# POLITECNICO DI TORINO

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



Tesi di Laurea Magistrale

# Caratterizzazione fluidodinamica di dispositivi idraulici cavitanti

Relatore:

Prof. Costantino MANES

Correlatore:

Dr. Giuseppe Carlo Alp CARIDI

Candidato:

Gianluca Arcaro

30 Marzo 2020

## Sommario

La crescente domanda di acqua potabile sfida sempre più le capacità dell'uomo di soddisfare il proprio fabbisogno idrico. La disinfezione ricopre un ruolo primario tra le soluzioni a questo problema. Globalmente, il trattamento con agenti chimici, risulta essere il principale metodo di decontaminazione. Questa tipologia di trattamento, seppur efficiente, causa la generazione di sottoprodotti dovuti all'ossidazione chimica. Negli ultimi anni sono stati sviluppati nuovi trattamenti di tipo fisico. Si è posta attenzione su dispositivi cavitativi in quanto l'efficacia della cavitazione idrodinamica nella disinfezione è comprovata da una molteplicità di esperimenti, ma gli studi fluidodinamici del campo di moto sono ancora pochi per comprendere i fenomeni coinvolti in questi reattori.

Il presente lavoro di tesi ha come finalità l'analisi fluidodinamica di due dispostivi industriali progettati dall'azienda Treelium che ha collaborato in questo progetto. I due dispositivi, indicati come modello OM e PW, caratterizzati da due differenti geometrie, sono stati sviluppati con lo scopo di eliminare la carica batterica negli impianti urbani (P = 2-4 bar). A tal fine, si è effettuata una caratterizzazione idraulica di questi reattori: attraverso il circuito idraulico del laboratorio nel Politecnico di Torino, si sono analizzati i regimi di flusso acquisendo valori di portata in funzioni di pressioni crescenti in ingresso. Si sono ricavati i parametri  $Re \in \sigma$  riscontrando regimi di flusso turbolento. Si è valutata l'efficienza di disinfezione attraverso dei test microbiologici con l'utilizzo di E. coli. I test si sono effettuati sullo stesso circuito idraulico, utilizzando pressioni urbane (P = 3bar); i campioni sono stati analizzati dal laboratorio Alchim utilizzando il metodo APAT CNR 7030C. Infine, si è analizzato il campo di moto medio dei due dispositivi attraverso simulazioni numeriche. Dato l'alto valore del numero di Reynolds è stato utilizzato un modello turbolento, in particolare il modello k-epsilon. I risultati permettono di confrontare i due dispositivi e analizzare l'effetto che la diversa geometria ha sul campo di moto e di pressione. Si sono inoltre determinate le caratteristiche turbolente e la presenza di cavitazione all'interno dei dispositivi. I risultati dimostrano che la geometria influenzi fortemente l'idrodinamica del dispositivo e l'abbattimento batteriologico. In particolare, il confronto dei due reattori mostra che la disinfezione è maggiore nel dispositivo PW caratterizzato da valori di Re maggiori rispetto al OM. Inoltre, nel modello PW si creano zone ove avviene localmente cavitazione idrodinamica e presenta valori più elevati di dissipazione turbolenta. Queste condizioni determinano l'abbattimento della carica batterica. L'analisi fluidodinamica risulta essere uno studio preliminare di fondamentale importanza; ha permesso di comprendere meglio i fenomeni fisici coinvolti all'interno dei reattori per il trattamento dell'acqua dove sia la cavitazione che la turbolenza giocano un ruolo fondamentale.

## Abstract

The growing demand for drinking water increasingly challenges man's ability to meet his own water needs. Disinfection plays a primary role among the solutions to this problem. Globally, treatment with chemical agents turns out to be the main method of decontamination. This type of treatment, albeit efficient, causes the generation of by-products due to chemical oxidation. In recent years, new physical treatments have been developed. Attention has been paid to cavitative devices as the effectiveness of hydrodynamic cavitation in disinfection is proven by a multiplicity of experiments, but the fluid dynamic studies of the motion field are still few to understand the phenomena involved in these reactors. This thesis work aims at the fluid dynamic analysis of two industrial devices designed by the Treelium company that collaborated on this project. The two devices, indicated as model OM and PW, characterized by two different geometries, have been developed with the aim of eliminating the bacterial load in urban systems (P = 2-4 bar). To this end, a hydraulic characterization of these reactors was carried out: through the hydraulic circuit of the laboratory in the Politecnico di Torino, the flow regimes were analyzed acquiring flow values in function of increasing inlet pressures. The parameters Re and  $\sigma$  were obtained. The disinfection efficiency was assessed through microbiological tests with the use of E. coli. The tests were carried out on the same hydraulic circuit, using urban pressures (P = 3 bar); the samples were analyzed by the Alchim laboratory using the APAT CNR 7030C method. Finally, the mean motion field of the two devices was analyzed through numerical simulations. Given the high value of the Reynolds number, a turbulent model was used, in particular the k-epsilon model. The results allow to compare the two devices and analyze the effect that the different geometry has on the motion and pressure field. The turbulent characteristics and the presence of cavitation inside the devices were also determined. The results show that geometry strongly influences the hydrodynamics of the device and bacteriological abatement. In particular, the comparison of the two reactors shows that disinfection is greater in the PW device characterized by higher Re values than in the OM. Furthermore, in the PW model areas are created where hydrodynamic cavitation occurs locally and while higher values of turbulent dissipation occur. These conditions determine the reduction of the bacterial load. Fluid dynamics analysis turns out to be a preliminary study of fundamental importance; has allowed us to better understand the physical phenomena involved inside the water treatment reactors where both cavitation and turbulence play a fundamental role.

## Indice

1	Intr	roduzio	one	3	
<b>2</b>	Ger	neralită	à sulla disinfezione dell'acqua	5	
	2.1	Panor	amica acqua potabile	5	
	2.2	Agent	i patogeni presenti nell'acqua e malattie trasmissibili	7	
	2.3	Metodi di disinfezione		9	
		2.3.1	Trattamenti di tipo chimico	10	
		2.3.2	Trattamenti di tipo fisico	12	
3	La cavitazione idrodinamica				
	3.1 Dinamica di formazione della cavitazione			15	
	3.2	3.2 Tipologie di cavitazione idrodinamica		19	
	3.3	Nume	ro di cavitazione	20	
	3.4	Effetti	indotti dalla cavitazione idrodinamica	23	
	3.5	La cav	vitazione idrodinamica nella disinfezione	24	
4	Fluidodinamica Computazionale 2				
	4.1	Formu	lazione differenziale del campo di moto	29	
		4.1.1	RANS- equazioni di N-S mediate	31	
	4.2	Risoluzione della turbolenza		34	
	4.3	Model	li di chiusura	35	
		4.3.1	Modello $k$ - $\epsilon$	38	
		4.3.2	Modellazione di parete	40	
<b>5</b>	Dispositivo idraulico e impianto sperimentale				
	5.1 Dispositivo idraulico				
		5.1.1	Modello OM	41	
		5.1.2	Modello PW	42	
		5.1.3	Caratterizzazione idraulica	43	

	5.2	2 Apparato sperimentale					
		5.2.1	Principio di funzionamento	48			
	5.3	Proce	dura sperimentale test microbiologici	49			
6	Sim	ulazio	ni fluidodinamiche	51			
	6.1	Defini	zione dominio fluido	51			
		6.1.1	Generazione Geometria	51			
		6.1.2	Discretizzazione Dominio	53			
	6.2	g	59				
		6.2.1	Modello turbolento	60			
		6.2.2	Condizioni al contorno	61			
		6.2.3	Metodi di risoluzione	62			
		6.2.4	Convergenza	63			
7 Analisi dei risultati				65			
	7.1	<ul><li>7.1 Risultati delle analisi microbiologiche</li></ul>		65			
	7.2			69			
		7.2.1	Campo di moto	70			
		7.2.2	Campo di pressione	73			
		7.2.3	Turbolenza	76			
8	Cor	nclusio	ni e sviluppi futuri	79			
$\mathbf{R}^{\mathrm{i}}$	Riferimenti bibliografici						

### 1 Introduzione

L'approvvigionamento di acqua potabile, universalmente riconosciuto quale diritto fondamentale alla vita, risulta nel mondo disomogeneo, dipendente dal grado di sviluppo socio-economico di un paese. Infatti, oggi giorno, l'accesso a tale risorsa appare scontato nelle zone del mondo dove le tecnologie evolute ne permettono un costante approvvigionamento. Diversamente accade in altre aree, dove l'impossibilità di accedervi risulta essere ancora una delle maggiori cause di morte. Le principali problematiche che affliggono le aree sottosviluppate sono da ricercarsi nell'inadeguatezza delle reti idriche e nella mancanza di servizi igienico-sanitari, nonché nella totale assenza di sistemi di depurazione delle acque. Considerata inoltre l'insostituibilità di questo bene che al contempo è svantaggioso trasportare e l'imminenza di una crisi idrica dettata dall'aumento demografico, gli sforzi ingegneristici nell'ambito ambientale sono spinti verso l'obiettivo di sviluppare nuove tecnologie al fine di garantire la diversificazione dei processi e incrementare la qualità e la quantità dell'acqua disponibile.

Le soluzioni per ottenere un'efficiente disinfezione, ad oggi, sono molteplici e da ricondursi principalmente a due maccanismi di azione: processi di tipo chimico e processi di tipo fisico. Come descritto nel capitolo 2, i primi indubbiamente risultano essere i trattamenti maggiormente utilizzati per semplicità di dosaggio, efficienza di trattamento e costo. Per contro, negli ultimi anni, i trattamenti fisico-meccanici svolgo un ruolo importante, in quanto permettono di ottenere, a parità di efficienza di rimozione, una qualità dell'acqua maggiore poiché non sviluppano sottoprodotti di disinfezione generati dall'utilizzo di agenti chimici. I dispositivi cavitativi sono parte integrante di questi nuovi sistemi di disinfezione, ma vista la complessità dei fenomeni coinvolti in essi, non possono considerarsi attualmente una tecnologia comprovata e di largo utilizzo nella disinfezione. Nonostante la cavitazione e la turbolenza siano fenomeni largamente diffusi e studiati, l'utilizzo di questi, nell'ambito della disinfezione, è un argomento innovativo e di interesse, che merita approfondimento vista la mancanza di studi sia sperimentali che numerici.

A tal proposito, il presente lavoro di tesi, si pone l'obiettivo di presentare ed analizzare le caratteristiche fluidodinamiche, i campi di moto e di pressione di due dispostivi idraulici progettati dall'azienda *Treelium*, al fine di sviluppare un prodotto che potrebbe avere comprovata efficienza di rimozione batterica e garantire una migliore qualità all'acqua trattata. Nello specifico, l'analisi prevede un confronto tra due modelli, descritti al capitolo 5, che presentano caratteristiche geometriche differenti, al fine di indagare il ruolo che queste svolgono nell'efficienza del dispositivo. L'analisi è applicata a dispositivi reali e brevettati ed aiuterà l'azienda a comprendere i processi coinvolti e ad ottimizzarne le prestazioni. I dati fluidodinamici sono implementati da test microbiologici: il confronto tra i due dispositivi, viene effettuato in termini di abbattimento batteriologico e dal punto di vista fluidodinamico con l'analisi del campo di moto, al fine di distinguere i processi chiave della disinfezione di questa particolare categoria di reattori.

La metodologia di studio prevede la caratterizzazione idraulica dei dispositivi: si analizzano le portate e le pressioni associate al dispositivo, al fine di definire i diversi regimi di flusso in termini di  $Re \ e \ \sigma_c$  (capitolo 5), per individuare i potenziali fenomeni coinvolti. Vengono effettuati degli esperimenti batteriologici, per valutare l'efficienza di rimozione batterica dei due dispostivi in regimi di pressioni domestiche, per garantire l'applicabilità del sistema in ambito urbano. Si è scelto di affiancare a questi dati l'utilizzo della fluidodinamica computazionale (capitolo 6 e 7) poiché permette di ottenere valori locali di pressione, caratteristiche turbolente e campo di moto (in termini di velocità). Questo è reso necessario a causa della complessità del flusso, dettato da alti valori di Reynolds e dalla struttura vorticosa che questo assume all'interno del dispositivo, ove non vi è possibilità di effettuare ulteriori misurazioni delle caratteristiche fluidodinamiche per impossibilità di accesso ottico o fisico. Le simulazioni utilizzate adattano il modello  $k - \epsilon$ , come descritto al capitolo 6, in grado di rappresentare le grandezze fluidodinamiche di interesse.

## 2 Generalità sulla disinfezione dell'acqua

Il presente capitolo illustra la situazione a livello globale per quanto concerne l'acqua potabile: innanzitutto si contestualizza ogni continente in riferimento alle possibilità di approvvigionamento e di accesso a strutture igienico-sanitarie, successivamente si evidenziano le problematiche legate alla mancanza di tali servizi e alla diffusione e trasmissione di malattie aventi l'acqua come tramite. Si descrivono inoltre i progressi ottenuti nella disinfezione e i principali metodi sviluppati al fine di mitigare uno dei più grandi problemi di mortalità nel mondo.

#### 2.1 Panoramica acqua potabile

La disinfezione dell'acqua su larga scala è un processo che ha determinato una drastica riduzione del numero di casi epidemici veicolati da acque insalubri ma, sebbene questo processo si sia sviluppato parallelamente alla scoperta e allo studio dei batteri, dunque da alcuni secoli, solo dal XX secolo si è assistito a una vasta diffusione degli impianti di potabilizzazione con i conseguenti risultati attesi. Ancora oggi, infatti, almeno due miliardi di persone nel mondo utilizzano fonti di acqua potabile contaminate (figura 2.1) e ogni anno si stimano 500000 decessi per dissenteria (figura 2.2) o comunque associati alla contaminazione di approvvigionamenti idrici[24]. Nel 2015 i servizi igienico-sanitari non erano ancora accessibili per 2,3 miliardi di individui e l'utilizzo di tali servizi, opportunamente collegati a un sistema fognario per il corretto smaltimento di acque con ricco carico organico, era possibile solo per il 39% della popolazione[25].

Inoltre, esistono delle stime che rivelano come dal 2025 circa metà della popolazione mondiale sarà concentrata in aree con carenza di acqua pulita [24], in relazione alla forte crescita della domanda anche nei paesi più sviluppati. In questo contesto sempre nuovi e diversi metodi di disinfezione si sviluppano al fine di tamponare un problema che sembra pretendere una diversificazione delle tecnologie per il trattamento delle acque.



Figura 2.1: Percentuale della popolazione che ha accesso a sistemi di potabilizzazione per l'acqua [26]



**Figura 2.2:** Tasso di mortalità dovuto a scarsa qualità dell'acqua e alla manca di servizi igienicosanitari [26]

## 2.2 Agenti patogeni presenti nell'acqua e malattie trasmissibili

La disinfezione si ritiene necessaria per impedire che microorganismi potenzialmente dannosi possano venire a contatto con l'uomo. Infatti, se la depurazione permette all'acqua di diminuire il carico organico al fine di poter essere reimmessa in un sistema idrico come il fiume, la disinfezione è necessaria per renderla potabile, ovvero eliminare qualsiasi potenziale pericolo per la salute umana. In merito a questo, è attestato che la contaminazione fecale dell'acqua e la conseguente ingestione risulta essere la principale modalità di trasmissione delle malattie diarroiche[25] e la seconda causa di morte nei paesi in via di sviluppo. Infatti, l'Escherichia coli, batterio fecale, si utilizza come marcatore per la determinazione del grado di contaminazione delle acque e, a tal proposito, questa trattazione fa uso di tale indicatore per la misura dell'efficienza di rimozione dei dispositivi oggetto di indagine (capitolo 5 e 7).

Più in generale, tra i principali agenti patogeni si possono distinguere virus, protozoi parassita e principalmente batteri. La maggior parte di questi è universalmente diffusa nel mondo, altri sono specifici di determinate regioni poiché la proliferazione può essere funzione di agenti esterni. Si riassumono di seguito le principali caratteristiche:

• Batteri: spesso di origini fecale, sono i patogeni che maggiormente si riscontrano nelle acque contaminate. Di dimensione variabile, hanno una lunghezza tra 0.4 e 14  $\mu m$  ed una larghezza che non supera i 12  $\mu m$ . Non tutti i batteri risultano dannosi, tuttavia alcuni sono causa di patologie gastrointestinali come il colera o la febbre tifoide. Siccome questa trattazione prevede l'utilizzo dell'Escherichia Coli se riportano le principali caratteristiche: è un batterio a forma di bastoncello di dimensioni medie 1x3  $\mu m$ , ciliato, gram-negativo, normalmente presente nel tubo digerente dell'uomo e degli animali, diffuso anche nell'ambiente e negli alimenti.



Figura 2.3: Colonie di Escherichia Coli viste al microscopio ottico

- Virus: organismo acellulare di dimensioni molto ridotte (0.02-0.09 μm) che si replica all'interno di cellule di altri organismi. La contaminazione può avvenire o per contatto diretto con acqua infetta o per diffusione del virus attraverso le secrezioni di altri soggetti che lo hanno contratto;
- Protozoi parassita: Organismi unicellulari, considerati una delle maggiori cause di contaminazione. Hanno una dimensione cellulare che supera i 2μm, quindi anche i normali trattamenti di filtrazione sono in grado di eliminare tali organismi. La formazione di uova e oocisti, viste le ridotte dimensioni, sono esenti da questa tipologia di trattamento, quindi la completa rimozione di questo parassita risulta complesso.

Tabella 2.1: Age	enti patogeni	e principali	malattie ch	ne veicolano
------------------	---------------	--------------	-------------	--------------

Organismo	Patogeno	Malattia	
	Vibrio cholerae	Colera	
	Vibrio parahaemolyticus	Gastroenteriti causate da vibrioni	
Batteri	Salmonella enterica	Febbre tifoide e altre salmonellos gravi	
	Shigella	Dissenteria bacillare o shighellosi	
	Escherichia coli	Diarree acute e gastroenteriti	
	Adenovirus	Gastroenterite, polmonite, congiunti-	
Organismo Batteri Virus Protozoi Elminti		vite	
	Enterovirus	Gastroenterite, poliomielite, menin- goencefalite, miocardite	
	HAV	Epatite A	
	HEV	Epatite E	
Destant	Cryptosporidium	Criptosporidiosi	
Protozoi	Giardia intestinalis	Giardiasi	
Florinti	Dracunculus medinensis	Dracunculiasi	
Elminti	Fasciola hepatica, F. gigantica	Gastroenteriti, itterizia, calcolosi bilia	
		re	

#### 2.3 Metodi di disinfezione

La disinfezione consiste nella disattivazione o uccisione degli agenti presenti nell'acqua, ovvero rendere questi inattivi, incapaci di agire o di produrre un effetto sull'organismo. (Bisogna ricordare che il processo di disinfezione è volto alla riduzione di carica batterica sino a valori così bassi per cui la probabilità di assumere una dose infettante assieme all'acqua è circa zero).

Per garantire l'approvvigionamento di acqua potabile molto spesso si attuano misure volte a prevenire il contatto di quest'ultima con agenti patogeni ma, quando questo non è possibile, la disinfezione risulta fondamentale per limitare la diffusione di malattie. Per stabilire quanto e in che modo disinfettare l'acqua, al fine di far rientrare i parametri di contaminazione biologica nei valori prestabiliti dalla legge, occorre conoscerne la quantità e la tipologia di contaminazione. In generale, un parametro discriminante sulla scelta del trattamento da utilizzare è il potere di copertura di un disinfettante, ovvero, per quanto tempo il processo di disinfezione è in grado di assicurare l'azione battericida. Per questo motivo ad oggi nel mondo i disinfettanti chimici risultano essere quelli maggiormente impiegati se si tratta di garantire la potabilità dell'acqua in quanto sono in grado di assicurare la disinfezione anche a chilometri di distanza dal punto di dosaggio. Nonostante la loro efficienza, richiedono l'uso e la disponibilità in loco di sostanze chimiche. Inoltre, come verrà descritto in seguito, le reazioni chimiche possono produrre effetti indesiderati.

Per contro, sono stati sviluppati altri metodi per la disinfezione dell'acqua, di natura fisica e con diversi vantaggi soprattutto per quanto riguarda la qualità finale dell'acqua trattata. Utilizzare una tecnologia o l'altra dipende quindi essenzialmente dal rischio che l'acqua possa contaminarsi nuovamente: quando il consumo avviene in prossimità del trattamento oppure nei casi in cui le condotte sono igienicamente sicure, allora il metodo fisico può essere impiegato tranquillamente; in tutti gli altri casi è preferibile intervenire con un disinfettante di copertura. È opportuno tener presente che molto spesso è preferibile combinare diverse tipologie di trattamento per migliorare l'efficienza di rimozione. Negli anni lo sviluppo di sistemi di disinfezione sempre più diversificati è stato incentivato dalla necessità di implementare questi sistemi anche dove l'accesso all'energia elettrica, ai supporti tecnologici e la possibilità di reperire composti disinfettanti sono scarsi. Infatti, proprio in questi contesti si fa ricorso a dei sistemi fisici di disinfezione che permettono di ottenere una buona efficienza di rimozione, evitando la generazione di sottoprodotti dovuti all'azione degli agenti chimici più comuni.

Di seguito si passano in rassegna i principali trattamenti utilizzati nella disinfezione. È noto che nel definire i differenti metodi si possano effettuare diversi tipi di classificazione, ma nella presente trattazione si è deciso di limitarsi a distinguere i metodi di disinfezione in funzione del principio d'azione che porta all'abbattimento di carica microbica: i trattamenti di tipo chimico e i trattamenti di tipo fisico. Esistono inoltre altri trattamenti, che possono essere definiti ibridi in quanto sono il risultato della somma di più processi di base: la combinazione di azioni fisico-chimiche consente di aumentare l'efficienza di disinfezione, ridurre i tempi di contatto e migliorare la qualità dell'acqua e pertanto spesso si preferisce per ottenere i risultati attesi.

#### 2.3.1 Trattamenti di tipo chimico

I trattamenti chimici sono la tecnica principale utilizzata per la disinfezione dell'acqua. Diverse sostanze hanno una buona capacità disinfettante e l'utilizzo di alcune piuttosto che altre è da attribuirsi alla disponibilità e alla capacità di approvvigionamento che una determinata regione possiede. La semplicità di processo e il potere di copertura che questa tipologia di trattamento comporta ne hanno determinato un utilizzo massiccio.

Si descrivono di seguito i trattamenti maggiormente utilizzati e si mostrano i sottoprodotti della disinfezione:

• Clorazione: è ampiamente il trattamento di disinfezione maggiormente utilizzato nel mondo. Risulta poco costoso perché, più che un trattamento, è un dosaggio con le dovute proporzioni rispetto al volume di acqua da trattare. Il cloro che può somministrarsi in forma gassosa, come cloroammine o ipoclorito di sodio, va a ossidare gli agenti patogeni rompendo i legami chimici delle loro molecole. Questo trattamento prevede alta persistenza, per contro genera odore e sapore all'interno dell'acqua riducendone così la qualità. Inoltre, provoca la formazione di sottoprodotti (*DBP's, disinfection by-products*), noti per essere nocivi per l'uomo se le concertazioni ingerite risultano elevate.Infatti, la formazione di *DBP* sono anche motivo per promuovere tecniche ibride e la diversificazione di quest'ultime rispetto al solo utilizzo dei normali trattamenti chimici;

• Ozonazione: trattamento molto utilizzato soprattutto negli ultimi anni. L'ozono, gas instabile derivante dalla fotolisi dell'ossigeno molecolare, è un forte ossidante capace di distruggere le pareti cellulari di batteri e virus. Risulta essere anche più efficace del cloro nella disinfezione, ma ha un alto costo energetico per la produzione e non può essere trasportato. Questa tipologia di trattamento prevede la generazione di ozono in situ prima di essere utilizzato. Molto spesso si prevedono anche trattamenti successivi per la rimozione di ozono in eccesso. Anche questa tipologia di trattamento prevede la formazione di sottoprodotti ma in misura minore.

A seguito dei trattamenti sopracitati, in funzione della tipologia del disinfettante, della dose utilizzata e delle condizioni presenti durante il trattamento (temperatura, PH dell'acqua e tempo di reazione), si possono avere differenti sottoprodotti per concentrazione e tipologia. Particolare interesse è destato dalla concentrazione dei trialometani (THM), somma delle concentrazioni di cloroformi, bromoformio, bromodiclorometano e dibromodiclorometano. Si tratta di composti bio-accumulativi, ovvero che si stipano nei tessuti se le concentrazioni sono elevate e l'organismo non è in grado di smaltirli. Questo rende tali sottoprodotti potenzialmente cancerogeni per l'uomo e ha determinato all'interno della *Direttiva Europea sull'acqua potabile*  $(98/83/3c \ del \ 1998)$  l'imposizione di una concentrazione limite pari a 100  $\mu g/l$ .

Disinfettante	Sottoprodotti di disinfezione organoalogenici	Sottoprodotti di disinfezione inorganici	Sottoprodotti di disinfezione non – alogenici
Cloro o acido ipocloroso	Trialometani Acidi acetici alogenici Aloacetonitrili Cloro idrato Cloropicrina Clorofenoli N-Cloroammine Alofuranoni Bromoidrine	Clorati	Aldeidi Acidi alcanici Benzene Acidi carbossilici
Diossido di Cloro	٨	Clorito Clorato	١
Cloroammine	Aloacetonitrili Ciano Clorina Cloroammine organiche Cloramino acidi Cloroidrati Alochetoni	Nitrito Nitrato Clorato Idrazina	Aldeidi Chetoni
Ozono	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

Tabella 2.2: Principali sottoprodotti di disinfezione chimica

#### 2.3.2 Trattamenti di tipo fisico

L'elevata affidabilità di componenti e materiali, e la conseguente realizzazione di impianti sempre più efficienti e sicuri, costituisce la principale motivazione del successo delle tecnologie di disinfezione ad azione fisica. Se a questo si somma la crescente attenzione da parte delle normative internazionali sul tema dei sottoprodotti della disinfezione (DPB) conseguenti all'uso dei disinfettanti chimici, si capisce facilmente perché questa tipologia di dispositivi sono in continua espansione nel mercato del trattamento delle acque.

Nella trattazione dei sistemi di disinfezione di tipo fisico possono distinguersi alcuni processi definibili come "tradizionali" in quanto diffusi nel panorama dei trattamenti che si effettuano oggigiorno: processi a membrana e raggi UV descritti qui di seguito. Seppur ancora in fase di sviluppo tecnologico, possono inserirsi in questo gruppo, i dispositivi idraulici oggetto di indagine nel presente lavoro di tesi. Come si tratterà, più nel dettaglio, nel successivo capitolo, la cavitazione idrodinamica produce disinfezione, nella fattispecie dei batteri, e sono in corso degli studi aventi come oggetto l'implementazione di sistemi che inducano tale fenomeno con pressioni e costi operativi ragionevoli al fine di poter applicare questa tecnologia a livello industriale. Inoltre, possono citarsi come trattamenti di tipo fisico anche i sistemi di disinfezione che utilizzano per tale scopo gli ultrasuoni e il calore[6]. Al momento tuttavia i trattamenti di tipo fisico in uso si distinguono in:

• **Processi a membrana**: le tecnologie a membrana permettono la separazione degli inquinanti presenti nell'acqua attraverso una barriera fisica. Con il passaggio attraverso le membrane vi è una completa rimozione di batteri e virus, ma l'efficienza di rimozione è funzione della tipologia di membrana utilizzata e quindi del processo che si attua. Il processo maggiormente utilizzato quando si vuole ottenere la disinfezione dell'acqua è l'*ultrafiltrazione*. Il meccanismo d'azione su cui si basa tale processo è duplice: la dimensione dei pori (tutto ciò che è più grosso viene trattenuto) e il potere adsorbente (capacità di trattenere sulla superficie) della membrana che ha una dimensione dei pori che varia tra  $0.01-0.1 \ \mu m$ . Questa tecnologia si sta sviluppando molto negli ultimi anni, sebbene il costo di un trattamento di questo tipo sia ancora abbastanza elevato se comparato con altri sistemi attualmente a disposizione, sia in termini di investimento iniziale che di gestione dell'impianto. Infatti, non permettono il trattamento di elevate portate e necessitano una continua sostituzione dei filtri. Di fatto, esistono diversi processi in funzione della dimensione dei pori della membrana utilizza (tabella 2.3). Sono da considerarsi come appartenenti a questa tipologia anche la filtrazione lenta su sabbia e la filtrazione su ceramica: il principio di funzionamento è effettivamente lo stesso e si possono ottenere elevate efficienze di rimozione, nonostante i lunghi tempi di contatto e l'eventuale necessità di altri trattamenti aggiuntivi.

	Particle Size (μm)	Molecular Weight (Da)	Particle Characteristics	Pressure (bar)
MF	0.1–1	$10^{5} - 10^{6}$	Macromolecular to cellular	0.5-1
UF	0.01-0.1	$1000 - 10^5$	Molecular to macromolecular	1-10
NF	0.001-0.01	100-1000	Ionic to molecular	5-70
RO	0.0001 - 0.001	100	Ionic	10-100

Tabella 2.3: Comparazione tra i diversi processi a membrana [5].

• Radiazione UV: la radiazione UV-C in particolare, con una lunghezza d'onda tra 240 e 280 nanometri, attacca direttamente il DNA di batteri, virus e di altri microorganismi, distruggendo l'informazione genetica in esso contenuta e rendendo così nulla la loro capacità di riprodursi.La sua efficacia è funzione della torbidità dell'acqua, della profondità dello strato trattato e risulta poco efficace per volumi in movimento.I raggi UV sono in grado di rimuovere protozoi e oocisti, ma la loro efficienza di rimozione aumenta notevolmente su batteri e virus. Tuttavia, il costo elevato di questa tecnologia fa sì che venga molto spesso utilizzata in processi che prevendono anche altri trattamenti prima di avere una disinfezione finale attraverso i raggi UV: questa configurazione permette di ridurre i costi e aumentarne l'efficienza.

Si menziona per completezza la *sterilizzazione solare*: l'esposizione alla luce solare permette l'inattivazione di alcuni agenti patogeni attraverso l'assorbimento di radiazioni UV e all'innalzamento della temperatura indotto. È un metodo utilizzato in paese in via di sviluppo per arginare il problema delle acque contaminate ed in particolare per la riduzione dei casi di diarrea; è un sistema a costo zero che non ha bisogno di nessuna strumentazione se non di bottiglie o taniche trasparenti.

### 3 La cavitazione idrodinamica

Il fenomeno della cavitazione può esplicarsi come la comparsa di cavità di vapore all'interno di un fluido inizialmente omogeneo. La configurazione del flusso e le proprietà del fluido ne determinano le caratteristiche che il fenomeno può assumere[3]. Il presente capitolo pone l'attenzione sulla dinamica di formazione delle bolle, andando ad analizzare i meccanismi di innesco, come la cavità di vapore si sviluppa ed il conseguente collasso. Si propone una classificazione delle tipologie di cavitazione idrodinamica in funzione della modalità di propagazione del fenomeno. Si introduce il numero di cavitazione, parametro adimensionale che ne descrive il fenomeno fisico e si analizzano gli effetti indotti dall'instaurarsi di un regime cavitativo. Si conclude analizzando lo stato dell'arte e i maggiori obiettivi raggiunti nella disinfezione delle acque contaminate dal ceppo batterico Escherichia Coli.

#### 3.1 Dinamica di formazione della cavitazione

Si definisce cavitazione idrodinamica il fenomeno di natura fisico – chimica che consiste nella formazione di zone di vapore circoscritte da un fluido. La formazione delle cavità di vapore si deve ad un abbassamento della pressione del fluido che localmente risulta essere minore della tensione di vapore  $P_v$ . Un successivo recupero di pressione comporta un'implosione violenta delle bolle di vapore. Si hanno localmente forti onde di shock, temperature elevata ( $\approx 10000K$ ), pressioni nell'ordine dei Gpa[10], sforzi di taglio[11]. La cavitazione appare pertanto simile ad un'ebollizione, ma il meccanismo di innesco è regolato da una variazione di pressione ad una temperatura che può considerarsi costante (Figura 3.1).



Figura 3.1: Diagramma di stato dell'acqua

La dinamica di generazione e sviluppo della cavitazione è regolata dalle condizioni idrodinamiche del flusso. Un flusso confinato che incontra un restringimento (orifizio, venturi, etc.) accelera a causa della diminuzione di sezione disponibile al passaggio del fluido. Per continuità si ha un abbassamento di pressione e la conseguente formazione di bolle di vapore dove localmente la pressione risulta essere minore della tensione di vapore del fluido. A valle del restringimento il getto si allarga di conseguenza rallenta, per cui le bolle che avanzano con il flusso incontrano una zona a pressione maggiore dove si ha l'implosione delle cavità di vapore (figura 3.2).



**Figura 3.2:** Tipica evoluzione dei nuclei di cavitazione in un tubo venturi in funzione dello spazio (s) e del diametro della bolla(R)

La cavitazione ha luogo al manifestarsi di determinate condizioni. La presenza dei "nuclei di cavitazione" all'interno del flusso è indispensabile. Si tratta di microcavità d'aria presenti direttamente nel fluido, dovute alla normale areazione del fluido o alla presenza di impurità. Infatti, un liquido completamente deaerato o comunque privo di vuoti o bolle di gas, in linea teorica anche al manifestarsi di determinate condizioni, può non sviluppare cavitazione. 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, quindi normalmente nei fluidi reali questa condizione è sempre sodisfatta[12]. Le cavità di vapore si sviluppano ma la cavitazione si presenta quando le bolle raggiungono un diametro critico che ne determina la successiva implosione. Ciò avviene quando il tempo di permanenza nella zona di bassa pressione è tale per cui si ha il raggiungimento delle dimensioni necessarie[12]. Molte bolle possono svilupparsi, ma non generare cavitazione, altre posso implodere e generare altre microbolle di diametro più piccolo (figura 3.2). Il fenomeno di cavitazione induce un'alterazione fisico-chimica del fluido. La modalità di implosione delle bolle ne determina la tipologia di alterazione che predomina. Si distinguono due tipologie di collasso di una bolla: un'implosione simmetrica favorisce lo sviluppo di radicali liberi fortemente reattivi, quindi trasformazioni di tipo chimico. Il collasso antisimmetrico genera un'intensa attività turbolenta locale e getti liquidi ad alta velocità a cui si attribuiscono le trasformazioni fisiche del fluido[13]. Le bolle maggiormente coinvolte alla formazione di microgetti sono quelle che risentono dell'interazione con la parete del corpo entro cui scorre il fluido[14]. In generale, questo tipo di collasso, per gli effetti indotti può ritenersi vantaggioso per le applicazioni sulla disinfezione microbica mediante rottura della parete cellulare degli elementi patogeni, ma risulta essere anche la maggior causa di erosione su pompe centrifughe e valvole.



Isolated bubble collapse near a solid boundary

Figura 3.3: Collasso Simmetrico vs Collasso Antisimmetrico[14].

La determinazione della tipologia di collasso all'interno del fenomeno è difficile da determinare. Le variazioni di pressione e velocità del fluido fanno si che ci siano delle oscillazioni di forma delle bolle e diverse tipologia di collasso all'interno dello stesso fenomeno. Si assume che la cavitazione e le alterazioni fisico chimiche che ne derivano possono variare man mano che il fenomeno evolve.

### 3.2 Tipologie di cavitazione idrodinamica

La cavitazione può assumere forme differenti a seconda di come si genera. Inizialmente è fortemente dipendente dalla struttura di base del flusso non cavitativo. Tuttavia, come il fenomeno si sviluppa, le cavità di vapore tendono a modificare il flusso di base. All'aumentare della frequenza di formazione e della dimensione della regione cavitante, le bolle di vapore cominciano ad interagire idrodinamicamente tra loro[3]. A causa di ciò e, in funzione, del campo di pressione nella zona cavitante, di geometria e rugosità del dispositivo, il fenomeno della cavitazione può assumere diverse forme. Si descrivono sinteticamente diverse tipologie di cavitazione:

- Attached cavitation: si presenta su un corpo in una regione di flusso separato. La forma della regione cavitante può subire delle modifiche. Se la zona cavitante si estende a valle del corpo, il fenomeno è detto supercavitazione.
- Cavitazione a bolle viaggianti: caratterizzata da bolle isolate in moto nella massa fluida. Le bolle di vapore si formano da nuclei presenti in una regione di bassa pressione e vengono trasportate dal liquido mentre si espandono e collassano in una regione di alta pressione.
- Vortici cavitativi: si manifesta nelle zone di bassa pressione all'interno di vortici che si formano nei punti di separazione del flusso o in flussi molto turbolenti. 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.

#### 3.3 Numero di cavitazione

Nell'analisi dei fenomeni fisici è utile introdurre parametri di similitudine che permetto di individuare e descrivere il fenomeno anche in processi caratterizzati da differenti dimensioni spaziali e proprietà fisiche. L'intensità del fenomeno di cavitazione è spesso associato ad un parametro adimensionale, definito numero di cavitazione  $\sigma$  [15]:

$$\sigma = \frac{P_2 - P_v}{\frac{1}{2}\rho v_0^2}$$
(3.1)

Nella presente trattazione  $P_2[Pa]$  è la pressione che si misura a valle del restringimento,  $P_v[Pa]$  è la tensione di vapore del liquido,  $\rho$  [kg/m3] rappresenta la densità del fluido, v[m/s] la velocità media del fluido al restringimento. Tale parametro rappresenta il rapporto tra forze di pressione, espresse dalla differenza di pressione assoluta locale dalla tensione di vapore, e l'energia cinetica per unità di volume e viene usato per caratterizzare la potenzialità del flusso di cavitare. Il numero di cavitazione può considerarsi una derivazione del teorema di Bernoulli. Se si considera un flusso attraverso un tubo di venturi (Figura 3.4), assumendo di considerare due punti nella sezione del fluido alla stessa quota geodetica e di poter trascurare la velocità a valle del restringimento perché sensibilmente minore rispetto alla velocità al restringimento, si ha:

$$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_0}{\gamma} + \frac{u_0^2}{2g} \tag{3.2}$$

Assumendo  $P_0$  pari a  $P_v$ , si desume che quando i due termini si uguagliano, tutto il carico idraulico presente nella strozzatura si eguaglia con la pressione di valle. Quando il primo membro risulta essere minore del secondo, parte dell'energia del fluido è stata dissipata, c'è produzione di cavità di vapore, si ha cavitazione.



Figura 3.4: Andamento della pressione in un dispositivo venturi

In letteratura sono presenti diverse definizioni di numero di cavitazione corrispondenti alle diverse configurazioni che il fenomeno può assumere. Alcuni autori utilizzano la definizione che tiene in considerazione della perdita di carico tra monte e valle del dispositivo[16]:

$$\sigma = \frac{P_2 - P_v}{P_1 - P_2} \tag{3.3}$$

Per quanto riguarda i flussi soggetti a fenomeni di cavitazione debole, la definizione maggiormente usata tiene conto delle condizioni a monte dell'ostacolo:

$$\sigma = \frac{P_1 - P_v}{\frac{1}{2}\rho v_0^2}$$
(3.4)

Tutte le relazioni sopraelencate permettono di avere una classificazione simile dei regimi di cavitazione, in quanto tutte tengono conto delle differenze di pressione e delle proprietà del fluido. La classificazione dei regimi cavitativi può misurarsi indirettamente. È noto, che l'instaurarsi della cavitazione induce vibrazioni, rumori persistenti e innesco di turbolenza locale. Un metodo di analisi prevede l'istallazione di accelerometri a rivestimento delle pareti delle tubazioni, al fine di correlare il numero di cavitazione all'accelerazione subita dalle pareti, effetto della sollecitazione che le onde di pressione generano quando si ha il fenomeno di cavitazione[17]. Il dispositivo cavitante utilizzato per la misurazione è una piastra forata. In generale, diversi dispositivi tendono ad avere comportamenti simili, si possono avere diverse entità del fenomeno ma la topologia con cui si sviluppano risulta simile.



Figura 3.5: Accelerazione delle pareti (A') in funzione del numero di cavitazione  $\sigma$ 

L'interpolazione dei dati sperimentali (figura 3.5) mostra la presenza di quattro regimi di cavitazione. Inizialmente si tratta di regime turbolento, le accelerazioni delle pareti sono dovute alla turbolenza generata dal flusso in uscita dalla piastra. Si registra un aumento sostanziale delle vibrazioni indotte in corrispondenza di  $\sigma_i$ , si instaura il regime di incipiente cavitazione, si ha formazione di cavità di vapore e si sviluppa il tipico fischio, caratteristico dell'innesco del fenomeno di cavitazione. Il completo e costante sviluppo di cavitazione si ha a  $\sigma_c$ . La cavitazione è tale per cui la generazione di bolle è costante. Infine, si raggiunge il *choked regime*, si ha diminuzione dell'accelerazione delle pareti del tubo a causa della natura bifasica del liquido che inibisce la propagazione delle onde di pressione. In questo regime, la portata risulta costante anche a fronte di ulteriore abbassamento di pressione a valle.

La cavitazione risulta essere un fenomeno complesso, il numero di cavitazione considera sono alcuni dei fattori che prendono parte al fenomeno cavitativo. Per una trattazione completa del fenomeno bisogna tener conto di altri fattori fisici: la tensione superficiale che ne influenza la vaporizzazione del liquido, la turbolenza che influenza la crescita e l'implosione delle cavità di vapore, grandezza spesso associata ad un altro parametro adimensionale fondamentale nell'ambito della fluidodinamica, il numero di Reynolds.

#### 3.4 Effetti indotti dalla cavitazione idrodinamica

Nell'ambito delle applicazioni industriali, la cavitazione è un fenomeno fisico noto soprattutto per gli effetti negativi che provoca sugli organi meccanici e sulle macchine idrauliche. Le implosioni delle cavità di vapore generano localmente altissime pressioni e temperature, con formazione di microgetti liquidi molto veloci, causando il danneggiamento delle superfici a contatto con il fluido. Localmente le tensioni superficiali risultano molto intense ed il ripetersi di questi fenomeni fortemente energetici, variabili e ripetuti nel tempo, genera nei pressi di una superficie solida i danni caratteristici dello stress a fatica. Le conseguenze possono riassumersi come una notevole perdita di efficienza, l'emissione di rumore e il danneggiamento di componenti, specie in valvole, turbine e pompe. Sono i dispositivi maggiormente coinvolti e non è un caso, infatti sono dispostivi utilizzati per il controllo dei parametri idrodinamici del flusso e impiegati appositamente per avere cadute di pressione localizzate. In particolare, il fenomeno comporta una diminuzione di prevalenza nei sistemi di pompaggio, una riduzione di potenza operativa delle turbine e una variazione di portata fluente nelle valvole. Negli ultimi decenni la comunità scientifica ha iniziato a studiare sistemi e impiantistica sperimentale al fine di poter sfruttare a proprio vantaggio l'energia sviluppata da questo fenomeno. I picchi di pressione, le onde d'urto e i forti gradienti di velocità possono considerarsi aspetti positivi se controllati ed utilizzati ad esempio per la disinfezione dell'acqua, la produzione di emulsioni, il trattamento di acque reflue o la sintesi di composti chimici.

Nell'ambito di questa trattazione ci si sofferma allo studio di particolari condizioni

di flusso e geometria del corpo tali da indurre cavitazione e conseguente disinfezione dell'acqua contaminata da Escherichia coli, pertanto il prossimo paragrafo si incentra sulla trattazione della cavitazione al fine di disinfezione e in particolare degli obiettivi raggiunti per quanto riguarda la trattazione di acque contaminate da batterio Escherichia coli.

#### 3.5 La cavitazione idrodinamica nella disinfezione

Gli studi sulla cavitazione idrodinamica hanno dimostrato le potenzialità di questa tecnica in vari processi industriali. Questa trattazione pone attenzione sugli sviluppi e lo stato dell'arte di questa tecnica per la disinfezione batterica dell'acqua. Si farà riferimento a quelli che sono ad oggi le tecniche sperimentali che hanno dimostrato un abbattimento di carica batterica ed in particolare, si sofferma sull'abbattimento del batterio Escherichia coli, in quanto come esposto, è il ceppo batterico utilizzato per testare il dispositivo oggetto del presente lavoro di tesi. In generale, i rendimenti di rimozione della carica batteria sono funzione dell'intensità di cavitazione e le geometrie del dispositivo cavitante ne influenzano l'efficienza. In tutte le applicazioni la configurazione geometrica è risultata essere il principale fattore per l'intensificazione dei processi di cavitazione. Numeri di cavitazione compresi tra 0,1 e 0,6 indicano rendimenti di rimozione alti per quanto riguarda la disinfezione[15]. I dispositivi utilizzati per indurre il fenomeno di cavitazione possono riassumersi in:

Orifizi : in questo tipo di dispositivo si è riscontrato che l'intensità di cavitazione è regolata dalla forma, dal numero e dall'area dei fori. Un parametro esemplificativo che permette di quantificare i diversi rendimenti di rimozione è α. Questo parametro rappresenta il rapporto tra il contorno bagnato dei fori e l'area totale di apertura di quest'ultimi. Gli esperimenti dimostrano che maggiori sono i valori che assume α (α >2), maggiore è l'efficienza di rimozione. Ciò implica che a parità di condizioni idrodinamiche in ingresso, un numero di fori crescente permette di aumentare l'efficienza di rimozione. Infatti una

piastra multiforo consente di avere complessivamente un'area maggiore di fori, il che implica un aumento della quantità di acqua interessata dal fenomeno cavitativo.



Figura 3.6: Dispositivo equipaggiato con diversi design di piastra multiforo[15].

• Venturi: Gli studi effettuati su questo tipo di dispositivo hanno dimostrato risultati comparabili con gli orifizi. All'aumentare del contorno bagnato si ha una percentuale di rimozione maggiore. Studi dimostrano che analizzando diverse configurazioni di venturi, per tutti i dispositivi oggetto di indagine  $\gamma$  influisce sull'efficienza di degradazione. Il parametro  $\gamma$  misura il rapporto tra l'altezza della strozzatura e la sua lunghezza ed influenza l'efficienza di rimozione perché la geometria è direttamente correlata alle dimensioni che la bolla raggiungere all'interno del dispositivo. Il restringimento deve essere abbastanza lungo da permettere la crescita delle cavità di vapore, ma non troppo da non permettergli di arrivare nella zona di alta pressione a valle e implodere in modo violento. Inoltre, influisce sul tasso di degradazione l'angolo di apertura del divergente a valle del restringimento. Un divergente con angoli compresi tra 5,5° e 8,5° gradi permette un recupero di pressione lento, di conseguenza la bolla può dilatarsi ulteriormente prima di collassare. I primi studi inerenti all'applicazione della cavitazione idrodinamica per la disinfezione delle acque risalgono agli anni Settanta. Negli ultimi decenni, diversi agenti patogeni sono stati inattivati mediante cavitazione idrodinamica[18] [19] [20], ma il meccanismo di disinfezione non è tuttora ben chiara. La forte turbolenza indotta in regime di cavitazione insieme agli effetti causati dall'implosione delle cavità di vapore possono considerarsi entrambi causa dell'inattivazione dei batteri. Studi dimostrano che gli sforzi turbolenti, in particolare le componenti normali possono raggiungere i  $10^8 - 10^9 Pa[21]$ , valori che consentono un buon abbattimento di carica batterica. Altri lavori hanno studiato come gli sforzi tangenziali dell'ordine di  $10^3 Pa$  possono determinare la rottura della membrana cellulare dei batteri e quindi disattivarli[21].

Per parallelismo di protocollo sugli esperimenti, si vuole introdurre uno studio degli effetti indotti dalla cavitazione idrodinamica su Escherichia Coli e riassumerne i risultati perché si considerano utili al fine di valutare la prestazione del dispositivo oggetto della presente trattazione. Lo studio in esame ha come obiettivo quello di valutare i diversi rendimenti nell'abbattimento batterico variando tre parametri: il design del reattore di cavitazione, la pressione di scarico a valle del reattore e la concentrazione di batteri in ingresso. Si sono testati tre diverse geometrie di piastre multiforo e altrettanti dispositivi venturi. I diversi design di piastre presentano stessa area forata ma rispettivamente con uno, cinque e venticinque fori. I venturi si differenziano per progressiva diminuzione della sezione del restringimento, ma tutti presentano stesso angolo di divergente pari a 10° [23].



**Figura 3.7:** Tasso di inattivazione di E. coli per diversi design di piastre forate e tubi Venturi. (Concentrazione iniziale: 104 Cfu/ml, pressione di scarico:1,5 bar) [21]

Osservando i tassi di inattivazione degli E. coli, l'efficienza dei venturi risulta essere molto maggiore rispetto ai differenti design di piastre multiforo. Se si considera che il meccanismo principale di disinfezione negli orifizi e dovuto ai radicali OH, mentre nei dispostiti venturi la principale azione disinfettante è dovuta alle onde di pressione generate e agli sforzi indotti, si può concludere che i batteri possono considerarsi più sensibili agli effetti meccanici generati dalla cavitazione. In particolare, l'efficienza maggiore si riscontra per il dispositivo venturi avente diametro del restringimento minore, il che implica maggiore intensità di cavitazione. Le due configurazioni di piastra multiforo (OP25X1mm) e venturi (Vent.3) risultate le più efficienti sono state valutate al variare della concentrazione di batteri e della pressione in uscita dal dispositivo.



Figura 3.8: Influenza della concentrazione iniziale di batteri e della pressione in uscita sui dispostitivi OP25x1 e Vent.3 [21]

La concentrazione iniziale di batteri ha influenza maggiore sulla piastra multiforo, poiché la quantità di radicali prodotti risulta essere un fattore limitante. Il dispositivo venturi non risente della variazione nella concentrazione di batteri in ingresso. La pressione in uscita si manifesta con una tendenza inversa tra i due dispositivi. Un aumento della pressione in uscita permette un collasso delle cavità di vapore più violento nelle piastre multiforo, quindi si ha un tasso di inattivazione maggiore. Un aumento di pressione a valle del restringimento nel dispositivo venturi ostacola la crescita delle bolle e gli effetti meccanici indotti dal collasso di quest'ultime.

## 4 Fluidodinamica Computazionale

Il presente capitolo descrive in maniera sintetica ed esaustiva la trattazione teorica alla base di un flusso turbolento e analizza gli approcci, sia analitici che computazionali, che permettono la risoluzione di un flusso turbolento. Nello specifico, si illustra lo sviluppo delle equazioni di Navier-Stokes fino alla definizione delle RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations). Nella risoluzione, si descrivono i modelli che permettono la "chiusura della turbolenza" e si mostra come la CFD permetta di implementare tali ipotesi all'interno del calcolatore. Attraverso il modello "a cascata" introdotto da Kolmogorov, si evidenziano le caratteristiche del fenomeno dalla generazione alla dissipazione. Il capitolo termina analizzando nel dettaglio la formulazione del modello  $k - \epsilon$ , utilizzato nel presente lavoro di tesi per la trattazione del problema in esame e con esso le necessarie modellazioni di parete.

#### 4.1 Formulazione differenziale del campo di moto

L'equazione indefinita di equilibrio del moto di un fluido viscoso descrive il comportamento di un fluido reale continuo e deformabile è data da:

$$\rho\left(\mathbf{F} - \frac{D\mathbf{U}}{Dt}\right) = \nabla p - \mu \nabla^2 - \frac{1}{3}\mu \nabla (\nabla \cdot \mathbf{U})$$
(4.1)

Dove  $\rho$  rappresenta la densità, **U** è la velocità del fluido,  $\mu$  la viscosità dinamica, p rappresenta la pressione e **F** una forza per unità di massa.

Si tratta di un'equazione alle derivate parziali non lineare, nella forma più generale.

Quando si ipotizza, come lecito, che il fluido sia incomprimibile (per l'equazione di continuità:  $div \ U=0$ ), si formalizza l'equazione di Navier-Stokes, che utilizzando la notazione di Einstein, assume la seguente forma:

$$\frac{\partial U_j}{\partial t} + u_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + u \frac{\partial^2 U_j}{\partial x_i^2} + F$$
(4.2)

dove globalmente i termini a primo membro rappresentano l'energia cinetica del flusso, rappresentato dal primo termine di accelerazione e dal secondo di convezione. A destra dell'uguale, il primo termine rappresenta le forze di pressione, il secondo descrive il processo di diffusione molecolare: è l'influenza della viscosità, e rappresenta la risultante, per unità di volume, delle forze originate da questa in ogni punto della massa fluida.

Tale relazione suppone la linearità tra sforzi e velocità di deformazione di un volume unitario di fluido. L'equazione sintetizza la formalizzazione matematica di tre principi fisici: conservazione della massa, conservazione della quantità di moto e conservazione dell'energia interna. La risoluzione di questa equazione è molto complicata soprattutto quando si tratta di studiare un moto turbolento[2].

Infatti, un flusso turbolento presenta un campo di moto caratterizzato da oscillazioni di velocità rispetto al valor medio e queste fluttuazioni si accentuano in frequenza man mano che il numero di Reynolds aumenta. Il regime di moto ha una natura caotica sia nel tempo che nello spazio e al crescere di *Re* la turbolenza aumenta: scale di moto sempre più piccole si generano a partire da quelle aventi le dimensioni del sistema, come dettato dalle condizioni al contorno. Le strutture vorticose formatesi hanno un carattere diffusivo e ciò comporta il trasporto di quantità di moto. Di conseguenza, la turbolenza si presenta come un fenomeno dissipativo.Il moto, come esposto, è caratterizzato da una componente di velocità media addizionata ad un modo di agitazione, che localmente modifica la traiettoria delle particelle del fluido. Il valor medio nel tempo delle fluttuazioni turbolente può considerarsi nullo in termini statistici, quindi dal punto di vista fisico le componenti turbolente non forniscono nessun contributo al trasporto di massa operato dal moto: la turbolenza
non influenza l'equazione di continuità. Da queste considerazioni risulta spontaneo utilizzare un approccio di tipo statistico nella valutazione del moto di un flusso turbolento e analizzare l'equazione di *Navier-Stokes* per come viene modificata dall'introduzione della turbolenza.

#### 4.1.1 RANS- equazioni di N-S mediate

Nella trattazione del fenomeno turbolento, per le ipotesi sopra citate, utilizzando un approccio statico si considera la velocità istantanea  $\mathbf{U}$  come la somma di una velocità media  $\langle \mathbf{U} \rangle$  e di un termine di fluttuazione  $\mathbf{u}$ , che rappresenta l'azione istantanea della turbolenza sul moto medio.

$$\mathbf{U} = \langle \mathbf{U} \rangle + \mathbf{u} \tag{4.3}$$

La presenta relazione, nota come decomposizione di Reynolds, la si applica a qualsiasi grandezza purché questa sia funzione di spazio e tempo.



Figura 4.1: Rappresentazione della decomposizione di Reynolds

Dallo sviluppo dell'equazione di Navier-Stokes, mediando successivamente nel tempo i vari termini differenziali, si ottiene la cosiddetta equazione di N-S mediata alla Reynolds (RANS).

$$\frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial t} + \langle U_i \rangle \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( v \frac{\partial^2 \langle U_j \rangle}{\partial x_i^2} - \langle u_i u_j \rangle \right) + F$$
(4.4)

L'utilizzo di questo approccio comporta un fattore aggiuntivo  $\langle u_i u_j \rangle$  nella legge di bilancio della quantità di moto: si ha la comparsa delle tensioni turbolente, termine definito dal prodotto delle componenti di agitazione della velocità. Si ha un tensore degli sforzi  $\tau_{ij}$  le cui componenti si denominano tensioni di Reynolds:

$$\tau_{ij} = -\rho \langle u_i u_j \rangle \quad o \quad \tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix}$$
(4.5)

Si tratta di uno sforzo che a causa del trasporto della quantità di moto, azione dell'agitazione turbolenta nel favorire il mescolamento del fluido, produce una resistenza al moto. Infatti, una particella che si muove di moto medio all'interno del fluido e a causa delle instabilità turbolente si trova in una regione con velocità relativa differente, tende a cederla o ad acquistarla in funzione del profilo di velocità che incontra. Il continuo scambio di quantità di moto determina così una maggiore dissipazione di energia e l'appiattimento del profilo medio di velocità.



Figura 4.2: Trasporto convettivo dovuto alla turbolenza[1].

Il modello che descrive tale comportamento, è definto da *Kolmogorov* "a cascata": la dissipazione di turbolenza associata al moto medio è inteso come il processo di trasferimento dell'energia cinetica dalle grandi strutture vorticose verso scale sempre più piccole, dette scale dissipative o di *Kolmogorov* per l'appunto. Esse rappresentano le scale minime dove l'energia viene dissipata sotto forma di calore dall'azione delle forze viscose.



Figura 4.3: Trasporto di energia dai vortici gradi fino alle scale dissipative[1].

La risoluzione analitica generale di questa equazione (4.4) rappresenta attualmente uno dei problemi irrisolti della matematica moderna. Soluzioni analitiche particolari si hanno per casi semplificati; soluzioni approssimate si ottengono tipicamente ricorrendo a metodi propri dell'analisi numerica e all'uso congiunto del calcolatore.

# 4.2 Risoluzione della turbolenza

La turbolenza, come precedentemente analizzato, è un fenomeno che si descrive come caotico, diffusivo, dissipativo e che comprende più scale temporali e spaziali. Lo si incontra in molti flussi di corrente sia nelle più comuni applicazioni industriali, sia direttamente in natura. Tuttavia, nonostante i flussi turbolenti si manifestino praticamente ovunque, vista la complessa conformazione una loro descrizione esaustiva necessiterebbe di una quantità di informazioni troppo elevata. Ai fini pratici, una definizione puntuale ed istantanea della turbolenza non è di fondamentale importanza. Infatti, sotto opportune ipotesi e semplificazioni, le equazioni si semplificano, permettendo comunque di analizzare il flusso in maniera coerente con i risultati attesi. Il processo di modellizzazione permette di risolvere il problema della *"chiusura della turbolenza"*, ovvero di approssimare in maniera accurata il comportamento di particolari flussi turbolenti.

Nello specifico, la risoluzione numerica della turbolenza permette quindi, attraverso simulazioni fluidodinamiche, di utilizzare differenti approcci in funzione del livello di approssimazione desiderato e del costo computazionale che ne deriva (figura 4.3). Si distinguono allora tre diversi approcci alla risoluzione della turbolenza:

- Simulazione numerica diretta (DNS): prevede la diretta risoluzione delle equazioni di Navier-Stokes. Si ha una descrizione completa ed univoca della turbolenza senza l'ausilio di nessun modello turbolento. Metodo non utilizzabile nelle applicazioni industriali di comune interesse, in quanto la risoluzione di tutte le scale della turbolenza implica un costo computazionale elevatissimo proporzionale al cubo del numero di Reynolds;
- Large- Eddy Simulation(LES) : la risoluzione della turbolenza, come dettato dal nome, è previso solo per le scale medio-grandi. Si utilizzano delle funzioni filtro per eliminare le piccole scale in relazione a una lunghezza di riferimento. Sebbene il livello di approssimazione non sia molto alto, la soluzione delle grandi scale implica una grande perdita di informazioni e un costo

computazionale comunque elevato. Questa metodologia per i motivi esposti risulta poco utilizzata;

• Equazioni RANS: questo criterio prevede l'utilizzo delle equazioni di N-S mediate alla Reynolds, proprio come è stato esplicitato al paragrafo 3.1. Tale approccio è di gran lunga il più utilizzato seppur non permette di eliminare i termini non lineari dalle equazioni. La risoluzione è affidata a dei modelli di chiusura della turbolenza che permettono, in maniera più o meno accurata, di descrivere questi termini con equazioni aggiuntive. La scelta del modello è vincolata alla tipologia di problema da affrontare.

# 4.3 Modelli di chiusura

I modelli di chiusura della turbolenza possono dividersi in funzione della tipologia di approssimazione che le ipotesi comportano. Si distinguono allora in modelli Reynolds stress (RSM) e modelli diffusivi. I primi risolvono un'equazione per ogni componente del tensore di Reynolds e per il tasso di dissipazione  $\epsilon$ . Questo approccio tiene conto degli effetti non locali, della storia dei vortici e di come questi si propagano anche a lunga distanza all'interno del flusso turbolento. Si tratta senza dubbio di un modello molto accurato, estremamente dettaglio e utile nella descrizione di flussi con geometrie complesse: anche in questo caso, il costo computazionale rispetto ai modelli diffusivi che vedremo di seguito è molto elevato. Di conseguenza, i modelli diffusivi risultano i quelli maggiormente utilizzati. Essi si basano sull'ipotesi di Boussinesq, un'approssimazione fondata sul presupposto che i componenti del tensore di Reynolds siano proporzionali ai gradienti di velocità media. Tale relazione prevede che il trasporto di momento effettuato dalla turbolenza è un processo diffusivo e che le tensioni di Reynolds possono essere modellati utilizzando una viscosità turbolenta  $\nu_T$  (eddy viscosity), che nella forma è analoga alla viscosità molecolare. Pertanto, le tensioni di Reynold assumono la seguente forma:

$$-\langle u_i u_j \rangle = \nu_T \left( \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ji}$$

$$\tag{4.6}$$

Nella presente relazione k rappresenta l'energia cinetica per unità di massa. Questa formula esprime una correlazione tra quantità statistiche e la viscosità turbolenza che risulta essere una proprietà del flusso, quindi fortemente influenzata dalla quantità di turbolenza. L'ipotesi di Boussinesq assume il comportamento dei vortici come molecole, la turbolenza isotropa e il conseguente equilibrio locale tra tensioni e deformazioni: ciò implica un'applicabilità limitata e l'introduzione di una nuova incognita, la viscosità turbolenta  $v_T$ , che deve comunque modellarsi attraverso l'introduzione di nuove equazioni che ne descrivono il comportamento.

In generale, la viscosità turbolenta può dirsi proporzionale al prodotto di una velocità per una lunghezza caratteristica del vortice:

#### $v_T \propto ul$

analogamente a quanto avviene nella definizione della viscosità molecolare nella teoria cinetica dei gas. A tal proposito, si distinguono differenti approcci per la risoluzione della nuova grandezza introdotta, in funzione del numero di equazioni differenziali utilizzate per la determinazione di u ed l:

- Modelli a zero equazioni: non si fa utilizzo di equazioni differenziali, bensì di equazioni algebriche. Il più conosciuto è il modello della lunghezza di miscelazione introdotto da Prandtl. In analogia alla teoria cinetica dei gas, il calcolo della viscosità turbolenta  $v_T$  assume come lunghezza caratteristica l, la lunghezza di miscelazione dei vortici. Tale dimensione, il più delle volte spazio-dipendente, non è di facile determinazione. Inoltre, questo approccio considera la turbolenza dipende solo dalle scale locali. Questa metodologia, per i motivi esposti, non è più utilizzata;
- Modelli a una equazione: utilizzano ancora equazioni algebriche per la definizione della lunghezza caratteristica, ma a questa viene aggiunta un'equazione differenziale per la determinazione della velocità caratteristica *u*. Questo

approccio permette di tener conto dei vortici più vecchi, ovvero il modello considera gli effetti di accumulo e il trasporto della turbolenza, che in questo caso non è funzione solo delle condizioni locali del flusso. La velocità caratteristica si ricava dall'equazione di trasporto dell'energia cinetica della turbolenza k, come segue:

$$u = k^{\frac{1}{2}}$$

• Modelli a due equazioni: utilizzano due equazioni per la descrizione di lunghezza caratteristica e velocità caratteristica. All'equazione di trasporto utilizzata per la descrizione della velocità si associa una seconda equazione che può descrivere, oltre alla l, anche altre proprietà del fluido. Infatti la derivazione del termine di lunghezza caratteristica si ricava dal seguente prodotto:

$$\phi = k^{\alpha} l^{\beta}$$

Il termine  $\phi$  si ricava in funzione del differente valore attribuito agli esponenti  $\alpha$  e  $\beta$ , come mostrato in tabella 3.1.

α	β	$\phi$	Alternative symbol to $\phi$	Interpretation of $\phi$
0	1	l	l	Length scale
1	-2	$k/l^2$	ω	Vorticity scale
1/2	-1	$k^{1/2}/l$	f	Frequency scale
-1/2	1	$k^{-1/2}l$	τ	Timescale
3/2	-1	$k^{3/2}/l$	ε	Dissipation rate

**Tabella 4.1:** differenti valori di  $\alpha$  e  $\beta$  e le relative proprietà

Tale criterio permette di ricavare diversi modelli a due equazioni, in funziona di quale proprietà viene indagata al fine della valutazione della viscosità turbolenza. I modelli di maggiore interesse ed utilizzo in ambito ingegneristico sono il modello  $k - \epsilon$  ed il modello  $k - \omega$ . Il primo viene descritto nel dettaglio nel successivo paragrafo in quanto è stato scelto per l'implementazione delle simulazioni fluidodinamiche di questo lavoro di tesi; il modello  $k - \omega$  utilizza la dissipazione specifica  $\omega$  come seconda equazione nella risoluzione. Non è di

particolare interesse in questa trattazione in quanto performa bene per flussi con bassi valori di *Re* ed in corrispondenza della parete. Ha un ulteriore vantaggio, non necessita di funzioni di parete, ma restituisce buoni risultati quando si riesce ad avere una griglia di calcolo molto fine nei pressi della parete.



Figura 4.4: Panoramica dei modelli turbolenti

#### 4.3.1 Modello k- $\epsilon$

Tra i modelli che fanno uso della viscosità turbolenta, quello che ha avuto maggior successo ed è considerato di riferimento per gli studi sulla turbolenza è sicuramente il modello k- $\epsilon$ . Questo modello prevede la descrizione della viscosità turbolenta come segue:

$$\upsilon_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{4.7}$$

Ovvero, come precedentemente esposto, risulta essere proporzionale al prodotto di velocità e lunghezza caratteristica, ma espressa in funzione di  $k \in \epsilon$ .

L' energia cinetica turbolenta k si ottiene dalla risoluzione della seguente equazione di trasporto:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \langle U_j \rangle \frac{\partial k}{\partial x_j} = \nu_T \left[ \left( \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} \right] - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$
(4.8)

dove la risoluzione è resa possibile dal necessario utilizzo di ipotesi di chiusura per alcuni termini dell'equazione. In particolare, per il termine di produzione turbolenta, dovuto agli sforzi di Reynolds che sottraggono energia al moto medio si utilizza l'approssimazione di Boussinesq; per la dissipazione  $\epsilon$ , si utilizza una nuova equazione di trasporto (4.9); il termine diffusivo è risolto introducendo la viscosità turbolenta  $\nu_T$  nella forma (4.7). La risoluzione dell'equazione prevede quindi il calcolo di  $\epsilon$  e  $\nu_T$  e la stima del numero di Prandtl  $\sigma_k$ .

La definizione del tesso di dissipazione  $\epsilon$  si ottiene invece come espresso di seguito:

$$\frac{\partial\varepsilon}{\partial t} + \langle U_j \rangle \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \nu_T \frac{\varepsilon}{k} \left[ \left( \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right]$$
(4.9)

Il modello k- $\epsilon$  è molto popolare per la sua semplicità e robustezza numerica, ma non sempre è in grado di fornire soluzione accurate. Inoltre, quest'ultimo performa molto bene per valori di Re elevati, pertanto necessita di una modellizzazione ulteriore quando il flusso incontra una parete solida, dove gli effetti viscosi dominano su quelli inerziali. Per contro, esso non è in grado di descrivere nella maniera più accurata flussi con elevate curvature, asimmetrie e brusche accelerazioni, né tantomeno con bassi valori di Reynolods.

A tal proposito, si sono sviluppate delle varianti del modello al fine di migliorare l'accuratezza di calcolo per una più vasta gamma di casi applicativi. Questi sono:

Modello k - ε RNG (Re-Normalization Group): differisce dal modello standard in quanto presenta l'aggiunta di un termine sorgente nell'equazione della dissipazione ε: l'aumento o la diminuzione è funzione della dimensione dei vortici, quindi nella modellizzazione si tiene conto di tutte le scale della turbolenza. Si ottiene una migliore accuratezza di calcolo per flussi vorticosi, flussi soggetti a distacco da parate solida o laddove sono presenti zone di ricircolo. Pertanto, come si vedrà nel capitolo 5, questa variante del modello è stata utilizzata per l'implementazione delle simulazioni oggetto di studio nella presente trattazione.

Modello k – ε realizable: assicura, attraverso la variabile C<sub>μ</sub>, funzione locale del flusso, che le tensioni normali risultano sempre positive. Anche questo modello performa bene per flussi in rotazione.

#### 4.3.2 Modellazione di parete

Il flusso a contatto con la parete ha un comportamento molto differente e di fondamentale importanza nella risoluzione della turbolenza. A tal proposito, nella fluidodinamica computazione, se si utilizza un modello turbolento come quelli appena descritti, nella modellizzazione di ciò che avviene nei pressi di una parete solida bisogna considerare due approcci possibili:

- Funzione di parete: attraverso il calcolo della distanza adimensionale di parate<sup>1</sup> y<sup>+</sup> è possibile valutare la distanza necessaria affinché la prima cella della mesh ricada all'interno della regione logaritmica, in modo da evitare la modificazione dei modelli turbolenti. Questo approccio permette di ridurre notevolmente il costo computazione il quanto non c'è la necessità di risolvere ciò che avviene a ridosso della parete. È la soluzione utilizzata nella definizione delle simulazioni che segue nei capitoli successivi.
- Modellazione di parete migliorata: implica la risoluzione completa dell'inner layer, con conseguente aumento del costo computazionale, in quanto è necessaria una mesh molto fitta. Si suddivide la regione a contatto con la parete: nella regione di dominio della viscosità l'equazione della dissipazione è di forma algebrica; nella regione più distante da questa, si utilizza un modello a due equazione come descritto nei precedenti paragrafi. Si utilizzano quindi delle funzioni che tengono conto dello smorzamento causato dalla parete.

 $<sup>{}^{1}</sup>y^{+}$  è un parametro adimensionale dipendente dalla velocità e dlalla viscosità del fluido e dall' altezza di cella: identifica il sublayer in cui ogni cella si colloca. Il calcolo della  $y^{+}$  relativo alla geometria oggetto di studio è sviluppato al capitolo 5.1.2

# 5 Dispositivo idraulico e impianto sperimentale

Il presente capitolo descrive nel dettaglio i dispositivi idraulici oggetto di indagine, illustra l'apparato ed il protocollo sperimentale utilizzato per le prove di disinfezione effettuate nel laboratorio di Idraulica Giorgio Bidone, presso il Politecnico di Torino.

# 5.1 Dispositivo idraulico

L'azienda *Treelium*, in collaborazione con il Politecnico di Torino, ha fornito due dispositivi idraulici che sembrerebbero migliorare le caratteristiche fisiche dell'acqua ed ottenere una decontaminazione di quest'ultima[7]. In particolare, ha sottoposto a delle analisi due modelli differenti di dispositivo, ideati all'interno del proprio dipartimento di ricerca e sviluppo, per ottenere una loro caratterizzazione fluidodinamica. Nello specifico sono stati testati il modello OM02531 ed il modello PW00064: per semplicità di trattazione d'ora in poi saranno indicati rispettivamente come modello OM e modello PW. Qui di seguito si andrà a descrivere nel dettaglio i suddetti e si riporterà la caratterizzazione idraulica al fine di offrire una maggiore comprensione del principio di funzionamento.

### 5.1.1 Modello OM

Il Modello OM è un raccordo tubolare filettato in acciaio. Le filettature G 1"  $\frac{1}{4}$  femmina sia in ingresso che in uscita permettono di inserire il dispositivo all'interno di un circuito idraulico o eventualmente in mandata all'interno di una condotta. La geometria interna presenta una girante fissa in acciaio che termina all'imbocco di un restringimento di diametro 25 mm con successivo divergente a  $\alpha = 45^{\circ}$ . In particolare, la girante interna si compone di 20 elementi, ognuno dei quali ha uno spessore di 6 mm. Ogni elemento ha uno sfasamento di  $\alpha = 42,07^{\circ}$  rispetto al precedente a formare una spirale di passo costante con diametro di 38,8 mm. La

larghezza di ogni elemento è 14 mm, il che implica un forte impedimento al flusso in ingresso al dispositivo, andando ad occupare un terzo della sezione trasversale del flusso.





**Figura 5.1:** In alto: vista prospettica del modello M. In basso: vista frontale e laterale della girante. Misure in mm.

### 5.1.2 Modello PW

Il modello PW ha una configurazione del tutto simile ma differisce dal modello OM per diametro e geometria interna. In particolare, le filettature femmina sono G 1", il diametro entro cui scorre il fluido è 28 mm e la girante presenta un passo differente. Al fondo non è presente nessun restringimento: una leggera diminuzione di diametro consente alla girante di rimane in una posizione fissa. Nello specifico, la girante si compone di 24 elementi, di spessore pari a 7 mm, per una lunghezza totale di 168mm, risultando maggiore della lunghezza di quella del dispositivo OM. La larghezza di

ogni elemento è dimezzata ed è pari a 7 mm. Lo sfasamento tra elementi successivi è di 28,95°. Questa configurazione permette una movimentazione del fluido più efficiente.





**Figura 5.2:** In alto: vista prospettica del modello PW. In basso: vista frontale e laterale della girante. Misure in mm.

#### 5.1.3 Caratterizzazione idraulica

Entrambi i modelli sono stati caratterizzati idraulicamente, ovvero, in funzione di portate crescenti, sono stati valutati i parametri idrodinamici ritenuti più significativi per una maggiore comprensione dei fenomeni coinvolti. Per la caratterizzazione idraulica, si è fatta variare la pressione in ingresso al dispositivo per step successivi di 0,25 bar. Tale aumento graduale è stato fornito tramite l'aumento della frequenza di rotazione della pompa; non appena il manometro risultava stabile, si procedeva ad acquisire i valori di velocità e portata. Per far fronte ad eventuali errori di misurazioni, per ogni intervallo di pressione (da 0,5 bar a 3,5 bar) si sono acquisiti cinquanta valori di portata istantanea e la media di questi è stato utilizzato come valore indicativo. La velocità si è ottenuta tenendo conto della sezione disponibile in ingresso alla girante; ovvero la porta è stata divisa per l'area della sezione del dispostivo a cui è stata sotratto l'area di ingombro della girante. Per una trattazione più esaustiva si è ritenuto opportuno valutare alcuni parametri adimensionali come il numero di Reynolds (Re) ed il numero di cavitazione ( $\sigma_c$ ), per valutare i potenziali fenomeni coinvolti. Bisogna considerare che i valori ottenuti fanno riferimo a grandezze misurate all'imbocco del dispositivo, in quanto non vi era la possibilità di ottenere misurazioni di ciò che accadeva all'interno. Si tratta di una fase prelimare di studio, ma nonostante ciò si può evidenziare una netta dissomiglianza di tra i valori ottenuti per i due diversi dispositivi.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti.

Hz	P1[bar]	$Q[l/s]^*$	Vm [m/s]	$\mathbf{Re}$	$\sigma_{\mathbf{c}}$
17,7	$^{0,5}$	$0,\!512$	0,789	34432	$310,\!85$
$21,\!3$	0,75	$0,\!613$	0,946	41260	$216,\!48$
24,7	1	0,710	1,094	47740	161,70
27,7	$1,\!25$	0,798	1,231	53700	$127,\!80$
$_{30,5}$	$1,\!5$	$0,\!837$	$1,\!291$	56322	$116,\!18$
32,7	1,75	0,791	1,219	53175	$130,\!33$
35	2	0,814	1,256	54776	$122,\!83$
$37,\!3$	$2,\!25$	$0,\!988$	1,523	66460	83,44
39,4	$^{2,5}$	1,161	1,790	78101	$60,\!42$
41,3	2,75	1,203	1,854	80890	56,32
43,4	3	1,274	1,964	85664	50,22
45,1	$3,\!25$	1,170	1,804	78687	$59,\!52$
46,7	$^{3,5}$	$1,\!357$	2,093	91299	44,21

Tabella 5.1: Caratterizzazione idraulica modello OM

Hz	P1[bar]	$Q[l/s]^*$	Vm [m/s]	Re	$\sigma_{\mathbf{c}}$
20	$0,\!5$	0,910	2,167	67884	40,77
25,2	0,75	1,340	$3,\!192$	99984	$18,\!79$
$29,\!5$	1	$1,\!497$	3,567	111722	$15,\!05$
32,7	$1,\!25$	$1,\!651$	3,931	123115	$12,\!39$
36	1,5	$1,\!879$	4,476	140192	$9,\!56$
38,9	1,75	$1,\!971$	$4,\!693$	146992	8,69
42	2	2,043	4,868	152451	8,08
44,3	$2,\!25$	2,211	5,265	164900	$6,\!91$
47	$^{2,5}$	$2,\!295$	$5,\!466$	171209	$6,\!41$
49,3	2,75	$2,\!400$	5,718	179077	$5,\!86$
$51,\!3$	3	2,530	6,027	188777	5,27
$53,\!9$	$3,\!25$	2,691	6,409	200715	4,66
56,7	$^{3,5}$	2,790	$6,\!647$	208177	4,34

Tabella 5.2: Caratterizzazione idraulica modello PW

La valutazione della portata in funzione di pressioni crescenti in ingresso al dispositivo (figura 5.3), permettono di dedurre alcune peculiarità dei dispositivi oggetto di studio. In particolare, nella caratterizzazione del modello OM si riscontra una forte instabilità: i valori di portata riscontrati non sono congrui con i risultati attesi. Le due curve differiscono, si riscontra una maggiore efficienza nel modello PW, dove le perdite di carico sono decisamente minori.

Inoltre, se si analizza l'andamento del numero di cavitazione in funzione di Reynolds crescenti(figura 5.4), si evince come le grandezze fluidodinamiche (portata, pressione) riscontrate nel dispostivo OM risultano essere eccessivamente distanti dalle condizioni necessarie affinché si possa genereare cavitazione.



Figura 5.3: Andamento della portata in funzione della pressione operativa



Figura 5.4: Andamento del numero di cavitazione in funzione di Reynolds

# 5.2 Apparato sperimentale

Il circuito sperimentale utilizzato in questi test permette la circolazione in continuo di un volume prestabilito di acqua e comprende tutti gli equipaggiamenti, come schematizzato in figura 5.5.



Figura 5.5: Schematizzazione dell'apparato sperimentale. Vista frontale dell'impianto.

L'apparato è caratterizzato da alcuni tratti di tubazione in acciaio inox 316 raccordati mediante attacchi maschio femmina e da alcune sezioni composte di tubi flessibili trasparenti in PVC. Un serbatoio cilindrico in polietilene assicura lo stoccaggio di un volume noto di acqua. L'assemblaggio della pompa presenta attacchi flangiati sia a monte che a valle. La scelta di questa configurazione è dettata da un maggior controllo sull'impianto: la presenza di valvole a 3 vie è stata necessaria sia per assicurarsi la fuoriuscita di tutta l'acqua al termine di ogni prova, sia per una corretta esecuzione dei cicli di risciacquo tra le diverse prove. Inoltre, si è ritenuta necessaria l'istallazione della valvola V4 (figura 5.5) per poter eseguire il prelievo dei campioni oggetto di indagine.

# 5.2.1 Principio di funzionamento

Si inserisce un volume prestabilito di acqua dalla rete idrica all'interno del serbatoio. Noto il diametro del serbatoio cilindrico, la misura del volume è effettuata attraverso una scala graduata presente sul serbatoio trasparente: il pelo libero dell'acqua indica il volume raggiunto.

La movimentazione dell'acqua all'interno della condotta è garantita dall'azionamento della pompa centrifuga verticale situata al di sotto del pelo libero dell'acqua. Questa configurazione assicura il pescaggio continuo e impedisce di immagazzinare aria nel circuito. Tuttavia, prima dell'inizio di ogni prova, l'eventuale presenza di aria all'interno della condotta viene evacuata attraverso la valvola di sfiato presente sulla pompa e dalla valvole a tre vie V3.

L'inverter collegato alla pompa permette di variare la velocità, sia in fase di accensione che durante l'intero periodo di funzionamento, aumentando la frequenza di rotazione della girante interna. Di conseguenza ciò permette di aumentare o diminuire la portata nel circuito. Un flussimetro ad ultrasuoni misura i valori di portata e velocità istantanea; due manometri differenziali, uno a monte, uno a valle del dispositivo, misurano rispettivamente la pressione in ingresso al dispositivo e quella in uscita per valutare, oltre alla pressione operativa della condotta, le perdite di carico indotte dal dispositivo.

Il serbatoio viene riempito attraverso un tubo flessibile direttamente collegato alla rete idrica. Lo svuotamento dell'impianto a termine di ogni singola prova avviene all'interno di un serbatoio supplementare, dove l'acqua che potrebbe contenere contaminazioni viene preventivamente disinfettata prima di essere scaricata nelle reti fognarie.

# 5.3 Procedura sperimentale test microbiologici

Tutte le prove sono state effettuate con una procedura standard affinché fornissero una reale comparazione sull'efficienza di disinfezione dei due dispositivi. Ognuno di questi test ha inoltre un "rapporto di prova" che ne riassume tutti i parametri utili alla descrizione univoca della stessa.

Innanzitutto, sono stati effettuati dei test preliminari, senza l'utilizzo di nessun dispositivo disinfettante al fine di appurare che il solo impianto istallato non ha alcun poter di disinfezione.

L'inizio del test prevede la misurazione del cloro residuo(mg/l) all'interno dell'acqua che sarà utilizzata nel circuito. La rilevazione avviene tramite la raccolta di un campione in una cuvetta: si inserisce all'interno una pastiglia di reagente (D.P.D. 1<sup>2</sup>) che alla presenza di cloro residuo reagisce con esso dando al liquido una colorazione più o meno intensa dal rosa al rosso violaceo. Un fonometro permette di leggere a video la concentrazione di cloro residuo, correlando la radiazione emessa dal campione, funzione della colorazione acquisita, con la concentrazione dell'elemento. La misurazione del cloro risulta sempre necessaria per la validazione del test in quanto, come è noto, ha potere disinfettante, quindi una presenza all'interno dell'impianto implica un'errata valutazione sull'efficienza di rimozione del dispositivo.

Una volta effettuata tale verifica, si inserisce l'inoculo contenente colonie di Escherichia coli, precedentemente stipato ad una temperatura di  $4^{\circ}C$ , e si procede al mescolamento attraverso l'accensione della pompa con una frequenza molto bassa al fine di rimescolare i batteri all'interno di tutto il volume. Dopo di che si effettua il primo prelievo che permetterà di valutare la concentrazione iniziale di escherichia coli all'interno dell'impianto.

Successivamente si imposta la frequenza necessaria alla pompa per fornire una determinata pressione in ingresso al dispositivo e si procede all'avviamento di quest'ultima. Parallelamente si aziona un timer sveglia per poter prelevare i campioni da questo punto in poi con una frequenza di un prelievo ogni dieci minuti. Prima di

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>D.P.D. (dietil-p-fenildiamina): molecola selettiva nella reazione con il cloro libero attivo.

ogni prelievo, la valvola V4 viene fiammata con un bruciatore al fine di rimuovere eventuali tracce di Escherichia coli del prelievo precedente. La procedura si ripete per cinque prelievi successivi per un totale di cinquanta minuti. Per una maggiore accuratezza di misura, non considerando il prelievo al tempo zero, antecedente all'inizio effettivo del test, per il campione uno, tre e cinque si effettuano due prelievi per avere una maggiore affidabilità di misura. Agli stessi campioni si misura anche la temperatura, per valutare se l'azionamento del dispositivo produce un surriscaldamento del liquido. I campioni sotto esame, non appena il test è terminato vengono stipati in apposite sacche termiche, per evitare brusche variazioni di temperatura che potrebbero compromette la riuscita delle analisi, e trasferiti presso un laboratorio di analisi microbiologiche.

# 6 Simulazioni fluidodinamiche

Il presente capitolo espone l'iter di progettazione e sviluppo che ha portato all'esatta definizione delle simulazioni numeriche. In particolare, se ne illustrano i passaggi chiave per una corretta implementazione.

Le simulazioni si sono ritenute necessarie al fine di indagare il principio di funzionamento dei dispositivi ed evidenziare l'eventuale analogia tra disinfezione e caratteristiche fluidodinamiche dei dispositivi oggetto di indagine. Per la strutturazione delle simulazioni si è utilizzato il software *Fluent*, di proprietà ANSYS, azienda innovativa nell'ambito dello sviluppo di software riguardanti questo settore.

# 6.1 Definizione dominio fluido

Il risolutore Fluent si occupa della risoluzione delle equazioni che gli vengono imposte, ma la parte di progettazione inizia con la definizione della geometria entro cui il fluido scorre. Successivamente risulta fondamentale discretizzare il dominio generato perché come vedremo al paragrafo 6.1.2, il software nella risoluzione delle equazioni differenziali utilizza il metodo ai volumi finiti.

### 6.1.1 Generazione Geometria

Il dominio fluido è rappresentato dalla geometria tridimensionale entro cui il liquido scorre quando si trova all'interno del dispositivo. Per la creazione di quest'ultimo, si è fatto uso di Solidworks (2019). al fine di ottenere la configurazione voluta. Per la costruzione del dominio, attraverso le tavole CAD, si sono estrapolate le misure necessarie alla costruzione della geometria descritte nei paragrafi 5.1.1 e 5.1.2 ed introducono le principali dimensioni caratteristiche dei dispostivi. In figura 6.1 e 6.2, si mostrano i volumi ottenuti a seguito della modellazione tridimensionale effettuata. Il dominio finale presenta due sezioni aggiuntive: una di lunghezza pari al diametro a monte della girante, una a valle di lunghezza pari a due volte quella del

diametro. Tale modifica si è ritenuta opportuna per permettere al flusso di equalizzarsi in ingresso e in uscita al fine di non creare problemi nella risoluzione numerica e permettere anche un'analisi del flusso a valle della girante.

Nonostante la complessità delle geometrie, si è ritenuto opportuno costruire modelli il più possibile fedeli a quelle che sono le misure originali, evitando semplificazioni che potevano far discostare il comportamento del modello dal dispositivo reale. L'assieme ottenuto su Solidworks è stato convertito in un formato opportuno (.STEP), prima di essere importato sulla workbench di ANSYS. Da qui è possibile iniziare il processo di discretizzazione della geometria. Di seguito sono mostrati i domini ottenuti.



Figura 6.1: Dominio fluido realizzato con Solidworks. Geometria 3D e sezione modello OM.



Figura 6.2: Dominio fluido realizzato con Solidworks. Geometria 3D e sezione modello PW.

## 6.1.2 Discretizzazione Dominio

L'analisi numerica attraverso il metodo ai volumi finiti, così come tutte le altre tecniche che fanno utilizzo di equazioni discrete necessitano di una discretizzazione del dominio.

Tale metodo prevede la risoluzione delle equazioni in postazioni discrete su una geometria meshata. Con il termine mesh o griglia si identifica l'insieme di nodi, facce e vertici con cui si suddivide il dominio di calcolo. Questa suddivisione del volume identifica le celle o gli elementi in cui risolvere le equazioni di conservazione. Per ogni cella, si valutano i flussi attraverso le superfici di ogni volumetto. Dato che il flusso che entra in un dato volume è uguale a quello che esce dal volume adiacente, tale metodo è conservativo. Il vantaggio che ne deriva è dettato dal fatto che questo metodo è facilmente applicabile anche a mesh non strutturate. Infatti, le celle possono essere triangolari, quadrilatere o si possono formare griglie non strutturate<sup>3</sup> al fine di avere un maggiore controllo sul dominio fluido.

La suddivisione del volume di calcolo in volumi infinitesimi implica avere una rappresentazione discreta del problema in un numero definito di nodi o elementi (a seconda dei metodi di risoluzione utilizzati) quindi si ha un'approssimazione del fenomeno continuo nello spazio. Infatti, la definizione della mesh permette di valutare quali sono i punti noti dove le equazioni sono risolte. Questo implica che la determinazione di una corretta griglia di calcolo è fondamentale per una corretta simulazione del fenomeno reale poiché più è grande il numero di celle, più si riesce ad avere volumetti infinitesimi e una descrizione praticamente continua, in modo da avere una soluzione più accurata possibile. Per contro, un numero di celle grande implica un notevole aumento del costo computazionale, infatti il tempo di calcolo si dilata. Risulta fondamentale trovare il giusto compromesso tra tempo di calcolo e accuratezza della soluzione. Questo è possibile attuarlo andando a variare le dimensioni di cella in funzione dell'importanza che queste assumono nella descrizione del flusso. Ovvero, celle adiacenti a superfici solide quali pareti o facciate della girante hanno un ruolo fondamentale, perché è da lì che si sviluppa la turbolenza, quindi in quelle zone è importante avere una mesh più accurata che in altre. Infatti, in queste aeree le quantità fluidodinamiche hanno gradienti spaziali molto grandi e quindi necessitano di una mesh fitta per riuscire a rappresentare al meglio il fenomeno senza perdere troppe informazioni. Questo approccio permette di avere una griglia di calcolo con un numero di celle ragionevole ma che allo stesso tempo sia in grado di risolvere tutte le singolarità che il fluido presenta. Quindi è importante capire come descrivere le condizioni al contorno sulla parete e bisogna conoscere le caratteristiche del fluido al fine di poter estrapolare i dati necessari alla generazione di una mesh congruente con quelli che dovranno essere i risultati attesi.

Nella scelta dell'approccio da seguire, bisogna andare ad analizzare cose avviene nello strato limite e capire quanto questo si estende dalla parete. Ad alti numeri di

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Le celle sono organizzate in modo arbitrario. La connessione tra celle adiacenti è irregolare, ma ciò permette al calcolatore di risolvere qualsiasi tipologia di elemento presente nel dominio.

Reynolds (caso in esame), troviamo uno strato limite turbolento caratterizzato da flussi vorticosi instabili. Al fine di avere una CFD che rispecchi quello che è il reale comportamento del flusso è necessario avere un numero ragionevole di punti all'interno dello strato limite. Per tanto bisogna stimarne lo spessore nelle condizioni al contorno descritte al capitolo 5. La struttura dello strato limite può essere studiata a partire da un'analisi dimensionale.

Si possono allora identificare due regioni (figura 6.3):

- Inner layer
- Outer layer

Nella scelta della dimensione minima di cella bisogna considerare l'estensione dell'inner layer ed in particolare dei sub-strati associati a quest'ultimo.



**Figura 6.3:** A destra: strato limite in un flusso turbolento. A sinistra: sottostrati dell'inner layer[1].

La suddivisione dell'inner layer è effettuata sulla base di quale componente degli sforzi tangenziali (6.1) ha maggiore effetto in quella regione.

$$\tau_{xy} = \frac{d \langle U_x \rangle}{dy} - \rho \langle u_i u_j \rangle \tag{6.1}$$

Per la determinazione delle dimensioni di questi substrati si fa uso di variabili adimensionali di parete funzione degli stress viscosi e turbolenti esistenti nello strato. Infatti, si introduce la velocità d'attrito come scala caratteristica di velocità:

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{6.2}$$

da qui, si definisce come scala caratteristica della lunghezza:

$$l^* = \frac{\mu}{\rho \cdot U^*} \tag{6.3}$$

Le grandezze ricavate, permettono di introdurre il parametro adimensionale  $y^+$ , definito come la distanza adimensionale dalla parete:

$$y^{+} = \frac{y}{l^{*}} = \frac{y \cdot U^{*} \cdot \rho}{\mu} \tag{6.4}$$

Sulla base di esperimenti condotti, è di uso comune classificare gli strati dell'inner layer sulla base della distanza adimensionale di parete, come segue[1]:

- Sottostrato viscoso  $0 < y^+ < 5;$
- Buffer sub-layer  $5 < y^+ < 30;$
- Strato completamente turbolento  $30 < y^+ < 400;$

La dimensione minima di cella è stata calcolata considerando i seguenti parametri:

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot d}{\mu} \tag{6.5}$$

$$y^{+} = \frac{\rho \cdot U^{*}y}{\mu} \rightarrow y = \frac{y^{+} \mu}{U^{*}\rho}$$

$$(6.6)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho \ U \tag{6.7}$$

dove,  $\rho = 1000 kg/m^3$  rappresenta la densità del fluido,  $\mu = 8.9E - 4Pa/s$  è la viscosità dinamica e  $C_f = 0.079 Re^{-0.25}$  valore empirico ricavato per flussi in condotte[2]. Per ottenere la distanza y, si imposta una  $y^+$  target, funzione di dove si vuole posizionare la prima cella. Il calcolo della distanza minima di cella è stato ottenuto anche mediate l'utilizzo di un calcolatore online al fine di appurare la correttezza dei risultati ottenuti.

							Calcolo	empirico	CFD (	Online
							Dimension	e cella [m]	Dimension	e cella [m]
	P[bar]	Q [l/s]	Re	Cf	$ au_{\mathrm{W}}$	U*	Y + = 1	Y+=30	Y + = 1	Y+=30
MODELLO OM	3	1,274	46510	0,0054	2,8677	0,0536	1,67E-05	5,01E-04	1,40E-05	4,30E-04
MODELLO PW	3	2,530	128687	0,0042	8,5690	0,0926	9,66E-06	2,90E-04	1,95E-05	3,80E-04

 Tabella 6.1:
 Calcolo della dimensione minima di cella.

Come si evince dai risultati riassunti in tabella 6.1, se si vuole avere una mesh che permetta la risoluzione anche del sottostrato viscoso, bisogna avere una dimensione di cella molto piccola con conseguente numero di celle totale troppo grande da gestire in relazione a memoria e potenza del calcolatore. Per questo, si è scelto di adottare una dimensione di cella maggiore ed utilizzare un modello turbolento che prevede l'utilizzo di una funzione di parete, come descritto nel capitolo 4, per modellizzare quello che avviene all'interno dello strato viscoso. Pertanto, la dimensione della prima cella deve essere tale da collocarsi all'intero dello strato turbolento, quindi  $y^+$  deve essere compresa tra 30 e 400. Le dimensioni delle altre celle del dominio sono formalizzate a partire da quest'ultima. Per migliorare la struttura della mesh si è impostato una dimensione di cella non maggiore di 0,7 mm, attraverso il *body sizing*. Inoltre, si è ritenuto opportuno andare a migliorare la griglia di calcolo sulla pareti e sulla girante attraverso lo strumento Inflation.

La definizione della mesh definitiva è stata ottenuta effettuando alcuni test intermedi al fine di ottimizzare il processo di calcolo. Di seguito, sono mostrati alcuni dettagli delle due griglie di calcolo ottenute.

Tabella 6.2: Statistiche delle mesh per i due modelli

	$\mathbf{N}^{\circ}$ di nodi	$\mathbf{N}^{\circ}$ di elementi
Modello OM	2017167	7191242
Modello PW	1366315	4022330



**Figura 6.4:** In alto: dettaglio mesh su piano mediano. In basso: dettaglio mesh piano secante la girante. Discretizzazione modello OM



**Figura 6.5:** In alto: dettaglio mesh su piano mediano. In basso: dettaglio mesh piano secante la girante. Discretizzazione modello PW

# 6.2 Solving

La fase di calcolo o Solving può sintetizzarsi come l'insieme di tutti i settaggi da inserirsi all'interno del software *Fluent*, al fine di ottenere la buona riuscita della simulazione numerica. Si è definito il fluido incomprimibile e si sono effettuate le simulazioni in regime stazionario. La complessità del flusso e la forte turbolenza indotta non hanno permesso di eseguire simulazioni in transitorio per un alto costo computazionale. Di seguito sono mostrati i settaggi utilizzati durante la definizione delle simulazioni.

#### 6.2.1 Modello turbolento

Una delle scelte fondamentali quando si affronta un'analisi CFD riguarda il modello di turbolenza da utilizzare. Si è deciso di utilizzare il modello  $k - \epsilon$ , in quanto da un punto di vista teorico, è un modello usato per alti valori del numero di Reynolds, quindi per flussi turbolenti[1]. Inoltre, da un punto di vista pratico, si è visto come la risoluzione di parete prevede un costo computazionale troppo elevato, quindi si è scelto una  $y^+$  compresa tra 30 e 300. In questo intervallo, ovvero facendo rientrare la prima cella nel sublayer turbolento, il modello  $k - \epsilon$  è indicato per avere una buona accuratezza di misura. Nello specifico, vista la natura vorticosa (*swirling*) del flusso all'interno del dispositivo, generata dalla presenza della girante, si è ritenuto utilizzare una variante del modello classico, il k-  $\epsilon$  RNG (Re-Normalization Group). Questa normalizzazione del modello, come ampiamente esposto nel capitolo 4, permette di ottenere una maggiore accuratezza di soluzione per flussi vorticosi in cui può verificarsi il distacco del fluido dalla parete. Per la modellazione di parete si è ritenuto opportuno utilizzare una funzione di parete standard. Altri settaggi inerenti all'implementazione del modello non sono stati modificati.



Figura 6.6: Settaggi modello turbolento.

## 6.2.2 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno permettono di determinare univocamente la soluzione del sistema adottato. Esse descrivono le variabili di flusso, nel caso in esame velocità e pressione e si applicano alle superficie del dominio fluido. Tipicamente sono necessarie almeno tre condizioni al contorno per definire ciò che avviene all'interno di un dispositivo come quello in esame:

- Condizioni in ingresso (*inlet*);
- Condizioni in uscita (*outlet*);
- Condizioni di parete solida (*wall e girante*);

La condizione di ingresso è stata impostata attraverso la definizione della pressione relativa e della velocità. In uscita si è imposta la condizione di pressione atmosferica. La scelta di queste condizioni è dettata dai valori ottenuti durante i test in laboratorio. Nello specifico si sono simulate le condizioni che prevedevano 3 bar di pressione in ingresso e la relativa velocità associata. I valori di riferimento sono riportati nel Capitolo 5 in tabella 5.1 e 5.2. Infatti, si è preferito ripetere le condizioni di laboratorio, piuttosto che inserire una condizione di efflusso o imporre un gradiente tra monte e valle del dispositivo. Le condizioni di parete solida non sono state modificate, infatti prevedono la condizione di *no slip*. Ovvero, la parete risulta fissa rispetto al moto del fluido, non sussistono velocità relative.

#### 6.2.3 Metodi di risoluzione

La determinazione del risultato di ogni equazione nella singola cella è da attribuirsi ai metodi di calcolo utilizzati. Inizialmente si è definito lo schema di calcolo per la risoluzione dei campi di moto e pressione. Si è utilizzato il metodo SIMPLE: L'algoritmo risolve le equazioni in modo sequenziale, non accoppiato, ma utilizza una relazione tra velocità e pressione per imporre la conservazione della massa ed ottenere il campo di pressione. La definizione della discretizzazione spaziale dei termini convettivi dell'equazione di trasporto (*spatial discretization*) è stata settata come mostrato in figura 6.7. In particolare, si è utilizzato il metodo Least Squares Cell Based, per la valutazione del gradiente: la soluzione si assume variare linearmente tra centroidi di celle adiacenti. Si ritiene opportuno utilizzare tale metodo in quanto permette di avere una maggiore accuratezza di calcolo per mesh non strutturate con meno costo computazionale di altri algoritmi altrettanto accurati come quello basato sui nodi (Green-Gauss Node-Based). Per le altre grandezze si è richiesta maggiore accuratezza nella discretizzazione della pressione, in quanto era la grandezza che destava maggiore interesse ai fini dell'indagine, le altre sono state definite come mostrato in figura 6.7.

Task Page ×
Solution Methods
Pressure-Velocity Coupling
Scheme
SIMPLE
Spatial Discretization
Gradient
Least Squares Cell Based 🔹
Pressure
Second Order 👻
Momentum
First Order Upwind 👻
Turbulent Kinetic Energy
First Order Upwind 👻
Turbulent Dissipation Rate
First Order Upwind
Transient Formulation
Non-Iterative Time Advancement
Frozen Flux Formulation
Pseudo Transient
Warped-Face Gradient Correction
High Order Term Relaxation Options
Default Report Poor Quality Elements

Figura 6.7: Metodi di calcolo utilizzati.

### 6.2.4 Convergenza

La definizione di convergenza è da identificarsi nella verifica di alcune condizioni al fine di appurare che il calcolo iterativo effettuato converge alla soluzione reale. Ovvero, il risultato delle iterazioni è sufficiente a descrivere il fenomeno reale. Generalmente la condizione di convergenza è controllata attraverso il monitoraggio dei residui[1]. Questi rappresentano per ogni equazione imposta, la differenza tra due iterazioni successive. Quando questi si assestano su valori che risultano costanti nel tempo, la soluzione può dirsi convergente. Tuttavia, il solo monitoraggio dei residui può risultare non sufficiente per garantire la correttezza della simulazione ottenuta. Si possono valutare che i bilanci di massa siano pari a zero, condizione difficilmente verificabile per flussi che vista la geometria tendono a creare *back flow*. Si consiglia inoltre il monitoraggio di parametri fluidodinamici lungo superficie note, come potrebbero essere la velocità lungo il piano mediano o la valutazione della velocità tangenziale in output. Importante sottolineare come di solito non sia difficile stabilire se i residui ottenuti possono considerarsi accettabili in riferimento agli obbiettivi da perseguire e al senso fisico del sistema studiato.



Figura 6.8: Andamento dei residui. Simulazione Modello OM.



Figura 6.9: Andamento dei residui. Simulazione modello PW.

# 7 Analisi dei risultati

Il presente capitolo espone e descrive quelli che sono i risultati ottenuti nel presente lavoro di tesi. Si mostrano gli esiti delle prove microbiologiche e delle simulazioni numeriche. Si descrivono i parametri fluidodinamici ritenuti importanti al fine di caratterizzare i due dispositivi oggetto di indagine. In particolare, dopo aver confrontato le prove microbiologiche si analizzano e confrontano campi di pressione e di velocità, si studia l'azione della turbolenza indotta dalla geometria dei dispositivi al fine di dare una spiegazione fluidodinamica sulle differenze efficienze di prestazione riscontrate nei due dispositivi idraulici.

# 7.1 Risultati delle analisi microbiologiche

I campioni prelevati nel laboratorio idraulico del Politecnico di Torino, durante gli esperimenti microbiologici descritti nel capitolo 5, sono stati trasportati presso il centro specializzato per le analisi microbiologiche ALCHIM (Chieri), dove sono trattati con procedure standardizzate dettate dall' *Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.* Nello specifico per la determinazione dell'Escherichia coli si è utilizzato il metodo APAT CNR 7030C, manuale 29/2003. Questa procedura permette di contare il numero delle colonie di Escherichia coli cresciute su una membrana posta su terreno colturale agarizzato addizionato con sostanze cromogene. Il procedimento è così composto: si filtra un'aliquota del campione, opportunamente diluito<sup>4</sup>, attraverso una membrana di esteri di cellulosa con porosità di 0,45  $\mu m$  di diametro; si pone la membrana sulla superficie di terreno colturale (C-EC Agar) e si procedere all'incubazione a  $44\pm1^{\circ}C$  per 18-24 ore. Il ceppo Escherichia coli sviluppa colonie tipiche di colore verde-blu che risultano fluorescenti alla luce ultravioletta. Le colonie atipiche crescono di colore biancastro o incolori. La concentrazione di

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Opportunamente diluito: il rapporto di diluizione è funzione della concertazione iniziale di E. coli. Esistono rapporti di diluizione standard per differiti tipologie di acqua da trattare.

Escherichia coli si calcola in base al numero di colonie contate nel terreno colturale, riportando il valore come Unità Formanti Colonia per 100 mL di campione (UFC/100 mL) [8].



Figura 7.1: Tipica piastrina per l'analisi dell'escherichia coli

I risultati ottenuti sono raccolti in un "diario esperimenti" che riassume tutte le prove effettuate. Per questa trattazione si ritiene opportuno mostrare i test più significativi, ovvero quelli che hanno prodotto un abbattimento della carica batterica per quanto riguarda il modello PW. Per il modello OM sono riportate le prove effettuate con le medesime caratteristiche fluidodinamiche del modello PW, ovvero stessa pressione operativa in ingresso al dispositivo. La scelta è dettata dal fatto che nelle simulazioni numeriche effettuate si sono utilizzati i medesimi parametri fluidodinamici. Quindi si effettua una comparazione tra l'eventuale abbattimento e la fluidodinamica del dispositivo, ma anche un confronto tra i due modelli oggetto di indagine. Inoltre, è bene ricordare che la pressione operativa utilizzata considerata è stata scelta in modo da rappresentare quella delle utenze urbane o comunque civili. Di seguito, sono mostrati i "rapporti di prova" con i relativi risultati delle analisi (tabella 7.1).
				Campione	E. coli	I.M.
					[u.f.c./100ml]	[u.f.c./100 ml]
1	Rapporto di Prova		<b>CN505</b>			
	Identificazione dispositivo	Modello OM	$\mathrm{ESP}~0~05$	ESP 0 05- c.0	-	-
	Lettura di cloro residuo [mg/l]		0,01	ESP 0 05- c.1a	40900	404
	Pressione a monte P1[bar]		3	ESP 0 05- c.1b	50900	451
	Temperatura [°C]	campione 1	25,9	ESP 0 05- c.2	46300	430
		campione 2	28,4	ESP 0 05- c.3a	34000	369
		campione 3	$_{30,3}$	ESP 0 05- c.3b	38000	390
	Volume acqua [l]		50	ESP 0 05- c.4	20400	286
	Velocit pompa [Hz]		40	ESP 0 05- c.5a	21000	290
	Frequenza acquisizione [min-1]		1/10	ESP 0 05- c.5b	22300	299
2	Rapporto di Prova		CP054			
	Identificazione dispositivo	Modello OM	ESP 1 07	ESP 1 07- c.0	0	>500
	Lettura di cloro residuo [mg/l]		0,01	ESP 1 07- c.1a	95	>500
	Pressione a monte P1[bar]		3	ESP 1 07- c.1b	116	>500
	Temperatura [°C]	campione 1	27,8	ESP 1 07- c.2	100	>500
		campione 2	30,2	ESP 1 07- c.3a	133	>500
		campione 3	33,2	ESP 1 07- c.3b	102	>500
	Volume acqua [l]		50	ESP 1 07- c.4	144	>500
	Velocit pompa [Hz]		43,2	ESP 1 07- c.5a	92	>500
	Frequenza acquisizione [min-1]		1/10	ESP 1 07- c.5b	106	>500
3	Rapporto di Prova		CP042			
	Identificazione dispositivo	Modello PW	ESP 1 05	ESP 1 05- c.0	1	>500
	Lettura di cloro residuo [mg/l]		0,02	ESP 1 05- c.1a	37	>500
	Pressione a monte P1[bar]		3	ESP 1 05- c.1b	0	>500
	Temperatura [°C]	campione 1	27,6	ESP 1 05- c.2	4	>500
		campione 2	33,1	ESP 1 05- c.3a	0	>500
		campione 3	_	ESP 1 05- c.3b	1	>500
	Volume acqua [l]		50	ESP 1 05- c.4	0	>500
	Velocit pompa [Hz]		52	ESP 1 05- c.5a	0	>500
	Frequenza acquisizione [min-1]		1/10	ESP 1 05- c.5b	0	>500
4	Rapporto di Prova		CP085			
	Identificazione dispositivo	Modello PW	ESP 1 10	ESP 1 10- c.0	0	8
	Lettura di cloro residuo [mg/l]		0.01	ESP 1 10- c.1a	74	42
	Pressione a monte P1[bar]		3	ESP 1 10- c.1b	79	29
	Temperatura [°C]	campione 1	27.8	ESP 1 10- c.2	95	73
		campione 2	30.2	ESP 1 10- c.3a	44	29
		campione 3	33.2	ESP 1 10- c.3b	38	86
	Volume acqua [1]	campione 9	50	ESP 1 10- c 4	0	43
			00		5	10

**Tabella 7.1:** Risultati delle analisi batteriologiche. L'incerta di misura (I.M.) rappresenta la presenza di eventuali batteri di fondo.

1/10

ESP 1 10- c.5b

0

52

Frequenza acquisizione [min-1]

Risulta importante sottolineare come i test effettuati per ogni singola configurazione, soprattutto per quelle che hanno evidenziato i risultati attesi, si sono ripetuti due volte al fine di appurare con certezza che la disinfezione sia stata opera del dispositivo e non di altri agenti esterni. In particolare, come si nota in tabella 7.1, durante la gran parte dei test effettuati all'interno del circuito era presente un'incertezza di misura rappresentata dalla presenza di altri batteri di fondo. Dopo diverse disinfezioni e risciacqui, la presenza di quest' ultimi è notevolmente diminuita ma l'efficacia nell'abbattimento è rimasta tale: la disinfezione in questo caso può effettivamente attribuirsi al dispositivo testato. Inoltre, il test CN505 presenta una concentrazione iniziale di E. coli di due ordini di grandezza maggiore rispetto alle altre prove effettuate. Questo è dovuto alla proliferazione batterica avvenuta all'interno dell'inoculo perché stipato per diversi giorni prima dell'utilizzo. Si può notare come a fine test, la concertazione finale di coliformi risulta dimezzata rispetto a quella iniziale ma questo è un argomento che esula da questa trattazione.



→ OM- prova 1 → OM - prova 2 → PW - prova 1 → PW - prova 2

Figura 7.2: Concentrazione normalizzata in funzione del tempo

Inoltre, in figura 7.2, si mostra l'andamento delle concentrazioni normalizzate con la concentrazione iniziale dell'inoculo, delle quattro prove descritte in tabella 7.1. È opportuno non riporte le concentrazioni riscontrate al tempo zero, in quanto questa misura è affetta da maggiore incertezza, dovuta allo scarso miscelamento dell'inoculo con l'iterno volume di fluido. Seppur con incertezze di misura, si visualizza la capacità di abbattimento della carica batterica. Infatti, le analisi dimostrano che il solo dispositivo in grado di apportare una disinfezione batterica ripetuta nel tempo risulta essere il modello PW. Per contro, il modello OM non presenta alcun andamento di interesse per quanto riguarda l'azione battericida.

Visti i risultati ottenuti, è doveroso inoltre ricordare che le analisi microbiologiche sono soggette a una incertezza di misura che può derivare da aspetti molto differenti: si lavora con i batteri, elementi vivi, sensibili alla temperatura, che necessitano di nutrimento per sostentarsi, e averne il completo controllo risulta molto difficile. Quello che risulta importante è l'analisi dei trend: nello specifico possiamo notare come nei rapporti di prova del modello PW, riportati in tabella 7.1, la costante di entrambi i test è il totale abbattimento dopo diversi passaggi all'interno del dispositivo, ovvero dopo 40 minuti di prova.

### 7.2 Risultati Simulazioni numeriche

Si riportano di seguito i risultati delle simulazioni ottenute. Al fine di una esaustiva comprensione dei fenomeni coinvolti si mostreranno parallelamente i comportamenti dei due dispostivi per dare prova delle differenze fluidodinamiche riscontrate. Si analizza inizialmente il campo di moto, si prosegue con la descrizione del campo di pressione. Si mostrano i legami tra questi e si descrive infine il ruolo della turbolenza

#### 7.2.1 Campo di moto

L'analisi del campo di moto nei due dispositivi ha mostrato evidenti dissomiglianze nel comportamento fluidodinamico. La geometria interna influisce sull'evoluzione del moto del fluido, infatti come si evince anche dai dati ottenuti nella caratterizzazione idraulica effettuata in laboratorio (tabella 5.1 e tabella 5.2), il modello OM ha delle perdite di carico più elevate, infatti a parità di pressione in ingresso, la velocità del fluido e quindi la portata risultano molto minori confrontate con il dispositivo PW.



Figura 7.3: Modulo della velocità, visualizzato mediante pathline.

In figura 7.3 sono rappresentate le linee di flusso del campo di moto medio e le diverse colorazioni rappresentano il modulo della velocità lungo tutto il dispositivo per avere innanzitutto una visione d'insieme di questi. In ingresso, i valori di velocità sono dettati dalle condizioni al contorno, quindi dai valori imposti e precedentemente ricavati attraverso la caratterizzazione idraulica svolta in laboratorio. Proseguendo l'analisi si incontrano le prime dissomiglianze: in particolare, il modello OM seppur presenta una girante più corta, il maggior ingombro delle sue palette (vedi paragrafo 5.1.1) crea maggiore ostacolo al flusso, quindi la velocità alla girante risulta inferiore rispetto al modello PW. I due flussi vorticosi che si generano all'imbocco della girante si "avvitano" con una curvatura imposta dalla stessa. A valle, i due flussi si ricongiungono poco prima del restringimento. Questa geometria non permette un deflusso agevole, anzi come si nota in figura 7.3, all'imbocco del restringimento il fluido è altamente instabile, in quanto i due flussi si uniscono dove la sezione disponibile è minore. Questa instabilità si è riscontrata anche a seguito della caratterizzazione idraulica effettuata in laboratorio, infatti nella misura effettuate, come riportato in tabella 5.1, si sono riscontrate evidenti fluttuazioni della portata al variare della pressione in ingresso. Inoltre, per entrambi i modelli, il flusso accelera sulle pareti formando centralmente una zona di ricircolo (back-flow) dove questo rallenta notevolmente, seppur le velocità raggiunte nei due dispositivi sono molto differenti ( $v_{max} = 18m/s$  per il modello PW,  $v_{max} = 9m/s$  per il modello OM). Per contro, la geometria del modello PW permette al flusso di accelerare notevolmente. In questa configurazione, la girante è utile alla generazione del flusso vorticoso, ma non ne ostacola il deflusso. La girante termina senza nessun restringimento finale e permette ai due flussi vorticosi che si avvitano di sfociare nel tubo a piena sezione attraverso un leggera rientranza. Questo leggera variazione di diametro, crea un distacco di vena del fluido e ne aumenta ulteriormente la velocità. Anche in questo caso, a valle della girante il flusso risulta maggiormente accelerato sulle pareti. Inoltre, risulta particolarmente importante appurare che in questa geometria i due flussi a valle della girante non risultano congiungersi, ma bensì continuano a mantenere velocità elevate lungo la parete del dispositivo.



Figura 7.4: Misura della velocita assiale lungo il piano mediano.

Inoltre, nella valutazione del campo di moto, è utile analizzare la velocità assiale $(V_y)$ del flusso per determinare zone di flusso inverso (*back-flow*) e zone dove si ha separazione di flusso (figura 7.4). Si è scelto di mostrare l'andamento di tale componente di velocità utilizzando il contour (mappa bidimensionale) lungo il piano mediano per avere la misura della grandezza lungo tutto il dispositivo ed apprezzarne le variazioni.

Questa prospettiva permette di chiarire il concetto precedentemente espresso per quanto riguarda il comportamento del flusso a valle dell'orifizio. È evidente come, per il modello OM, la velocità assiale risulta piuttosto costante, il fluido non supera mai  $V_y = 10m/s$ , si notano solo leggeri aumenti di velocità sulle pareti. Lungo tutta la girante, si mostrano forti zone di ricircolo, dovute al fluido che incontrando la girante rimane intrappolato tra gli elementi di quest'ultima. All'uscita dell'orifizio si ha una forte zona di ricircolo, dove le velocità assiali sono prossime a 0m/s.

Il modello PW mostra come la velocità, che in ingresso è impostata in funzione delle prove effettuate in laboratorio, pari a 4m/s, in uscita alla girante presenta valori in alcune zone anche quadruplicati. Inoltre, anche questo dispositivo risulta avere zone di ricircolo lungo tutto il perimetro della girante, ma il fattore importante risulta essere il forte gradiente spaziale di velocità lungo i gradini, dove zone di ricircolo  $(V_y < 0m/s)$  sono adiacenti a zone di alta velocità(V > 17m/s). In uscita, seppur i gradienti di velocità sono molto diversi, il comportamento non è dissimile, con zone di velocità maggiore sulle pareti del dispositivo rispetto alle zone interne, anche se la geometria a valle della girante è differente e non permette di valutare al meglio analogie e dissomiglianze. I valori che si sono analizzati permettono allora di comprendere meglio quello che è esposto nel seguente paragrafo relativo al campo di pressione.

#### 7.2.2 Campo di pressione

L' analisi del campo di pressione dei due dispositivi idraulici mostra risultati importanti ai fini della caratterizzazione dei due dispositivi, ma innanzitutto bisogna comprendere l'approccio utilizzato nella definizione dei fenomeni coinvolti. Nell'implementazione delle simulazioni si è utilizzato il modello k- $\epsilon$ , come descritto al capitolo 6, che è ampiamente utilizzato per simulare flussi turbolenti. Siccome i modelli di cavitazione (descrivono il cambiamento di fase) richiedono più condizioni al contorno e tempo computazionali e non sono molto utilizzati per flussi complessi, si è deciso di usare un espediente già adottato in studi precedenti[9]. L'intenzione è quella di valutare il campo di pressione, alla ricerca di pressioni assolute negative. A livello fisico, come è noto, non è possibile ottenere tale condizione, ma nella simulazione di un fluido monofase incomprimibile (caso in esame), la risoluzione numerica dell'equazione di Navier-Stokes per il gradiente di pressione può divenire negativo se non è ammissibile il passaggio di fase. Infatti, nella realtà quando è raggiunta la tensione di vapore, la pressione non si abbassa ulteriormente, ma si ha il passaggio di stato. Quindi le zone dove la  ${\cal P}_{ass} < 0$ possono essere considerate quelle in cui si ha cavitazione idrodinamica.

La figura 6.4 mostra le linee di flusso rappresentanti il valore locale della pressione assoluta. Avendo simulato quest'ultimi con le medesime pressioni in ingresso, questa risulta essere pari a circa 400000Pa, ovvero somma della Gauge pressure, pressione a cui lavora il dispositivo, e pressione operativa, definita in questo caso come pressione atmosferica( $P_{atm} = 100000Pa$ ).



Figura 7.5: Pressione assoluta visualizzata attraverso pathline.

L'andamento delle pressioni all'interno dei dispositivi è del tutto simile: si hanno forti pressioni in ingresso, quando si supera il primo ostacolo rappresentato dal primo elemento della girante, questa inizia a scendere fino a raggiungere la pressione atmosferica in uscita. Il modello OM, come auspicabile visto il campo di moto, non presenta nessun comportamento singolare da menzionare. Invece, risulta di particolare importanza quello che avviene all'interno del modello PW: la pressione in uscita alla girante, nelle zone dove la velocità è massima, raggiunge valori negativi. In questa zona, si può assumere che ci siano le condizioni fluidodinamiche affinché il fluido possa cambiare fase quindi cavitare. La definizione del numero di cavitazione in quella zona del dispositivo ne è una controprova. Infatti, se si estrapolano i valori di velocità a valle della girante e si fa riferimento alla tensione di vapore del fluido a  $30^{\circ}C^{5}$  (4239,65*Pa*), si ricava un numero di cavitazione  $\sigma_{c} = 0.4$ , ovvero valori che secondo la letteratura ( $\sigma_{c} < 1$ ) risultano necessari alla cavitazione.

Per la visualizzazione dell'area dove effettivamente si raggiungono pressioni negative, si sono create delle Isosurface, superfici di punti aventi medesimi valori di pressione per caratterizzare la zona di interesse (figura 7.5). Plottando le superfici aventi pressioni assoluta pari a 0 Pa e 100000 Pa, possiamo descrivere due fenomeni importanti.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Valori di temperatura ricavato effettuando la media dei valori misurati in laboratorio durante la prova che hanno dato abbattimento della carica batterica.

Come già esposto, si visualizza l'area dove c'è possibilità di cavitazione, ma oltre a ciò è possibile visualizzare una bolla dove localmente la pressione risulta più bassa rispetto agli altri punti del dominio circostante. Questo comportamento evidenziato anche durante alcuni test in laboratorio, deriva dal moto dei flussi vorticosi generatisi all'interno della girante, in quanto in uscita risultano comunque più veloci alla parete che al centro del dispositivo, andando a formare una zona di relativa bassa pressione.



Figura 7.6: Visualizzazione attraverso lo strumento Isosurface su modello PW.

#### 7.2.3 Turbolenza

L'analisi della turbolenza generata e dissipata all'interno del dispositivo idraulico è di fondamentale importanza al fine di valutare diversi aspetti dell'efficienza dei dispositivi e delle rispettive configurazioni.

Analizzando la figura 7.7, si denota l'importanza della girante nella generazione di turbolenza. La geometria di questa influenza il moto del fluido, dimostrando il diverso comportamento nei due dispositivi. Il modello OM, costato l'ingombro della girante che, ostacolando il passaggio del flusso, non risulta efficiente nella generazione di turbolenza. Per contro, il modello PW presenta un'energia turbolenta maggiore, che si genera lungo tutta la lunghezza della girante, a ridosso dei distacchi di parare sugli elementi della girante. Ciò accade per il differente campo di moto presente all'interno dei dispositivi.



Figura 7.7: Energia cinetica turbolenta lungo il piano mediano.

Attraverso il tasso di dissipazione turbolenta ( $\epsilon$ ) è possibile definire la scala di lunghezza di *Kolmogorov*. La definizione di tale lunghezza permette di indagare a quale dimensione la turbolenza è capace di interagire con le particelle presenti all'interno del flusso turbolento. Questo ci permette di effettuare un'altra grande distinzione di comportamento tra i due dispostivi idraulici.

Infatti, la scala di lunghezza di Kolmogorov [1] è definità come:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} \tag{7.1}$$

Dove  $\nu$  rappresenta la viscosità cinematica del fluido.

Nella scelta del valore dell'energia turbolenta dissipata si è deciso di seguire l'approccio utilizzato fino ad adesso per la determinazione delle grandezze caratterizzanti il dispositivo. Si è plottato il tasso di dissipazione turbolento (Figura 6.6) lungo il piano mediano per riuscire a ricavare un valore ragionevole per valutare la scala di interazione della turbolenza. Risulta importante considerare che durante i fenomeni di turbolenza, l'energia dissipata per unità di massa, tuttavia, è differente in punti e in istanti diversi, quindi è possibile pensare che il valore della scala di *Kolmogorov* cambino nel tempo e nello spazio. In ogni caso una valutazione basata sul campo medio mermette un confronto indicativo tra i due modelli in esame. Analizzando la serie di valori disponibili, si nota come è possibile considerare che il tasso di dissipazione turbolenta differisce nei due modelli di un ordine di grandezza. . Infatti, il tasso di dissipazione turbolenta scala con il cubo della velocità [27]:

$$\epsilon \sim \frac{u^3}{l} \tag{7.2}$$

dove *l*, rappresenta la lunghezza di scala integrale.

Il rapporto tra i tassi di dissipazione ( $\epsilon$ ), utilizzando come lunghezza di scala integrale, la larghezza degli elementi di ciascuna girante, ci permette di quantificare di che ordine di grandezza differiscono i due modelli. Tale dissomiglianza deriva dalle differenze riscontrate nel campo di moto dei due dispostivi.

Se ragionevolmente si pensa di utilizzare come valore di  $\epsilon = 600m^2/s^3$  per il modello OM e  $\epsilon = 6000m^2/s^3$  per il modello PW, si ricava una scala di Kolmogorov rispettivamente nell'ordine di 7  $\mu m$  e 3  $\mu m$ .

Se si considera, come esposto al capitolo 1, che la dimensione media di un batterio escherichia coli varia tra  $1e3\mu m$ , si può affermare che il modello PW genera un flusso che potrebbe interagire con quest'ultimi. Studi dimostrano che gli sforzi generati da un flusso turbolento, possono determinare un abbattimento di carica batterica[22].



Figura 7.8: Tasso di dissipazione turbolenta lungo il piano mediano.

Non è determinabile se l'effettiva disinfezione che si manifesta in questo modello sia opera della turbolenza, ma è fondamentale esporre che il flusso turbolento generato ha le caratteristiche necessarie affinché i batteri, in esso presenti, ne subiscano i potenziali effetti o quantomeno possono risultarne influenzati ed incentivare una potenziale disinfezione per cavitazione idrodinamica.

# 8 Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro di tesi ha analizzato il comportamento fluidodinamico di due dispostivi idraulici innovativi al fine di determinare il principio di funzionamento per migliorarne l'efficienza ed indagare sul meccanismo d'azione di una conseguente disinfezione. Questa indagine è stata condotta attraverso la raccolta in laboratorio di informazioni in merito alle grandezze fluidodinamiche e all'eventuale capacità di disinfezione, variabili convalidate in una seconda fase attraverso lo sviluppo di simulazioni numeriche al fine di analizzare i campi di moto (velocità, pressione, turbolenza) all'interno dei dispositivi.

In riferimento agli obiettivi preposti, si riportano di seguito le osservazioni derivanti dal lavoro svolto e qui descritto nei precedenti capitoli.

Alla luce dei valori ottenuti dalla caratterizzazione idraulica, dalle analisi microbiologiche e dei risultati delle simulazioni numeriche si può affermare che esiste una concreta corrispondenza tra questi. I due due dispostivi idraulici testati hanno evidenziato differenti comportamenti fluidodinamici: la geometria interna è la principale causa di queste dissomiglianze. I dati ricavati, derivanti dal confronto dei due dispositivi ad una pressione di 3 bar, mostrano che il modello PW ha le caratteristiche fluidodinamiche per generare cavitazione. In particolare, si riscontrano valori di  $Re \in \sigma_c$  ( $\sigma_c = 0, 4$ ) congrui con i valori riportati in letteratura dove si riscontra disinfezione a causa di cavitazione idrodinamica per valori si  $\sigma_c$  copresi tra 0,1 e 0,6. I risultati ottenuti dai test microbiologici mostrano un abbattimento di carica batterica. Le simulazioni numeriche hanno verificato le ipotesi precedentemente formulate riscontrando alti gradienti di velocità, alti valori di dissipazione turbolenta e pressione assolute negative, risultati che riconduco l'abbattimento della carica batterica alla cavitazione idrodinamica o a una possibile interazione tra i batteri e il flusso turbolento. Allo stesso modo, il modello OM ha evidenziato instabilità nella caratterizzazione idraulica svolta in laboratorio e non ha prodotto nessun tipo di

abbattimento. I risultati si sono dimostrati tali anche in fase di simulazione numerica, dove si sono evidenziate tutte le caratteristiche di instabilità. Si può assumere dunque, con certezza, che la geometria del modello PW è risultata più efficiente. La presenza della girante ha certamente avuto un ruolo di primaria importanza nel creare zone ad alta velocità nel fluido e nella generazione di turbolenza all'interno del dispositivo. In particolare, lo sfasamento con cui si snodano gli elementi delle due giranti e la forma che il dispositivo assume a valle di queste, sono la maggiore causa dei fenomeni descritti. Inoltre, lungo le pareti interne, i flussi vorticosi generano zone in cui fluidi scorrono ad alta velocità, determinando un locale abbassamento della pressione: avviene così la cavitazione idrodinamica. Questo fenomeno, come riscontrato in letteratura, è una efficace modalità di disinfezione batterica. Tuttavia le potenzialità di tale metodo sono ancora oggetto di studio, soprattutto per quanto riguarda l'applicabilità a processi industriali con costi operativi accessibili, ed è in questo contesto che si inseriscono questi dispositivi idraulici, che possono ritenersi innovativi sia per le basse pressioni con cui il dispositivo ha prodotto una disinfezione, sia per la possibilità, vista la configurazione, di istallarsi direttamente sulle condotte o all'interno di circuiti idraulici preesistenti con bassi costi operativi.

È doveroso sottolineare che il lavoro di tesi svolto, trattandosi di una caratterizzazione fluidodinamica, è da ritenersi uno studio preliminare, un fondamentale punto di partenza per lo sviluppo di un dispositivo che possa ritenersi più efficiente sia nella disinfezione che nella fluidodinamica, limitando così anche le perdite di carico. I potenziali sviluppi futuri, derivanti da questo lavoro risultano necessari e proficui. Innanzitutto, occorre indagare a fondo sul ruolo della girante e di eventuali restringimenti a valle di quest'ultima: si necessita di una valutazione sull'effettivo quantitativo di elementi della girante e sulle dimensioni di ciascuno di questi; occorre dunque analizzare la formazione di vortici, al fine di individuare l'eventuale necessità di avere un numero superiore di flussi vorticosi. Non meno importante è lo studio dei flussi a valle della girante derivati dall'applicazione di diverse tipologie di restringimento in correlazione alle varie geometrie di getti che si possono ottenere in uscita dalla girante. Infine, per comprendere a pieno il meccanismo d'azione di questo dispositivo sarebbe utile studiare diversi regimi di flusso al fine per svincolare gli effetti della cavitazione da quelli turbolenti. Ciò permetterà di comprendere quale dei due fenomeni determina l'abbattimento di carica batterica. Per queste successive analisi si suggerisce, al fine di avere un maggiore riscontro con un minor costo, di seguire un approccio basato sulla determinazione delle grandezze attraverso delle simulazioni numeriche per poi riprodurre in laboratorio un prototipo che ne verifichi il corretto funzionamento.

## Riferimenti bibliografici

- Bengt Andersson et. al, «Computational Fluid Dynamics for Engineers», Cambridge University Press, 2012
- [2] Citrini, Noseda «Idraulica», Casa editrice Ambrosiana, 1987
- [3] J.M. M. Jean-Pierre Franc, Fundamentals of cavitation, Kluwer academic publishers, 2004
- [4] M. C. C. e. al, «Overview of the Main Disinfection Processes for Wastewater and DrinkingWater Treatment Plants» sustainability, 2017.
- [5] P. f. H. T. Madsen, «Membrane Filtration in Water Treatment e Removal of Micropollutants,» elsevier, vol. Chapter 6, 2014.
- [6] Mezule e. al, « A simple technique for water disinfection with hydrodynamic cavitation: Effect on survival of Escherichia coli», Elsevier,2008.
- [7] «Treelium», https://treelium.ch/chi-siamo/
- [8] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale http: //www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/manuali-e-linee-guida/ metodi-analitici-per-le-acque.
- [9] Davello «Progettazione di un dispositivo per la disinfezione a basso costo dell'acqua con cavitazione idrodinamica», Politecnico di Torino
- [10] m. D. e. al., «Use of hydrodinamic cavitation in (waste) water treatment,» Ultrasonics Sonochemistry, pp. 577-588, 2015.
- [11] M. B. e. A. P. Mandar Badve, ««Microbial disinfection of seawater using hydrodynamic cavitation,» Separation and Purification Technology, pp. 31-38, 2015.
- [12] Tullis, «Hydraulics of Pipelines: pumps, valves, Cavitation, transients,» 1989.

- [13] G. P.R., «Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing,» Springer Science, 2010.
- [14] G. G. F. M. F. J. Prasanta S, «Numerical investigation of the dynamics of pressure loading on a solid boundary from a,» 10th Internationa Symposium on Cavitation, 2018.
- [15] J. C. e. al., «Hydrodynamic cavitation: an emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry,» Reviews in Chemical Engineering, pp. 433-468, 2017.
- [16] M. P. H. A. A. Y. Testud P., «Noise generated by cavitating single-hole and multi-hole orifices in a water pipe,» Journal on Fluids and Structures, pp. 163-189, 2007.
- [17] H. G. B. J. Maynes D., «Cavitation inception and head loss due to liquid flow through perforated plates of varing thickness,» Journal of fluids Engineering, vol. 135, 2013.
- [18] G.-A. I. R. N. R. M. D. M. Kosel J., «Efficient inactivation of MS-2 virus in water by hidrodynamic cavitation,» Water research, pp. 465-471, 2017.
- [19] O. M. e. M. D. Andrej Sarc, «Can rapid pressure decrease induced by supercavitation efficiently eradicate Legionella pneumophila bacteria?,» Desalination and Water Treatment, pp. 1-11, 2014.
- [20] S. S. S. e. al., «Effect of hydrodynamic cavitation on zooplankton: A tool for disinfection,» Biochemical Engineering journal, pp. 320-328, 2008.
- [21] V.-F. A. S. C. W. J. T. J. A. Mùjica-paz H., «High- pressure processing technologies for the pasteurization and sterilization of foods,» Food Bioprocess technol, 2011.
- [22] T. P. R. S. Lange H., «Effect of high shear stress on microbial viability,» Journal of chemical Technology and Biotechnology, pp. 501-505, 2001.

- [23] Y. B. e. A. M. T. S. Arrojo, «A parametrical study of disinfection with hydrodynamics cavitation,» Ultrasonics Sonochemistry, pp. 903-908, 2008.
- [24] https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water.
- [25] https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/sanitation.
- [26] https://www.who.int/data/gho/map-gallery-searchresults?&maptopics=0b24388a-5ace-4e7f-883f-51f00f21064f.
- [27] J. Christos Vassilicos «Dissipation in Turbulent Flows» Annual Review of Fluid Mechanics, 2014