

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in

INGEGNERIA MECCANICA

Tesi di Laurea Magistrale

Metodi di disinfezione meccanica dell'acqua:
Progettazione di una ruota cavitante.



Relatore

prof. Costantino Manes

Candidato

Francesco Saffioti

Anno Accademico 2018/2019

Dicembre 2019

Introduzione	3
1 Metodi di disinfezione.	5
1.1 Trattamenti tradizionali.	5
1.1.1 Clorazione.	5
1.1.2 Ozonazione.	6
1.1.3 Radiazioni ultraviolette.	6
1.2 Trattamenti alternativi.	7
1.2.1 Filtro al carbone di bambù.	7
1.2.2 Filtri ceramici.	8
1.2.3 Sterilizzazione solare.	8
1.2.4 Estratti vegetali.	9
2 La Cavitazione.	11
2.1 Cavitazione acustica.	11
2.2 Cavitazione idrodinamica.	12
2.3 Caratteristiche della cavitazione.	13

Introduzione

Nel mondo una persona su tre non ha accesso all'acqua potabile. Questo è quello che emerge dal rapporto "Progress on drinking water" redatto dalla Organizzazione mondiale della sanità (OMS) e da Unicef. Circa 2,2 miliardi di persone infatti non hanno accesso ad acqua potabile attraverso servizi gestiti in sicurezza mentre 3 miliardi di persone non dispongono dei servizi di base per potersi lavare le mani. La scarsità dei servizi igienico-sanitari e la presenza di agenti contaminati nell'acqua sono legati anche alla trasmissione di malattie come colera, dissenteria, epatite A e tifo. La OMS stima infatti che circa 5 milioni di persone muoiono ogni anno a causa di malattie legate al consumo di acque contaminate, circa il 60% dei decessi dovuto ad infezioni intestinali. Di questi circa il 30% sono bambini sotto 5 anni. Le malattie si trasmettono principalmente per via oro-fecale, in cui l'acqua è il primo veicolo di trasmissione. La situazione ovviamente peggiora in situazioni di scarsa igiene, infatti le regioni in cui la mortalità legata alla contaminazione fecale dell'acqua è maggiore sono quelle dei paesi dove persistono condizioni igienico-sanitarie non adeguate, come Africa e in parte del Sud-Est Asiatico. La grande maggioranza di queste malattie potrebbe essere facilmente debellata garantendo acqua potabile sicura, proveniente da una fonte in loco, e servizi igienici e di trattamento e smaltimento dei reflui fognari in modo sicuro, non a casa infatti il problema della defecazione all'aperto è preso in seria considerazione nel rapporto sopracitato.

Attualmente i metodi più utilizzati per la disinfezione dell'acqua sono di tipo chimico, che si basano sull'utilizzo di sostanze come cloro, ipoclorito di sodio, calcio, biossido di cloro, ozono, permanganato di potassio, sali di argento, perossido di idrogeno, in grado di rimuovere o ridurre la carica microbica presente di specifici agenti patogeni (batteri, virus, protozoi) capaci di trasmettere infezione e malattie. La scelta di questi metodi ha senza dubbio molti vantaggi ad esempio praticità nello stoccaggio, semplicità di utilizzo e velocità di intervento. L'applicazione di questi metodi presenta però il problema dei sottoprodotti come trialometani (THM) e acidi cloroacetici, che possono alterare le qualità organolettiche dell'acqua. Nei Paesi più poveri si utilizzano per lo più metodi fisici (radiazioni UV, calore) più o meno sofisticati, come ad esempio, la filtrazione lenta su sabbia, i filtri in ceramica e la sterilizzazione solare.

Lo scopo di questo elaborato è la sperimentazione di un metodo alternativo, a basso costo, per la disinfezione dell'acqua che sfrutti la cavitazione idrodinamica per la neutralizzazione dei batteri di *Escherichia coli*.

Il presente lavoro di Tesi si prefigge i seguenti obiettivi:

- La progettazione e la costruzione di un prototipo, sulla base degli studi effettuati in precedenza da l'ingegnere Roberta Davello all'interno della sua tesi, di un dispositivo che sia in grado di provocare la cavitazione dell'acqua;
- La progettazione e l'esecuzione di esperimenti volti a ricercare le condizioni di cavitazione migliori;
- La progettazione e l'esecuzione di esperimenti di disinfezione, alle condizioni individuate in precedenza.

L'elaborato è così strutturato:

- Il capitolo 1 è una panoramica sui trattamenti di disinfezione più diffusi;
- Il capitolo 2 consiste in una breve descrizione della cavitazione e del suo utilizzo nei processi di sanificazione;
- Nel capitolo 3 vengono illustrati quelli alcuni dispositivi che sfruttano la cavitazione per il trattamento delle acque;
- Nel capitolo 4 viene illustrato il progetto "ruota cavitante" dalla sua progettazione fino alla messa in opera;
- Nel capitolo 5 riepiloga le procedure di sperimentazione utilizzate negli esperimenti di cavitazione e di disinfezione;
- Nel capitolo 6 vengono illustrati e commentati i risultati ottenuti;
- Il capitolo 7 è dedicato alle conclusioni ed alle eventuali modifiche da apportare al prototipo.

1 Metodi di disinfezione.

L'accesso all'acqua potabile è essenziale per la salute, un diritto umano fondamentale e una componente fondamentale di un'efficace politica di protezione della salute. Le acque destinate al consumo umano devono essere salubri e pulite ciò vuol dire che non devono contenere microrganismi e parassiti, né altre sostanze, in quantità o concentrazioni tali da rappresentare un potenziale pericolo per la salute umana. Garantire acqua sicura da bere vuol dire fare tutto il necessario per prevenire o ridurre la contaminazione da agenti patogeni. La disinfezione è una delle misure di sicurezza adottate per ridurre il rischio di trasmissione di malattie. Prima di subire un trattamento di disinfezione le acque di approvvigionamento, che possono contenere materiali in sospensione (sabbia, foglie), devono essere filtrate per aumentarne l'efficienza del trattamento, tali materiali infatti possono inglobare contaminanti ed interferire con la disinfezione.

1.1 Trattamenti tradizionali.

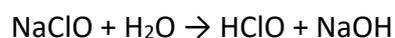
I metodi di disinfezione ad oggi utilizzati sono molti, tra quelli convenzionali i più diffusi sono:

- Clorazione;
- Ozonazione;
- Irraggiamento tramite raggi UV;

1.1.1 Clorazione.

Il cloro ed i suoi composti sono tra le sostanze chimiche più usate per la disinfezione dell'acqua. Possono essere utilizzati per rendere inattivi la maggior parte dei microrganismi e risultano molto efficaci contro quelli patogeni.

Tra i vari composti il più utilizzato è l'ipoclorito di sodio (NaClO), si trova in commercio sotto forma di soluzione e può essere utilizzato in purezza o previa diluizione. In acqua avviene la seguente reazione:



La specie attiva responsabile della disinfezione è l'acido ipocloroso che può penetrare le pareti delle cellule e gli strati protettivi dei microorganismi ed efficacemente uccidere gli agenti patogeni. I microorganismi muoiono o soffrono di disturbi riproduttivi. Se sono presenti composti organici od inorganici (ed in particolare composti azotati) il cloro reagisce formando cloroammine e composti cloroorganici. L'efficacia del trattamento dipende da diversi fattori, concentrazione del disinfettante, tempo di contatto dello stesso con l'acqua da trattare, pH, la temperatura dell'acqua ed il grado di inattivazione dei patogeni voluto. Il metodo è ormai consolidato ma presenta degli svantaggi legati al lungo tempo di contatto richiesto ma soprattutto vi è il problema dei sottoprodotti (generalmente indicati con la sigla inglese DBP, Disinfection By-Products) come i trialometani, che sono notoriamente cancerogeni. Tuttavia, il rischio di morte per la presenza di patogeni è almeno da 100 a 1000 volte il rischio di sviluppare un tumore a causa della presenza di sottoprodotti di disinfezione e da 10.000 ad un milione di volte maggiore del rischio di sviluppare un tumore dovuto alla presenza di DBP.

1.1.2 Ozonazione.

L'ozono "O₃" è uno dei più forti ossidanti conosciuti in natura, secondo come potenziale di ossidazione solo al fluoro, presenta un effetto ossidante per i contaminanti sia organici che metallici e sterilizzante per i microorganismi. Una volta che l'ozono è entrato nelle cellule, ossida tutte le componenti essenziali (enzimi, proteine, DNA, RNA). La velocità di disinfezione dell'ozono è di molto superiore a quella di altri disinfettanti come il cloro, e risulta indipendente dalla presenza di ammoniaca e dal valore di pH dell'acqua. Inoltre, l'utilizzo di ozono rende l'acqua potabile trattata priva di odori e sapori sgradevoli, grazie all'eliminazione di contaminanti organici, e permette di ridurre la concentrazione dei metalli disciolti, quali ferro e manganese. Contrariamente ad altri sterilizzanti, l'ozono, eventualmente dosato in eccesso, non forma nell'acqua sostanze nocive all'uomo. Il principale problema riguardante l'utilizzo dell'ozono è l'elevato costo energetico legato alla sua produzione.

1.1.3 Radiazioni ultraviolette.

Le apparecchiature di disinfezione mediante UV utilizzano sorgenti in grado di emettere radiazioni comprese in genere tra 240 e 280 nm (raggi UV-C) che, interagendo con acidi nucleici e sistemi enzimatici di virus e microorganismi, presiedono ad azioni germicide in acque destinate a consumo umano, i batteri infatti perdono la loro capacità di riprodursi e muoiono. La disinfezione UV però non rimuove i composti organici, inorganici e le particelle presenti nell'acqua. Le radiazioni lasciano inalterate le caratteristiche organolettiche dell'acqua trattata, l'azione di disinfezione è localizzata nell'area

dell'irraggiamento UV e non genera sottoprodotti, essa consiste in un processo esclusivamente fisico, non chimico. Se l'acqua trattata deve essere immessa in un serbatoio è opportuno associare al trattamento ultravioletto uno con disinfettante chimico. La disinfezione UV non necessita di lunghi tempi di esposizione e nessun batterio, virus o muffa è immune ad essa, è però fortemente influenzata dalla torbidità dell'acqua, le particelle in sospensione possono assorbire le radiazioni al posto dei microorganismi patogeni, e presenta inoltre un costo energetico considerevole.

1.2 Trattamenti alternativi.

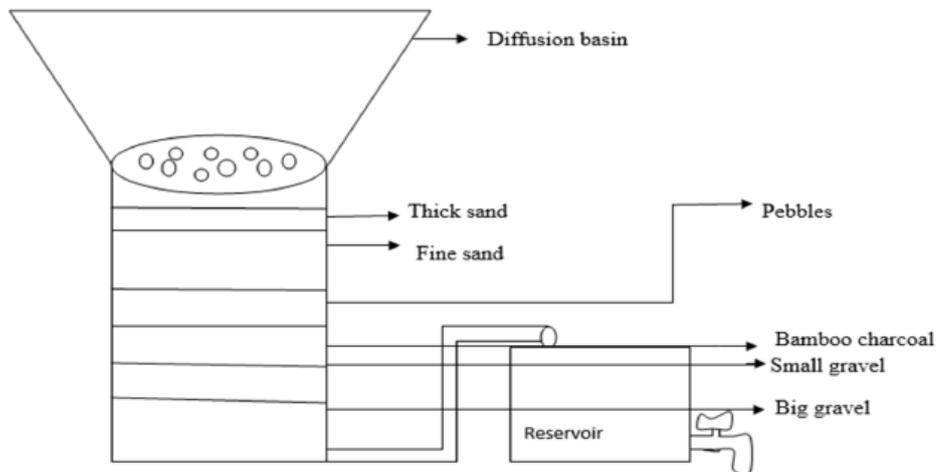
Sin dall'antichità uno dei metodi più diffusi e più economico per disinfettare l'acqua è quello di farla bollire su di un fuoco alimentato dalla legna, questa procedura però, oltre ad essere pericolosa se eseguita in cucine senza un adeguata ventilazione, alimenta la deforestazione, si è resa quindi necessaria la ricerca di trattamenti che siano sostenibili per le infrastrutture rurali.

In questo paragrafo cercheremo di analizzare quelli che sono i vari metodi di trattamento a basso costo utilizzati nelle aree più povere del mondo, in queste zone infatti l'assenza di acqua potabile è una delle più grandi sfide che il popolo deve affrontare quotidianamente, il costo dei trattamenti tradizionali, dovuti soprattutto alla necessità di importare i prodotti chimici, incentivano il consumo di acqua non trattata. Oltre all'elevato costo di importazione del materiale necessario al trattamento delle acque, sostanze chimiche come il solfato di alluminio, un comune coagulante, rilasciano dei residui in acqua che possono essere cancerogeni.

1.2.1 Filtro al carbone di bambù.

Si tratta di un filtro naturale composto da bambù, ghiaia, ciottoli e altri materiali naturali per purificare l'acqua. Le proprietà del carbone di bambù come la sua elevata porosità, l'alto tasso di minerali tra i suoi costituenti, il tasso di assorbimento ecc., lo rendono perfetto per l'utilizzo nella depurazione delle acque. Durante il processo i minerali presenti al suo interno, tra cui potassio, magnesio, sodio e calcio, si dissolvono nell'acqua andandola ad arricchire. Durante il filtraggio il carbone rilascia un tipo di onde elettromagnetiche, chiamate Far Infrared Waves (FIR), a lunghezze d'onda comprese tra 4 e 16 micrometriche vengono assorbite da tutto il materiale organico. Oltre al bambù nel filtro sono presenti sabbia e ciottoli per favorire la sedimentazione delle particelle e l'ulteriore purificazione. Anche l'esposizione alla luce del sole gioca un ruolo importante

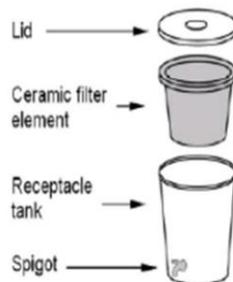
nel processo di purificazione, i raggi UV infatti contribuiscono ad uccidere gli agenti patogeni.



1Progetto principale del filtro al carbone di bambù

1.2.2 Filtri ceramici.

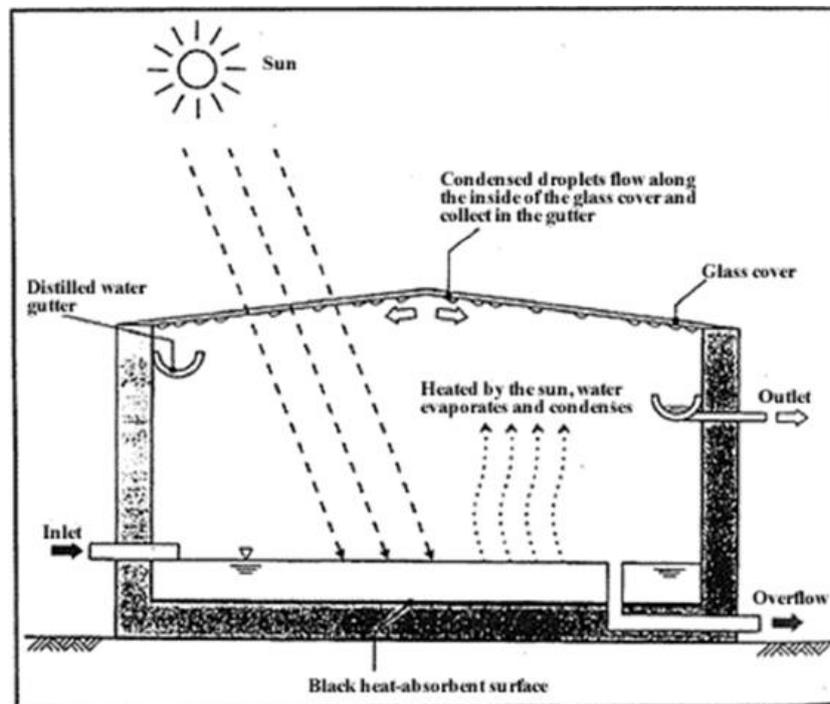
I filtri in argilla e arenaria sono stati utilizzati migliaia di anni, assomigliano ai vasi da fiori che comunemente vediamo nelle nostre case, quando viene versata al loro interno l'acqua filtra lentamente attraverso il materiale argilloso e gocciola in un contenitore sottostante. Essendo l'argilla porosa il filtro funziona come un setaccio, i pori sono abbastanza grandi da consentire all'acqua di filtrare, ma abbastanza piccolo da intrappolare batteri e altri contaminanti. Questi filtri hanno solitamente una grandezza tale da riuscire a trattare circa 2 litri d'acqua all'ora, un volume sufficiente per la maggior parte delle famiglie.



1.2.3 Sterilizzazione solare.

Quella di esporre alla luce solare i contenitori pieni d'acqua è una pratica molto comune in varie parti del mondo. La luce del sole contribuisce ad inibire gli agenti patogeni in due modi, facendo aumentare la temperatura del liquido e tramite l'irraggiamento UV, come

descritto precedentemente. L'energia solare è anche utilizzata nei processi di distillazione, in cui viene utilizzato il calore solare per purificare l'acqua per evaporazione e condensazione. Questo processo è usato per lo più per ricavare acqua potabile da acqua di mare o acque salmastre e viene anche detto dissalazione solare diretta. È una tecnica semplice e dal basso costo ma risente molto delle condizioni climatiche.



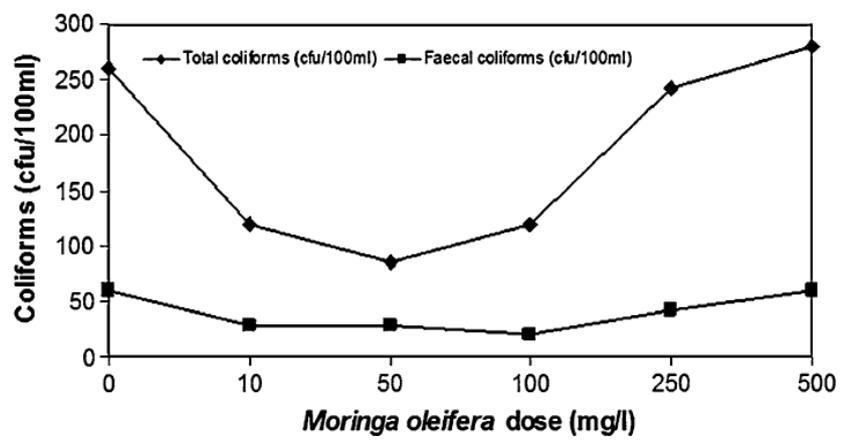
2Tecnologie di dissalazione termica solare

1.2.4 Estratti vegetali.

Gli estratti vegetali naturali sono stati utilizzati per purificare l'acqua per molti secoli. La maggior parte di questi estratti sono derivati da semi, foglie, pezzi di corteccia o linfa, radici ed estratti di frutta di alberi e piante, ad esempio, veniva utilizzato lo *Strychnos potatorum* come chiarificatore tra il XIV e il XV secolo avanti Cristo. I coagulanti naturali ne hanno diversi vantaggi, rispetto al solfato di alluminio, producono infatti un volume di fanghi molto più basso, la naturale alcalinità viene preservata durante il trattamento, sono biodegradabili, sicuri per la salute umana, dal costo contenuto poiché possono essere coltivati localmente.

In Etiopia sono stati condotti diversi studi sul potere coagulante e disinfettante di diversi semi ridotti in polvere, *Moringa oleifera*, *Jatropha curcas*, *Pleurotus tuberregium sclerotium*, *Hibiscus sabdariffa*. È stata registrata una riduzione batterica compresa tra il 90% ed il 99% e per quanto riguarda la *M. oleifera* un potere coagulante di circa il 90% delle particelle presenti nei campioni. Alcuni studi però hanno dimostrato la resistenza di

alcuni agenti patogeni per questo il loro utilizzo su larga scala è ancora in fase di sperimentazione.



3 Effetto della concentrazione di MO sulla riduzione dei coliformi

2 La Cavitazione.

La Cavitazione è definita come il fenomeno di formazione, crescita e collasso di microbolle o cavità nell'arco di alcuni millisecondi, durante il quale si ha un grande rilascio di energia in pochi istanti. Il fenomeno è noto ai più per i suoi effetti negativi nei sistemi idraulici, negli anni precedenti infatti la maggior parte degli studi sulla cavitazione miravano ad evitare la formazione di queste cavità che implodendo danneggiano gli apparati meccanici come giranti o eliche. Negli ultimi tempi invece sono sempre più numerosi gli studi su come sfruttare in modo positivo questo rilascio di energia all'interno di vari processi chimici e meccanici.

Nella cavitazione il fluido passa dallo stato liquido a quello gassoso, analogamente a quanto avviene durante l'ebollizione ma con una differenza importante, per far bollire un liquido gli si fornisce calore in modo che la tensione di vapore raggiunga il livello della pressione ambiente, questo porta alla formazione di bolle meccanicamente stabili in quanto il vapore al loro interno possiede la stessa pressione del liquido circostante. Nella cavitazione invece non viene fornito calore ma si procede ad abbassare la pressione del liquido fino a raggiungere la tensione di vapore, una volta uscite dalla zona di bassa pressione le bolle implodono istantaneamente, in quanto la pressione di vapore al loro interno non è in grado di contrastare la pressione idrostatica che le circonda, con conseguente formazione di uno stato locale di altissima pressione (GPa) e temperatura (10000K) noto come hot-spot. Gli effetti meccanici o fisici della cavitazione, come la formazione di microgetti ad alta velocità e di turbolenze locali ad alta intensità, vengono principalmente sfruttate per migliorare alcuni processi fisici come la sintesi di nanoemulsioni, formazione di nanoparticelle, disgregazione microbica e disinfezione. I suoi effetti chimici, come la generazione di radicali liberi altamente reattivi in ambiente acquoso, sono i principali responsabili dell'intensificazione di processi chimici come la sintesi di prodotti chimici, la degradazione delle sostanze inquinanti dell'acqua, ecc.

La cavitazione può essere generata in un mezzo liquido in diversi modi, attraverso la variazione del flusso in liquido che scorre, nota come cavitazione idrodinamica, oppure investendo in liquido con ultrasuoni, si parla allora di cavitazione acustica.

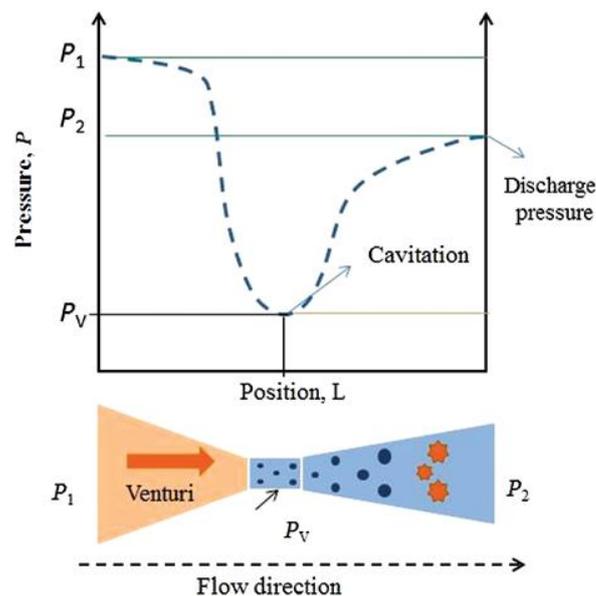
2.1 Cavitazione acustica.

Si espone il liquido a delle onde acustiche di lunghezza d'onda compresa tra 20kHz e 1.1MHz, ultrasuoni, queste provocano dei cicli di compressione ed espansione nel fluido

con conseguente variazione della pressione. Durante la fase di espansione la pressione scende, quindi aumenta la distanza intermolecolare tra le molecole fluide, nelle zone in cui questa distanza raggiunge un valore critico, ossia quelle zone dove la pressione scende al di sotto della tensione di vapore, si avrà la formazione di cavità, che finiranno per collassare su loro stesse nel successivo ciclo di compressione generando degli hot-spot. Le bolle non crescono di grandi dimensioni e (alla massima potenza) formano solo piccole strutture distintive. Il collasso della bolla di solito segue la frequenza motrice del trasduttore, quindi si può apprezzare la dinamica di cavitazione molto intensa. Uno degli svantaggi della cavitazione acustica è che le bolle compaiono solo nelle zone colpite delle onde acustiche è quindi essenziale un qualche tipo di miscelazione se si vuole trattare l'intero volume. La cavitazione acustica ha inoltre una bassa efficienza economica, poiché è difficile da applicare a un processo continuo (a flusso) e risulta pertanto difficile la sua applicazione a livello industriale.

2.2 Cavitazione idrodinamica.

La cavitazione in un fluido in movimento è generata, costringendolo a passare attraverso un restringimento del tubo, che può essere un orificio oppure un venturimetro, questo provoca una variazione di pressione con conseguente formazione di cavità.



4 Variazione della pressione e condizioni di flusso in un venturimetro.

La cavitazione idrodinamica può anche essere prodotta facendo ruotare un oggetto all'interno di un liquido. Sebbene esistano dispositivi come omogeneizzatori e rotor ad alta velocità, che possono creare le condizioni necessarie per la cavitazione, le loro

applicazioni sono limitate a causa dell'elevato costo energetico. Orifizi e tubi di Venturi sono invece considerati dispositivi più efficienti e quindi più diffusi. Caratteristiche della cavitazione.

La cavitazione può essere di due tipi: stabile e transitoria. Nella prima, si formano cavità a bassa intensità oscillante che oscillano tra alcune dimensioni di equilibrio per numerosi cicli acustici. In quella transitoria, le cavità si espandono aumentando la loro dimensione iniziale prima del loro crollo violento ed oscillano più rapidamente. Si è visto che la cavitazione acustica produce principalmente il collasso di cavità ad alta intensità, a causa della generazione di un numero più elevato di cavità transitorie. Quella idrodinamica invece produce per lo più collassi di cavità a bassa intensità, ma viene generato un numero maggiore di cavità a causa della sua configurazione geometrica, inoltre può generare entrambi i tipi di cavitazione, stabile e transitoria, e ciò dipende principalmente dalla geometria del dispositivo cavitante.

2.3 Caratteristiche della cavitazione.