del liquido. Tali nuclei possono essere legati a bolle di vapore disciolto già presenti nel liquido o intrappolate lungo le pareti delle condotte e ad impurità varie.
- Generazione di una caduta di pressione, la cui entità deve essere tale da permettere al liquido di trovarsi al di sotto della propria pressione di vapor saturo.
- Pressione ambientale, attorno alle cavità di vapore, maggiore della pressione di vapor saturo al fine di garantire il collasso delle bolle.

Per comprendere a pieno i meccanismi di origine della pressione è necessario comprendere il ruolo giocato dai nuclei e dalle vorticosità, e quindi comprendere come la cavitazione possa essere generata. Il processo è descritto solo in termini teorici senza l'introduzione di metodi numerici.

#### 3.3.1. Formazione delle bolle: nuclei di cavitazione

Con il termine "nuclei di cavitazione" si identificano le bolle di gas o i vuoti presenti all'interno del liquido, legati alla normale aerazione della sostanza e alla presenza più o meno marcata di contaminanti o impurità. Le bolle d'aria possono essere libere o intrappolate nelle crepe del materiale sospeso presente nel liquido o nelle rugosità delle tubazioni. La presenza dei nuclei è necessaria affinché un fenomeno di ebollizione o di cavitazione possa svilupparsi. In linea teorica, un liquido completamente deaerato, con un contenitore pulito in maniera tale che non vi siano contaminanti, vuoti o aria intrappolata, potrebbe mantenere la tensione e non bollire alla normale temperatura di ebollizione, né avrebbe la capacità di cavitare quando la pressione scende al sotto la pressione di vapor saturo. Per questo motivo, la presenza dei nuclei è una condizione necessaria affinché la cavitazione possa avvenire. La quantità e la dimensione dei nuclei sono legate ai precedenti trattamenti che il liquido ha subito, nonché alle condotte idrauliche in cui ha viaggiato. L'acqua contiene normalmente abbastanza nuclei da indurre la cavitazione nel momento in cui la sua pressione scende sotto il valore di pressione di vapor saturo. In particolari condizioni, replicabili in laboratorio, è possibile ridurre il contenuto di nuclei in maniera tale da non generare la cavitazione; tale applicazione si rileva economicamente svantaggiosa per la produzione di grandi volumi, né risulta pratica nelle applicazioni impiantistiche comuni (*Tullis, 2007*). Se l'acqua viene fatta circolare attraverso un tunnel o in un sistema di pompaggio chiuso, il contenuto di aria può essere artificialmente cambiato in modo da controllare le condizioni necessari allo sviluppo della cavitazione.

L'analisi del fenomeno della cavitazione è estremamente complesso a causa del gran numero di fattori coinvolti. La formazione e la crescita delle bolle è dettata dalle condizioni operative del liquido (esempio densità e temperatura), dal funzionamento dell'impianto e della diminuzione della pressione locale al di sotto di una certa pressione, che potremmo definire *pressione critica*  $p_{cr}$ . Considerando le sole condizioni del liquido, si distingue la cavitazione *vaporosa* da quella *gassosa*.

- *Cavitazione vaporosa*: in condizioni di *liquido deaerato* (liquido puro), la formazione e la crescita delle bolle è dovuta all'evaporazione del liquido all'interno delle cavità. Trascurando la tensione superficiale, in condizioni di equilibrio della bolla, si avrà:

$$p_{cr} = p_v$$

dove:

$p_v$  è la tensione di vapore alla temperatura della massa liquida;

$p_{cr}$ : pressione critica esterna.

Occorre considerare la tensione superficiale della bolla; essa tende a chiudere le cavità generatesi e a ripristinare la continuità. Considerando Figura 3.4, è necessario aggiungere un termine  $\Delta p = 4s/D$  al semplice equilibrio tra la pressione esterna e la tensione di vapore ( $s$  è la tensione superficiale (N/m) e  $D$  è il diametro della bolla).

$$p_{cr} = p_v + \Delta p \tag{3.1}$$

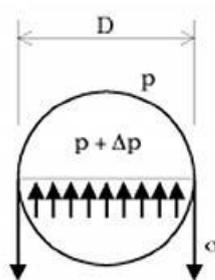


Figura 3.4 – Forze di pressione interagenti per una bolla in una massa liquida

In teoria, la  $p_{cr}$  dovrebbe essere molto inferiore a  $p_v$ , soprattutto per bolle molto piccole, ma in pratica ciò non si verifica sia per la presenza di impurità gassose disciolte nel liquido e sia per irregolarità delle pareti in cui possono essere intrappolate bolle di gas. A causa di queste impurità si hanno nuclei di formazione delle bolle che fanno sì che la cavitazione si manifesti ad una  $p_{cr}$  maggiore della pressione di vapore:

$$p_{cr} = p_v + p_g \quad (3.2)$$

dove  $p_g$  è la pressione parziale del gas disciolto.

Il valore di pressione critica è solo indicativo, nella pratica si valuta sperimentalmente.

- *Cavitazione gassosa*: si distingue da quella precedente per il fatto che la crescita delle bolle è dovuta principalmente alla diffusione del gas disciolto nel liquido; lo sviluppo è molto più lento comparato al caso di cavitazione vaporosa.

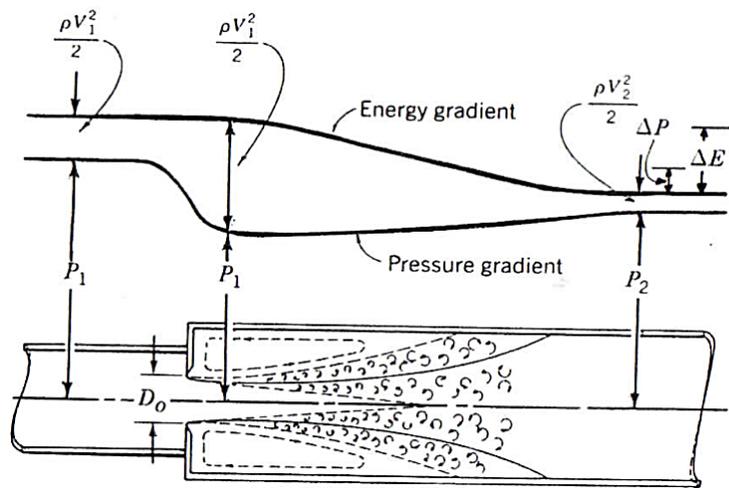
### 3.3.2. Caduta di pressione per la cavitazione

La pressione locale è la somma della pressione media, uniforme in una certa regione del fluido, e della pressione dinamica, che dipende dal moto del fluido e in particolare dalla formazione e dissipazione di vortici. La pressione media varia nel sistema per cambiamenti di elevazione, per perdite localizzate e per accelerazioni locali dovute a cambiamenti della sezione attraverso la quale fluisce il liquido. Andando ad analizzare il flusso attraverso un tubo di Venturi è possibile comprendere il ruolo giocato dalla caduta di pressione nell'induzione della cavitazione. In un tubo di Venturi progettato correttamente non si ha distacco della vena liquida e la turbolenza risulta essere bassa. Conseguentemente, per far avvenire la cavitazione in un Venturi, la pressione media deve scendere approssimativamente al di sotto della pressione di vapor saturo del liquido. Tuttavia è sempre presente uno strato lungo il contorno della tubazione che genera turbolenza. La cavitazione inizierà vicino al centro di tale strato all'interno di piccolissime vorticosità, le quali hanno pressioni nel loro centro minori della pressione media del sistema. Quando si progetta o analizza un sistema di tubazioni, le valutazioni dovrebbero essere fatte sulla localizzazione delle valvole, delle pompe o delle turbine e sugli effetti della pressione media sulla cavitazione. Se si vuole ridurre le possibilità di cavitazione e aumentare la pressione media, è consigliato posizionare i dispositivi che potrebbero essere sottoposti a cavitazione in un luogo di massima pressione. Questo può essere fatto, per esempio, posizionando una valvola nel punto più basso della rete idriche; se non è possibile agire modificando l'elevazione dell'installazione, è consigliato aumentare la pressione con qualche altro dispositivo di controllo. Se una valvola è installata per produrre una grande caduta di pressione, con conseguente induzione della cavitazione, può essere utile posizionare una seconda valvola a valle; questa creerà una moderata caduta di pressione e incrementerà la pressione sulla valvola di controllo principale (Garofano, 2016). Per una pompa, potrebbe essere utile incrementare la dimensione della sezione del tubo o cambiare la configurazione della tubazione per ridurre le perdite (Tullis, 2007).

### 3.3.3. Vorticità e turbolenza

Le pressioni tempo-dipendenti generate dalla turbolenza o la formazione e decadimento delle vorticità giocano un ruolo molto importante nel processo di cavitazione. Le fluttuazioni di pressione sono anche la primaria ragione per cui la cavitazione è così difficile da essere predetta. La pressione media può essere calcolata applicando una equazione energetica e stimando le possibili perdite all'interno del sistema, mentre la pressione all'interno della zona di distacco della vena liquida e nelle vorticità può solo essere stimata con metodi empirici.

Per comprendere il ruolo delle vorticità e della turbolenza in un processo di cavitazione, nella Figura 3.5 è rappresentato il flusso attraverso un restringimento localizzato di sezione.



**Figura 3.5 – Andamento del carico totale e del carico piezometrico attraverso un restringimento localizzato di sezione. Con  $P_1$  e  $V_1$  sono indicati la pressione e la velocità a monte del restringimento, con  $P_2$  e  $V_2$  la pressione e la velocità a valle del restringimento e con  $D_0$  il diametro del restringimento (Tullis, 2007)**

Il flusso a monte del restringimento è caratterizzato da bassa velocità ed alta pressione, mentre nel momento in cui incontra l'orifizio la velocità aumenta notevolmente e si ha una caduta di pressione. Quando il getto liquido si riallarga dopo il restringimento, un intenso strato di taglio si viene a creare lungo il contorno tra il getto e la circostante regione di separazione. L'alto gradiente di velocità in questo strato di taglio crea le vorticità. La pressione media nella zona di separazione vicino al getto è circa la stessa che si ha all'interno del getto. Tuttavia, la pressione all'interno delle vorticità è significativamente minore a causa della sua alta velocità rotazionale. Se un nucleo viene ad essere intrappolato da una di queste vorticità e la pressione interna scende fino al valore della pressione di vapor saturo, il nucleo inizia a crescere. Se la pressione rimane vicina a quella di vapor saturo abbastanza a lungo da far raggiungere al nucleo il diametro critico questo cresce ancor più rapidamente grazie alla vaporizzazione. Quando la dimensione delle cavità di vapore aumenta, la potenza delle

vorticità è rapidamente dissipata, la velocità rotazionale viene a ridursi e la pressione non ha più un valore pari a quella di vapor saturo. Fintanto che la pressione ambientale è sopra al valore della pressione di vapor saturo, le cavità divengono instabili e collassano (Garofano, 2016). Il tempo per cui un nucleo è soggetto alle basse pressioni all'interno delle vorticità è molto importante. Se il tempo non è abbastanza lungo la bolla non può raggiungere il diametro critico e quindi non può evolvere in un evento cavitazionale (Tullis, 2007).

### 3.3.4. Fase di recupero della pressione

La terza fase della cavitazione è contraddistinta dal recupero della pressione: deve essere presente infatti una pressione locale, nella regione di cavitazione, maggiore di quella di vapor saturo in maniera tale da favorire il collasso delle cavità. Per un sistema in cui è installato, per esempio, un Venturi, l'alta pressione richiesta per il collasso si ha quando le cavità si muovono attraverso la regione di diffusione della vena liquida, a valle del Venturi, dove la pressione viene recuperata con la distanza. Si hanno anche dei recuperi di pressione grazie alla dissipazione delle piccolissime vorticità. Nel caso di un sistema in cui è installato un orificio o una piastra forata, il recupero di pressione avviene grazie alla dissipazione delle vorticità e alle cavità soggette alla pressione locale. Vi è anche un recupero di pressione associabile alla diffusione del getto, come mostrato sempre nella Figura 3.5 esposta precedentemente (Tullis, 2007).

Quando la bolla incontra una zona di alta pressione, l'equilibrio tra le forze di pressione viene meno, e di conseguenza la bolla subisce una compressione che può sfociare o meno in un'implosione della bolla (in relazione all'entità di pressione del liquido incontrata). La bolla di cavitazione è instabile: appena la bolla lascia la zona di bassa pressione, essa collassa, implode violentemente, poiché la pressione interna non è più sufficiente a contrastare la pressione idrostatica esterna e le forze di tensione superficiale.

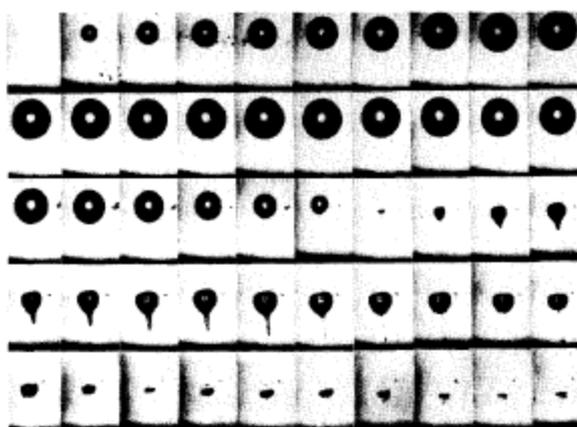


Figura 3.6 – Collasso di una singola bolla vicino ad una parete solida, ripreso a 75000 fotogrammi al secondo. Il raggio massimo è 1,9 mm (Lauterborn et al. 1985)

Sebbene il principio di formazione e crescita della bolla sia lo stesso, si distingue il caso di cavitazione acustica e idrodinamica. Nella cavitazione acustica, l'onda sonora impone una variazione sinusoidale di pressione sulle cavità esistenti in soluzione. Durante il ciclo di pressione negativo, noto come rarefazione, la bolla tende ad ingrossarsi; invece il comportamento opposto, la diminuzione della bolla, lo si ha in fase di pressione positiva. Raggiunta la dimensione critica della bolla, un ulteriore aumento di pressione ne provoca il collasso. In fase di rarefazione, le bolle di cavitazione si formano come microbolle: assorbono l'energia dalle onde sonore e crescono. Le bolle, raggiunta la dimensione critica, non possono più assorbire energia efficacemente; per effetto di questo passaggio (mancanza di assorbimento di energia), esse implodono durante la fase di compressione (*Ozonek et al. 2011*).

Nella cavitazione idrodinamica, non si ha la variazione sinusoidale di pressione, bensì un distacco netto tra la zona ad alta velocità e bassa pressione e la zona di bassa velocità ed alta pressione. Il principio di sviluppo della bolla è il medesimo a quanto spiegato per il caso acustico: essa cresce nella zona a bassa pressione ed implode nella zona ad alta pressione; il collasso avverrà quando verrà raggiunto il raggio critico  $R_c$ . *Yasui et al. (2014)* hanno mostrato che le temperature e le pressioni di collasso raggiungono rispettivamente valori di 5000-10000K e 300 atm. La bolla generatasi può andare incontro a diversi destini:

- coalescenza: unione di due bolle (Figura 3.7);
- diffusione rettificata: la bolla, se in ambiente a bassa pressione, accresce le sue dimensioni;
- degasaggio: la bolla, dopo aver raggiunto dimensioni sufficientemente grandi, può lasciare il sistema con un'implosione incompleta o con una frammentazione in bolle più piccole;
- implosione: la bolla ha raggiunto la dimensione critica e la pressione esterna è sufficientemente alta da generare il collasso della bolla.

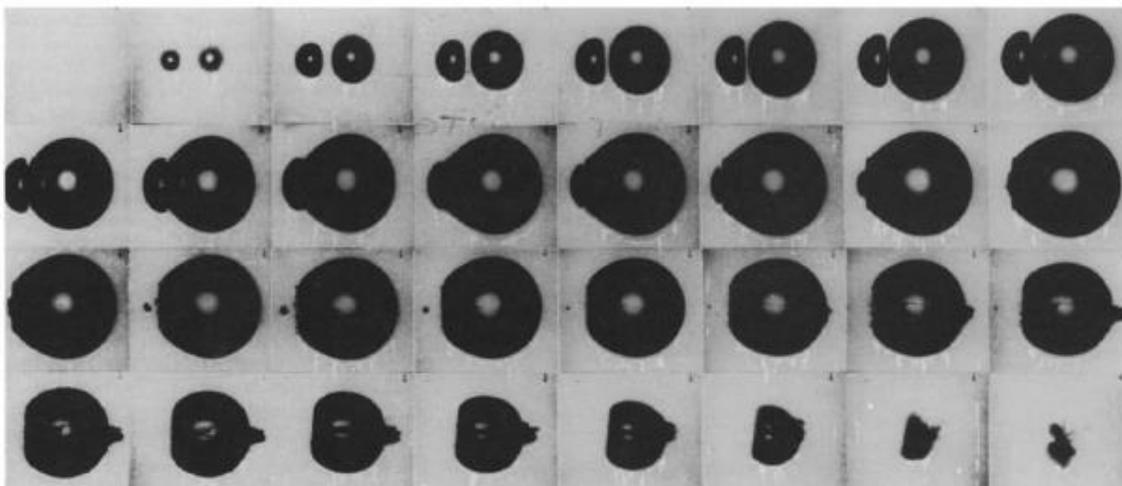


Figura 3.7 – Coalescenza di due bolle, riprese a 75000 fotogrammi al secondo (*Lauterborn et al. 1985*)



Figura 3.8 – Frammentazione di una bolla cavitazionale e conseguente formazione di una nuvola di microbolle  
(Frost e Sturtevant, 1986)

### 3.4. Definizione del Numero di cavitazione

La probabilità che l'evento di cavitazione si sviluppi è data dal calcolo del Numero di cavitazione (o *Cavitation Number*). Tale numero adimensionale risulta essere il rapporto tra le forze che sopprimono la cavitazione (il cambiamento di pressione) e le forze che ne sono la causa (energia cinetica); la forza che causa la cavitazione è direttamente proporzionale all'energia cinetica locale del fluido.

Il numero di cavitazione adimensionale ( $\sigma_v$ ) rappresenta le caratteristiche idrauliche di un dispositivo cavitante, e questo caratterizza la condizione di cavitazione all'interno del dispositivo. È rappresentato dall'Eq. (3.3) (Saharan et al. 2011):

$$\sigma_v = \frac{p_2 - p_v}{\frac{1}{2} \rho v_0^2} \quad 3.3$$

Dove:

$p_2$  è la pressione a valle del restringimento,

$p_v$  è la pressione di vapore del liquido,

$v_0$  è la velocità nella strozzatura

$\rho$  è la densità del liquido.

Il numero di cavitazione al quale l'inizio della cavitazione si verifica è noto come numero di inizio della cavitazione,  $\sigma_{vi}$ . Idealmente, l'inizio della cavitazione si verifica a  $\sigma_{vi} = 1$ , e gli effetti cavitazionali sono significativi con un valore di  $\sigma_{vi}$  inferiore di 1. Partendo dalla definizione iniziale, si determina che: se il numero di cavitazione diminuisce, le forze che generano la cavitazione prevalgono su quelle che la sopprimono, per cui si ha una più alta attività cavitazionale.

Come riassunto da *Garofano (2016)*, una soluzione analitica al problema della cavitazione non è ancora stata trovata. Come noto, la cavitazione è causa di rumore, fluttuazioni di pressione, vibrazioni, erosione delle pareti solide e perdita di efficienza; alcuni di questi fenomeni fisici indotti dalla cavitazione possono essere valutati e monitorati per poter quantificare e studiare il fenomeno, come per esempio fatto da *Aurégan et al. (2006)*. Sofisticati strumenti elettronici, tra i quali misuratori del livello sonoro, trasduttori di pressione, accelerometri, idrofoni sono utilizzati nei laboratori per misurare e studiare la cavitazione. L'accelerometro è sicuramente uno degli strumenti maggiormente utilizzati; poiché la parete della condotta del sistema idraulico risponde direttamente alle onde d'urto generate dalla cavitazione, installando un accelerometro sulle tubazioni in cui fluisce l'acqua in cavitazione è possibile quantificare l'intensità del fenomeno correlandola al Cavitation Number. *Maynes et al. (2013)* hanno sfruttato le potenzialità dell'accelerometro per definire l'andamento del Numero di cavitazione in funzione dell'accelerazione di vibrazione delle pareti solide (Figura 3.8).

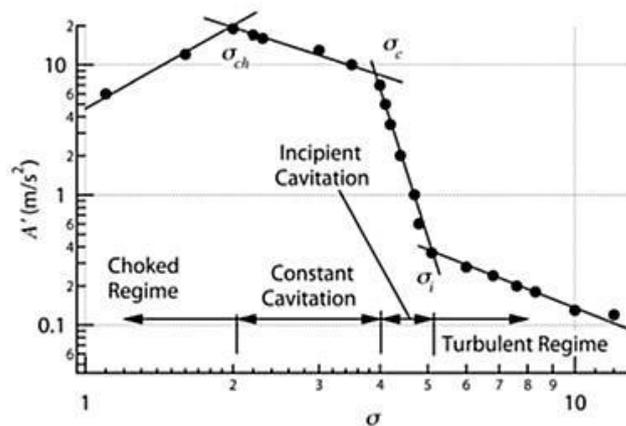


Figura 3.9 – Andamento del Numero di cavitazione in funzione dell'accelerazione di vibrazione delle pareti solide del sistema idraulico (*Maynes et al., 2013*)

La regione di "Turbolent Regime" corrisponde ad una situazione in cui non si ha cavitazione: le variazioni di accelerazione rilevate sono semplicemente funzione dell'incremento della velocità del flusso, del regime turbolento dei getti e della loro interazione. Il tratto di "Incipient Cavitation" corrisponde ad un regime in cui il livello di accelerazione cresce considerevolmente, mentre le variazioni del Cavitation Number sono esigue. È qui che la cavitazione ha inizio, benché essa si manifesti solo ad intermittenza sotto queste condizioni. Il

terzo tratto, definito “Constant Cavitation”, è un regime in cui il flusso è completamente cavitazionale. Nell’ultimo tratto invece si ha un soffocamento del flusso e come conseguenza il livello vibrazionale decresce; parliamo quindi di “Choked Regime”. Ciò avviene poiché la distanza fino alla quale le cavità si protraggono cresce ed il collasso delle bolle avviene lontano dal luogo di generazione. Con il termine  $\sigma_i$  si identifica il valore di Cavitation Number per il quale inizia a manifestarsi la cavitazione con la formazione di piccole bolle di vapore. Il valore critico di cavitazione  $\sigma_c$  rappresenta il valore di Cavitation Number per il quale il flusso è completamente in cavitazione e si ha una formazione costante di bolle di vapore. Infine,  $\sigma_{ch}$  rappresenta il valore del Cavitation Number per il quale si manifesta un soffocamento del flusso.

### 3.5. Fenomeni cavitazionali: osservazioni fotografiche

Come già affermato, la cavitazione è fortemente indesiderata nelle applicazioni impiantistiche e nei sistemi di propulsione. Risulta interessante prendere visione dei fenomeni correlati alla cavitazione attraverso una serie di riscontri fotografici, al fine di comprendere come queste varie vorticità si sviluppano nel liquido. I più comuni fenomeni cavitazionali sono riscontrabili in eliche, turbine e pompe e vengono indotti dall’azione rotatoria che contraddistingue l’attività di tali organi meccanici. I fenomeni correlati alla HC possono avere scale temporali e spaziali assai varie; alcuni di essi sono in grado di persistere nel tempo anche a lunga distanza dagli elementi presso i quali si originano, variando sia nella forma che nel contenuto energetico.

#### 3.5.1. Configurazioni delle cavità in una turbopompa o all’interno di un’elica

Le diverse configurazioni assunte dalle bolle cavitazionali dipendono principalmente da alcuni aspetti: i parametri operativi, il sistema cavitazionale, le condizioni chimico/fisiche del liquido, ecc. Tali configurazioni sono state individuate e distinte da *d’Agostino e Salvetti (2007)*. Distinguiamo i seguenti casi:

- cavitazione attaccata: la cavitazione appare nella forma di una cavità attaccata al lato di aspirazione della lamina;
- cavitazione *traveling bubble*, a bolle viaggianti: caratterizzata da bolle isolate in moto nella massa liquida;
- nuvola di cavitazione: nuvola di bolle, generalmente molto fini e dense;

- vortici di cavitazione: si osserva sul vertice di una lamina tridimensionale o sulla scia turbolenta di un *bluff body*, un corpo tozzo. Un flusso liquido che incontra un corpo tozzo non riesce a rimanere aderente sul corpo ma si stacca piuttosto rapidamente, rilasciando una scia turbolenta caratterizzata da un forte difetto di velocità e da uno spessore dello stesso ordine di grandezza del diametro del corpo. Quando il flusso si separa dalla superficie si forma una scia: più questa è grande, maggiore è la caduta di pressione.

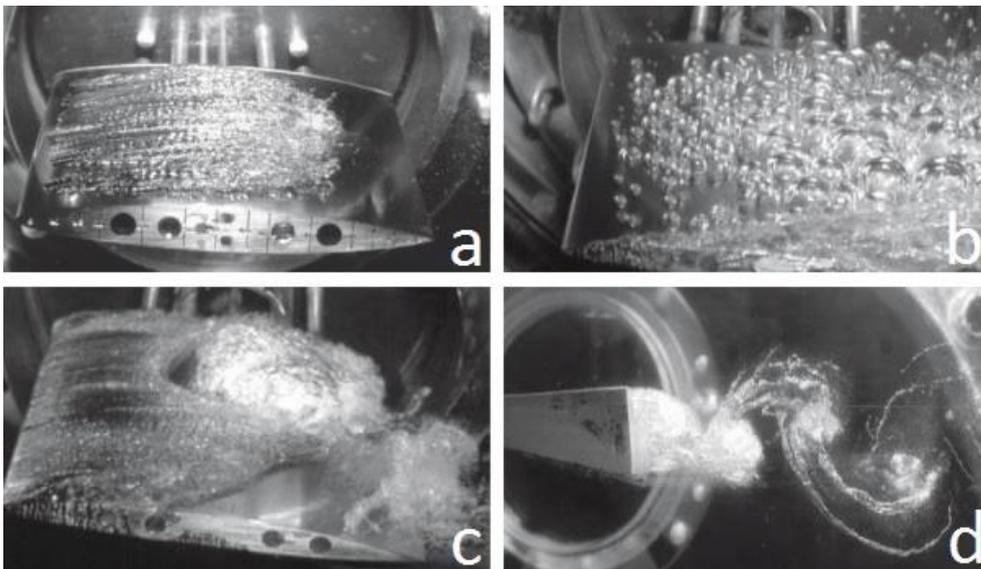


Figura 3.10 – Configurazioni delle cavità: (a) cavitazione attaccata, (b) cavitazione a bolle viaggianti, (c) nuvole di cavitazione, (d) vortice cavitazionale (Ricucci, 2017)

### 3.5.2. Origine dei vortici cavitazionali

I flussi caratterizzati da un alto valore del numero di Reynolds possono contenere regioni con vorticità concentrate dove la pressione risulta significativamente minore rispetto al resto del flusso. Questa regione è generalmente situata al centro del del vortice stesso. Un esempio può essere il caso delle vorticità generate dalle eliche delle barche o dalla girante delle pompe idrauliche (Figura 3.11). La conseguenza principale risulta essere la nascita di fenomeni cavitazionali all'interno di queste vorticità; al diminuire del valore del Cavitation Number, il cuore del vortice può diventare completamente vaporoso, originando quello che viene definito vortice cavitazionale.



Figura 3.11 – Vortici cavitazionali formati dall'elica di una barca (Garofano, 2016)

Numerosi sono gli esempi di fenomeni cavitazionali su larga scala. *Brennen (1995)* ha evidenziato lo sviluppo di vortici cavitazionali in un liquido che investe un corpo ellissoidale (Figura 3.12). Anche in questo caso, dopo la nascita della vorticità localizzata all'apice dell'ostacolo (Figura 3.12a), se si procede a ridurre il valore di Cavitation Number si ottiene un'estensione del vortice su porzioni di superficie maggiore (Figura 3.12b).

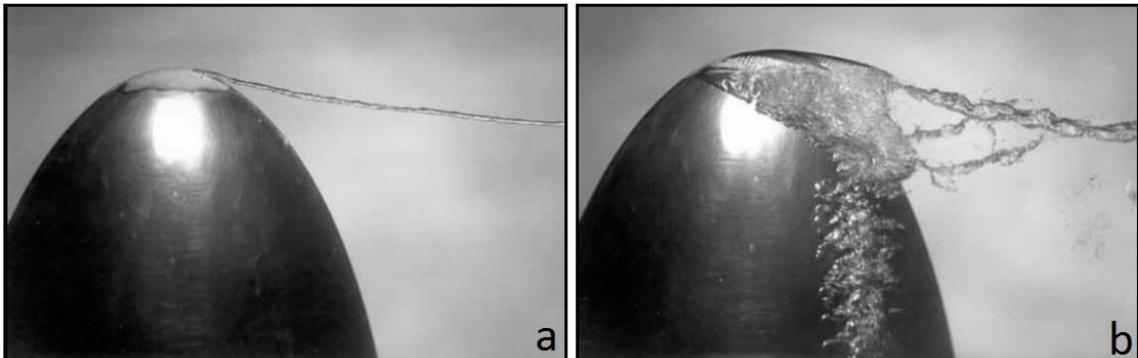


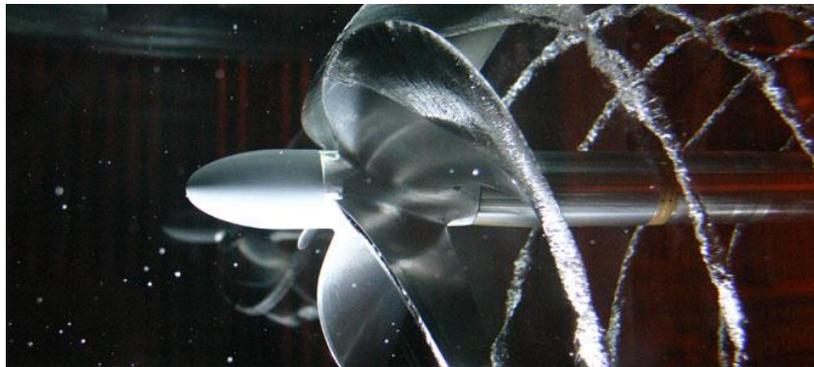
Figura 3.12 – Vortici cavitazionali in corrispondenza della punta di un solido ellissoidale; nella figura (a) la vorticità è concentrata all'apice dell'ostacolo, mentre nella figura (b) osserviamo un'estensione del vortice di bolle (*Brennen, 1995*)

Negli esperimenti condotti da *Higuchi, Rogers e Arndt (1986)* l'inizio della cavitazione avveniva in vortici situati ad una certa distanza dall'apice della struttura ellissoidale, quando il Cavitation Number assumeva un valore pari a 1,4. Con ulteriori diminuzioni di pressione la cavitazione nel cuore delle vorticità diveniva continua, come illustrato nella Figura 3.19b. Questa transizione è probabilmente relazionata al fatto che le singole bolle tendono ad accumularsi nel centro del vortice, migrando a causa del gradiente di pressione centrifugo. Con una ulteriore decrescita del Cavitation Number si osservano bolle cavitazionali lungo la superficie idrofila della struttura ellissoidale, in accordo con quanto successivamente dimostrato da *Brennen (1995)*. Un fenomeno analogo si può osservare in corrispondenza della girante di una pompa idraulica (Figura 3.13).



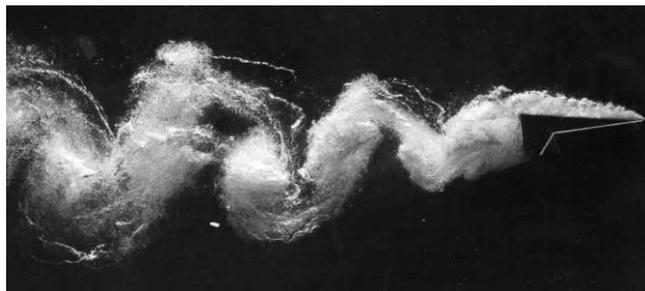
**Figura 3.13 – Vortici cavitazionali in un modello in scala della girante di una turbopompa a bassa pressione (Brennen, 1995)**

I vortici cavitazionali hanno la caratteristica di creare un flusso sorprendentemente stabile. Caratterizzati da una forma elicoidale, i vortici prodotti dalle lame di un'elica possono persistere a lunga distanza dell'elica stessa (Figura 3.14)



**Figura 3.14 – Vortici cavitazionali in un modello di elica; è possibile notare come i vortici persistano a lunga distanza a valle dell'elica (Brennen, 1995)**

Un vortice cavitazionale analogo a quello visto in Figura 3.10d è quello prodotto dalla scia generata da un piatto liscio, in moto nell'acqua, dotato di una linguetta sufficientemente pronunciata (Figura 3.15).



**Figura 3.15 – Vortici cavitazionali prodotti dalla scia di un piatto liscio dotato di linguetta in moto nell'acqua (Garofano, 2016)**

### 3.6. Classificazione basata sugli effetti cavitazionali

Come suggerito da *Ricucci (2017)* è utile presentare la cavitazione secondo due diverse classificazioni: la prima, basata sugli effetti conseguenti il collasso e la seconda, incentrata sulla tipologia di apparecchiatura che genera il fenomeno, quindi sulla tecnologia cavitazionale.

Per quanto riguarda gli effetti conseguenti il collasso delle bolle, la cavitazione può essere classificata in funzione dell'energia richiesta per la generazione di tre diversi tipi di regimi:

- *Cavitazione transitoria.* È il processo per cui le cavità generatesi collassano molto velocemente (nel caso di cavitazione acustica ciò avviene in un singolo ciclo di fluttuazioni); attraverso un meccanismo molto violento il gas presente all'interno delle bolle dissipa verso il liquido circostante, rilasciando una quantità rilevante di energia sotto forma di onda d'urto e causando la sono-luminescenza. Nel momento del collasso, la temperatura del vapore intrappolato dentro la cavità può raggiungere diverse migliaia di kelvin e la pressione diverse centinaia di atmosfere. Queste esplosioni possono essere accompagnate da onde d'urto localizzate e/o dalla generazione di specie chimiche molto reattive.
- *Cavitazione stabile.* È caratterizzata dalla presenza di piccole bolle nel liquido che oscillano forzatamente, per dimensione e forma, a causa del campo di fluttuazione di pressione. Quando l'intensità dell'energia in ingresso diventa insufficiente, si ha un collasso della bolla meno violento rispetto al caso precedente. Non si verificano fenomeni di sono-luminescenza, ma a causa delle oscillazioni volumetriche, il liquido immediatamente adiacente alla bolla forma un flusso, detto microstreaming, che produce uno sforzo di taglio sufficiente a distruggere la membrana cellulare di un batterio (*Scherba et al., 1991*).
- *Supercavitazione o Choked cavitation.* Quando l'energia introdotta nel sistema diventa troppo alta, si passa dalla regione della cavitazione transitoria a quella della supercavitazione. Questo fenomeno è caratterizzato da una crescita indiscriminata delle bolle, con la fase di vaporizzazione che risulta dominante rispetto al collasso con conseguente aumento del numero di bolle generate. La maggiore densità di bolle favorisce il fenomeno della coalescenza delle cavità, accrescendo le dimensioni delle bolle fino a valori esterni al campo delle reazioni sonochimiche. Quando avviene la supercavitazione, il flusso a valle dell'orificio può essere diviso in tre distinte regioni (figura2.3.1):
  - zona A: un jet liquido avvolto da una tasca di vapore, identificabile come una "super cavità";
  - zona B: una zona di 3 – 5 cm, definita "white clouds", formata da piccole bolle che collassano;
  - zona C: una "clear liquid region", così definita perché tutte le cavità sono già collassate.

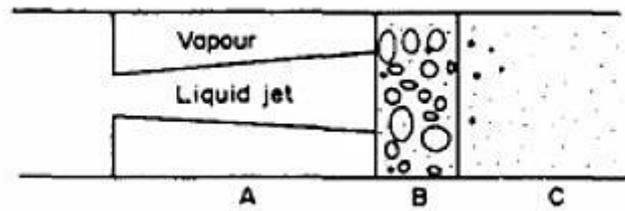


Figura 3.16 – Regioni di flusso in regime di supercavitazione: regione A – super cavità, regione B- white clouds, regione C – clear liquid

### 3.7. Classificazione basata sulla tecnologia cavitazionale

La necessità di studiare gli effetti della cavitazione e di sfruttarli in numerose applicazioni, come vedremo in seguito, ha reso indispensabile la progettazione di sistemi sperimentali ed apparecchiature da laboratorio in grado di ricreare il fenomeno. La cavitazione può essere indotta all'interno di un generico fluido per via acustica, idrodinamica o particellare. Ogni sistema ha degli aspetti particolari che ne caratterizzano i campi di applicazione; si analizzano di seguito gli esempi più significativi.

#### 3.7.1. Cavitazione acustica

*Brarr et al. (2015)* identificano due range ultrasonori che trovano importanti applicazioni nel campo chimico: il “diagnostic ultrasound” (sfruttato per effettuare misure fisiche) e il “power ultrasound” (utilizzato per influenzare le attività chimiche).

*Diagnostic ultrasound:* la prima applicazione commerciale degli ultrasuoni si sviluppò immediatamente dopo il disastro del Titanic del 1912, quando venne organizzato un concorso per mettere a punto una strumentazione in grado di identificare la presenza degli iceberg galleggianti in mare aperto. Si scoprì che la distanza tra la nave e l'iceberg poteva essere stimata grazie al calcolo del tempo intercorrente tra l'emissione di un suono dall'imbarcazione e la ricezione di un eco riflesso dall'iceberg: tale ragionamento costituì le basi sulle quali fu sviluppato il SONAR. L'utilizzo degli ultrasuoni, oltre che in campo navale, trova anche grande applicazione nella medicina diagnostica, per la riproduzione delle immagini fetali mediante ecografia.

*Power ultrasound:* è un sistema che produce effetti chimici grazie al fenomeno della cavitazione. La cavitazione è stata descritta come la formazione e collasso di microbolle in un liquido quando allo stesso viene applicata una forte pressione negativa. I primi studi sulla cavitazione furono sviluppati da *Sir John Thynycroft e Sidney Barby*, in seguito ai danni verificatisi sulle pale di un'elica. Durante il rapido moto nell'acqua, il bordo posteriore delle

pale produce sufficiente pressione negativa da dissociare le molecole di acqua e creare delle minuscole microbolle. Successivamente queste bolle collassano con un intenso rilascio locale di energia sotto forma di alte pressioni e temperature. Il collasso di queste bolle vicino alla superficie metallica ne comporta il danneggiamento.

In un sistema in condizioni idrauliche stazionarie la cavitazione può essere generata mediante variazioni di pressione nel liquido prodotte da onde sonore, generalmente ricadenti nel campo degli ultrasuoni (16 KHz–100MHz). Queste generano delle fluttuazioni sinusoidali di pressione; se l'ampiezza delle variazioni è sufficientemente grande da ridurre localmente la pressione al di sotto del valore di pressione di vapor saturo del liquido, vengono a crearsi delle piccolissime bolle e cavità. Gli ultrasuoni hanno un grande potenziale e trovano applicazione in numerosi campi, poiché si rendono responsabili della formazione, della crescita ed infine del collasso delle cavità. Uno degli utilizzi più frequenti riguarda la distruzione delle cellule batteriche e dei microrganismi potenzialmente dannosi per la salute dell'uomo. Durante il ciclo di rarefazione si ha la formazione e la crescita delle bolle; durante la fase di pressione positiva: la bolla subisce compressione fin quando non giunge a collasso (Figura 3.17). In presenza di una quantità abbastanza limitata di batteri l'utilizzo degli ultrasuoni si configura come una valida tecnica per la disinfezione come testato da *Koval et al. (2011)*. Tuttavia il metodo presenta indubbiamente due svantaggi: il primo è che l'apparato risulta essere molto costoso e secondo che non tutti i batteri riescono ad essere disintegrati dall'azione degli ultrasuoni, come osservano *Fu et al. (1994)*.

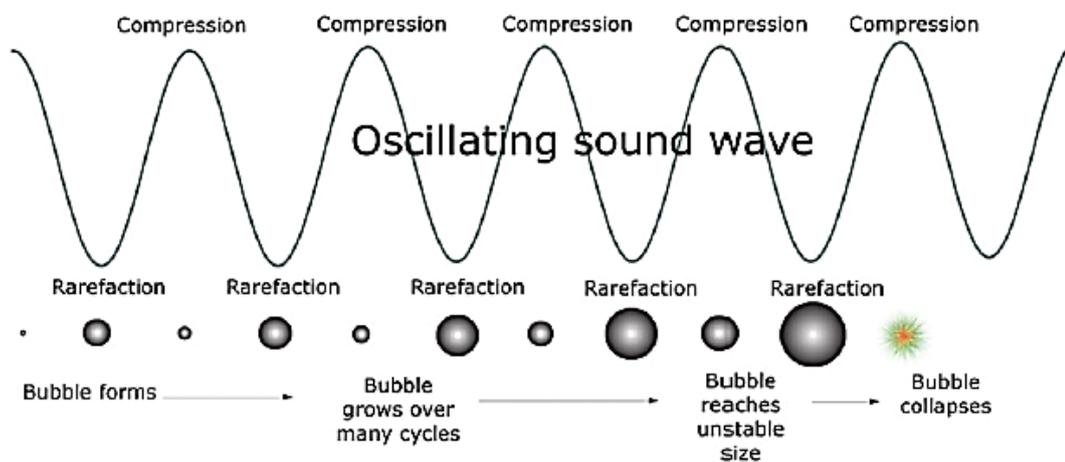


Figura 3.17 – Dinamica di crescita e collasso di una bolla durante la cavitazione acustica (*Ricucci, 2017*)

### 3.7.1.1. Sistemi di generazione degli ultrasuoni

Gli ultrasuoni sono generati dall'azione di un trasduttore ultrasonoro capace di convertire forme meccaniche od elettriche di energia in suoni ad alta frequenza. Distinguiamo tre tipologie di trasduttori (Garofano, 2016):

- *Trasduttori a gas*: i trasduttori a gas non sono stati inventati per avere una significativa applicazione nel campo chimico poiché non è possibile con il loro operato ottenere un'intensità sonora sufficientemente alta nell'aria: il suono infatti è attenuato rapidamente dal passaggio attraverso tale mezzo. È ottenibile una intensità di una frazione di Watt per centimetro quadro nei gas, ma la sorgente deve essere notevolmente potente. Tali trasduttori sono generalmente utilizzati per eliminare schiume, pulire superfici da particelle fini, quali polvere o fumi, e per accelerare i processi di essiccaimento.
- *Trasduttori a liquido*: questo tipo di trasduttore genera cavitazione grazie al moto di un liquido forzato a passare ad alta velocità attraverso un orifizio, mediante l'azione di una pompa idraulica. Il getto così creato dall'orifizio impatta su una lamina metallica (Figura 3.18). Esistono due metodi attraverso i quali la cavitazione può accorrere: il primo attraverso l'effetto del restringimento dell'orifizio ed il successivo ingresso in una zona di espansione, il secondo attraverso la vibrazione della lamina metallica a valle dell'orifizio. La distanza tra la lamina e l'orifizio è controllata per ottimizzare l'azione della lamina stessa. La pressione operante all'interno del sistema è controllata agendo sulla dimensione dell'orifizio o sulle velocità indotte dalla pompa (K. L. Mittal e R. Jaiswal, 2015).

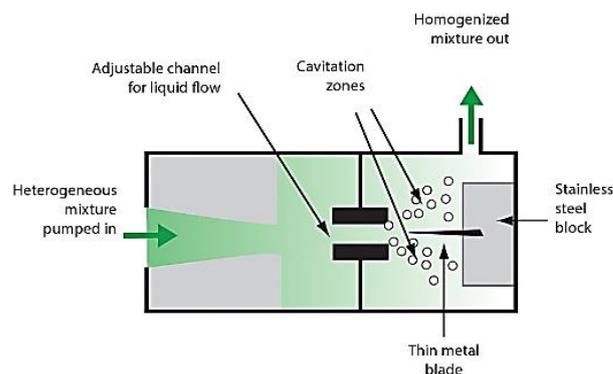


Figura 3.18 – Schema di funzionamento di un trasduttore a liquido (Garofano, 2016)

- *Trasduttori elettromeccanici*: esistono principalmente due tipi di trasduttori elettromeccanici, quelli piezoelettrici e quelli magnetostrittivi. Il trasduttori piezoelettrici sono quelli più comunemente usati e trovano applicazione nelle vasche o nelle sonde ad ultrasuoni. Essi convertono l'energia elettrica alternata direttamente in energia meccanica attraverso l'effetto piezoelettrico, mediante il quale un materiale può variare le proprie dimensioni qualora venga sottoposto ad un campo elettrico. L'energia elettrica alla frequenza ultrasonica, proveniente dal generatore, viene applicata ad uno o più elementi

piezoelettrici presenti nel trasduttore; questi ultimi vengono messi in vibrazione. Queste vibrazioni vengono amplificate attraverso dei dispositivi di risonanza e dirette nel liquido (lega brasante) mediante un piatto di irraggiamento. Generalmente i dispositivi piezoelettrici sono costruiti in quarzo, ma essendo tale materiale fragile e difficile da lavorare spesso sono utilizzati come sostituti il  $\text{BaTiO}_3$  o il  $\text{PbNb}_2\text{O}_6$ . Gli attuali materiali impiegati sono soprattutto ceramici avanzati e altamente stabili.

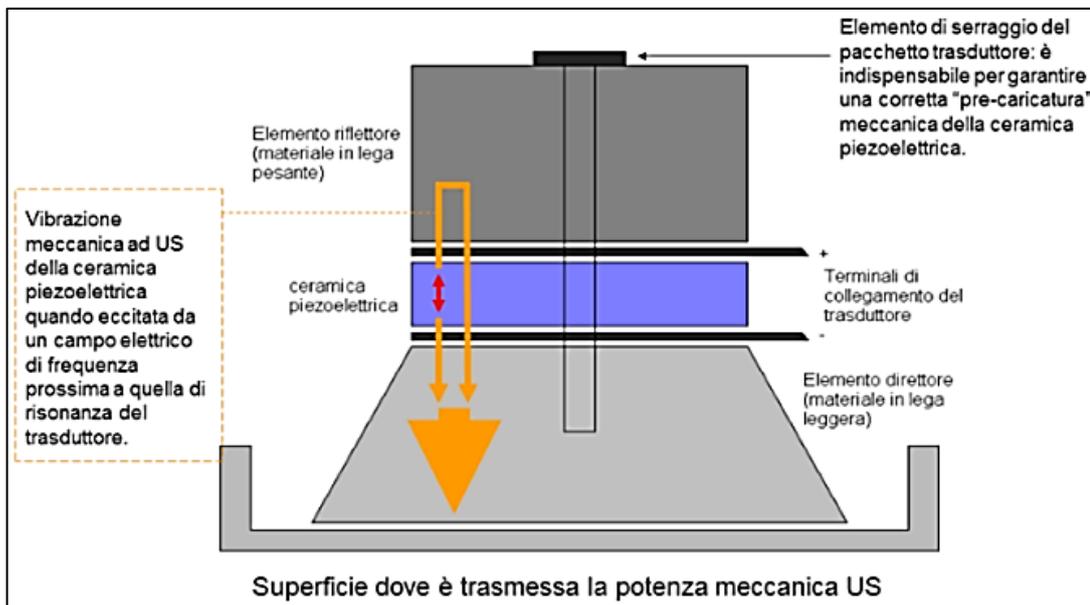


Figura 3.19 – Schema riassuntivo del funzionamento di un trasduttore piezoelettrico (Garofano, 2016)

I principali dispositivi utilizzati per indurre la cavitazione acustica sono la vasca ultrasonora, la sonda ad ultrasuoni e l'ultrasonic flow cell. Si tratta in ogni caso di sistemi sostenibili soprattutto per piccole-medie applicazioni in quanto i volumi trattabili sono esigui e i costi per il loro utilizzo sono particolarmente onerosi. È di seguito riportata una rapida descrizione dei tre sistemi citati.

- *Ultrasonic bath: vasca ad ultrasuoni:* Consiste essenzialmente in una vasca in acciaio inossidabile che può avere differenti dimensioni a seconda dell'utilizzo che le compete. Dei trasduttori sono attaccati alla base della vasca per generare la trasmissione degli ultrasuoni. Questo sistema è frequentemente utilizzato come sistema di lavaggio e trattamento dell'acqua in laboratori scientifici, ospedali e per il lavaggio di strumentazioni chirurgiche e siringhe. La cavitazione produce l'effetto igienizzante grazie alla formazione ed esplosione delle bolle cavitazionali.



Figura 3.20 – Ultrasonic Bath, vasca ad ultrasuoni (Fonte: <https://www.sogi-tools.com>)

- *Probe system: sonda ad ultrasuoni.* È il miglior sistema per applicazioni di laboratorio in quanto genera la massima intensità ultrasonora. Lo strumento consiste essenzialmente in una sonda in lega metallica (Figura 3.21). Gli ultrasuoni sono creati direttamente dall'azione dei trasduttori e direzionati dal corno della sonda. Tale sistema trova la maggiore applicazione nel campo delle biotecnologie, nell'industria farmaceutica, nei laboratori chimici e negli istituti di ricerca per la disattivazione dei batteri. La massima intensità degli ultrasuoni si ha in corrispondenza della punta della sonda, dove si registrano anche le massime sollecitazioni di taglio responsabili del danneggiamento della parete cellulare dei batteri. Tuttavia l'intensità decresce allontanandosi dalla punta della sonda facendo sì che tale sistema non sia particolarmente efficace per trattamenti di grandi volumi. Generalmente sia per la sonda che per la vasca ad ultrasuoni vengono utilizzati trasduttori piezoelettrici che lavorano ad una frequenza fissa tra i 20 e 500 kHz.



Figura 3.21 – Probe system, esempio di una sonda ad ultrasuoni utilizzata per il trattamento dell'acqua (Ricucci, 2017)

- *Ultrasonic Flow Cell*. Questa tipologia di sistema per l'induzione degli ultrasuoni è utilizzata soprattutto per i trattamenti su larga scala. Permette di generare ultrasuoni ad alta intensità. Questo sistema consiste in un trasduttore ultrasonoro collegato ad un sistema di ricircolo chiuso. Se comparato con la sonda ultrasonica, questo sistema è più vantaggioso in quanto permette di lavorare in continuo con un elevato livello di intensità. La variazione della portata del liquido trattato e dell'esposizione all'attività cavitazionale sono altri due importanti fattori condizionanti l'efficienza della disinfezione operata dal sistema, come affermano *Ashokkumar et al. (2011)*. Tale sistema presenta principalmente uno svantaggio, ovvero l'alto consumo energetico del sistema di pompaggio per il ricircolo del fluido, in particolare in presenza di sostanze viscosi che inquinano l'acqua da trattare.

*Pandit et al. (2000)* hanno effettuato un confronto tra la disinfezione di acqua contaminata ottenuta mediante sonda ad ultrasuoni e quella dovuta da due sistemi di cavitazione idrodinamica. I risultati riguardanti il numero di batteri uccisi per unità di tempo suggerirebbe che la sonda ultrasonica sia la tecnologia migliore. Tuttavia questa mostra il più basso tasso di distruzione batterica globale, se confrontato con gli altri due reattori. Questo andamento è confermato dal fatto che l'azione della sonda ultrasonica copre solo una area ristretta: la sua efficienza locale è sì molto alta, ma è limitata alla punta del corno. Il movimento della massa di liquido attraverso la zona di cavitazione influenza notevolmente il tasso globale di disinfezione e rende preferibile l'utilizzo di reattori di cavitazione con piastre forate per trattare grandi volumi di acqua.

### **3.7.1.2. Fattori che influenzano l'efficacia degli ultrasuoni**

Gli ultrasuoni hanno incontrato un largo utilizzo in numerosi settori. Grazie ai numerosi studi condotti nell'arco della sua ricerca sull'applicazione degli ultrasuoni per l'induzione della cavitazione, *Botha (1993)* ha definito i principali parametri che condizionano il fenomeno:

*Frequenza*: se la frequenza delle onde sonore aumenta, la fase di rarefazione diventa più breve e ciò ha due conseguenze dirette. Per mantenere un livello di cavitazione equivalente nel sistema è necessario incrementare l'ampiezza del suono irradiato; in altre parole è richiesta una potenza maggiore per mantenere gli stessi effetti cavitazionali. La seconda conseguenza è rappresentata dal fatto che, quando la frequenza degli ultrasuoni aumenta fino ai megahertz, il fenomeno cavitazionale decresce: il tempo di rarefazione (e compressione) diventa così breve da non permettere lo sviluppo delle dinamiche che portano alla formazione delle bolle cavitazionali.

*Viscosità del solvente*: la formazione delle microbolle nel liquido richiede che la pressione nella regione di rarefazione vinca le naturali forze coesive presenti all'interno del fluido. Lo sviluppo della cavitazione risulta tanto più difficile quanto più queste forze interne sono alte: maggiori sono la viscosità e la tensione superficiale del fluido, maggiore sarà la richiesta energetica.

*Pressione di vapor saturo:* quando viene utilizzato un liquido molto volatile, un maggior quantitativo di vapore entra a far parte delle bolle cavitazionali ed il collasso delle stesse è meno violento.

*Temperatura:* aumentando la temperatura ambientale cresce anche la pressione di vapor saturo del liquido e questo rende più semplice e meno violenta la cavitazione.

*Gas disciolto:* i gas disciolti e le piccole bolle nel fluido possono fungere da nuclei per la cavitazione. Se viene indotta l'azione ultrasonora in presenza di tali nuclei la cavitazione si manifesta abbastanza semplicemente, mentre se il gas viene rimosso il fenomeno avviene con maggiore difficoltà. Aumentando il contenuto di gas non solo è reso più semplice lo sviluppo della cavitazione, ma si ha anche una riduzione dell'intensità delle onde d'urto prodotte dal collasso delle bolle.

*Pressione esterna applicata:* aumentare la pressione esterna applicata coincide con un incremento dei consumi energetici, ma aumenta anche l'intensità della cavitazione e degli effetti del trattamento ad ultrasuoni.

*Intensità:* l'intensità degli ultrasuoni è direttamente relazionata all'ampiezza della vibrazioni prodotte. In generale, incrementare l'intensità coincide con un aumento degli effetti degli ultrasuoni.

*Attenuazione del suono:* il suono viene attenuato se si propaga attraverso un mezzo, poiché parte dell'energia sonora viene dissipata sotto forma di calore. L'entità dell'attenuazione è inversamente legata alla frequenza. Per esempio un suono a 118 kHz riduce della metà la sua intensità dopo essersi propagato per un chilometro nell'acqua.

Oltre i fattori fisici, anche le caratteristiche e la natura dei microrganismi trattati influenzano la disinfezione. Le osservazioni che seguono sono valide anche nel caso della cavitazione idrodinamica.

*Dimensione delle cellule:* Nesaratnam et al. (1982) hanno notato che la resistenza all'azione degli ultrasuoni delle cellule decresce con l'aumento della dimensione delle stesse. Cellule di dimensioni maggiori presentano una minore resistenza a trazione rispetto a quelle più piccole.

*Forma delle cellule:* Hughes e Nyborg (1962) hanno osservato che batteri con forme larghe e allungate sono più suscettibili all'azione ultrasonora rispetto a batteri più piccoli e più compatti.

*Tipologia di specie:* alcune specie di batteri mostrano una certa resistenza al trattamento ultrasonoro.

*Forza dei legami molecolari dei batteri.* Turai et al. (1980) hanno evidenziato come la sopravvivenza batterica sia influenzata dalla forza dei legami intermolecolari e dai legami che i

batteri sono in grado di generare con il mezzo nel quale sono immersi: batteri circondati da un capsula non polare formano legami deboli se immersi in un mezzo polare. I batteri a carica polare, invece, non possono creare legami con il mezzo polare in cui sono immersi e di conseguenza presentano una maggiore suscettibilità alla distruzione.

### **3.7.2. Cavitazione ottica e particellare**

La causa scatenante della rottura del liquido (e della conseguente formazione della cavità) è il deposito locale di energia che porta ad un *hot spot* e ad una sorta di microesplosione. Nella cavitazione ottica vengono utilizzati i protoni per la rottura della continuità liquida. Il liquido, sottoposto ad un campo di luce sufficientemente alto, giunge a rottura a causa del processo di *ionizzazione multifotonica* (formazione di ioni da atomi o da molecole elettricamente neutre, attraverso il simultaneo assorbimento di due o più fotoni) che permette un trasferimento di energia localizzato. La luce assorbita riscalda il liquido oltre la sua temperatura di ebollizione, in un arco di tempo che va dai microsecondi ai millisecondi (a seconda dell'intensità ottica). Una volta che il liquido viene riscaldato fino al suo limite spinodale (per acqua pura circa 300°C), l'acqua surriscaldata diventa instabile e si raggiunge uno stato in cui si hanno fluttuazioni instabili di densità e una fase di transizione a vapore, con la produzione di bolle di vapore che espongono molto velocemente fino al loro collasso (Ricucci, 2016).

La cavitazione particellare differisce da questo sistema poiché per rompere la continuità del liquido possono essere utilizzate particelle energetiche qualsiasi, quindi non necessariamente protoni.

### **3.7.3. Cavitazione idrodinamica**

La cavitazione è prodotta da una variazione di pressione, ottenuta per mezzo di un sistema idraulico che permette di trasformare l'energia di pressione in energia cinetica. Il modo più semplice per raggiungere pressioni inferiori alla pressione di vapore è il passaggio del liquido attraverso un restringimento: l'energia cinetica associata al liquido aumenta a discapito della pressione locale. Successivamente, il getto liquido incontra una zona a più alta pressione e le bolle sono soggette ad una forte compressione che garantisce la loro implosione.

A causa della sua importanza teorica ed applicativa, la cavitazione idrodinamica sarà ampiamente trattata nel capitolo successivo.



## 4. CAVITAZIONE IDRODINAMICA

Il presente capitolo espone in maniera quanto più esaustiva i vari aspetti che contraddistinguono la cavitazione idrodinamica (HC). Verranno trattati in questa sede i seguenti argomenti: le basi teoriche che stanno all'origine del fenomeno; le tipologie di reattore cavitazionale, con una descrizione particolareggiata della configurazione geometrica dei reattori a piastra forata; le applicazioni della HC nei processi chimici ed in quelli fisici (tra i quali spicca la distruzione delle cellule microbiche, fulcro degli esperimenti oggetto di Tesi), in accordo con la distinzione proposta da *Carpenter et al. (2017)*.

La cavitazione è definita come un fenomeno di formazione, crescita e collasso di microbolle o cavità che si verificano in pochi milli/microsecondi in più posizioni all'interno del reattore e quindi rilascia una grande quantità di energia in un breve lasso di tempo (*Mahulkar e Pandit 2010*).

Il fenomeno inizia con la formazione di cavità di vapore quando il liquido entra nella regione di bassa pressione; successivamente queste cavità raggiungono la massima dimensione in condizioni di espansione isoterma. Nel ciclo di compressione successivo, si verifica un repentino collasso adiabatico, con conseguente formazione di uno stato supercritico di alta temperatura e pressione locale, noto come *hot spot*. Le trasformazioni chimiche e fisiche richieste dai processi si verificano a causa di queste intense condizioni di temperatura e pressione che vengono a crearsi negli *hot spots*.

Il concetto fondamentale è quello di sfruttare l'energia rilasciata dalle bolle in modo positivo per vari processi chimici e meccanici. Nella cavitazione idrodinamica (HC), la cavitazione è generata da una combinazione di costrizione del flusso e da opportune condizioni di pressione-velocità, che sono monitorati in modo tale da dare origine a degli *hot spots*. Ciò permette all'intero processo di funzionare in condizioni diverse di temperatura e pressione mentre la generazione di cavitazione avviene localmente.

La cavitazione idrodinamica è nota per produrre fenomeni cavitazionali transitori ai quali sono associate fluttuazioni di pressione, onde d'urto, stress meccanici e termici. Sulla base di ciò il potenziale di disattivazione delle cellule batteriche presenti in un liquido è simile a quello visto per la cavitazione ad ultrasuoni. Tuttavia, al contrario della cavitazione ultrasonora (o acustica, AC), quella idrodinamica trova un minor utilizzo nei vari settori scientifici.

Esiste una letteratura abbastanza contenuta sull'utilizzo della cavitazione idrodinamica come metodo di disinfezione dell'acqua; uno dei principali contributi è stato dato dal sistema CAV-OX di *Oppel (1994)*, brevettato negli Stati Uniti, il quale, combinando l'azione di ultrasuoni, perossido di idrogeno e cavitazione idrodinamica, si propone come un valido sistema di trattamento della acque.

Molti degli studi iniziali condotti sulla cavitazione idrodinamica sono stati portati avanti utilizzando il lievito, il quale rappresenta una delle risorse di biomassa microbiologica più valida e al tempo stesso economica. I primi studi hanno mostrato che il lievito è uno dei microrganismi più difficili da distruggere; per questo motivo l'applicazione di un metodo meccanico avrebbe potuto facilitare tale operazione. Gli studi di *Nesaparatman (1985)* hanno mostrato che la cavitazione idrodinamica risulta essere un valido sistema per la distruzione del lievito così come per molte specie batteriche. Per esempio, la cavitazione idrodinamica è stata utilizzata con successo da *Harrison (1996)* per la distruzione del batterio *Alcaligenes Eutrophus*. Numerose ricerche hanno fatto emergere la cavitazione idrodinamica come valido sistema alternativo agli ultrasuoni per il trattamento dell'acqua ed è stata messa in luce anche la particolare economicità del sistema in combinazione con disinfettanti chimici (*Pandit, 2007*).

Negli ultimi anni, i ricercatori hanno evidenziato il ruolo delle cavità generate idrodinamicamente per ottenere le trasformazioni chimiche e fisiche a causa dei numerosi vantaggi di questa tecnica e della sua ampia applicabilità. Sebbene l'intensità del collasso della cavità nella HC sia inferiore rispetto alla AC, si genera un numero maggiore di cavità, aumentando così il volume totale trattato e rendendola più efficiente rispetto alla AC. La tecnica della HC ha un maggiore potenziale nel caso di un processo su larga scala a causa della sua capacità di generare condizioni di cavitazione simili alla tecnica AC su un volume maggiore, risulta facilmente scalabile e ha minori costi d'impianto. Questo tecnica risulta oggi ben consolidata per la creazione di nanoemulsioni (*Ramisetty et al., 2014*), la sintesi di nanoparticelle (*Pinjari e Pandit, 2010*), la sintesi di sostanze chimiche (*Pandit e Joshi, 1993; Ambulgekar et al. 2004, 2005; Sainte Beuve e Morison, 2010; Prajapat e Gogate 2015*) e il degrado di vari inquinanti dell'acqua come coloranti (*Saharan et al., 2011, 2012; Gore et al., 2014*), fenoli (*Chakinala et al., 2008; Capocelli et al., 2014*), cianuri (*Jawale et al., 2014*), e altri inquinanti organici complessi. Con questa tecnica è stato anche investigata con successo la distruzione di microrganismi (*Wu et al., 2012; Li et al., 2014; Lee e Han, 2015*), di cui può danneggiare la parete cellulare, inibire la crescita, annullare gli effetti collaterali e allo stesso tempo ridurre l'utilizzo di sostanze chimiche necessarie per uccidere i microbi.

#### 4.1. Generazione della cavitazione

La HC viene semplicemente generata facendo passare il liquido attraverso delle costrizioni montate in un condotto. Il metodo più semplice ed utilizzato in campo sperimentale per indurre una violenta caduta di pressione è installare all'interno di un circuito idraulico chiuso una piastra forata o un tubo di Venturi (Capocelli et al., 2013), affinché si riduca notevolmente la sezione attraverso la quale il liquido può fluire. Come è noto la portata è esprimibile con la relazione (4.1):

$$Q = Av = cost \quad (4.1)$$

Con

$Q$  la portata fluente nel circuito

$A$  l'area della sezione

$v$  la velocità del liquido.

Dovendo la portata rimanere costante all'interno del sistema, tra una generica sezione 1 di area  $A_1$  e una successiva sezione 2 di area  $A_2$  (con  $A_1 > A_2$ ) la velocità  $v_2$  dovrà necessariamente aumentare rispetto alla velocità  $v_1$  (tale aumento sarà tanto maggiore quanto maggiore sarà la differenza di area tra le sezioni 1 e 2). L'orifizio è tale da generare la formazioni di una vena liquida contratta la quale è accompagnata dalla presenza di numerosi vortici turbolenti.



Figura 4.1 – Creazioni di vortici in corrispondenza di un restringimento (Garofano, 2017)

In corrispondenza del restringimento, l'energia cinetica del liquido aumenta a spese di pressione e, con una regolazione efficace, la pressione scende sotto la tensione di vapore del liquido, causando fenomeni di sonoluminescenza del liquido e generando numerose cavità di vapore. Successivamente, quando il getto liquido si espande nella sezione a valle del dispositivo di cavitazione, la velocità diminuisce e la pressione aumenta, provocando il collasso delle cavità. Un tipico profilo di pressione di un dispositivo basato su un tubo Venturi (del tutto analogo al caso con orifizio o piastra multiforata) è mostrato in Figura 4.2.

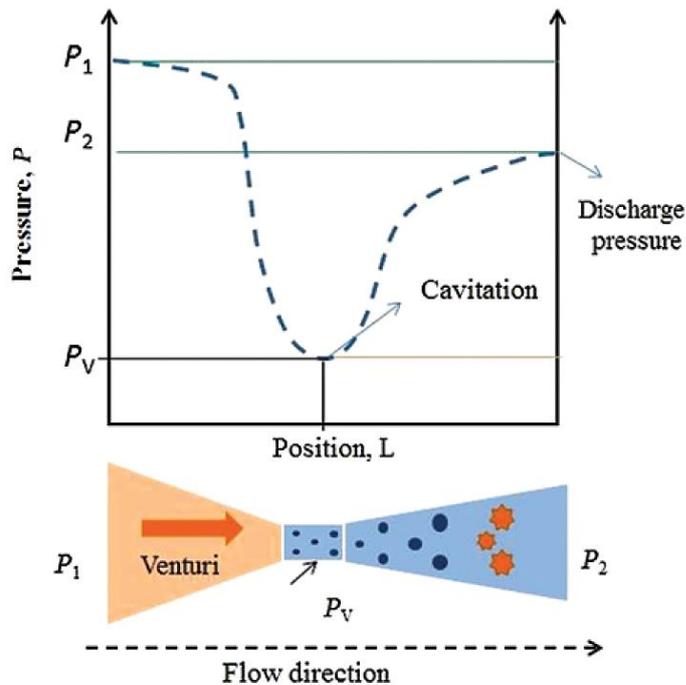


Figura 4.2 – Variazione di pressione e condizioni del flusso in un dispositivo cavitante (Carpenter et al., 2017)

Nella sezione a valle, si verifica la separazione dello strato limite e una certa quantità di energia viene rilasciata sotto forma di caduta di pressione permanente. L'entità della caduta di pressione influenza notevolmente l'intensità della cavitazione e la turbolenza nella sezione a valle (Moholkar et Pandit, 1997). Pertanto, è necessario controllare il funzionamento e i parametri geometrici dei dispositivi per ottenere l'intensità della cavitazione richiesta. Quando il getto liquido formatosi per il restringimento ricomincia ad allargarsi a valle dello stesso si crea un intenso strato di taglio lungo il contorno tra il getto e la regione di separazione circostante. Gli alti gradienti di velocità creati in questo strato di taglio creano le vorticità rappresentate nella Figura 4.1. Se la caduta di pressione è tale da generare le condizioni di nascita della cavitazione, i nuclei cavitazionali possono essere intrappolati in questi vortici. Se la pressione rimane prossima a quella di vapore abbastanza a lungo da far raggiungere il diametro critico al nucleo, quest'ultimo cresce ancor più rapidamente fino a vaporizzare. Infine si ha una fase di recupero della pressione a causa della successiva dissipazione delle vorticità; altri motivi di recupero della pressione sono sicuramente la diffusione del getto all'intera sezione e il fatto che i nuclei cavitazionali sono soggetti alla pressione locale a valle del restringimento.

Come già esposto nel capitolo 3, il numero di adimensionale ( $\sigma_v$ ) rappresenta le caratteristiche idrauliche di un dispositivo cavitante, e questo caratterizza la condizione di cavitazione all'interno del dispositivo. È rappresentato dall'Eq. (3.1) (Saharan et al. 2011):

$$\sigma_v = \frac{p_2 - p_v}{\frac{1}{2}\rho v_0^2} \quad (3.1)$$

Dove:

$p_2$  è la pressione a valle del restringimento,

$p_v$  è la pressione di vapore del liquido,

$v_0$  è la velocità nella strozzatura

$\rho$  è la densità del liquido.

#### 4.1.1. Perdite di carico

Quando il liquido incontra la piastra forata, questo è forzato ad accelerare attraverso i fori, causando una caduta di pressione all'interno dei fori e nel getto liquido uscente. Se la pressione locale statica scende sotto la pressione di vapore, le bolle di vapore si formano presso i siti di nucleazione. Queste bolle sono poi trasportate a valle, verso un punto dove la pressione inizia a salire, causandone il loro collasso.

Come indicato da *Ricucci (2017)*, il teorema di *Bernoulli* (Eq. (4.2)), utile a comprendere come ad una variazione di velocità sia associata una variazione di pressione, esprime il principio di conservazione dell'energia e vale qualora siano verificate le seguenti ipotesi:

- fluido pesante incomprimibile (liquido);
- sistema chiuso (assenza di scambi di massa con l'esterno);
- moto permanente (le grandezze in ogni punto sono costanti nel tempo);
- fluido ideale (assenza di perdite dovute agli attriti interni al fluido).

$$H = z + \frac{p}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} = costante \quad (4.2)$$

Con:

$z$  = altezza geodetica = energia potenziale;

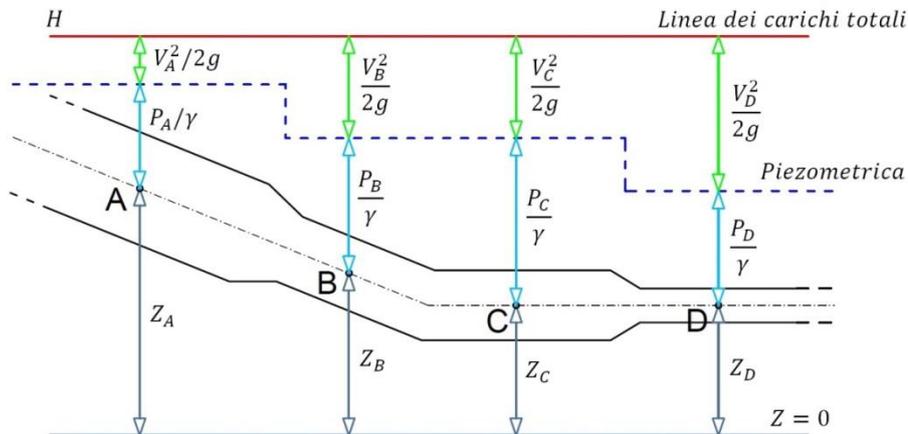
$\frac{p}{\gamma}$  = altezza piezometrica = energia di pressione;

$\frac{v^2}{2g}$  = altezza cinetica = energia cinetica;

$H$  = carico idraulico totale = energia totale.

Tutti i termini elencati sono espressi come energie per unità di peso (m). Poiché il moto è permanente (Eq. (4.1)), in corrispondenza di tratti orizzontali, al diminuire della sezione (da C a D) aumenta il termine cinetico e diminuisce il termine di pressione; se questa diminuzione è

sufficientemente alta si possono raggiungere pressioni inferiori alla pressione di vapore del liquido, con conseguente cavitazione del liquido (Figura 4.3).



**Figura 4.3 – Schema dei contributi energetici al variare della sezione, della velocità e della quota geodetica, nel caso di fluidi ideali.**

Nel caso di fluidi reali occorre considerare le perdite di carico nel movimento; queste sono dovute agli attriti fra le particelle del fluido ed alle turbolenze che si creano nei punti particolari (cambiamenti di sezione, curve, intersezioni fra diverse condotte, etc.). Le perdite di carico si distinguono in:

- perdite di carico distribuite: sono dovute agli sforzi tangenziali fra le particelle del fluido durante il moto rettilineo, per effetto della viscosità;
- perdite di carico localizzate: sono dovute alle turbolenze che si creano nei punti particolari (cambiamenti di sezione, curve, etc.).

Il teorema di Bernoulli per fluidi reali, tra la sezione A e B della (Figura 4.4) diventa:

$$H_A = H_B + \Delta \quad (4.3)$$

Dove  $\Delta$  è la perdita di carico fra A e B (B è un punto più a valle di A rispetto al senso di moto).

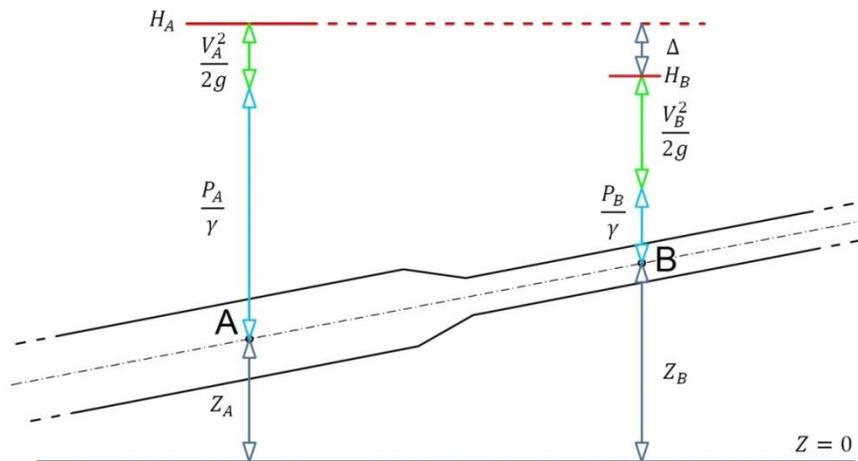


Figura 4.4 – Teorema di Bernoulli per fluidi reali, con  $\Delta$  si indica la perdita di carico tra la sezione A e B

Nel caso di una piastra forata, l'acqua è forzata a passare attraverso i fori di una sezione più piccola, il fluido subisce un incremento drastico di velocità a cui corrisponde una altrettanta diminuzione di pressione per la legge di Bernoulli; a questa perdita occorre aggiungere quella localizzata di brusco restringimento (ingresso nel foro) e quella distribuita (attraversamento del foro) nel caso di *thick plate* (si veda Paragrafo 4.4.1).

## 4.2. Effetti indotti dalla cavitazione

La variazione improvvisa di pressione e velocità causa oscillazioni dinamiche delle cavità e, quando le cavità collassano, si verificano effetti fisici e chimici nelle immediate vicinanze che provocano le trasformazioni desiderate. Inoltre, il tipo di collasso della cavità influenza la trasformazione desiderata. *Mahulkar e Pandit (2010)* hanno evidenziato due condizioni di collasso della cavità: simmetrica e asimmetrica. La cavità potrebbe rimanere sferica fino al collasso o essere non sferica a causa della presenza di un'interfaccia di parete o di un'altra superficie di particelle/bolle vicino alla cavità oscillante. La formazione di radicali liberi reattivi e la pirolisi termica di molecole organiche sono favorite dal collasso sferico, cioè simmetrico, e sono essenziali per le trasformazioni chimiche. Al contrario, il collasso non sferico, cioè asimmetrico, produce getti liquidi ad alta velocità (Figura 4.5) e intensa turbolenza locale, che sono utili per le trasformazioni fisiche. Sebbene sia il collasso simmetrico che quello asimmetrico ricevano la stessa energia dalle fluttuazioni di pressione, l'energia viene erogata in diverse forme, cioè sotto forma di intensa turbolenza o nel forma di condizioni estreme di pressione e temperatura.

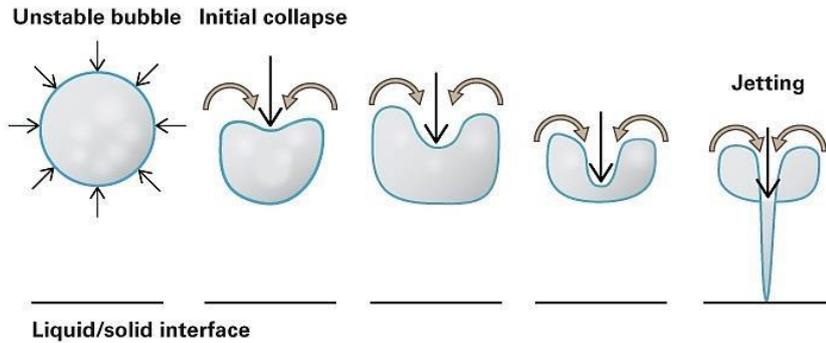


Figura 4.5 – Schema della generazione del getto liquido ad alta velocità in un collasso asimmetrico (Fonte: Iowa State University)

Il collasso simmetrico è vantaggioso per le applicazioni che comportano cambiamenti chimici, soprattutto per quanto riguarda le reazioni di ossidazione. Le trasformazioni chimiche sono principalmente indotte dalla formazione di radicali liberi reattivi e secondariamente attraverso le anomalie termiche generate dalle molecole più grandi che si rompono nelle molecole più piccole, sotto le condizioni dell'hot spot locale. Uno dei più semplici esempi è la formazione di radicali ossidrilici altamente reattivi ( $\cdot\text{OH}$ ) a causa della dissociazione delle molecole d'acqua in condizioni di cavitazione. Questi radicali idrossilici, che hanno il più alto potenziale di ossidazione, possono ossidare molecole organiche di grandi dimensioni. I cambiamenti chimici avvengono in due modi (Saharan *et al.*, 2013): in primo luogo, le molecole intrappolate all'interno della cavità subiscono decomposizione termica durante il collasso della bolla, e in secondo luogo, i radicali liberi generati attaccano le molecole ossidandole. Secondo la teoria degli hot spot (Adewuyi, 2001), ciascuna cavità agisce come un microreattore dove vengono create le condizioni di alta pressione e temperatura e vengono rilasciate elevate quantità di energia in un periodo di tempo molto breve. La teoria descrive le seguenti tre zone di reazione nel sistema di cavitazione, come mostrato nella Figura 4.6 (Chen, 2012):

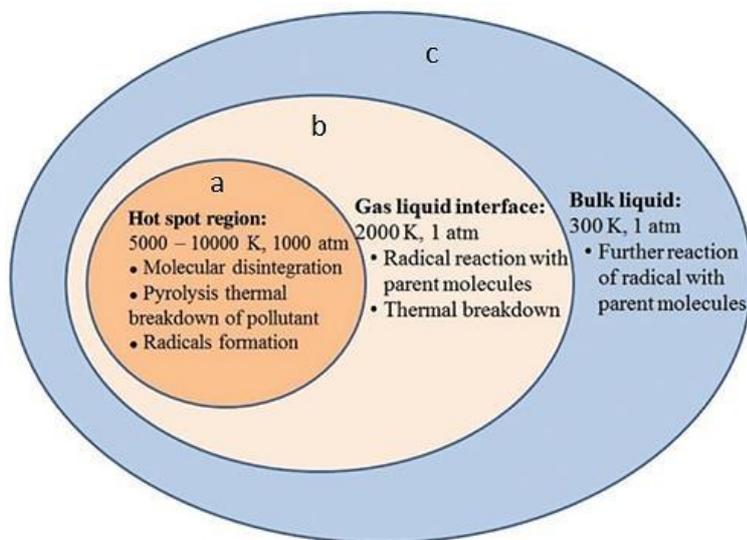


Figura 4.6 – Teoria degli hot spot: zone di reazione in un processo cavitazionale (Chen, 2012)

- Zona (a): nel nucleo delle cavità la temperatura e la pressione raggiungono il picco più alto (10.000 K e 1000 atm, rispettivamente) durante il collasso. All'interno di questa regione, le molecole intrappolate si dissociano in stati intermedi più piccoli e si producono, dopo la dissociazione, anche radicali liberi reattivi. Questi radicali attaccano le molecole, iniziando ulteriori reazioni. Per esempio, le molecole d'acqua si dissociano in radicali  $\cdot\text{OH}$  e  $\cdot\text{H}$ .
- Zona (b): nella regione dell'interfaccia o molto vicino all'interfaccia della cavità, vengono creati microjet ad alto taglio e turbolenza, a causa dell'oscillazione della cavità e del suo successivo collasso. La temperatura può arrivare fino a 2000 K in prossimità dell'interfaccia della cavità. Questa alta turbolenza migliora il trasporto di massa dei radicali generati e migliorandone la reattività, che è quindi più alta all'interfaccia cavità-liquido rispetto alla regione di liquido indisturbato. Inoltre, le molecole organiche che sono presenti vicino all'interfaccia cavità-liquido vengono decomposte termicamente a causa della temperatura elevata.
- Zona (c): nella regione del liquido indisturbato, la temperatura non è così elevata e rimane vicina alla temperatura atmosferica. In questa regione, i radicali generati si diffondono e reagiscono con le molecole.

La quantificazione degli effetti chimici che si verificano all'interno del dispositivo cavitante in termini di generazione di radicali  $\cdot\text{OH}$  e il rendimento delle reazioni sono tra gli aspetti più importanti da valutare; vari studi di dosimetria che hanno impiegato sostanze come ioduro e acido salicilico sono stati utilizzati per la determinazione della resa e dell'efficienza della HC (*Senthilkumar et al., 2000; Arrojo et al., 2007; Chakinala et al., 2008*). La quantificazione è condotta valutando le rese della reazione in base all'ossidazione della molecola tramite i radicali  $\cdot\text{OH}$  e dai prodotti dell'ossidazione ottenuti, che equivale a quantificare quanti radicali  $\cdot\text{OH}$  sono stati utilizzati. *Senthilkumar et al. (2000)* hanno misurato l'efficienza dei dispositivi di HC basati su orifizio e ne hanno ottimizzato la geometria sulla base della resa delle reazioni dello iodio.

Oltre a ciò, *Arrojo et al. (2007)* e *Amin et al. (2010)* hanno valutato l'efficienza di diverse piastre forate utilizzando diverse dosi di acido salicilico e osservato come sia più affidabile e preciso il monitoraggio dell'efficienza della HC tramite i prodotti di ossidazione, poiché questi possono essere facilmente rilevati mediante cromatografia liquida ad alta pressione, che risulta più sensibile rispetto al metodo spettrofotometrico utilizzato in dosimetria di ioduro. Tutti questi studi di dosimetria concordano nell'affermare che la HC è in grado di attivare molte reazioni chimiche attraverso la formazione di radicali liberi.

Al contrario, il collasso asimmetrico delle cavità è vantaggioso per i processi fisici. Il collasso asimmetrico fornisce in modo efficace elevati quantitativi di energia, creando getti liquidi ad alta velocità e vortici turbolenti durante l'oscillazione delle cavità ed il successivo collasso. Questi effetti sono vantaggiosi per le applicazioni che coinvolgono vari cambiamenti fisici come l'emulsione, la sintesi di nanoparticelle e la disinfezione microbica mediante rottura della

parete cellulare degli elementi patogeni. Inoltre, il collasso asimmetrico facilita il trasporto delle specie in sistemi omogenei ed eterogenei. Nei sistemi liquido-liquido, esso crea una miscelazione di microlivello, che a sua volta aumenta la velocità di trasferimento di massa riducendo la tensione interfacciale tra fasi immiscibili, migliorandone così la miscelazione. Nei sistemi solido-liquido, getti di liquido ad alta velocità rompono la pellicola liquida che circonda il solido, che a sua volta riduce la resistenza al trasferimento di massa. Il collasso asimmetrico della cavità sulla superficie di un catalizzatore solido può romperne e pulirne la sua superficie migliorandone l'attività catalitica. La HC è quindi in grado di attivare numerosi processi fisici e chimici, che possono essere controllati variando i parametri geometrici ed il funzionamento dei vari dispositivi; questi parametri devono comunque essere ottimizzati per ogni specifica applicazione.

### **4.3. Reattori per la cavitazione idrodinamica**

#### **4.3.1. Omogeneizzatori**

Gli omogeneizzatori sono piccoli dispositivi da laboratorio utilizzati per il trattamento di volumi ridotti di acqua. Dispositivi di miscelazione ad alta velocità o ad alta pressione sono in grado di disinfettare l'acqua grazie alle azioni meccaniche e cavitazionali indotte. Esistono due tipologie di omogeneizzatori: gli High Speed Homogenizer (HSH) e gli High Pressure Homogenizer, di cui si fornisce una breve descrizione (*Garofano, 2016*).

##### **4.3.1.1. High Speed Homogenizer (HSH)**

L'High Speed Homogenizer (HSH) (Figura 4.7) è un dispositivo di miscelazione utilizzato soprattutto in laboratorio, che permette la rapida omogeneizzazione di piccoli volumi di sostanze solide all'interno di una soluzione acquosa. La componente principale è il rotore, il quale comunica al liquido trattato l'azione centrifuga che permette la miscelazione dei solidi sospesi con il fluido; l'omogeneizzazione della soluzione avviene grazie ad azioni di taglio, urti, collisioni e cavitazione. Generalmente il sistema è dotato di un motore in grado di imprimere una velocità variabile tra gli 8.000 e i 24.000 giri al minuto e dotato di un sistema di autoregolazione che permette di mantenere sempre costante la velocità di rotazione, anche in seguito a cambiamenti di viscosità del fluido.

Questo sistema può essere utilizzato per il trattamento di piccoli volumi liquidi da disinfettare. Incrementando i tempi di trattamento la concentrazione di microrganismi decresce a causa di una maggiore probabilità di interazione tra i batteri e le cavità formate dall'azione del rotore. Nel tempo il tasso di disinfezione decresce poiché diminuisce la concentrazione di batteri, mentre rimane costante il numero di cavità prodotte.



Figura 4.7 – High Speed Homogenizer (HSH) (Garofano, 2016)

#### 4.3.1.2. High Pressure Homogenizer (HPH)

Così come il precedente, anche questo dispositivo (Figura 4.8) viene utilizzato nei laboratori per operazioni di miscelazione e creazione di soluzioni. L'HPH trova grande impiego nell'industria lattiero-casearia, nell'industria alimentare, nell'industria farmaceutica e cosmetica. All'interno del dispositivo il materiale che deve essere miscelato viene forzato ad altissima pressione attraverso una valvola di omogeneizzazione. La turbolenza, la cavitazione e le forze di taglio rompono le particelle solide conferendo alle stesse una dimensione inferiore ad un micron e garantendone la miscelazione con il liquido.

Anche per questo sistema di omogeneizzazione è stata testata l'applicabilità nel campo della disinfezione dell'acqua, andando a sfruttare le azioni indotte per uccidere i batteri presenti; esperimenti eseguiti con pressioni superiori ai 1000 psi hanno evidenziato comportamenti e trend simili a quanto emerso per l'HSH.



Figura 4.8 – High Pressure Homogenizer (HPH) (Garofano, 2016)

Sia per un sistema che per l'altro è stata individuata una configurazione ottimale per l'impiego nei processi di disinfezione. Incrementando la velocità o la pressione fino ad un certo valore anche l'intensità della cavitazione cresce, ma incrementare la velocità comporta anche una diminuzione del tempo di residenza, cioè del tempo per cui i microrganismi "risiedono" nella zona in cui avviene la cavitazione: la principale conseguenza è che i microrganismi non vengono uccisi ma semplicemente paralizzati, abbassando quindi il tasso di disinfezione. In aggiunta a ciò, quando la velocità o la pressione salgono oltre un certo valore, si sviluppa un fenomeno supercavitazione e non tutte le cavità generate collassano; venendo meno l'esplosione delle bolle, il tasso di disinfezione decresce.

Un'ulteriore importante osservazione da fare è che la flessibilità del controllo dell'intensità di cavitazione in questi dispositivi è molto inferiore a quella delle piastre forate e dei dispositivi basati sui tubi di Venturi (Gogate 2007).

#### 4.3.2. Piastre forate e tubi di Venturi

La HC è solitamente generata ponendo un'adeguata costrizione in un flusso di liquido. La strozzatura può essere creata usando vari dispositivi come tubi di Venturi, piastre forate, rotori ad alta velocità ed omogeneizzatori. La pressione di esercizio e le condizioni di flusso possono variare nei vari dispositivi, ma il fenomeno di generazione delle cavità rimane sempre lo stesso. La cavitazione in un orifizio è di natura transitoria, mentre la cavitazione in un Venturi è per lo più stabile, a causa della sua configurazione geometrica. Nel caso di piastre forate, si possono avere fori singoli o multipli, con area di flusso variabile (Figura 4.9). L'uso di una piastra con fori multipli offre un controllo migliore sull'intensità della cavitazione e sul numero di eventi cavitazionali (Gogate e Kabadi 2009) che si verificano all'interno del dispositivo cavitante.

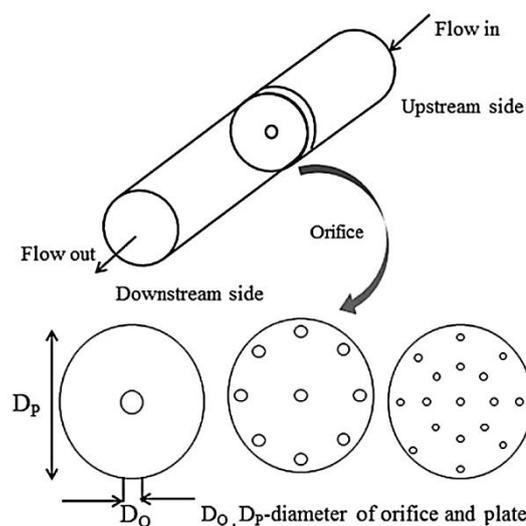


Figura 4.9 – Dispositivo ad orifizio con foro singolo o con piastra multiforata (Carpenter et al., 2017)

Allo stesso modo, diverse forme di Venturi (Figura 4.10) sono state utilizzate per ottenere diverse condizioni cavitazionali all'interno del reattore. La variazione dei parametri geometrici si traduce in diversi rendimenti cavitazionali, che è necessario considerare durante la progettazione. Ad oggi, la maggior parte degli studi si sono concentrati su queste due tipologie di reattori, a causa di alcuni importanti vantaggi: un prodotto a più elevato rendimento, un miglior rapporto costo-efficacia rispetto agli omogeneizzatori e una facile scalabilità.

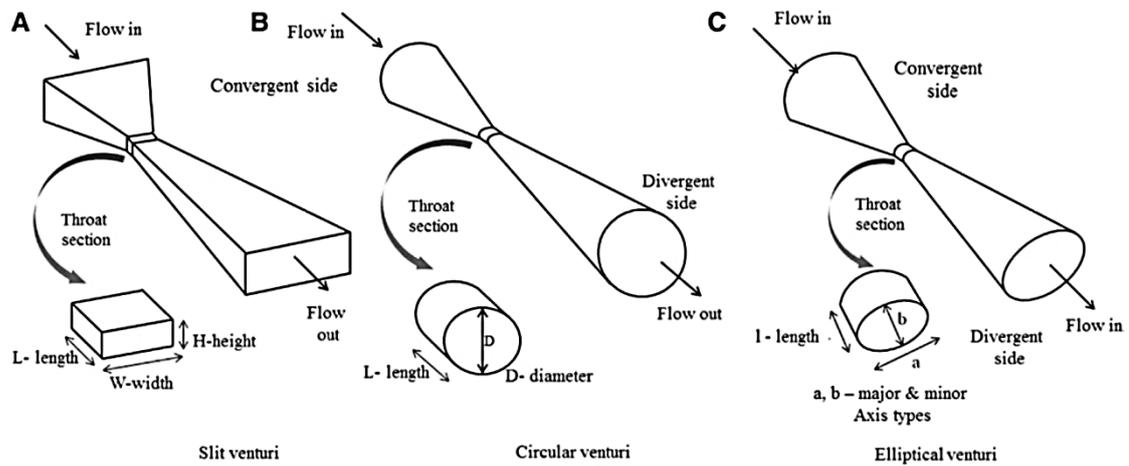


Figura 4.10 – Differenti configurazioni di dispositivo Venturi: (A) a fessura, (B) circolare e (C) ellittico (Carpenter et al., 2017)

Per generare la cavitazione, il liquido viene spinto attraverso questi dispositivi utilizzando una pompa. La portata/capacità della pompa è determinata dal numero di cavitazione e dalla portata volumetrica richiesti per una particolare applicazione. Un tipico reattore utilizzato per generare la HC è mostrato in Figura 4.11. Molti studi hanno riportato l'uso di un setup della HC simile per diverse applicazioni, come il trattamento di acque reflue (Sivakumar e Pandit, 2002; Sahariano et al., 2011, 2013; Bagal e Gogate, 2014; Gogate e Patil, 2015), i processi di emulsificazione (Ramisetty et al., 2014), la sintesi di nanoparticelle (Patil e Pandit, 2007; Pinjari e Pandit, 2010), la disinfezione dell'acqua (Jyoti e Pandit, 2001; Badve et al., 2015) e la sintesi del biodiesel (Kelkar et al., 2008; Ghayal et al., 2013; Gole et al., 2013; Maddikeri et al., 2014). Il setup comprende un serbatoio di accumulo, una pompa, un dispositivo di cavitazione, dei manometri, una valvola di controllo del flusso e un misuratore di portata. Il liquido dalla pompa viene fatto circolare attraverso la linea principale, che ospita il dispositivo cavitante. Inoltre l'impianto può essere dotato di una linea di bypass per controllare la portata.

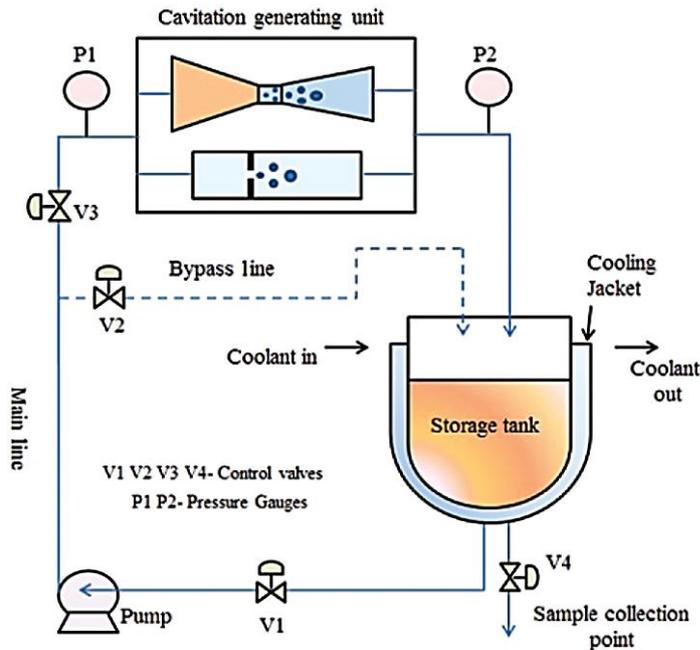


Figura 4.11 – Rappresentazione schematica di un impianto con reattore di cavitazione idrodinamica (Carpenter et al, 2017)

#### 4.4. Criteri geometrici per dispositivi ad orifizio o a piastre multiforate

Il design geometrico influisce in modo significativo sull'efficienza di un dispositivo cavitante. Per ottimizzarne il rendimento, sono molto importanti parametri come il numero di cavità generate, il tempo di residenza delle cavità nella regione a bassa pressione, la velocità di recupero della pressione nella sezione a valle, la traiettoria delle cavità e l'intensità della cavitazione (Bashir et al., 2011). È provato che tutte queste proprietà possono essere regolate variando la geometria del dispositivo cavitante. Gli effetti di diversi parametri geometrici sono discussi in dettaglio nelle seguenti sezioni. Poiché l'impianto utilizzato durante il lavoro di Tesi è dotato di un reattore cavitazionale a piastra forata, la descrizione dei criteri geometrici sarà limitata a questa tipologia di dispositivo.

In una piastra forata, l'intensità del collasso delle cavità dipende fortemente dall'area occupata dal flusso, dalle dimensioni, dalla forma e dal numero dei fori. La cavitazione che si origina è per lo più di natura transitoria, caratteristica principalmente richiesta nelle trasformazioni chimiche. In un orifizio, a causa dell'espansione improvvisa, la pressione viene recuperata immediatamente, causando il rapido collasso delle cavità, inducendo così un intenso fenomeno energetico. Però, in un orifizio, le cavità si sviluppano solo sul bordo del foro, e quindi se ne genera un numero limitato. Questo svantaggio può essere superato usando

piastre con più fori. Molti studi hanno suggerito per l'uso di piastre forate in applicazioni come il trattamento delle acque reflue, la disinfezione dell'acqua, l'emulsificazione, la sintesi di nanoparticelle, ecc. *Sivakumar e Pandit (2002)* hanno usato piastre forate per la degradazione di coloranti tessili. *Senthilkumar et al. (2000)* hanno usato fori multipli per studiare la decomposizione del KI, mentre *Ghayal et al. (2013)* hanno usato lo stesso metodo per produrre biodiesel dall'olio di frittura esausto.

In tutte queste applicazioni la configurazione geometrica è risultata essere il principale fattore per l'intensificazione dei processi di cavitazione. Una piastra a fori multipli è più efficace in termini di aumento della resa cavitazionale rispetto ad una a foro singolo, a parità di area di flusso. Nel caso di una piastra a più fori, un contorno bagnato maggiore per una determinata area della sezione trasversale produce un'area di strato di taglio più estesa, che a sua volta genera un numero più elevato di cavità. Il maggior numero di cavità generate produce un aumento della pressione di collasso nell'istante in cui il fenomeno si manifesta. Anche le dimensioni e la forma dei fori giocano un ruolo importante durante la progettazione ed è necessario considerare due importanti parametri geometrici:  $\alpha$  (rapporto tra il perimetro del foro e il area di flusso totale) e  $\beta$  (rapporto tra area forata o area del restringimento e sezione trasversale del tubo) per selezionare la migliore configurazione per la trasformazione desiderata.

#### 4.4.1. Thin e thick plate

Nel momento in cui il flusso liquido incontra la piastra forata, si è di fronte ad un passaggio da una sezione  $A_1$  ad una  $A_2$ , con  $A_1 \gg A_2$ , denominato in idraulica *brusco restringimento di sezione*, che comporta all'interno del foro la formazione di una vena liquida contratta. Quello che occorre comprendere, al fine di determinare le perdite di pressione, è se il liquido si riattacca oppure no alla parete all'interno del foro della piastra. Si è introdotto nel paragrafo 4.1.1 il termine *thick plate*, distinto dal *thin plate* a seconda che il riattacco della vena liquida avvenga nel foro oppure no. In letteratura sono presenti alcuni studi che hanno permesso di comprendere, in funzione di determinati parametri geometrici, a quale tipologia appartenga il sistema in esame.

Qualora il fenomeno di riattacco della vena liquida non si presenti nel foro si è di fronte ad un sistema detto *thin plate* (Figura 4.12); nel caso contrario il sistema è definito *thick plate* (Figura 4.13). In funzione del rapporto tra lo spessore della piastra e il diametro del foro realizzato è possibile comprendere in quale caso ci si trovi:

$$\frac{t}{D_{\text{foro}}} \leq 2 \rightarrow \text{caso Thin Plate}$$
$$\frac{t}{D_{\text{foro}}} > 2 \rightarrow \text{caso Thick Plate}$$

con:

$t$ , spessore della piastra (m)

$D_{foro}$ , diametro del foro realizzato nella piastra (m)

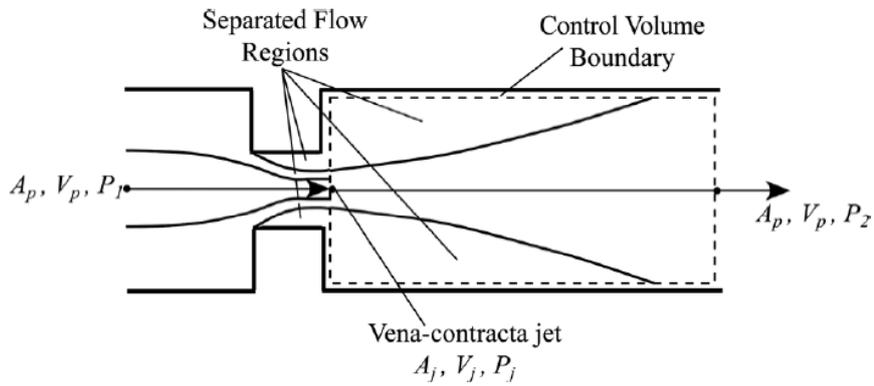


Figura 4.12 – Sistema “thin plate” (Garofano, 2016)

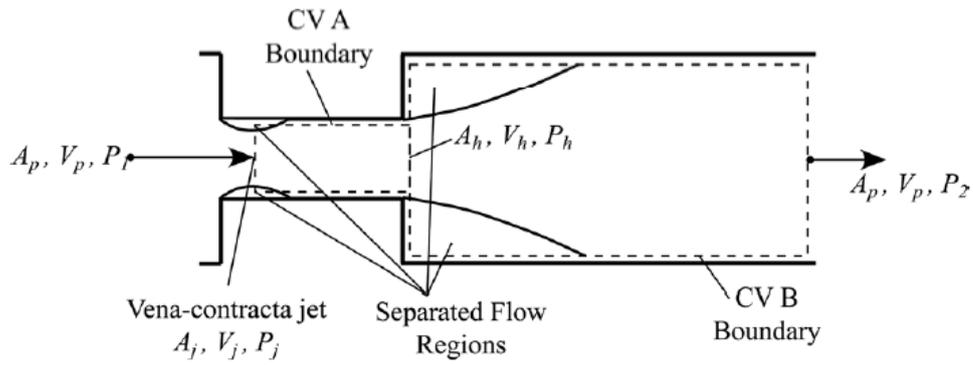


Figura 4.13 – Sistema “thick plate” (Garofano, 2016)

#### 4.4.2. $\alpha$ , il rapporto tra il perimetro dei fori e l'area totale del flusso

Questo parametro dipende dalla dimensione, dalla forma e dal numero di fori in una piastra. *Sivakumar e Pandit (2002)* e *Ghayal et al. (2013)* indicano che  $\alpha$  è direttamente proporzionale al numero di fori e inversamente proporzionale alle dimensioni dei fori. Questi studi hanno posto l'accento sulla massimizzazione del valore di  $\alpha$  per ottenere una maggiore resa cavitazionale. *Sivakumar e Pandit (2002)* hanno osservato come il valore  $\alpha$  aumentato da 0,8 a 4 raddoppi il tasso di degradazione di colorante di rodamina B da  $2,67 \times 10^{-5}$  a  $5,33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . È stato suggerito che per una data area della sezione trasversale, un valore più alto di  $\alpha$ , vale a dire una piastra con un gran numero di fori più piccoli, è più adatto rispetto ad una piastra numero minore di fori più grandi. Per uno stesso valore di  $\alpha$ , la piastra che ha un grande numero di fori fornisce una migliore resa cavitazionale. Un'osservazione simile è stata fatta da *Ghayal et al. (2013)*. Con un valore di  $\alpha$  aumentato da 0,4 a 2, la conversione dei trigliceridi in esteri metilici è aumentato dal 77% al 94%. Quindi, per una data area della sezione trasversale dei fori, un valore più alto di  $\alpha$ , cioè un più alto perimetro bagnato, è preferibile per generare più cavità e ottenere una resa cavitazionale più alta. Pertanto, le piastre aventi un maggior numero di fori o forme diverse da quella circolare, come rettangolare ed ellittico, per una data sezione trasversale offrono una maggiore resa. Studi simili di *Wang et al. (2015)* e *Balasundaram e Harrison (2011)* hanno anche sottolineato che una maggiore resa cavitazionale può essere raggiunta a valore di  $\alpha$  elevati, in particolare con  $\alpha > 2$ .

#### 4.4.3. $\beta$ , il rapporto tra l'area dei fori e l'area della sezione trasversale del tubo

Il parametro  $\beta$  è altresì importante nella scelta della migliore configurazione del dispositivo. Il suo valore dipende dal numero di cavitazione richiesto durante il funzionamento, che viene deciso in base all'applicazione per cui la HC viene utilizzata e alla portata desiderata. *Senthilkumar et al. (2000)* hanno indicato che un valore inferiore di  $\beta$  (0,091) era tre volte più efficiente rispetto ad un valore superiore (0,138) per l'ossidazione di KI (ioduro di potassio). A una pressione di ingresso di 50 psi, il tasso di liberazione di iodio è aumentato da  $5,5 \times 10^{-6}$  a  $1,65 \times 10^{-5} \text{ g/l}$  quando  $\beta$  è diminuito da 0,138 a 0,091. Anche *Sivakumar e Pandit (2002)* hanno osservato risultati simili, dove al diminuire di  $\beta$  da 0,139 a 0,023 è stato ottenuto un aumento del tasso di degradazione di colorante di rodamina B da  $2,67 \times 10^{-5}$  a  $5,33 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Al diminuire dell'area dei fori si ottiene un aumento della velocità del fluido, che porta ad una diminuzione del numero di cavitazione. Ad un numero di cavitazione inferiore, si formano più cavità e queste collassano più violentemente; ne consegue che una maggiore velocità di degradazione si ottiene con un valore  $\beta$  più piccolo. Contrariamente agli studi precedentemente citati, *Ghayal et al. (2013)* hanno osservato che aumentando il valore di  $\beta$  da 0,25 a 0,45, la conversione dei trigliceridi in estere metilico è aumentato dal 77% al 95%. Inoltre, per due piastre aventi lo stesso  $\beta$  (0,25), il tasso di conversione era più alto in quella

con un valore più alto di  $\alpha$ . Quindi, la piastra con un gran numero di piccoli fori agevola la conversione dei trigliceridi, che risulta essere una trasformazione di natura fisico-chimica. L'area del restringimento è decisa in base alla velocità che si vuole ottenere, essenziale per il numero richiesto di cavitazione e per la portata desiderata, e il valore  $\beta$  è impostato di conseguenza. Poiché il numero ottimale di cavitazione operativa è diverso per diverse applicazioni, la dimensione e la forma dei fori vengono progettati in maniera specifica.

#### **4.4.4. Effetto di altri parametri operativi della HC**

L'intensità della cavitazione che si origina all'interno del dispositivo dipende anche dalla pressione operativa in ingresso e dal numero di cavitazione, che sono interdipendenti tra loro. Con numero di cavitazione inferiore o con una pressione di ingresso superiore, si formano più cavità. Tuttavia, una diminuzione nel numero di cavitazione oltre un valore ottimale porta alla condizione di cavitazione soffocata (*Saharan et al., 2014*), che non ha utilità pratica. I parametri ottimali di pressione e di numero di cavitazione dipendono dall'applicazione cui si sta lavorando. La cavitazione può verificarsi a  $\sigma_v > 1.0$  a causa della presenza di gas disciolti e di particelle sospese nella soluzione (*Patil e Pandit, 2007*). Tuttavia, un rendimento maggiore per la maggior parte delle applicazioni è evidente ad un numero di cavitazione inferiore ( $\sigma_v < 1.0$ ), tranne che per processi di riduzione della dimensione delle particelle e per soluzioni liquide altamente viscosi. Pertanto, i dispositivi che cavitano dovrebbero sempre essere operativi al di sopra delle condizioni di cavitazione soffocata. Per il trattamento di acque reflue, il numero di cavitazione ottimale è stato trovato nell'intervallo 0,15-0,55 (*Saharan et al., 2011, 2012; Capocelli et al., 2014; Li et al., 2015*), a seconda del tipo di inquinanti presenti nell'acqua. Per il processo di emulsificazione, il numero di cavitazione ottimale è compreso tra 0,16 e 0,23 (*Ramisetty et al., 2014*) e dipende principalmente dalla geometria del dispositivo cavitante. Nel caso di sintesi di nanoparticelle, il numero di cavitazione ottimale è stato trovato nell'intervallo 0,1-2,61 (*Patil e Pandit, 2007; Pinjari e Pandit, 2010; Sonawane et al., 2010*), a seconda della dimensione iniziale dei materiali trattati. È evidente, da questi studi, che un numero di cavitazione inferiore, cioè compreso tra 0,1 e 0,3, fornisce una migliore resa cavitazionale per la maggior parte delle applicazioni. Mentre nel caso di una sospensione con particelle solide di dimensioni dell'ordine dei micron e per fluidi altamente viscosi, un numero di cavitazione più alto può dare una resa migliore. Pertanto, è necessario considerare la natura della soluzione da trattare (proprietà fisico-chimiche) e selezionare la pressione operativa in entrata ed il numero di cavitazione adeguati per lo specifico processo.

#### 4.4.5. Ottimizzazione della configurazione geometrica e dei parametri operativi

Dalla discussione precedente sugli effetti delle varie condizioni geometriche ed operative sull'attività cavitazionale all'interno del dispositivo, si può concludere che l'ottimizzazione di questi parametri è essenziale per avere una corretta progettazione di un reattore allo scopo di indurre la trasformazione desiderata. Per ottimizzare i parametri, si espongono le seguenti raccomandazioni:

- nel caso di una piastra forata, per una data sezione trasversale, è preferibile un alto valore di  $\alpha$  per ottenere una cavitazione intensa, mentre  $\beta$  dipende dal numero di cavitazione numero e dalla portata volumetrica da gestire ed il suo valore dovrebbe essere scelto una volta stabilita la velocità voluta in corrispondenza dei fori. Valori molto bassi di  $\beta$  causano un'alta caduta di pressione e una considerevole energia per il pompaggio e, quindi, dovrebbe essere evitato se non specificatamente richiesto. Pertanto, sono preferibili piastre con un gran numero di piccoli fori, vale a dire con un valore di  $\alpha$  elevato;
- il numero di cavitazione richiesto e la pressione di ingresso dipendono dalle proprietà fisico-chimiche del fluido e dalla geometria del dispositivo cavitante. Un numero di cavitazione il più basso possibile, cioè  $\sigma_v < 1$ , è preferibile per la maggior parte dei processi, al fine di ottenere le trasformazioni desiderate. I dispositivi di cavitazione dovrebbero sempre essere azionati al di sopra della condizione di cavitazione soffocata, che altrimenti ne ridurrebbe la resa.

#### 4.5. Applicazione della HC nei processi chimici

Nell'ultimo decennio la HC è stata efficacemente utilizzata per la sintesi di molte sostanze chimiche come il biodiesel, varie sostanze polimeriche dal basso peso molecolare, prodotti chimici organici e per il cracking termico del petrolio greggio in distillati con basso peso molecolare. La HC può favorire numerose reazioni chimiche, come reazioni di ossidazione, rottura di composti ad alto peso molecolare in molecole più piccole, idrolisi di olio e reazioni di transesterificazione (*Pandit e Joshi, 1993; Ambulgekar et al., 2004, 2005; Sainte Beuve e Morison, 2010; Maddikeri et al., 2014; Ansari et al., 2015; Prajapat e Gogate, 2015*). È stato evidenziato come le reazioni procedano in due modi sotto l'effetto della HC, cioè mediante l'attacco di radicali liberi e la pirolisi termica per le reazioni chimiche che comportano l'ossidazione, l'idrolisi e la rottura molecolare quando si desiderano prodotti di dimensione minore, a basso peso molecolare (*Carpenter et al., 2017*).

Nella reazione di transesterificazione dei trigliceridi per la sintesi del biodiesel, la turbolenza d'interfaccia e i getti liquidi ad alta pressione sono ritenuti responsabili del miglioramento del trasferimento di massa tra due sostanze immiscibili, quali olio e alcool. Questo ha migliorato il trasferimento di massa (a causa della creazione di un'estesa area di interfaccia) cui segue l'aumento della resa della reazione. Molti studi hanno indicato che gli effetti meccanici, cioè il fluido altamente turbolento, i mulinelli e i microgetti, sono la causa principale del miglioramento della reazione di transesterificazione. Il ruolo degli effetti chimici della HC sulla transesterificazione non è stata ancora accertata. Tuttavia, ci possono essere reazioni collaterali dell'ossidazione dei trigliceridi durante la sintesi del biodiesel. I radicali ossidrilici possono unirsi al gruppo carbonilico, convertendolo in gruppo carbossilico. Pertanto, resta ad oggi aperto un spazio di ricerca volta ad indagare il ruolo degli effetti chimici della HC durante la transesterificazione.

Anche le reazioni associate a catalizzatori solidi possono essere intensificate grazie all'effetto meccanico della cavitazione. Il catalizzatore si attiva grazie all'aumento della superficie e della porosità come risultato di un collasso asimmetrico delle cavità sulla superficie stessa del catalizzatore (*Gogate 2008*).

#### **4.5.1. Reazioni di ossidazione**

Nelle industrie chimiche, molte sostanze importanti come alcoli, acidi carbossilici, fenoli, chinoni e acetone sono prodotti dall'ossidazione di aldeidi, chetoni e alchilareni. Queste reazioni di ossidazione sono condotte in presenza di catalizzatori e richiedono alte temperature e condizioni di alta pressione. La maggior parte delle reazioni di ossidazione iniziano con l'azione dei radicali liberi, generati da un catalizzatore; i più utilizzati sono gli ossidi di metallo. Il rendimento della reazione dipende fortemente dall'attività del catalizzatore e dalla velocità di mescolamento richiesta per generare un'area di interfaccia sufficientemente estesa. Inoltre, deve essere fornito sufficiente calore per mantenere la temperatura di reazione e le aliquote richieste per le diverse reazioni.

Nei processi convenzionali la maggior parte dell'energia è dissipata nella turbolenza creata nel volume liquido e solo una parte dell'energia fornita viene utilizzata effettivamente per la reazione. I vantaggi di un reattore cavitazionale rispetto a quelli convenzionali è che le reazioni possono essere condotte in condizioni ambientali più efficienti, utilizzando la HC e ad un costo più basso. Le cavità generate sono in grado di fornire l'energia a livello della reazione, a causa delle loro piccole dimensioni, mentre gli hot spots forniscono l'energia necessaria a livello molecolare.

*Ambulgekar et al. (2004, 2005)* hanno prodotto toluene per ossidazione di alchilareni in presenza di  $\text{KMnO}_4$  utilizzando sia la HC che la AC. Il rendimento, in termini di prodotti, è stato studiato a diverse pressioni operative e tempi di reazione. Un'osservazione simile è stata fatta

anche nella seconda studio (*Ambulgekar et al., 2005*) durante l'ossidazione di xilene e mesitilene per mezzo di  $\text{KMnO}_4$  usando entrambe le tecnologie cavitazionali. La HC è risultata essere sei volte più efficiente dal punto di vista energetico rispetto alla AC nell'ossidazione del toluene e sette volte più efficiente nell'ossidazione di xilene e mesitilene. Nella HC si è osservato uno sviluppo maggiore di eventi cavitazionali rispetto alla AC. Questo grande numero di cavità prodotte ha portato ad una maggiore entità della pressione di collasso e quindi ad un aumento del tasso di reazione e del rendimento.

#### 4.5.2. Idrolisi degli oli

Glicerolo e acidi grassi liberi sono ottenuti attraverso l'idrolisi dei trigliceridi. I metodi tradizionali richiedono alte temperature ( $200^\circ\text{C}$ - $250^\circ\text{C}$ ), alta pressione (50-60 bar) ed elevata energia per miscelare questi liquidi altamente viscosi e immiscibili (*Albasi et al., 1999*). Per ottenere un alto rendimento della reazione ed accelerarla, vengono utilizzati dei catalizzatori. A tal proposito, numerosi studi hanno indicato l'uso di enzimi per l'idrolisi dell'olio (*Rooney e Weatherley, 2001; Al-Zuhair et al., 2002, 2008; Weatherley e Rooney, 2008; Sainte Beuve e Morison, 2010*). Per ottenere un rendimento elevato, l'area di interfaccia dovrebbe essere massima e quindi la reazione viene solitamente condotta utilizzando una miscelazione vigorosa, generando un'emulsione fine di trigliceridi ed enzimi. Questo perché anche utilizzando una concentrazione più alta dell'enzima può capitare di non riuscire a raggiungere la resa desiderata (*Al-Zuhair et al., 2002, 2008*) a causa di un'interfaccia inferiore. Pertanto diventa essenziale intensificare il processo convenzionale in modo da condurre tali reazioni con un uso minimo di energia. La HC può facilitare l'idrolisi di olio a causa dei suoi effetti meccanici indotti, creando una migliore emulsione di trigliceridi ed enzimi. Inoltre, gli hot spots che si creano durante il collasso della cavità in più posizioni all'interno del reattore, facilitano la reazione esponendo le molecole reagenti direttamente a zone ad alta temperatura.

*Pandit e Joshi (1993)* hanno studiato per la prima volta l'idrolisi di olio di ricino e di kendi utilizzando la HC e la AC. Il rendimento più alto è stato ottenuto con una pressione di ingresso di 3 bar e temperatura di  $30^\circ\text{C}$ . È stato osservato che utilizzando la HC, l'idrolisi dell'olio può essere ottenuta a temperature e pressioni molto più basse di quelle utilizzate nei metodi convenzionali. Inoltre la HC è risultata essere il 22% più efficiente dal punto di vista energetico rispetto alla AC, a parità di rendimento della reazione.

*Sainte Beuve e Morison (2010)* hanno studiato l'idrolisi dell'olio di colza utilizzando la HC. Per generare la cavitazione è stato utilizzato un tubo di Venturi. Gli esperimenti sono stati eseguiti a diverse pressioni di ingresso (tra 2 e 8 bar) con il corrispondente numero di cavitazione nell'intervallo 0,11-0,0381. È stato osservato un rendimento massimo del 60% ad una pressione di 3,4 bar, senza alcuna variazione per ulteriori incrementi. Inoltre, l'entità dell'idrolisi era la stessa per i primi 50 minuti in tutte le condizioni di pressione in entrata, quindi non è stato possibile evidenziare un chiaro effetto della pressione di ingresso sul grado

di idrolisi, mentre la resa massima del 90% è stata ottenuta in 200 minuti. In questo caso è stato concluso che la HC non è stata efficace nel migliorare l'idrolisi enzimatica dell'olio, e sono state ottenute rese inferiori rispetto ai sistemi tradizionali. La minore resa può essere attribuita alla cavitazione soffocata, che si presenta al numero di cavitazione più basso. È infatti stato segnalato in molti studi che la resa cavitazionale si riduce fortemente in condizioni soffocate, e quindi la HC dovrebbe sempre essere utilizzata al di sopra di tale condizione. Per la maggior parte delle applicazioni, il numero ottimale di cavitazione operativa ricade nell'intervallo 0,15-0,5. Uno studio condotto da *Saharan et al. (2012)* ha dimostrato che la cavitazione soffocata si verifica a un numero di cavitazione inferiore a 0,15. Esiste un vasto campo di ricerca dove diverse geometrie di Venturi e piastre forate, differenti valori di  $\beta$  e  $\alpha$  e in genere numeri di cavitazione operativa più elevati, possono essere utilizzati per intensificare il processo di idrolisi usando la HC, ma rimane tuttavia necessario stabilirne l'esatto meccanismo.

#### **4.5.3. Reazioni di depolimerizzazione**

La HC è applicata con successo nella scissione di vari biopolimeri in monomeri essenziali. Gli sforzi di taglio indotti, l'alta temperatura localizzata e l'alta pressione possono rompere i legami molecolari dei polimeri e ridurre la viscosità intrinseca della soluzione polimerica. L'efficacia della depolimerizzazione è quantificata in termini di riduzione della viscosità della soluzione polimerica (*Prajapat e Gogate, 2015*). *Huang et al. (2013)* hanno studiato la degradazione di un polisaccaride polimerico, il chitosano (Figura 4.14), con l'utilizzo della HC, investigando l'effetto dei parametri operativi e delle diverse geometrie degli orifizi. È stata osservata una degradazione del chitosano sotto gli effetti della HC, misurabile mediante l'aumento del livello di pH da 3,6 a 5,2. A livelli di pH più alti, gli effetti cavitazionali generano più radicali  $\cdot\text{OH}$ . Questi radicali idrossili attaccano i legami molecolari del chitosano e li rompono, scindendolo in molecole più piccole e riducendo in tal modo la viscosità intrinseca. Inoltre, variando la pressione da 0,1 a 0,5 MPa, la degradazione aumenta dal 27% al 48%, dimostrando che una pressione più elevata genera uno stress maggiore, che aiuta a rompere più facilmente i legami molecolari. È stato poi effettuato un confronto geometrico fra i diversi orifizi e la degradazione massima del 33% è stata ottenuta utilizzando fori con  $\alpha$  maggiore (1,6  $\text{mm}^{-1}$ ). Allo stesso modo, la degradazione è aumentata dal 27% a quasi il 33% quando  $\beta$  è aumentato da 0,010 a 0,040, indicando che piastre con fori più grandi fornivano un'area di flusso sufficiente per produrre una cavitazione attiva.

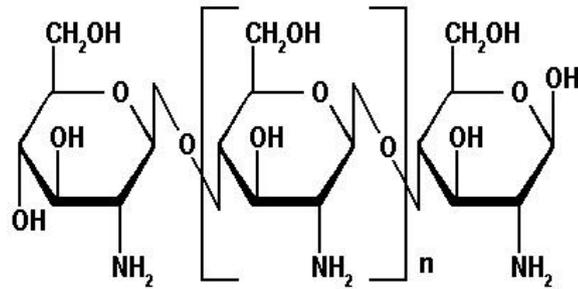


Figura 4.14 – Struttura del chitosano rappresentata mediante le proiezioni di Haworth. (Fonte: <https://it.wikipedia.org>)

*Prajapat e Gogate (2015)* hanno eseguito la depolimerizzazione della gomma di guar, principalmente composta di polisaccaridi ad alto peso molecolare, utilizzando la HC. A causa del suo basso costo e di molte proprietà uniche come biodegradabilità, biocompatibilità e non tossicità, la gomma di guar ed i suoi derivati sono usati in molte applicazioni quali vernici e carta, nell'industria tessile ed alimentare, in campo petrolifero, farmaceutico e dell'igiene personale. Tuttavia, prima del suo utilizzo, la gomma di guar deve essere trattata per ridurre il peso molecolare e la viscosità. La depolimerizzazione è stata condotta utilizzando tre diversi dispositivi di cavitazione: un Venturi a fessura, un Venturi circolare ed una piastra a foro singolo. Con il Venturi a fessura è stata ottenuta una depolimerizzazione del 74%, usando una pressione ottimale di 3 bar, in virtù del 71 e del 61% ottenuti usando rispettivamente il Venturi circolare e la piastra a foro singolo, entrambi a 4 bar di pressione. Inoltre, il  $\sigma_v$  ottimale è stato stimato in 0,38, 0,25 e 0,30 per i tre casi.

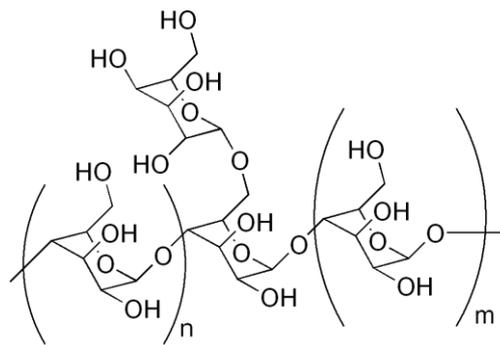


Figura 4.15 – Monomero del galattomannano, costituente principale del polisaccaride che forma la gomma di guar. (Fonte: <https://it.wikipedia.org>)

#### 4.5.4. Lavorazione del greggio

Nelle raffinerie di petrolio vi è un'enorme quantità di energia richiesta nei vari processi come cracking termico, cracking catalitico, il visbreaking e la cokizzazione ritardata, che necessitano di temperature molto elevate (750°C – 1000°C) ed alta pressione (100-200 atm) per la produzione/potenziamento dei residui di petrolio (*Heinemann e Spelght, 2006*). Questi processi di cracking sono molto costosi perché richiedono sia un elevato quantitativo di energia, sia opportuni catalizzatori: c'è quindi la necessità di sviluppare tecniche alternative dove il cracking possa essere eseguito a temperature e pressione moderatamente basse e senza l'utilizzo di un catalizzatore. Nell'ultimo decennio, alcuni ricercatori hanno studiato le potenzialità della cavitazione acustica (AC) per il cracking termico del greggio: *Cataldo (2000)*, *Sawarkar et al. (2009)* e *Kaushik et al. (2012)* hanno utilizzato la AC per scindere le molecole più complesse in composti più semplici, utilizzando determinate condizioni ambientali. Tuttavia, esistono alcune limitazioni della AC, come ad esempio una minore efficienza energetica ed un costo di impiantistico elevato che ne limitano l'uso su larga scala. Al contrario, la HC può essere una buona alternativa per il cracking di frazioni di petrolio a causa dei suoi vantaggi nella gestione di grandi volumi, nel funzionamento continuo e nella capacità di generare condizioni di cavitazione simili a quelle della AC.

Di recente, *Ansari et al. (2015)* hanno lavorato ad un metodo che combina anche le caratteristiche della HC, applicandolo a varie tipologie di greggio. Il trattamento ha sottoposto differenti stadi del greggio alla distillazione atmosferica per la separazione dei prodotti in base al loro punto di ebollizione e le rese del prodotto sono state confrontate per campioni trattati e non trattati con la HC. È stato osservato che la percentuale di distillati prodotti è aumentata tra il 37% e l'11% a seconda della tipologia. La resa dei prodotti gassosi come l'etilene e il butano era significativamente aumentata sotto l'effetto della cavitazione rispettivamente di 2,9 e 3,8 volte, confrontandola ai processi senza uso della HC. Inoltre, è stato osservato che nel caso del petrolio greggio primario, le frazioni di benzina e di nafta sono aumentate del 257% e 27%, mentre la frazione di cherosene è diminuita del 7,7% dopo il trattamento con la HC. Per il greggio secondario, tuttavia, le frazioni di benzina e di nafta sono diminuite rispettivamente del 33% e del 45%, mentre il cherosene e i distillati medi sono aumentati rispettivamente del 56% e del 17%.

Tutti questi risultati indicano che la HC è in grado di rompere le molecole più grandi in prodotti a basso peso molecolare, più utili; gli effetti indotti dagli *hot spots* (alta temperatura ed alta pressione) e i jet liquidi ad alta velocità sono i principali fattori che causano la rottura delle molecole più pesanti. Poiché gli studi riguardanti l'uso della HC per la raffinazione del greggio sono ancora limitati, si rende necessario approfondire ulteriormente gli effetti di vari parametri, in particolare quelli geometrici ed operativi, che possono migliorarne l'efficacia.

#### 4.5.5. Reazione di transesterificazione: sintesi di biodiesel

Negli ultimi anni, come evidenziato in specifici studi, il biodiesel è risultato essere non tossico, rinnovabile, biodegradabile e non inquinante e ha dimostrato di poter essere potenzialmente utilizzato come combustibile alternativo per i motori diesel (*Chuah et al. 2015*). Il biodiesel è una miscela di esteri di acidi grassi alchilici semplici ed è prodotto dal reazione di transesterificazione di grassi animali o di oli vegetali con alcool. Nel processo di transesterificazione, l'alcool (etanolo o metanolo) viene deprotonato per renderlo un nucleofilo più forte. In condizioni normali, la reazione è molto lenta e per aumentarne il tasso di rendimento, vengono utilizzati dei catalizzatori come l'idrossido di sodio e di potassio. Negli ultimi anni, la HC è stata utilizzata con successo per la produzione di biodiesel da vari oli vegetali (*Gogate et al., 2006; Ji et al., 2006; Kelkar et al., 2008; Pal et al., 2010; Gole et al., 2013; Franke et al., 2014; Maddikeri et al., 2014; Chuah et al., 2015*). La cavitazione ha la capacità di dissipare l'energia a livello molecolare e direttamente all'interfaccia dei due liquidi immiscibili. Nel sistema liquido-liquido, gli effetti meccanici di cavitazione migliorano la velocità di trasferimento di massa, con un incremento dei tassi di reazione globali, e quindi è possibile ottenere un rendimento più elevato.

La HC, se confrontata con la AC e gli altri metodi convenzionali per la produzione di biodiesel, è risultata essere il processo più efficiente dal punto di vista energetico. *Ji et al. (2006)* hanno riportato per la prima volta un confronto tra le tre tipologie di metodi, basato sul loro consumo di energia per la transesterificazione dell'olio di soia. È stato osservato che entrambe le tecniche di cavitazione hanno un tempo di reazione più breve e un rendimento più alto rispetto all'agitazione meccanica dei metodi tradizionali. Basando il confronto sul consumo di energia, la HC è risultata 2,7 volte più efficiente dell'agitazione meccanica e 1,3 volte più efficiente della AC, a causa della sua capacità di trattare un volume maggiore con un basso consumo energetico. Un'osservazione simile è stata riportata da *Kelkar et al. (2008)* in uno studio analogo. Recentemente, *Gole et al. (2013)* hanno confrontato i processi di HC e AC per l'ottenimento di esteri metilici da olio non commestibile e anch'essi hanno riportato che la HC risulta essere più efficiente dal punto di vista energetico della AC. In tutti questi studi si può osservare che le tecniche convenzionali sono meno efficaci della HC perché richiedono un funzionamento a temperature più elevate (60°C), ottenendo comunque tassi di reazione più bassi e consumando un quantitativo maggiore di energia (*Gole et al., 2013*). La HC e la AC possono produrre la stessa resa di reazione, ma per la prima è richiesta una quantità di energia minore, che la rende più efficiente e la pone come una potenziale tecnica da esplorare su un scala industriale.

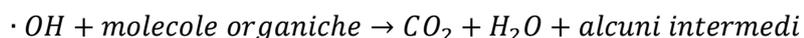
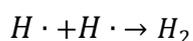
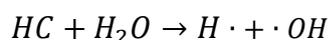
Il tasso di reazioni di transesterificazione può essere controllato tramite la configurazione geometrica del dispositivo. *Ghayal et al. (2013)* hanno ottimizzato la geometria delle piastre per la sintesi del biodiesel. L'ottimizzazione di varie configurazioni è stata eseguita variando i due parametri  $\alpha$  e  $\beta$ : con un valore di  $\alpha$  passato da 0,5 a 2,0, la conversione è aumentata da circa il 75% al 95% e la stessa tendenza è stata osservata sul parametro  $\beta$ . Per lo stesso valore

di  $\beta$ , la piastra con un numero elevato di fori più piccoli ha dato risultati migliori. Inoltre, facendo un confronto con la AC, è stato riscontrato che la HC forniva una conversione del 95% in soli 10 minuti, mentre usando la AC, la conversione era solo dell'85% dopo 40 minuti.

#### 4.5.6. Trattamento delle acque reflue

Molte attività industriali, agricole, mediche e domestiche producono acque reflue contenenti composti organici ed inorganici come pesticidi, sostanze chimiche, cariche batteriche. Molte tecniche convenzionali come l'adsorbimento, la coagulazione, lo scambio ionico, la filtrazione a membrana ed altri metodi biologici sono stati impiegati per smaltire questo tipo di inquinamento. Tuttavia, la maggior parte di queste tecniche può solo rimuovere gli inquinanti con mezzi di separazione fisica, causando così un carico secondario sull'ambiente. Gli stessi metodi biologici convenzionali non sono in grado di eliminare completamente molti inquinanti organici (Bagal e Gogate 2014). Pertanto la cavitazione si pone come una tecnica promettente per sopperire a tali limiti.

Nell'ultimo decennio, la HC è stata largamente studiata da vari ricercatori per il trattamento delle acque reflue. Gli effetti indotti, quali alte temperature ed alte pressioni (*hot spots*) ed i getti di liquido ad alta velocità, possono degradare varie sostanze organiche e contemporaneamente generate radicali idrossilici che ossidano gli inquinanti presenti (Saharan et al., 2014). I radicali idrossilici ( $\cdot OH$ ) generati dalla frammentazione della molecola d'acqua sotto gli effetti della HC hanno un alto potenziale di ossidazione rispetto agli altri ossidanti e sono efficienti nel degradare sostanze complesse. Le reazioni che si verificano sono le seguenti:



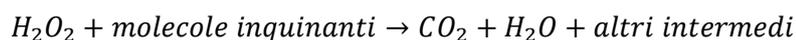
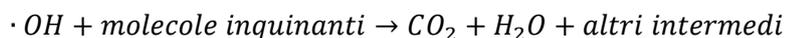
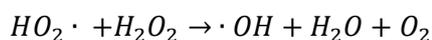
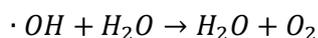
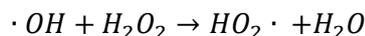
L'uso efficace della HC nel trattamento delle acque reflue richiede l'ottimizzazione rigorosa di diverse geometrie, oltre che dei parametri operativi. Durante il trattamento delle acque reflue, la geometria del dispositivo cavitante, le condizioni operative come pressione di ingresso e numero di cavitazione, e le proprietà fisico-chimico del liquido influenzano significativamente il processo di degradazione. Sivakumar e Pandit (2002) per primi hanno studiato l'applicazione della HC e l'effetto della geometria sul trattamento di acqua contaminata da coloranti, evidenziando come sia importante ottimizzare il numero di cavitazione e la pressione di ingresso al dispositivo cavitante per ottenere una maggiore efficienza di degradazione. I reattori dovrebbero sempre operare ad un numero di cavitazione superiore a quello di flusso

soffocato (Saharan et al., 2011); numerosi ricercatori hanno riportato il numero di cavitazione ottimale nell'intervallo di 0,15-0,30 (Saharan et al., 2011, 2013; Bagal et Gogate, 2014; Capocelli et al., 2014).

Le proprietà fisico-chimiche del mezzo liquido come la densità, la viscosità e la tensione superficiale, possono incidere sul tasso di degradazione (Bagal et Gogate 2014). Queste proprietà influenzano tanto il numero di cavitazione, quanto i fenomeni ad essa correlati. La natura stessa delle molecole inquinanti influenza l'utilizzo della HC: quando queste sono idrofobiche e volatili, hanno più possibilità di reagire con i radicali  $\cdot OH$  quando si trovano nel nucleo di una cavità e all'interfaccia cavità-liquido in cui la concentrazione di radicali è più alto. Al contrario, un composto idrofilo può reagire solo con gli  $\cdot OH$  residui, che non hanno reagito nel mezzo liquido indisturbato, dove è presente una concentrazione di radicali limitata.

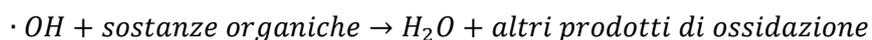
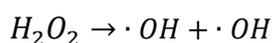
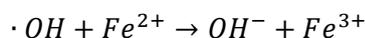
D'altra parte, la HC può essere utilizzata come tecnica di supporto per diversi processi biologici, dove gli effetti combinati possono ridurre la tossicità dell'acqua oltre ad aumentare l'efficienza di un processo di tipo convenzionale. Padoley et al. (2012) hanno studiato l'effetto della HC sulla biodegradabilità delle acque reflue di un depuratore. Un trattamento con HC è stato condotto con l'obiettivo di massimizzare il BI (indice di biodegradabilità) degli effluenti e ridurre il COD (domanda chimica di ossigeno) ed il livello totale di carbonio organico (TOC). La riduzione massima del COD si è attestata al 34,29%, mentre per il TOC è stata del 32,65%; tali risultati sono stati ottenuti con un livello elevato di pressione di ingresso, pari a 13 bar. A causa degli effetti cavitazionali, il valore di BI è aumentato da 0,14 a 0,29. Inoltre, i campioni trattati con HC sono stati sottoposti a digestione anaerobica e l'efficienza del processo in termini generazione di metano è migliorata di sei volte rispetto a quella ottenuta nel caso di campioni non pretrattati con HC. Questo studio evidenzia gli effetti della HC, utili per la rottura le molecole complesse in intermedi più piccoli: questi intermedi risultano più suscettibili ad essere metabolizzati dai microrganismi nel successivo processo biologico.

Inoltre, molti ricercatori hanno studiato la combinazione di HC con altri processi di ossidazione avanzata (AOP; con tale termine si indica un insieme di processi per la depurazione delle acque) come il Fenton, quelli a base di perossido di idrogeno ( $H_2O_2$ ) ed ozono ( $O_3$ ), i processi fotocatalitici e la AC, con l'obiettivo di aumentarne l'efficienza (Saharan et al., 2011; Gore et al., 2014; Jawale et al. 2014; Patil et al. 2014; Gogate e Patil, 2015). Questi metodi combinati, noti come metodi ibridi, dimostrano di produrre effetti sinergici in grado di superare gli inconvenienti delle singole tecniche. Nel caso di HC combinata con  $H_2O_2$ , quest'ultimo facilmente dissocia in radicali  $\cdot OH$  sotto gli effetti della cavitazione: il tasso di generazione dei radicali viene migliorato e questi vengono distribuiti in modo efficiente nel liquido. Durante questo processo combinato, possono verificarsi le seguenti reazioni (Sahara et al. 2011; Patil et al. 2014):



Per ottenere un migliore effetto sinergico di questo processo combinato, il quantitativo di perossido da introdurre dovrebbe essere ottimizzato in modo tale da farlo reagire interamente solo con le molecole inquinanti. Occorre notare che l'efficienza di reazione tra radicali  $\cdot OH$  e molecole inquinanti si riduce quando i radicali  $\cdot OH$  si legano al perossido; la concentrazione di  $H_2O_2$  deve essere quindi ottimizzata anche per evitare questo fenomeno (Saharan et al., 2011, 2014). La maggior parte degli studi comunque riporta un positivo effetto sinergico; per numerosi inquinanti degradati usando questo metodo, è stato trovato un rapporto molare ottimale tra inquinante e  $H_2O_2$  nell'intervallo 1:20-1:60 (Saharan et al., 2011, 2012; Jadhav et al., 2013; Rajoriya et al., 2017).

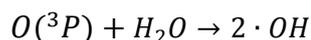
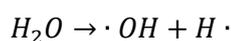
Allo stesso modo nel caso di combinazione di HC con il processo Fenton, gli effetti cavitazionali migliorano la generazione di agenti altamente ossidanti come  $\cdot OH$  e  $HOO\cdot$ . Le reazioni che si verificano sono le seguenti:



Poiché il processo di Fenton implica la reazione di  $H_2O_2$  con ferro  $Fe^{2+}$  per dare radicali  $\cdot OH$ , è necessario ottimizzare il dosaggio di  $Fe^{2+}$  ed il rapporto tra questo ed il perossido, al fine di migliorare l'efficienza complessiva del processo combinato. Il rapporto molare tra  $Fe^{2+}$  e  $H_2O_2$  è stato studiato nell'intervallo di 1:1-1:20 per i vari inquinanti degradati (Jadhav et al., 2013; Patil et al., 2014; Gogate e Patil, 2015). Il pH della soluzione è un altro parametro che influenza l'efficienza del processo. Un pH più basso favorisce la degradazione degli inquinanti: l'intervallo

di pH 2-4 è il più adatto perché il mezzo acido favorisce la generazione di radicali  $\cdot OH$  (Chakinala et al., 2009; Bagal e Gogate, 2013; Jadhav et al., 2013; Patil et al., 2014).

Nel caso della combinazione della HC con l'ozono ( $O_3$ ), questo viene facilmente decomposto producendo ossigeno molecolare e ossigeno atomico (Saharan et al., 2014), che può formare radicali  $\cdot OH$  reagendo con le molecole d'acqua. Le seguenti reazioni hanno luogo durante tale processo:



Sotto l'alta turbolenza di interfaccia, il tasso di trasferimento di massa ed il tempo di contatto tra ozono e molecole inquinanti aumenta, con un conseguente maggior grado di degradazione. Il dosaggio di  $O_3$  deve essere ottimizzato per minimizzare il consumo di energia ed il rischio ambientale legato all'ozono non reagito rilasciato nei gas di scarico. Alcuni studi hanno riportato un dosaggio ottimale di  $O_3$  pari a 3 g/h per vari inquinanti presenti in concentrazione di 50-100 ppm.

Allo stesso modo, nel caso della combinazione di HC con la fotocatalisi, gli effetti indotti dalla cavitazione hanno superato i limiti del processo tradizionale, come l'adsorbimento di contaminanti sulla superficie del catalizzatore (Jadhav et al., 2013). La tecnica combinata della HC con la fotocatalisi è risultata soddisfacente nel settore del trattamento delle acque reflue, poiché alla base di entrambi i processi vi è la generazione di radicali  $\cdot OH$ , che migliora notevolmente il processo. (Wang et al., 2011; Jadhav ed altri 2013; Bagal e Gogate, 2014).

#### 4.5.7. Trattamento delle acque di zavorra

Oltre a rendere potabile l'acqua contaminata (Paragrafo 4.6.3), l'utilità della cavitazione è stata sperimentata anche sull'acqua di zavorra, la *ballast water* delle navi, che viene trasportata da una regione all'altra del pianeta, venendo prelevata in un ecosistema e rilasciata in un altro. L'acqua di zavorra viene utilizzata dalle grandi navi per la stabilizzazione e la compensazione del peso; viene prelevata generalmente in una zona sotto la costa e, una volta che la nave arriva a destinazione, viene scaricata in porto. Con quest'acqua, tuttavia, vengono raccolti regolarmente anche sedimenti e microrganismi come ad esempio batteri, microbi, piccoli invertebrati, uova e larve. Il carico e lo scarico dell'acqua (Figura 4.16) possono avvenire, quindi, in località anche molto lontane e diverse tra loro. Se tali organismi trovano nel nuovo ambiente condizioni adatte alla loro sopravvivenza, essi entrano a far parte del nuovo ecosistema creando spesso gravi squilibri.

La traslocazione di organismi attraverso le navi, detta *bio-invasione*, è considerata essere uno dei problemi più importanti che minacciano l'evoluzione della biodiversità naturale. Sebbene siano state utilizzate molte tecnologie di trattamento come filtrazione, ozonazione, deossigenazione, elettro-ionizzazione e trattamenti chimici, queste non riescono a limitare i danni (Ricucci, 2017).

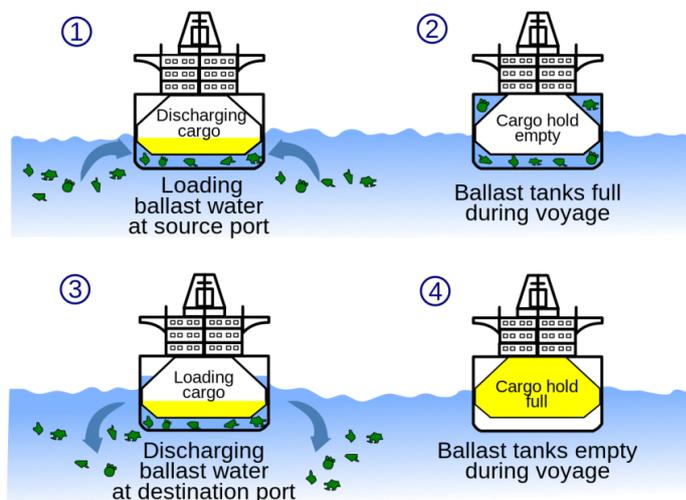


Figura 4.16 – Fasi di carico e scarico dell'acqua di zavorra in una nave cargo (Fonte: <https://it.wikipedia.org>)

Pandit (2008) ha riportato l'applicazione della cavitazione sul trattamento dell'acqua di zavorra e un design per l'incorporazione della tecnologia sulle navi. Gli esperimenti condotti indicano che la cavitazione idrodinamica (generata usando come reattore cavitazionale una piastra forata) ha permesso una distruzione del 99% di batteri e dell'80% di zooplancton.



Figura 4.17 – Scarico dell'acqua di zavorra (Fonte: Cambiaso Risso Marine)

L'obiettivo, per questo tipo di applicazione, dovrebbe essere quello di rendere il processo attuabile in un singolo passaggio dell'acqua attraverso il reattore; questo perché sono praticamente impossibili passaggi multipli, se si considera il volume di liquido da trattare e la rete di tubazioni per l'acqua di zavorra.

## 4.6. Applicazione della HC nei processi fisici

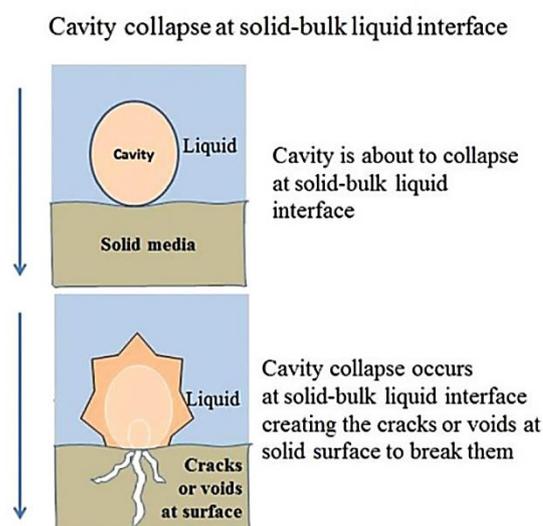
Gli effetti fisici indotti dalla HC stabiliscono un punto di riferimento per la sua applicazione in vari ambiti. Come discusso, possono aiutare vari processi chimici (*Jyoti e Pandit 2001, 2003; Patil e Pandit 2007; Pinjari e Pandit, 2010; Ramisetty et al., 2014*), ma sono altresì utilizzabili per altrettanti processi fisici, quali l'emulsione, la sintesi di nanoparticelle e la distruzione cellulare (*Carpenter et al., 2017*).

### 4.6.1. Sintesi di nanomateriali

Oggi i nanomateriali hanno trovato ampia applicabilità in diversi processi chimici e in molti ambiti della vita quotidiana. Vengono sempre più velocemente ideati nuovi nanomateriali come nanoparticelle, nanocatalizzatori, nanofibrille, nanotubi e nanoemulsioni che hanno vaste applicazioni. I nanomateriali solidi sono ampiamente applicabili nell'ambito biomedicale, in biotecnologia e nell'industria farmaceutica e chimica (*Barick et al., 2015*). I nanomateriali a base liquida come le nanoemulsioni sono utilizzate in vernici, cosmetici, prodotti alimentari e nell'incapsulamento di prodotti farmaceutici (*Gutierrez et al., 2008*) per prevenire il loro naturale deterioramento e migliorare la loro stabilità a lungo termine. Oggi gli studi sono sempre più focalizzati sullo sviluppo di nuove tecnologie energeticamente efficienti per la sintesi di tali materiali su larga scala, implementando vari metodi chimici e fisici (*Pinjari et al., 2014*). Particolari omogeneizzatori ad alta pressione ed alta velocità sono utilizzati per la preparazione di nanoemulsioni su una scala industriale, ma queste tecniche consumano un elevato quantitativo di energia. Di recente alcuni studi hanno dimostrato l'applicabilità della HC per la sintesi di nanomateriali.

Il collasso asimmetrico delle cavità sulla superficie di una particella solida crea getti liquidi ad alta pressione che provocano crepe e vuoti localizzati. Nei successivi eventi collassanti, queste crepe vengono allargate e le particelle di materiale si scindono in prodotti più piccoli (*Mahulkar e Pandit, 2010*). Gli sforzi forniti dai getti di liquido ad alta pressione devono essere maggiori della resistenza della particella (durezza, resistenza alla trazione, ecc.) che si vuole ridurre. L'intensità degli sforzi di taglio generati dal collasso delle cavità può essere controllata variando la geometria e parametri operativi dei dispositivi cavitanti (*Pinjari et al., 2014*). Allo stesso modo, nel caso di due liquidi immiscibili, gli effetti indotti dalla cavitazione riducono la tensione interfacciale portando a una migliore dispersione. Nel frattempo, la turbolenza favorisce la formazione dell'emulsione, riducendo così la dimensione delle gocce disperse e aumentando l'area interfacciale. Negli ultimi anni, alcuni studi hanno riportato l'efficacia della HC per la riduzione delle dimensioni delle particelle su scala nanometrica, indicandone l'idoneità per l'applicazione su larga scala.

*Patil e Pandit (2007)* hanno studiato la riduzione delle dimensioni di particelle di stirene butadiene (SBR) utilizzando una piastra avente 33 fori di 1 mm di diametro ( $\beta=0,026$ ) a 4,2 atm di pressione. La dimensione delle particelle è stata ridotta da 275  $\mu\text{m}$  a 129 nm in 3 h con un numero di cavitazione di 1,87. Continuando a trattare la stessa soluzione utilizzando una piastra a foro singolo con diametro di 0,6 mm ( $\beta =0,00035$ ) a 11 atm di pressione (numero di cavitazione di 0,18), la dimensione delle particelle è stata ridotta a 20 nm. La dimensione minima delle particelle è stata ottenuta usando la HC, poiché era richiesta meno energia rispetto alla AC. È stato osservato che i parametri operativi come il numero di cavitazione, la pressione di ingresso e la geometria del dispositivo cavitante influenzano notevolmente la dimensione finale delle particelle. Per raggiungere dimensioni inferiori a 100 nm, è preferibile un numero di cavitazione basso, poiché viene generato un numero molto più elevato di cavità. Inoltre, è stato trovato che la geometria avente un perimetro bagnato più alto, vale a dire  $\alpha$  superiore, è risultata più efficiente.



**Figura 4.18 – Meccanismo di rottura delle particelle solide e delle cellule microbiche (Carpenter et al., 2017)**

*Sonawane et al. (2010)* hanno sintetizzato nanoparticelle di  $\text{CaCO}_3$  (nanocalcite) utilizzando varie configurazioni per valutare gli effetti di vari parametri come diametro e geometria dei fori, portata di  $\text{CO}_2$  e concentrazione di  $\text{Ca(OH)}_2$ . Quando la reazione viene condotta senza HC, a concentrazione fissa di  $\text{Ca(OH)}_2$  e  $\text{CO}_2$ , si osservano tre fasi: un periodo di induzione, uno di nucleazione ed uno di precipitazione. È stato osservato che, usando le piastre forate, è possibile eliminare il periodo di induzione e la reazione ha inizio direttamente con la nucleazione; vengono inoltre ridotte le dimensioni delle particelle ottenute. Si è constatato che il tasso di consumo di  $\text{Ca(OH)}_2$  è aumentato con un valore di  $\beta$  più elevato. È stato inoltre osservato che la dimensione delle particelle diminuiva da 54 a 39 nm quando  $\beta$  diminuiva da 0,04 a 0,01 e che la piastra con un foro da 2 mm ( $\beta =0,01$ ) ha dato particelle più piccole rispetto alle piastre che hanno dimensioni dei fori maggiori (3 e 4 mm). Non è stata rilevata alcuna differenza significativa tra le dimensioni delle particelle ottenute utilizzando un foro da 2 mm ( $\beta =0,01$ ) ed una piastra con 5 fori da 1 mm di diametro ( $\beta =0,0125$ ). Le dimensioni

medie di una particella di calcite sintetizzata senza cavitazione risultano essere 101 nm. Inoltre, vi è una grande distribuzione delle dimensioni delle particelle (da 90 a 168 nm), mentre per il processo utilizzando una piastra con foro da 2mm, la distribuzione delle dimensioni delle particelle va da 30 a 41 nm.

*Pinjari e Pandit (2010)* hanno elaborato la cellulosa naturale (Figura 4.19), con particelle di dimensione iniziale pari a 63  $\mu\text{m}$  utilizzando la HC e la AC per ridurle in un range nanometrico. I campioni di cellulosa sono stati trattati a 7,8 atm utilizzando una piastra avente 33 fori di 1 mm di diametro ( $\beta = 0,026$ ). Il numero di cavitazione è risultato essere 2,61. Sotto gli effetti della HC, la dimensione della cellulosa è stata ridotta a 1,36  $\mu\text{m}$  in 6 ore. Quando queste particelle trattate idrodinamicamente venivano ulteriormente elaborate usando la AC, la dimensione è stata ridotta a 301 nm in 1 ora e 50 minuti. È stato osservato che anche la cristallinità ha subito una riduzione dall'86,56% iniziale al 37,76%, facendo variare la temperatura di fusione ( $T_m$ ) da 101,78°C a 60,13°C; questi due aspetti sono riconducibili agli effetti cavitazionali. In termini di efficienza energetica, è stata quantificata in  $9,4 \times 10^4$  kJ/m<sup>3</sup> l'energia richiesta dalla HC per una riduzione del 98% delle dimensioni iniziali rispetto ai  $2,44 \times 10^6$  kJ/m<sup>3</sup> richiesti dalla AC per una riduzione del 78%, dimostrando come la HC risulti energeticamente più efficiente della AC in questo tipo di processo.

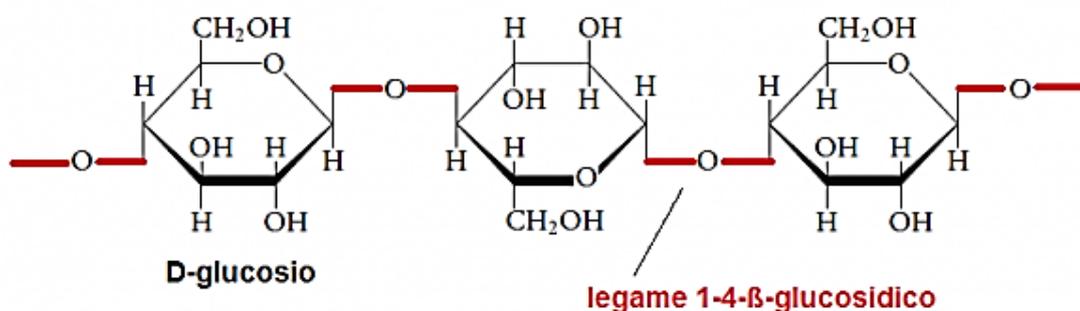


Figura 4.19 – Struttura di una porzione di una catena di cellulosa, formata da monomeri di D-glucosio uniti mediante legami 1-4-β-glucosidici (indicati in rosso). (Fonte: Zanichelli)

Nel caso dell'emulsificazione con HC, *Parthasarathy et al. (2013)* hanno sviluppato uno studio concernente l'olio di palma inducendo la cavitazione con un sistema che comprendeva una piastra a singolo orifizio e una lama, che era tenuta a una certa distanza dalla piastra. La dimensione minima delle goccioline disperse nell'emulsione era di 415 nm a 800 psi, usando una configurazione con la lama piatta distante 0,5 cm dall'orifizio. Tale distanza è stata ottimizzata per ottenere una sufficiente contropressione per massimizzare l'intensità del collasso. In un altro studio, *Ramisetty et al. (2014)* hanno investigato l'uso del reattore per la preparazione di una nanoemulsione di olio di palma in acqua, usando opportuni tensioattivi. L'effetto della pressione di ingresso, il numero di passaggi e la geometria del tubo di Venturi (a fessura e circolare) sono i parametri studiati per controllare la dimensione delle gocce di olio disperse. Questa è risultata essere mediamente di 200 nm per un processo di 30 minuti, usando un Venturi circolare ad una pressione di esercizio di 10 bar ed un numero di

cavitazione di 0,08. È stato osservato che la dimensione della gocciolina si riduce da 711 a 332 nm all'aumentare della pressione di ingresso da 5 a 10 bar, per i campioni raccolti dopo 10 minuti; nessuna riduzione significativa è stata osservata oltre la pressione di 10 bar. Si è visto che le dimensioni delle goccioline diminuivano all'aumentare del numero di passaggi, per poi diventare costanti dopo il 55°. Il Venturi con configurazione a fessura è risultato essere migliore di quello a sezione circolare, in quanto ha prodotto goccioline di dimensioni quasi dimezzate, a parità di parametri e di numero di passaggi. Il numero di cavitazione ottimale è risultato essere 0,23 per la prima tipologia di Venturi, 0,08 per la seconda. La frazione volumetrica di olio e di tensioattivo influiscono in modo significativo sulla dimensione della gocciolina. Fissati 20 bar come pressione di ingresso, all'aumentare della frazione di volume di olio da 0,1 a 0,4, la dimensione della gocciolina è aumentata da 233 a 620 nm, a causa dell'incremento della tensione interfacciale, che a sua volta richiede un quantitativo di energia più alto per rompere l'interfaccia. È stato inoltre osservato che all'aumentare della concentrazione dell'agente emulsionante, l'aspetto dell'emulsione passa da bianco a traslucido, indicando la formazione della nanoemulsione.

Pertanto, come risulta evidente da questi studi, la HC può efficacemente essere utilizzata per la sintesi dei nanomateriali: vari parametri operativi (pressione di ingresso, numero di cavitazione, parametri geometrici  $\alpha$  e  $\beta$ , tipologia del dispositivo di cavitazione) influenzano le dimensioni del nanomateriale prodotto. Si può osservare dai risultati riportati che un numero di cavitazione compreso tra 0,1 e 0,3 risulta efficace per ottenere particelle nell'intervallo di 50-200 nm. Un valore di  $\beta$  nell'intervallo 0,01-0,02 e di  $\alpha$  di 2-6 mm<sup>-1</sup> intensifica gli effetti fisici della HC e quindi permette di ottenere prodotti di dimensione inferiore. Un valore molto basso di  $\beta$  (< 0,01) può essere usato solo laddove la dimensione desiderata delle gocce disperse sia inferiore a 50 nm.

#### **4.6.2. Produzione di prodotti biologici**

Per estrarre materiale intracellulare da una cellula microbica è necessario distruggere la sua membrana cellulare. La distruzione cellulare è un fattore che influenza la produzione dei prodotti biologici di derivazione intracellulare. Come riportato da *Garofano (2016)*, per la distruzione dei microrganismi in impianti di una certa dimensione, vengono generalmente utilizzati disintegratori meccanici, come gli agitatori ad alta velocità o omogeneizzatori ad alta pressione. La loro efficienza è però molto bassa e gran parte dell'energia è dissipata sotto forma di calore, il quale necessita di essere rimosso per salvaguardare l'integrità dei prodotti biologici.

*Harrison e Pandit (1992)* sono stati i primi a riportare l'uso di reattori di cavitazione per i processi di distruzione microbica attraverso una valvola di strozzamento. Uno studio effettuato da *Shirgaonkar et al. (1998)* ha riportato che il tasso di proteine rilasciate a 10.000 rpm in un omogeneizzatore è molto più alto se confrontato a 5.000 rpm (Figure 4.20 e 4.21). Ciò accade

poiché l'evento di cavitazione ha inizio a 8000 rpm, come riportato da *Kumar e Pandit (1999)*. A 10.000 rpm il contributo per la distruzione cellulare è dato sia dalla cavitazione e sia dalle forze meccaniche, a 5.000 rpm solo dalle forze meccaniche.

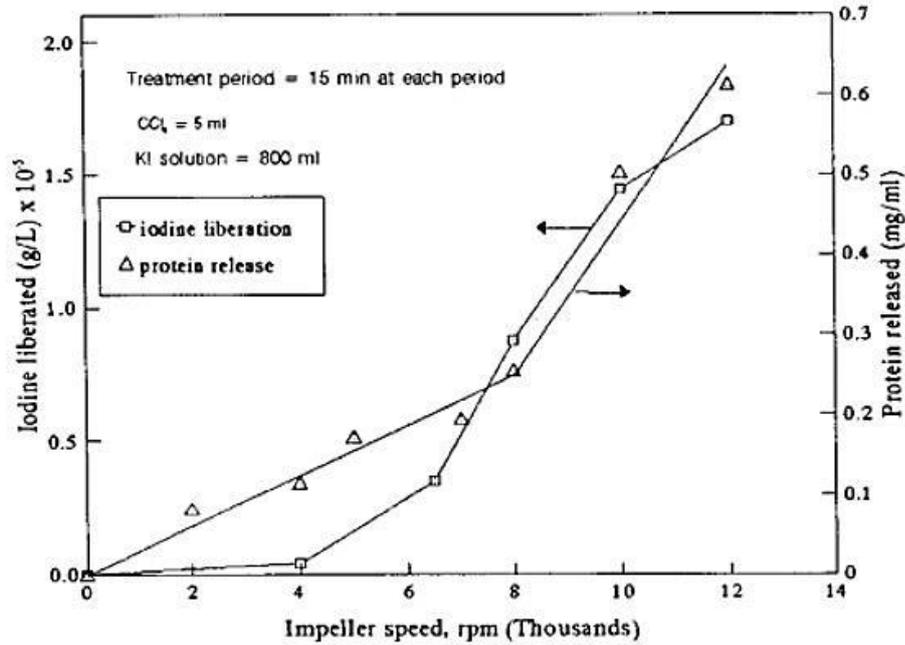


Figura 4.20 – Rilascio di proteine e liberazione di iodio all'aumentare della velocità del omogeneizzatore. Come si può notare, a partire dall'attivazione della cavitazione (circa 8000 rpm) si ha un incremento sostanziale della produzione di proteine. (*Garofano, 2016*)

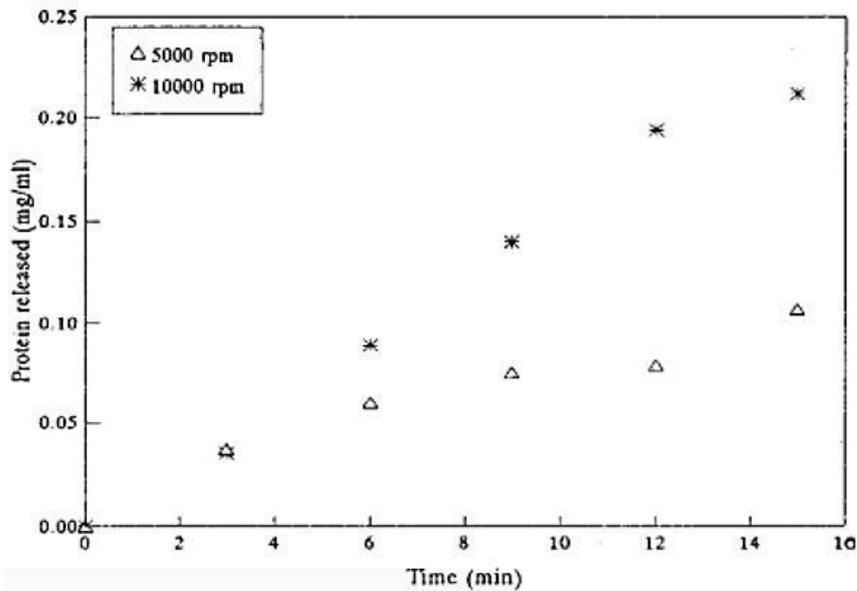


Figura 4.21 – Rilascio di proteine nel tempo, riferita a due valori di velocità dell'omogeneizzatore: 5000 e 10000 rpm. (*Garofano, 2016*)

L'induzione della cavitazione contribuisce a massimizzare il rilascio di enzimi intracellulari ad una data energia immessa. *Save et al. (1994)* hanno effettuato un confronto tra l'efficienza energetica sul rilascio di proteine per tre strumentazioni:

- la cavitazione idrodinamica, cavitazione generata da una brusca accelerazione dell'acqua;
- il *mixer blender*, un agitatore meccanico;
- l'ultrasonificazione, cioè la generazione di vibrazioni meccaniche attraverso l'utilizzo di onde ultrasoniche.

I risultati hanno indicato che l'energia richiesta per la cavitazione idrodinamica è più bassa di più di due ordini di grandezza a parità di proteine rilasciate, rispetto agli altri metodi. In termini quantitativi, l'energia utilizzata per ottenere lo stesso livello di proteine da una sospensione di lieviti è stata: 20,7 J/ml per cavitazione idrodinamica, 1500 J/ml per ultrasonificazione e 800 J/ml per il *mixer blender* (*Garofano, 2016*).

#### 4.6.3. Effetto di altri disinfettanti in combinazione con la HC

L'efficienza della HC può essere migliorata combinando il processo con altri biocidi chimici quali ossido di cloro ( $ClO_2$ ), ipoclorito di sodio ( $NaClO$ ), perossido di idrogeno ( $H_2O_2$ ) e ozono ( $O_3$ ), in maniera simile a quanto visto nel Paragrafo 4.5.6 relativo al trattamento delle acque reflue. L'effetto sinergico è garantito dal fatto che gli effetti della HC possono rendere la parete cellulare più permeabile a questi ossidanti. *Jyoti e Pandit (2003)* hanno studiato l'effetto della combinazione di HC con  $H_2O_2$  e  $O_3$  sulla disinfezione dell'acqua: è stata ottenuta una riduzione massima dell'83% sul totale dei coliformi usando una piastra a fori multipli ( $\alpha=4$ ) con un trattamento di 60 minuti ad una pressione operativa di 5,17 bar. La riduzione del contenuto di coliformi è stata ulteriormente aumentata rispettivamente al 90 ed al 94% combinando la HC con 5 mg/l di  $H_2O_2$  e 2 mg/l  $O_3$ . L'effetto sinergico ha migliorato la generazione di radicali idrossilici ed ha anche accelerato il tasso di decomposizione di perossido ed ozono in soluzione, migliorando l'efficienza della disinfezione. *Wang et al. (2015)* hanno scoperto che sostanze come  $ClO_2$  e  $NaClO$  vengono meglio utilizzate durante la disinfezione in presenza di HC. Si è constatato che l'efficienza di disinfezione è aumentata dal 67,3%, ottenuto usando solo la HC, al 98% in combinazione con  $ClO_2$ , per un processo di 60 minuti. È interessante osservare come sia stata ottenuta una maggiore efficienza con una concentrazione minore di  $ClO_2$ : utilizzando 0,5 mg/l è stata ottenuta una disinfezione pari a quasi l'82%, mentre con una dose di 1 mg/l è stato ottenuto un 78%, con una durata del trattamento di 30 minuti in entrambi i casi. Quando la HC è stata combinata con 2 mg/l di  $NaClO$ , la disinfezione è aumentata fino al 60%, in netto miglioramento rispetto al 43 e 40% ottenuti utilizzando rispettivamente solo HC e solo  $NaCl$ , in 30 minuti di trattamento. *Badve et al. (2015)* hanno studiato la combinazione di HC e  $NaClO$  per la disinfezione dell'acqua marina, osservando che la percentuale di disinfezione è passata dal 45%, ottenuto usando solo la HC, al 100% usando 5

ppm di *NaClO* in combinazione con la HC. Dunque, questa tecnica, in sinergia con altri biocidi, può aumentare l'efficacia della disinfezione e ridurre il consumo di sostanze chimiche. Rimane necessario tuttavia ottimizzare il processo e le dosi di biocidi da utilizzare, a seconda della sostanza inquinante trattata.

#### 4.6.4. Industri alimentare

I recenti sviluppi nell'industria alimentare sono focalizzati sull'ottenimento di prodotti alimentari di alta qualità, puliti e freschi come da richiesta dei consumatori. Le tecnologie più avanzate si indirizzano verso l'aumento della stabilità e della durata dei prodotti alimentari, una bassa carica batterica residua, condizioni di lavorazione favorevoli, tempi di lavorazione inferiori e costi ridotti, con un uso minimo di conservanti chimici. Molte tecniche, tra le quali il metodo di pastorizzazione termica, vengono utilizzate per l'inattivazione microbica nei prodotti alimentari. Tuttavia, questi metodi termici non sono in grado di prevenire la perdita di vitamine e sapori (*Milly et al., 2007; Mohammadi et al., 2014; Samani et al. 2015*). Per superare gli effetti negativi dei metodi termici, sono state messe a punto tecniche che utilizzano un'elevata pressione idrostatica, campi elettrici oppure la cavitazione per trattare soprattutto alimenti allo stato liquido (*Samani et al., 2015*). Nell'ultima decade, la cavitazione è risultata essere una tecnica efficiente grazie ai suoi numerosi vantaggi. Secondo la letteratura esistente, la cavitazione, non solo ha distrutto i microrganismi presenti negli alimenti, ma anche eliminato la necessità di ulteriori trattamenti termici che possono alterare le proprietà organolettiche. Numerosi studi hanno riportato l'uso di ultrasuoni (AC) per la pastorizzazione di cibi fluidi (*Chandrapala et al., 2012; Mohammadi et al., 2014; Samani et al., 2015*), ma la sfida principale per l'AC è il suo impiego su scala commerciale.

Nell'ultimo decennio, la HC è risultata essere una tecnica più efficiente rispetto alla AC e ad altri metodi convenzionali per il trattamento degli alimenti liquidi. Nella HC il processo generale si svolge senza necessità di riscaldamento esterno e la resa desiderata può anche essere raggiunta a pressioni operative inferiori rispetto ai dispositivi ad alta pressione o agli omogeneizzatori utilizzati per l'inattivazione dei microbi. I meccanismi coinvolti nell'inattivazione o nella distruzione dei microrganismi sono gli stessi discussi precedentemente: stress fisici indotti, onde d'urto ad alta pressione e condizioni di alta temperatura comportano la completa inattivazione del contenuto batterico negli alimenti (*Albanese et al., 2015*). La HC può essere quindi applicata efficacemente per la sterilizzazione dei cibi, per aumentarne la stabilità e la durata di conservazione, per garantire il benessere e la sicurezza del consumatore. *Milly et al. (2007)* hanno studiato l'applicazione di un reattore cavitazionale per la sterilizzazione di diversi alimenti liquidi come il succo di mela, il latte scremato ed il succo di pomodoro. Il reattore è composto da due cilindri concentrici, di cui quello esterno fermo e quello interno rotante. Il liquido scorre nella regione tra i due cilindri e passa attraverso i fori del cilindro interno durante la rotazione (Figura 4.22). A causa della rotazione ad alta velocità, vengono generate localmente condizioni estreme di alta

temperatura e pressione, a testimonianza di una cavitazione intensa. Questo meccanismo è risultato essere responsabile dell'inattivazione e del deterioramento dei microrganismi nocivi. La HC è risultata adeguata per la completa inattivazione di cellule di lievito, batteri e spore batteriche altrimenti resistenti al calore. È stato osservato che l'inattivazione di vari microrganismi presenti nel succo di mela, come il *Lactobacillus plantarum*, il *Lactobacillus Sakei*, lo *Zygosaccharomyces bailii* e la *ascospore*, si verificava per velocità del rotore di 3.000 e 3.600 rpm, con temperature di uscita rispettivamente di 65,6°C e 76,7°C. L'inattivazione dei bacilli presenti nel succo di pomodoro è stata ottenuta per velocità di 3.000 e 3.600 rpm con temperature di uscita di 93,3°C e 104,4°C. In conclusione lo studio ha evidenziato che la HC è risultata essere una tecnica efficiente per la sterilizzazione degli alimenti fluidi senza richiedere ulteriori processi termici.

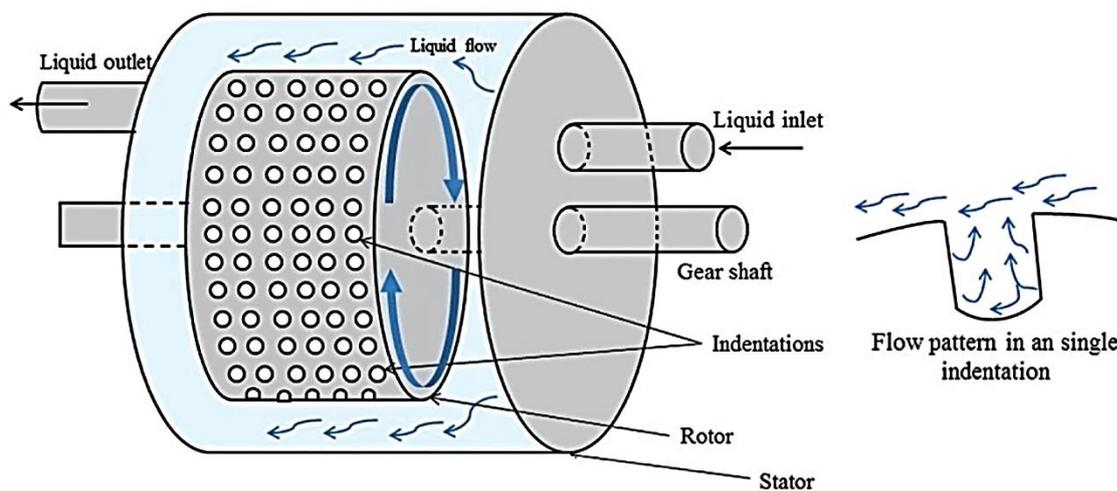


Figura 4.22 – Schema di un reattore cavitationale utilizzato nell'industria alimentare (Carpenter et al., 2017)

Milly et al. (2008) hanno studiato l'uso di onde di shock generate da un reattore di HC per l'inattivazione del *Saccharomyces cerevisiae* nel succo di mela. Inizialmente è stata osservata un'inattivazione trascurabile di ad una temperatura di lavorazione pari o inferiore a 54,4°C. Tuttavia, a temperature più elevate, tra 65,6°C e 76,7°C, a 3.000 e 3.600 rpm, l'inattivazione è aumentata considerevolmente. Oltre a ciò, tale metodo è risultato essere più efficiente rispetto al processo di pastorizzazione convenzionale; l'energia richiesta è stata quantificata in 173 kJ/kg, mentre per un processo convenzionale ci attestiamo attorno ai 258 kJ/kg. Al termine dello studio è stato possibile affermare come un reattore basato sulla HC possa essere facilmente scalato a livello industriale per la pastorizzazione di prodotti alimentari, con un significativo risparmio energetico ed una elevata efficienza (nel range 55% - 84%). Recentemente, Crudo et al. (2014) hanno studiato l'applicazione di HC e AC per il trattamento del latte vaccino fresco. Il trattamento con HC è stato eseguito utilizzando un reattore basato su un Venturi e con dispositivi a piastra forata, in presenza di  $CO_2$ . A 6 bar di pressione in ingresso, la distruzione del contenuto batterico totale è stata dell'88%, ottenuta utilizzando un orifizio rettangolare con area di flusso di 1,17 mm<sup>2</sup>, superiore al 75% ottenuto utilizzando un Venturi a sezione circolare con la medesima sezione trasversale. La configurazione con piastra

forata è risultata essere più efficiente del dispositivo basato sul Venturi grazie alla sua capacità di generare condizioni di collasso maggiormente energetiche. Inoltre, la massima inattivazione microbica è stata raggiunta dalla AC, pari al 95% in 10 minuti di trattamento, utilizzando una potenza di 370 W. Tuttavia, in base al consumo di energia, la HC è risultata essere più efficiente della AC, con una densità di potenza richiesta di soli 2 W/l rispetto ai 1194 W/l. Anche in questo caso è stata sottolineata l'applicabilità del metodo su scala industriale.

#### **4.6.5. Distruzione delle cellule microbiche**

Come risultato di varie attività umane, il rilascio di quantità eccessive di composti di azoto e fosfati nell'ambiente acquatico ha portato in numerosi casi alla formazione di alghe nei corpi idrici superficiali (*Wang et al., 2013*). Problemi comuni causati da queste escrescenze cianobatteriche includono il rischio di presenza di sottoprodotti di disinfezione, un alto livello residuo di coagulanti, un gusto indesiderabile, un odore sgradevole ed un contenuto organico elevato nelle acque superficiali (*Li et al. 2014*). Questi processi biochimici contaminano l'acqua, rendendola inadatta all'approvvigionamento umano; è pertanto necessario evitare che questa tipologia di bio-inquinanti comprometta le risorse idriche. La distruzione cellulare è uno dei passi importanti adottati nei processi riguardanti la produzione di enzimi intracellulari da microrganismi (*Balasundaram e Pandit, 2001*). Esistono numerosi metodi chimici e fisici usati per la distruzione di questo tipo di sostanze inquinanti (*Jyoti e Pandit, 2001, 2003*). I primi includono l'aggiunta di prodotti chimici come  $Cl$ ,  $H_2O_2$ ,  $O_3$  ed altri biocidi e sono efficaci nella disinfezione dell'acqua generando tuttavia sottoprodotti indesiderabili che possono essere in una certa misura pericolosi o tossici. Dall'altro lato, i metodi fisici, quali l'omogeneizzazione ad alta velocità ed altre tecniche cavitazionali, risultano essere più sicuri rispetto ai metodi chimici (*Jyoti e Pandit, 2001, 2003*). La maggior parte dei metodi fisici necessitano di una grande quantità di energia se paragonati a quelli chimici; tra tutte le tecniche, la HC è quella con il maggiore potenziale per un'applicazione su larga scala, anche dal punto di vista economico – energetico (*Save et al., 1994; Jyoti and Pandit, 2001*).

Come riportato da *Ricucci, (2017)*, alcune specie di microorganismi si possono agglomerare in *cluster* (Figura 4.23). Il *cluster* è un raggruppamento di batteri, di forme e composizioni varie, in cui i microrganismi più esterni fungono da barriera protettiva contro i biocidi, garantendo una maggiore sopravvivenza rispetto alle cellule isolate.

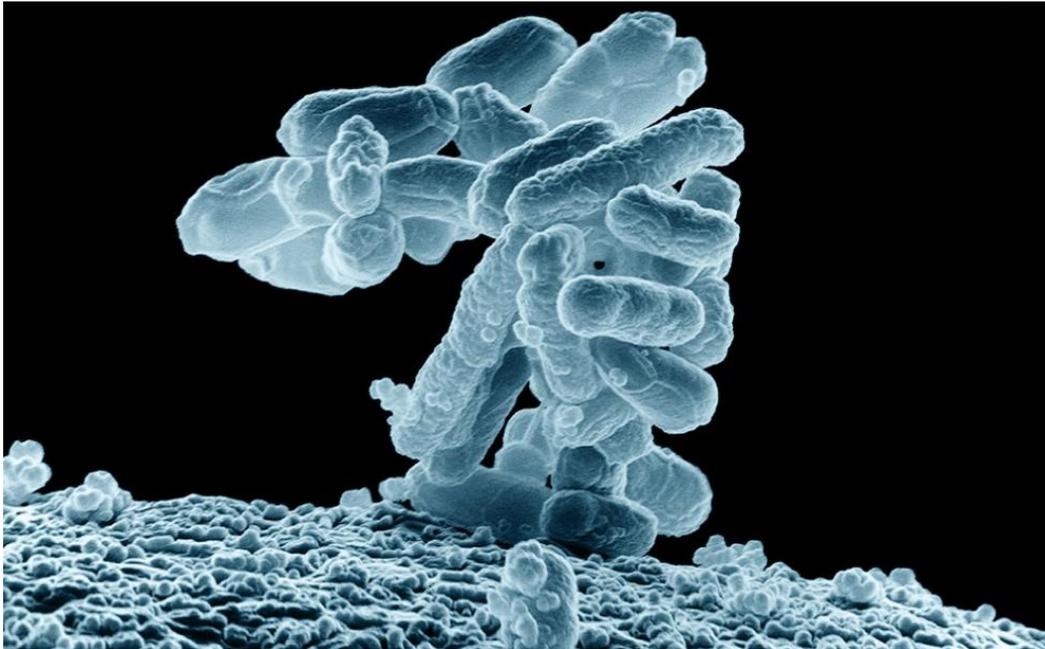


Figura 4.23 – Cluster di *Escherichia coli* ingrandito 10.000 volte al microscopio elettronico  
(Fonte: <http://sciencenewsjournal.com/>)

Il trattamento chimico dei cluster è efficiente solo sui batteri che si trovano sulla superficie, ma non intacca le cellule più interne. Da queste considerazioni, è stato necessario sviluppare tecniche alternative di disinfezione. La cavitazione, a causa dei suoi effetti multipli in termini di produzione di radicali e generazione di stress meccanici, turbolenza e *hot spots* localizzati, offre una promettente alternativa tra le tecniche di disinfezione, considerando in particolare l'effetto sinergico che si può ottenere con i disinfettanti. Una volta che questi cluster di batteri vengono "spacchettati", grazie all'azione della HC, l'efficienza dei biocidi aumenta (Joyce *et al.*, 2003); inoltre il gradiente di pressione generato favorisce la penetrazione degli ossidanti attraverso la membrana cellulare dei batteri, intensificando l'effetto. È stato osservato che gli effetti meccanici della cavitazione sono i maggiori responsabili per la disinfezione dei batteri; gli effetti chimici e termici giocano solo un ruolo di supporto (Mason *et al.*, 2003).

La HC risulta una valida alternativa ai biocidi in questo campo di applicazioni a causa dei suoi effetti chimici e meccanici indotti (Gogate e Kabadi, 2009; Mezule *et al.*, 2009): mediante l'azione di onde d'urto ad alta pressione, getti liquidi ad alta velocità e *hot spots* con elevate temperature localizzate, oltre ad altri effetti cavitazionali quali elevati sforzi di taglio, la HC provoca in molti casi la morte degli agenti microbici, batteri e virus. Contemporaneamente, i radicali  $\cdot OH$  altamente reattivi prodotti durante la HC svolgono un'elevata reazione ossidativa sugli organismi, contribuendo a disinfettare l'acqua. Il meccanismo della rottura delle pareti cellulari è il fenomeno chiave per l'inattivazione dei microrganismi. L'implosione asimmetrica delle cavità sulla superficie dei microrganismi rompe la parete cellulare e ne inibisce la crescita (Sawant *et al.*, 2008). Sawant *et al.* (2008) hanno sviluppato un modello matematico che mette

in correlazione l'estensione della distruzione cellulare con la resistenza della parete cellulare e le configurazioni geometriche e operative del dispositivo cavitante. Il modello aiuta a quantificare lo stress necessario per la rottura della parete cellulare. Come mostrato nell'Eq. (4.4), il tasso di rottura delle cellule ( $X$ ) è una funzione della forza della parete cellulare ( $S_{cell}$ ), del numero di cavitazione ( $\sigma_v$ ), del numero di cavitazione soffocata ( $\sigma_{CN}$ ), del diametro del foro ( $d_0$ ), del perimetro del foro ( $P_h$ ) e dell'area della condotta ( $A_p$ ):

$$X = K e^{\frac{-S_{cell}}{\Delta P_{cavity}}} e^{\left(\frac{\sigma_{CN}}{\sigma_v}\right)^A} \left(\frac{P_h X 0,07 d_0}{A_p}\right)^B \quad (4.4)$$

dove  $A$  e  $B$  sono esponenti. Dall'equazione si può osservare che l'entità della distruzione cellulare è più elevata al crescere del perimetro dei fori e ad un numero di cavitazione inferiore. Per questo motivo la distruzione cellulare può essere controllata variando la pressione operativa, il numero di cavitazione e geometria del dispositivo cavitante. *Arrojo et al. (2008)* hanno riportato l'uso di diversi dispositivi venturi e di piastre forate per l'inattivazione di *Escherichia coli*. Sono state utilizzate per la sperimentazione tre piastre forate con valori  $\alpha$  diversi (0,8, 2 e 4), ma con stessa area di flusso pari a 20 mm<sup>2</sup>. Il tasso di inattivazione degli *E. coli* è aumentato da 0,001 a 0,004 min<sup>-1</sup> con il passaggio di  $\alpha$  da 0,8 a 4 con una pressione di fuoriuscita di 1,5 bar: dai risultati precedenti si evince che un valore di  $\alpha$  più elevato favorisce l'inattivazione di *E. coli* prodotta essenzialmente da sforzi di taglio più elevati e da un numero maggiore di cavità. Tuttavia, la massima velocità di inattivazione, pari a 0,015 min<sup>-1</sup>, è stata ottenuta usando un Venturi avente area di flusso più piccola (10 mm<sup>2</sup>) rispetto ad altri utilizzati e alle piastre forate citate in precedenza.

*Sawant et al. (2008)* hanno studiato la disinfezione dell'acqua marina utilizzando diverse configurazioni di piastre forate e orifizi. È stato osservato che all'aumentare del valore di  $\beta$  delle piastre da 0,147 a 0,442, la distruzione di zooplancton è aumentata dal 79,5 all'81,7%, dimostrandosi quindi pressoché costante. A differenza dei risultati presentati nelle sezioni precedenti, dove è stata osservata una maggiore efficienza per bassi valori di  $\beta$  (*Senthikumar et al., 2000; Sivakumar e Pandit, 2002*), questi risultati hanno indicato che anche uno strozzamento minore, cioè un'area della sezione trasversale della gola più grande, può indurre effetti simili di cavitazione, i quali risultano sufficienti per uccidere i microrganismi costituenti lo zooplancton. È infatti bastata una condizione di cavitazione leggera per rompere la parete cellulare di molti microrganismi; quindi è consigliabile usare uno strozzamento ridotto, che dà un flusso maggiore e richiede meno perdite di carico. I numeri di cavitazione ottenuti sono stati 5,13, 3,94 e 14,68 per le piastre forate aventi valore di  $\beta$  rispettivamente di 0,147, 0,294 e 0,442. Quasi l'82% dello zooplancton è stato ucciso con un numero di cavitazione di 14,68; questo aspetto indica in particolare che l'acqua di mare conteneva molti nuclei pronti sotto forma di gas disciolti e particelle sospese, e quindi la cavitazione può essere attivata anche a un numero di cavitazione superiore, vale a dire maggiore di 1. *Balasundaram e Harrison (2011)* hanno dimostrato l'effetto di varie forme di geometria dei fori sul rilascio di prodotti

periplasmatici durante la distruzione delle cellule. È stato osservato che come un valore di  $\alpha$  aumentato da 0,8 a 2,0, porti ad un rendimento di prodotti periplasmatici aumentato dal 45% al 93%, con un numero di cavitazione sceso da 0,18 a 0,14. È stato inoltre osservato che la piastra con 44 fori circolari dava una quantità maggiore di periplasma rispetto alle piastre con orifizi di forma quadrata e rettangolare. Questo particolare aspetto dipende dal fatto che un numero maggiore di fori più piccoli genera un numero più alto di getti ad alta pressione, derivanti dal collasso di un numero più elevato di bolle.

*Wu et al. (2012)* hanno riportato l'effetto di tre diverse piastre forate con orifizi di 5, 10 e 12 mm sulla rimozione di alghe verdi – azzurre, note oggi come cianobatteri. Il reattore cavitazionale è stato posizionato in due posizioni diverse, nel tratto di aspirazione e mandata della pompa.



**Figura 4.24 – Struttura tipica dei cianobatteri, in un campione di alga verde – azzurra.**  
(Fonte: <https://www.lawrencehallofscience.org/>, University of California, Berkeley)

I numeri di cavitazione ottenuti sono stati 0,03, 0,08 e 0,54 con orifizi di 5, 10 e 12 mm in condizioni di aspirazione e 0,01, 0,06 e 0,43 in condizioni di scarico, per le stesse configurazioni. Quando le piastre sono state collocate nella linea di aspirazione, la rimozione massima di alghe, pari al 20%, è stata ottenuta con numero di cavitazione 0,54 (pressione di aspirazione di 0,063 MPa). Una rimozione massima del 13% è stata invece ottenuta ad numero di cavitazione di 0,43 (0,118 MPa di pressione di scarico) quando le piastre forate sono state collocate nella linea di scarico. Una più elevata rimozione delle alghe è stata ottenuta utilizzando fori di dimensioni maggiori (12 mm), cui corrisponde un valore di  $\beta$  più grande (0,36).



Figura 4.25 – Inquinamento da alghe verdi – azzurre presso la Bay of Quinte, Belleville, Ontario, Canada.  
(Fonte: <https://www.fishingbayofquinte.com>)

Wang *et al.* (2015) hanno studiato l'effetto della pressione di ingresso e di varie configurazioni di piastre a fori multipli sulla disinfezione di un pozzo d'acqua. È stato osservato che aumentando la pressione di esercizio da 0,35 a 0,45 MPa, l'efficienza di disinfezione è aumentata dal 57,3% al 67,3%, ad indicare un incremento dell'attività cavitazionale. La massima riduzione di microrganismi, circa il 68%, è stato ottenuto utilizzando la piastra con il più alto perimetro e numero di fori, con una pressione di 0,45 MPa ed un tempo di trattamento di 60 minuti. Quindi, si può concludere che, tra tutte le piastre forate, l'efficienza di disinfezione più elevata si ottiene con la piastra avente un gran numero di piccoli i fori .

In un altro studio, Badve *et al.* (2015) hanno riportato un confronto tra dispositivi basati su Venturi e su piastre forate per la disinfezione dell'acqua di mare. È stato osservato che incrementando la pressione di ingresso l'efficienza di disinfezione era aumentata fino ad un massimo, per poi diminuire. Utilizzando un Venturi a fessura è stata raggiunta un'efficienza massima di circa il 45%, con una pressione di ingresso ottimale di 3 bar, mentre circa il 50% ed il 20% sono stati ottenuti rispettivamente usando un Venturi a sezione circolare e una piastra forata, con una pressione di ingresso ottimale di 5 bar.

In generale, è stato possibile concludere che a differenza di altri processi come il trattamento delle acque reflue, l'emulsione, le reazioni di ossidazione e l'idrolisi dell'olio, che richiedono un numero di cavitazione molto basso (intervallo 0,1-0,3), la disinfezione microbica può essere eseguita a numeri di cavitazione relativamente più alti, cioè maggiori di 0,6. In alcuni casi anche un numero di cavitazione superiore a 1 può essere utilizzato per ottenere l'efficienza di disinfezione desiderata; tali casi risultano però influenzati in maniera significativa dai quantitativi di gas disciolti e di particelle sospese presenti nell'acqua. Può anche essere osservato che i dispositivi cavitazionali con area forata più elevata (valore di  $\beta$  superiore a 0,3) risultano migliori in termini di efficienza ed anche il valore  $\alpha$  dovrebbe essere massimizzato per una determinata area della sezione trasversale, mantenendo un numero elevato di fori più piccoli per ottenere una disinfezione maggiore.

Garofano (2016) propone un efficace elenco riassuntivo dei meccanismi con i quali la cavitazione disattiva i batteri presenti nell'acqua:

- Vortici cavitazionali: in accordo con quanto affermato da *Doulah e Hammond (1975)*, all'azione cavitazionale in un liquido corrisponde la formazione di vortici. Questi vortici hanno scale dimensionali differenti: quelli che presentano una grandezza superiore a quella dei microrganismi, ne causano il moto all'interno, mentre quelli di dimensioni minori deformano la parete cellulare (imprimono movimenti differenziali) dei microrganismi. Questi fenomeni comportano una sollecitazione della parete cellulare di diversa intensità: se la pressione esercitata sulla parete è superiore alla sua capacità di resistere, la parete si rompe. È stato osservato che la temperatura ha un piccolo effetto sul tasso di uccisione dei batteri; sono soprattutto le azioni meccaniche il motivo della distruzione dei microrganismi. Studi condotti da *Marr e Cota-Robles (1954)* supportano questa teoria, avendo rilevato che la disattivazione delle cellule batteriche di *Azotobacter*, mediante energia ultrasonora, è principalmente il risultato dell'azione di forze meccaniche piuttosto che dei prodotti di reazione chimici (radicali  $\cdot OH$ ).
- Elevati gradienti di pressione: variazioni nette e sostanziali di pressioni danneggiano la struttura del batterio facilitando la sua distruzione.
- Micro-getti ad alta velocità: quando una bolla collasa vicino ad una superficie solida o ad un batterio, questa implode in maniera asimmetrica. Si forma un micro-getto liquido dalla parte opposta della resistenza meccanica (solida) che penetra attraverso la bolla a grandissima velocità (circa 250 mil/h).
- Sforzi di taglio delle onde d'urto: le onde d'urto, a seguito dell'implosione della cavità, sono responsabili della nascita di *sforzi di taglio (Thacker, 1973)*. Questa teoria è supportata dagli studi di *Hughes e Nyborg (1962)*: essi hanno notato che la rottura della parete cellulare non è causata direttamente dal collasso delle bolle bensì dall'azione di taglio e dai vortici turbolenti creati come conseguenza del collasso.
- Effetti chimici: il collasso della bolla porta alla formazione di *hot spots* in cui si raggiungono temperature e pressioni elevatissime. Queste condizioni estreme, soprattutto le elevate temperature, favoriscono la formazione di radicali liberi grazie alla rottura omolitica delle molecole. In generale, i radicali ossidrilici si formano in seguito a temperature di collasso superiori a 2500 K e, una volta generati, provvedono all'ossidazione dei composti organici (*Yasui et al. 2004*).
- Effetti termici: le alte temperature raggiunte dal collasso permettono la pirolisi/combustione di sostanze organiche volatili (*Leong et al 2011*).

- Rottura dei cluster batterici: la forte turbolenza esercitata può facilitare la disagglomerazione dei cluster batterici presenti nella soluzione, aumentando l'efficacia disinfettante (*Hua e Thompson, 2000*).
- Sonoluminescenza: è stato provato che le bolle di cavitazione, in condizioni estreme, emettono luce durante l'implosione; questo fenomeno può essere sfruttato in alcuni processi di decomposizione, ad esempio l'ossidazione del fenolo attraverso l'attivazione del catalizzatore  $\text{TiO}_2$  (*Ogi et al. 2008*).
- Processi di diffusione e mixing: vengono migliorati i fenomeni di miscelamento e di trasferimento di massa, spesso limitanti nelle applicazioni di trattamento chimico delle acque.
- Effetto sinergico con reattivi chimici: il forte gradiente di pressione generato dalla cavitazione facilita la penetrazione degli agenti ossidanti attraverso la membrana cellulare.



## 5. CASI STUDIO: ESPERIMENTI CON *ESCHERICHIA COLI* IN LETTERATURA

La disinfezione costituisce un passaggio essenziale nel trattamento delle acque sia per l'approvvigionamento idrico umano che per gli utilizzi agricoli ed animali. Dopo che Pasteur e Koch formularono la teoria delle malattie dovute ai germi, nel 1881 Koch stesso scoprì le proprietà battericide della clorazione: ciò segnò l'inizio delle tecnologie di disinfezione. L'uso di tecnologie alternative per la disinfezione intende superare i punti deboli dei metodi convenzionali: i biocidi chimici sono generalmente efficaci e relativamente economici, ma possono generare pericolosi sottoprodotti organici, specialmente nei processi di clorazione.

La presenza di microrganismi patogeni nell'acqua potabile rappresenta una minaccia per la salute umana e animale; gli effetti della contaminazione batterica sull'uomo possono variare da una malattia di poco conto fino a conseguenze fatali (OMS, 2005). La più alta percentuale di morti legati all'acqua contaminata, così come i numeri assoluti più elevati, si verifica in Africa ed in alcune regioni del sud-est asiatico. La maggior parte delle morti per complicanze gastrointestinali in tutto il mondo (88%) sono causate da acqua non sicura e da scarsa igiene (WHO, 2014). Un'importante quota del carico totale di malattie a livello globale, quantificabile in circa il 10%, potrebbe essere prevenuto da miglioramenti nell'ambito della potabilizzazione dell'acqua, dell'igiene e della gestione delle risorse idriche (Prüss-Üstün et al., 2008). La qualità dell'acqua per il consumo umano può essere migliorata controllando l'inquinamento e aumentando l'efficacia di tecniche di disinfezione che eliminano gli organismi presenti (WHO, 1996).

La clorazione è uno dei metodi di disinfezione per l'acqua potabile più frequentemente applicati tanto nei paesi in via di sviluppo quanto in quelli più sviluppati. Tuttavia ha diversi svantaggi, quali la formazione di sottoprodotti di disinfezione cancerogeni (legati alla reazione del cloro con il materiale organico), l'alterazione del gusto e i problemi legati all'odore dell'acqua trattata (EPA, *Health Risks from Microbial Growth and Biofilms in Drinking Water Distribution Systems*, Washington, DC, 2002.) Inoltre, il cloro non è efficace contro i batteri che si trovano in sospensione o nei biofilm presenti nella maggior parte dell'acqua nelle reti di distribuzione. La clorazione non sempre induce danni fisiologici ai microrganismi e quindi molti di questi si sono adattati a dosi di disinfettante relativamente alte. (Saby et al., 1999; Pelletier et al., 1988). Sebbene la clorazione sia considerata relativamente economica e facile da usare, questo metodo di disinfezione richiede un attento controllo del dosaggio che aumenta i costi operativi e di manutenzione. Sorgono tuttavia numerosi problemi: le elevate esigenze di manutenzione delle strutture e, oltre agli aspetti sopracitati, gli scarichi chimici che possono compromettere anche la vita acquatica (Koivusalo et al., 1997).

Si rende quindi ancora necessario mettere a punto nuovi approcci per la disinfezione dell'acqua, che potrebbero risultare efficaci, sicuri, facili da eseguire e meno dispendiosi dal punto di vista economico. I metodi che inducono lesioni fisiologiche o che distruggono i microrganismi hanno un potenziale di applicazione nella disinfezione dell'acqua potabile, soprattutto nelle aree in cui non sono sempre disponibili operatori altamente qualificati. Gli ultrasuoni sono stati usati per decenni nei laboratori per la disintegrazione di cellule microbiche. Questo metodo, applicato in acqua, produce effetti di cavitazione acustica, vale a dire formazione artificiale di bolle di gas nel liquido che collassano con conseguente generazione di onde d'urto e microgetti ad alta velocità (fino a 400 m/s) nel fluido (Crum, 1988). D'altra parte, le tecnologie fisiche tendono ad essere più costose, come quelle basate su lampade UV, e risultano inefficienti in presenza di torbidità o coloranti che riducono l'efficienza dell'irradiazione. La cavitazione invece agisce come un biocida attraverso la chimica (generazione di radicali ·OH) e attraverso meccanismi fisici (onde d'urto, gradienti di pressione, forze di taglio, ecc.). Molti autori ne hanno proposto l'uso per la disinfezione come pre-trattamento piuttosto che come trattamento stesso. I batteri tendono a formare agglomerati in cui i microrganismi più esterni fungono da barriera protettiva contro i biocidi. La cavitazione produce un effetto di disgregazione, rompendo gli agglomerati attraverso le onde d'urto e isolando i batteri in maniera quasi individuale. Inizialmente, durante le prime fasi della cavitazione, gli agglomerati disgregati danno origine ad un evidente aumento della popolazione di batteri. Una volta che questi cluster di batteri vengono "spacchettati" l'efficienza dei biocidi aumenta (Joyce et al., 2003).

Save et al. per primi hanno osservato la rottura di cellule di lievito usando la cavitazione idrodinamica (HC). Secondo alcuni autori l'efficienza energetica della distruzione cellulare nella HC è almeno un ordine di grandezza al di sopra di alcune tecniche fisiche consolidate, come i metodi di mixer – blender, gli omogeneizzatori ad alta pressione e persino la cavitazione ultrasonica (Save et al., 1996; Balasundaram et al., 2001). Tuttavia, i costi dei metodi chimici come la clorazione o l'ozonizzazione sono di un ordine di grandezza inferiori (Jyoti e Pandit, 2001).

## **5.1. Cosa sono gli *Escherichia coli*: diffusione e pericolosità**

L'*Escherichia coli* (*E. coli*) è la specie di batterio più nota del genere *Escherichia*. Costituisce parte integrante della normale flora intestinale dell'uomo e di altri animali a sangue caldo. Nonostante la maggior parte dei ceppi di *E. coli* siano innocui, ne esistono tuttavia alcuni che mettono a rischio la salute umana causando disturbi di diversa gravità.

È un microrganismo a forma di bastoncino con estremità rotondeggianti, gram-negativo (Si definiscono gram-negativi quei batteri che rimangono colorati di rosa dopo aver subito la colorazione di Gram. Si contrappongono ai batteri Gram-positivi, che invece rimangono colorati in blu-violetto all'inizio del procedimento di Gram), aerobio e anaerobio facoltativo,

non sporigeno, può produrre pericolose tossine ed è capsulato. La temperatura di sopravvivenza va da 10-45 °C. Come tutti i gram-negativi possiede una sottile parete cellulare. Sono organismi peritrici, dotati di numerose ciglia disposte lungo tutto il corpo. Il moto dei batteri è garantito dai flagelli, appendici cellulari sottili e allungate disposte in vario modo.

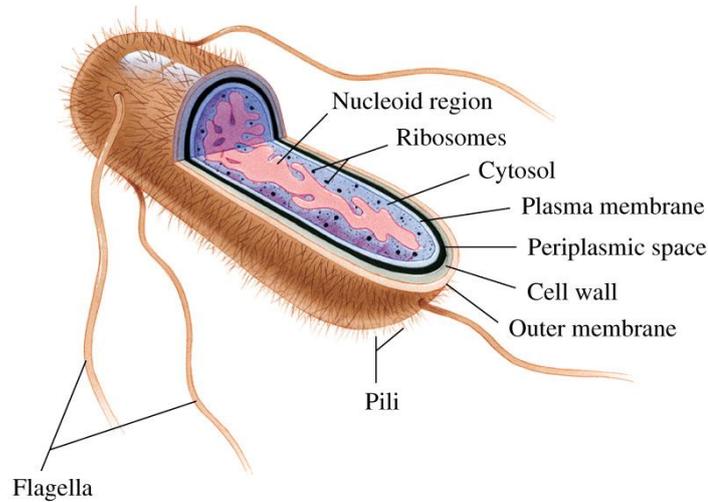


Figura 5.5.1 – Struttura cellulare di un *Escherichia Coli* (Fonte: <https://zemed.ru>)

L'infezione da *Escherichia coli*, che può provenire da acqua o cibi contaminati (carne, frutta e ortaggi), può risultare molto pericolosa soprattutto per i bambini piccoli e gli anziani, che possono sviluppare una forma di insufficienza renale pericolosa per la vita chiamata sindrome emolitico uremica. L'*E. coli* è sensibile al calore: la cottura dei cibi permette quindi di neutralizzarlo, mentre per l'inquinamento delle acque è necessario l'utilizzo di biocidi. I principali sintomi dell'infezione sono diarrea, a volte grave ed emorragica, crampi addominali, nausea e vomito (<http://www.humanitas.it>, *Humanitas Research Hospital*).

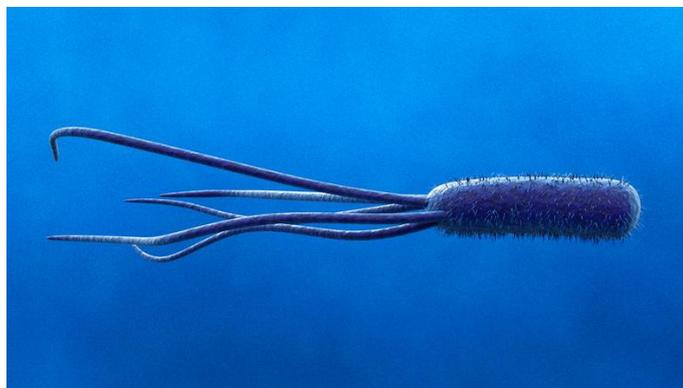


Figura 5.2 – Immagine di un *Escherichia Coli*, caratterizzato dalla presenza dei pili lungo il corpo del batterio e dai lunghi flagelli che ne permettono il moto (Fonte: <https://www.farmacoecura.it>)

Come precedentemente affermato, gli *E. coli* risiedono normalmente nel tratto digerente delle persone sane. Tuttavia, alcuni ceppi hanno acquisito geni che consentono loro di causare infezioni in diverse parti del corpo, più comunemente delle vie urinarie. Gli *E. coli* sono la causa più comune di infezione della vescica nelle donne. Questi batteri possono anche provocare infezione della ghiandola prostatica (prostatite), della cistifellea, infezioni che si sviluppano dopo un'appendicite o diverticolite, infezioni di ferite (comprese quelle da intervento chirurgico), delle piaghe da decubito e dei piedi nei soggetti diabetici, polmonite, meningite nei neonati e infezioni del torrente ematico. Inoltre, se l'intestino è lacerato o danneggiato, per esempio a causa di un trauma o di una malattia, questi batteri possono causare infezioni anche alle strutture anatomiche adiacenti, che non possiedono difese specifiche; gli antibiotici possono curare efficacemente le infezioni da *E. coli* esterne al tratto digerente e la maggior parte delle infezioni intestinali.

Un particolare ceppo produce una tossina che causa brevi episodi di diarrea acquosa. Questo disturbo, chiamato comunemente diarrea del viaggiatore, solitamente si presenta nei viaggiatori che consumano acqua o cibo contaminati in zone in cui questi non risultano adeguatamente purificati, puliti o cotti. Si possono prescrivere specifici farmaci, quali la loperamide, per rallentare il passaggio del cibo attraverso l'intestino e, quindi, facilitare il controllo della diarrea. Questi farmaci non vengono però utilizzati in presenza di febbre o sangue nelle feci, né in bambini di età inferiore a 2 anni. Se la diarrea è di entità da moderata a grave, per risolvere più rapidamente i sintomi vengono solitamente somministrati antibiotici (come azitromicina, ciprofloxacina o rifaximina). Se la diarrea è accompagnata da febbre o è di tipo emorragico, si rende necessario un consulto medico (*Bush e Perez, <https://www.msmanuals.com>, Merck & Co., Inc.*).

Alcuni ceppi di *E. coli* producono una tossina che danneggia il colon e provoca una grave infiammazione (colite). Nel Nord America, il più comune di tali ceppi si chiama *E. coli O157:H7*, ma ne esistono più di altri 100, a volte collettivamente indicati come *E. coli* enteroemorragici. Nelle infezioni dovute a *E. coli O157:H7* e altri *E. coli* enteroemorragici, i sintomi iniziano dopo circa 3 giorni dall'esposizione e si manifestano come gravi crampi addominali e diarrea acquosa, che può diventare emorragica entro 24 ore. Poiché l'infezione viene facilmente trasmessa, i pazienti devono essere ricoverati in ospedale ed isolati. La diarrea si risolve spontaneamente nell'85% dei casi, solitamente in 1-8 giorni. Tuttavia, circa 1 settimana dopo l'esordio della sintomatologia, in una percentuale di casi variabile dal 5% al 10% (soprattutto in bambini di età inferiore a 5 anni e adulti di età superiore a 60 anni), si sviluppa la sindrome emolitico-uremica. In questa sindrome, i globuli rossi vengono distrutti (emolisi) e si verifica un'insufficienza renale, che provoca un accumulo di sostanze tossiche nel sangue (uremia). Questa complicanza è una causa comune di malattia renale cronica nei bambini. Nell'immediato i soggetti vengono ricoverati in un'unità di terapia intensiva e possono essere sottoposti a emodialisi. L'infezione da *E. coli O157:H7* può causare il decesso, soprattutto nelle persone anziane, a prescindere dal fatto che si sviluppi o meno una sindrome emolitico-uremica. Molte altre infezioni da *E. coli*, di solito della vescica o altre infezioni delle

vie urinarie, vengono trattate con antibiotici; tuttavia molti batteri, soprattutto quelli acquisiti all'interno di strutture sanitarie, risultano resistenti ad alcuni antibiotici, complicando la somministrazione di cure.

Anche in Europa le infezioni da *E. coli* sono comuni. Nel 2011 si è sviluppata un'epidemia, circoscritta all'area di Amburgo, in Germania, il cui focolaio è stato localizzato nelle deiezioni dei bovini che avrebbero contaminato la falda acquifera, compresa l'acqua usata per irrigare i campi e, in seconda battuta, sarebbero serviti come fertilizzanti. L'epidemia ha provocato oltre 2.400 contagi e quasi 40 decessi. Pochi mesi dopo un'infezione alimentare, che ha provocato il ricovero di sette bambini francesi, si è sviluppata nella zona di Lille. L'alimento contaminato questa volta è risultato essere la carne e, con una certa rapidità, è stato individuato il focolaio negli hamburger prodotti da un'azienda francese e distribuiti da una nota catena di supermercati ([www.fondazioneveronesi.it](http://www.fondazioneveronesi.it)). Anche le carni crude o mal cotte possono infatti veicolare i batteri.

Quindi, nonostante gli *E. coli* siano una delle specie principali di batteri che vivono nella parte inferiore dell'intestino degli animali a sangue caldo (uccelli e mammiferi, incluso l'uomo) e siano necessari per la digestione corretta del cibo, la loro presenza nei corpi idrici segnala le cosiddette condizioni di fecalizzazione e risultano essere il principale indicatore di contaminazione fecale, insieme con gli enterococchi. Il numero di cellule di *E. coli* nelle feci che un umano espelle in un giorno va da 10 a 100 milioni di unità formanti colonia (UFC) per grammo di feci (*Ruppé et al., 2013*). Trattandosi quindi di un batterio molto comune e largamente studiato, è stato deciso di utilizzarne opportuni ceppi forniti dal Centro Ricerche SMAT per valutare l'efficienza dell'impianto di disinfezione.

È stato inoltre ritenuto opportuno valutare studi simili già presenti in letteratura. Numerosi gruppi di ricerca hanno affrontato lo studio della cavitazione idrodinamica applicandola ad acqua contaminata da *E. coli*. A tal proposito si fornisce di seguito una panoramica degli esperimenti più significativi dal punto di vista della configurazione impiantistica utilizzata e dei risultati ottenuti, in modo da costituire un robusto metro di paragone con lo studio oggetto di tesi.

## 5.2. Arrojo et al., 2007

### 5.2.1. Effetti fisici e chimici della HC

Gli effetti fisici e chimici causati dalla HC sono di solito di difficile caratterizzazione. Gli effetti fisici della cavitazione (cioè l'intensità della cavitazione) dipendono in modo critico dalle forze inerziali durante il collasso delle bolle. Studi teorici hanno rivelato che gli effetti inerziali (e quindi l'intensità della cavitazione) aumentano in maniera importante con il parametro  $R_{max}/R_0$ , rapporto tra il raggio massimo raggiunto dalla bolla e il raggio iniziale della stessa, e con la velocità del recupero di pressione. Quindi, promuovendo la crescita delle bolle ed il veloce recupero della pressione aumenta l'intensità della cavitazione. D'altra parte, al fine di valutare gli effetti chimici generati dalla cavitazione nella fase liquida, deve essere presa in considerazione la diffusione dei radicali  $\cdot OH$ . Questa è favorita da bolle più piccole e collassi più veloci, facilitati nel caso di piastre forate; pertanto le configurazioni ottimali per l'ottenimento di prodotti chimici e per la generazione degli effetti fisici non sono necessariamente simili. Studiando il degrado di sostanze con differenti volatilità (Arrojo e Benito, 2006), è stato osservato che la diffusione dei radicali  $\cdot OH$  nella fase liquida ha una forte dipendenza sulle scale temporali della pressione, cioè sul tasso di recupero della pressione. Un recupero più veloce della pressione porta ad un collasso più rapido delle bolle, permettendo ad alcuni radicali  $\cdot OH$  di essere rilasciati nella fase liquida prima di ricombinarsi o reagire con altri biocidi. Infatti, mentre le sostanze volatili degradano più velocemente con quelle configurazioni che generano bolle più grandi e nubi di cavitazione densa (ad esempio configurazioni che sfruttano tubi di Venturi), il degrado delle sostanze non volatili è favorito da design che promuovono anche il recupero veloce della pressione (ad esempio configurazioni con piastre multiforate). Gli effetti fisici della cavitazione possono essere caratterizzati attraverso le oscillazioni di pressione istantanee causate dall'implosione delle bolle o analogamente attraverso il suono generato dal fenomeno (Sharma et al., 1990).

### 5.2.2. Procedura sperimentale

Come mostrato in Figura 5.3, la HC viene generata facendo circolare il liquido in un circuito di cavitazione con le seguenti caratteristiche: un serbatoio da 60 L, una pompa centrifuga multistadio da 9 kW realizzata di acciaio inossidabile, tubi in PVC ed una camera di cavitazione con design flessibile. La camera di cavitazione, dove la HC viene originata, ha una sezione rettangolare e si compone di due travi in acciaio inossidabile, 2 finestre in metacrilato e profili in PVC che fungono sia da tubi Venturi che da piastre forate. Le misurazioni della pressione istantanea sono state eseguite al secondo. Gli Escherichia coli sono stati coltivati in 250 ml soluzione nutritiva (5 g/L di peptone + 1 g/L di glucosio + 2,5 g/L di lievito) a 37°C per un periodo di 48 ore, raggiungendo una concentrazione finale di circa  $1 \cdot 10^7$  CFU/mL. I batteri sono stati diluiti in 50 L di soluzione salina (1 g/L di NaCl in acqua deionizzata per prevenire la

citolisi) per raggiungere il valore di CFU/mL desiderato in ogni esperimento. Tutti gli esperimenti sono stati eseguiti con una potenza assorbita (pompa) di 5 kW (densità di potenza di 0,1 W/mL). Il conteggio delle CFU è stato eseguito su piastre di agar dopo 48 h a 37°C, utilizzando tre diverse livelli di diluizione (1:10, 1:100 e 1:1000), e con la raccolta di sei campioni per esperimento (0, 5, 15, 30, 60 e 120 min).

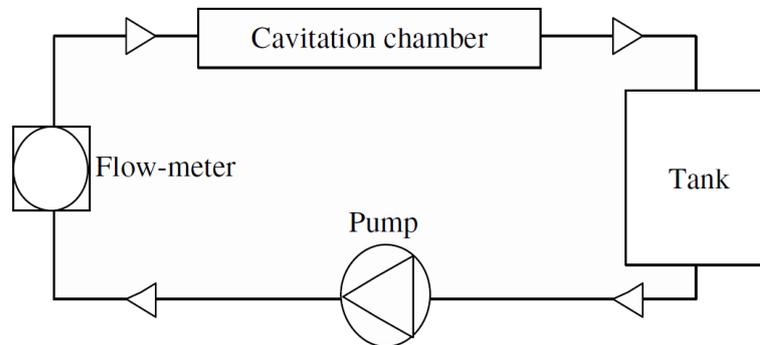


Figura 5.3 – Schema impianto utilizzato da Arrojo et al. (Arrojo et al., 2007)

### 5.2.3. Design della camera di cavitazione

Il design della camera di cavitazione ha una forte influenza sul processo. Le piastre forate, una configurazione relativamente comune in questo genere di dispositivi (Gogate et Pandit, 2000), costituiscono probabilmente il più semplice metodo per generare la HC e fondamentale consistono in una piastra con uno o più fori. Le tre configurazioni utilizzate in questo studio hanno approssimativamente la stessa sezione trasversale libera complessiva ( $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ ) distribuiti in un numero diverso di fori: un foro con un diametro di 5 mm (1x5), sei fori con un diametro di 2 mm (6x2) e 25 fori con un diametro di 1 mm (25x1). Le configurazioni con tubi di Venturi sono invece basate su una convergenza regolare seguita da una gola e da una divergenza liscia. In termini generali, questo significa un processo più efficiente dal punto di vista energetico e scale dei tempi più lunghe (bolle più grandi e collassi più lenti) rispetto alle piastre forate. Le tre configurazioni utilizzate in questo studio hanno una sezione minima del restringimento (gola) di  $4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$  (Venturi #1),  $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$  (Venturi #2) e  $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$  (Venturi #3) e un angolo di divergenza di  $10^\circ$ .

### 5.2.4. Configurazioni impiantistiche più efficienti

La capacità di inattivazione della HC è stata studiata variando tre parametri importanti: il design della camera di cavitazione, la pressione di scarico e la concentrazione dei microrganismi. Innanzitutto, sono stati testati i sei diversi modelli (tre piastre forate e tre tubi di Venturi) sopra descritti. In una seconda fase, quelli che sono risultati essere la miglior piastra forata ed il miglior tubo di Venturi sono stati studiati con diverse pressioni di scarico. Infine, la migliore configurazione è stata studiata con tre diverse concentrazioni di *E.Coli*. La Figura 5.4 mostra due esempi dell'evoluzione della concentrazione di *E.Coli* durante un processo con HC. L'effetto di declumping (spacchettamento, scissione) degli agglomerati di batteri è stato osservato nella maggior parte degli esperimenti attraverso una prima fase di aumento del CFU, che è durata 30 minuti per le piastre forate e 5 minuti per le configurazioni con Venturi (a differenza degli altri Venturi, il Venturi #3 non ha mostrato alcun aumento apparente).

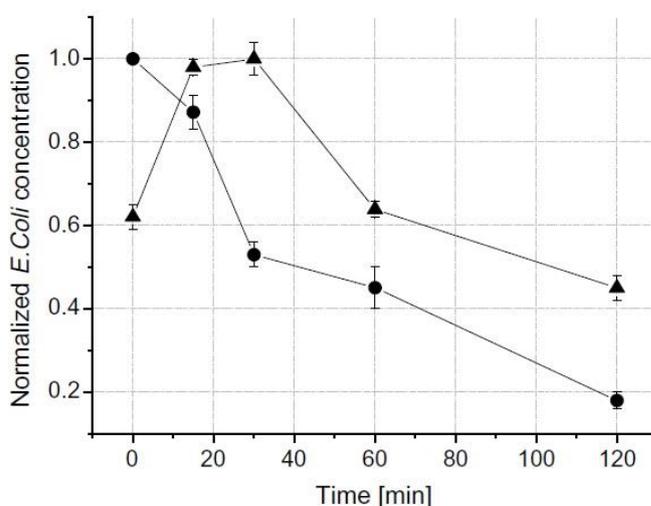


Figura 5.4 – Concentrazione normalizzata di *E. Coli* rilevata negli esperimenti con piastra 25x1 (triangoli) e Venturi #3 (cerchi) (Arrojo et al., 2007)

La Figura 5.5 mostra la costante velocità di inattivazione batterica durante un esperimento di 120 minuti, assumendo che la disinfezione segua una reazione di pseudo-primo ordine (cioè considerando il processo di rottura come reazione tra *E.Coli* e l'agente disinfettante in cui solo il primo cambia la sua concentrazione col tempo). Il comportamento dei tubi di Venturi sembra essere migliore di quello delle piastre forate. La prima ragione è che, per una data potenza immessa, la portata nei tubi Venturi risulta superiore a quella nelle piastre, causando un numero maggiore di cicli di cavitazione per unità di tempo. Tuttavia, la differenza nella portata di ciascuna configurazione (nell'ordine del 30% per il Venturi #1 e quasi trascurabile per Venturi #3) non spiega completamente le differenze osservate nelle quote di disinfezione. La portata nelle piastre è simile per ogni caso (circa 4 m<sup>3</sup>/h), quindi la velocità di flusso e la pressione minima sono simili. Tuttavia, quando il numero di fori aumenta e diminuisce la loro dimensione, l'inerzia dei getti ad alta energia diminuisce. Di conseguenza, questi getti decelerano di più rapidamente e il tasso di recupero della pressione aumenta. Alcuni autori

hanno osservato un degrado chimico massimo utilizzando fori più piccoli in piastre a più corone (Gogate et al., 2001). Probabilmente, come menzionato sopra, aumentando il tasso di recupero della pressione si accelera il collasso delle bolle che promuove la diffusione dei radicali  $\cdot\text{OH}$  nella fase liquida: pertanto potrebbero essere spiegati in questo modo i risultati migliori nelle piastre con fori più piccoli.

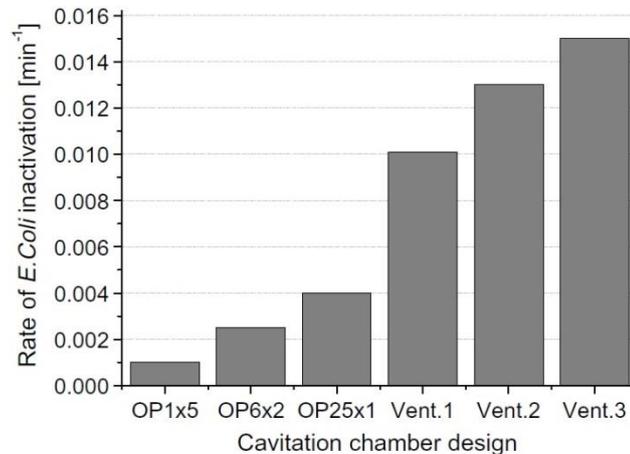
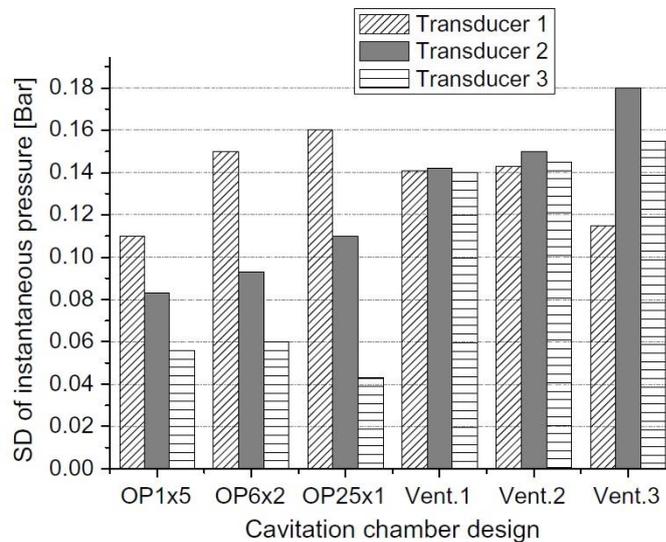


Figura 5.5 – Tasso di inattivazione di *E. coli* per diverse piastre forate e tubi di Venturi (concentrazione iniziale di 104 CFU/mL e pressione di scarico di 1,5 bar) (Arrojo et al., 2007)

Oltre ad aumentare la portata per una data potenza di ingresso, i tubi di Venturi tendono a dare origine a una nuvola cavitazionale più densa (più eventi di cavitazione per unità di tempo e bolle più grandi) a causa di un aumento del tempo disponibile per la crescita della bolla. In queste circostanze, le interazioni bolla-bolla e l'eccessiva dimensione della bolla potrebbero ostacolare sia la formazione di radicali  $\cdot\text{OH}$  che la loro diffusione nella fase liquida (Henglein, 1994). In effetti, i pochi studi fatti su questo argomento indicano che una densità moderata della nuvola di bolle, combinata con un rapido recupero della pressione (caso di piastre multiforate), può ottimizzare le reazioni chimiche al di fuori della bolla (Arrojo e Benito, 2006; Gogate e Pandit, 2005). Quindi, l'aumento delle percentuali di disinfezione nei tubi di Venturi non sembra essere causato da meccanismi legati ai radicali  $\cdot\text{OH}$ . La Figura 5.6 mostra l'ampiezza media dell'oscillazione istantanea della pressione, misurata da tre trasduttori di pressione situati all'interno del flusso, vicino alla nuvola di bolle che implode. Come sopra menzionato, l'oscillazione istantanea della pressione può essere usata per misurare l'intensità delle bolle implose durante la cavitazione, e quindi può essere considerata come un stima delle onde d'urto che danno origine alla rottura meccanica delle cellule. Il trasduttore #1 è situato immediatamente dopo la sezione minima (es. i fori nelle piastre e la gola nel tubo di Venturi), il trasduttore #2 e #3 si trovano rispettivamente a 5 a 10 cm a valle del primo trasduttore. Anche se le piastre multiforate mostrano intensità maggiori localizzate immediatamente dopo gli orifizi, la cavitazione è chiaramente concentrata intorno al primo trasduttore. Nei tubi di Venturi gli effetti meccanici della cavitazione sono estesi fino al terzo trasduttore (o persino più lontano), indicando una densa nube di cavitazione o un gran numero di eventi

cavitazionali. Le reazioni chimiche generate per cavitazione aumentano esponenzialmente con l'intensità e quindi un'intensa cavitazione localizzata risulterebbe generalmente più efficiente.



**Figura 5.6 – Ampiezza media dell'oscillazione di pressione istantanea a tre trasduttori di pressione consecutivi posizionati accanto alla nuvola di bolle, nella zona di implosione (5 cm di separazione tra i trasduttori) (Arrojo et al., 2007)**

I risultati ottenuti nelle Figure 5.5 e 5.6 rivelano alcune interessanti correlazioni tra i tassi di distruzione cellulare e oscillazioni di pressione istantanea. Il Venturi #3 raggiungere i migliori risultati, in linea con il grande shock di pressione osservato nei trasduttori 2 e 3. D'altra parte il confronto tra Venturi #1 e la piastra 25x1 rivela che gli E. coli sono più vulnerabili ad una cavitazione a bassa intensità estesa piuttosto che ad una cavitazione localizzata più intensa. Anche se questa osservazione sembra contraddire la teoria generale delle reazioni sonochimiche, è coerente con un processo in cui gli effetti meccanici delle onde d'urto sono più importanti dei meccanismi chimici che coinvolgono i radicali ·OH.

### 5.2.5. Influenza della pressione di scarico

Precedenti studi sulla disinfezione con HC generata da piastre forate rivelano un'efficienza crescente con una pressione di scarico maggiore (Joyti e Pandit, 2003). Come mostrato in Figura 5.7, le piastre multiforate dipendono in modo critico da questo parametro, e c'è persino un valore soglia sotto al quale non avviene alcuna disinfezione. Il comportamento delle configurazioni con Venturi è invece abbastanza diverso. A pressioni di scarico più elevate l'effetto è opposto. Va sottolineato che aumentando la pressione di scarico si promuove un recupero di pressione sempre più veloce, e quindi aumenta la violenza del collasso delle bolle. Tuttavia ciò causa anche una pressione minima che ostacola la crescita delle bolle più alta e fa diminuire il numero di eventi di cavitazione. Inoltre, per un dato apporto di energia la portata diminuisce e così anche il numero di cicli idrodinamici per unità di tempo. Il recupero della

pressione nelle piastre è fortemente inefficiente a causa della brusca divergenza dopo fori. Dall'altro lato, il recupero della pressione nei tubi Venturi è molto più efficiente e quindi la pressione di scarico è usata come mezzo per controllare la crescita eccessiva delle bolle. Come in precedenza spiegato, la diffusione dei radicali  $\cdot\text{OH}$  nella fase liquida è quasi trascurabile nei tubi Venturi, ma non nelle piastre multiforate. I risultati presentati in Figura 4.7 sono coerenti con questa ipotesi. Maggiori pressioni di scarico promuovono la disinfezione attraverso i radicali  $\cdot\text{OH}$  nelle piastre forate, aumentando la violenza del collasso delle bolle, ma ostacolano la crescita delle bolle e gli effetti meccanici nelle varie configurazioni di Venturi, a causa del minor numero di collassi. In altre parole, la disinfezione mediante radicale  $\cdot\text{OH}$  è promossa concentrando l'energia (anche a spese del volume di collasso generale) mentre gli effetti meccanici della cavitazione aumentano con il numero di eventi di cavitazione (a spese della violenza delle singole esplosioni).

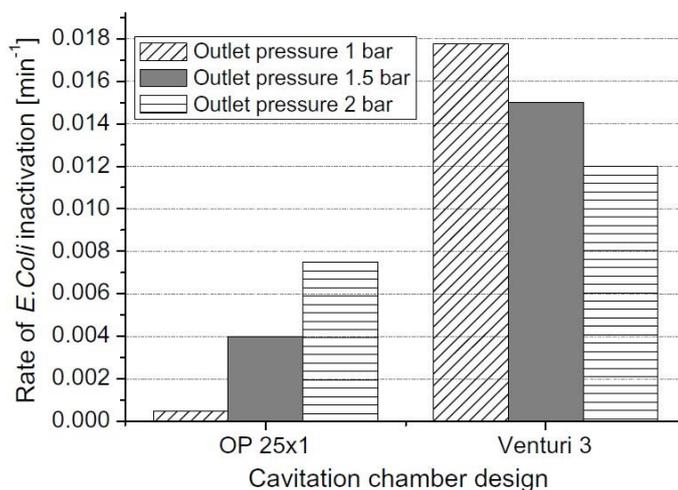
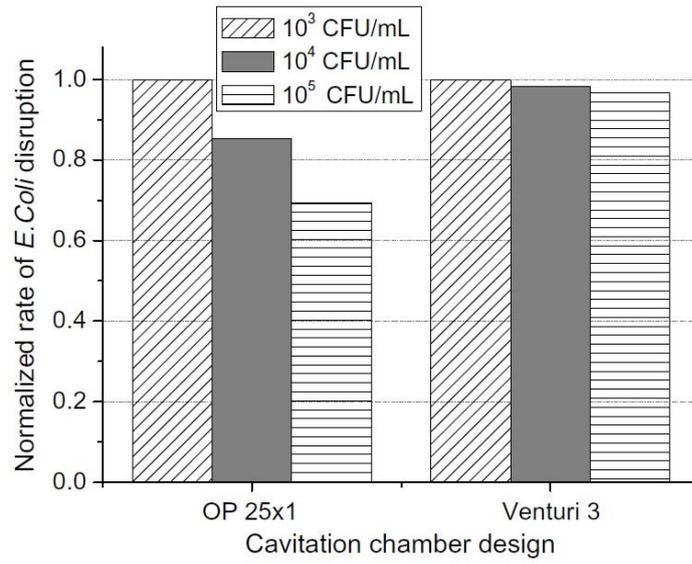


Figura 5.7 – Tasso di inattivazione di *E. Coli* per la piastra 25x1 e il Venturi #3, con differenti pressioni di scarico (Arrojo et al., 2007)

### 5.2.6. Influenza della concentrazione iniziale di CFU

Arrojo et al. hanno effettuato tre diversi esperimenti variando la concentrazione di *E. coli*. La Figura 5.8 mostra il tasso di inattivazione normalizzato (il valore 1 è equivalente al massimo tasso raggiunto per ogni configurazione). Il tasso si riduce moderatamente nel caso di piastra quando la concentrazione di *E. coli* aumenta, mentre rimane approssimativamente lo stesso per la configurazione Venturi #3. Questi risultati sono di nuovo coerenti con l'ipotesi precedente. Nelle piastre forate una parte della disinfezione è correlata alla generazione dei radicali  $\cdot\text{OH}$  e quindi, quando la concentrazione di *E. coli* aumenta, la concentrazione dei radicali agisce come fattore limitante del processo di disinfezione. D'altra parte, il comportamento delle configurazioni con Venturi rimane quasi inalterato, indicando che non ci sono reagenti limitanti e che in questo caso la rottura meccanica dei batteri gioca un ruolo fondamentale nel processo.



**Figura 5.8 – Tasso normalizzato di inattivazione degli *E. Coli* per la piastra 25x1 ed il Venturi #3, con concentrazione batterica iniziale differente (Arrojo et al., 2007)**

### 5.3. Mezule et al., 2009

La maggioranza degli studi precedenti a *Mezule et al.* si sono limitati alle analisi sulla culturabilità dei batteri (*Scherba et al., 1991; Arrojo et al. 2007 e 2008*) e non sono stati indagati altri stati metabolici in cui i batteri patogeni possono essere presenti nell'acqua potabile. *Kell et al., 1998* hanno evidenziato che i microrganismi sottoposti a stress possono entrare nello "stato attivo ma non coltivabile" (ANBC), a volte indicato anche come "vitale ma non coltivabile" (VNBC) (*Olivier, 2005*), dove le cellule non mostrano alcun potenziale per moltiplicarsi, ma i test di vitalità mostrano con certezza l'attività dei batteri. Quindi, oltre ai metodi di coltura tradizionalmente usati, tecniche diverse possono fornire informazioni più dettagliate sui cambiamenti di vitalità dei microrganismi durante la disinfezione. A tal proposito *Mezule et al.* utilizzano due specifici metodi di analisi: il DVC e il CTC. Il metodo DVC (Direct Viable count), basato sull'incubazione di campioni con agenti antimicrobici (nalidixico acido per *Escherichia coli*) e sostanze nutritive, dove l'acido nalidixico agisce come inibitore specifico della sintesi del DNA e impedisce la divisione cellulare senza influenzare le altre attività metaboliche cellulari (*Goss et al., 1964*). Il metodo CTC, invece, è basato sull'incubazione delle cellule con colorante redox CTC che in presenza di una catena di trasporto di elettroni funzionante agisce come accettore artificiale di elettroni, con conseguente formazione di cristalli fluorescenti insolubili all'interno delle cellule metabolicamente attive (*Rodriguez et al., 1992; Schauble et al., 1993; Bartosch et al., 2003*). L'obiettivo di questo studio è stato quello di determinare l'effetto della cavitazione idrodinamica sulla vitalità dei batteri nell'acqua potabile.

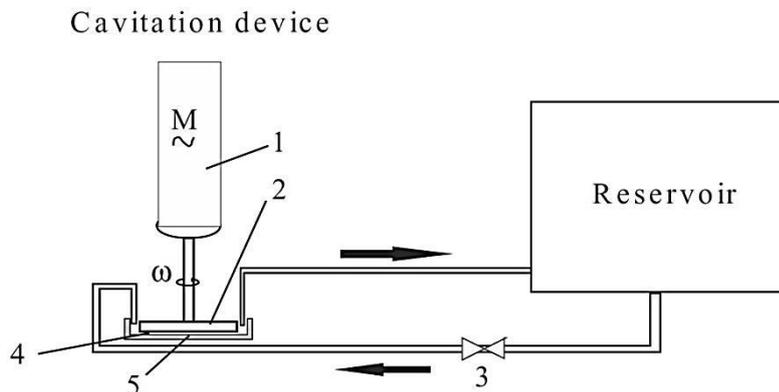
#### 5.3.1. Ceppi batterici utilizzati e preparazione dei campioni

Negli esperimenti di *Mezule et al.* sono stati utilizzati *E. coli* ATCC 25922 sviluppati in un brodo di cultura Luria-Bertrani (triptone 10 g/L, estratto di lievito 5 g/L, NaCl 10 g/L) ed incubati con agitazione costante (150 rpm) durante la notte a 37°C. La coltura notturna di *E. coli* è stata centrifugata a 3000 rpm per 10 minuti. Sono successivamente stati lavati due volte con tampone sterile con fosfato salino (7 mM di Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, 3 mM di NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, 130 mM di NaCl, pH 7,2) e risospesi in acqua distillata. Al fine di determinare il numero di cellule in sospensione in un piccolo volume (0,1-1 ml) il tutto è stato filtrato attraverso 25 filtri con pori di 0,2 µm di diametro (Anodisc; Whatman plc, Regno Unito) e fissato con il 3-4% di formaldeide per 15 minuti, lavato con acqua distillata, asciugato all'aria e colorato con 10 mg/ml di DAPI (40,6-diamidino-2-phenylindole, Merck, Germania) per 5 minuti. Il numero di cellule è stato determinato mediante microscopia a epifluorescenza (Es: 545 ± 30 nm; Em: 610 ± 75 nm, specchio dicromatico 565 nm, Leica DMLB, Germania). Quindi una concentrazione nota di cellule è stata aggiunta a 2 L di acqua preparata artificialmente (1 ml/L di soluzione salina AOC, contenente 4,55 g/L (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; 0,2 g/L KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>; 0,1 g/L MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O; 0,1 g/L di CaCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O; 0,2 g/L di NaCl, acqua distillata, pH 7 ± 0,5) ed è stata filtrata attraverso filtri di diametro 47 mm in

nitrocellulosa con pori da 0,2  $\mu\text{m}$  (Millipore, STATI UNITI D'AMERICA). Tutti gli esperimenti eseguiti sono stati condotti in triplice copia e tutti i campioni sono stati trattati con la cavitazione idrodinamica entro 2 ore dalla preparazione.

### 5.3.2. Trattamento del campione

L'impianto utilizzato nell'esperimento consiste di un serbatoio ( $V = 2 \text{ L}$ ) e di un dispositivo di cavitazione che è stato realizzato con una piastra su cui si trova un disco rotante. Il disco è guidato da un motore (circa 8-9 A, 1850 W, capacità di penetrazione 0 – 20 mm, Makita 3612C) in modo che la velocità angolare crei un flusso altamente turbolento ( $Re > 3 \cdot 10^5$ ) e cavitazione (Figura 5.9) nello strato liquido tra la superficie del disco e il piatto.



**Figura 5.9 – Configurazione sperimentale utilizzata da Mezule et al. La cavitazione ha origine nello strato liquido (4), all'interno dello spazio tra il rotore (2) e la piastra (5). La rotazione è controllata dal motore (1) e la circolazione dell'acqua tra il serbatoio ed il dispositivo è regolata da una valvola (3). (Mezule et al., 2009)**

A causa della forza di taglio indotta sullo strato liquido, l'acqua circola tra il serbatoio e il dispositivo di cavitazione. Prima del trattamento, il dispositivo viene disinfettato per 10 minuti, quindi risciacquato con acqua distillata per 2 minuti. La soluzione è stata versata all'interno dell'apparato (lasciando circa 10 ml di campione non trattato, come controllo), è stata registrata la temperatura iniziale del campione ed è stato inserito un impacco di ghiaccio liquido precedentemente sterilizzato nel porta campioni, per controllarne la temperatura. I regimi di trattamento differivano per ciascun esperimento, da  $0,14 \text{ W/cm}^3$  (8,7 A, 220 V) a  $0,49 \text{ W/cm}^3$  (8.7-9.3 A, 220 V) e sono durati dai 5 ai 9 minuti, a seconda del momento in cui la temperatura nel portacampioni ha superato o raggiunto i  $38^\circ\text{C}$  (Figura 5.10). Dopo il trattamento, sono stati raccolti 10 ml di campione in bottiglie sterili.

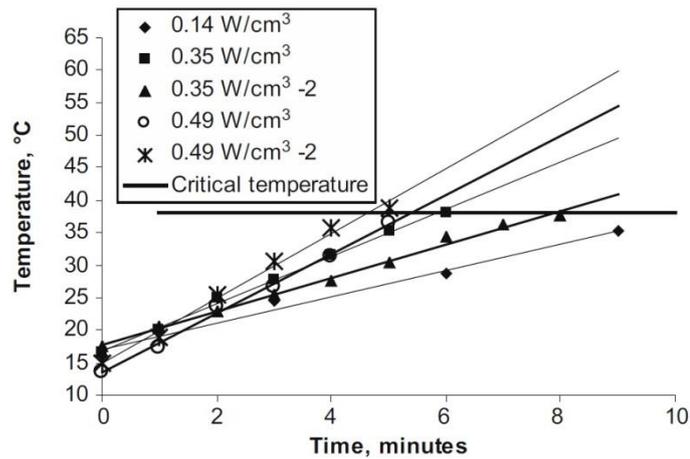
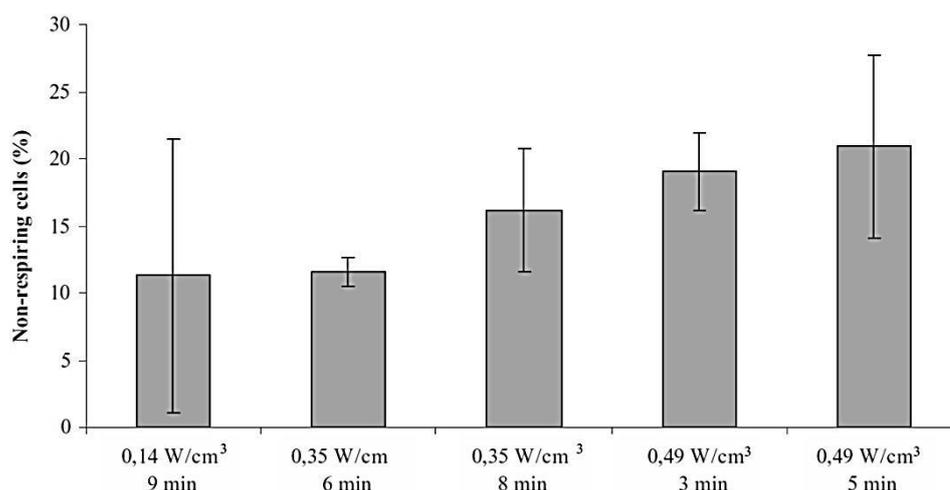


Figura 5.10 – Aumento della temperatura dei campioni trattati con cavitazione idrodinamica nelle diverse configurazioni (indicate nella legenda). (Mezule et al., 2009)

### 5.3.3. Analisi dei campioni con metodo CTC e DVC

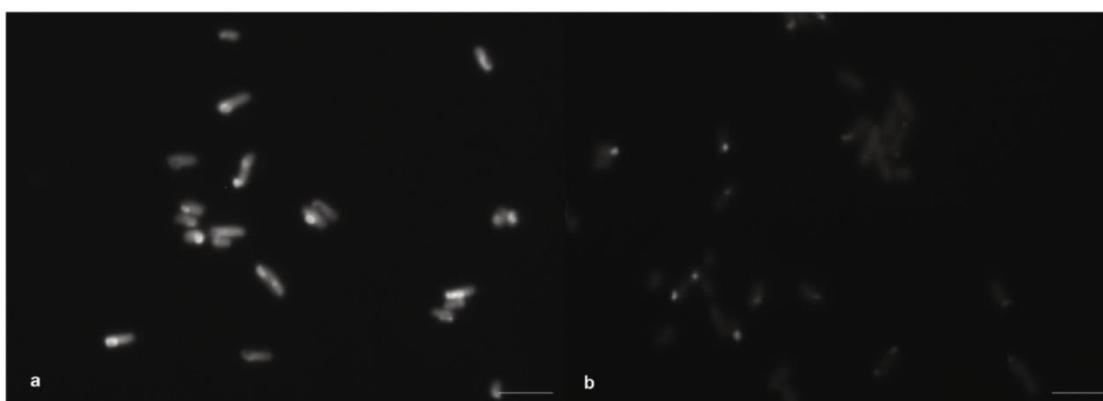
Gli esperimenti preliminari hanno dimostrato che la cavitazione fa aumentare rapidamente la temperatura dell'acqua. Per escludere l'effetto termico sull'efficacia della disinfezione dei batteri, tutti gli esperimenti sono continuati fino a quando la temperatura non ha raggiunto i 38°C e quindi fermati (Figura 4.10). La durata degli esperimenti è variata da 5 (per la massima velocità di rotazione ed il consumo di energia di 0,49 W/cm<sup>3</sup>) a 9 minuti (per la più bassa velocità di rotazione e immissione di energia di 0,14 W/cm<sup>3</sup>) a seconda della velocità di rotazione. Le analisi dei campioni d'acqua con colorazione DAPI prima e dopo gli esperimenti hanno dimostrato che la cavitazione non ha aumentato il numero totale di batteri, confermando l'efficacia della disinfezione e della pulizia del sistema tra un esperimento ed il successivo. Le analisi della sospensione di *E. coli* prima degli esperimenti con il metodo CTC hanno mostrato che i campioni non trattati contengono circa il 5% di cellule non attive, mentre il restante 95% era composto da batteri attivi.

Negli esperimenti di cavitazione, a seconda del tempo di applicazione (Figura 5.11), è aumentata la quantità di cellule non attive tra il 10% ed il 20%, attribuendo tale effetto alla cavitazione. A causa dell'aumento della temperatura oltre il limite dei 38°C, non è stato possibile testare intensità maggiori di cavitazione. Per questo Mezule et al. hanno proposto di approfondire ulteriormente gli studi con una modifica del dispositivo di cavitazione, dotandolo di un sistema di raffreddamento adeguato o di altre apparecchiature di cogenerazione di energia. Come detto, il trattamento per 5 minuti a 0,49 W/cm<sup>3</sup> è stato il più intenso ed efficace, mentre il meno efficace è risultato essere quello durato 9 minuti a 0,14 W/cm<sup>3</sup>; questo ha evidenziato che l'input di energia è più importante del tempo di esposizione al fine di ridurre l'attività metabolica degli *E. coli*.



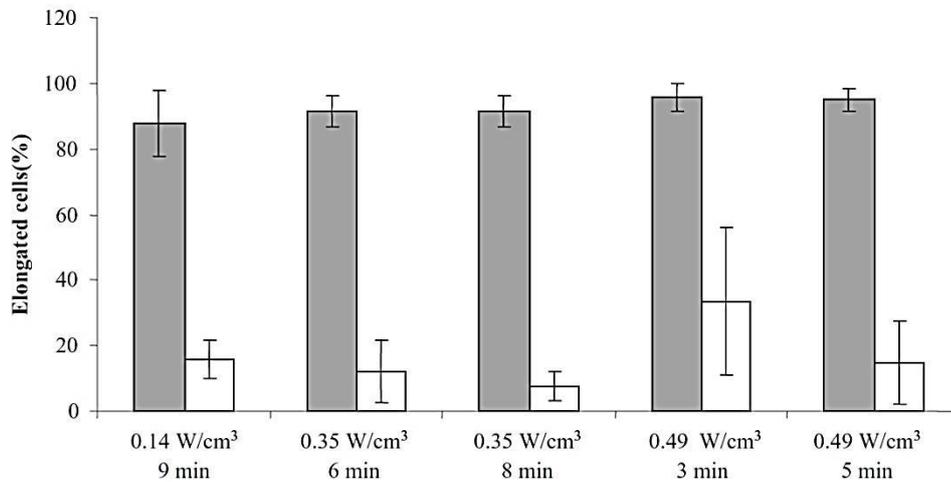
**Figura 5.11 – Percentuale di cellule non attive dopo il trattamento con diversi regimi di cavitazione idrodinamica (dati mostrati dopo la sottrazione di cellule inizialmente non attive). La deviazione standard rappresenta la dispersione dei risultati di tre separati esperimenti. Il 100% rappresenta la popolazione totale. (Mezule et al., 2009)**

Secondo la descrizione del metodo CTC, la formazione di cristalli all'interno delle cellule dei batteri è l'indicazione dell'attività metabolica dei batteri. Le analisi al microscopio hanno rivelato che i cristalli formati nei campioni di controllo erano di grandi dimensioni e spesso è stato trovato all'interno di una singola cellula più di un cristallo (Figura 5.12a), mentre le cellule trattate con cavitazione idrodinamica contenevano per la maggior parte un singolo cristallo con dimensioni variabili (Figura 5.12b). Questo indica chiaramente un rallentamento della frequenza respiratoria del cellule trattate ed una minore capacità di formare cristalli, ma tuttavia è ancora presente una catena di trasporto di elettroni funzionante (Lisle et al., 1999): per tale motivo Mezule et al. hanno contato tutte le cellule contenenti cristalli visibili come metabolicamente attive.



**Figura 5.12 – Cristalli di formazan (punti luminosi all'interno delle cellule) in un campione di controllo (a), campione trattato per 5 minuti con un input di energia di 0,49 W/cm<sup>3</sup> (b). Tratto in basso di 3 μm. (Mezule et al., 2009)**

L'analisi DVC dei campioni di controllo ha mostrato la capacità di riproduzione potenziale per circa il 90% della popolazione totale, che corrisponde ai risultati del metodo CTC. Anche il trattamento con la cavitazione idrodinamica più lieve ha permesso di ottenere un gran numero di cellule non allungate (Figura 5.14).



**Figura 5.13 – Percentuale di cellule allungate (DVC positive) in campioni di controllo (barra grigia) e campioni trattati con regimi diversi di cavitazione idrodinamica (barra bianca). La deviazione standard rappresenta la dispersione dei risultati per tre esperimenti separati. Il 100% rappresenta la popolazione totale.**

Il trattamento con cavitazione idrodinamica ha causato una diminuzione del potenziale di riproduzione delle cellule di circa il 75%, rimanendo metabolicamente attive, ma non capaci di effettuare una ulteriore suddivisione cellulare. Questa condizione già discussa in diversi studi (Hoefel *et al.*, 2003) potrebbe essere causata dallo stress fisico cui sono sottoposte le cellule batteriche. Nei campioni di controllo la lunghezza media delle cellule dopo l'analisi DVC era mediamente di circa 6  $\mu\text{m}$ , con variazioni tra i 2 e i 20  $\mu\text{m}$  (Figura 4.14a). I risultati hanno mostrato come la cavitazione sia molto efficace nel fermare la moltiplicazione di *E. coli*; tuttavia un trattamento più breve di 3 minuti con un apporto di energia di 490 W/L è risultato insufficiente per ridurre la capacità di *E. coli* di moltiplicarsi. Se supponiamo che la cessazione della capacità di divisione sia un'indicazione di morte batterica, dagli studi di Mezule *et al.* si evince che la cavitazione appare come un metodo efficace di disinfezione, anche se i batteri possedevano ancora la capacità di effettuare il processo di respirazione cellulare, mantenendo quindi gli *E. coli* nello stato attivo ma non coltivabile (ABNC). Pertanto, un aspetto che dovrebbe essere ulteriormente approfondito è se questi batteri siano in grado di moltiplicarsi dopo che gli stress legati alla cavitazione siano venuti meno, causando quindi un rischio potenziale per i consumatori dell'acqua trattata.

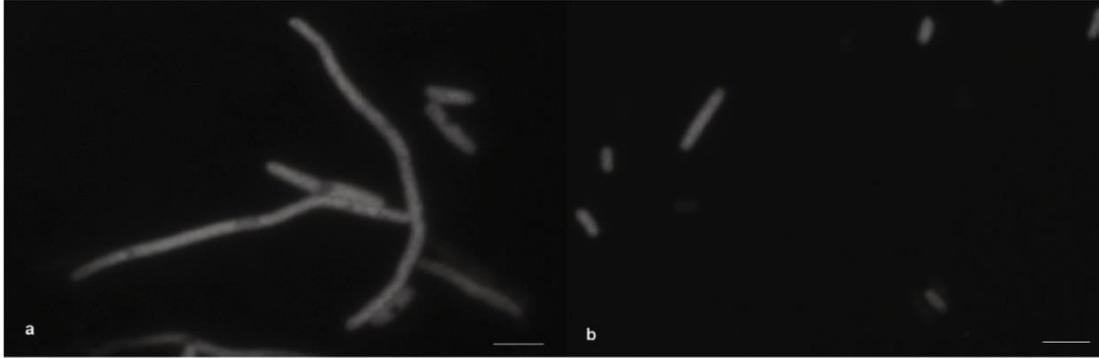


Figura 5.14 – Cellule di *E. coli* allungate nel campione di controllo (a) e nel campione trattato con  $0,49 \text{ W/cm}^3$  per 5 min (b). Tratto in basso di  $3 \mu\text{m}$ .

#### 5.4. Dalfré Filho et al., 2015

In questo studio gli autori hanno presentato una procedura alternativa per l'inattivazione di *Escherichia Coli* in acqua, utilizzando un apparecchio a getto di cavitazione a varie pressioni e con sistemi di raffreddamento realizzati con vari materiali. I test sono stati eseguiti presso il Laboratorio di Idraulica e Meccanica dei fluidi dell'Università di Campinas (Unicamp), in Brasile. Nei test con varie concentrazioni di *E. coli*, è stata ottenuta un'inattivazione superiore al 90,00% dopo 900 s di processo ad una pressione di 10,00 MPa.

Un apparecchio cavitazionale a getto è un sistema idrodinamico che genera la cavitazione in acqua. Il ruolo dei vortici o della turbolenza nella cavitazione può essere osservato, nel caso di un getto sommerso, come mostrato in Figura 5.15.

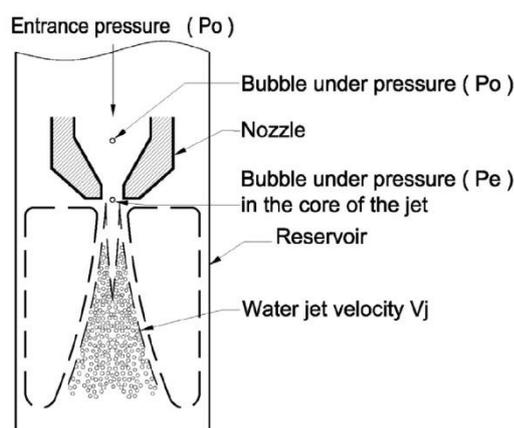


Figura 5.15 – Sviluppo della turbolenza in un apparecchio a getto sommerso. (Dalfré Filho et al., 2015)

La scelta di tale dispositivo è stata fatta in accordo con quanto evidenziato da Tullis (1989) nel confronto tra la cavitazione potenziale di un dispositivo Venturi con quella di un getto sommerso: a parità di condizioni operative e geometriche, il getto sommerso è molto più suscettibile all'insorgere della cavitazione, a causa dell'alto grado di turbolenza generato nello strato di taglio intorno al getto. In studi precedenti, Dalfré Filho et al. (2006) e Dalfré Filho e Genovez (2008, 2009) hanno sviluppato un apparecchio per testare gli effetti di erosione e hanno dimostrato che la tecnologia a getto cavitante sommerso fornisce un maggiore potere distruttivo. Controllando la pressione del apparecchio e adattando diverse forme di ugelli all'orifizio che forma il getto cavitante, sono stati eseguiti dei test appositi per scegliere la migliore configurazione da adottare nello studio sull'inattivazione di *E. coli* in acqua contaminata.

### 5.4.1. Configurazione dell'impianto

Lo studio sperimentale di *Dalfré Filho et al.* è stato condotto nel laboratorio di idraulica e meccanica dei fluidi all'Università di Campinas (UNICAMP, Campinas, Brasile). L'apparecchio a getto cavitante (Figura 5.16a) consiste in una pompa volumetrica che opera ad alta pressione (14 MPa) e bassa portata ( $4,83 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ ) (PROMINAS BPS-327-025-MP) e ricicla  $40 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$  di acqua. All'uscita dalla pompa, una valvola di controllo regola la pressione durante le prove. A valle della valvola di controllo, vi è un sistema di misurazione della pressione composto da un trasduttore di pressione (HBM-K-P8AP- 231B-17A5; intervallo 0 – 20 MPa; precisione  $\pm 0,1\%$ ) con il sistema hardware di acquisizione Spider8 (HBM) ed il sistema di acquisizione software CatmanExpress (HBM). Le tubazioni hanno diametro di 12,70 mm e conducono l'acqua all'interno di un ugello conico in acciaio inossidabile, con angolo di apertura pari a  $132^\circ$  (Figura 5.16b) ed orifizio di diametro (D) di 2,00 mm. *Dalfré Filho e Genovez (2008)* hanno in precedenza testato e selezionato questo ugello e questo foro tra una serie di configurazioni geometriche. L'ugello conico ha provocato le condizioni erosive maggiori nei campioni di alluminio e cemento, dimostrando così di essere il getto cavitante più energetico. La Figura 5.16c mostra lo schema del serbatoio di inattivazione ( $D_R = 0,303 \text{ m}$ ,  $H = 0,702 \text{ m}$ ) in acciaio rivestito con resina epossidica.

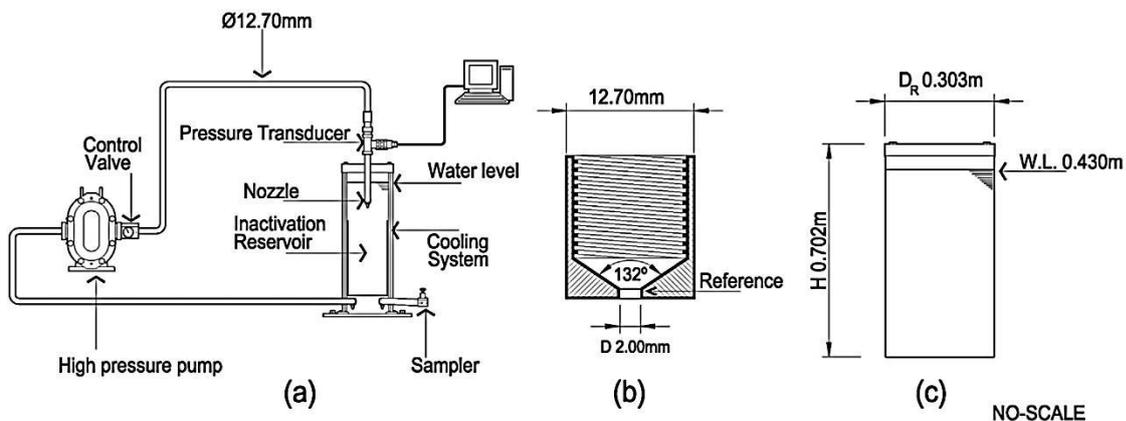


Figura 5.16 – Impianto di cavitazione (a), particolare dello strozzamento (b) e serbatoio di inattivazione (c).  
(*Dalfré Filho et al., 2015*)

La motopompa ha una potenza operativa di 12,5 CV, 1200 rpm ed è trifase a 220 V. La corrente elettrica (i) consumata è stata misurata in tutti i test utilizzando un amperometro. L'indice di cavitazione dell'apparato ( $\sigma_j$ ) è stato calcolato considerando i parametri pressione  $P_e$  e velocità del getto  $v_j$ , con riferimento all'estremità dell'orifizio (Figure 5.15 e 5.16b). Tenendo conto dell'equazione energetica e della stima adeguata delle perdite di carico, la pressione  $P_e$  può essere calcolata dalla pressione  $P_o$  e l'equazione di continuità consente il calcolo della velocità del getto. La pressione operativa è  $P_o = 14,00 \text{ MPa}$ ; quindi  $P_e = 1,65 \text{ MPa}$  e la velocità del getto  $v_j = 153,75 \text{ m/s}$ . Se la tensione di vapore  $P_v$  è approssimativamente 3250,00 Pa e la densità dell'acqua è di  $997,00 \text{ kg/m}^3$ , l'indice di cavitazione è  $\sigma_j = 0,14$ . La formazione di jet e

vortici sono stati filmati utilizzando una luce stroboscopica a una frequenza di 167 Hz attraverso due finestre esistenti nel serbatoio di inattivazione. Il sistema di raffreddamento è stato progettato e costruito per mantenere costante la temperatura durante le prove e per garantire che l'inattivazione fosse esclusivamente dovuta alla cavitazione. Il sistema consiste di una bobina (19,5 m di lunghezza e 0,01 m di diametro) posta all'interno del serbatoio di inattivazione. La bobina ricircola acqua pulita per mantenere una temperatura media massima di 33°C nell'acqua da testare.

#### 5.4.2. Fasi dello studio

Una temperatura eccessiva può alterare la vitalità degli *E. coli*; fino ai 44 – 45°C essi non vengono inattivati dall'aumento della temperatura. I campioni "T0" indicati nello studio sono stati raccolti prima dell'inizio dei test. Ogni 900 secondi (15 minuti), durante un periodo totale di 1800 secondi (30 minuti), è stato raccolto un doppio campione per le analisi fisico-chimico, presentando i risultati come media dei due riscontri. Tutti i campioni sono stati recuperati dal fondo del serbatoio per garantire condizioni di campionamento identiche. Per le analisi fisico-chimiche sono state utilizzate attrezzature specifiche per ogni parametro misurato: la temperatura, l'ossigeno disciolto, il pH, la torbidità, la conduttività ed il colore apparente. Le analisi microbiologiche sono state condotte presso il Laboratorio d'igiene dell'UNICAMP, implementando il metodo cromogenico di substrato *Colilert*. Tutti i campioni (T0, T900 e T1800) sono stati testati non diluiti e a concentrazioni di  $10^{-1}$  e  $10^{-2}$ . I risultati sono stati analizzati dopo 24 ore di incubazione a 35°C.

Lo studio è stato eseguito in più fasi. Innanzitutto, è stata testata l'inattivazione dei batteri in acqua contaminata artificialmente inoculata con *E. coli* (ATCC 25922) con tre impostazioni di pressione: 12, 10 e 8 MPa e rispettivamente con velocità di getto di 131,80, 109,80 e 87,85 m/s. In questa fase, è stata impiegata una bobina di rame per il sistema di raffreddamento. Per accertare l'efficacia dell'apparato e stabilire chiaramente un test ottimale confrontando i risultati, l'acqua è stata contaminata con alte concentrazioni di *E. coli*. Nella seconda fase, tenendo conto del risultato del primo stadio di analisi, gli *E. coli* presenti in campioni naturalmente contaminati prelevati dal lago situato nel campus dell'Università di Campinas (UNICAMP, São Paulo, Brasile) sono stati inattivati con due pressioni di prova, a 10 e 5 MPa, con velocità di getto rispettivamente di 109,80 m/s e 55,05 m/s, utilizzando anche in questo caso il medesimo sistema di raffreddamento. Il lago (Figura 5.17) presenta un particolare ecosistema: oltre ai molti uccelli ordinariamente presenti nella regione, esso è anche abitato da mammiferi, in particolare dal capibara (*Hydrochoerus hydrochaeris*). Questo mammifero endemico ha l'abitudine di defecare e lavarsi nell'acqua e si ritiene che sia responsabile di alcune malattie trasmesse dall'acqua, dovuti ai bacilli per i quali l'animale agisce come ospite. Tra queste malattie portate dall'acqua citiamo l'endoparassitosi (verminosi), le infezioni da protozoi (tripanosomiosi e coccidiosi) e le tipologie batteriosie (leptosirosi) (*Nogueira e da*

*Cruz, 2007*). I campioni sono stati raccolti tenendo conto delle condizioni climatiche tra luglio ed ottobre 2012.



Figura 5.17 – Vista del lago (a sinistra) e gruppo di capibara (a destra). (*Dalfré Filho et al., 2015*)

La terza fase è stata eseguita con acqua contaminata naturalmente e con valvola di comando (vedi Figura 5.16a) completamente aperta, secondo la condizione di prova denominata "sistema depressurizzato (0,00 MPa)". In questa condizione, la pressione nell'apparecchio è vicina alla pressione atmosferica locale e non si genera cavitazione all'interno del serbatoio di inattivazione, quindi l'acqua nell'apparecchio viene semplicemente ricircolata attraverso di esso. Per questi la bobina del sistema di raffreddamento è stata sostituita con un tubo tessile. Infine è stato eseguito un test complementare, con sistema depressurizzato, utilizzando acqua contaminata in laboratorio con *E. coli* ATCC 25922.

### 5.4.3. Risultati delle analisi

#### 5.4.3.1. Acqua artificialmente contaminata

Come precedentemente spiegato, la prima fase dell'esperimento è stata testare l'inattivazione di *E. coli* non patogeni (ATCC 25922), a tre pressioni: 12, 10 e 8 MPa. Il serbatoio di inattivazione è stato dotato sistema di raffreddamento con bobina di rame. Va notato che sono stati volutamente utilizzati alti tassi di inoculazione di *E. coli*, dell'ordine di  $10^7$  CFU/mL, per accertare l'efficienza dell'apparato durante l'inattivazione e per stabilire un test con condizioni ottimali. La Figura 5.18 mostra l'inattivazione (come percentuale del quantitativo originale di *E. coli*, per ogni pressione che è stata testata) in funzione del tempo. Si può osservare che alla fine dei test (dopo 1800 s), l'inattivazione ha raggiunto 98,30, 99,96 e 100,00% a pressioni rispettivamente di 8, 10 e 12 MPa. I più alti tassi di inattivazione sono stati ottenuti nei primi 900 s, con la pressione di 10 MPa (96,68%) mostrando risultati migliori della configurazione con 12 MPa (82,83%). Questo risultato ha portato *Dalfré Filho et al.* a concludere che le pressioni più basse sarebbero più adatte all'inattivazione degli *E. coli*,

specialmente considerando l'alta inoculazione utilizzata in questi test, che è, in media, più alta di quella trovata in acque grezze inquinate naturalmente. Per alte concentrazioni, l'*E. coli* è in genere distribuito in maniera lognormalmente, quindi è stato calcolato il tasso di inattivazione batterica (BIR) usando l'Eq. (5.1):

$$BIR = \frac{\log C_i - \log C_f}{\log C_i} \quad (5.1)$$

dove  $C_f$  e  $C_i$  sono le concentrazioni finali e iniziali di *E. coli* (CFU/mL) e BIR è un parametro adimensionale. Più alto è il BIR, migliori sono i risultati per la condizione testata. Tuttavia, per stabilire una condizione di prova ottimale, è preferibile conoscere il tasso di inattivazione batterica (BIR) come funzione dell'energia consumata ( $E$ , kW h) durante una prova. L'Eq. (5.2) mostra l'energia consumata dal sistema per una data durata della prova ( $t$ , h), tensione ( $U$ ) e corrente elettrica ( $i$ ):

$$E = U * i * t \quad (5.2)$$

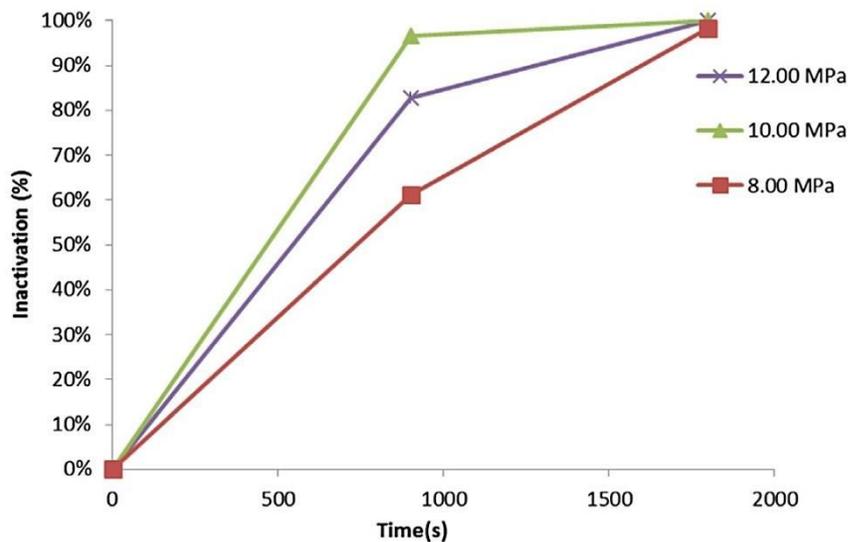


Figura 5.18 – Inattivazione di *Escherichia coli* ATCC 25922 a differenti pressioni, per acqua artificialmente contaminata. (Dalfré Filho et al., 2015)

Infine, gli autori dello studio suggeriscono l'Eq. (5.3) per calcolare l'efficienza del tasso di inattivazione (IER). Il massimo IER (kWh)<sup>-1</sup> è la condizione ottimale di prova per l'apparecchio a getto di cavitazione.

$$IER = \frac{BIR}{E} \quad (5.3)$$

La Tabella 5.1 mostra i valori di BIR e IER per questa prima fase di i test. La pressione di prova di 12 MPa è la condizione di test ottimale, sia come tasso di inattivazione batterica (BIR = 0.82) che come efficienza (IER = 0.06 (kW h)<sup>-1</sup>), poiché risultano maggiori di quelli ottenuti per le pressioni di prova di 8 e 10 MPa. Tuttavia, sono stati ottenuti alti tassi di inattivazione anche per la pressione di prova di 10 MPa, per una durata di 900 secondi, che consentirebbe un minor consumo di energia. *Jyoti e Pandit (2001)* hanno usato la cavitazione idrodinamica per inattivare un campione di 6970 CFU/ml di popolazione batterica, impiegando 3600 secondi per ridurre il conteggio di batteri del 35,00% rispetto al suo valore originale, a 0,172 MPa di pressione, mentre il 37,00% di riduzione veniva raggiunto entro i 900 secondi con una pressione di 0,51 MPa. Quindi, può essere osservato che l'inattivazione è maggiore a pressioni più elevate per lo stesso tempo di elaborazione. Gli autori hanno dimostrato che se l'acqua è più inquinata (alto CFU/ml iniziale) e i volumi da trattare sono maggiori, la cavitazione idrodinamica dà buoni risultati, mentre offre prestazioni scadenti con bassi volumi e con un conteggio CFU iniziale più basso. In questa fase è stato usato un volume fisso per l'inattivazione degli *E. coli*.

Tabella 5.1 – Tasso di inattivazione batterica (BIR) e tasso di efficienza di inattivazione (IER) per *E. coli* ATCC 25922. (Dalfré Filho et al., 2015)

Parameters	8,00 MPa $v_j = 87,85 \text{ m/s}$	10,00 MPa $v_j = 109,80 \text{ m/s}$	12,00 MPa $v_j = 131,80 \text{ m/s}$
log Ci (CFU/mL)	5,15	5,90	5,41
log Cf (CFU/mL)	3,38	2,53	0,95
BIR <sub>log</sub>	0,34	0,57	0,82
t (s)	1800,00	1800,00	1800,00
i (A)	29,00	31,00	32,80
U (V)	220,00	220,00	220,00
Pw (kW)	6,38	6,82	7,22
E (kW h)	11,48	12,28	12,99
IER (kW/h) <sup>-1</sup>	0,03	0,05	0,06

I parametri fisico-chimici sono stati analizzati per tutti i campioni raccolti. Il contenuto di ossigeno disciolto (DO) è diminuito rispetto a quello che si aveva al momento del test "T0", mentre pH, conducibilità, torbidità e colore apparente sono cresciuti. La temperatura, una volta aumentata fino a 33°C, è stata mantenuta costante dal sistema di raffreddamento in modo da non influenzare la vitalità batterica. La Tabella 5.2 mostra i parametri fisico-chimici, ordinati secondo i valori di pressione, alla fine dei test. Si osservano diverse tendenze per i vari parametri: l'ossigeno disciolto diminuisce con la pressione, mentre pH, torbidità, conduttività e colore apparente aumentano.

Tabella 5.2 – Parametri fisico-chimici a diverse pressioni per acqua contaminata e sistema di raffreddamento con bobina di rame. (Dalfré Filho et al., 2015)

Pressure (Mpa)	Temperature (°C)	DO (mgO <sub>2</sub> /L)	pH (-)	Turbidity (NTU)	Conductivity (µs/cm)	Ap. Color (Pt-Co)
12,00	31,67	4,92	7,97	48,17	269,00	365,33
10,00	31,33	4,76	7,84	31,60	274,33	334,67
8,00	29,00	6,48	7,80	27,50	253,00	216,00

### 5.4.3.2. Acqua naturalmente contaminata

Nella seconda parte degli esperimenti è stata utilizzata acqua naturalmente contaminata prelevata dal lago presente all'interno del campus universitario. Gli esperimenti sono stati condotti con pressioni di 5 e 10 MPa. Tutti i campioni (T0, T900 e T1800) sono stati testati adottando una procedura simile a quanto indicato ai paragrafi precedenti. Il sistema di raffreddamento utilizzato è rimasto il medesimo. La Figura 5.19 mostra i tassi di inattivazione per le diverse pressioni.

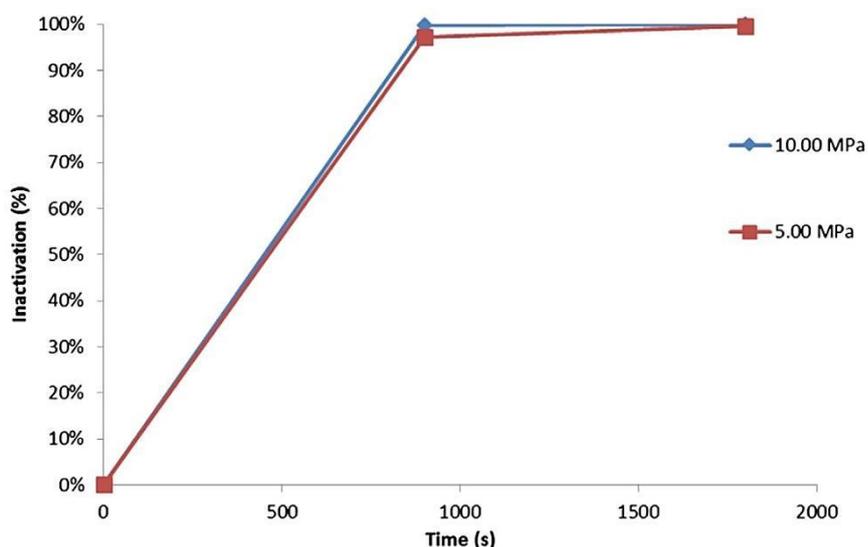


Figura 5.19 – Inattivazione di Escherichia coli in acqua naturalmente contaminata per diverse pressioni e sistema di raffreddamento con bobina di rame. (Dalfré Filho et al., 2015)

Dal grafico si osserva che, indipendentemente dalla pressione, l'inattivazione ha raggiunto un tasso del 100,00% alla fine dei test. Al tempo test di 900 s, le prove con pressione di 10 e 5,00 MPa hanno raggiunto, rispettivamente, il 99,89% ed il 97,31% di inattivazione. Per acqua naturalmente contaminata con basse concentrazioni di E. coli (inferiore a 10/100 ml), è

adeguato l'uso della concentrazione lineare per calcolare la condizione di prova ottimale. Di conseguenza, BIR (Eq. (5.1)) e IER (Eq. (5.3)) dovrebbero essere calcolati come

$$BIR_n = \frac{C_i - C_f}{C_i} \quad (5.4)$$

$$IER_n = \frac{BIR_n}{E} \quad (5.5)$$

I risultati ottenuti sono presentati in Tabella 5.3. Con un confronto tra i test della prima e della seconda fase, alla stessa pressione di prova, ad esempio 10 MPa, può essere osservato che la concentrazione iniziale di acqua contaminata artificialmente ( $C_i = 800013$  CFU/mL) è molto più alta rispetto alla concentrazione iniziale di acqua naturalmente contaminata ( $C_i = 37.30$  CFU/mL). Tuttavia, alla fine dei test (1800 s), c'è una significativa riduzione di E. coli in entrambi i casi. Dalla Tabella 4.3, lo IER mostra risultati vicini per i test con pressione di 5 e 10 MPa a 1800 s, con valori leggermente migliori nel primo caso. Tuttavia, il tasso di inattivazione in acqua naturalmente contaminata ha raggiunto quasi il 100,00% in 900 s e con pressione di 10 MPa. Nella Tabella 5.4 sono mostrati i parametri fisico-chimici a diverse pressioni. Simile nella tendenza dei risultati della tabella 5.2, la tabella 5.4 mostra una diminuzione dell'ossigeno disciolto con l'aumento della pressione. Al contrario, pH, torbidità, conduttività e colore apparente sono aumentati con la pressione ed il tempo di test.

Tabella 5.3 – Tasso di inattivazione batterica (BIR) e tasso di efficienza di inattivazione (IER) per E. Coli in acqua contaminata naturalmente. (Dalfré Filho et al., 2015)

Parameters	5,00 MPa $v_j = 55,05$ m/s	10,00 MPa $v_j = 109,80$ m/s
Ci (CFU/mL)	4,35	37,30
Cf (CFU/mL)	0,01	0,01
BIR	1,00	1,00
t (s)	1800,00	1800,00
i (A)	24,00	29,00
U (V)	220,00	220,00
Pw (kW)	6,38	6,82
E (kW h)	2,64	3,19
IER (kW/h) <sup>-1</sup>	0,38	0,31

Tabella 5.4 – Parametri fisico-chimici a diverse pressioni per acqua contaminata naturalmente e sistema di raffreddamento con bobina di rame. (Dalfré Filho et al., 2015)

Pressure (Mpa)	Temperature (°C)	DO (mgO <sub>2</sub> /L)	pH (-)	Turbidity (NTU)	Conductivity (µs/cm)	Ap. Color (Pt-Co)
10,00	26,00	4,88	7,95	50,75	166,50	500,00
5,00	26,00	6,28	7,95	42,00	160,50	509,00

### 5.4.3.3. Sistema depressurizzato

Il tasso di inattivazione dei precedenti test ha portato gli autori dello studio a testare l'apparecchio a getto cavitante con valvola completamente aperta con "sistema depressurizzato (0,00 MPa)". In questo caso particolare non si forma cavitazione e la pressione nell'apparecchio è approssimativamente pari alla pressione atmosferica locale. Sono stati testati due materiali per il raffreddamento sistema (tubo in rame e in tessuto) ed il sistema depressurizzato ha ricircolato l'acqua con una pompa ad alta pressione.

La figura 5.20 mostra una forte relazione tra il materiale della bobina ed il tasso di inattivazione batterica nel tempo. Confrontando il risultati alla fine dei test, con un sistema di raffreddamento in rame era stato quasi raggiunto il 100% di inattivazione per l'acqua naturalmente contaminata, in contrasto con il 55% per il tubo in tessuto. Il test supplementare ha mostrato solo un 12% di inattivazione per l'acqua contaminata artificialmente, con questo secondo sistema di raffreddamento; dunque i batteri in acqua naturalmente contaminata hanno registrato un tasso di inattivazione più alto di quelli in acqua contaminata artificialmente. Il tasso di inattivazione batterica (BIRn) e l'efficienza di inattivazione (IERn) dei test sono confrontati nella Tabella 5.5.

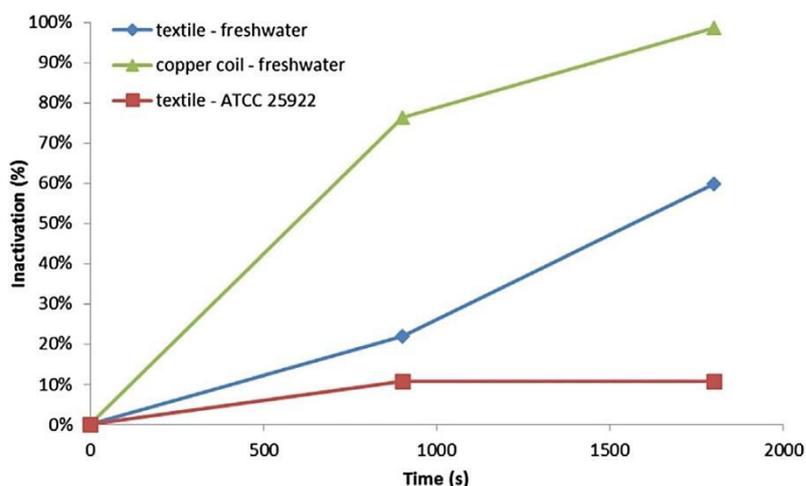


Figura 5.20 – Interferenza del materiale del sistema di raffreddamento con l'inattivazione degli *E. coli*. (Dalfré Filho et al., 2015)

In particolare si nota che la condizione migliore si ha quando si utilizza la bobina in rame ( $IER_n=0,42 \text{ (kW.h)}^{-1}$ ). Si può concludere che l'inattivazione di *E. coli* in acqua naturalmente contaminata è possibile usando il sistema depressurizzato ed il tubo di tessuto come sistema di raffreddamento, che è meno costoso del sistema di raffreddamento in rame, ma il tempo deve essere aumentato e conseguentemente sarà consumata più energia. In aggiunta a ciò, quando si utilizza un raffreddamento con tubo tessile, con una pressione superiore a 4 MPa è impossibile mantenere la temperatura dell'acqua inferiore a 40°C nel serbatoio di inattivazione.

Tabella 5.5 – BIR e IER per gli *E. coli* in acqua naturalmente contaminata, in sistema depressurizzato, per entrambe le tipologie di bobina. (Dalfré Filho et al., 2015)

Parameters	Naturally contaminated water	
	Textile	Copper
<b>Ci (CFU/mL)</b>	3,65	0,80
<b>Cf (CFU/mL)</b>	1,47	0,01
<b>BIR</b>	0,60	0,99
<b>t (s)</b>	1800,00	1800,00
<b>i (A)</b>	21,00	21,20
<b>U (V)</b>	220,00	220,00
<b>Pw (kW)</b>	4,62	4,66
<b>E (kW h)</b>	2,31	2,33
<b>IER (kW/h)<sup>-1</sup></b>	0,26	0,42

In sintesi, non è stata necessaria alcuna cavitazione per inattivare gli *E. coli* trovati in acqua naturalmente contaminata. Tuttavia, gli *E. coli* (ATCC 25922) in acqua contaminata artificialmente vengono inattivati solo se l'unità costruita è in grado di generare cavitazione e l'inattivazione risulta ulteriormente migliorata se il sistema di raffreddamento è costruito in rame. In generale i test hanno mostrato che maggiore è la pressione, più alto è il tasso di inattivazione legato all'energia consumata.

Dagli studi che sono stati descritti nel presente capitolo possiamo dedurre che diverse configurazioni di test producono diverse efficienze di inattivazione. A seconda del budget disponibile e dei requisiti di tempo, esistono diverse configurazioni impiantistiche per soddisfare esigenze specifiche. Rimangono quindi da esplorare nuove combinazioni di materiali per poter ottimizzare i processi a seconda dei risultati richiesti.

## 6. IMPIANTO SPERIMENTALE PER L'INDUZIONE DELLA CAVITAZIONE IDRODINAMICA

Nel presente capitolo verrà presentato in maniera particolareggiata l'intero impianto, con una descrizione dettagliata sia dell'impianto cavitazionale, che del sistema di raffreddamento. Saranno descritte le varie componenti ed infine sarà illustrata la strumentazione ausiliaria utilizzata.

L'impianto di cavitazione idrodinamica utilizzato durante il lavoro di Tesi è ubicato in uno specifico locale dedicato, situato all'interno del Laboratorio di idraulica Giorgio Bidone, presso il Politecnico di Torino. L'obiettivo della ricerca è quello di ottimizzare a livello energetico una tecnica innovativa di trattamento dell'acqua, basata sulla cavitazione idrodinamica, al fine di renderla appetibile sul mercato a fronte dei più economici metodi di natura chimica. A tal fine è stato predisposto l'utilizzo di adeguati strumenti di misura delle grandezze fisiche coinvolte, oltre ad un'attenta configurazione dell'impianto che potesse permettere di variarne delle componenti alla ricerca di configurazioni ottimali.

La costruzione dell'impianto ha occupato i primi mesi del lavoro di Tesi di *Garofano (2016)*, che ha preliminarmente adeguato i locali alla collocazione dell'impianto attraverso operazioni di pulizia e ritinteggiatura. Successivamente sono state realizzate, mediante software AutoCAD, le tavole progettuali dell'impianto da fornire alle maestranze specializzate.



Figura 6.1 – Sistemazione del locale originario (a sinistra) e collocazione dell'impianto (a destra) (*Garofano, 2016*)

Una volta ottenute tutte le componenti, si è proceduto all'assemblaggio dell'impianto; alcuni elementi sono stati assemblati direttamente in laboratorio (come per esempio i sistemi di fissaggio dei manometri) grazie alle attrezzature presenti.

Per quanto riguarda la costruzione dell'impalcatura su cui poggia il serbatoio di acciaio inox, la struttura presenta un'altezza di circa 2 metri dal piano di calpestio ed è costituita da tubi di metallo tra loro uniti da morsetti in acciaio zincato. I tubi costituenti l'impalcatura sono stati tagliati in maniera tale da realizzare una struttura simmetrica dimensioni opportune e successivamente verniciati. Una volta assemblato l'intero impianto sono stati realizzati tutti i collegamenti elettrici per l'alimentazione della pompa idraulica con 380 V di corrente e del misuratore di portata con 230 V di corrente. Per rendere confortevole e pratico il locale di lavoro sono stati inseriti quattro armadi, un tavolo di metallo (il quale è stato opportunamente smerigliato per rendere liscia la superficie di lavoro), dei bancali su cui poggia l'impianto ed una lavagna.



Figura 6.2 – Cartellonistica all'ingresso del locale

In Figura 6.4 è possibile vedere una schematizzazione, alla data di stesura della Tesi, dell'impianto di cavitazione, il quale ha subito alcune modifiche e migliorie rispetto alla configurazione utilizzata da *Garofano (2016)* e *Ricucci (2017)* (Figura 6.3), mentre nella Tabella 6.1 ad ogni codice identificativo è collegata una breve definizione dell'elemento corrispondente.

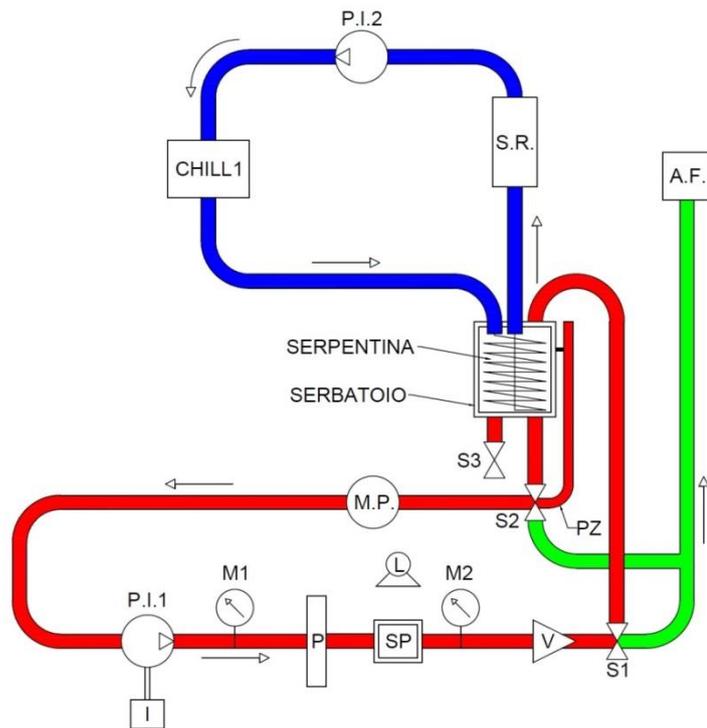


Figura 6.3 – Configurazione impianto utilizzata da *Garofano (2016)* e *Ricucci (2017)*

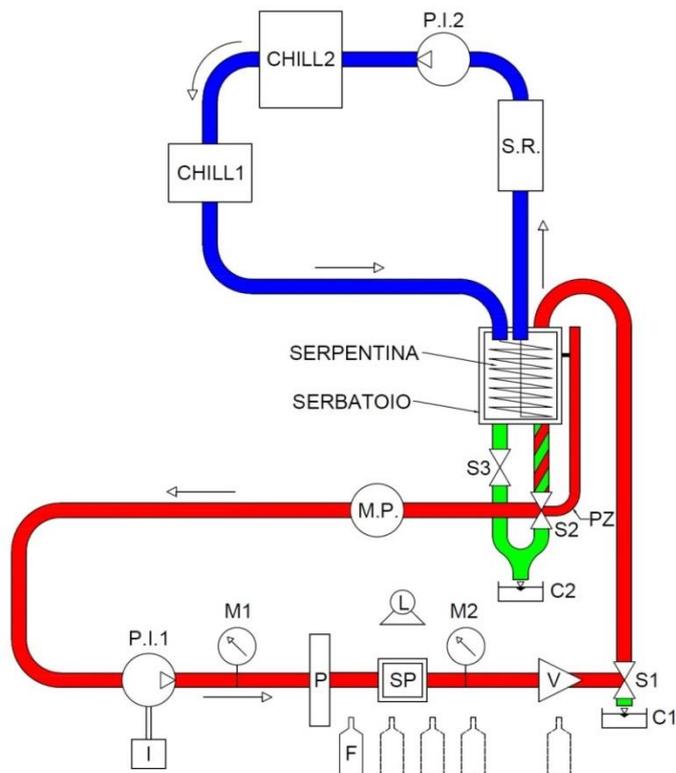


Figura 6.4 – Nuova configurazione impianto utilizzata durante gli esperimenti di disinfezione

Con il colore rosso è rappresentato il circuito dove viene indotta la cavitazione, con il blu è rappresentato il circuito di raffreddamento. Con il colore verde era raffigurato il sistema di scarico verso l'allacciamento con il sistema fognario, non più utilizzato nel presente studio, a causa di modifiche procedurali degli esperimenti, meglio descritte nel capitolo dedicato.

L'impianto di cavitazione idrodinamica è costituito da una pompa idraulica per accelerare il liquido, due manometri per la misurazione della pressione, un reattore cavitazionale che utilizza opportune piastre forate, una specola di vetro, una valvola a sfera per generare la contropressione di valle, un serbatoio di accumulo in acciaio inox, un misuratore di portata e tre rubinetti a sfera, di cui due dedicati solamente allo scarico ed uno utilizzato anche per il prelievo dei campioni. L'impianto di raffreddamento è costituito da due chiller posti in serie per il refrigeramento dell'acqua, un serpentina in materiale plastico collocata all'interno del serbatoio di acciaio inox, un pompa idraulica per accelerare l'acqua ed un serbatoio di accumulo in plastica. Il sistema di scarico è stato sostituito a causa della riorganizzazione degli spazi nei pressi dell'allaccio fognario e delle variazioni procedurali nella raccolta dei campioni. Potremmo identificare tale sistema come costituito dai tre rubinetti precedentemente citati e dai due contenitori plastici utilizzati per lo scarico dell'impianto ed il trasporto dei liquidi.

Per comodità descrittiva e chiarezza espositiva, l'impianto di cavitazione può essere suddiviso in quattro blocchi: il sistema idraulico, il reattore cavitazionale, il sistema di raffreddamento ed il sistema di prelievo/scarico.

Tabella 6.1 – Definizione dei codici identificativi degli elementi mostrati nella Figura 6.4 e costituenti l'impianto di cavitazione. Con l'(\*) sono indicati gli elementi che hanno subito delle modifiche rispetto alla configurazione utilizzata da Garofano (2016) e Ricucci (2017)

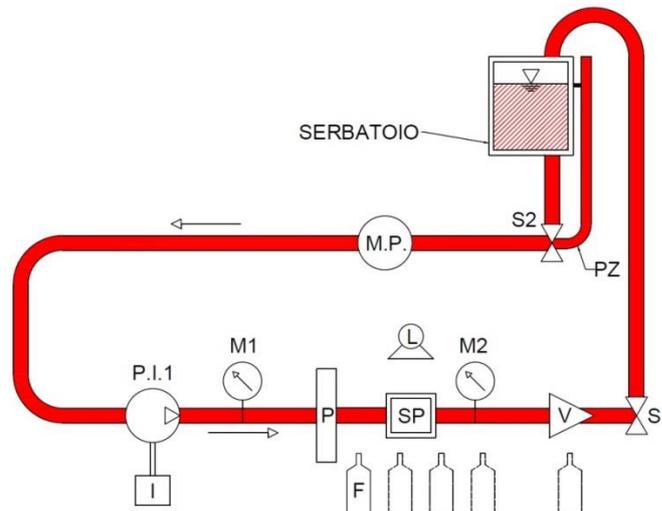
<b>CODICE IDENTIFICATIVO</b>	<b>DEFINIZIONE ELEMENTO</b>	<b>NOTE</b>
<b>C1</b>	Contenitore scarico n° 1	*
<b>C2</b>	Contenitore scarico n° 2	*
<b>CHILL1</b>	Chiller n° 1	
<b>CHILL2</b>	Chiller n°2	*
<b>F</b>	Fonometro	*
<b>I</b>	Inverter	
<b>L</b>	Lampada	
<b>M1</b>	Manometro di monte	
<b>M2</b>	Manometro di valle	
<b>M.P.</b>	Misuratore di portata	
<b>P</b>	Piastra forata	
<b>P.I.1</b>	Pompa idraulica n° 1 (impianto idraulico)	
<b>P.I.2</b>	Pompa idraulica n° 2 (impianto di raffreddamento)	*
<b>PZ</b>	Piezometro	
<b>S1</b>	Scarico 1 - operazioni di prelievo/scarico	
<b>S2</b>	Scarico 2 - operazioni di scarico	*
<b>S3</b>	Scarico 3 - operazioni di scarico	*
<b>SERPENTINA</b>	Serpentina impianto di raffreddamento	*
<b>SERBATOIO</b>	Serbatoio impianto idraulico	
<b>SP</b>	Specola di vetro	
<b>S.R.</b>	Serbatoio impianto di raffreddamento	
<b>V</b>	Valvola per gestione pressione di valle	

Il sistema idraulico è composto da:

- una pompa idraulica per accelerare il liquido;
- un inverter per regolare la frequenza della pompa;
- tubazioni e raccordi;
- tappi di chiusura;
- due manometri per la misurazione della pressione;
- un serbatoio di accumulo in acciaio inox;
- un misuratore di portata;
- tre rubinetti a sfera per lo scarico dell'impianto ed il raccoglimento dei campioni;
- un piezometro per monitorare il livello all'interno del serbatoio.

Il reattore cavitazionale è costituito da:

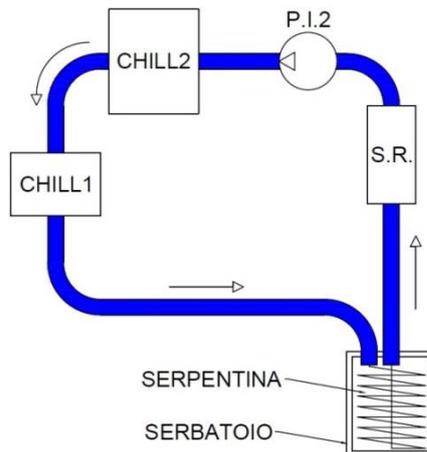
- una piastra forata;
- una specola di vetro;
- una valvola a sfera per generare una contropressione a valle della piastra forata;
- una lampada per rendere meglio visibili le bolle di cavitazione attraverso la specola.



**Figura 6.5 – Sistema idraulico con reattore cavitazionale. Il flusso è accelerato dalla pompa (P.I.1), mediante l'azione dell'inverter (I) ed incontra la piastra (P). Gli effetti cavitazionali sono visibili attraverso la specola di vetro (SP), grazie anche all'azione della lampada (L), e la loro intensità può essere misurata con il fonometro (F). La pressione di valle è misurata dal manometro M1, mentre quella di valle (M2) può essere controllata mediante la valvola a sfera (V). Il piezometro (PZ) ci fornisce indicazioni sul livello idrico all'interno del SERBATOIO, mentre la portata fluente è misurata dal misuratore di portata (M.P.). Gli scarichi (S1, S2) risultano chiusi, per impedire fuoriuscite di acqua.**

L'impianto di raffreddamento è formato da:

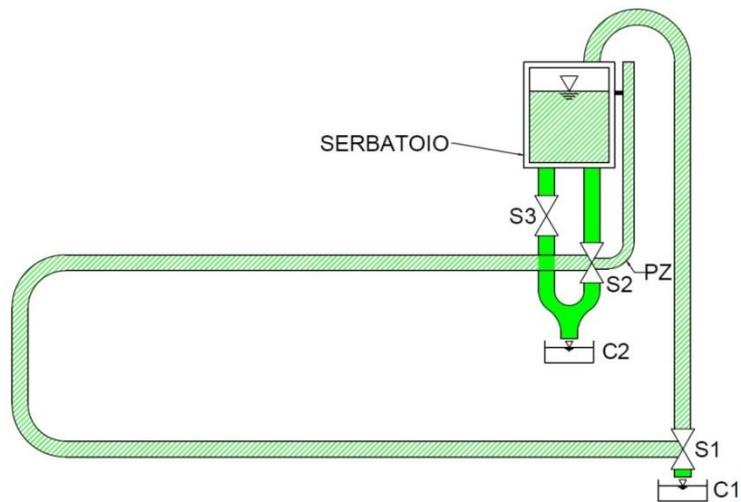
- due chiller funzionanti in serie, per il refrigeramento dell'acqua;
- una serpentina in materiale plastico collocata all'interno del serbatoio di acciaio inox;
- una pompa idraulica per accelerare l'acqua;
- un serbatoio di accumulo in plastica.



**Figura 6.6 – Impianto di raffreddamento: all'interno del SERBATOIO in acciaio inox è posta la SERPENTINA in materiale plastico; l'acqua dell'impianto di raffreddamento viene accumulata nel serbatoio di raffreddamento (S.R.) ed è accelerata da un'apposita pompa (P.I.2). I chiller (CHILL1, CHILL2) provvedono al raffreddamento dell'acqua**

Il sistema di prelievo/scarico è composto da:

- tre rubinetti a sfera per lo scarico dell'impianto ed il raccoglimento dei campioni;
- due contenitori in materiale plastico per il trasporto dei liquidi.



**Figura 6.7 – Sistema di prelievo/scarico: dallo scarico S1 vengono spillati i campioni e si provvede alle operazioni di scarico in apposito contenitore (C1). Le valvole S2 ed S3 vengono utilizzate per soli scopi di scarico. Sono evidenziate con una campitura tratteggiata tutte le parti non facenti parte del sistema, ma tuttavia interessate dalle operazioni di campionamento/scarico.**

Nei paragrafi seguenti i quattro blocchi saranno approfonditi e descritti nel dettaglio.

## 6.1. Sistema idraulico

### 6.1.1. Tubazioni, raccordi e tappi di chiusura

Le componenti dell'impianto sono tra loro collegate mediante delle tubazioni in acciaio inox di diametro 32 mm ( $\Phi 32$ ) (Figura 6.8). La scelta di questo materiale è giustificata dalle alte sollecitazioni, sia termiche che meccaniche, cui è sottoposto l'impianto durante l'attività cavitazionale, nonché dall'utilizzo di disinfettanti quali l'ipoclorito di sodio, utilizzato per i cicli di pulizia.



Figura 6.8 – Tubi in acciaio inox  $\Phi 32$  (Garofano, 2016)

Alle estremità delle tubazioni sono saldati elementi maschi e femmina *DIN 11851* o flange (*DN 32* o *DN 25*) per rendere possibile l'assemblaggio di tutte le varie componenti del sistema idraulico (Figura 6.9, Figura 6.10). In presenza delle flange, il serraggio tra gli elementi avviene grazie a quattro bulloni di diametro nominale 12 mm.



Figura 6.9 – Raccordo femmina *DIN 11851* (a sinistra) e raccordo maschio con girella (a destra), saldati alle tubazioni in acciaio inox (Garofano, 2016)



Figura 6.10 – Flangia DN 32 (Garofano, 2016)

Sul lato di mandata dell'impianto cavitazionale sono installati una serie di raccordi a T; questi possono essere strumentati (manometri) oppure chiusi mediante tappi in acciaio inox (Figura 6.11) ed utilizzati per operazioni di sfiato o ispezione. La presenza dei tappi di questi garantisce l'ermeticità e la tenuta idraulica del sistema, ma in particolar modo la loro installazione può permettere di monitorare lo stato delle tubazioni nel momento in cui il sistema è libero da acqua o di poter installare (in futuro) qualsiasi tipo di strumentazione di laboratorio si renda necessaria. I raccordi a T presentano, alle loro estremità, dei raccordi maschio o femmina con lo scopo di garantirne l'assemblaggio (Figura 6.12).



Figura 6.11 – Raccordi a T nel lato di mandata; alcuni risultano strumentati con manometri, altri chiusi con tappi

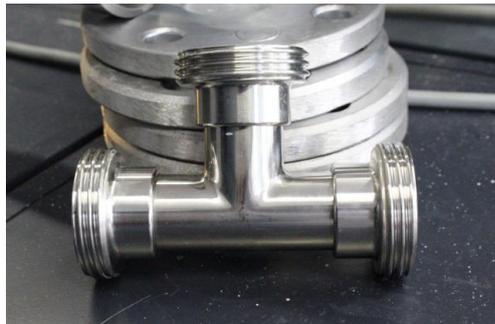


Figura 6.12 – Particolare di un raccordo a T; risulta visibile la filettatura per il serraggio tra elementi adiacenti (Garofano, 2016)

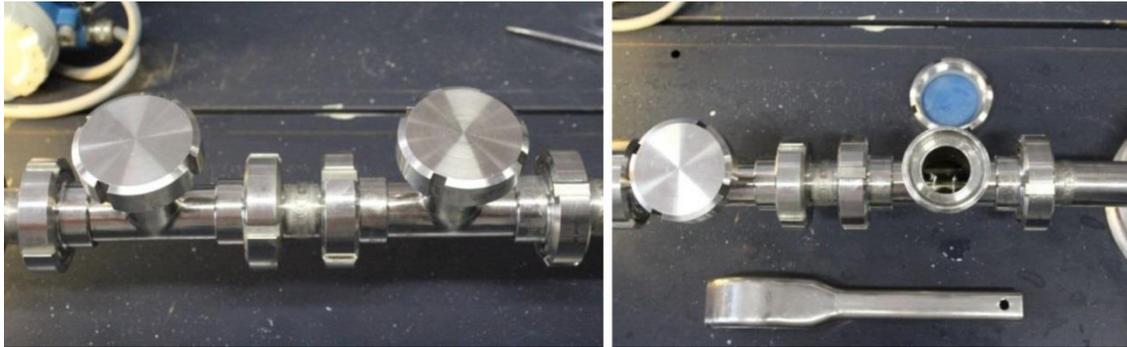


Figura 6.13 – Tappi installati sui raccordi a T presenti sul lato di mandata dell'impianto, a sinistra, e operazione di ispezione, a destra. È possibile notare, tra due T adiacenti, la presenza di un opportuno raccordo dotato di girelle. È visibile inoltre l'apposita chiave utilizzata per le operazioni di serraggio di tappi e girelle (Garofano, 2016)

La tenuta idraulica dell'impianto è garantita dall'installazione di adeguate guarnizioni, sia nel caso in cui è presente un'unione tra flange sia nel caso di raccordi maschio e femmina (Figura 6.14, Figura 6.15).

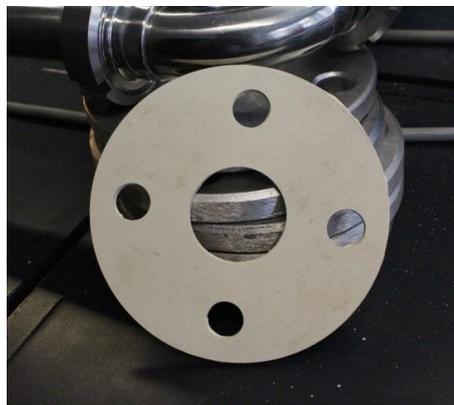


Figura 6.14 – Guarnizione in gomma installata tra due flange (Garofano, 2016)



Figura 6.15 – Guarnizione in gomma installata tra un raccordo maschio ed un raccordo femmina (Garofano, 2016)

### 6.1.2. Pompa idraulica per indurre la cavitazione idrodinamica

Per garantire la circolazione dell'acqua, all'interno dell'impianto di cavitazione è installata una pompa *Lowara 3SV11* (Figura 6.16); si tratta di una elettropompa centrifuga multistadio verticale.



Figura 6.16 – Elettropompa centrifuga multistadio verticale Lowara 3SV11 (Garofano, 2016)

La pompa idraulica è alimentata da 380 V di corrente elettrica ed è in grado di sviluppare una potenza di 1,1 kW. Genera, inoltre, una portata massima di 4,4 m<sup>3</sup>/h; la massima e la minima prevalenza fornite dalla pompa sono di 81 e 36,8 metri. Questa è dotata nella sua parte inferiore di due flange DN25 a cui possono essere serrate, mediante dei bulloni, le tubazioni in acciaio inox alle cui estremità sono saldate le medesime flange (Figura 6.17).



Figura 6.17 – Particolare dei collegamenti della pompa all'impianto, a monte (a sinistra) e a valle (a destra)

La rotazione della girante idraulica della pompa è regolata mediante un inverter. Questo permette di impostare la frequenza di rotazione ed indurre all'interno dell'impianto di cavitazione diverse configurazioni idrauliche in termini di portata e pressioni.

### 6.1.3. Inverter

In molte occasioni gli inverter sono confusi con altri apparecchi, i *softstart*, che hanno sembianze analoghe ma concetti di funzionamento, caratteristiche e prestazioni diverse. Il *softstart* è un avviatore elettronico che permette l'avvio e l'arresto del motore in maniera graduale, agendo di base sui parametri di tensione e corrente, ma una volta terminato l'avviamento, alimenta il motore ad una frequenza fissa di 50 Hz o viene addirittura bypassato.

L'inverter invece gestisce la variazione di velocità del motore secondo la formula:

$$n^{\circ} \text{giri} = 120 \cdot \frac{\text{Frequenza}}{n^{\circ} \text{poli}}$$

Da momento che 120 è un numero fisso ed i poli del motore non variano (numero pari a 2), l'unico fattore che può incidere sulla variazione di velocità è la variazione di frequenza; l'inverter è quindi un apparato che effettua questa operazione. La capacità di variare la frequenza non è solo limitata alle fasi di avvio-arresto ma anche durante tutto il tempo di marcia del motore. Gli inverter consentono la regolazione di velocità e quindi la variazione di portata delle pompe (in genere vi è un limite sotto i 30 Hz), permettendo così di implementare varie soluzioni progettuali. Gli avvii e gli arresti graduali riducono gli stress sui componenti meccanici, idraulici ed elettrici: si ottengono significativi risparmi energetici in quanto la pompa viene utilizzata per le effettive richieste del sistema idraulico. Le protezioni elettroniche presenti nei convertitori consentono una efficace e completa protezione della pompa. Infine si aboliscono gli spunti di avviamento, permettendo così di non dover sovradimensionare i componenti elettrici e gli eventuali gruppi elettrogeni di soccorso (*Garofano, 2016*).

All'interno dell'impianto idraulico costruito l'inverter (Figura 6.18) si presenta come uno degli elementi più importanti, poiché, agendo sulla frequenza e cambiando quindi la velocità di rotazione della girante della pompa, permette di indurre all'interno del sistema portate e condizioni idrauliche differenti, permettendo così di variare le condizioni al contorno del sistema e permettendo quindi di testarlo in diverse configurazioni.



Figura 6.18 – Inverter dell'impianto di cavitazione idrodinamica; modificando la frequenza di rotazione della girante idraulica della pompa (nella fotografia impostata a 10 Hz) è possibile indurre all'interno dell'impianto portate e pressioni differenti

#### 6.1.4. Manometri per il monitoraggio delle cadute di pressione

A monte e a valle della piastra forata sono installati due manometri (Figura 6.19) che permettono di monitorare la pressione del fluido all'interno delle tubazioni. La decisione di posizionare i manometri rispettivamente prima e dopo il reattore cavitazionale è stata presa al fine di poter valutare le cadute di pressione che si realizzano in corrispondenza della piastra forata.



Figura 6.19 – Posizionamento dei manometri lungo il ramo di mandata dell'impianto; tra i due è possibile osservare la piastra forata e la specola di controllo (Garofano, 2016)



**Figura 6.20 – Manometro utilizzato per monitorare la pressione del fluido all'interno dell'impianto idraulico**

Sia la molla che il perno risultano essere in ottone, mentre la lente è in acrilico. I manometri installati permettono una lettura delle pressioni in scala Bar (fino a 10 Bar) e in scala Psi (fino a 145 Psi). Presentano una classe di precisione 1,6 (ovvero ha un errore sulla misura pari all'1,6% della portata dello strumento) e risultano essere conformi alle norme di sicurezza EN 837-1.

Grazie all'ausilio di un trapano a colonna è possibile effettuare fori sui tappi che chiudono l'unica uscita libera dei raccordi a T installati sul lato di mandata dell'impianto ed inserire, quindi, uno scarico di fondo con parte terminale filettata (avvolta con il nastro di teflon) a cui è possibile avvitare i manometri (Figura 6.20). Tale procedimento si è reso necessario al fine di garantire la tenuta idraulica del sistema (Garofano, 2016).

### **6.1.5. Serbatoio di accumulo**

Il serbatoio di accumulo è collocato su un'impalcatura ad una altezza di un metro rispetto al piano stabile su cui poggia il resto dell'impianto idraulico (Figura 6.21); è realizzato in acciaio inox ed ha capacità di circa 50 Litri. Alla sommità vi è una piastra AISI 304 di spessore 2 mm; la piastra ed il serbatoio sono serrati tra di loro da 16 bulloni M6. Sia la piastra di chiusura che il fondo del serbatoio presentano tre raccordi femmina.



Figura 6.21 – Posizionamento del serbatoio di accumulo sull'impalcatura (Garofano, 2016)

I tre raccordi femmina collocati sulla faccia superiore del serbatoio sono utilizzati per:

- le operazioni manuali di carico dell'impianto, introducendo tramite appositi contenitori sia l'acqua milliQ che la carica batterica;
- l'inserimento del disinfettante durante le operazioni di pulizia dell'impianto;
- l'inserimento della gomma di plastica allacciata alla rete idrica, utilizzata in fase di risciacquo dell'impianto;
- l'ingresso e la fuoriuscita delle tubazioni costituenti la serpentina di raffreddamento posizionata all'interno del serbatoio;
- il trasporto all'interno del serbatoio dell'acqua circolante all'interno dell'impianto grazie all'unione con una tubazione di alimentazione.



Figura 6.22 – Tacche di livello in corrispondenza di 21, 31, 41 e 51 litri

Per quanto riguarda il fondo del serbatoio, questo risulta dotato di tre raccordi femmina utilizzati come segue:

- collegamento ad una tubazione verticale in acciaio che presenta alla sua estremità un raccordo a T, cui sono collegate due rubinetti, uno utilizzato per il sistema di scarico, l'altro per il funzionamento del piezometro;
- installazione di uno scarico di fondo; il raccordo femmina è stato chiuso con un tappo e forato mediante l'ausilio del trapano a colonna per permettere il fissaggio del rubinetto;
- predisposizione di un terzo attacco per eventuale nuova configurazione e/o strumentazione.



Figura 6.23 – Fondo del serbatoio

### 6.1.6. Misuratore di portata

Per monitorare la portata che fluisce all'interno dell'impianto idraulico viene installato un misuratore elettromagnetico di portata *PROline Promag 10* (Figura 6.24, a sinistra). Il misuratore presenta due flange esterne DN25 che permettono di collegarlo, mediante quattro viti M6, alle tubazioni in acciaio inox, alle cui estremità sono saldate due flange del medesimo tipo. Tra la flangia della tubazione e quella del misuratore di portata è installata una guarnizione in gomma al fine di garantire la tenuta idraulica del sistema.

Il misuratore è dotato di un display (fissato al bancale su cui poggia l'impianto mediante quattro viti) che permette la visualizzazione della portata misurata (Figura 6.24, a destra). Il

misuratore fornisce una stima del flusso, affetta da un errore dello 0,5% della portata volumetrica misurata e presenta un campo di misura variabile tra 4 dm<sup>3</sup>/min e 9600 m<sup>3</sup>/h (Garofano, 2016).



Figura 6.24 – Misuratore di portata installato all'interno dell'impianto (a sinistra) e display di visualizzazione della portata fluente (a destra).

### 6.1.7. Piezometro

Per poter monitorare il livello dell'acqua all'interno del serbatoio è stato installato un piezometro. Questo è costituito da un tubo di gomma trasparente da 3/8 di pollice, fissato con una fascetta metallica (Figura 6.25) al piego gomma inclinato di 90 gradi di una valvola a sfera installata sotto il serbatoio. Nella parte superiore il piezometro è fissato all'impalcatura ed al tubo flessibile in acciaio inox mediante fascette plastiche, in modo da garantirne quanto più possibile la verticalità e la stabilità.



Figura 6.25 – Tubo di gomma trasparente da 3/8 di pollice utilizzato per realizzare il piezometro (a sinistra) e fascetta metallica utilizzata per serrare il piezometro al piego-gomma (a destra) (Garofano, 2016)

Il tubo in gomma trasparente ed il serbatoio in acciaio inox risultano così comunicanti, permettendo di assumere come livello idrico di entrambe le componenti quello letto mediante il piezometro. Questo risulta essere particolarmente funzionale durante le operazioni di riempimento dell'impianto, in quanto rende possibile monitorare l'avanzamento del livello

idrico all'interno del serbatoio, permettendo di comprendere quando sospendere l'alimentazione idrica ed evitare lo sfioro dell'acqua dalla sommità del serbatoio stesso (Figura 6.26). Al tempo stesso, essendo noto il livello all'interno del serbatoio corrispondente a 21, 31, 41 e 51 litri, il piezometro permette di conoscere il raggiungimento di tali volumi e ciò risulta essere molto importante durante le prove di disinfezione.



Figura 6.26 – Collegamento del piezometro al piego-gomma (a sinistra) ed indicazione dei livelli idrici all'interno del serbatoio (a destra)

## 6.2. Reattore cavitazionale

### 6.2.1. Piastra forata per l'induzione della cavitazione

La piastra forata (OPL), utilizzata per indurre la cavitazione, è costituita un disco di alluminio sul quale sono stati praticati opportuni fori (Figura 6.27). Questi sono stati realizzati mediante l'ausilio di un trapano a colonna, equipaggiato con punte di cobalto di diametro diverso, a seconda del tipo di geometria che si desidera realizzare.

Come detto, l'OPL è la componente responsabile della nascita della cavitazione, in quanto la portata generata dall'azione idraulica della pompa viene forzata a passare all'interno di fori di diametro molto più piccolo rispetto a quello dei tubi di alluminio costituenti l'intero circuito. Necessariamente, dovendo la portata rimanere costante, in corrispondenza della piastra forata si registrano notevoli incrementi di velocità del fluido e cadute di pressione tali da scendere sotto la pressione di vapor saturo del liquido.

La piastra è inserita tra due flange DN32 e viene serrata a queste ultime grazie all'ausilio di 4 bulloni di diametro nominale 12 mm. Sulle due facce della piastra sono installate delle guarnizioni in gomma che garantiscono la tenuta idraulica del sistema.

Durante la sperimentazione condotta da *Garofano (2016)* e *Ricucci (2017)* sono state testate diverse geometrie di OPL per valutare le differenze sui principali parametri fisici caratterizzanti il fenomeno (esempio cadute di pressione, velocità nel foro, portata, etc.), mentre il presente lavoro di Tesi si è concentrato sullo studio degli effetti indotti da una piastra a 4 fori, ciascuno di diametro 2,5 mm (Figura 6.28).



Figura 6.27 – Piastre a 5 e 3 fori i quali sono stati realizzati mediante un trapano a colonna dotato di una punta in cobalto da 2 mm di diametro (*Garofano, 2016*)



Figura 6.28 – Piastra a 4 fori, diametro 2,5 mm utilizzata durante gli studi di disinfezione con *E. coli*

### 6.2.2. Specola di vetro

La specola di vetro è uno degli elementi più importanti dell'impianto idraulico in quanto permette di visualizzare costantemente l'attività cavitazionale sviluppata dalla piastra. La specola è posizionata immediatamente a valle del reattore cavitazionale e a monte del manometro  $M_2$ ; essa è composta da una struttura di acciaio inox e da un cilindro di vetro dello stesso diametro della tubazione.

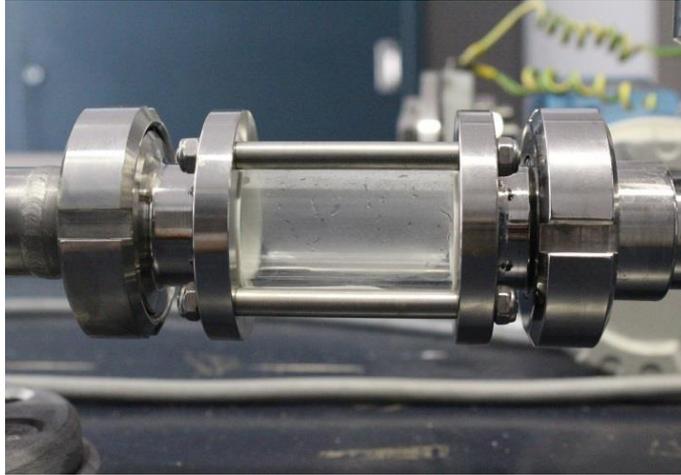


Figura 6.29 – Specola di vetro in linea DIN 11851 installata all'interno dell'impianto idraulico (Garofano, 2016)

È dotata alle due estremità di raccordi femmina DIN 11851, che rendono possibile l'assemblaggio con le tubazioni dell'impianto (Figura 6.29). Il vetro risulta essere borosilicato; le principali caratteristiche di questa tipologia di materiale sono la robustezza, la resistenza agli sbalzi termici, il basso coefficiente di dilatazione termica, la resistenza agli agenti chimici e la trasparenza. La specola di vetro ha quindi la capacità di resistere fino ad una pressione di 10 bar (conforme con le caratteristiche dell'impianto in grado di generare al massimo delle pressioni nelle tubazioni di 8,1 bar) (Garofano, 2016).



Figura 6.30 – Attività cavitazionale visibile attraverso la specola di vetro

### 6.2.3. Valvola a sfera

A valle della piastra forata, della specola e del manometro M<sub>2</sub> è posizionata una valvola che permette di agire sulla regolazione della pressione agente a valle della piastra forata. Andando a chiudere progressivamente la valvola è possibile innalzare la pressione di valle per creare una contropinta tale da facilitare l'implosione delle bolle di cavitazione che vengono a crearsi dalla piastra forata. In presenza in particolar modo di elevate portate, infatti, le bolle prodotte dalla piastra forata non implodono e scorrono all'interno del sistema sino al raggiungimento del serbatoio.

La valvola installata è del tipo a sfera in acciaio inossidabile AISI 304 con attacchi maschio e femmina DIN 11851 alle due estremità. Presenta una maniglia anch'essa in acciaio inossidabile per regolare la sezione fluente (Figura 6.31). Il principio di funzionamento della valvola è il medesimo descritto per le valvole a sfera usate come scarichi dell'impianto.

Durante l'acquisizione dei dati idraulici l'utilizzo della valvola a sfera in acciaio inox è stata molto importante; infatti sono state testate configurazioni con 0 bar, 1 bar e 2 bar di pressione a valle della piastra forata. Il raggiungimento di tali valori è stato garantito dall'operato di tale valvola; modificando l'apertura o la chiusura della sezione fluente grazie alla maniglia è stato possibile avere sempre la pressione di valle desiderata.



Figura 6.31 – Valvola a sfera per regolazione della pressione di valle (Garofano, 2016)

#### 6.2.4. Luci: lampada e puntatore laser

L'impianto è equipaggiato, inoltre, con una lampada da ufficio per facilitare la visualizzazione delle bolle indotte dalla cavitazione e gli scatti fotografici. La lampada può essere posizionata in diverse posizioni nei pressi della specola di vetro. L'illuminazione della specola rende nitida la visione dell'attività cavitazionale in corso, permettendo di osservare anche le minime perturbazioni indotte dalla piastra forata (Figura 6.30).

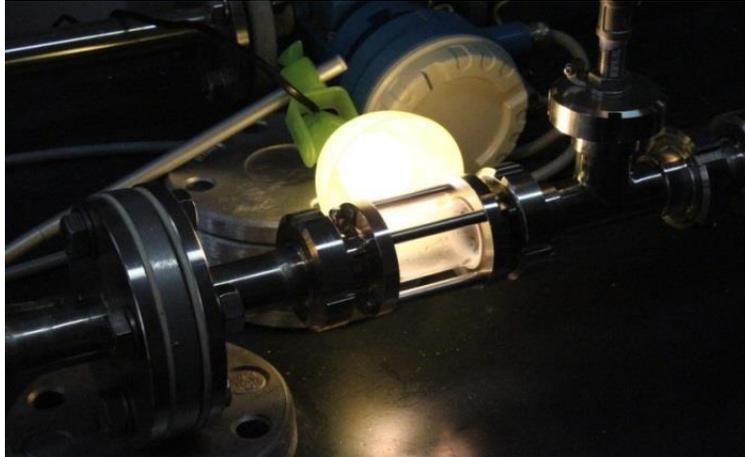


Figura 6.32 – Posizionamento lampada nei pressi della specola di vetro (Garofano, 2016)

All'attività svolta con la lampada è stata affiancata quella realizzata con un semplice puntatore laser. Questa tecnologia permette di illuminare in maniera ottimale un'area limitata, evidenziando in maniera nitida i fenomeni cavitazionali che si sviluppano a valle della piastra forata (Figura 6.32, Figura 6.33))



Figura 6.33 – Fotografia scattata durante l'illuminazione con puntatore laser monocromatico rosso

La possibilità di osservare tutte le sfaccettature dell'attività cavitazionale al variare della frequenza impostata con l'inverter permette di studiare in maniera dettagliata e completa l'evoluzione del fenomeno.

### 6.3. Impianto di raffreddamento

Durante il funzionamento, il liquido che circola all'interno dell'impianto tende a riscaldarsi per l'azione della pompa idraulica e soprattutto per i fenomeni di cavitazione sviluppati dal reattore: implosioni, *hot spots*, sforzi di taglio. Per ovviare ai problemi connessi all'aumento di temperatura, è stato predisposto, fin dalle prime fasi (Garofano, 2016) un opportuno impianto di raffreddamento costituito da un chiller, un serbatoio di accumulo, una serpentina in gomma, una pompa idraulica per mobilitare l'acqua all'interno del circuito di raffreddamento, un raccordo a T dotato di valvola a sfera per le operazioni di carico e scarico del serbatoio.

Tuttavia, l'inizio della fase degli esperimenti di disinfezione svolta da Ricucci (2017), ha messo in evidenza i limiti di tale sistema di raffreddamento. Durante il funzionamento dell'impianto, la temperatura saliva in maniera troppo rapida superando i 30°C; con conseguente influenza sulla vitalità dei batteri. Per sopperire a questo problema si è deciso di apportare due modifiche all'impianto di raffreddamento:

- l'aggiunta di ulteriore tubo alla serpentina in gomma, in modo da aumentare la superficie di scambio tra il liquido refrigerato e quello trattato durante gli esperimenti;
- l'aggiunta di un nuovo chiller, con capacità di raffreddamento maggiori rispetto a quello già installato; i due apparecchi sono quindi stati collegati in serie, per ottimizzarne il funzionamento.
- la sostituzione della pompa idraulica utilizzata per mobilitare l'acqua del circuito di raffreddamento

L'impianto di raffreddamento, alla data di stesura della Tesi, risulta così composto:

- due chiller collegati in serie per il raffreddamento dell'acqua;
- un serbatoio di accumulo in plastica;
- serpentina in gomma inserita all'interno del serbatoio in acciaio inox;
- pompa idraulica per mobilitare l'acqua all'interno del circuito di raffreddamento;
- raccordo a T dotato di valvola a sfera, per le operazioni di carico e scarico del serbatoio.



Figura 6.34 – Vista d'insieme dell'impianto cavitazionale (poggiato sul bancone) e dell'impianto di raffreddamento (sulla sinistra, nella fotografia)

### 6.3.1. Chiller

Per refrigerare l'acqua in circolo all'interno della serpentina installata nel serbatoio dell'impianto di cavitazione sono stati utilizzati due chiller collegati in serie (Figura 6.35):

- *chiller RESUN CL 610;*
- *chiller HAQUOSS ARTIKA 2000.*



Figura 6.35 – I due chiller utilizzati nell'impianto di raffreddamento. A destra è visibile in collegamento in serie tra i due apparecchi.

Come descritto da *Garofano (2016)*, il chiller (refrigeratore o gruppo frigorifero) è una macchina termica che, sfruttando la compressione e l'espansione di gas frigoriferi (ammoniaca o freon, composto chimico derivato dal metano e dall'etano e appartenente alla

famiglia degli alogenuri alchilici, chiamati impropriamente anche clorofluorocarburi, CFC), consente di sottrarre calore ad un fluido. Per generare l'effetto refrigerante, il chiller sfrutta un ciclo frigorifero, cioè un ciclo termodinamico che ha per effetto il trasferimento di calore da un fluido (o da un ambiente) ad un altro.

In letteratura sono descritti diversi tipi di ciclo frigorifero; quello sfruttato dal chiller installato è detto ciclo a compressione o di Kelvin. In un chiller con ciclo di Kelvin, un compressore viene impiegato per comprimere il gas frigorifero che, in conseguenza dell'aumento di pressione, passa dallo stato gassoso allo stato liquido. Il gas viene quindi fatto espandere, tornando alla fase gassosa ed evaporando. Per effetto dell'espansione e della conseguente evaporazione, il gas sottrae la quantità di calore necessaria a compiere il proprio passaggio di stato, generando l'effetto frigorifero desiderato.

Un chiller consta generalmente di una serie di macchinari e apparecchiature atti a garantire il funzionamento del ciclo di raffreddamento:

- compressore;
- evaporatore;
- condensatore.

Un chiller è quindi composto da macchinari accostati a scambiatori di calore, impiegati per fornire o sottrarre energia termica in forma di calore nelle diverse fasi di un ciclo termodinamico.

L'impianto di raffreddamento è alimentato con comune acqua potabile. La temperatura minima ottenibile con il *chiller CL 610* è di 2°C, mentre per il modello *ARTIKA 2000* è di 3°C. Entrambi sono dotati di un display per il monitoraggio della temperatura dell'acqua durante il funzionamento.

### 6.3.2. Serpentina di raffreddamento

All'interno del serbatoio di accumulo in acciaio inox, è installata una serpentina di raffreddamento nella quale scorre, accelerata dall'azione idraulica della pompa dell'impianto di raffreddamento, l'acqua refrigerata dai due chiller. In questo modo si genera uno scambio termico tra l'acqua contenuta nella serpentina e quella contenuta all'interno del serbatoio dell'impianto di cavitazione, che provvede a stabilizzare la temperatura dell'acqua sottoposta a disinfezione.



Figura 6.36 – Fuoriuscita dal serbatoio delle tubazioni di mandata (a sinistra) e di ritorno (a destra) della serpentina (Garofano, 2016)

La serpentina di raffreddamento è realizzata con un tubo di gomma trasparente, il quale è avvolto a spirale e posizionato all'interno del serbatoio in acciaio inox. Tale serpentina è raccordata alle tubazioni dirette ai chiller grazie a dei raccordi a compressione, i quali garantiscono anche la tenuta idraulica del sistema (Figura 6.37). Le tubazioni della serpentina fuoriescono dall'apposito raccordo femmina posto sulla sommità del serbatoio (Figura 6.36).



Figura 6.37 – Raccordo a compressione usato per collegare la serpentina alle tubazioni dirette ai chiller (Garofano, 2016)

### 6.3.3. Pompa idraulica del circuito di raffreddamento

Per mettere in circolazione all'interno della serpentina di gomma l'acqua raffreddata dal chiller è installata una pompa idraulica *WILTEC 50966* (Figura 6.38). La pompa viene può essere alimentata da una corrente di 220-240 V/50Hz, sviluppa una potenza di 50 W ed una portata massima di 7000 L/h, è in grado di generare una prevalenza massima di 4,6 metri ed è certificata come IP X8.

Sia sul lato di mandata che in quello di ingresso, sono state fissati due porta gomma da 3/8 di pollice, cui sono stati serrati, con opportune fascette in metallo, le tubazioni in gomma.



Figura 6.38 – Pompa idraulica *WILTEC 50966* utilizzata per il ricircolo dell'acqua dell'impianto di raffreddamento

### 6.3.4. Serbatoio di raccolta

L'acqua raffreddata dal chiller e messa in circolo dalla pompa idraulica viene raccolta all'interno di un serbatoio di plastica. Questo è fissato, mediante delle fascette di acciaio, all'impalcatura di metallo realizzata per sostenere il serbatoio in acciaio inox dell'impianto di cavitazione (Figura 6.39).

Il recipiente è dotato di due porta gomma, uno sul tappo superiore ed uno sulla base, con opportuni dadi. Anche in questo caso sono state installate delle guarnizioni di gomma per assicurare la tenuta idraulica del sistema. Al porta gomma installato sul tappo del serbatoio è fissato, con una fascetta di metallo, il tubo di ritorno della serpentina di raffreddamento, mentre al portagomma installato sulla base del serbatoio, sempre mediante una fascetta di metallo, è fissato il tubo di ingresso nel chiller. Per garantire la fuoriuscita dell'aria, contenuta

all'interno del serbatoio di plastica e trasportata all'interno della serpentina di raffreddamento, è stato praticato un foro sul tappo di chiusura.



Figura 6.39 – Serbatoio di plastica per la raccolta dell'acqua in circolo nella serpentina. A destra sono visibili alcuni particolari: il tubo di ritorno, il foro per garantire la fuoriuscita dell'aria, le fascette di metallo per il fissaggio all'impalcatura (Garofano, 2016).

### 6.3.5. Raccordo a T e valvola a sfera

Sul lato di ritorno del circuito di raffreddamento, precisamente al di sotto del porta gomma installato alla base del serbatoio di plastica di raccolta, è installato un raccordo a T in ottone (Figura 6.40). Ad una estremità del raccordo a T è fissata, con una fascetta di metallo, una porzione di tubazione che collega il raccordo a T stesso al porta gomma inserito nella base del serbatoio di plastica di raccolta. Una seconda estremità del raccordo è dotata di una valvola a sfera equipaggiata con un porta gomma a cui è possibile collegare il tubo di gomma allacciato alla rete idrica e consentire così il riempimento del circuito di raffreddamento. Nel momento in cui il sistema risulta pieno di acqua, la valvola a sfera viene chiusa, permettendo la circolazione dell'acqua nell'impianto di raffreddamento senza alcuna fuoriuscita idrica. La stessa valvola viene poi utilizzata nelle operazioni di svuotamento del serbatoio. Alla terza estremità del raccordo a T è fissata, con una fascetta di metallo, la tubazione in gomma direttamente collegata con i chiller.



Figura 6.40 – Raccordo a T in ottone collegato al serbatoio di plastica ed equipaggiato con una valvola a sfera dotata di portagomma (Garofano, 2016)

#### **6.4. Sistema di scarico e prelievo dei campioni**

All'interno dell' impianto sono dislocati tre scarichi: uno nei pressi della valvola di regolazione della pressione di valle, uno immediatamente al di sotto del serbatoio di acciaio inox, uno nei pressi del raccordo a T cui è collegato anche il piezometro.

Gli scarichi sono realizzati da valvole a sfera che presentano un piego gomma di 90 gradi della dimensione di 3/8 di pollice. Il motivo dell'installazione delle valvole a sfera deriva dalla necessità di dover periodicamente spillare campioni d'acqua per effettuare le analisi chimiche e biologiche necessarie per valutare l'efficacia dell'attività cavitazionale sulla disinfezione dell'acqua. Inoltre garantiscono la possibilità di avere dei comodi organi di scarico per eliminare l'acqua dall'impianto nelle varie fasi degli esperimenti.



Figura 6.41 – Disposizione degli scarichi lungo l'impianto idraulico

Una valvola a sfera è generalmente composta da un corpo (1), da tenute o sede, (2), da un otturatore, ovvero la sfera vera e propria (3), da una leva di azionamento (4) e da uno stelo (5) (Figura 6.42).

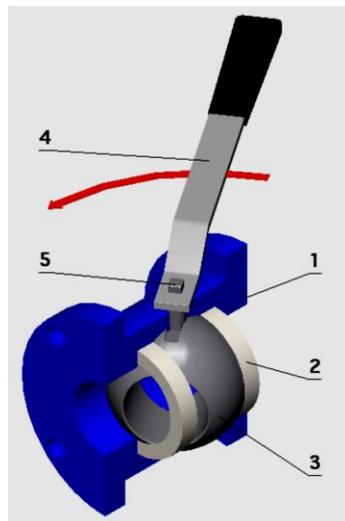


Figura 6.42 – Rappresentazione di una valvola a sfera con i dettagli dei suoi elementi

Il corpo è in genere monoblocco nelle versioni economiche, diviso in tre parti avvitate l'una nell'altra o tra loro flangiate nelle versioni più costose. Per pressioni medio-basse si impiega comunemente ottone lavorato per stampaggio, mentre per pressioni più alte si preferisce l'acciaio al carbonio o l'acciaio inossidabile. L'otturatore è dello stesso materiale del corpo; si usa spesso l'acciaio inossidabile con corpi in metalli meno nobili ed ha finitura superficiale molto curata per consentire un buon contatto con la sede di tenuta. Questa è costituita da due anelli sagomati, in PTFE (Teflon). Lo stelo è dello stesso materiale della sfera o del corpo, ed ha anch'esso una tenuta mediante anelli di PTFE opportunamente sagomati. La leva di manovra stampata di alluminio nel caso di valvole di dimensione minore, di acciaio protetto contro la corrosione nelle valvole più grandi (Garofano, 2016).

La spillatura dei campioni avviene dalla valvola indicata in Figura 6.41 on la lettera (a); le operazioni di scarico vengono invece effettuate utilizzando tutte e tre le valvole. I contenitori per il trasporto dei liqui sono in materiale plastico ed il loro trasporto fino al punto di sversamento viene effettuato mediante l'ausilio di un carrello.



**Figura 6.43 – Contenitori in materiale plastico utilizzati per le operazioni di scarico dell'impianto**

## 6.5. Altra strumentazione

### 6.5.1. Termometro

La misurazione della temperatura risulta essere importante principalmente per tre ragioni:

- la pressione di vapor saturo, la cui conoscenza è indispensabile per monitorare l'attività cavitazionale e per calcolare il numero di cavitazione, risulta essere strettamente dipendente dalla temperatura;
- la viscosità dinamica del liquido, di cui è funzione il numero di Reynolds, è anch'essa dipendente dalla temperatura;
- l'attività biologica dei batteri è funzione della temperatura.

Durante i vari esperimenti vengono spillati, ad intervalli prestabiliti, i campioni; parallelamente viene spillato un campione al cui interno viene immerso il termometro per poter misurare correttamente la temperatura. A tal fine è utilizzato il *TFA DIGITAL Einstich-Termometer*, certificato IP 67 (Figura 6.44), un termometro a sonda in acciaio inossidabile da 105 mm, digitale e portatile, generalmente indicato per l'utilizzo in presenza di sostanze liquide, pastose e semisolide. Il sensore per la misurazione della temperatura si trova in corrispondenza della punta della sonda, quindi l'operazione viene eseguita introducendola per almeno 2 cm di profondità nel fluido. Il tempo di misurazione è di circa 8 secondi. Il termometro è provvisto di apposito pulsante per commutare da gradi Celsius a gradi Fahrenheit. La precisione dello strumento è di  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  nel range  $-10 - 100^{\circ}\text{C}$  e risulta progettato seguendo le norme HACCP e EN 13485, quindi conforme e adatto per l'uso professionale nei settori industriale, commerciale, industriale e di laboratorio (<http://www.tfa-dostmann.de>).



Figura 6.44 – Termometro a sonda *TFA DIGITAL Einstich-Termometer* con la fondina protettiva per il sensore.

### 6.5.2. Fonometro

Durante la seconda fase di esecuzione degli esperimenti, si è deciso di fornire l'impianto di un fonometro, al fine di poter stabilire, mediante l'analisi delle registrazioni, quale fosse l'intensità dei fenomeni cavitazioni sviluppati dalle diverse configurazioni di test.

Il fonometro (Figura 6.45) è un dispositivo elettroacustico per la misura del livello di pressione sonora. La sua funzione principale è quella di convertire un segnale acustico variabile nel tempo in un valore numerico che esprime il livello di pressione.

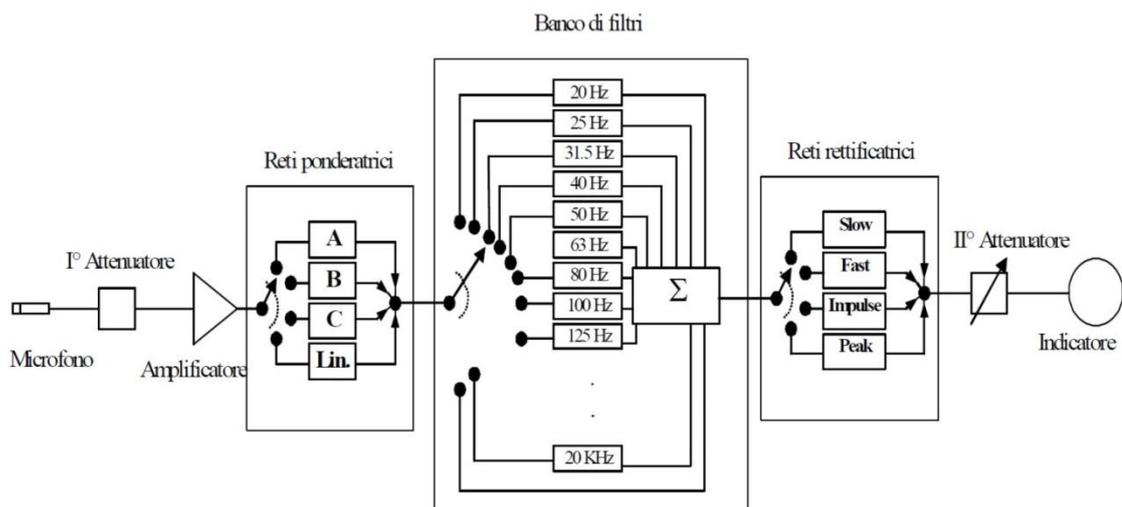


Figura 6.45 – Schema riassuntivo delle componenti di un fonometro (Fonte CIRIAF)

Si descrivono di seguito, in maniera sintetica, le varie componenti dello strumento (<http://www.ciriaf.it>, Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento e sull'Ambiente "Mauro Felli"). Il microfono di cui è dotato il fonometro può essere di due tipologie: a condensatore oppure piezoelettrico. Nel nostro caso lo strumento è dotato della prima tipologia. I microfoni a condensatore sono costituiti da una piastra mobile, detta membrana, e da una piastra fissa, che costituiscono le armature di un condensatore piano. A seguito delle variazioni di pressione, la membrana entra in vibrazione, determinando variazioni della distanza dalla piastra fissa; poiché la capacità di un condensatore piano dipende dalla distanza fra le armature, le variazioni di pressione si traducono in variazioni della capacità  $C$  secondo la relazione (6.1):

$$C = \varepsilon * \frac{S}{d} \quad (6.1)$$

Con:

$\varepsilon$  = costante dielettrica del mezzo all'interno delle armature;

$S$  = superficie delle armature;

$d$  = distanza fra le armature.

Lo scopo dell'attenuatore è evitare il sovraccarico dell'amplificatore, mantenendo l'ampiezza del segnale elettrico al di sotto di un valore detto soglia di saturazione. Infatti il funzionamento dell'amplificatore è lineare (segnale in uscita proporzionale a quello in ingresso) solo se l'ampiezza del segnale in ingresso è inferiore alla soglia di saturazione; in caso contrario si verificano distorsione del segnale e danni ai circuiti dell'amplificatore.

La funzione dell'amplificatore è quella di generare un segnale elettrico con potenza sufficiente da potere essere filtrato e condizionato dai circuiti a valle, con un rapporto segnale/rumore sufficientemente elevato. In genere i cavi di collegamento tra microfono ed amplificatore sono estesi, poiché durante le misure si trovano in posizioni distanti; è quindi necessario collegare un preamplificatore direttamente al microfono.

In questi strumenti la pressione sonora viene tradotta in un corrispondente segnale elettrico, a sua volta pesato, quasi sempre, con un particolare filtro, denominato "curva di pesatura o di ponderazione". Il segnale elettrico può essere filtrato con tre curve di ponderazione: curva A, curva B e curva C. La curva A è un filtro avente una risposta in frequenza costruita in base alla isofonica a 40 phon: le componenti del segnale in uscita da tale filtro sono attenuate di una quantità pari alla differenza fra il valore in dB della isofonica a 40 phon e 40dB. Questa curva è nata in seguito agli studi di Fletcher e Munson sulla risposta dell'orecchio umano rispetto alla composizione dei suoni in livelli e frequenza. Risulta essere quindi uno strumento elettronico che reagisce al suono in maniera simile a quella dell'orecchio umano. Esso fornisce il livello della pressione sonora efficace mediato nel tempo con una legge esponenziale, caratterizzata da una costante di tempo ben definita che diventa importante nello studio di un livello istantaneo massimo.

Il banco di filtri è costituito da un insieme di filtri, ciascuno dei quali di tipo *passa banda*, con larghezza di banda pari ad una ottava od ad un terzo di ottava. Un filtro passa banda ideale ha una risposta in frequenza pari ad 1 all'interno della larghezza di banda (*banda passante*), dove il segnale deve essere riprodotto linearmente, e pari a 0 per il resto delle frequenze. Una risposta di questo tipo non è però realizzabile. La norma impone che per frequenze pari ad otto volte la frequenza centrale, l'attenuazione del filtro sia superiore a 60 dB mentre all'interno della banda passante sia compresa fra -0,5 dB e 1dB.

Le reti rettificatrici e l'integratore sono dei circuiti elettronici che permettono di ottenere il valore efficace della pressione acustica istantanea; il segnale di pressione acustica viene elevato al quadrato e poi integrato in intervallo di tempo stabilito (1000 s nella rete slow e 125 ms nella rete fast). Il fonometro è dotato anche di due reti dinamiche: *impulse* e *peak*. La rete *impulse* opera con costanti di tempo diverse a seconda che il livello del segnale sia in salita o in discesa (rispettivamente 35 ms e 1200 ms). La rete *peak* invece è costituita da un circuito integratore di tempo pari a 35 ms in serie con un circuito che consente di registrare il livello massimo raggiunto dal segnale acustico. Il *fonometro integratore* permette quindi di calcolare un livello  $L_{eq}$ , ossia l'integrale della pressione sonora al quadrato, in un determinato tempo, diviso per il tempo stesso, ovvero l'energia sonora complessiva. Tale quantità viene

definita “*livello sonoro continuo equivalente*”, cioè il livello sonoro che un rumore costante dovrebbe avere per eguagliare la quantità di energia acustica fornita dal rumore reale, fluttuante nel tempo.

Il fonometro utilizzato durante gli esperimenti di disinfezione è un *Brüel & Kjær Type 2222* (Figura 6.46) dotato di microfono a condensazione direzionale ed alimentato con 3 pile AA. Questo fonometro è uno strumento rispondente alle norme IEC tipo 1P per misure ambientali di precisione. È stato altresì necessario dotare il fonometro di una scheda di acquisizione dati, per poter trasferire le registrazioni ad un apposito software di elaborazione su notebook. Il collegamento è garantito da un uscita AC dotata di un attacco micro-jack.



Figura 6.46 – Fonometro *Brüel & Kjær Type 2222* utilizzato durante gli esperimenti

### 6.5.3. Scheda di acquisizione dati

L'acquisizione dati (DAQ) è un processo per misurare un fenomeno elettrico o fisico come la tensione, la corrente, la temperatura, la pressione od il suono. Un sistema DAQ è formato da sensori, hardware di misura DAQ e da un computer con software programmabile. Rispetto ai sistemi di misura tradizionali, i sistemi DAQ basati su PC permettono di sfruttare tutte le funzioni avanzate di visualizzazione, elaborazione, connettività, offrendo una soluzione di misura efficace, flessibile e potente.

L'hardware DAQ agisce da interfaccia tra il computer e i segnali del mondo esterno. Funziona come un sistema che digitalizza i segnali analogici in entrata in modo che il computer possa interpretarli. I tre componenti fondamentali di un dispositivo DAQ, utilizzati per la misura di un segnale, sono: il circuito di condizionamento del segnale, un *ADC (analog-to-digital converter)* ed un bus per il collegamento al computer (Figura 6.47). I segnali che provengono dai sensori potrebbero essere troppo rumorosi o pericolosi da misurare direttamente. Il circuito di condizionamento gestisce il segnale in modo da poterlo adattare per l'ingresso in un *ADC*. Questo circuito può includere un amplificatore, un attenuatore, dei filtri e un sistema di isolamento.

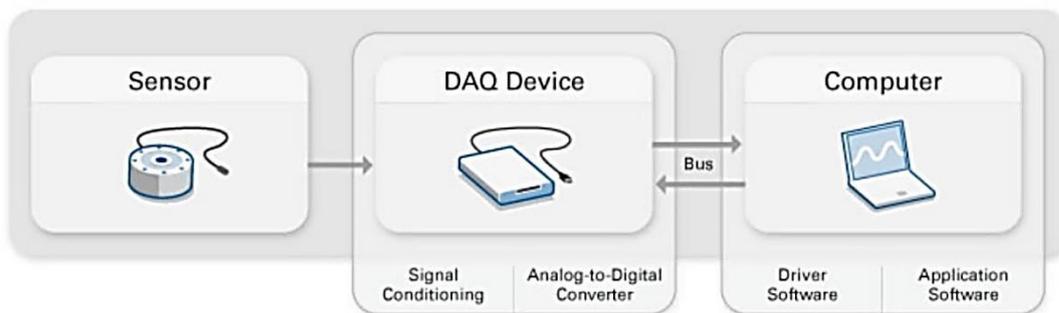


Figura 6.47 – Schema di funzionamento di un sistema formato da un sensore, una DAQ ed un computer per l'analisi nei dati (Fonte: <http://www.ni.com>)

I segnali analogici dei sensori devono essere convertiti in digitali prima di poter essere manipolati dai dispositivi digitali come ad esempio un computer. Un *ADC* è un chip che fornisce una rappresentazione di un segnale analogico in un determinato momento. In pratica, i segnali analogici variano continuamente nel tempo ed un *ADC* acquisisce "campionamenti" periodici del segnale ad un intervallo predefinito. Questi campionamenti sono poi trasferiti ad un computer attraverso un computer bus nel quale il segnale originale è ricostruito dai campionamenti nel software.

I dispositivi DAQ si collegano ad un computer tramite uno slot o una porta. Il computer bus funziona da interfaccia di comunicazione tra il dispositivo DAQ ed il computer per il trasferimento delle istruzioni e dei dati misurati. I dispositivi DAQ sono disponibili nei più comuni bus computer inclusi USB, PCI, PCI Express, Ethernet e Wi-Fi. (<http://www.ni.com/data-acquisition>, National Instrument Corporation).

La scheda di acquisizione dati utilizzata durante gli esperimenti è una *NATIONAL INSTRUMENT NI USB-6009* (Figura 6.48), un dispositivo DAQ multifunzione a basso costo che offre un sistema I/O analogico (per strumenti quali il fonometro) e digitale ed un counter a 32 bit. Fornisce funzionalità di acquisizione dati di base per applicazioni di data logging, misure portatili ed esperimenti di laboratorio. Il collegamento al computer avviene tramite bus di tipo USB. A supporto della scheda di memoria è stato installato su notebook il software LabVIEW della National Instrument; le procedure di analisi saranno meglio descritte nel capitolo dedicato agli esperimenti.



Figura 6.48 – Scheda di acquisizione dati *NI USB-6009*, con collegamento per il fonometro



## 7. PROCEDURE SPERIMENTALI

Tutti gli esperimenti svolti durante il lavoro di Tesi sono stati eseguiti seguendo una procedura sperimentale ben definita. Lo scopo principale è stato quello di definire le capacità disinfettive dell'impianto, sfruttando una serie di configurazioni impiantistiche dettate dalla variazione di alcuni parametri quali frequenza della pompa, pressione di valle ecc.. Lo studio è il naturale proseguimento dei lavori di *Garofano (2016)* e *Ricucci (2017)*: analizzando questi esperimenti è stato possibile apportare alcune migliorie all'impianto (le modifiche sono descritte nel Capitolo 6) ed approfondire ulteriormente determinate configurazioni, a partire risultati precedentemente ottenuti.

Gli esperimenti svolti sono classificabili in tre gruppi distinti:

- esperimenti di disinfezione: sono gli esperimenti mirati a comprendere quale sia il ruolo della cavitazione sulla disinfezione dell'acqua. Sono stati eseguiti variando il setup sperimentale agendo sulla pressione di valle, al fine di investigare differenti numeri di cavitazione;
- registrazioni con fonometro: questo particolare studio è stato introdotto a lavoro di Tesi già avviato, al fine di misurare i rumori prodotti dai fenomeni cavitativi (in particolare dall'implosione delle bolle) per comprendere se questi si sviluppino sempre allo stesso modo oppure subiscano delle variazioni in funzione del setup sperimentale;
- esperimenti di controllo: sono esperimenti di tipo disinfettivo e non, utilizzati per investigare la funzionalità dell'impianto, l'affidabilità del metodo di analisi batterica utilizzato (test *Colilert*, si veda il Capitolo 8 per una descrizione del metodo) e la presenza di disinfettante residuo.

Ogni gruppo di esperimenti ha rispettato un ordine procedurale metodico e rigoroso, in modo da renderli ripetibili anche a distanza di tempo. Nei paragrafi seguenti si offre una panoramica delle diverse procedure, rispettando la classificazione sopra proposta.

## 7.1. Esperimenti di disinfezione

Gli esperimenti di disinfezione mirano a testare le capacità disinfettive dell'impianto di cavitazione. A tal proposito sono stati utilizzati adeguati quantitativi di acqua *Milli-Q*, concentrazioni batteriche variabili e differenti configurazioni sperimentali.

La *Milli-Q* è un'acqua che è stata purificata e deionizzata ad un alto livello da un sistema di purificazione realizzato dalla *Millipore Corporation*, della quale "*Milli-Q*" è anche un marchio registrato. Il sistema di purificazione usa filtri a resine e processi di deionizzazione e monitora la concentrazione degli ioni misurando la resistenza elettrica dell'acqua. Per poter produrre acqua ultrapura della qualità più affidabile, il sistema *Milli-Q* fa affidamento su una sequenza di purificazione ottimizzata: dapprima, viene prodotta acqua pura, definita *Elix*, a partire dall'acqua di rete. Il modulo *Elix* è protetto da un pretrattamento completo formato da un blocco *Progard* (*Elix* e *Progard* sono brevetti di proprietà della *Millipore Corporation*), da un'osmosi inversa e da una lampada UV battericida. A seconda del fabbisogno d'acqua quotidiano, è possibile scegliere tra diversi volumi di produzione oraria (3, 5, 10 e 15 L/h). L'acqua pura viene quindi conservata in un serbatoio in polietilene appositamente ideato. Il filtro di sfiato offre un'efficace protezione dai contaminanti aerodispersi ed il Modulo di Sanitizzazione Automatico (*ASM*) previene la formazione del biofilm. L'acqua pura viene quindi sottoposta, per la produzione d'acqua ultrapura, ad ulteriore trattamento da parte del sistema *Milli-Q*: l'acqua purificata viene quindi sottoposta all'azione di una lampada UV di lunga durata a doppia lunghezza d'onda, che garantisce la degradazione delle molecole organiche mediante fotossidazione. Il trattamento finale, rimuove i contaminanti ionici e organici fino a concentrazioni inferiori ai livelli definibili come tracce. Infine, l'acqua ultrapura viene fatta ricircolare attraverso un anello fino all'erogatore, dove un ulteriore componente brevettato rimuove in modo mirato i contaminanti critici per gli esperimenti in programma. Il monitoraggio congiunto dei livelli di carbonio organico totale (*TOC*) e della resistività consente di tenere sotto controllo sia i contaminanti ionici, sia quelli organici che potrebbero interferire con i risultati. (<http://www.merckmillipore.com>, *Merck*). Questo sistema brevettato è in grado di fornire acque abbastanza pure da avere riproducibilità e accuratezza nell'ordine delle ppm (parti per milione) (*Tetsuya et al., 1999*).

Il quantitativo di liquido utilizzato negli esperimenti è generalmente pari a 20 litri di acqua *Milli-Q* cui si somma 1 litro di acqua *Milli-Q* in cui è diluita la carica batterica, costituita da *E. coli*. Tutti i liquidi, così come la carica batterica, vengono forniti quotidianamente da *SMAT*. Quantitativi di *Milli-Q* differenti sono stati usati solo in esperimenti sporadici; la loro descrizione verrà fatta nel capitolo 8.

### 7.1.1. Accensione impianto di raffreddamento

Tutti gli esperimenti cavitazionali necessitano di un opportuno sistema di raffreddamento; gli effetti generati dal fenomeno, quali hot spots e sforzi di taglio, producono un incremento della temperatura del fluido, che necessita di essere controllato. In particolare, le variazioni di temperatura possono incidere sulla vitalità dei batteri, falsando i risultati degli esperimenti. Al fine di tener conto delle conseguenze prodotte dai soli effetti cavitazionali, è stato predisposto già da *Garofano (2016)*, un opportuno impianto di raffreddamento, aggiornato e modificato durante lo svolgimento del presente lavoro di Tesi, così come descritto nel Capitolo 6.



Figura 7.1 – I due chiller dell'impianto di raffreddamento. Sullo sfondo la gomma verde utilizzata per riempire il serbatoio di raffreddamento con acqua della rete idrica

L'impianto di raffreddamento viene attivato almeno 30 minuti prima delle operazioni di carico dell'impianto idraulico (Paragrafo 7.1.3). In primo luogo viene riempito il serbatoio in plastica con l'acqua della rete idrica, mediante l'utilizzo di una gomma e del raccordo a T posto sotto il serbatoio stesso; successivamente vengono accesi simultaneamente i due chiller e la pompa che permette il ricircolo dell'acqua. La scelta di attivare il sistema almeno mezz'ora prima dell'inizio delle operazioni presso l'impianto idraulico permette di far raggiungere al liquido di raffreddamento una temperatura sufficientemente bassa per l'inizio dell'esperimento di disinfezione. In questo modo si garantisce che l'acqua *Milli-Q* contaminata non superi mai i 30°C, temperatura che è stata scelta come discriminante per l'interruzione di qualunque esperimento che preveda l'utilizzo di una carica batterica.

### 7.1.2. Montaggio piastra forata e serraggio

Una volta acceso l'impianto di raffreddamento, si provvede a terminare l'assemblaggio dell'impianto di cavitazione. Poiché al termine di ogni esperimento, per facilitare le operazioni di asciugatura dell'impianto, vengono svitati i tappi ed i manometri e viene rimossa la piastra forata, queste componenti necessitano di essere nuovamente serrate.

La piastra utilizzata durante gli esperimenti di disinfezione è la stessa mostrata in Figura 6.28 ed è dotata di 4 fori da 2,5 mm di diametro. La piastra è inserita tra due flange DN32 e viene serrata a queste ultime grazie all'ausilio di 4 bulloni di diametro nominale 12 mm. Sulle due facce della piastra sono installate delle guarnizioni in gomma che garantiscono la tenuta idraulica del sistema (Figura 7.2).

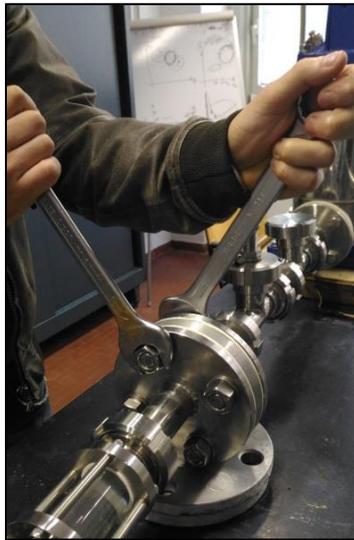


Figura 7.2 – Operazione di installazione della piastra forata all'interno dell'impianto di cavitazione (Garofano, 2016)

Una volta fissata la piastra forata, si procede al montaggio ed al serraggio dei tappi e dei manometri posti sui segmenti a T del lato di mandata dell'impianto (Figura 7.3), mediante l'utilizzo dell'apposita chiave.

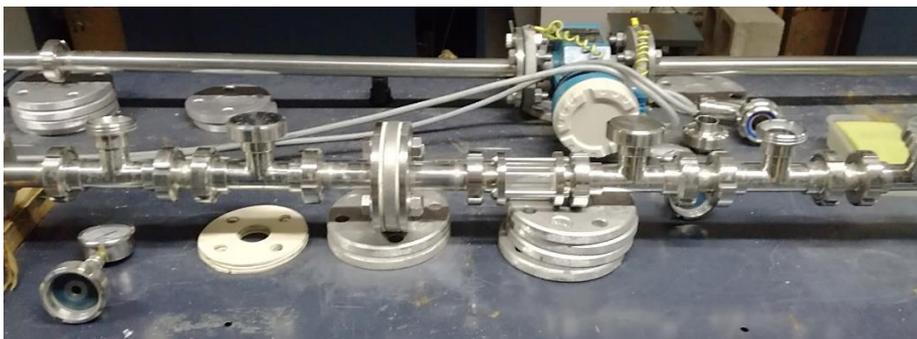


Figura 7.3 – Operazioni di serraggio di manometri e tappi sul lato di mandata

### 7.1.3. Caricamento impianto e mescolamento

Per ogni esperimento di disinfezione, il partner SMAT fornisce 20 litri di acqua *Milli-Q* (stoccata in appositi contenitori plastici da 10 litri, Figura 7.4), cui si somma 1 litro di soluzione batterica (fornita in apposito contenitore in vetro *pyrex*, Figura 7.5), composta sempre da acqua *Milli-Q* in cui viene disciolta un'opportuna carica di *E. coli*, in modo da ottenere ogni volta la concentrazione di inquinanti desiderata.



Figura 7.4 – Contenitore da 10 litri contenente acqua *Milli-Q*

Il serbatoio viene riempito in maniera manuale, mediante uno degli appositi raccordi femmina posti sulla faccia superiore del serbatoio stesso. Dopo aver inserito i primi 10 litri di acqua *Milli-Q* si procede alle operazioni di sfiato della pompa (Figura 7.5) e dei raccordi a T sul lato di mandata dell'impianto.

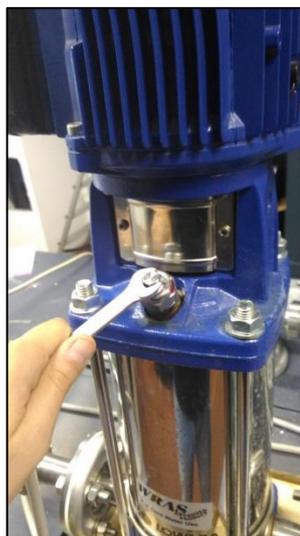


Figura 7.5 – Allentamento dello sfiato della pompa idraulica per eliminare l'aria accumulatasi all'interno dell'impianto durante le operazioni di riempimento (Garofano, 2016)

Dopo aver eliminato l'aria presente nelle condotte, si procede ad inserire nel serbatoio in acciaio inox il litro di soluzione batterica e, successivamente, i restanti 10 litri di acqua *Milli-Q*.



**Figura 7.6 – Beker in vetro pyrex utilizzato per la soluzione di *E. coli* fornita da SMAT**

Per evitare qualunque contaminazione, tutte le operazioni descritte a partire dal presente capitolo vengono svolte mediante l'uso di guanti in nitrile. Il nitrile, comunemente utilizzato nella produzione dei guanti monouso e denominato anche *NBR (Nitril Butadiene Rubber)*, è un materiale di origine sintetica derivato dalla polimerizzazione dell'Acrylonitrile e del Butadiene. I guanti in nitrile hanno caratteristiche di resistenza meccanica (soprattutto alla perforazione) e chimica superiori ai guanti in lattice, pur mantenendo un'ottima elasticità che conferisce sensibilità ed ergonomia (<http://www.reflex.com>, *Reflex S.P.A.*). Risultano inoltre privi di polvere e per tale ragione idonei ad evitare qualunque contaminazione dei campioni.



**Figura 7.7 – Guanto in nitrile**

Terminate le operazioni di riempimento, si procede a rimescolare l'acqua presente nell'impianto. Viene imposta, mediante l'inverter, una frequenza della pompa di 15 Hz per 10 minuti, in modo da permettere un'omogeneizzazione del liquido. Al termine dei 10 minuti di mescolamento viene prelevato il campione denominato "CAV 0", che stabilisce il quantitativo

iniziale di *E. coli* presenti, secondo la procedura descritta nel Paragrafo 7.1.5. A questo punto si può passare alla seconda fase dell'esperimento: l'impostazione della frequenza e della pressione di valle per ottenere il numero di cavitazione desiderato.

#### **7.1.4. Impostazione frequenza e pressione di valle**

Una volta prelevato il campione iniziale, si impostano i parametri per l'esecuzione dell'esperimento; tutti i test di disinfezione sono stati condotti con una frequenza imposta dall'inverter di 50 Hz. La pressione di valle è stata regolata mediante l'apposita valvola a sfera (Figura 6.31) al fine di ottenere il numero di cavitazione desiderato. Per  $\sigma_v$  pari a 0,2 la pressione di valle misurata dal manometro deve essere pari a 0 bar, dunque la valvola viene lasciata totalmente aperta. Per ottenere un numero di cavitazione pari a 0,4 viene imposto 1 bar di contropressione. Infine, nel caso in cui  $\sigma_v$  doveva risultare pari a 0,6 la valvola generava 2 bar di pressione. È importante osservare che i valori 0, 1 e 2 bar sono valori di pressione relativi e non assoluti, in quanto il manometro registra 0 bar in presenza di pressione atmosferica. La distinzione tra grandezza relativa ed assoluta perde di significato nel momento in cui si calcola una variazione di pressione tra monte e valle del tipo  $\Delta p = p_{monte} - p_{valle}$ .

#### **7.1.5. Prelievo campioni**

Il prelievo dei campioni avviene a intervalli regolari, secondo le necessità dell'esperimento in atto. Generalmente viene spillato un quantitativo di circa 350 ml in un apposito contenitore sterile (Figura 7.8) ogni ora, a partire dall'istante di imposizione di frequenza e pressione di valle. Spesso, per comprendere il comportamento dell'impianto nella prima fase del test, è stato deciso di infittire il campionamento prelevando circa 350 ml di acqua anche dopo 30 minuti. La durata totale degli esperimenti risulta variabile; per ulteriori informazioni si rimanda al Capitolo 8.



Figura 7.8 – Contenitore sterile usato per il campionamento

Il campionamento avviene rispettando un ordine d'azione ben preciso: vengono prima spillati circa 300 ml di prodotto in un contenitore per misurare la temperatura. Poiché il termometro a sonda necessita di circa 8 secondi per la misurazione precisa della temperatura, nel frattempo viene spillato il campione che sarà sottoposto alle analisi batteriche da SMAT. Ciascun campione è costituito da 350 ml di acqua contaminata, al fine di permettere di studiare diverse diluizioni di prodotto, secondo il protocollo del metodo *Colilert*, descritto nel Capitolo 8. Su ciascun contenitore vengono riportate le seguenti informazioni (Figura 7.9):

- data dell'esperimento;
- numero del campione, secondo la dicitura progressiva "CAV (numero)";
- orario del prelievo;
- temperatura misurata.

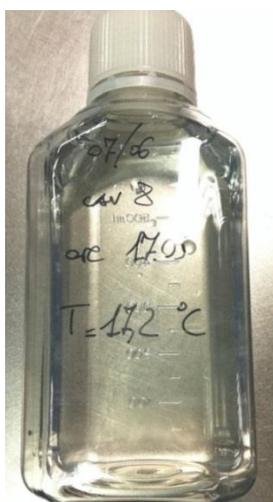


Figura 7.9 – Informazioni riportate sui campioni spillati durante ogni esperimento

Al termine della compilazione del contenitore, il termometro viene spento e introdotto nella fondina protettiva; il contenitore utilizzato per la misurazione della temperatura viene svuotato all'interno del serbatoio in acciaio inox, in modo da reintrodurre il liquido contenuto in circolo nell'impianto. Il campione da sottoporre alle analisi è invece posto in un apposito frigorifero (Figura 7.10), per mantenerlo ad una temperatura di circa 4°C. Al termine degli esperimenti i campioni vengono portati al laboratorio analisi di SMAT mediante l'utilizzo di un'apposita borsa termica.



Figura 7.10 – Frigorifero utilizzato per la conservazione dei campioni spillati

#### 7.1.6. Disinfezione e risciacquo impianto

Al termine dell'esperimento l'impianto necessita di essere disinfettato per poter essere nuovamente operativo per i test successivi. Il numero di esperimenti settimanali è risultato variabile tra uno e tre, in giorni consecutivi. Di conseguenza, per evitare dati falsati tra studi condotti in due giorni successivi, si rende necessario eliminare ogni forma di carica batterica residua. A tal proposito, SMAT ha fornito, durante lo svolgimento del lavoro di Tesi, appositi contenitori di ipoclorito di sodio (Figura 7.11).



Figura 7.11 – Contenitore di ipoclorito di sodio, fornito da SMAT

L'ipoclorito di sodio è un composto che può essere efficacemente usato per la depurazione dell'acqua. È usato su larga scala per applicazioni industriali, candeggiamento, rimozione degli odori e disinfezione dell'acqua. È fornito come una soluzione chiara, leggermente giallastra, con un odore caratteristico e la sua densità relativa è pari a 1.1 (5,5% di soluzione acquosa). Quando l'ipoclorito di sodio si dissolve in acqua, si formano due sostanze che agiscono per ossidazione e disinfezione: esse sono l'acido ipocloroso ( $HOCl$ ) e lo ione ipoclorito ( $OCl^-$ ), meno attivo (<https://www.lenntech.it>).

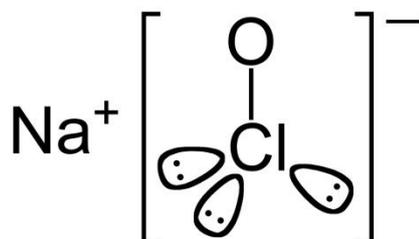
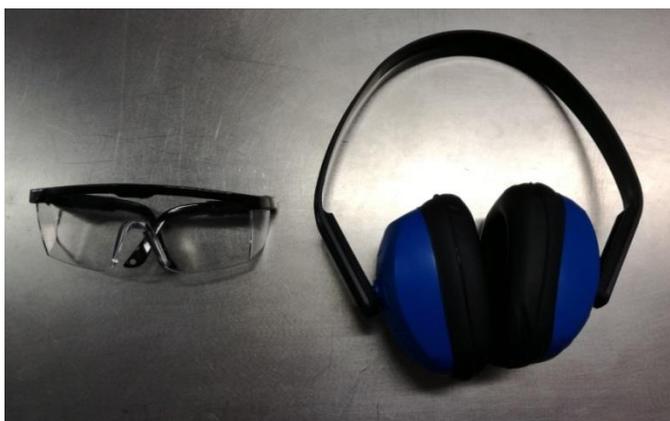


Figura 7.12 – Formula di struttura dell'ipoclorito di sodio (Fonte: <https://it.wikipedia.org>)

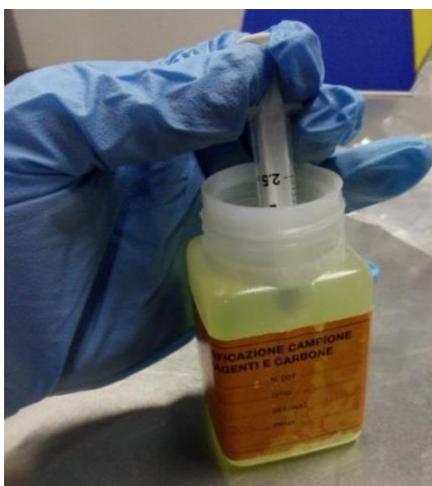
L'ipoclorito può essere usato per impedire lo sviluppo dei crostacei e delle alghe nelle torri di raffreddamento. È usato inoltre su larga scala in agricoltura, nelle industrie chimiche, alimentari, del vetro, della carta, farmaceutiche, di prodotti sintetici e nelle industrie di deposizione dei rifiuti, nonché frequentemente per la purificazione e la disinfezione della casa. L'ipoclorito di sodio è efficace contro batteri, virus e funghi e disinfetta allo stesso modo del cloro: è applicato nelle piscine per la disinfezione e l'ossidazione dell'acqua. Presenta il vantaggio che i microorganismi non possono sviluppargli alcuna resistenza (<https://www.lenntech.it>).

L'ipoclorito di sodio, usato come disinfettante, presenta i seguenti vantaggi: può essere facilmente immagazzinato e trasportato, il dosaggio è semplice e risulta efficace quanto il cloro gassoso per la disinfezione. Produce tuttavia del disinfettante residuo, che necessita di essere eliminato mediante risciacqui successivi con acqua della rete idrica. Non bisogna dimenticare che parliamo comunque di una sostanza pericolosa e corrosiva, se usata ad alte concentrazioni. Quando si lavora con l'ipoclorito di sodio, devono essere approntate misure di sicurezza per proteggere gli operatori e l'ambiente. Per i primi sono forniti opportuni dispositivi quali guanti in nitrile ed occhiali (Figura 7.13); per quanto riguarda la sicurezza ambientale, le concentrazioni di ipoclorito utilizzate durante il lavoro di Tesi sono risultate sufficientemente basse da permetterne lo scarico dell'acqua disinfettata direttamente nella rete fognaria, senza ulteriore trattamento.



**Figura 7.13 – Dispositivi di protezione individuale (DPI) forniti: gli occhiali vengono utilizzati durante le operazioni di dosaggio dell'ipoclorito di sodio; le cuffie sono invece utilizzate per la protezione dal rumore durante lo svolgimento degli esperimenti**

Si introduce all'interno del serbatoio in acciaio inox 1 ml di ipoclorito di sodio ogni 10 litri di acqua trattata (Figura 7.14). Il livello di acqua contenuta viene ripristinato allo stato iniziale (precedente ai prelievi dei campioni) mediante rabbocco con acqua della rete idrica. Il processo di disinfezione dura 15 minuti, con una frequenza della pompa di 35 Hz. Successivamente l'impianto viene arrestato e svuotato (si utilizzano gli scarichi mostrati in Figura 6.41) in appositi contenitori plastici (Figura 6.43), i quali vengono sversati nell'impianto di scarico generale del laboratorio, e riempito nuovamente con 25 litri circa di acqua della rete idrica. Vengono eseguite le operazioni di sfiato di pompa e dei raccordi a T sul lato di mandata e viene avviato un risciacquo di 10 minuti a 35 Hz. Terminata questa operazione si procede nuovamente all'arresto ed allo svuotamento dell'impianto nei contenitori plastici ed allo sversamento dei liquidi nella rete di scarico. Il risciacquo viene ripetuto per 3 volte, in modo da eliminare qualunque traccia di disinfettante residuo.



**Figura 7.14 – Operazioni di dosaggio dell'ipoclorito di sodio mediante siringa graduata**

Al termine della fase di disinfezione e risciacquo, l'impianto viene parzialmente smontato per favorire la fase di asciugatura delle condotte; vengono rimossi la piastra forata, i manometri ed i tappi dei raccordi a T sul lato di mandata.

### 7.1.7. Disinfezione locale

L'utilizzo di cariche batteriche come *E. coli* necessita di un opportuno protocollo di disinfezione dei locali, per evitare qualunque forma di contaminazione per gli operatori e verso l'ambiente esterno. Tutte le superfici utilizzate durante lo svolgimento degli esperimenti vengono a fine giornata disinfettate. A tale scopo si utilizza una soluzione al 75% di alcool etilico, spruzzata mediante un apposito dispositivo nebulizzatore; le superfici vengono pulite con una comune bobina in cellulosa. Durante questa operazione vengono indossati guanti in gomma (Figura 7.15).



Figura 7.15 – Materiale utilizzato durante la pulizia del locale: nebulizzatore spray (a sinistra), guanti in gomma (al centro) e bobina in cellulosa (a destra)

## 7.2. Registrazioni con fonometro

Durante lo svolgimento del lavoro di Tesi, si è deciso di fornire l'impianto di un fonometro, per poter eseguire una misura acustica dei fenomeni cavitazionali generati (si veda il paragrafo 6.5). Il fissaggio dello strumento al bancone su cui poggia l'impianto segue alcune fasi di seguito descritte.

### 7.2.1. Posizionamento e collegamento alla DAQ

Il fonometro necessita di un opportuno cavalletto per restare in posizione; questo viene fissato mediante un morsetto al bordo superiore del bancone. Sono state individuate 4 posizioni per eseguire le registrazioni nei pressi della piastra forata, denominate secondo il codice "POS (numero)" (Figura 7.16). Sul bancone sono state tracciate opportune linee guida, parallele tra loro, per il direzionamento del fonometro rispetto alla condotta. Le differenti posizioni risultano quindi delle semplici traslazioni rigide, spaziate tra di loro di 10 cm; il riferimento è stabilito nel centro esatto del morsetto. La POS1 è stata individuata in maniera tale da direzionare in microfono del fonometro verso l'attacco tra condotta e flangia di valle del reattore cavitazionale. In questo modo vengono misurati i fenomeni cavitazionali proprio nella zona di prima generazione. Le successive posizioni si allontanano dalla piastra forata di 10, 20 e 30 cm e le registrazioni così ottenute sono state sfruttate per analizzare l'evoluzione dei fenomeni lungo la condotta.

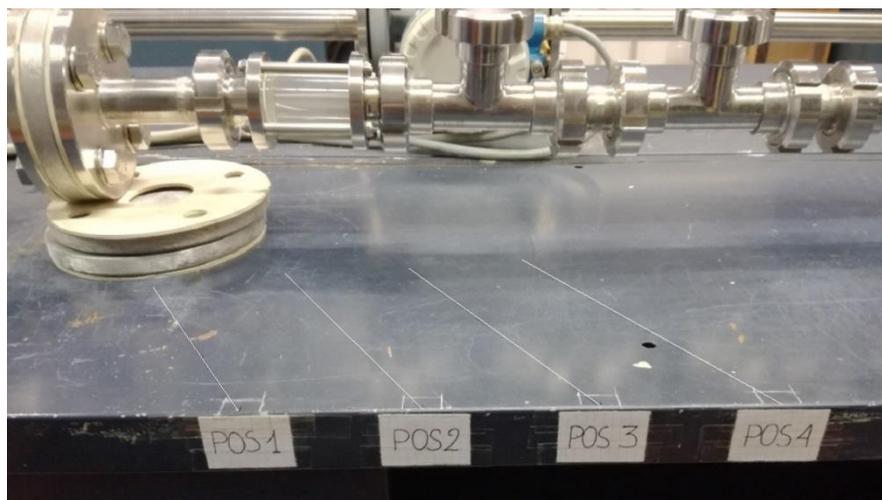


Figura 7.16 – Posizioni del fonometro individuate lungo la superficie del bancone

Una volta fissato il cavalletto in una delle quattro posizioni, il fonometro viene avvitato mediante la vite posta all'estremità del braccio snodato. Il braccio snodato permette a sua volta un posizionamento di precisione del fonometro sia in direzione orizzontale che verticale (Figura 7.17).



Figura 7.17 – Cavalletto con braccio snodato per il fissaggio del fonometro al bancone

Mediante attacco micro-jack, la *DAQ* viene collegata al fonometro; la comunicazione con il PC è invece garantita dal cavo USB che funge anche da alimentatore della scheda di acquisizione dati (Figura 7.18).

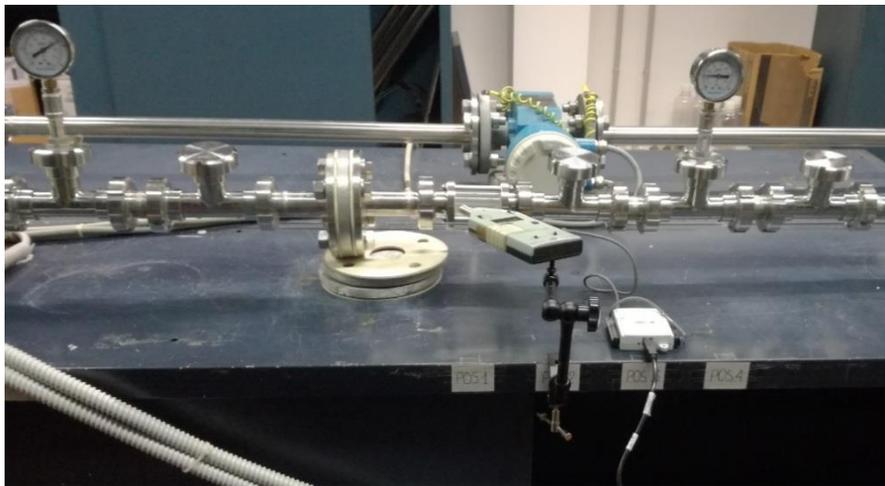


Figura 7.18 – Collegamento del fonometro con la *DAQ*. nella parte inferiore è visibile il cavo USB che connette la *DAQ* al PC

Durante gli esperimenti eseguiti con numero di cavitazione pari a 0,6, è stato notato un abbattimento anomalo della carica batterica. Uno dei motivi di tali risultati è stato riscontrato in corrispondenza della valvola a sfera utilizzata per imporre la pressione di valle. Questa infatti, per produrre i 2 bar di contropressione, risultava chiusa a tal punto da generare una seconda zona di cavitazione all'interno dell'impianto; si è deciso pertanto di effettuare delle registrazioni mirate in corrispondenza della valvola e immediatamente a monte della stessa. A tal proposito è stato costruito ed assemblato un opportuno supporto in alluminio; questo è stato fissato al bancone mediante l'utilizzo di una barra filettata, di bulloni e di rondelle.



Figura 7.19 – Supporto per le registrazioni in corrispondenza della valvola a sfera

Con il trapano a colonna sono stati prodotti cinque fori, denominati dalla sigla “*F (numero)*” (Figura 7.19), per permettere un fissaggio del fonometro in diverse posizioni, grazie ad un opportuna vite.



Figura 7.20 – Sistema di fissaggio del supporto al bancone (a sinistra) e vite per fissaggio del fonometro (al centro)

Ogni registrazione è stata classificata indicando la posizione di fissaggio del fonometro, in modo da rendere la misura ripetibile anche in futuro. Il microfono è stato posizionato in maniera perpendicolare alla condotta (Figura 7.21).



Figura 7.21 – Operazioni di registrazione con fonometro a monte della valvola a sfera (a sinistra) ed in corrispondenza della stessa (a destra)

### 7.2.2. Registrazioni

Le registrazioni acustiche vengono eseguite mediante fonometro *Brüel & Kjær Type 2222*; hanno durata di 30 o 60 secondi e vengono eseguite nel periodo che intercorre due prelievi successivi di campioni d'acqua contaminata. In tal modo si cerca di monitorare il fenomeno cavitazionale lungo tutto lo svolgimento dell'esperimento. Al fine di analizzare le registrazioni, il fonometro è collegato alla *DAQ* modello *NI USB-6009* mediante apposito connetto micro-jack (Figura 6.48). La *DAQ* comunica con il PC tramite BUS di tipo USB ed apposito software *LabVIEW* della *National Instrument*. Mediante un sistema di compilazione a blocchi, il software permette di acquisire varie tipologie di segnali, impostando la frequenza di campionamento ed il numero di dati desiderati.

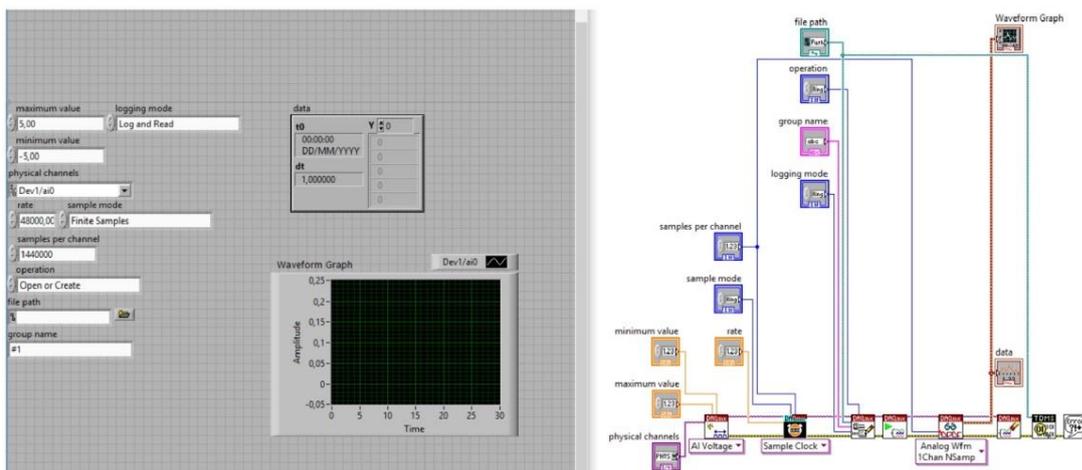


Figura 7.22 – Interfaccia del software *LabVIEW* della *National Instrument*. A sinistra è visibile l'interfaccia con le condizioni di campionamento, a destra lo schema a blocchi del software

Le registrazioni vengono poi processate ed accorpate tramite software *DIAdem* della *National Instrument* ed infine elaborate con programma *MATLAB* della *MathWorks*. I risultati verranno presentati e discussi nel Capitolo 8.

### 7.3. Esperimenti di controllo

Durante il lavoro di Tesi si sono rese necessarie alcune modifiche alle procedure sperimentali per investigare determinati fenomeni o risultati anomali. Questi aspetti vengono descritti nei paragrafi seguenti.

#### 7.3.1. Esperimenti senza piastra forata

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 influisce sulla vitalità degli *E. coli*. Sono stati perciò eseguiti alcuni esperimenti di controllo in assenza di piastra forata, a differente frequenza della pompa. Le procedure seguite durante l'esecuzione di questi particolari esperimenti sono le stesse descritte del Paragrafo 7.1, ad eccezione del Sottoparagrafo 7.1.2. In questo caso, infatti, non avviene il fissaggio della piastra, ma le due flange vengono avvitate tra di loro mediante interposizione di una guarnizione, per garantire la tenuta idraulica del sistema. Le restanti operazioni vengono eseguite come precedentemente descritto.



Figura 7.23 – Esperimento di controllo eseguito in assenza di piastra forata

Anche questa tipologia di esperimenti è stata soggetta ad analisi fonometrica. In particolare le registrazioni sono state utilizzate per “depurare” gli esperimenti di disinfezione dal rumore di fondo, generato dall'impianto di raffreddamento, dalla pompa dell'impianto idraulico, dall'inverter ed in generale da tutti i rumori ambientali.

### 7.3.2. Triplicati

I cosiddetti “triplicati” sono esperimenti volti ad indagare l’affidabilità del metodo Colilert applicato agli esperimenti di disinfezione eseguiti. La procedura che ha subito variazioni in questo caso è quella descritta nel Paragrafo 7.1.5 – Prelievo dei campioni. In questo caso sono stati infatti utilizzati tre differenti campioni da 100 ml (da cui il nome “triplicato”), spillati in successione. Ogni contenitore è stato caratterizzato con le seguenti informazioni:

- data dell’esperimento;
- numero del campione, secondo la dicitura progressiva “CAV (numero) (lettera)” (esempio: “CAV 1A”, “CAV 1B”, “CAV 1C”);
- orario del prelievo;
- temperatura misurata.

In questo modo, analizzando i vari campioni, è stato possibile investigare la variabilità del metodo Colilert nella conta degli *E. coli*. I risultati delle analisi saranno presentati e discussi nel Capitolo 8.



Figura 7.24 – Campioni utilizzati negli esperimenti “triplicati”

### 7.3.3. Cloro residuo

Gli esperimenti definiti “Cloro residuo” sono stati eseguiti per testare la persistenza dell’ipoclorito di sodio all’interno dell’impianto, in seguito ai risciacqui eseguiti dopo l’operazione di disinfezione. In questo caso il campionamento è avvenuto in due fasi distinte:

- prima dello svuotamento dell’impianto che segue l’operazione di disinfezione;
- prima dello svuotamento dell’impianto in seguito al terzo ed ultimo risciacquo.

I contenitori utilizzati sono gli stessi degli esperimenti triplicati e vengono riempiti fino all’orlo superiore degli stessi; questa accortezza viene assunta in modo da non permettere al cloro (ove presente) di evaporare nello strato d’aria compreso tra il tappo del contenitore ed il pelo libero dell’acqua contenuta.

Questa tipologia di esperimenti ha permesso di verificare la presenza di sufficiente ipoclorito nella fase di disinfezione e l’assenza di disinfettante alla fine delle operazioni di pulizia dell’impianto, confermando che i risultati tra test eseguiti in giorni successivi non subiscono alcuna influenza. Le misurazioni di cloro residuo al termine del terzo risciacquo sono sempre risultate essere al di sotto del limite di 0,05 mg/L, considerato come il quantitativo minimo necessario per avere potere disinfettante. I risultati saranno meglio descritti nel Capitolo 8.



## 8. ESPERIMENTI DI DISINFEZIONE

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 stato incentrato sull'analisi di questi effetti, su un'attenta progettazione degli esperimenti, sull'apporto di modifiche alla configurazione utilizzata da *Garofano (2016)* e *Ricucci (2017)*.

SMAT, partner del progetto, ha svolto un ruolo essenziale per quanto riguarda la fornitura di acqua *Milli-Q* e cariche batteriche, oltre che nelle analisi bio-chimiche; proprio i risultati di queste ultime sono stati la bussola per orientarsi nello studio di nuove configurazioni impiantistiche. 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.

### 8.1. Metodo di analisi batterica *Colilert*

Come precedentemente sottolineato, tutte le analisi batteriche sono state affidate al partner SMAT. 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*.

Negli ultimi anni la ricerca quantitativa di *Escherichia coli* si è spostata dalla tradizionale reazione di fermentazione del lattosio al rilevamento dell'attività enzimatica della  $\beta$ -D-glucuronidasi. Sfruttando questa specifica caratteristica, non si necessita di prove di conferma e si ottengono i risultati in tempi più rapidi e con maggiore accuratezza (*Ricucci, 2016*).

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  $\beta$ -D galattopiranozid) e MUG (4-metilumbelliferil- $\beta$ -D-glucuronide) L'indicatore ONPG scioglie mediante l'enzima  $\beta$ -D-galattosidasi 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  $\beta$ -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*. Questo approccio minimizza i falsi positivi e i falsi negativi.

### 8.1.1. Principi del metodo

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 (piscine). Il metodo *Colilert-18* si basa su una tecnologia di substrato definito "Defined Substrate Technology" (DST) brevettata dai laboratori *IDEXX*. La ISO segue il metodo *Quanti-Tray* 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.

### 8.1.2. Strumentazione e procedura *Quanti-Tray*

Come riassunto da *Ricucci (2016)*, per lo svolgimento dell'analisi, oltre alla normale attrezzatura di laboratorio, sono necessari:

- buste a multi-pozzetto *Quanti-Tray*;
- comparatore di riferimento *Quanti-Tray*;
- flaconi di plastica con antischiuma (100 mL) oppure flaconi in vetro con chiusura a vite di *Schott* sterilizzabili in autoclave;
- lampada di *Wood* per l'osservazione a 366 nm;
- termosigillatrice automatica *Quanti-Tray*.

La procedura utilizzata per la quantificazione dei batteri, in accordo con la ISO 9308-2:2012, può essere sintetizzata come segue:

- operando a temperatura ambiente e utilizzando una provetta sterile, ad un volume del campione di 100 mL viene aggiunto il terreno disidratato, contenuto in un'apposita busta precofenzionata;
- si chiude la provetta sterile e si miscela con cura il contenuto, finché le polveri contenute si disciolgono completamente nel liquido del campione;
- la soluzione ottenuta viene quindi versata in una busta multi-pozzetto *Quanti-Tray* che viene chiusa mediante termosigillatrice automatica *IDEXX Quanti-Tray Sealer*
- si pone il vassoietto sigillato in un'incubatrice ad una temperatura di  $35 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$  per gli *E. coli*,  $44,5 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$  per i coliformi fecali;
- si valutano i risultati colorimetrici di presenza/assenza (PA) ottenuti dopo l'incubazione, mediante apposita tabella;
- si procede all'enumerazione *Quanti-Tray* per la valutazione del MPN/100mL (nel caso in cui siano state utilizzate differenti diluizioni, il risultato viene comunque riportato come MPN/100mL).

### 8.1.3. Interpretazione dei risultati *Colilert*

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:

**Tabella 8.1 – Tabella di interpretazione colorimetrica sei risultati dopo l'incubazione (Ricucci, 2017)**

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>



Figura 8.1 – Confronto colorimetrico tra comparatore e campione incubato (Fonte: <http://www.idexx.it>)

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 (Ricucci, 2017).



Figura 8.2 – Individuazione della fluorescenza per il riconoscimento 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 MPN di seguito riportata, relativa al test con 51 pozzetti:

Tabella 8.2 – Tabella per l'enumerazione *Quanti-Tray* per valutazioni di MPN/100 mL (Ricucci, 2017)

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

## 8.2. Esperimenti di controllo

La valutazione dell'efficienza disinfettiva dell'impianto passa necessariamente per l'esecuzione di due verifiche preventive ben precise:

- l'assenza di disinfezione nel caso di azionamento dell'impianto idraulico in assenza di piastra forata;
- l'affidabilità del metodo di conta degli E. coli per i particolari esperimenti prodotti.

Si presentano quindi di seguito gli esperimenti di verifica per entrambi gli aspetti sopraelencati.

### 8.2.1. Esperimenti in assenza di piastra forata

Gli esperimenti in assenza di piastra forata sono stati eseguiti modificando quattro parametri: il quantitativo di acqua *Milli-Q* utilizzato, la frequenza imposta dall'inverter, la durata dell'esperimento e la frequenza di campionamento (variabile tra i 30 ed i 60 minuti).

Il primo test è stato eseguito con una frequenza di 22 Hz e 20 + 1 L (*Milli-Q* + soluzione batterica) di acqua fornita da SMAT. La portata è risultata pari a 0,66 L/s.

Tabella 8.3 – Esperimento Exp5: sintesi delle operazioni di prelievo e riepilogo delle analisi batteriche

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	11:05	14,8	0	307,6	100%	<b>1,00</b>
1	11:35	20,3	30	344,8	112%	<b>1,12</b>
2	12:05	23,7	60	461,1	150%	<b>1,50</b>
3	12:35	25,2	90	344,8	112%	<b>1,12</b>
4	13:05	26,6	120	344,8	112%	<b>1,12</b>

A questa prova iniziale sono seguiti due esperimenti utilizzando le medesime condizioni: 35 Hz di frequenza imposta (portata pari a 1,06 L/s) e 30 + 1 L di acqua utilizzata.

Tabella 8.4 – Sintesi dati esperimento Exp6

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	11:25	13,7	0	209,8	100%	<b>1,00</b>
1	11:55	19,6	30	204,6	98%	<b>0,98</b>
2	12:25	23,1	60	185	88%	<b>0,88</b>
3	12:55	25,1	90	204,6	98%	<b>0,98</b>
4	13:25	25,8	120	185	88%	<b>0,88</b>

Tabella 8.5 – Sintesi informazioni esperimento Exp32

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	11:25	17,7	0	5577	100%	<b>1,00</b>
1	11:55	17,4	30	4331,5	78%	<b>0,78</b>
2	12:25	17,6	60	4726	85%	<b>0,85</b>
3	13:25	18,4	120	2902,5	52%	<b>0,52</b>
4	14:25	18,7	180	4682	84%	<b>0,84</b>
5	15:25	18,6	240	4225,5	76%	<b>0,76</b>

Dai risultati di conta degli E. coli presenti, presentati come rapporto tra il MPN del campione analizzato e il MPN di partenza (MPN<sub>0</sub>), si nota una variabilità trascurabile dal punto di vista biologico. Le analisi oscillano in maniera contenuta e ci permettono di affermare che il potere disinfettivo dell'impianto, in assenza di reattore cavitazionale, è pressoché nullo.

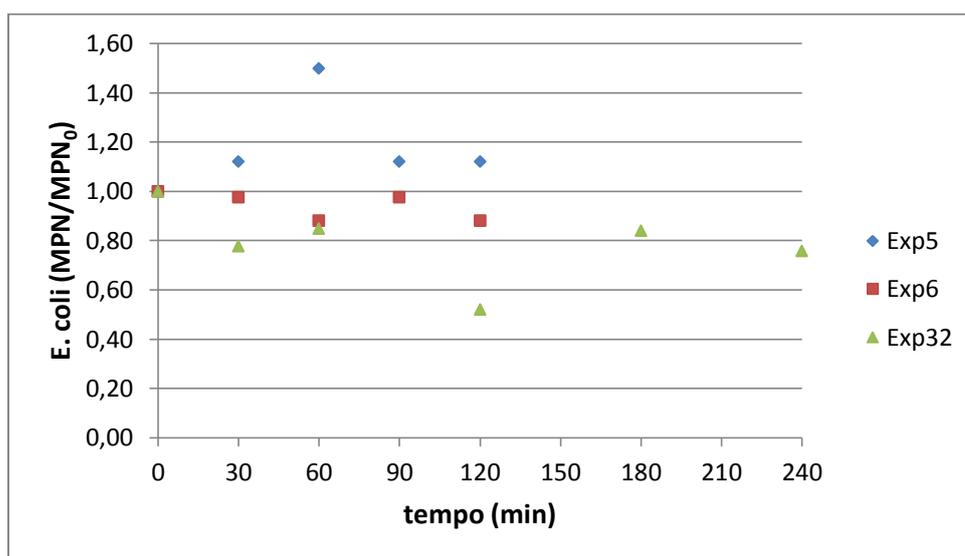


Figura 8.3 – Analisi sulla conta di *E. coli* per gli esperimenti di controllo Exp5, Exp6 ed Exp32

Se mediamo i tre esperimenti sui primi 120 minuti, supponendo che la frequenza della pompa non influenzi in alcun modo la vitalità dei batteri, né quindi i risultati delle analisi, otteniamo il seguente risultato, che evidenzia quanto affermato in precedenza:

Tabella 8.6 – Tabella riepilogativa dell'esperimento "medio", con calcolo della deviazione standard

minuto di campionamento	MPN/MPN <sub>0</sub>			Media	Deviazione Std
	Exp5	Exp6	Exp32		
0	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
30	1,12	0,98	0,78	0,96	0,17
60	1,50	0,88	0,85	1,08	0,37
90	1,12	0,98	-	1,05	0,10
120	1,12	0,88	0,52	0,84	0,30

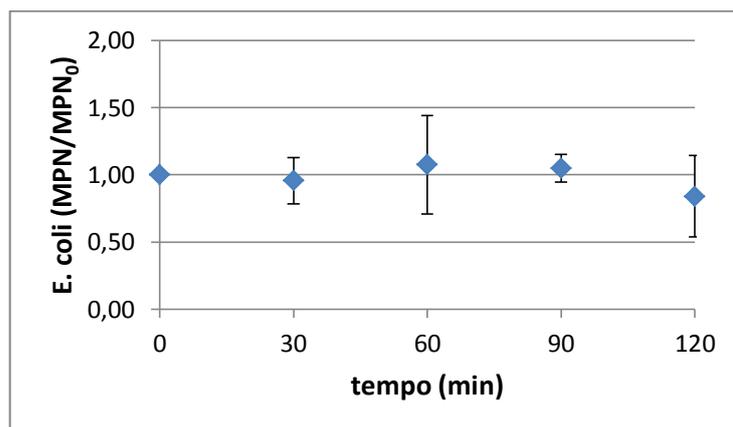


Figura 8.4 – Media dei tre esperimenti senza piastra forata, con indicazione della deviazione standard

### 8.2.2. Controllo sui triplicati

Per verificare l'applicabilità del metodo di conta degli *E. coli* agli esperimenti eseguiti con l'impianto di cavitazione, si è deciso di eseguire un ulteriore test di controllo con l'analisi dei triplicati. Il campionamento è avvenuto utilizzando appositi contenitori da 100 mL, spillandone tre in maniera consecutiva ogni ora, per una durata totale della prova di 120 minuti.

In questo caso è stato utilizzato il reattore cavitazionale dotato dell'apposita piastra con 4 fori da 2,5 mm di diametro. I parametri imposti all'impianto hanno permesso di ottenere un numero di cavitazione pari a 0,2: frequenza pompa di 50 Hz, pressione di valle pari a 0, quantitativo di acqua di 20 + 1 L, portata di 0,61 L/s con una velocità nei fori pari a 31,07 m/s.

I risultati sono di seguito presentati:

Tabella 8.7 – Esperimento Exp37 per l'analisi dei triplicati

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0A	10:20	21,7	0	686700	100%	<b>1,00</b>
0B	10:20	21,7	0	770100	112%	<b>1,12</b>
0C	10:20	21,7	0	686700	100%	<b>1,00</b>
1A	11:20	27,4	60	150000	22%	<b>0,22</b>
1B	11:20	27,4	60	150000	22%	<b>0,22</b>
1C	11:20	27,4	60	129100	19%	<b>0,19</b>
2A	12:20	30,1	120	42800	6%	<b>0,06</b>
2B	12:20	30,1	120	49500	7%	<b>0,07</b>
2C	12:20	30,1	120	65700	10%	<b>0,10</b>

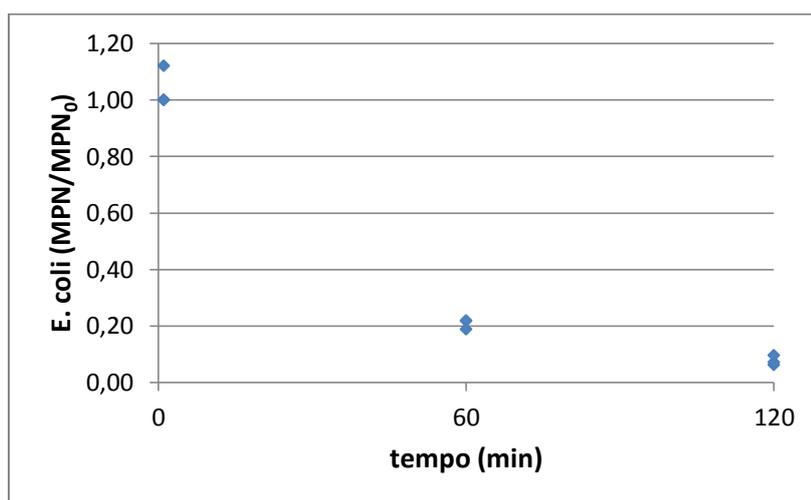


Figura 8.5 – Risultati delle analisi sui campioni dell'Exp37

Come visibile dal risultato delle analisi, la variabilità del metodo di conta è da considerarsi trascurabile, dunque la sua applicazione allo studio di Tesi non è sconsigliata.

### 8.2.3. Controllo del cloro residuo

Come già descritto nel Sottoparagrafo 7.3.3, sono stati eseguiti opportuni controlli per verificare la persistenza dell'ipoclorito di sodio all'interno dell'impianto, in seguito ai risciacqui eseguiti dopo l'operazione di disinfezione. Il test è servito altresì per verificare il corretto dosaggio per le operazioni di disinfezioni, indicato da SMAT. Il campionamento è avvenuto in due fasi distinte:

- prima dello svuotamento dell'impianto che segue l'operazione di disinfezione, per valutare il corretto dosaggio (campione 1);
- prima dello svuotamento dell'impianto in seguito al terzo ed ultimo risciacquo, per verificare i livelli di cloro residuo (campione 2).

I test eseguiti sono stati due:

Tabella 8.8 – Riepilogo test cloro residuo

N° campione	Test 1 (mg/L)	Test 2 (mg/L)
1	2,2	/
2	0,04	0,03

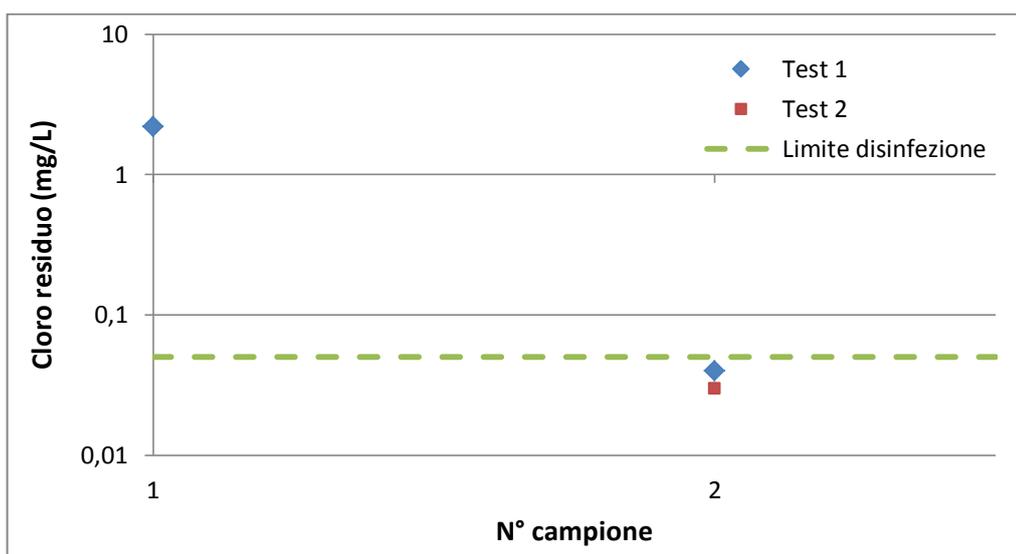


Figura 8.6 – Risultato analisi sul cloro residuo

I campioni prelevati dopo il terzo ed ultimo risciacquo hanno evidenziato un quantitativo di cloro residuo pari a 0,03 e 0,04 mg/L, ovvero al di sotto del limite di 0,05 mg/L considerato come minimo per garantire potere disinfettivo. Il quantitativo di ipoclorito di sodio introdotto invece nella fase di disinfezione risulta adeguato.

### 8.3. Configurazione dei parametri geometrici del reattore

Il reattore cavitazionale, descritto in maniera accurata nel Capitolo 6, è dotato di apposita piastra di spessore 16 mm, dotata di 4 fori da 2,5 mm di diametro. Ci troviamo quindi nel caso *thick plate*, poiché

$$\frac{t}{D_{\text{foro}}} = \frac{16 \text{ mm}}{2,5 \text{ mm}} = 6,4 > 2$$

e di conseguenza, la vena liquida contratta, formatasi a causa del brusco restringimento operato dai fori, si riattacca alle pareti del foro stesso prima di incontrare l'argamento di sezione a valle della piastra.

Dato il diametro della condotta, pari a 32 mm, risulta che il parametro  $\beta$  (rapporto tra l'area dei fori e l'area della sezione trasversale del tubo) ha valore

$$\beta = \frac{4 \cdot \pi \cdot \frac{2,5^2}{4} \text{ mm}^2}{\pi \cdot \frac{32^2}{4} \text{ mm}^2} = 0,024$$

mentre il parametro  $\alpha$  (rapporto tra il perimetro dei fori e l'area totale del flusso) è pari a

$$\alpha = \frac{4 \cdot \pi \cdot 2,5 \text{ mm}}{4 \cdot \pi \cdot \frac{2,5^2}{4} \text{ mm}^2} = 1,60 \text{ mm}^{-1}$$

### 8.4. Esperimenti in funzione del numero di cavitazione

Il lavoro di Tesi si è concentrato, fin dagli inizi, sull'indagine dei risultati ottenuti testando differenti valori di numero di cavitazione ( $\sigma_v$ ). Regolando opportunamente la contropressione mediante la valvola a sfera posta a valle del reattore, sul lato di mandata, è stato possibile imporre 0, 1 e 2 bar (valori di pressione relativa) per ottenere rispettivamente un  $\sigma_v$  pari a 0,2, 0,4 e 0,6.

A fronte di un numero di cavitazione più basso è atteso un risultato in termini di disinfezione maggiore, così come illustrato nella maggior parte delle applicazioni descritte nei Paragrafi 4.5 e 4.6 ed in particolare nel Sottoparagrafo 4.6.5 interamente dedicato alla distruzione delle cellule microbiche. I risultati vengono proposti in ordine crescente di valore di  $\sigma_v$ .

**Numero di cavitazione  $\sigma_v = 0,2$**

Il primo valore di  $\sigma_v$  presentato è lo 0,2. Tutti gli esperimenti sono stati condotti utilizzando il seguente setup sperimentale:

- piastra con 4 fori da 2,5 mm;
- frequenza pompa: 50 Hz
- pressione misurata dal manometro di monte: 7,5 bar;
- pressione imposta a valle: 0 bar;
- acqua utilizzata: 20 L di Milli-Q + 1 L di soluzione batterica a concentrazione variabile;
- portata: 0,61 L/s;
- velocità dell'acqua nel foro: 31,07 m/s.

La pressione di vapore saturo  $p_v$  risulta pari a 0,0233 bar. La durata degli esperimenti è stata variabile e compresa tra 120 e 360 minuti (2 – 6 ore); il campionamento è stato eseguito ogni 30 minuti e tutti i campioni sono stati caratterizzati come visibile in figura 7.9, riportando le seguenti informazioni:

- data dell'esperimento;
- numero del campione, secondo la dicitura progressiva "CAV(numero)";
- orario del prelievo;
- temperatura misurata.

I risultati ottenuti con la configurazione sperimentale avente  $\sigma_v = 0,2$  sono i seguenti:

**Tabella 8.9 – Riepilogo dell'esperimento Exp10**

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	9.00	15,6	0	11530	100%	<b>1,00</b>
1	9.30	21,1	30	7230	63%	<b>0,63</b>
2	10.00	23,9	60	1710	15%	<b>0,15</b>
3	10.30	25,8	90	1990	17%	<b>0,17</b>
4	11.00	27,2	120	3590	31%	<b>0,31</b>

Tabella 8.10 – Riepilogo dell'esperimento Exp11

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	10.45	14,9	0	1664	100%	<b>1,00</b>
1	11.15	21,8	30	404	24%	<b>0,24</b>
2	11.45	23,8	60	218	13%	<b>0,13</b>
3	12.15	26,1	90	109	7%	<b>0,07</b>
4	12.45	26,7	120	52	3%	<b>0,03</b>

Tabella 8.11 – Riepilogo dell'esperimento Exp12

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	12.05	15,7	0	727	100%	<b>1,00</b>
1	12.35	21,7	30	501,2	69%	<b>0,69</b>
2	13.05	24,8	60	261,3	36%	<b>0,36</b>
3	13.40	26,6	90	172	24%	<b>0,24</b>
4	14.10	27,6	120	73,8	10%	<b>0,10</b>

Tabella 8.12 – Riepilogo dell'esperimento Exp13

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	10.30	15,8	0	39345	100%	<b>1,00</b>
1	11.00	20,5	30	34065	87%	<b>0,87</b>
2	11.30	23,2	60	31360	80%	<b>0,80</b>
3	12.00	25,5	90	27725	70%	<b>0,70</b>
4	12.30	26,1	120	33010	84%	<b>0,84</b>

Tabella 8.13 – Riepilogo dell'esperimento Exp14

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	11.00	15,9	0	4007	100%	<b>1,00</b>
1	11.30	21,3	30	2405,5	60%	<b>0,60</b>
2	12.00	24,3	60	1741,5	43%	<b>0,43</b>
3	12.30	26,1	90	1319	33%	<b>0,33</b>
4	13.00	27,2	120	588,5	15%	<b>0,15</b>

Tabella 8.14 – Riepilogo dell'esperimento Exp15

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	11.30	16,2	0	3076	100%	<b>1,00</b>
1	12.00	21,3	30	2098	68%	<b>0,68</b>
2	12.30	24,5	60	1081	35%	<b>0,35</b>
3	13.00	26,4	90	657	21%	<b>0,21</b>
4	13.30	27,0	120	537	17%	<b>0,17</b>

Tabella 8.15 – Riepilogo dell'esperimento Exp17

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	11.00	14,2	0	579400	100%	<b>1,00</b>
1	11.30	19,3	30	101900	18%	<b>0,18</b>
2	12.00	22,1	60	88200	15%	<b>0,15</b>
3	12.30	23,6	90	49500	9%	<b>0,09</b>
4	13.00	24,6	120	26200	5%	<b>0,05</b>
5	13.30	25,1	150	18900	3%	<b>0,03</b>
6	14.00	25,5	180	21300	4%	<b>0,04</b>
7	14.30	25,8	210	14600	3%	<b>0,03</b>
8	15.00	26,1	240	18500	3%	<b>0,03</b>
9	15.30	26,1	270	12200	2%	<b>0,02</b>
10	16.00	26,5	300	6300	1%	<b>0,01</b>
11	16.30	26,6	330	3100	1%	<b>0,01</b>
12	17.00	26,7	360	5200	1%	<b>0,01</b>

ESPERIMENTI DI DISINFEZIONE

Tabella 8.16 - Riepilogo dell'esperimento Exp18

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	10.40	14,7	0	365400	100%	<b>1,00</b>
1	11.10	19,7	30	209800	57%	<b>0,57</b>
2	11.40	23,2	60	77600	21%	<b>0,21</b>
3	12.10	24,9	90	69700	19%	<b>0,19</b>
4	12.40	26,2	120	58300	16%	<b>0,16</b>
5	13.10	26,8	150	25600	7%	<b>0,07</b>
6	13.40	27,4	180	34500	9%	<b>0,09</b>
7	14.10	27,9	210	26900	7%	<b>0,07</b>
8	14.40	28,4	240	16100	4%	<b>0,04</b>
9	15.10	28,8	270	14800	4%	<b>0,04</b>
10	15.40	28,8	300	5100	1%	<b>0,01</b>
11	16.10	28,8	330	6300	2%	<b>0,02</b>
12	16.40	29,0	360	3000	1%	<b>0,01</b>

Tabella 8.17 – Riepilogo dell'esperimento Exp19

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	11.00	16,1	0	32550	100%	<b>1,00</b>
1	11.30	20,2	30	18720	58%	<b>0,58</b>
2	12.00	22,7	60	14210	44%	<b>0,44</b>
3	12.30	24,8	90	8570	26%	<b>0,26</b>
4	13.00	25,8	120	8130	25%	<b>0,25</b>
5	13.30	26,6	150	4320	13%	<b>0,13</b>
6	14.00	27,1	180	3180	10%	<b>0,10</b>
7	14.30	27,4	210	2180	7%	<b>0,07</b>
8	15.00	28,0	240	630	2%	<b>0,02</b>
9	15.30	28,1	270	200	1%	<b>0,01</b>
10	16.00	28,2	300	100	0%	<b>0,00</b>

Accorpare i dati di  $MPN/MPN_0$  otteniamo il seguente grafico:

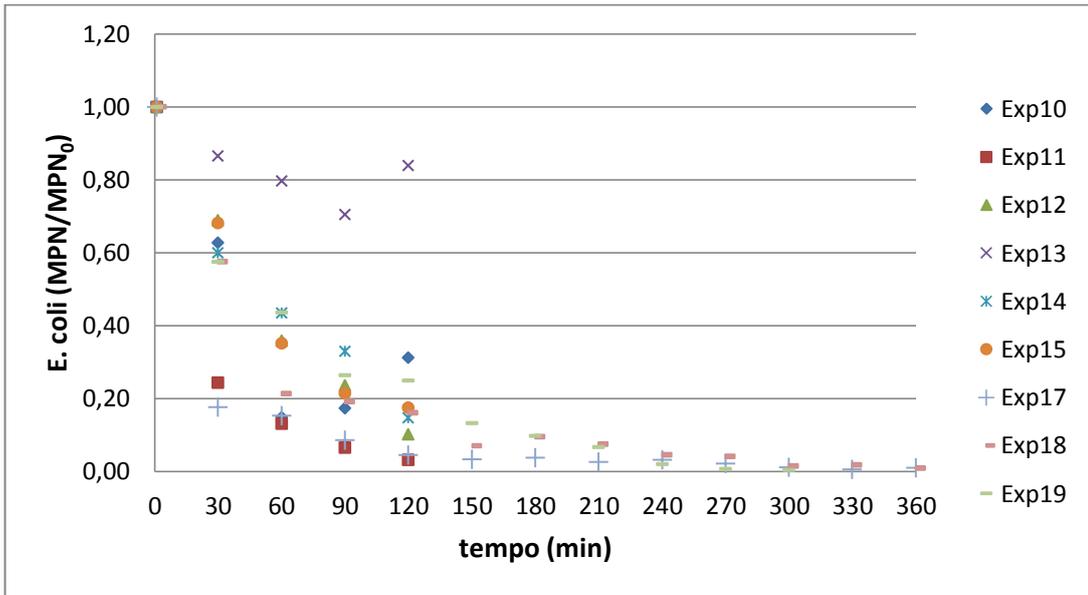


Figura 8.7 – Risultato delle analisi batteriche per gli esperimenti con numero di cavitazione pari a 0,2

mentre in scala semilogaritmica si ottiene:

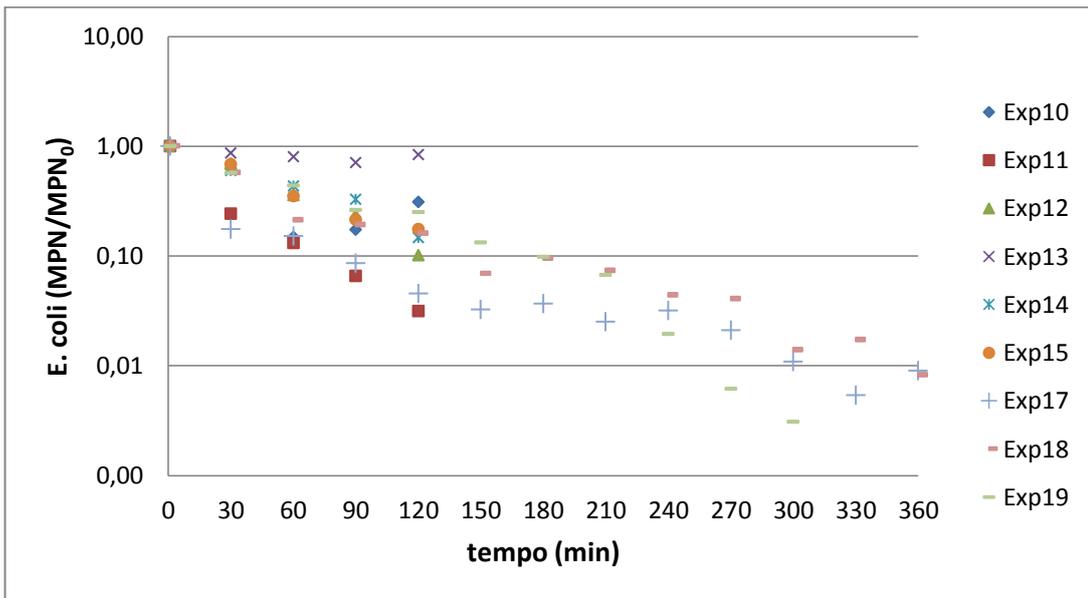


Figura 8.8 – Risultato delle analisi batteriche per gli esperimenti con numero di cavitazione pari a 0,2; presentazione in scala semilogaritmica

Eccetto che per gli esperimenti Exp 10 ed Exp13, che presentano risultati anomali, tutti gli altri test mostrano lo stesso trend di abbattimento. L'azione disinfettante è costante nei primi 120 minuti, meno accentuata successivamente. Oltre i 300 minuti di trattamento non si osservano apprezzabili abbattimenti. Se si escludono i risultati anomali dell'esperimento Exp13, la riduzione totale della carica batterica oscilla tra il 70 (Exp10) ed il 99% (Exp 17 e 18), mentre in un solo caso (Exp19) si osserva una disinfezione del 100%.

Mediando i risultati di tutti gli esperimenti aventi  $\sigma_v = 0,2$ , si può calcolare un andamento medio della capacità disinfettiva di tale configurazione; viene trascurato nel calcolo l'esperimento Exp13, a causa del risultato anomalo. Vengono riportati inoltre gli intervalli relativi alla varianza dei risultati.

**Tabella 8.18 – Riepilogo degli esperimenti con numero di cavitazione 0,2; valutazione dell'abbattimento medio e calcolo della deviazione standard**

Campio ne	minuto di campioname nto	MPN/MPN <sub>0</sub>								Medi a	Deviazione Std
		Exp1 0	Exp1 1	Exp1 2	Exp1 4	Exp1 5	Exp1 7	Exp1 8	Exp1 9		
0	0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
1	30	0,63	0,24	0,69	0,60	0,68	0,18	0,57	0,58	0,52	0,20
2	60	0,15	0,13	0,36	0,43	0,35	0,15	0,21	0,44	0,28	0,13
3	90	0,17	0,07	0,24	0,33	0,21	0,09	0,19	0,26	0,19	0,09
4	120	0,31	0,03	0,10	0,15	0,17	0,05	0,16	0,25	0,15	0,10
5	150						0,03	0,07	0,13	0,08	0,05
6	180						0,04	0,09	0,10	0,08	0,03
7	210						0,03	0,07	0,07	0,06	0,03
8	240						0,03	0,04	0,02	0,03	0,01
9	270						0,02	0,04	0,01	0,02	0,02
10	300						0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
11	330						0,01	0,02		0,01	0,01
12	360						0,01	0,01		0,01	0,00

È possibile osservare che nei primi 120 minuti l'abbattimento medio è stato dell'85%, con una carica residua di solo il 15%. L'ulteriore decrescita fino al 2% si attesta a 270 minuti; oltre questa durata, la carica batterica residua si mantiene stabile, attorno all'1% del quantitativo iniziale

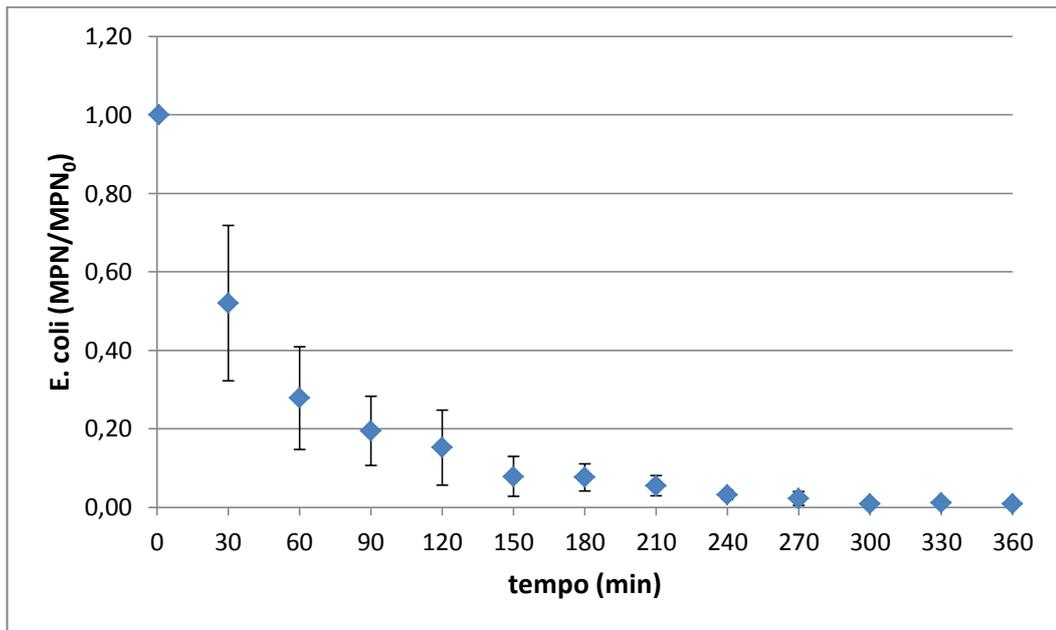


Figura 8.9 – Abbattimento medio per gli esperimenti con numero di cavitazione 0,2

In scala semilogaritmica è possibile individuare graficamente il trend dei valori:

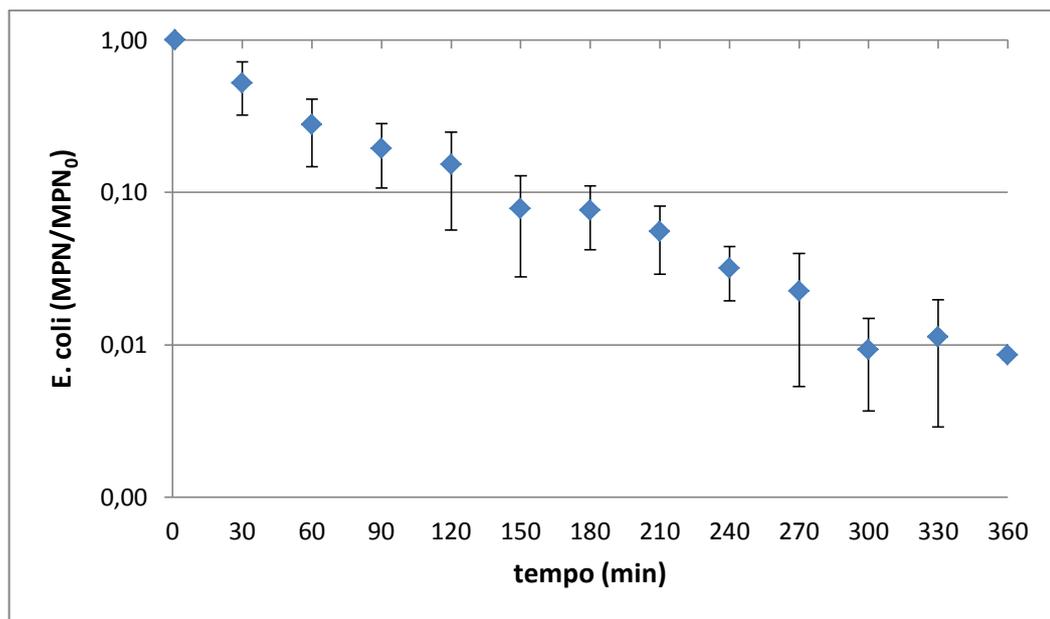


Figura 8.10 – Risultati dell'abbattimento medio con configurazione 0,2 presentati in scala semilogaritmica

Per tutti i campioni è stata misurata la temperatura al momento della spillatura. Lo scopo di tale operazione è triplice:

- valutare la temperatura massima raggiunta dall'esperimento: nel protocollo sperimentale è stato stabilito di arrestare qualunque test che oltrepassasse i 30°C, in modo da non alterare la vitalità dei batteri con gradienti di temperatura eccessivi;
- calcolare la densità dell'acqua in funzione della temperatura, per valutarne la possibile variazione. A tal proposito è stata utilizzata la formula da letteratura:

$$\rho = 0,9971 \cdot (0,0000000379 \cdot T^3 - 0,00000758606 \cdot T^2 + 0,00005115101 \cdot T + 1,00287057338)$$

derivante dal grafico della densità dell'acqua al variare della temperatura;

- valutare la variazione del numero di cavitazione  $\sigma_v$  al variare della temperatura.

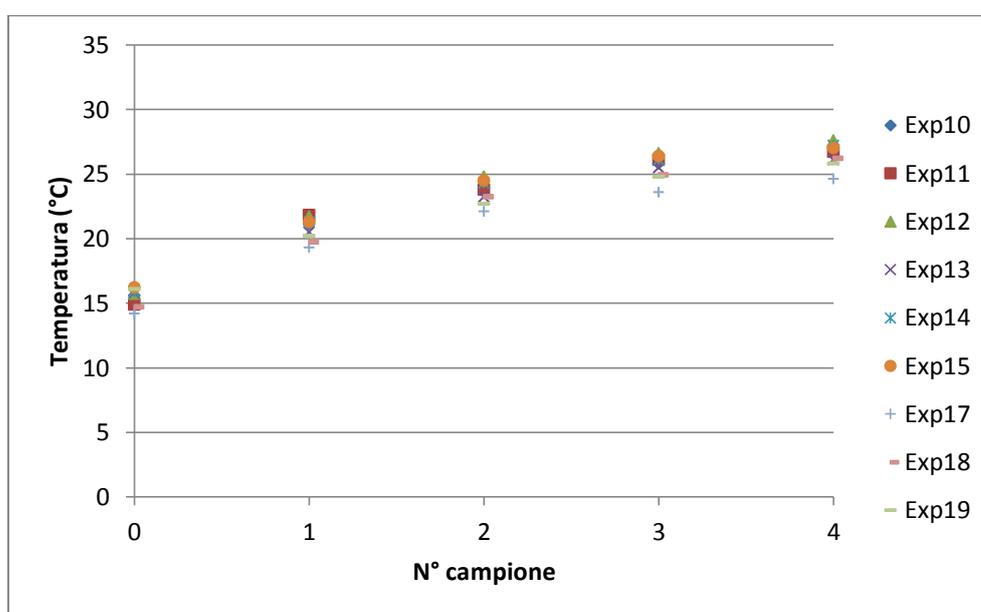


Figura 8.11 – Andamento delle temperature durante gli esperimenti con numero di cavitazione pari a 0,2

L'andamento della temperatura segue lo stesso andamento per tutti gli esperimenti, tendendo ad un asintoto orizzontale compreso tra i 27 ed i 29°C.

La densità dell'acqua varia tra un massimo di 999,27 kg/m<sup>3</sup> ed un minimo di 996,00 kg/m<sup>3</sup>; tale variazione non influisce sul numero di cavitazione, che resta stabilmente pari a 0,2.

**Numero di cavitazione  $\sigma_v = 0,4$**

Il secondo valore di  $\sigma_v$  investigato è lo 0,4. Gli esperimenti sono stati condotti utilizzando la seguente configurazione:

- piastra con 4 fori da 2,5 mm;
- frequenza pompa: 50 Hz
- pressione misurata dal manometro di monte: 7,5 bar;
- pressione imposta a valle: 1 bar;
- acqua utilizzata: 20 L di Milli-Q + 1 L di soluzione batterica a concentrazione variabile;
- portata: 0,61 L/s;
- velocità dell'acqua nel foro: 31,07 m/s.

Il valore della pressione di vapor saturo  $p_v$  è 0,0233 bar. La durata degli esperimenti è stata di 120 minuti (2 ore); i campioni sono stati prelevati ogni 30 minuti e caratterizzati come descritto nel caso di  $\sigma_v = 0,2$ .

Gli esperimenti disinfettivi hanno dato i seguenti risultati:

**Tabella 8.19 – Riepilogo esperimento Exp2**

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	11.05	14,8	0	295	100%	<b>1,00</b>
1	11.35	20,3	30	301	102%	<b>1,02</b>
2	12.05	23,7	60	135	46%	<b>0,46</b>
3	12.35	25,2	90	120	41%	<b>0,41</b>
4	13.05	26,6	120	20	7%	<b>0,07</b>

**Tabella 8.20 – Riepilogo esperimento Exp3**

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	11.30	13,7	0	373,3	100%	<b>1,00</b>
1	12.00	19,6	30	141,65	38%	<b>0,38</b>
2	12.30	23,1	60	20,9	6%	<b>0,06</b>
3	13.00	25,1	90	13,15	4%	<b>0,04</b>
4	13.30	25,8	120	0	0%	<b>0,00</b>

Tabella 8.21 – Riepilogo esperimento Exp4

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	12.30	14,8	0	163,2	100%	<b>1,00</b>
1	13.00	20,2	30	90,8	56%	<b>0,56</b>
2	13.30	23,6	60	28,8	18%	<b>0,18</b>
3	14.00	24,8	90	11	7%	<b>0,07</b>
4	14.30	25,3	120	9,9	6%	<b>0,06</b>

Tabella 8.22 – Riepilogo esperimento Exp7

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	11.05	14,6	0	5810	100%	<b>1,00</b>
1	11.35	20,3	30	4410	76%	<b>0,76</b>
2	12.05	23,7	60	3170	55%	<b>0,55</b>
3	12.35	25,3	90	1610	28%	<b>0,28</b>
4	13.05	26,6	120	1460	25%	<b>0,25</b>

Tabella 8.23 – Riepilogo esperimento Exp8

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	10.50	15,4	0	17220	100%	<b>1,00</b>
1	11.20	19,7	30	13540	79%	<b>0,79</b>
2	11.50	22,4	60	10860	63%	<b>0,63</b>
3	12.20	24,6	90	9060	53%	<b>0,53</b>
4	12.50	25,6	120	8160	47%	<b>0,47</b>

Tabella 8.24 – Riepilogo esperimento Exp9

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	10.55	14,3	0	2280,8	100%	<b>1,00</b>
1	11.25	19,8	30	711,1	31%	<b>0,31</b>
2	11.55	23,4	60	300,35	13%	<b>0,13</b>
3	12.25	25,2	90	147,4	6%	<b>0,06</b>
4	12.55	26,6	120	58	3%	<b>0,03</b>

I risultati vengono in grafico lineare e semilogaritmico (Figura 8.11 e Figura 8.12) per avere una migliore visione del trend seguito dagli esperimenti:

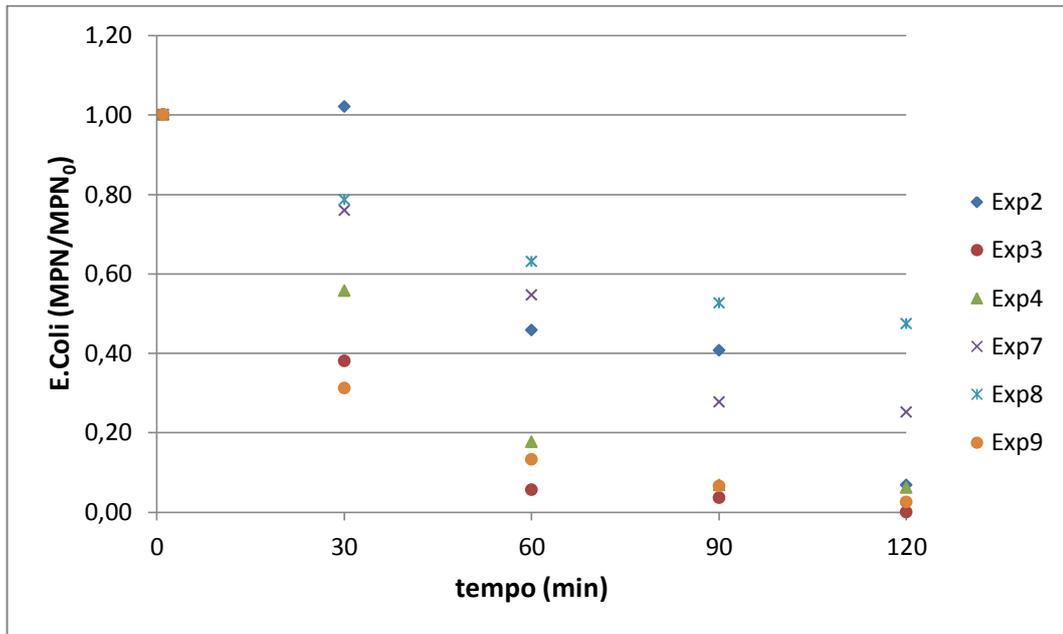


Figura 8.12 – Risultato delle analisi batteriche per gli esperimenti con numero di cavitazione pari a 0,4

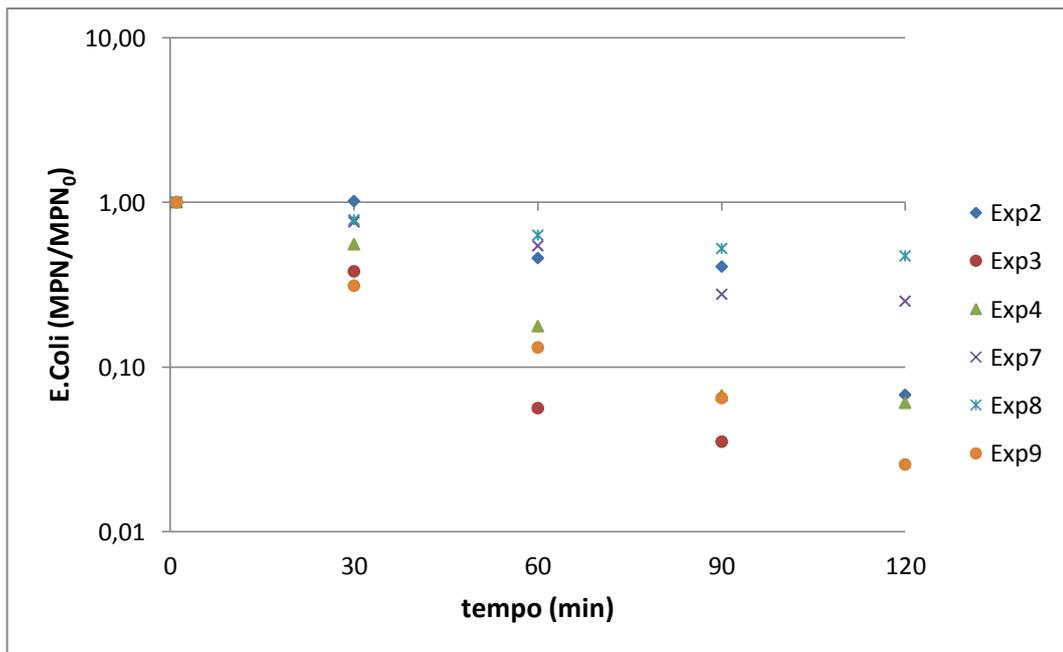


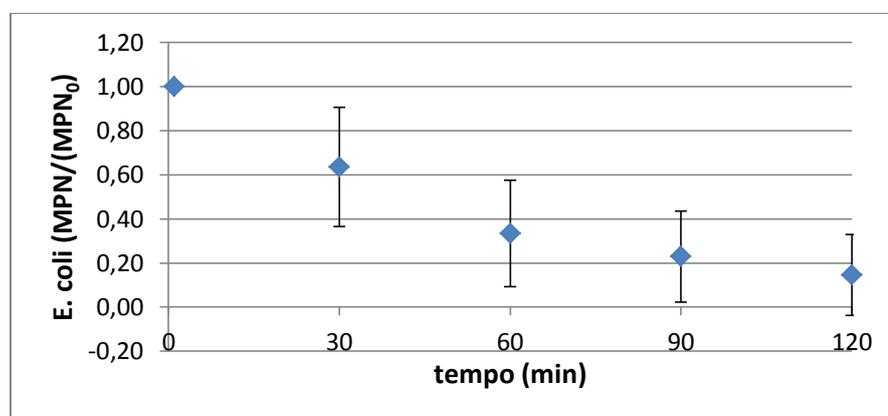
Figura 8.13 – Risultato delle analisi batteriche per gli esperimenti con numero di cavitazione pari a 0,4; presentazione in scala semilogaritmica

La media degli esperimenti con numero di cavitazione pari a 0,4 produce i seguenti risultati:

**Tabella 8.25 – Riepilogo degli esperimenti con numero di cavitazione 0,4; valutazione dell'abbattimento medio e calcolo della deviazione standard**

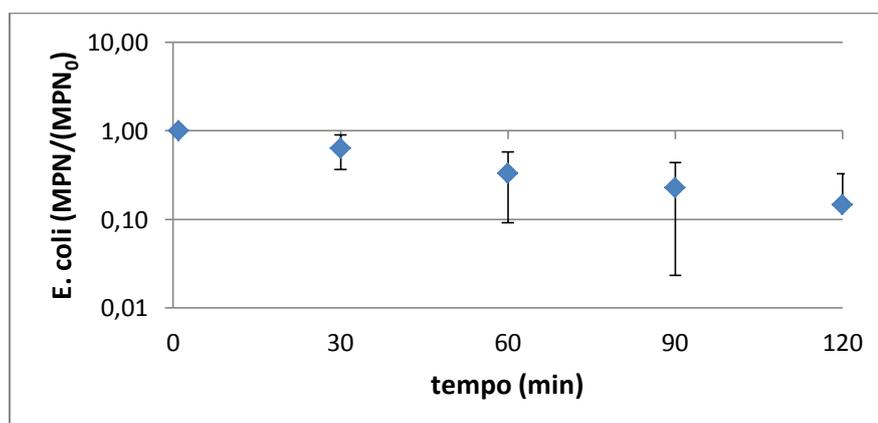
Campione	minuto di campionamento	MPN/MPN <sub>0</sub>						Media	Deviazione Std
		Exp2	Exp3	Exp4	Exp7	Exp8	Exp9		
0	0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00
1	30	1,02	0,38	0,56	0,76	0,79	0,31	0,64	0,27
2	60	0,46	0,06	0,18	0,55	0,63	0,13	0,33	0,24
3	90	0,41	0,04	0,07	0,28	0,53	0,06	0,23	0,21
4	120	0,07	0,00	0,06	0,25	0,47	0,03	0,15	0,18

Come si osserva, in questo secondo caso la deviazione standard assume valori rilevanti (Figura 8.14), indicando una dispersione dei dati rispetto alla media sicuramente maggiore rispetto al caso con numero di cavitazione 0,2. Questo dato permette di affermare che il controllo sul sistema è maggio nella prima tipologia di esperimenti di disinfezione.



**Figura 8.14 – Abbattimento medio per gli esperimenti con numero di cavitazione 0,4**

In grafico semilogaritmico:



**Figura 8.15 – Risultati dell'abbattimento medio con configurazione 0,4 presentati in scala semilogaritmica**

Per quanto concerne la variazione di temperatura, tutti gli esperimenti tendono ad un asintoto orizzontale di circa 27°C (Figura 8.16). Così come osservato per la configurazione sperimentale precedente, anche in questo caso la variazione di densità non influisce sul numero di cavitazione, che resta stabilmente pari a 0,4.

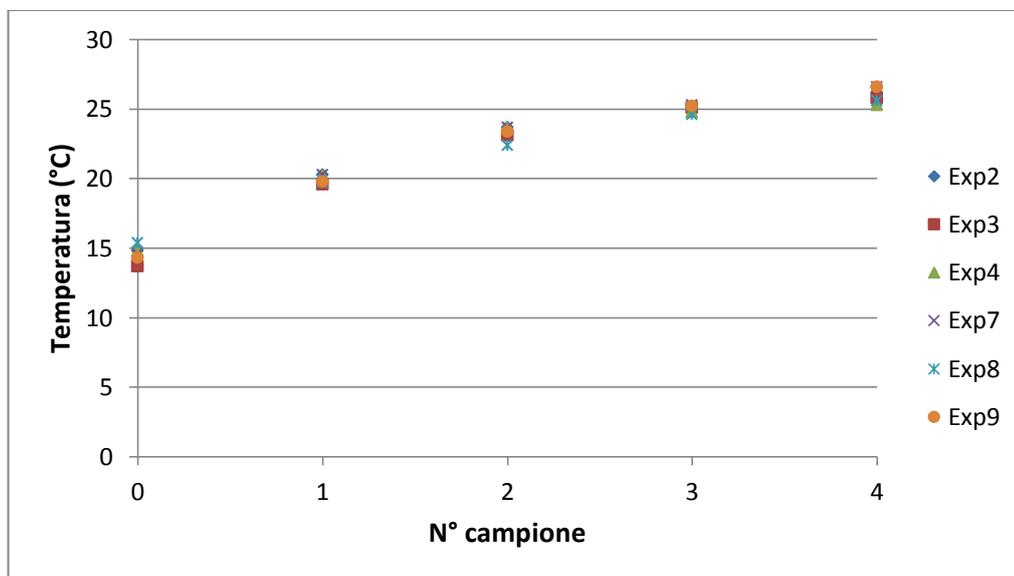


Figura 8.16 – Andamento delle temperature durante gli esperimenti con numero di cavitazione pari a 0,4

**Numero di cavitazione  $\sigma_v = 0,6$**

L'ultimo valore di  $\sigma_v$  investigato è lo 0,6. Gli esperimenti sono stati condotti utilizzando la seguente configurazione:

- piastra con 4 fori da 2,5 mm;
- frequenza pompa: 50 Hz
- pressione misurata dal manometro di monte: 7,5 bar;
- pressione imposta a valle: 2 bar;
- acqua utilizzata: 20 L di Milli-Q + 1 L di soluzione batterica a concentrazione variabile;
- portata: 0,59 L/s;
- velocità dell'acqua nel foro: 31,07 m/s.

Il valore della pressione di vapor saturo  $p_v$  è 0,0233 bar. La durata degli esperimenti è stata di 240 minuti (4 ore); i campioni sono stati prelevati ogni 30/60 minuti e caratterizzati come descritto per i casi precedenti.

Gli esperimenti disinfettivi hanno dato i seguenti risultati:

**Tabella 8.26 – Riepilogo esperimento Exp20**

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	9.50	15,8	0	120330	100%	<b>1,00</b>
1	10.20	20,6	30	41060	34%	<b>0,34</b>
2	10.50	23,1	60	57940	48%	<b>0,48</b>
3	11.20	25,0	90	38730	32%	<b>0,32</b>
4	11.50	25,6	120	22820	19%	<b>0,19</b>
5	12.20	26,2	150	20140	17%	<b>0,17</b>
6	12.50	26,7	180	11530	10%	<b>0,10</b>
7	13.20	27,3	210	13140	11%	<b>0,11</b>
8	13.50	27,8	240	11120	9%	<b>0,09</b>

**Tabella 8.27 – Riepilogo esperimento Exp22**

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	10.55	17,3	0	32700	100%	<b>1,00</b>
1	11.55	25,2	60	21800	67%	<b>0,67</b>
2	12.55	27,3	120	7500	23%	<b>0,23</b>
3	13.55	27,7	180	2000	6%	<b>0,06</b>
4	14.55	28,2	240	0	0%	<b>0,00</b>

Tabella 8.28 – Riepilogo esperimento Exp23

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	11.10	17,8	0	15993	100%	<b>1,00</b>
1	12.10	24,7	60	8351	52%	<b>0,52</b>
2	13.10	27,6	120	6077	38%	<b>0,38</b>
3	14.10	28,1	180	8432	53%	<b>0,53</b>
4	15.10	29,1	240	2669,5	17%	<b>0,17</b>

Tabella 8.29 – Riepilogo esperimento Exp24

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	11.00	19,3	0	2243950	100%	<b>1,00</b>
1	12.00	25,7	60	1221100	54%	<b>0,54</b>
2	13.00	28,6	120	843500	38%	<b>0,38</b>
3	14.00	29,6	180	355450	16%	<b>0,16</b>
4	15.00	29,8	240	129750	6%	<b>0,06</b>

Tabella 8.30 – Riepilogo esperimento Exp29

Prelievo in laboratorio			Analisi batterica			
Campione	ora prelievo	T (°C)	minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	10.45	17,3	0	2755	100%	<b>1,00</b>
1	11.15	21,4	30	1789	65%	<b>0,65</b>
2	11.45	24,1	60	860	31%	<b>0,31</b>
3	12.45	26,3	120	201	7%	<b>0,07</b>
4	13.45	27,1	180	10	0%	<b>0,00</b>
5	14.45	27,6	240	10	0%	<b>0,00</b>

I risultati vengono riportati graficamente nelle figure seguenti, sia in scala lineare, che semilogaritmica:

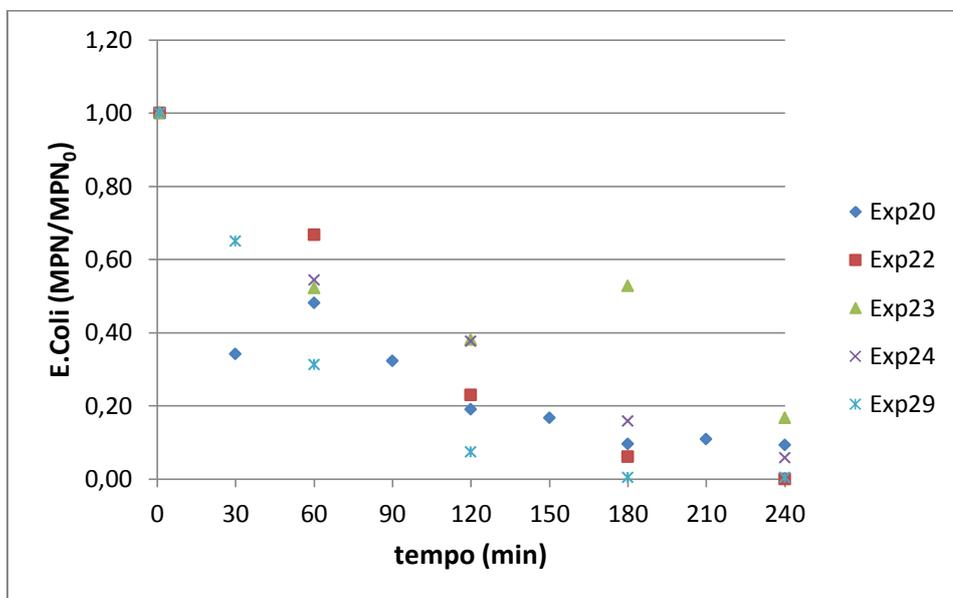


Figura 8.17 – Risultato delle analisi batteriche per gli esperimenti con numero di cavitazione pari a 0,6

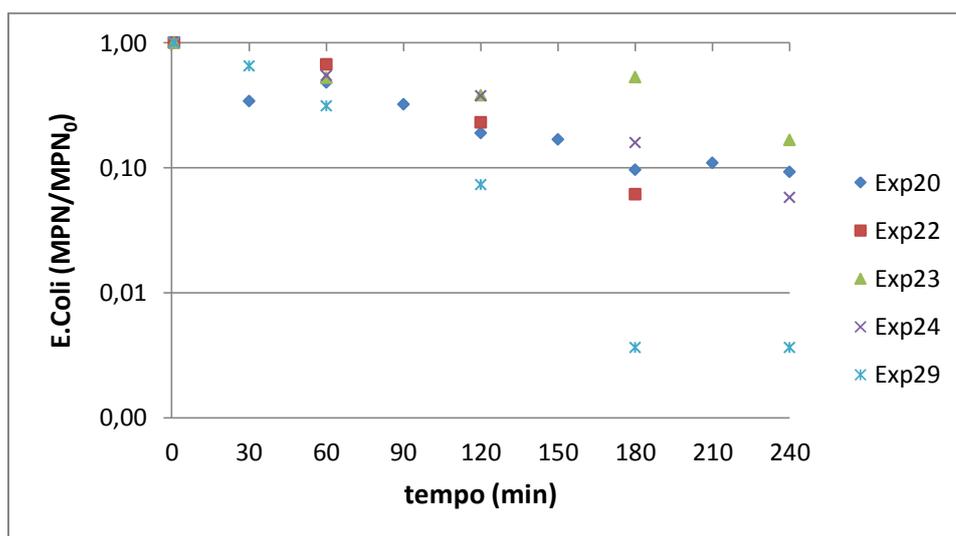


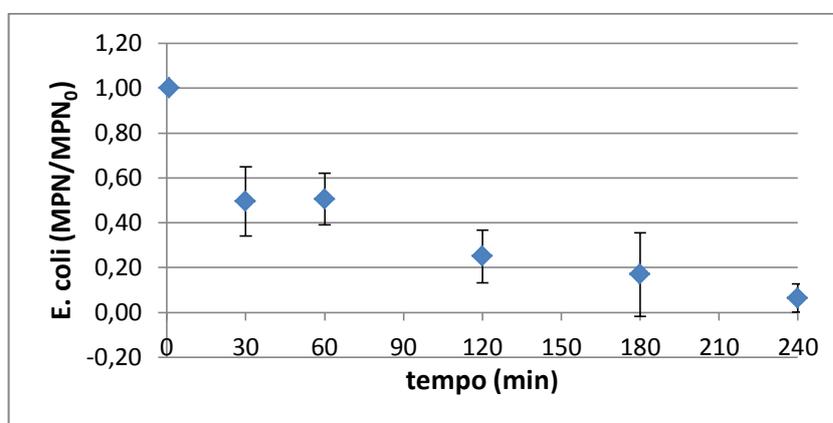
Figura 8.18 – Risultato delle analisi batteriche per gli esperimenti con numero di cavitazione pari a 0,6; presentazione in scala semilogaritmica

La media dei risultati ottenuti con gli esperimenti di disinfezione viene calcolata per i minuti di campionamento cui corrispondo almeno due valori; i risultati sono i seguenti:

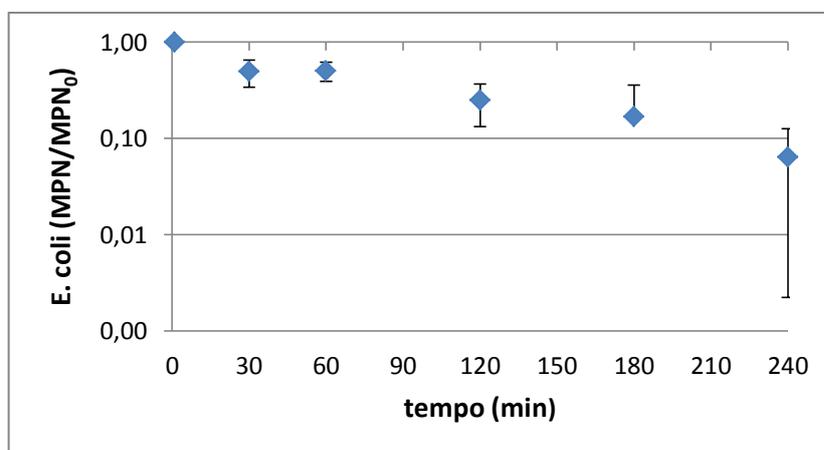
**Tabella 8.31 – Riepilogo degli esperimenti con numero di cavitazione 0,6; valutazione dell'abbattimento medio e calcolo della deviazione standard**

Campione	minuto di campionamento	MPN/MPN <sub>0</sub>					Media	Deviazione Std
		Exp20	Exp22	Exp23	Exp24	Exp29		
0	0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0
1	30	0,34				0,65	0,50	0,1540683
2	60	0,48	0,67	0,52	0,54	0,31	0,51	0,1146334
4	120	0,19	0,23	0,38	0,38	0,07	0,25	0,1167535
6	180	0,10	0,06	0,53	0,16	0,00	0,17	0,1858886
8	240	0,09	0,00	0,17	0,06	0,00	0,06	0,0619318

Cui corrispondono i seguenti grafici in scala lineare e semilogaritmica:



**Figura 8.19 – Abbattimento medio per gli esperimenti con numero di cavitazione 0,6**



**Figura 8.20 – Risultati dell'abbattimento medio con configurazione 0,6 presentati in scala semilogaritmica.**

In funzione di questi esiti, possono essere fatte due osservazioni. In primo luogo, la deviazione standard diminuisce rispetto al caso con numero di cavitazione pari a 0,4. In secondo luogo, la disinfezione attesa era minore rispetto ai risultati ottenuti.

Un'attenta analisi del funzionamento del sistema ha permesso di osservare un fenomeno inizialmente inaspettato: durante l'esecuzione dell'esperimento, in corrispondenza della valvola a sfera (usata per imporre la contropressione di vale) risultava percepibile la generazione di una seconda zona di cavitazione. La strozzatura generata dalla valvola, infatti, era tale da provocare un'accelerazione del flusso, con conseguente caduta di pressione al di sotto del valore di pressione di vapor saturo. A monte del restringimento la pressione misurata dal manometro risultava essere di 2 bar; a valle invece la pressione era quella atmosferica. Questo fenomeno, inaspettato ma coerente con i risultati delle analisi batteriche, è stato indagato e i risultati dello studio sono proposti nel seguente sottoparagrafo.

#### 8.4.1. Influenza della valvola a sfera per numero di cavitazione 0,6

Come precedentemente esposto, la strozzatura provocata dalla valvola a sfera nella configurazione utilizzata per ottenere un  $\sigma_v$  del reattore pari a 0,6, è risultata tale da generare una seconda zona di cavitazione. Si è deciso quindi di indagare il fenomeno, sia dal punto di vista geometrico che da quello acustico (presentato nell'apposito Paragrafo 8.6).

La rotazione della leva di azionamento rispetto all'asse della condotta è stata valutata in 65°. Mediante software CAD è stata calcolata con discreta approssimazione l'area di flusso lasciata libera dalla strozzatura (Figura 8.21).

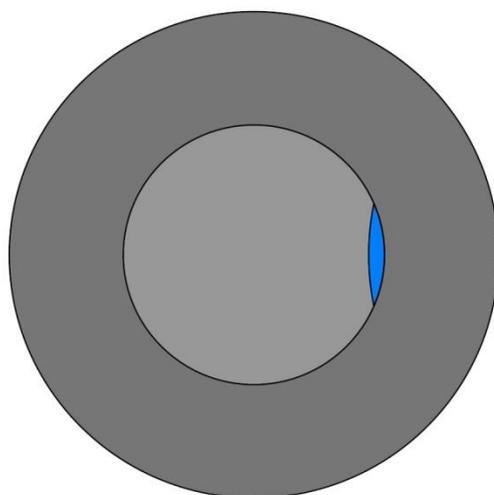


Figura 8.21 – Sezione con chiusura della valvola pari a 65°; in azzurro lo spazio lasciato libero per il flusso

Come nel caso della piastra forata sono stati calcolati i parametri utili a descrivere le caratteristiche geometri e calcolare il numero di cavitazione. Dato un diametro della tubazione di 32 mm, l'area della condotta risulta essere pari a 804,25 mm<sup>2</sup>; l'area ed il contorno bagnato

dell'apertura, ricavati mediante software, risultano pari, rispettivamente, a 16,20 mm<sup>2</sup> e 25,64 mm. Si possono quindi calcolare i valori di  $\beta$  ed  $\alpha$ :

$$\beta = \frac{16,20 \text{ mm}^2}{804,25 \text{ mm}^2} = 0,020$$

$$\alpha = \frac{25,64 \text{ mm}}{16,20 \text{ mm}^2} = 1,58 \text{ mm}^{-1}$$

Come si può osservare i parametri geometrici risultano simili a quelli della piastra forata:

Parametri geometrici	Piastra forata	Strozzatura valvola
$\beta$ (-)	0,024	0,020
$\alpha$ (mm <sup>-1</sup> )	1,60	1,58

Nota la portata durante gli esperimenti (0,59 L/s) è stato possibile calcolare la velocità all'interno della strozzatura, pari a 36,42 m/s. Ipotizzando una densità  $\rho$  dell'acqua di 1000 kg/m<sup>3</sup>, si ricava un numero di cavitazione per la valvola a sfera pari a 0,15: l'effetto risulta quindi non trascurabile.

È stato quindi deciso di effettuare degli esperimenti che riproducessero le condizioni di cavitazione della valvola, in assenza di piastra forata, in modo da tener conto dell'influenza del solo fenomeno anomalo riscontrato. I parametri operativi utilizzati sono i seguenti:

- chiusura valvola: 65° rispetto all'asse della condotta, cui corrisponde una pressione misurata dal manometro di valle di 2 bar;
- frequenza: 29,5 Hz, in modo da ottenere la stessa portata di 0,59 L/s degli esperimenti con piastra forata montata;
- acqua utilizzata: 20 L di Milli-Q + 1 L di soluzione batterica a concentrazione variabile.

Gli esperimenti sono stati condotti con differenti procedure nella parte iniziale, al fine di indagare alcune anomalie sopraggiunte nel corso degli ultimi esperimenti; di seguito si riportano solo i dati relativi al periodo di azione della valvola. La durata degli esperimenti è stata di 240 minuti (4 ore); il campionamento è stato eseguito ogni 60 minuti, con caratterizzazione analoga agli esperimenti già visti. Si consiglia comunque un approfondimento dello studio, così come riportato nel Capitolo 9, dedicato alle conclusioni.

Tabella 8.32 – Riepilogo analisi batteriche relative all'esperienza Exp34

Analisi batterica			
minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	38900	100,00%	<b>1,00</b>
60	38400	98,71%	<b>0,99</b>
120	29500	75,84%	<b>0,76</b>
180	23100	59,38%	<b>0,59</b>
240	13500	34,70%	<b>0,35</b>

Tabella 8.33 – Riepilogo analisi batteriche relative all'esperienza Exp35

Analisi batterica			
minuti	MPN/100 ml	Carica residua %	MPN/MPN <sub>0</sub>
0	32550	100%	<b>1,00</b>
60	20980	64%	<b>0,64</b>
120	18600	57%	<b>0,57</b>
180	11980	37%	<b>0,37</b>
240	10920	34%	<b>0,34</b>

Cui corrispondono i seguenti grafici, riportati in scala lineare e semilogaritmica:

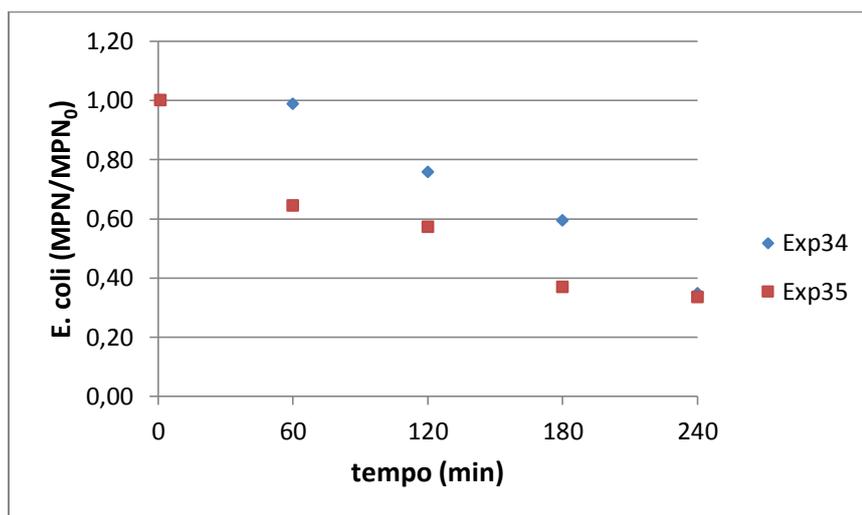


Figura 8.22 – Risultato delle analisi batteriche per gli esperimenti condotti con valvola ruotata di 65°

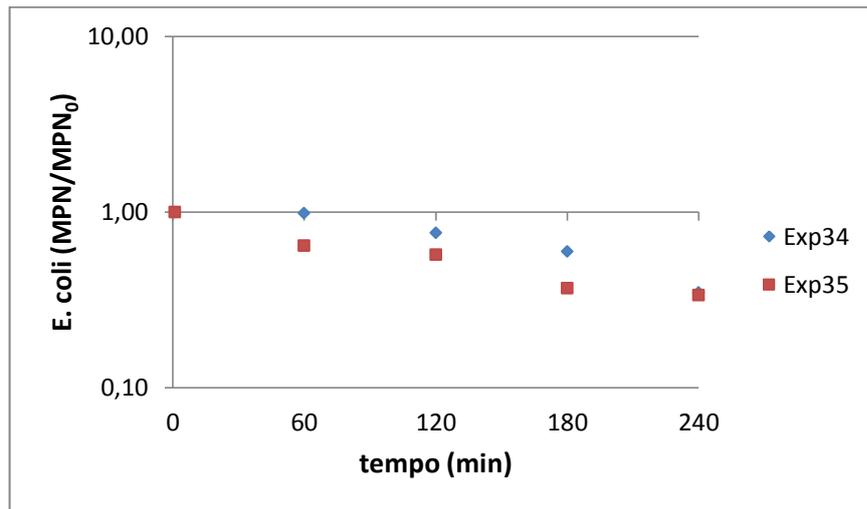


Figura 8.23 – Risultato delle analisi batteriche per gli esperimenti condotti con valvola ruotata di 65°, presentato in scala semilogaritmica

Come nei precedenti casi, si calcola la media tra i vari esperimenti, al fine di fornire anche delle indicazioni sulla varianza:

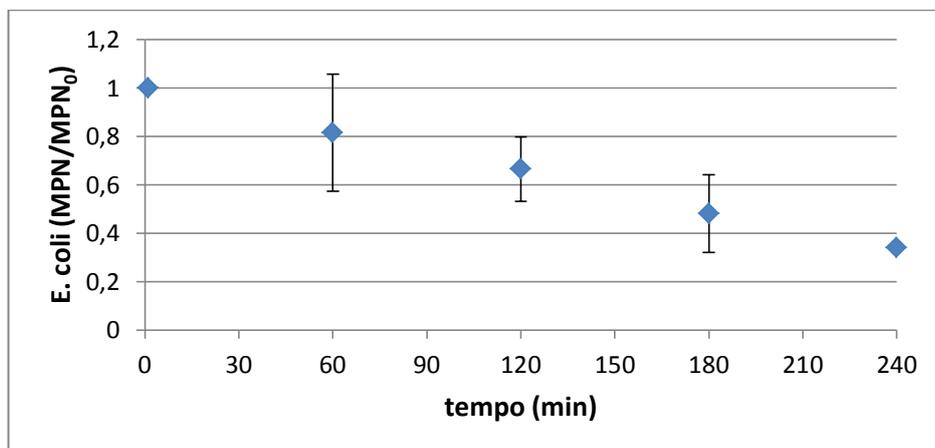


Figura 8.24 – Abbattimento medio per gli esperimenti con valvola ruotata di 65°

L'andamento dell'abbattimento è pressoché lineare e la carica residua si attesta al di sotto del 40%. È interessante notare come parametri geometrici simili tra piastra forata e strozzatura generata dalla valvola generino tuttavia risultati disinfettivi differenti; un numero maggiore di fori più piccoli genera infatti un quantitativo maggiore di cavità.

Tuttavia, l'alta variabilità che contraddistingue gli esperimenti con numero di cavitazione 0,6 e l'influenza dimostrata dell'azione della valvola a sfera, aprono nuovi scenari di ricerca ed approfondimento (si veda il Capitolo 9 dedicato alle conclusioni).

### 8.4.2. Variazioni di temperatura

Gli altri stress meccanici generati dalle bolle e la creazioni di punti localizzati fortemente energetici (*hot spots*) suggerisce un aumento della temperatura del liquido trattato differente a seconda del setup sperimentale. A tal proposito è stato elaborato un quadro riassuntivo degli esperimenti di disinfezione precedentemente descritti:

**Tabella 8.34 – Variazioni di temperatura rilevate durante gli esperimenti di disinfezione**

<b>N° esperimento</b>	<b>Cavitation Number</b>	<b>Durata min</b>	<b>T iniz °C</b>	<b>T fin °C</b>	<b>ΔT °C</b>
Exp2	0,4	120	14,8	26,6	<b>11,8</b>
Exp3	0,4	120	13,7	25,8	<b>12,1</b>
Exp4	0,4	120	14,8	25,3	<b>10,5</b>
Exp7	0,4	120	14,6	26,6	<b>12,0</b>
Exp8	0,4	120	15,4	25,6	<b>10,2</b>
Exp9	0,4	120	14,3	26,6	<b>12,3</b>
Exp10	0,2	120	15,6	27,2	<b>11,6</b>
Exp11	0,2	120	14,9	26,7	<b>11,8</b>
Exp12	0,2	120	15,7	27,6	<b>11,9</b>
Exp13	0,2	120	15,8	26,1	<b>10,3</b>
Exp14	0,2	120	15,9	27,2	<b>11,3</b>
Exp15	0,2	120	16,2	27,0	<b>10,8</b>
Exp17	0,2	360	14,2	26,7	<b>12,5</b>
Exp18	0,2	360	14,7	29,0	<b>14,3</b>
Exp19	0,2	300	16,1	28,2	<b>12,1</b>
Exp20	0,6	240	15,8	27,8	<b>12,0</b>
Exp22	0,6	240	17,3	28,2	<b>10,9</b>
Exp23	0,6	240	17,8	29,1	<b>11,3</b>
Exp24	0,6	240	19,3	29,8	<b>10,5</b>
Exp29	0,6	240	17,3	27,6	<b>10,3</b>

È possibile osservare un  $\Delta T$  simile per gli esperimenti con numero di cavitazione 0,2 e 0,4 della durata di 120 minuti; i medesimi risultati si riscontrano per gli esperimenti con  $\sigma_v$  pari a 0,6 durati 240 minuti. In questo ultimo caso è però necessario sottolineare due aspetti. Il primo aspetto è che ad un numero di cavitazione maggiore corrisponde un'attività cavitazionale minore, che giustificerebbe una variazione di temperatura simile raggiunta nel doppio del tempo; il secondo aspetto è che la cavitazione generata in corrispondenza della valvola deve incidere in qualche modo nel bilancio totale, ma il suo contributo non è stato totalmente chiarito.

Gli esperimenti che registrano una variazione di temperatura maggiore sono quelli con configurazione  $\sigma_v = 0,2$  e durata compresa tra i 300 e i 360 minuti, come atteso. Resta però importante l'influenza di tre fattori non trascurabili:

- la dissipazione fornita dalla serpentina dell'impianto di raffreddamento;
- la dissipazione delle condotte in acciaio inox dell'impianto;
- la temperatura del locale.

Il primo fattore dipende dal materiale costituente la serpentina e potrebbe essere suscettibile di variazioni ed implementazioni future; il secondo è legato alla configurazione dell'impianto; il terzo è strettamente dipendente dalle variazioni stagionali e dall'eventuale messa in funzione dell'impianto di riscaldamento/condizionamento. Tutti questi fattori si prestano a possibili sviluppi futuri dello studio.

## **8.5. Esperimenti in funzione della concentrazione batterica**

Finora i risultati degli esperimenti sono stati presentati in funzione del differente numero di cavitazione. Risulta interessante effettuare un'analisi riassuntiva sulle diverse concentrazioni utilizzate, al fine di valutare eventuali comportamenti caratteristici.

Si propone quindi il seguente quadro di valutazione dell'abbattimento totale ottenuto nei diversi esperimenti:

Tabella 8.35 – Tabella riepilogativa degli esperimenti condotti, in funzione della concentrazione della carica batterica. Si evidenziano le percentuali di abbattimento per ogni esperimento.

Carica batterica MPN/100 mL	N° esperimento	Numero di cavitazione	Durata esperimento (min)	Carica residua %	Abbattimento %
<b>10<sup>2</sup></b>	Exp2		120	6,8	<b>93,2</b>
	Exp3	0,4	120	0,0	<b>100,0</b>
	Exp4		120	6,1	<b>93,9</b>
	Exp12		120	10,2	<b>89,8</b>
	Exp14	0,2	120	14,7	<b>85,3</b>
	Exp15		120	17,5	<b>82,5</b>
<b>10<sup>3</sup></b>	Exp7	0,4	120	25,1	<b>74,9</b>
	Exp9		120	2,5	<b>97,5</b>
	Exp11	0,2	120	3,1	<b>96,9</b>
	Exp29	0,6*	240	0,4	<b>99,6</b>
<b>10<sup>4</sup></b>	Exp8	0,4	120	47,4	<b>52,6</b>
	Exp10		120	31,1	<b>68,9</b>
	Exp19	0,2	300	0,3	<b>99,7</b>
	Exp22	0,6*	240	0,0	<b>100,0</b>
	Exp23		240	16,7	<b>83,3</b>
<b>10<sup>5</sup></b>	Exp17		360	0,90	<b>99,10</b>
	Exp18	0,2	360	0,82	<b>99,18</b>
	Exp20	0,6*	240	9,2	<b>90,8</b>
<b>10<sup>6</sup></b>	Exp24	0,6*	240	5,8	<b>94,2</b>

Si può osservare che a basse concentrazioni, comprese tra  $10^2$  e  $10^3$ , a parità di durata di trattamento si ottengono i medesimi risultati per quanto riguarda le configurazioni con numero di cavitazione pari a 0,2 e 0,4. Man mano che le concentrazioni aumentano ( $10^4$ ), si evidenzia una maggiore resa per il caso con  $\sigma_v$  minore; per trattamenti di 300-360 minuti con numero di cavitazione 0,2 l'abbattimento è pressoché totale sia in presenza di concentrazioni di  $10^4$  che di  $10^5$ . In questa breve discussione vengono tralasciati gli esperimenti evidenziati con l'(\*) aventi  $\sigma_v$  pari a 0,6 a causa dell'influenza della valvola sugli esiti dei test.

## 8.6. Registrazioni fonometriche

Esistono in letteratura due approcci per quantificare la cavitazione in un fluido dal punto di vista acustico: la modellazione analitica e i metodi definibili come ingegneristici. Nel primo caso lo studio è fortemente teorico e generalmente concentrato sullo studio di una sola bolla ed è basato su modelli che possono solo approssimare il rumore prodotto (*Torredimare, 2018*). Questo dipende linearmente dalla velocità del flusso, dalla quantità di bolle prodotte e dalla concentrazione di bolle per unità di volume (*Karassik et McGuire, 1997*); data tuttavia una forte casualità nella generazione di bolle, i metodi analitici non prevedono con sufficiente accuratezza il rumore prodotto.

Per tale motivo lo studio di Tesi si è concentrato su un approccio ingegneristico, cercando di correlare la cavitazione prodotta con la misurazione di una data grandezza fisica. La scelta è ricaduta sulla valutazione della pressione sonora, generata dall'implosione delle bolle, fenomeno percepito anche dall'orecchio umano. Lo studio degli effetti acustici della cavitazione è stato condotto in collaborazione con *Torredimare (2018)*. Le registrazioni sono state effettuate mediante un fonometro *Brüel & Kjær Type 2222*, il quale è stato collegato ad una scheda di acquisizione dati (DAQ) *NI USB-6009* della *National Instrument*. Questa comunica con il PC mediante BUS di tipo USB e mediante l'apposito software *LabVIEW* acquisisce il segnale. Le registrazioni multiple acquisite durante ogni esperimento vengono poi accorpate dal software *DIAdem*, che le rende fruibili dal programma *MATLAB*.

### 8.6.1. Cenni teorici

Il fonometro registra quindi un segnale che viene successivamente elaborato. Il segnale è composto da una distribuzione di potenza rispetto alla frequenza e prende generalmente il nome di *spettro di potenza* o *di densità di potenza spettrale*. Uno dei concetti fondamentali alla base dell'analisi è che, durante un fenomeno di cavitazione, il segnale prodotto ha comportamento casuale, quindi risulta necessario adottare un approccio statistico utilizzando una stima della densità spettrale (*Torredimare, 2018*).

Lo scopo è trovare, ove siano presenti:

- un valore di picco caratteristico della cavitazione;
- l'esistenza di una periodicità del rumore emesso dalle bolle.

Il metodo utilizzato per studiare il segnale è quello di Welch, che si presta ad essere applicato a segnali composti da frequenze diverse. Esso deriva dal metodo di Barlett ed è basato su due operazioni:

- la suddivisione del segnale in un certo numero di segmenti di lunghezza finita, che si sovrappongono per almeno il 50%
- la scelta di un'opportuna "finestra" di analisi nel dominio del tempo, che influisce sulla gamma di frequenze che risulterà meglio definita.

Nei Sottoparagrafi seguenti saranno descritti i risultati dello studio acustico condotto con *Torredimare (2018)*.

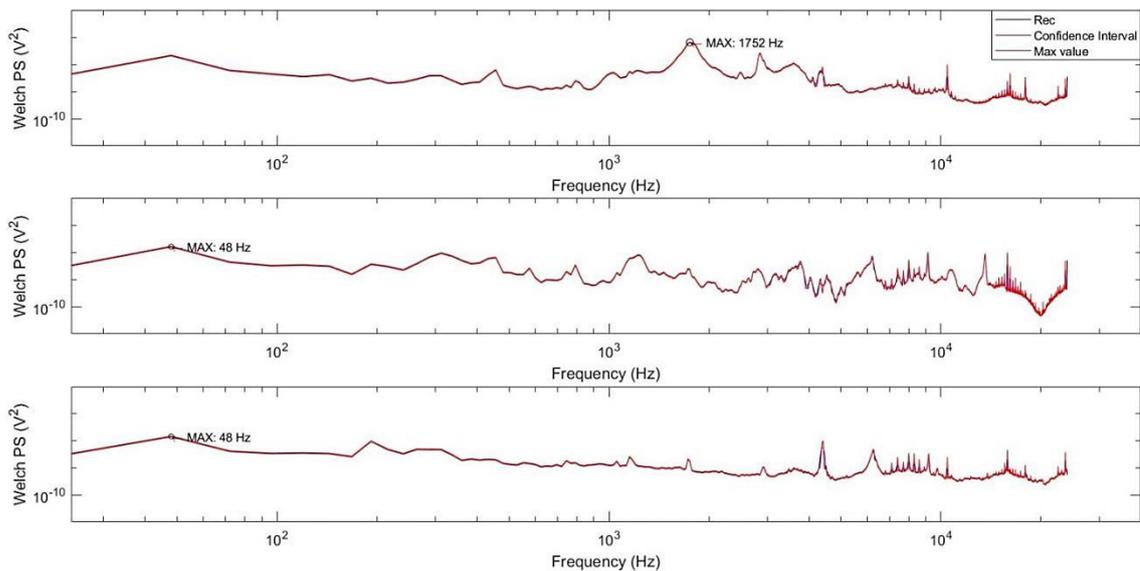
### 8.6.2. Valutazione dello spettro di potenza

La procedura di acquisizione dei dati viene spiegata in maniera dettagliata nel Capitolo 7, Paragrafo 7.2. Ogni esperimento è stato accompagnato da un minimo di 5 registrazioni fino ad un massimo di 10, con durata variabile di 30 o 60 secondi. Il campionamento è stato eseguito a 48kHz, permettendo di avere  $1,44 \times 10^6$  punti nei segnali di 30 secondi e  $2,88 \times 10^6$  punti in quelli da 60. Sono state inoltre eseguite delle registrazioni anche durante gli esperimenti di controllo eseguiti senza piastra, in modo da ottenere una valutazione del rumore di fondo utile a depurare il segnale acquisito durante gli esperimenti di disinfezione.

Dopo aver elaborato i file acquisiti dalla *DAQ* con i software proprietari della *National Instrument*, si è proceduto ad effettuare lo studio statistico con un programma *MATLAB* appositamente compilato. Le registrazioni sono state in primo luogo mediate e successivamente, utilizzando la funzione *pwelch* si è applicato il metodo di analisi di Welch precedentemente citato. Ruolo importante ha la scelta della finestra di analisi, come riportato da *Torredimare (2018)*: un valore basso da un risultato meno rumoroso, dove alcuni picchi possono essere nascosti dalla media integrale, mentre per un valore maggiore si ottiene uno spettro di potenza rumoroso, con ogni singolo valore di picco considerato. A partire da queste osservazioni, sono state utilizzate finestre comprese tra 1000 e 2000 punti.

Per quanto riguarda il rumore del segnale, si è osservato come, oltre la soglia dei 3 kHz, questo diventi particolarmente accentuato. A partire da questa frequenza si è deciso di ridurre il rumore random applicando la funzione *smooth*.

Si presentano quindi i risultati ottenuti per le tre differenti configurazioni di numero di cavitazione utilizzate durante gli esperimenti di disinfezione:



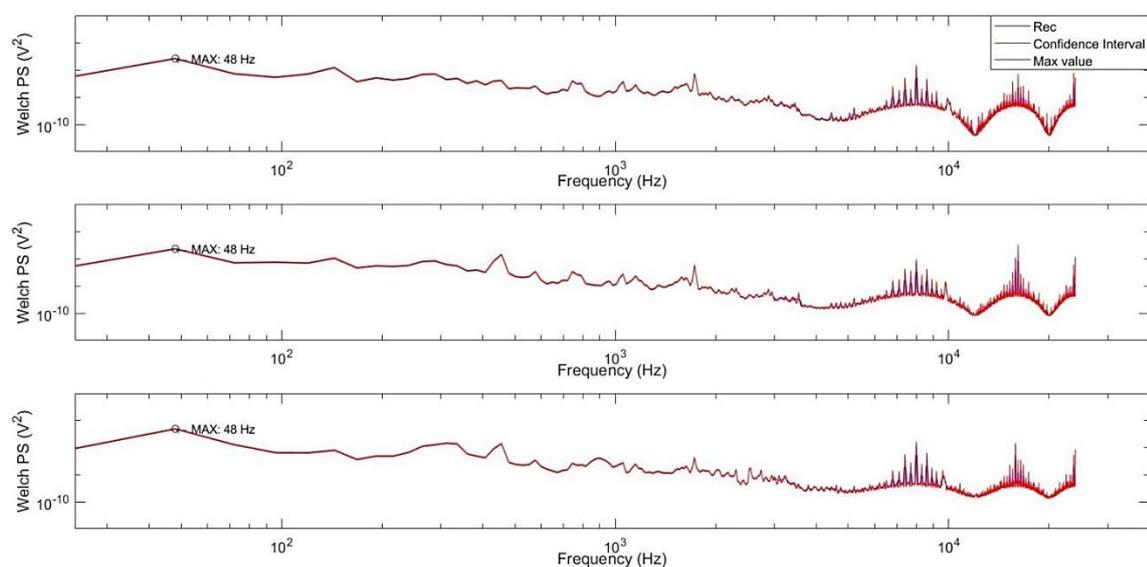
**Figura 8.25 – Grafici relativi a registrazioni di 60 secondi, analizzati con finestra di 2000 punti per i numeri di cavitazione 0,2 (in alto), 0,4 (al centro) e 0,6 (in basso) (Torredimare, 2018)**

I risultati ottenuti ci permettono di fare alcune considerazioni. In prima battuta la frequenza di campionamento ed il numero di punti acquisiti fanno sì che il livello di confidenza sia tanto piccolo da coprire la quasi totalità dello spettro di potenza ottenuto. Se ci concentriamo invece sulla valutazione dei picchi, osserviamo che nel caso di maggiore sviluppo della cavitazione ( $\sigma_v = 0,2$ ) si osserva un massimo in corrispondenza di 1752 Hz. Nei casi con numero di cavitazione 0,4 e 0,6 si osserva un picco in corrispondenza di 48 Hz. La causa più probabile è che il rumore emesso dalla pompa, che lavora all'incirca a questa frequenza, sia più forte di quello prodotto dall'implosione delle bolle (Torredimare, 2018). Tuttavia, in entrambi i casi, si può notare la presenza di un massimo relativo nel range compreso tra 1000 e 2000 Hz; si potrebbe dunque affermare, con buona probabilità, che la minor quantità di fenomeni cavitazionali generati in queste configurazioni fa sì che il picco relativo alla cavitazione non sia un massimo assoluto dello spettro di potenza, ma risulti tuttavia osservabile un massimo locale nel medesimo range di frequenze del primo caso. Tale picco è minore nel caso con  $\sigma_v$  pari a 0,6, come atteso.

Come precedentemente accennato, durante gli esperimenti di controllo eseguiti senza reattore cavitazionale, si è deciso di eseguire delle registrazioni che potessero essere utili a depurare i segnali dal rumore di fondo. Tuttavia, risultati poco coerenti con quanto atteso hanno indotto ad eseguire delle nuove registrazioni utilizzando il seguente setup:

- 50 litri di acqua nel serbatoio in acciaio inox, per evitare che all'interno dell'impianto potessero introdursi sacche d'aria dall'esterno;
- pressione di valle valle imposta con la valvola a sfera pari a 0, 1, 2 bar, a seconda della configurazione studiata.

Le registrazioni sono state eseguite con la stessa procedura dei casi con reattore montato, utilizzando le medesime posizioni lungo il bancone. I tre spettri di potenza ottenuti sono i seguenti:



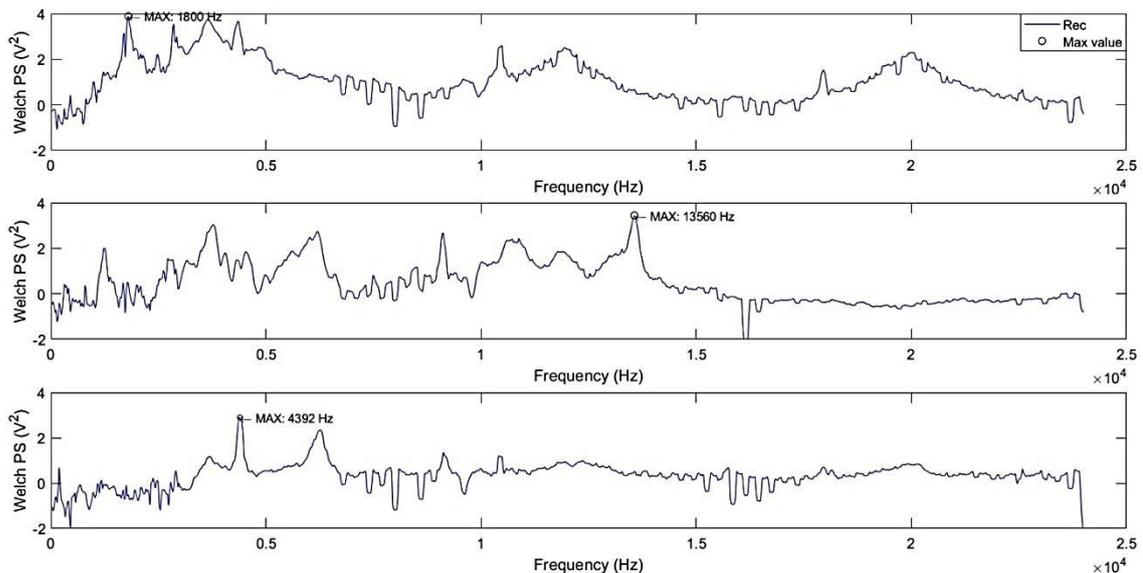
**Figura 8.26 – Spettri di potenza ottenuti imponendo come pressione di valle 0 bar (in alto), 1 bar (al centro) e 2 bar (in basso). La finestra di analisi utilizzata è di 2000 punti; le registrazioni hanno durata di 60 secondi. (Torredimare, 2018)**

Tutti e tre gli spettri di potenza presentano andamento analogo, con un picco localizzato a 48 Hz, circa la frequenza operativa della pompa. Altre eventuali discrepanze potrebbero essere legate a rumori ambientali non controllabili, legate alle attività svolte nei locali adiacenti. Per il caso con pressione di valle pari a 2 bar, non si riscontrano picchi levati alla cavitazione della valvola descritta nel Sottoparagrafo 8.4.1 a causa, probabilmente, della distanza tra punto di misura e punto di generazione del fenomeno.

Infine, si è proceduto a sottrarre il rumore di fondo agli spettri di potenza relativi agli esperimenti di disinfezione. La nuova funzione ottenuta, definita  $\Delta$ , viene ottenuta dalla formula:

$$\Delta = \log \frac{\text{Spettro di potenza}_{\text{esperimenti disinfezione}}}{\text{Spettro di potenza}_{\text{rumore di fondo}}} \quad (8.1)$$

I risultati ottenuti sono i seguenti:



**Figura 8.27 – Grafico della funzione delta per i casi con numero di cavitazione 0,2 (in alto), 0,4 (al centro), 0,6 (in basso). Le registrazioni utilizzate per la sottrazione sono tutte di 60 secondi e la finestra di analisi è di 2000 punti. (Torredimare, 2018)**

Tra i risultati attesi spicca l’abbattimento del picco legato alla pompa, in corrispondenza dei 48 Hz; rimangono tuttavia presenti alcuni rumori casuali per valori superiori ad  $1 \times 10^4$ . Per quanto riguarda i picchi legati al fenomeno di cavitazione, nel caso con  $\sigma_v$  pari a 0,2 si conferma la presenza di un massimo attorno ai 1800 Hz; nelle altre due considerazioni si distinguono dei massimi locali nel range compreso tra 1000 e 2000 Hz, mentre i rimanenti picchi risultano ad oggi non facilmente interpretabili.

Ulteriori considerazioni sono proposte nel capitolo 9, dedicato alle conclusioni.

### 8.6.3. Cavitazione della valvola a sfera

Come descritto nel capitolo dedicato alle procedure, sono stati predisposti alcuni esperimenti legati all’azione disinfettiva legata alla cavitazione generata nei pressi della valvola a sfera, nel caso di contropressione di valle pari a 2 bar (Sottoparagrafo 8.4.1).

Le registrazioni fonometriche ed il metodo di analisi sono stati i medesimi descritti nei paragrafi precedenti; tuttavia non è stato possibile individuare dagli spettri di potenza delle indicazioni significative. Nonostante il numero di cavitazione calcolato fosse pari a 0,15, non si notano picchi nel range di frequenze attese. Pertanto si rimanda ad un approfondimento dello studio del fenomeno, così come suggerito già nell’ambito delle analisi batteriche.

#### 8.6.4. Evoluzione del fenomeno di cavitazione lungo la condotta

Lungo il bancone su cui poggia l'impianto sono state predisposte differenti posizioni di registrazione, così come evidenziato in Figura 7.16, denominate secondo il codice "POS (numero)". Le differenti posizioni risultano delle semplici traslazioni rigide, spaziate tra di loro di 10 cm, a partire dal riferimento stabilito dalla POS1, individuata in maniera tale da direzionare il microfono del fonometro verso l'attacco tra condotta e flangia di valle del reattore cavitazionale.

Tutti i grafici precedentemente presentati fanno riferimento a registrazioni effettuate in questa posizione; la motivazione di tale scelta è duplice:

- il fenomeno cavitazionale è stato studiato nella posizione più prossima al luogo di origine;
- i rumori generati dall'implosione delle bolle sono risultati più nitidi in tale posizione.

Si è osservato, infatti, come i fenomeni (e, di conseguenza, i picchi) si attenuassero fortemente già in posizione POS2, per diventare comparabili al rumore di fondo nelle successive POS3 e POS4. Si può quindi affermare che la sezione migliore per lo studio dei fenomeni acustici è quella immediatamente a valle del reattore cavitazionale, in modo da individuare al meglio le implosioni delle cavità.

Ulteriori considerazioni a riguardo sono presentate nel prossimo capitolo.

## 9. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di Tesi ha cercato di investigare le capacità di disinfezione dell'impianto di cavitazione messo a punto da *Garofano (2016)* e *Ricucci (2017)*, apportando modifiche e migliorie alle componenti descritte nei Capitoli 6 e 7. Le potenzialità del metodo sono state confermate e numerosi sono stati i riscontri rispetto alla letteratura già esistente; restano tuttavia delle questioni aperte che necessitano di ulteriore approfondimento.

### 9.1. Evidenze riscontrate e risultati ottenuti

Gli esperimenti di disinfezione eseguiti hanno messo in evidenza alcuni aspetti fondamentali:

- ad un numero di cavitazione più basso corrisponde una capacità di distruzione microbica maggiore, mettendo in risalto le potenzialità già descritte da *Jyoti et Pandit (2001)*;
- esperimenti di 120 minuti, condotti con numero di cavitazione pari a 0,2 e 0,4, permettono di abbattere tra il 75 ed il 95% della carica batterica, per concentrazioni di MPN/100 mL nell'ordine di  $10^2$  e  $10^3$ ; esperimenti compresi tra 300 e 360 minuti hanno portato ad abbattimenti del 99% della carica batterica, nella configurazione con  $\sigma_v$  pari a 0,2, facendo risultare il metodo come una valida alternativa ai biocidi chimici (*Gogate e Kabadi, 2009; Mezule et al., 2009*);
- il mantenimento della temperatura dell'acqua trattata al di sotto dei 30°C ha permesso di escludere la dipendenza della disinfezione da tale parametro, così come affermato da *Mason et al. (2003)*; le variazioni di densità dell'acqua sono risultate tali da non creare variazioni sostanziali del numero di cavitazione né della vitalità dei batteri introdotti nell'impianto, che non è stata alterata;
- strozzature eccessive prodotte per raggiungere particolari valori di contropressione possono generare localmente fenomeni di cavitazione, che influiscono sui risultati delle analisi batteriche, come dimostrato per la configurazione con  $\sigma_v$  pari a 0,6;
- per  $\sigma_v$  pari a 0,2, le indagini fonometriche hanno evidenziato la presenza di un picco nello spettro di potenza compreso tra 1750 e 1800 Hz, in accordo con uno dei tre valori possibili proposti da *Cudina (2003)*.

## 9.2. Questioni aperte

Lo studio ha tuttavia lasciato aperti alcuni interrogativi che meritano di essere analizzati e sviluppati in futuro; a riguardo si propongono i seguenti spunti:

- una valutazione più approfondita dell'incidenza della strozzatura prodotta dalla valvola a sfera in particolari condizioni sperimentali;
- lo studio di nuove configurazioni di frequenza/pressione al fine di valutare l'influenza della velocità (e di conseguenza degli sforzi di taglio generati) sulla disinfezione microbica;
- la messa a punto di nuove piastre forate, per variare i parametri geometrici  $\alpha$  e  $\beta$ ;
- l'utilizzo di una serpentina, per l'impianto di raffreddamento, di materiale differente, al fine di poter valutare possibili implicazioni non emerse;
- l'installazione di un nuovo fonometro che possa superare i limiti dello strumento utilizzato, soprattutto riguardo alle registrazioni in particolari setup sperimentali o, eventualmente, la predisposizione di strumentistica differente (per es. accelerometri) per poter avere un ulteriore raffronto.

In definitiva, lo studio di Tesi ha evidenziato le ottime potenzialità della cavitazione idrodinamica come metodo innovativo per la disinfezione dell'acqua; una configurazione impiantistica relativamente economica ha permesso di ottenere risultati incoraggianti e di fornire ulteriori spunti di ricerca.

Resta da mettere in atto un'opportuna scalabilità, al fine di proporre un trattamento di volumi d'acqua maggiori, rimanendo comunque ad oggi una tecnologia che si pone come mezzo, se non completamente sostitutivo, comunque fortemente indicato per la riduzione dell'utilizzo di sostanze chimiche o di dispendiose tecnologie fisiche tradizionali.

## BIBLIOGRAFIA

- Albanese L.; Ciriminna, R.; Meneguzzo, F.; Pagliaro, M. (2015). Energy efficient inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* via controlled hydrodynamic cavitation. *Energy Sci Eng*, 3: 221-238.
- Ambulgekar, G. V.; Samant, S. D.; Pandit, A. B. (2005). Oxidation of alkylarenes using aqueous potassium permanganate under cavitation: comparison of acoustic and hydrodynamic techniques. *Ultrason Sonochem*, 12: 85-90.
- Arrojo, S.; Benito, Y.; Martínez Tarifa, A. (2008). A parametrical study of disinfection with hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15: 903-908
- Arrojo, S.; Benito, Y. (2008). A theoretical study of hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15: 203-211
- Badve, M. P.; Bhagat, M. N.; Pandit, A. B. (2015). Microbial disinfection of seawater using hydrodynamic cavitation. *Separation and purification technology*, 151: 31-38
- Bagal, M. V.; Gogate, P. R. (2014). Wastewater treatment using hybrid treatment schemes based on cavitation and Fenton chemistry: a review. *Ultrason Sonochem*, 21: 1-14.
- Baker, M. N. (1948). *The Quest for Pure Water*. American Water Works Association
- Balasundaram, B.; Harrison, S. T. L. (2011). Optimising orifice geometry for selective release of periplasmic products during cell disruption by hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering Journal*, 54: 207-209
- Balasundaram, B.; Harrison, S. T. L. (2006). Study of physical and biological factors involved in the disruption of *E. coli* by hydrodynamic cavitation. *Biotechnol. Prog.*, 22: 907-913
- Bartosch, S.; Mansch, R.; Knotzsch, K.; Bock, E. (2003). CTC staining and counting of actively respiring bacteria in natural stone using confocal laser scanning microscopy. *J. Microbiol. Methods*, 52: 75-84.
- Brennen, C. E. (2005). *Fundamentals of Multiphase Flows*. Cambridge University Press.
- Carpenter, J.; Badve M.; Rajoriya S. G.; Saharan, V.K.; Pandit, A.B. (2017). Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Reviews in Chemical Engineering*, 35: 433-468
- Cataldo F. (2000). Ultrasound-induced cracking and pyrolysis of some aromatic and naphthenic hydrocarbons. *Ultrason Sonochem*, 7: 35-43.

Chakinala, A. G.; Bremner, D. H.; Gogate, P. R.; Namkung, K. C.; Burgess, A. E. (2008). Multivariate analysis of phenol mineralization by combined hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing. *Appl Catal B Environ*, 78: 11-18.

Crudo, D.; Bosco, V.; Cavaglia, G.; Mantegna, S.; Battaglia, L.; Cravotto, G. (2014). Process intensification in food industry: hydrodynamic and acoustic cavitation for fresh milk treatment. *Agro Food Industry Hi Tech*, 25: 1-8

Cudina, M. (2003). Detection of cavitation phenomenon in a centrifugal pump using audible sound. *Mechanical Systems and Signal Processing* 17.6: 1335-1347.

Dalfré Filho, J. G.; Pereira Assis, M.; Borri Genovez, A. I. (2015). Bacterial inactivation in artificially and naturally contaminated water using a cavitating jet apparatus. *Journal of hydro-environment research*, 9: 259-267

Dalfré Filho, J.G.; Genovez, A. I. B.; Silva, L. V. C. (2006). Evaluating Damage of Concrete Hydraulic Structures Caused by Cavitation. *Recent developments on hydraulic structures*. Sociedad Venezolana de Ingeniería, Caracas: 297-306, 723

Doulah, M. S.; Hammond, T. H.; Brookman, J. S. G., (1975). A hydrodynamic mechanism for the disintegration of *Saccharomyces Cerevisiae* in an industrial homogenizer. *Biotechnology e Bioengineering*, 845-858

Dular, M.; Delgosha, O. C. (2013). Thermodynamic effects during growth and collapse of a single cavitation bubble. *Journal Fluid Mechanics*, 736: 44-66

Garofano, M. (2016). *Metodi innovativi per la disinfezione dell'acqua: utilizzo della cavitazione idrodinamica*. Politecnico di Torino

Gogate, P. R.; Kabadi, A. M. (2009). A review of applications of cavitation in biochemical engineering/biotechnology. *Biochemical Engineering Journal*, 44: 60-72

Gogate, P. R.; Patil, P. N. (2015). Combined treatment technology based on synergism between hydrodynamic cavitation and advanced oxidation processes. *Ultrason Sonochem*, 25: 60-69.

Goss, W.A.; Deitz, W.H.; Cook, T.M. (1964). Mechanism of action of nalidixic acid on *Escherichia coli*. *J. Bacteriol.*,88(4): 1112-1118.

Gutierrez, J. M.; Gonzalez, C.; Maestro, A; Sole, I.; Pey, C. M.; Nolla, J. (2018). Nano-emulsions: new applications and optimization of their preparation. *Curr Opin Colloid Interface Sci*, 13: 245-251

Harrison, S., & Pandit, A. (1992). The disruption of microbial cells by hydrodynamic cavitation. *International Biotechnology Symposium, Washington*.

Heinemann, H.; Spelght, J. G. (2006) The chemistry and technology of petroleum, 4th ed., USA: Taylor and Francis Group LLC

Henglein, A. (1995). Chemical effects of continuous and pulsed ultrasound in aqueous solutions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2: S115-S121

Jyoti, K. K.; Pandit, A.B. (2001) Water disinfection by acoustic and Hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering Journal*, 2: 201-212

Jyoti, K. K.; Pandit, A.B. (2012). Drinking water disinfection techniques. Taylor & Francis Inc, 128-164

Jyoti, K. K.; Pandit, A.B. (2012). Clean water for developing countries. Annual review of chemical and biomolecular engineering, 217-246

Kell, D.B.; Kaprelyants, A.S.; Weichart, D.H.; Harwood, C.R.; Barer, M.R. (1998) Viability and activity in readily culturable bacteria: a review and discussion of the practical issues, *Antonie van Leeuwenhoek*, 73: 169–187.

Koval I., L. S. (2011). Ultrasonic intensification of the natural water and sewage disinfection. *Chemical engineering transaction*, 1315-1319.

Lee, I.; Han, J. (2015). Simultaneous treatment (cell disruption and lipid extraction) of wet microalgae using hydrodynamic cavitation for enhancing the lipid yield. *Bioresour. Technol*, 186: 246-251

Lisle, T.J.; B.H. Pyle, B.H.; McFeters, G.A. (1999). The use of multiple indices of physiological activity to access viability in chlorine disinfected *Escherichia coli* O157:H7. *Lett. Appl. Microbiol.*, 29: 42-47

Maddikeri, G. L.; Gogate, P. R.; Pandit, A. B. (2014). Intensified synthesis of biodiesel using hydrodynamic cavitation reactors based on the interesterification of waste cooking oil. *Fuel*, 237: 285-292.

Mahulkar, A.; Pandit, A. B. (2010). Ed. Analysis of hydrodynamic and acoustic cavitation reactors. Saarbrucken, Germany: VDM publishing

Malavasi Stefano (2014). On cavitation occurrence in perforated plates. *Flow Measurement and Instrumentation* 41, 129–139.

Mezule, L.; Tsyfansky, S.; Yakushevich, V.; Juhna, T. (2009). A simple technique for water disinfection with hydrodynamic cavitation: Effect on survival of *Escherichia coli*. *Desalination*, 248: 152-159

Milly, P. J.; Toledo, R. T.; Kerr, W. L.; Armstead, D. (2008). Hydrodynamic cavitation: characterization of a novel design with energy considerations for the inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in apple juice. *J Food Sci*, 73: M298-M303.

- Oliver, J.D. (2005). The viable but nonculturable state in bacteria. *J. Microbiol.*, 43(S): 93–100.
- Oppel, T., 1994, “CAV-OX – Cavitation oxidation process”, 63-71
- Pandit, A. B.; Joshi, J. B. (1993). Hydrolysis of fatty oils: effect of cavitation. *Chem Eng Sci*, 48: 3440–3442.
- Pinjari, D. V.; Pandit, A. B. (2010). Cavitation milling of natural cellulose to nanofibrils. *Ultrason Sonochem*, 17: 845–852.
- Prajapat, A. L.; Gogate, P.R. (2015). Intensification of depolymerization of aqueous guar gum using hydrodynamic cavitation. *Chem Eng Process Process Intensification*, 93: 1–9.
- Prüss-Üstün, A.; Bos, R.; Gore, F.; Bartram, J. (2008). *Safer Water, Better Health: Costs, Benefits and Sustainability of Interventions to Protect and Promote Health*. World Health Organization, Geneva.
- Ramisetty, K. A.; Pandit, A. B.; Gogate, P. R. (2014). A novel approach of producing oil in water emulsion using hydrodynamic cavitation reactor. *Ind Eng Chem Res*, 53: 16508–16515
- Ricucci, F (2017). *Cavitazione idrodinamica come metodo innovativo per la disinfezione delle acque*. Politecnico di Torino
- Rodriguez, G.G.; Hipps, D.; Ishiguro, K.; Ridgway, H.F. (1992). Use of a fluorescent redox probe for direct visualization of actively respiring bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.*, 58(11): 1801–1808.
- Saharan, V. K.; Pandit, A. B.; Satish Kumar, P. S.; Anandan, S. (2012). Hydrodynamic cavitation as an advanced oxidation technique for the degradation of acid red 88 dye. *Ind Eng Chem Res*, 51: 1981–1989
- Sainte Beuve, R.; Morison, K. R. (2010). Enzymatic hydrolysis of canola oil with hydrodynamic cavitation. *Chem Eng Process Process Intensification*, 49: 1101–1106.
- Šarc, A.; Stepišnik-Perdih, T.; Petkovšek, M.; Dular, M. (2017). The issue of cavitation number value in studies of water treatment by hydrodynamic cavitation. *Ultrasonics sonochemistry*, 34: 51–59
- Save, S. S.; Pandit, A. B.; Joshi, J. B. (1994). Microbial cell disruption: role of cavitation. *The chemical engineering journal*, 55: B67–B72
- Save, S. S.; Pandit, A. B.; Joshi, J. B. (1997). Use of hydrodynamic cavitation for large scale cell disruption. *Cem. Eng. Res. Des.*, 75: 41–49

- Sawant, S. S.; Anil, A. C.; Krishnamurthy, V.; Gaonkar, C.; Kolwalkar, J.; Khandeparker, L.; Desai, D.; Mahulkar, A. V.; Ranade, V. V.; Pandit, A. B. (2008). Effect of hydrodynamic cavitation on zooplankton: A tool for disinfection. *Biochemical engineering journal*, 42: 320-328
- Schaule, G.; Flemming, H.; Ridgway, H. (1993). Use of 5-cyano-2,3-ditoly tetrazolium chloride for quantifying planktonic and sessile respiring bacteria in drinking water. *Appl. Environ. Microbiol.*, 59(11): 3850–3857.
- Scherba, G.; Weigel, R.M.; O'Brien Jr., W.D. (1991). Quantitative assessment of the germicidal efficacy of ultrasonic energy, *Appl. Environ. Microbiol.*, 57(7): 2079–2084.
- Senthilkumar, P.; Sivakumar, M.; Pandit, A. B. (2000). Experimental quantification of chemical effects of hydrodynamic cavitation. *Chem Eng Sci*, 55: 1633-1639
- Sharma, S. D.; Mani, K.; Arakeri, V. H. (1990). Cavitation noise studies on marine propellers. *Journal of Sound and Vibration*, 138: 255-283
- Sivakumar, M.; Tang, S. Y.; Tan, K.W. (2014). Cavitation technology - a greener processing technique for the generation of pharmaceutical nanoemulsion. *Ultrason Sonochem*, 21: 2069-2083.
- Testud, P.; Moussou, P.; Hirschberg, A.; Aurégan, Y. (2007). Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe. *Journal of fluids and structures*, 23: 163-189
- Torredimare M. (2018). Hydrodynamic cavitation and measurement of bubbles implosion. Politecnico di Torino
- Tullis, J. P. (1989) *Hydraulics of Pipelines: Pumps, Valves, Cavitation, Transients*, first ed. John Wiley & Sons, New York.
- UNAIDS (2016). *Global AIDS update 2016*
- United Nations (2017). *The United Nations world water development report 4*
- Wang, Y.; Jia, A.; Wu, Y.; Wu, C.; Chen, L. (2015). Disinfection of bore well water with chlorine dioxide/sodium hypochlorite and hydrodynamic cavitation. *Environmental Technology*, 36 (4): 479-486
- World Health Organization (1996). *WHO Seminar Pack for Drinking-water Quality-disinfection*.
- World Health Organization (2005). *Enterohaemorrhagic Escherichia coli (EHEC)*
- World Health Organization (2014). *Global Health Observatory (GHO): Water, Sanitation and Hygiene*

Wu, Z.; Shen, H.; Ondruschka, B.; Zhang, Y.; Wang, W.; Bremner, D. H. (2012). Removal of blue-green algae using the hybrid method of hydrodynamic cavitation and ozonation. *Journal of Hazardous materials*, 235-236: 152-158



