



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura
Sezione Idraulica e infrastrutture viarie

Corso di Laurea in Ingegneria Civile e Ambientale

**SMORZAMENTO DEL MOTO ONDOSO CON
METODI NON TRADIZIONALI**

WAVE DAMPING USING NON-TRADITIONAL METHODS

Relatore

Prof. Ing. Carlo LORENZONI

Tesi di Laurea di

Giorgio D'ETTORRE

Correlatori

Prof.ssa Ing. Sara CORVARO

Dott.ssa Ing. Stefania ROCCHI

Anno Accademico 2025-2026



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura
Sezione Idraulica e infrastrutture viarie

Corso di Laurea in Ingegneria Civile e Ambientale

**SMORZAMENTO DEL MOTO ONDOSI CON
METODI NON TRADIZIONALI**

WAVE DAMPING USING NON-TRADITIONAL METHODS

Relatore

Prof. Ing. Carlo LORENZONI

Tesi di Laurea di

Giorgio D'ETTORRE

Correlatori

Prof.ssa Ing. Sara CORVARO

Dott.ssa Ing. Stefania ROCCHI

Anno Accademico 2025-2026

INDICE

INTRODUZIONE

CAPITOLO 1: OPERE DI DIFESA COSTIERA

- 1.1 Interventi tradizionali
 - 1.1.1 Barriere parallele alla linea di costa (o frangiflutti)
 - 1.1.2 Pennelli trasversali alla linea di riva
 - 1.1.3 Opere morbide
 - 1.1.4 Ripascimenti
- 1.2 Interventi non tradizionali

CAPITOLO 2: APPLICAZIONI E STUDI DEL PNEUMATIC BREAKWATER

- 2.1 Il salvataggio del molo di El Segundo
- 2.2 La Seconda Guerra Mondiale e la logistica navale
- 2.3 La protezione delle operazioni di “Tendering” nelle Bermuda
- 2.4 Il contenimento dei sedimenti nei Grandi Laghi
- 2.5 Mitigazione del disastro Deepwater Horizon
- 2.6 The Great Bubble Barrier (Amsterdam)
- 2.7 La difesa silenziosa dei moli industriali

CAPITOLO 3: MODELLI FISICI NELL'IDRAULICA MARITTIMA

- 3.1 Analisi dimensionale e teorema di Buckingham
- 3.2 Similitudini idrodinamiche
 - 3.2.1 Criteri di similitudine e leggi di scala
- 3.3 Criterio di Reynolds
- 3.4 Criterio di Froude
- 3.5 Scelta dei criteri

CAPITOLO 4: RIFLESSIONE E TRASMISSIONE ONDOSA

- 4.1 Teoria delle onde e bilancio energetico
 - 4.1.1 Cenni teorici sulla riflessione delle onde regolari
 - 4.1.1.1 Riflessione totale

4.1.1.2 Riflessione parziale

4.2 Trasmissione ondosa e coefficiente di trasmissione

4.3 Dissipazione dell'energia ondosa e fenomeni turbolenti

4.3.1 Meccanismi dissipativi associati alla cortina di bolle

4.3.1.1 Attenuazione delle proprietà del mezzo

4.3.1.2 Attenuazione dell'ampiezza ondosa

4.3.1.3 Generazione di turbolenza

4.3.1.4 Interfaccia aria-acqua

CAPITOLO 5: DESCRIZIONE DEL LABORATORIO

5.1 Il laboratorio

5.2 La canaletta

CAPITOLO 6: DESCRIZIONE E REALIZZAZIONE DEL MODELLO DI PROVA

CAPITOLO 7: PROCEDURE PRELIMINARI ALLE PROVE SPERIMENTALI

7.1 Test preliminari per il settaggio delle condizioni di prova

7.2 Verifica preliminare del livello dell'acqua

7.3 Calibrazione delle sonde

CAPITOLO 8: PROVE SPERIMENTALI CON ACQUISIZIONE DEI LIVELLI ONDOSI

8.1 Acquisizione in assenza di onde e bolle d'aria – rumore di fondo

8.2 Prove in assenza di onde con emissione di bolle d'aria

8.3 Prove con pala battente in funzione in assenza di bolle d'aria

8.4 Prove in presenza di onde e bolle d'aria

CAPITOLO 9: ANALISI DEI DATI ESTRATTI DALLE PROVE ONDOSE

9.1 Analisi della configurazione: Onda H=1cm, T=0.5s

9.2 Analisi della configurazione: Onda H=1cm, T=1s

9.3 Analisi della configurazione: Onda H=2cm, T=0.5s

9.4 Analisi della configurazione: Onda H=2cm, T=1s

9.5 Analisi della configurazione: Onda H=3cm, T=0.5s

9.6 Analisi della configurazione: Onda H=3cm, T=1s

9.7 Analisi della configurazione: Onda $H=4\text{cm}$, $T=0.5\text{s}$

9.8 Analisi della configurazione: Onda $H=4\text{cm}$, $T=1\text{s}$

9.9 Risultati ottenuti nell'abbattimento del moto ondoso

CAPITOLO 10: CONFIGURAZIONE CON ONDE FRANGENTI

8.1 Analisi della configurazione frangente: Onda $H=6\text{cm}$, $T=1\text{s}$

8.2 Analisi della configurazione: Onda $H=7.5\text{cm}$, $T=1\text{s}$

CAPITOLO 11: CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

RINGRAZIAMENTI

INTRODUZIONE



L'innovazione tecnologica e la crescente attenzione verso la tutela ambientale rappresentano oggi temi centrali nella progettazione di opere di ingegneria civile, con particolare riferimento agli interventi di difesa delle coste.

I fenomeni di erosione costiera, aggravati dai cambiamenti climatici e dall'innalzamento del livello del mare, richiedono soluzioni efficaci che siano al contempo sostenibili sotto il profilo ambientale, economico e riducano l'impatto visivo.

Tradizionalmente, la protezione dei litorali è affidata a opere rigide quali scogliere emerse, barriere frangiflutti e pennelli trasversali, capaci di garantire un'elevata resistenza all'azione del moto ondoso ma spesso caratterizzate da un significativo impatto visivo e da alterazioni degli equilibri morfodinamici costieri.

Negli ultimi decenni, la ricerca scientifica si è quindi orientata verso soluzioni alternative in grado di integrarsi maggiormente con l'ambiente naturale, riducendo gli effetti negativi sul paesaggio e sugli ecosistemi marini.

In questo contesto si inserisce la presente tesi, che analizza una soluzione alternativa di salvaguardia delle coste basata sull'utilizzo di un sistema sommerso ad aria insufflata che, attraverso la generazione controllata di una cortina di bolle, realizza un meccanismo di dissipazione dell'energia ondosa senza l'utilizzo di opere rigide emergenti.

Tale configurazione consente di intervenire sul moto ondoso tramite un'azione dinamica, riducendo l'energia incidente prima che questa raggiunga la linea di riva, con un impatto visivo pressoché nullo.

L'efficacia del sistema dipende da diversi parametri, tra cui la profondità di installazione, la portata d'aria insufflata, la geometria delle perforazioni del condotto, nonché le caratteristiche del moto ondoso incidente.

Obiettivo della presente tesi è analizzare il comportamento idrodinamico del sistema, valutandone la capacità dissipativa e individuando i principali parametri che ne influenzano l'efficacia. Attraverso l'analisi teorica e sperimentale condotta, si intende fornire indicazioni utili per l'applicazione della tecnologia in contesti costieri, contribuendo allo sviluppo di strategie di difesa innovative e sostenibili.

CAPITOLO 1: OPERE DI DIFESA COSTIERA

L'arretramento progressivo delle spiagge costituisce oggi una delle principali criticità per le aree costiere, con ripercussioni sia sull'equilibrio ambientale sia sulle attività economiche legate al territorio. Si tratta di un fenomeno complesso, determinato da cause naturali ma, in misura sempre più rilevante, dall'intervento umano.

La spiaggia è un deposito costiero litorale costituito da sedimenti (sabbie e/o ciottoli), che si estende dalle dune costiere o affioramenti rocciosi e lato off-shore fino ad una profondità tale da non avere più interazione tra i depositi sabbiosi sul fondo ed il moto ondoso.

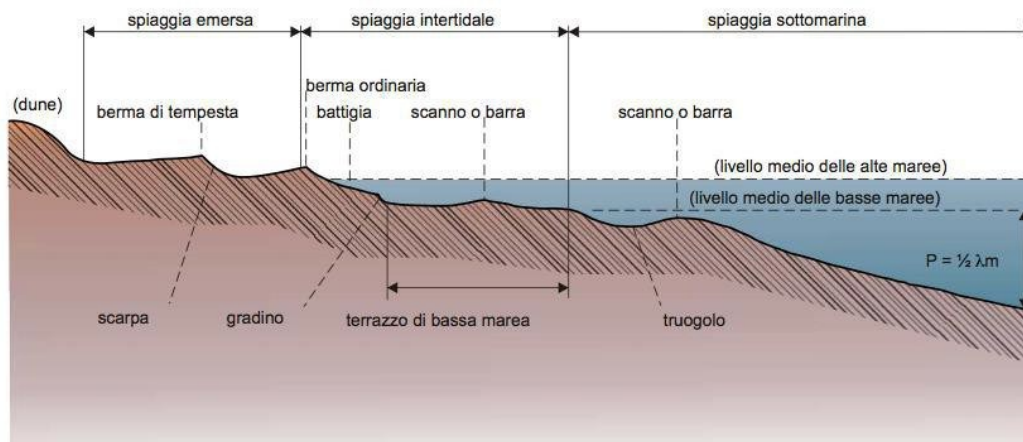


Fig.1.1 Profilo di una spiaggia e principali elementi caratteristici

L'Italia vanta uno sviluppo costiero di circa 7.500 km, una risorsa naturale che posiziona il paese come leader nel turismo balneare europeo e mondiale. Questa estensione non è omogenea, ma si articola in una varietà morfologica:

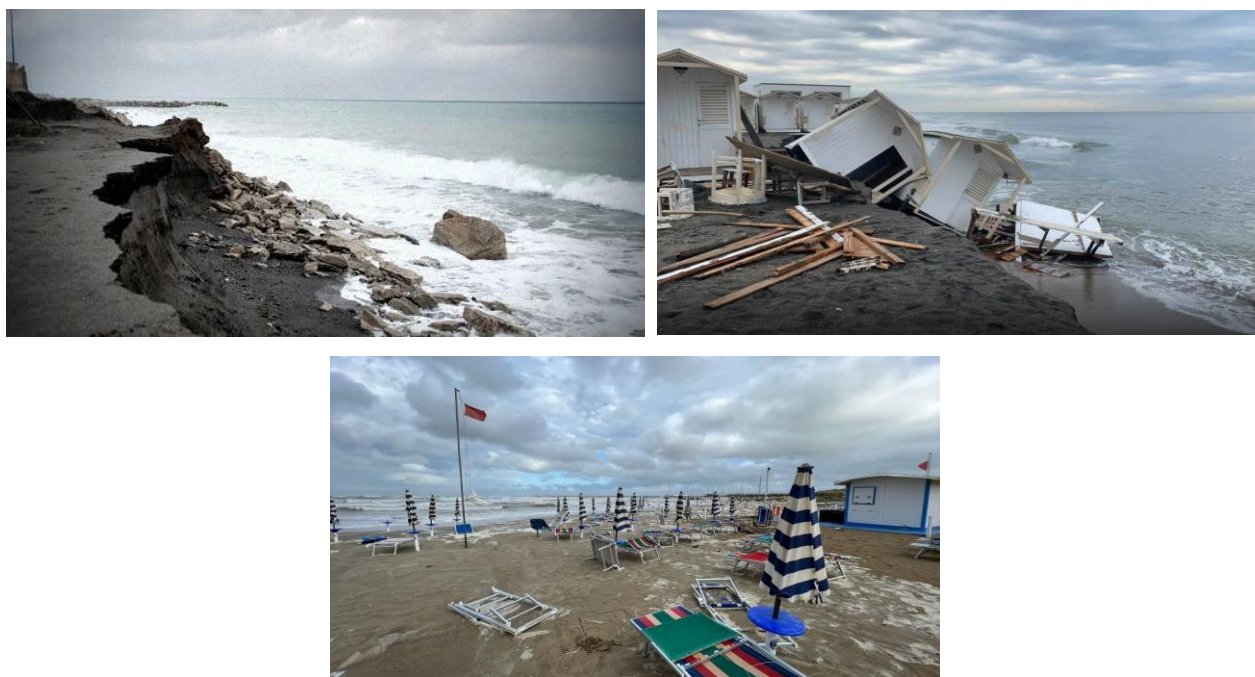
Secondo i dati ISPRA e del Ministero dell'Ambiente, le coste italiane sono così suddivise:

- Coste basse (sabbiose o ghiaiose): rappresentano circa il 43% del totale (circa 3.270 km). Sono le aree a maggiore vocazione turistica e pressione antropica;
- Coste alte (rocciose): costituiscono circa il 30% del litorale. Spesso protette o meno accessibili, rappresentano un valore paesaggistico e di biodiversità inestimabile.
- Tratti artificializzati: circa il 27% delle coste oggi è occupato da infrastrutture portuali, opere di difesa o urbanizzate (circa 2.250 km).

L'analisi dei fattori che influenzano la stabilità della linea di costa evidenzia come l'incremento dell'erosione sia riconducibile principalmente a tre aspetti: l'intensa urbanizzazione delle fasce costiere, la riduzione del trasporto solido fluviale e i fenomeni di subsidenza. In particolare, le opere di bonifica, l'estrazione di sabbia e ghiaia dagli alvei dei fiumi e la regolazione artificiale dei corsi d'acqua hanno comportato una significativa diminuzione dell'apporto di sedimenti al mare. Di conseguenza, i litorali ricevono oggi quantità di materiale inferiori rispetto al passato, alterando il naturale bilancio sedimentario e favorendo l'erosione.

A ciò si aggiunge la progressiva trasformazione del paesaggio costiero: la sostituzione della vegetazione spontanea e dei cordoni dunali con stabilimenti balneari, infrastrutture ed edifici costruiti spesso in prossimità della battigia ha compromesso ulteriormente l'equilibrio dinamico della costa.

Diventa quindi necessario adottare strategie e interventi mirati per contenere il fenomeno erosivo, tutelare le spiagge e garantire la sicurezza delle strutture esistenti, nel rispetto dell'ambiente costiero e delle sue dinamiche naturali.



Figg.1.2 evidenze dei danni prodotti da eventi meteo-marini avversi

1.1 Interventi tradizionali

Le strategie solitamente impiegate per la protezione e la cura dell'assetto morfologico delle coste si possono distinguere in due filoni principali:

- interventi indiretti
- interventi diretti

Si definiscono azioni indirette tutte quelle norme e prescrizioni legislative che mirano a una "gestione cautelativa del suolo", ovvero che pongono dei limiti ai processi di degrado e alla pressione antropica sulle zone delle dune e dei retrostanti sistemi dunali. Tali misure disciplinano le licenze demaniali per scopi turistici e le relative installazioni; inoltre promuovono il riposizionamento verso l'interno, quando attuabile, delle reti infrastrutturali già esistenti (come strade, ferrovie e simili).

Le operazioni di tipo diretto, al contrario, consistono in opere realizzate fisicamente sulla zona costiera e vengono generalmente ripartite in soluzioni di tipo morbido o "soft" e soluzioni di tipo rigido o "hard".

Nel primo caso, si parla di azioni volte a stabilizzare i litorali minimizzando le ripercussioni sull'ecosistema e cercando di non alterare i cicli naturali di movimentazione dei sedimenti lungo la costa.

Le opere di natura rigida sono invece caratterizzate da una presenza molto frequente sul territorio e sono finalizzate a intervenire puntualmente per bloccare il fenomeno dell'erosione dove esso si manifesta. Tali strutture possiedono una notevole resistenza temporale e la loro fase di design richiede un'attenzione elevatissima per assicurare che gli impatti ambientali siano minimi e che la qualità della balneazione resti alta. In queste circostanze, risulta indispensabile un'attività di controllo costante volta a individuare tempestivamente eventuali conseguenze negative derivanti dalla costruzione di tali manufatti.

Nelle sezioni che seguono, verranno descritte brevemente le principali tipologie di opere per la difesa delle coste, sia in ambito rigido che morbido.

1.1.1 Barriere parallele alla linea di costa (o Frangiflutti)

Queste opere sono posizionate a una certa distanza dalla costa se distaccate, oppure definite radenti qualora si trovino in stretta prossimità della linea di riva. Disposizioni differenti da quella parallela alla linea di costa sono giustificate se ci troviamo in presenza di correnti o moto ondoso incidente proveniente esclusivamente da un ristretto settore direzionale obliquo rispetto alla normale linea di costa.

In passato si utilizzavano massi cubici o parallelepipedi, successivamente si è optato per massi di forma articolata (tetrapodo, dolos) questo migliora l'incastro e la capacità di assorbimento d'energia per rugosità e permeabilità, riducendo i fenomeni di riflessione e di sormonto.

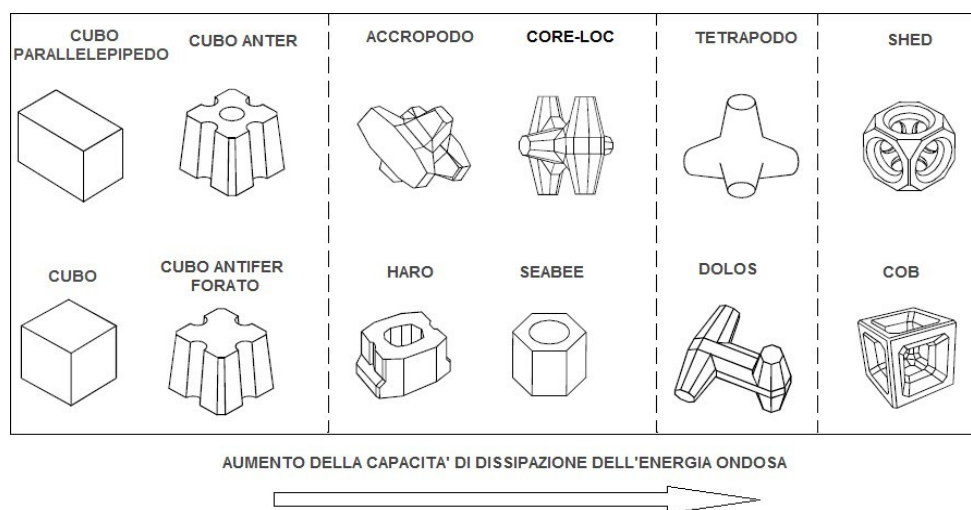


Fig. 1.3 Forme speciali di massi frangiflutti in calcestruzzo.

L'alimetria del coronamento della struttura non è definita in modo univoco, ma viene stabilita in fase di progetto in base alle specifiche esigenze di difesa e alle caratteristiche meteomarine del paraggio. Tale quota può essere impostata a un livello superiore rispetto al livello medio marino (S.L.M.), configurando un'opera emersa, oppure a una quota batimetrica inferiore, dando origine a una barriera sommersa. La scelta tra queste due configurazioni dipende strettamente dal grado di protezione che si intende garantire al litorale e dalla

tolleranza ammessa verso i fenomeni di tracimazione o di trasmissione dell'energia ondosa residua all'interno del bacino protetto.

Se la quota di cresta della barriera è superiore al livello medio marino, l'opera prende il nome di frangiflutto emerso, raramente o frequentemente tracimabile, a seconda delle condizioni idrauliche che si verificano.

Sono generalmente caratterizzate dalla presenza di un nucleo poco permeabile in “tout venant” di cava e strati filtro tra nucleo e rivestimento esterno, chiamato “mantellata” di materiale di pezzatura intermedia, al fine di impedire l'asportazione del materiale costituente il nucleo per effetto dell'azione del moto ondoso su di esso.

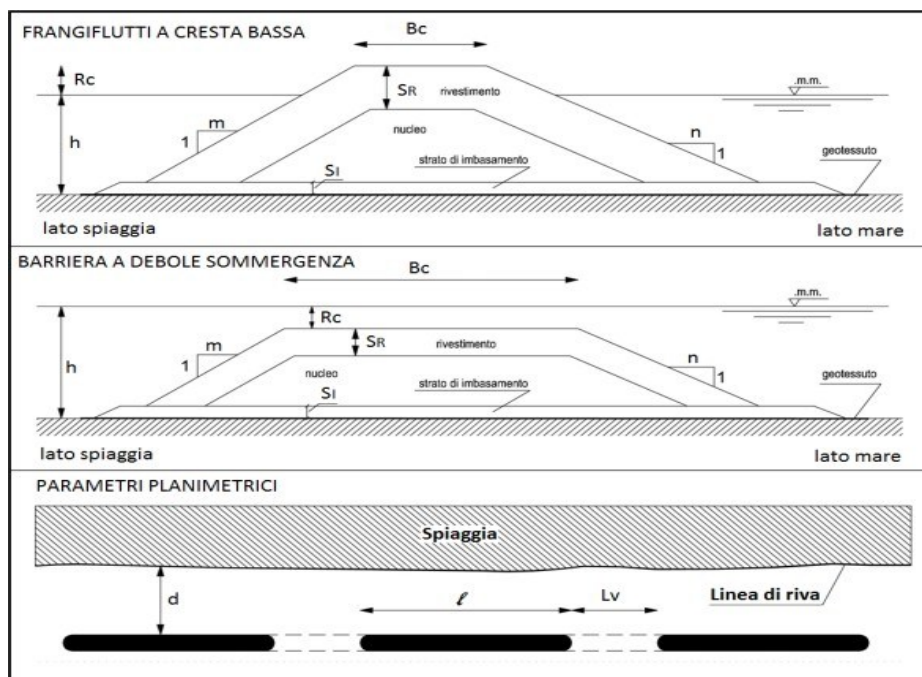


Fig. 1.4 Schema di un frangiflutto emerso e parametri di posizionamento.

Lungo la costa, a protezione della spiaggia, vengono solitamente realizzati frangiflutti con sezione trasversale trapezoidale, senza muro paraonde, costituiti in nucleo in tout venant e da più strati esterni costituiti da massi di cava di dimensioni crescenti spostandosi verso l'esterno.

Tra un'opera e l'altra è necessario mantenere uno spazio libero, per permettere un corretto ricambio idrico nella parte più vicina alla costa, in modo da evitare una rapida eutrofizzazione.

L'obiettivo principale di queste barriere è quello di dissipare l'energia del moto ondoso tramite il frangimento delle onde, proteggendo la costa dall'attacco diretto, e di determinare, se il fondo è costituito da materiale incoerente, una variazione del trasporto solido costiero; offrono una protezione quasi totale del litorale, tuttavia generano al contempo anche una forte riflessione dell'onda incidente, che causa un profondo scavo ai piedi dell'opera che ne mette in pericolo la stabilità stessa. Inoltre, possono ridurre la fruibilità del litorale, peggiorare la qualità delle acque, generando pericoli di balneazione, ostacolando l'utilizzo di piccoli natanti ed alterando il paesaggio locale.

Se la quota della cresta è inferiore al livello medio marino l'opera viene detta barriera sommersa. L'opera è sempre tracimabile; fornisce il vantaggio di diminuire il possibile inquinamento dello specchio d'acqua protetto, aumentando il ricircolo dell'acqua, migliora l'aspetto paesaggistico dell'area dato che l'opera rimane "nascosta", ma ne riduce l'effetto di protezione.

Se la profondità di coronamento risulta maggiore di 1 metro, tali opere possono essere continuative ed è possibile omettere le interruzioni, poiché è garantito il ricambio di acqua.



Fig.1.5 Protezione tramite frangiflutti emersi paralleli alla linea di costa (Porto San Giorgio).

1.1.2 Pennelli trasversali alla linea di riva

I pennelli sono strutture trasversali che in generale si utilizzano quando è accertata l'esistenza di un sufficiente trasporto long-shore. Sono opere di difesa a gettata, con andamento planimetrico o leggermente obliquo rispetto alla linea di riva.

A differenza delle scogliere distaccate che operano direttamente sul trasporto solido costiero creando una zona di calma dal moto ondoso incidente dove è favorita la sedimentazione del materiale solido, i pennelli interrompono il trasporto lungo riva assicurando al tratto da proteggere la quantità di materiale necessaria per la realizzazione di una spiaggia artificiale ma hanno l'inconveniente di determinare nella spiaggia una drastica riduzione del trasporto solido che la alimentava "spostando" il problema erosivo in un'altra zona adiacente. L'erosione di quest'ultima, può essere limitata, prevedendo un intervento di ripascimento artificiale, opere di by-pass dei sedimenti o progettando l'opera in modo tale che la sua disposizione planimetrica permetta un apporto sufficiente di sedimenti alla spiaggia sottoflutto.

La loro efficacia nell'intercettare i sedimenti dipende dalla loro lunghezza: all'aumentare di essa aumenta la portata solida longitudinale intercettata. A monte provocano l'avanzamento della linea di riva, mentre a valle l'arretramento (monte e valle sono riferiti alla direzione del trasporto longitudinale), occorre quindi ponderare le singole scelte prima di progettare un'opera di questo tipo.

Un altro inconveniente si presenta se l'attacco ondoso è prevalentemente frontale, in tal caso la deriva litoranea sarà scarsa; in tal caso un sistema di pennelli non assicura la difesa della spiaggia, anzi può risultare dannoso, facilitando l'allontanamento verso il largo dei sedimenti più fini.

Tuttavia sono opere di rapida realizzazione, di facile manutenzione e rispetto ad una scogliera hanno un'interferenza minore con le attività turistico-balneari.

I pennelli sono opere costituite da un ammasso lapideo che costituisce il nucleo centrale in tout venant, sormontato da diversi strati protettivi di diametro maggiore con funzione di resistenza al moto ondoso e protezione del nucleo.

È possibile strutturare la parte superiore con un passaggio pedonale, costruendo al di sopra una sovrastruttura (berma) che può essere transitabile.

I pennelli devono essere ben aderenti alla terraferma, in modo da evitare che le onde possano generare il fenomeno del “run-up” ovvero che l’ancoraggio possa essere aggirato dal trasporto longitudinale.

Anche per questa tipologia di opere il coronamento può trovarsi sopra o sotto il livello del mare. Parliamo di pennelli emergenti se ci troviamo nel caso di coronamento al di fuori del livello del mare, mentre parliamo di pennelli sommersi se ci troviamo nel caso di coronamento sommerso.

Dal punto di vista costruttivo i pennelli vengono realizzati in un numero di unità tali da ottenere la protezione desiderata per il tratto costiero interessato.



Fig.1.6 Protezione delle coste tramite pennelli trasversali alla linea di costa

1.1.3 Opere morbide

L'utilizzo di opere di tipo morbido prevede la stabilizzazione della linea di costa tramite utilizzo di soluzioni innovative come le barriere in geotessuto e/o ripascimenti artificiali, che consistono nel versamento di materiale granulare, di caratteristiche (tessiturali, cromatiche, ecc.) compatibili con quelle del materiale in loco. Il vantaggio di tali opere risiede nella possibilità di stabilizzare la spiaggia rendendo minimo al contempo l'impatto sull'ambiente ed evitando di interferire con i naturali fenomeni di trasporto litoraneo. Di contro, i costi elevati, per ripascimenti non protetti di cui ci si attende una durata limitata nel tempo, costituiscono il principale deterrente al loro impiego.

1.1.4 Ripascimenti

Sono interventi di tipo morbido e consistono in versamenti periodici di sabbia e/o ghiaia di opportuna granulometria estratta da cave di prestito in mare o a terra, una tecnica che si è sviluppata in particolare negli ultimi 20 anni. La scelta del materiale deve essere conforme al tipo di fondale e materiale nativo del luogo, in quantitativi tali da indurre un ampliamento artificiale della spiaggia.

Lo scopo del ripascimento è quello di ridurre o limitare l'erosione marittima, di costruire o ricostruire aree fruibili per scopi turistici e ricreativi, offrire protezione dall'attacco del moto ondoso, ricostituire habitat per specie pregiate o in estinzione.

Tra i vantaggi della realizzazione di un ripascimento artificiale vi sono quindi la possibilità di ampliamento della spiaggia e il conseguente incremento della sua fruibilità; la capacità di conservare e all'occorrenza migliorare le caratteristiche ambientali; migliorare la protezione da mareggiate anche attraverso la costruzione di spiagge sacrificali ed infine il fatto che si hanno in realtà perdite di sedimenti minori di quelle apparentemente stimabili, poiché il sedimento che abbandona l'area soggetta a riporto va a ripascere altri siti limitrofi.

Lo svantaggio principale è legato alla manutenzione del ripascimento stesso, che prevede una ciclicità nelle operazione di gettata in opera del materiale, peraltro a distanza temporale non facilmente determinabile.



Fig.1.7 Opere di ripascimento di una spiaggia sabbiosa

1.2 Interventi non tradizionali

A causa dei costi elevati di esecuzione e di posa in opera delle strutture tradizionali, i nuovi obiettivi dell'ingegneria costiera si configurano oggi come una sfida ingegneristica: concepire soluzioni d'avanguardia capaci di garantire la massima protezione dei litorali, riuscendo al contempo a minimizzare l'impatto paesaggistico e preservare l'integrità degli ecosistemi naturali.

In questa categoria rientrano sia interventi tradizionali rivisitati utilizzando materiali o metodi innovativi, sia interventi di rinaturalizzazione dei cordoni dunali.

Le opere non tradizionali più diffuse sono:

- **AQUAREEF:** sono strutture tridimensionali prefabbricate realizzate in materiali ecocompatibili come calcestruzzi a PH controllato o materiali naturali, progettate per essere sommerse o semisommerse, sono dei blocchi progettati con cavità, passaggi e texture superficiali in modo da favorire la crescita e l'insediamento di organismi marini.

Il vantaggio maggiore è che essendo sommersi non alterano la paesaggistica, ed inoltre incrementano la biodiversità locale.

Sono opere comunque molto costose per i materiali utilizzati e la precisione maggiore richiesta rispetto ai massi grezzi.



Fig. 1.8 Blocchi aquareef, dettaglio della posa in opera

- **BARRIERE SOMMERSE IN GEOTESSILE:** sono grandi tubolari in materiale sintetico resistente (geotessile) riempiti di sabbia o materiale inerte, posti sul fondale marino. Vengono installati parallelamente alla costa ad una certa distanza da essa, ed una volta riempiti fungono da dighe soffolte.

Il vantaggio principale è che il costo è molto contenuto e l'installazione è semplice e maneggevole, oltre ad essere sommerse, evitando l'impatto visivo sulla paesaggistica. La

durata è la nota negativa, poiché il materiale sintetico può essere soggetto a lacerazioni da parte di detriti, animali o ancore delle imbarcazioni.



Fig. 1.9 Barriere sommerse in geotessile

- RIPASCIMENTI CON BARRIERE DI “INGEGNERIA NATURALISTICA”: invece di usare strutture rigide è possibile utilizzare materiali naturali come pali in legno, fascine di rami o bio-stuoie per creare elementi capaci di trattenere la sabbia versata artificialmente.

La facilità di installazione e reperimento dei materiali, unito al costo molto basso sono elementi che creano vantaggi nell'utilizzo di tali metodologie, la durata e l'efficacia però è molto limitante.

- PEP REEF: Il Pep Reef (*Prefabricated Erosion Prevention*) è un reef artificiale formato da moduli di calcestruzzo; ogni modulo presenta dimensioni approssimative pari a 2.7m x 3.6m x 2.4m e pesa circa 25 tonnellate. Questo tipo di struttura frangiflutto è definita “*narrow-crested*”, a cresta stretta, a causa della forma triangolare con la dimensione più stretta sulla cresta, pari a 0.3m la struttura frangiflutto si ottiene mettendo insieme i diversi moduli con la faccia meno ripida posizionata in direzione del lato di provenienza delle onde e la faccia a pendenza maggiore posizionata di fronte alla spiaggia. La cresta è stata progettata per influenzare il moto ondoso.

- FERRAN: Il palo di tipo Ferran è un manufatto in calcestruzzo armato che può essere assemblato, o prima di essere collocato sul fondo o sul fondo stesso, in svariate combinazioni. L'elemento di base è una piastra ottagonale forata che viene unita mediante bulloni ad altri due elementi analoghi formando una struttura di base con forma piramidale. A loro volta, le piramidi possono essere assemblate in varie forme e geometrie fornendo il *lay-out* finale del Reef.

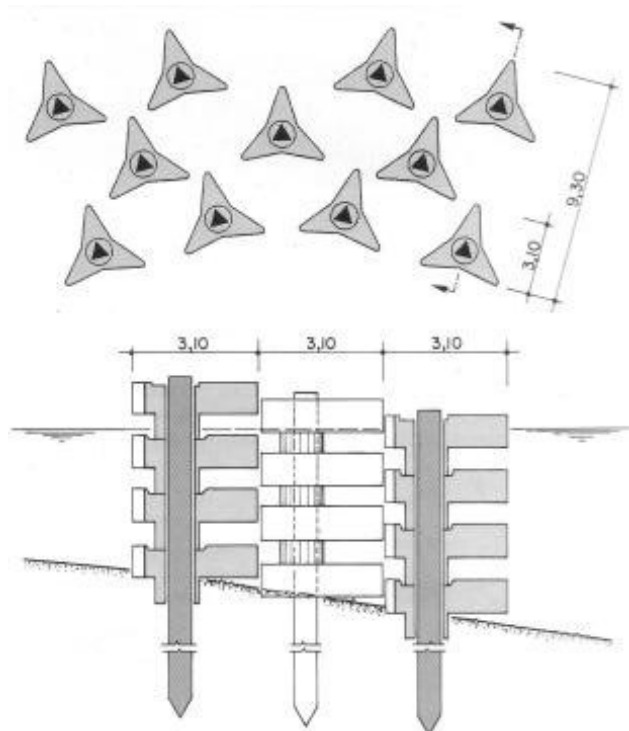


Fig. 1.10 Schema dei pali Ferran

CAPITOLO 2: APPLICAZIONI E STUDI DEL PNEUMATIC BREAKWATER

Di seguito vengono riportati alcuni casi di applicazioni e studi del metodo “pneumatic breakwater”.

2.1 Il salvataggio del molo di El Segundo

Uno dei primi utilizzi documentati e spettacolari avvenne negli Stati Uniti durante i primi anni del '900. L'ingegnere Philip Brasher ebbe l'opportunità di testare il suo sistema pneumatico per proteggere un lungo molo della Standard Oil a El Segundo, in California, minacciato dalle tempeste del Pacifico. In un'epoca di scetticismo, il sistema venne attivato durante una violenta mareggiata: mentre le onde distruggevano le strutture vicine, il tratto di mare protetto dalle bolle rimase sorprendentemente calmo, salvando il molo dal collasso. Fu la prova tangibile che l'aria poteva sconfiggere la forza brutta dell'oceano.

2.2 La Seconda Guerra Mondiale e la logistica navale

Durante il conflitto mondiale, la necessità di creare approdi sicuri in tempi rapidissimi portò a un rinnovato interesse per i frangiflutti pneumatici. Furono progettati per essere installati in acque portuali temporanee o in zone di sbarco dove non era possibile costruire dighe fisse. In questi contesti, il sistema veniva utilizzato non solo per le onde, ma anche per impedire che il ghiaccio bloccasse i canali di navigazione vitali per i rifornimenti, mantenendo l'acqua in movimento e impedendo la solidificazione superficiale.

2.3 La protezione delle operazioni di "Tendering" nelle Bermuda

Un esempio moderno e descrittivo si ritrova nell'arcipelago delle Bermuda. Qui, le grandi navi da crociera spesso non possono attraccare direttamente a causa dei bassi fondali o della delicatezza della barriera corallina. In diversi momenti critici della gestione turistica, si è fatto

ricorso a sistemi di cortine d'aria per permettere ai "tender" (le imbarcazioni più piccole che trasportano i passeggeri a terra) di operare in sicurezza. Il sistema creava una "bolla" di calma piatta intorno alla fiancata della nave madre, proteggendo i passeggeri durante il trasbordo mentre, a pochi metri di distanza, il mare continuava a mostrare la sua forza.

2.4 Il contenimento dei sedimenti nei Grandi Laghi

Oltre alla forza delle onde, il sistema è stato storicamente impiegato nei Grandi Laghi del Nord America per gestire la dinamica dei sedimenti. Durante lavori di dragaggio o riparazioni subacquee, le cortine di bolle sono state attivate per creare una barriera invisibile che impedisse ai detriti e ai fanghi sollevati dal fondo di disperdersi verso le zone protette o le spiagge pubbliche, agendo come un muro d'aria che filtrava l'acqua senza bloccare il passaggio dei pesci o delle piccole imbarcazioni.

2.5 Mitigazione del disastro Deepwater Horizon (2010)

Nel giugno 2010, una cortina di bolle è stata implementata presso il Destin Pass (Contea di Okaloosa, Florida) come misura emergenziale per limitare l'ingresso di greggio nelle lagune interne, a seguito del disastro della piattaforma Deepwater Horizon.

Il sistema era costituito da una linea di diffusori d'aria posizionata sul fondale marino, disposta trasversalmente rispetto alla direzione principale del flusso. La configurazione comprendeva una tubazione perforata ancorata al fondo mediante zavorre, dotata di ugelli equispaziati per garantire una distribuzione uniforme dell'aria lungo tutta la sezione del canale.

L'alimentazione era assicurata da compressori esterni collegati tramite linee ad alta pressione, in grado di generare una portata d'aria sufficiente a creare una cortina continua lungo l'intera colonna d'acqua.

Il principio operativo, noto come push and skim, si basa sulla combinazione di due effetti principali:

- il trasporto ascensionale indotto dalle bolle, che favorisce la risalita degli idrocarburi dispersi;
- la turbolenza indotta, che modifica il campo di velocità e incrementa il mescolamento.

Introducendo questa regione di moto fortemente tridimensionale, la cortina di bolle è riuscita a deviare e convogliare il greggio direttamente verso la superficie. Una volta lì, il petrolio, accumulato e intrappolato dallo sbarramento d'aria, ha potuto essere intercettato e rimosso agevolmente attraverso i sistemi di raccolta tradizionali (skimmer e panne galleggianti), limitando drasticamente l'impatto ambientale all'interno delle lagune.

2.6 The Great Bubble Barrier (Amsterdam)

Un'applicazione recente e decisamente innovativa delle cortine di bolle si trova nel cuore di Amsterdam, per l'esattezza nel canale Westerdok, dove è stato implementato il sistema noto come The Great Bubble Barrier con l'obiettivo di intercettare i rifiuti plastici prima che raggiungano il mare.

A differenza delle barriere fisiche tradizionali, questo dispositivo non blocca il canale, ma si integra in modo intelligente con la sua idrodinamica. Sul fondale è stata posizionata una tubazione perforata che, alimentata continuamente da compressori a terra, genera una cortina di bolle. La vera chiave del progetto sta nel suo orientamento: la linea è disposta in diagonale rispetto alla corrente. In questo modo, la barriera non agisce come un muro perpendicolare, ma sfrutta il flusso naturale dell'acqua per indurre una deviazione controllata dei detriti, che vengono guidati verso un apposito punto di raccolta laterale situato a riva.

Il funzionamento del sistema si basa su una combinazione di tre effetti fluidodinamici. Per prima cosa, la risalita delle bolle genera un trasporto verticale che solleva in superficie i rifiuti sospesi lungo tutta la colonna d'acqua. Una volta a galla, l'inclinazione diagonale della cortina devia lateralmente il flusso, mentre la formazione di una corrente superficiale secondaria spinge definitivamente i detriti accumulati verso il bacino di raccolta.

Questo complesso campo di moto, pur introducendo una forte turbolenza che dissipa l'energia cinetica del flusso, porta con sé enormi vantaggi operativi. Il sistema si dimostra infatti straordinariamente efficace nel catturare la plastica e, allo stesso tempo, garantisce la totale navigabilità del canale e il libero passaggio della fauna ittica, superando così i limiti strutturali delle barriere meccaniche.

2.7 La difesa silenziosa dei moli industriali

In tempi più recenti, molte strutture industriali offshore hanno adottato questa soluzione come "misura di emergenza". Invece di una protezione costante, il sistema rimane dormiente sul fondo, pronto a essere attivato solo quando i bollettini meteo annunciano onde di una frequenza specifica. È stato utilizzato in vari terminal petroliferi e chimici per stabilizzare le navi durante le delicate operazioni di carico e scarico, evitando che il rollio eccessivo causato dal moto ondoso potesse danneggiare i bracci di collegamento o causare sversamenti.

Parallelamente alle applicazioni in scala reale, numerosi studi sperimentali sono stati condotti in laboratorio per valutare le prestazioni delle barriere pneumatiche come opere di protezione costiera. Già a partire dagli anni '50, test in canali ondosi hanno analizzato l'efficacia di tali dispositivi nel ridurre l'altezza d'onda trasmessa, variando parametri come la portata d'aria, la profondità e le caratteristiche del moto ondoso. Questi studi hanno evidenziato come i pneumatic breakwaters possano essere efficaci in determinate condizioni, portando alla realizzazione di ulteriori prototipi e installazioni sperimentali. La letteratura recente, come gli studi di Maciej Paprota (2014), ha spostato l'attenzione sulla cinematica fine della miscela aria-acqua. Grazie alla tecnologia PIV (Particle Image Velocimetry), gli ingegneri hanno potuto visualizzare come la cortina d'aria non agisca solo come muro, ma come un perturbatore di flussi che frammenta la velocità orbitale delle onde corte.

CAPITOLO 3: MODELLI FISICI NELL'IDRALUICA MARITTIMA

Nello studio di numerose opere idrauliche risulta spesso necessario ricorrere a modelli fisici, soprattutto quando si devono analizzare fenomeni complessi che non possono essere descritti in modo soddisfacente mediante sole formulazioni matematiche. In particolare, nell'ambito dell'idraulica marittima, molti processi coinvolgono interazioni tra moto ondoso, strutture e sedimenti che rendono difficile una schematizzazione puramente teorica.

Per definizione, un modello fisico è una rappresentazione semplificata, realizzata in laboratorio, di un fenomeno naturale o di un'opera reale, che prende il nome di prototipo. Il modello consente di riprodurre in scala le caratteristiche principali del sistema reale, mantenendone il comportamento essenziale ai fini dello studio.

Diversamente, un modello matematico consiste nell'impostazione di un sistema di equazioni che descrivono il fenomeno in esame e che vengono risolte mediante algoritmi o procedure numeriche automatiche. Sebbene tali modelli siano strumenti estremamente potenti, non sempre riescono a cogliere la complessità dei fenomeni fisici, motivo per cui l'approccio sperimentale mantiene un ruolo fondamentale.

Poiché nella maggior parte dei casi non è possibile riprodurre il fenomeno in dimensioni reali, si introduce il concetto di scala, che definisce il rapporto tra le dimensioni del prototipo e quelle del modello. La scelta della scala rappresenta un passaggio cruciale, in quanto condiziona la corretta rappresentazione dei fenomeni osservati.

I modelli marittimi vengono generalmente realizzati per verificare la stabilità di opere quali scogliere, moli e altre strutture di difesa costiera, per analizzare l'agitazione ondosa all'interno di bacini portuali o per studiare la propagazione e la riflessione delle onde in prossimità delle infrastrutture. Le prove possono essere condotte su modelli bidimensionali, realizzati in canaletta, oppure su modelli tridimensionali, allestiti in vasca.

Ad esempio, qualora si voglia valutare la stabilità o la riflessione di un tratto di molo sottoposto all'azione del moto ondoso, si riproduce in scala una porzione dell'opera in canaletta e la si sottopone a onde generate artificialmente. Il moto ondoso viene prodotto

mediante un dispositivo chiamato battitore, costituito generalmente da una pala mobile che, oscillando o traslando, trasferisce energia all'acqua generando onde controllate.

Uno dei principali vantaggi dell'impiego dei modelli fisici risiede non solo nella possibilità di riprodurre un fenomeno reale in scala ridotta, ma anche nella possibilità di introdurre semplificazioni che consentano di isolare le variabili più significative. In laboratorio è infatti possibile operare in un ambiente controllato, modificando intenzionalmente le condizioni al contorno e le caratteristiche del fenomeno secondo gli obiettivi della ricerca. Tale controllo non è attuabile in natura, dove le variabili che governano il processo non possono essere regolate a piacimento.

Tuttavia, la riproduzione sperimentale delle condizioni naturali presenta inevitabili difficoltà, dovute sia ai limiti degli strumenti impiegati, sia alla complessità intrinseca dei fenomeni. È pertanto necessario considerare il cosiddetto effetto scala, ossia il fatto che non tutte le grandezze fisiche possono essere ridotte in maniera perfettamente proporzionale. Alcune forze, come ad esempio quelle viscosi, assumono nel modello un peso relativo maggiore rispetto al prototipo. In generale, quanto più piccola è la scala adottata, tanto più marcato può risultare tale effetto, con possibili ripercussioni sull'interpretazione dei risultati.

3.1 Analisi dimensionale e teorema di Buckingham

Il moto dei fluidi è descritto da un numero relativamente limitato di leggi fondamentali, che possono essere formulate sia in forma differenziale sia in forma integrale. Tuttavia, la presenza di termini non lineari nelle equazioni che governano tali fenomeni rende, nella maggior parte dei casi, impossibile ottenere soluzioni analitiche esatte per problemi di interesse applicativo. Per questo motivo si ricorre necessariamente a forme di approssimazione.

L'approssimazione può derivare da differenti strategie. Una prima possibilità consiste nell'introdurre semplificazioni di tipo analitico, ad esempio mediante metodi perturbativi o ipotesi semplificative sulle condizioni al contorno. In alternativa, è possibile impiegare

tecniche numeriche, che permettono di risolvere le equazioni in forma discreta tramite calcolo automatico. Infine, un ulteriore approccio è rappresentato dalla sperimentazione fisica, attraverso la realizzazione di modelli in scala. In ciascuno di questi casi, l'analisi dimensionale costituisce uno strumento di supporto estremamente utile.

Un qualunque fenomeno fisico può essere formalmente descritto mediante una relazione funzionale del tipo:

$$f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0$$

dove le x_i rappresentano le grandezze fisiche coinvolte. Anche qualora la forma esplicita della funzione f non sia nota, si assume che essa esista, secondo l'impostazione deterministica propria della meccanica classica, in base alla quale a determinate condizioni corrisponde un preciso comportamento del sistema.

Le grandezze fisiche che intervengono nella descrizione di un fenomeno si distinguono in grandezze fondamentali (o primarie) e grandezze derivate. Le grandezze fondamentali sono quelle assunte come indipendenti, direttamente misurabili e dotate di unità di misura scelte in modo convenzionale. Nell'ambito della meccanica classica le dimensioni fondamentali sono tre: lunghezza [L], massa [M] e tempo [T]. Le grandezze derivate, invece, si ottengono combinando tra loro le grandezze fondamentali secondo relazioni fisiche definite.

L'analisi dimensionale si fonda sul principio di omogeneità dimensionale, secondo il quale ogni equazione che rappresenta un fenomeno fisico deve essere dimensionalmente coerente: tutti i termini presenti devono avere le stesse dimensioni. Questo principio costituisce una condizione necessaria di correttezza formale delle equazioni fisiche.

Nel contesto degli studi sperimentali, l'analisi dimensionale non fornisce direttamente risultati quantitativi, ma offre criteri metodologici utili per organizzare e interpretare le informazioni ricavate dalle prove. Essa consente infatti di ridurre il numero di variabili indipendenti e di rappresentare i risultati in forma compatta, facilitandone la generalizzazione e il confronto.

Il fondamento teorico dell'analisi dimensionale è rappresentato dal Teorema di Buckingham, noto anche come teorema Π . Tale teorema afferma che, se un fenomeno fisico è descritto da una relazione dimensionalmente omogenea che coinvolge n grandezze dimensionali x_i , è possibile riformulare il problema attraverso un numero inferiore di parametri adimensionali. Più precisamente, se tra le n grandezze sono presenti k dimensioni fondamentali indipendenti, allora il fenomeno può essere espresso mediante una relazione equivalente che coinvolge $(n - k)$ gruppi adimensionali Π , costruiti a partire dalle grandezze originarie. La relazione può essere scritta nella forma:

$$\Pi_1 = F(\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_{n-k})$$

Il numero k coincide con il numero di dimensioni fondamentali indipendenti presenti tra le variabili considerate. La riduzione operata dal teorema permette quindi di passare da un problema espresso in termini dimensionali a uno formulato tramite parametri adimensionali, riducendo il numero di variabili effettivamente rilevanti.

È importante sottolineare che il teorema di Buckingham garantisce l'esistenza di tali gruppi adimensionali, ma non fornisce un procedimento univoco per la loro determinazione. La scelta dei parametri Π , infatti, non è unica e dipende dall'esperienza e dalla comprensione fisica del fenomeno in esame. Proprio per questo motivo, l'analisi dimensionale richiede non solo rigore formale, ma anche consapevolezza dei meccanismi fisici che governano il problema studiato.

3.2 Similitudini idrodinamiche

I modelli fisici tradizionali usati in campo idraulico vengono suddivisi in:

- modelli simili;
- modelli distorti;
- modelli analogici;

I modelli simili sono caratterizzati da un'unica scala di riduzione applicata a tutte le grandezze aventi le stesse dimensioni fisiche. In altre parole, il rapporto tra le dimensioni del prototipo e quelle del modello rimane costante per ciascuna categoria di grandezze omogenee.

Si parla invece di modello distorto quando le scale di riduzione non coincidono nelle diverse direzioni spaziali. Un caso tipico si verifica nei modelli bidimensionali, nei quali la scala orizzontale e quella verticale risultano differenti. Tale scelta può rendersi necessaria per esigenze pratiche o per migliorare il rapporto di scala in determinati fenomeni.

I modelli analogici, infine, si basano su una corrispondenza tra grandezze fisiche di natura differente rispetto a quelle del sistema reale, ma governate da leggi matematiche formalmente simili.

Altra distinzione che può essere effettuata all'interno dei modelli simili e distorti è rappresentata dalla suddivisione tra modelli "a fondo fisso" e modelli "a fondo mobile".

Nel modello a fondo fisso viene data indicazione del pelo libero dell'acqua relativamente a qualsiasi fenomeno idraulico, il piano di fondo non è soggetto a modificazioni durante la prova: il movimento dei sedimenti è trascurabile e l'analisi si concentra principalmente sull'andamento del pelo libero e sul comportamento idrodinamico del fluido. Tali modelli sono particolarmente utili quando l'evoluzione morfologica del fondo non costituisce l'oggetto principale dello studio.

Al contrario i modelli a fondo mobile sono utilizzati quando è necessario analizzare fenomeni che coinvolgono anche o soprattutto il piano di fondo, come ad esempio nello studio del moto nei corsi d'acqua e nei processi di erosione e deposizione lungo i litorali. In questi casi diventa

fondamentale garantire una corretta rappresentazione non solo del moto del fluido ma anche delle interazioni tra acqua e materiale solido.

Idealmente un modello in laboratorio adeguatamente progettato dovrebbe comportarsi in maniera simile alla versione controllata del prototipo, in termini di velocità, accelerazione, trasporto di massa e forze risultanti che il flusso fluido esercita sui corpi solidi.

Tramite la teoria della similitudine abbiamo le conoscenze necessarie per progettare i modelli e per rielaborare i dati di laboratorio, ottenuti in scala, e riportarli a dati reali.

I risultati di una serie di prove sperimentali su un modello fisico, infatti, sono riportabili sul prototipo solo se sono rispettate un certo numero di relazioni che costituiscono la legge della similitudine.

I requisiti richiesti per la similitudine tra il comportamento di un'opera in scala ridotta ed il suo prototipo vengono stabiliti sulla base di considerazioni dinamiche e di analisi dimensionali. La similitudine completa fra un modello ed il relativo prototipo coinvolge una similitudine geometrica (lunghezza), cinematica (tempi e velocità), dinamica (forze).

3.2.1 Criteri di similitudine e leggi di scala

Nella fase di progettazione di un modello fisico, una volta individuati i processi idrodinamici o morfologici che si intendono investigare, risulta prioritario stabilire il criterio di similitudine più idoneo da adottare. Tale criterio definisce rigorosamente la legge di riduzione in scala, ovvero l'insieme di rapporti costanti che mettono in relazione le grandezze fisiche (geometriche, cinematiche e dinamiche) del modello di laboratorio con le corrispondenti grandezze del sistema reale, o prototipo.

La determinazione delle scale di riduzione più appropriate è finalizzata al raggiungimento della similitudine dinamica tra i due sistemi. Questo obiettivo garantisce che il modello non sia solo una riproduzione proporzionata nelle forme (similitudine geometrica), ma che

presenti una distribuzione delle forze tale da assicurare una riproduzione fedele e scientificamente attendibile del fenomeno naturale analizzato.

Da un punto di vista fisico, in ogni fenomeno idrodinamico sono intrinsecamente presenti le forze inerziali, le quali interagiscono e vengono bilanciate da sollecitazioni di differente natura, quali la gravità, la viscosità o la tensione superficiale. Di conseguenza, sono stati codificati diversi criteri di similitudine, ciascuno basato sul rapporto tra le forze d'inerzia e una specifica forza antagonista.

All'interno di questo studio, verranno approfonditi nei paragrafi successivi i criteri di maggiore rilevanza per l'ingegneria costiera, analizzando come l'equilibrio tra le forze inerziali e le altre componenti fisiche influenzi la validità dei risultati sperimentali.

3.3 Criterio di Reynolds

Nello studio dei modelli fisici in cui le forze viscosi svolgono un ruolo predominante rispetto alle altre azioni sollecitate, il riferimento tecnico principale è rappresentato dal criterio di similitudine di Reynolds. Tale principio si basa sull'omonimo numero adimensionale Re , il quale esprime il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosi che agiscono all'interno di un fluido in movimento:

$$Re = \frac{\rho * v * L}{\mu} = \frac{v * L}{\nu}$$

dove:

- ρ è la densità del fluido;
- v rappresenta la velocità caratteristica del flusso;
- L è una dimensione geometrica rappresentativa (che può essere un diametro o una lunghezza di una condotta);
- μ e ν rappresentano, rispettivamente, la viscosità dinamica e cinematica del fluido.

Affinché si verifichi la similitudine di Reynolds tra il modello di laboratorio e il prototipo reale, è necessario che il numero di Reynolds sia identico in entrambi i sistemi ($Re_{mod} = Re_{prot}$). Ciò garantisce che il regime di moto (laminare, di transizione o turbolento) sia riprodotto fedelmente in scala ridotta.

Nel caso in cui venga utilizzato tale criterio si sceglie un modello in cui predominano effetti dissipativi legati alla viscosità e alla turbolenza rispetto a forze di altra natura.

In base alla grandezza del numero di Reynolds siamo di fronte a caratteristiche fisiche differenti: grandi numeri di Reynolds identificano forze inerziali predominanti rispetto a quelle viscosi; viceversa, per numeri di Reynolds molto piccoli, le forze predominanti sono quelle viscosi.

Tuttavia, l'applicazione rigorosa di questo criterio presenta notevoli complessità operative. Se si utilizza lo stesso fluido (ad esempio acqua) sia nel modello che nel reale, per mantenere l'uguaglianza del numero di Reynolds a fronte di una riduzione delle dimensioni geometriche, sarebbe necessario aumentare drasticamente le velocità nel modello. Questo requisito entra spesso in conflitto con altri criteri (come quello di Froude) e può comportare difficoltà tecniche insormontabili, come l'insorgere di fenomeni di cavitazione o costi energetici elevati.

Pertanto, nella pratica dell'ingegneria marittima e costiera, si tende a operare in regime di turbolenza pienamente sviluppata, dove le forze viscosi diventano indipendenti dal numero di Reynolds, permettendo così di trascurare la stretta uguaglianza di Re a favore di altri parametri cinematici più rilevanti per il moto ondoso.

3.4 Criterio di Froude

Il criterio di Froude trova la sua applicazione elettiva nello studio dei moti in presenza di una superficie libera, contesti nei quali la forza di gravità gioca un ruolo dinamico fondamentale. Affinché si possa garantire la similitudine dinamica tra il modello sperimentale e il prototipo reale, questo criterio impone che il numero di Froude (Fr) rimanga costante nei due sistemi.

Il numero di Froude è un parametro adimensionale che esprime il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze gravitazionali. Matematicamente, tale rapporto può essere sintetizzato come segue:

$$Fr = \frac{(F_i)^{1/2}}{(F_g)^{1/2}} = \frac{(\rho L^2 V^2)^{1/2}}{(\rho L^3 g)^{1/2}}$$

dove:

- V rappresenta la velocità caratteristica del flusso;
- g è l'accelerazione di gravità;
- L è la dimensione lineare di riferimento (solitamente il tirante idrico o la lunghezza d'onda).

Il valore $Fr = 1$ rappresenta una soglia critica per la classificazione delle correnti a superficie libera. Essa funge da discriminante tra due diversi regimi di moto:

- Corrente lenta (subcritica): quando $Fr < 1$, le perturbazioni possono risalire la corrente verso monte;
- Corrente veloce (supercritica): quando $Fr > 1$, la velocità della corrente è superiore alla velocità di propagazione delle onde, impedendo a queste ultime di risalire il flusso.

Il criterio di Froude è in assoluto il più utilizzato nell'ingegneria costiera e marittima per la progettazione di modelli fisici di opere di difesa, porti e dinamiche di propagazione del moto ondoso.

Per garantire che il comportamento del modello rispecchi quello reale, il rapporto delle scale di Froude deve essere unitario ($Fr=1$).

$$\frac{N_V N_L N_\rho}{N_\mu} = 1 \qquad N_{Fr} = 1$$

Questo implica che le scale della velocità V , della lunghezza L , e della densità ρ , correlate alle proprietà del fluido e alla forza gravitazionale, debbano rispettare la seguente scala:

$$\frac{N_V}{\sqrt{g * N_L}} = 1$$

L'adozione di questo criterio permette di ottenere risultati sperimentali affidabili su fenomeni complessi come il frangimento delle onde o la stabilità delle mantellate dei frangiflutti, sebbene richieda particolare attenzione nel minimizzare gli "effetti di scala" dovuti alla non perfetta riproduzione della viscosità (che seguirebbe invece il criterio di Reynolds).

3.5 Scelta dei criteri

La selezione del criterio di similitudine più appropriato dipende strettamente dalla natura delle forze predominanti nel fenomeno analizzato. Nell'ambito dell'ingegneria costiera, le forze che governano la dinamica del sistema sono principalmente quelle gravitazionali e quelle viscosi..

Esistono altre tipologie di criteri di similitudine, ma possono essere trascurate, poiché in questo campo altre forze, associate ad esempio a forze superficiali, alla pressione o alla comprimibilità possono essere trascurate poiché di ordine nettamente inferiore rispetto alle forze analizzate.

Si può dimostrare che la completa similitudine dinamica si ha nel caso in cui entrambi i criteri siano verificati, ossia quando:

$$N_{Re} = N_{Fr} = 1$$

Nella modellazione dei fenomeni ondosi e delle correnti costiere, la prassi consolidata prevede l'adozione del criterio di Froude. Questa scelta è giustificata da due fattori principali:

1. Influenza della viscosità: Il contributo delle forze viscosi è spesso secondario, poiché il moto ondoso si propaga generalmente su distanze e profondità tali da rendere l'attrito col fondo un fattore non determinante nelle prime fasi di propagazione.
2. Ordine di grandezza: Per garantire una riproduzione scientificamente valida, è sufficiente che il numero di Reynolds nel modello sia dello stesso ordine di grandezza di quello del prototipo (o comunque tale da garantire un regime di moto turbolento), senza che vi sia una corrispondenza numerica esatta.

In definitiva, per lo studio delle opere di difesa e della propagazione ondosa, si procede costruendo modelli (geometricamente distorti o non distorti) basati sulla similitudine di Froude, accettando i minimi scostamenti dovuti agli "effetti di scala" viscosi.

CAPITOLO 4: RIFLESSIONE E TRASMISSIONE ONDOSA

Il presente capitolo introduce i fondamenti teorici relativi alla riflessione ondosa in campo marittimo e alla trasmissione ondosa.

4.1 Teoria lineare delle onde e bilancio energetico

Il moto ondoso in ambiente marittimo può essere descritto, in prima approssimazione, mediante la teoria lineare delle onde (teoria di Airy), che rappresenta uno dei modelli fondamentali per l'analisi dei fenomeni di propagazione ondosa.

Tale teoria si basa su alcune ipotesi semplificative:

- Il fluido è incomprimibile e non viscoso;
- Il moto è irrotazionale;
- Le ampiezze d'onda sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda e alla profondità;
- Le condizioni al contorno sulla superficie libera possono essere linearizzate.

In queste condizioni, il moto ondoso può essere descritto come la propagazione di onde regolari (monocromatiche) caratterizzate da altezza d'onda H , lunghezza d'onda λ , periodo T , numero d'onda $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ e pulsazione $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

La relazione tra queste grandezze è espressa dalla relazione di dispersione:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$

dove h rappresenta la profondità del fondale. Tale relazione evidenzia come la velocità di propagazione dell'onda dipenda sia dalla lunghezza d'onda sia dalla profondità del mezzo.

L'energia associata al moto ondoso è proporzionale al quadrato dell'altezza d'onda. In particolare, l'energia media per unità di superficie può essere espressa nella forma:

$$E \propto H^2$$

Questa relazione riveste un ruolo fondamentale nello studio dell'interazione tra onde e ostacoli, poiché consente di collegare direttamente le variazioni dell'altezza d'onda ai fenomeni energetici.

Il fenomeno della riflessione si determina quando un'onda progressiva, propagandosi all'interno di un fluido, incide su un ostacolo dotato di un potere riflettente non trascurabile. In ambito marittimo, tale ostacolo può essere costituito sia da opere di difesa tradizionali (a paramento verticale o inclinato), sia da sistemi innovativi, come la barriera pneumatica oggetto della presente trattazione.

In corrispondenza dell'interazione con l'ostacolo, la propagazione ondosa subisce una redistribuzione della propria componente energetica. Il coefficiente di riflessione (K_r) rappresenta il parametro di maggiore importanza ai fini di una corretta progettazione delle opere costiere, in quanto definisce il rapporto tra l'altezza dell'onda riflessa verso il largo (H_r) e l'altezza dell'onda incidente (H_i).

$$K_r = \frac{H_r}{H_i}$$

In alternativa esso può essere scritto come

$$K_r = \sqrt{\frac{E_r}{E_i}}$$

L'energia associata all'onda incidente (E_i) può essere scomposta, in accordo con il principio di conservazione dell'energia, in tre contributi fondamentali:

$$E_i = E_r + E_t + E_d$$

Dove:

- E_r (energia riflessa) rappresenta la quota di energia che viene respinta dall'ostacolo e si propaga nuovamente verso il largo. Come indicato precedentemente, il rapporto tra l'altezza

dell'onda riflessa (H_r) e l'altezza dell'onda incidente (H_i) definisce il coefficiente di riflessione K_r .

- E_t (energia trasmessa) identifica l'energia che riesce a superare la barriera e a propagarsi verso la costa. Il controllo di questa componente è l'obiettivo primario della protezione litoranea, quantificato nel coefficiente di trasmissione $K_t = H_t / H_i$.

- E_d (energia dissipata) rappresenta la frazione di energia convertita in calore e turbolenza a causa del lavoro compiuto dalle forze di attrito e dai processi di frangimento indotti.

In sintesi, la teoria lineare delle onde di Airy consente di descrivere in maniera semplificata ma efficace le principali caratteristiche del moto ondoso, mettendo in relazione le grandezze cinematiche e dinamiche fondamentali. In tale ambito, l'energia associata all'onda risulta direttamente collegata al quadrato dell'altezza d'onda, evidenziando come anche variazioni modeste di ampiezza possano comportare significative differenze in termini energetici.

Quando il moto ondoso interagisce con un ostacolo, tale energia non si conserva localmente nella sola forma di propagazione, ma viene redistribuita tra le componenti riflessa, trasmessa e dissipata. Il coefficiente di riflessione rappresenta quindi un parametro fondamentale per descrivere quantitativamente l'interazione tra onda e struttura, consentendo di collegare le caratteristiche geometriche del moto ondoso alle variazioni energetiche indotte dall'interazione stessa.

Le relazioni introdotte nel presente paragrafo costituiscono la base teorica per l'analisi più approfondita dei fenomeni di riflessione e trasmissione ondosa, che verranno trattati nei paragrafi successivi.

4.1.1 Cenni teorici sulla riflessione delle onde regolari

Quando un'onda regolare incide su un ostacolo riflettente, il campo di moto risultante può essere descritto come la sovrapposizione di due onde armoniche che si propagano in direzioni opposte: un'onda incidente e un'onda riflessa.

Il moto della superficie libera η_T è dato dalla somma algebrica delle due armoniche che viaggiano in senso opposto:

- onda incidente (η_1):

$$\eta_1 = a_1 \sin(k_1 x - \sigma_1 t + \delta_1)$$

- onda riflessa (η_2):

$$\eta_2 = a_2 \sin(k_2 x - \sigma_2 t + \delta_2)$$

e quindi:

$$\eta_T = \eta_1 + \eta_2$$

Nel caso di riflessione totale, dove le due ampiezze ($a_1 = a_2 = a$), i numeri d'onda (k) e le frequenze circolari (σ) sono identici, l'equazione del profilo della superficie libera diventa:

$$\eta_T = a_1 \sin(k_1 x - \sigma_1 t + \delta_1) + a_2 \sin(k_2 x - \sigma_2 t + \delta_2)$$

Ossia:

$$\eta_T = 2a \sin(kB - \sigma t) \cos(kx - kB)$$

Questa espressione descrive un'onda stazionaria caratterizzata dalla presenza di punti fissi nello spazio in cui l'ampiezza di oscillazione varia in funzione della posizione.

In particolare questa formula evidenzia l'esistenza di sezioni fisse nello spazio:

- NODI: in cui l'oscillazione è costantemente nulla ($\eta_T = 0$), che si verificano per $\cos(kx - kB) = 0$;
- ANTINODI: sezioni in cui l'escursione del pelo libero è massima e pari al doppio dell'ampiezza incidente ($2a$).

4.1.1.1 Riflessione totale

Quando un'onda incidente urta contro un ostacolo non deformabile, parte dell'energia viene riflessa. Nel caso limite di una parete verticale perfettamente riflettente, il coefficiente di riflessione assume un valore unitario ($K_r = 1$). Questo determina la formazione di un'onda stazionaria, nota anche come *clapotis* o *standing wave*.

Stando sotto l'ipotesi di riflessione totale, il tirante idrico è costante ($h = \text{cost}$) e si può scrivere:

$$k = k_1 = k_2 \text{ e } \mathbf{s} = \mathbf{s}_1 = \mathbf{s}_2$$

Per determinare le grandezze caratteristiche del moto ondoso risultante è necessario ricavare le espressioni del potenziale di velocità totale Φ_T , della elevazione della superficie libera η_T e delle componenti di velocità u_T e w_T .

Senza perdita di generalità si può assumere nullo lo sfasamento della prima onda ($\delta_1 = 0$). È invece necessario determinare il valore dello sfasamento δ_2 nel caso in cui l'ostacolo responsabile della riflessione sia localizzato alla posizione $x = B$. In tale sezione la velocità orizzontale deve annullarsi, quindi:

$$u_T = -\frac{\partial \Phi_T}{\partial x} = 0 \quad \text{per } x = B$$

Il potenziale complessivo è dato dalla somma dei potenziali delle due onde:

$$\Phi_T = \Phi_1 + \Phi_2$$

Per definizione il potenziale associato all'onda stazionaria può essere scritto come:

$$\Phi_T = \frac{a * g \cosh k(h + z)}{\sigma} [\cos(kx - \sigma t) - \cos(kx + \sigma t + \delta_2)]$$

Derivando rispetto alla coordinata x si ottiene la componente orizzontale della velocità:

$$u_T = \frac{\partial \Phi_T}{\partial x} = \frac{a * g \cosh k(h + z)}{\sigma} [\sin(kx - \sigma t) - \sin(kx + \sigma t + \delta_2)]$$

Affinché la velocità si annulli nel punto $x = B$ deve essere soddisfatta la relazione

$$\sin(kx - \sigma t) - \sin(kx + \sigma t + \delta_2) = 0$$

Poiché tale relazione deve valere per qualsiasi valore del tempo, si possono considerare particolari istanti:

scegliendo un istante per cui $\sin(\sigma t) = 1$ e $\cos(\sigma t) = 0$ si ricava:

$$\cos(kB) = -\cos(kB + \delta_2)$$

Analogamente scegliendo un istante per cui $\sin(\sigma t) = 0$ e $\cos(\sigma t) = 1$ si ricava:

$$\sin(kB) = \sin(kB + \delta_2)$$

Oppure nella forma piu generale:

$$\delta_2 = (2n - 1)\pi - 2kB$$

Sostituendo tale espressione nell'equazione della superficie libera e utilizzando la formula di duplicazione si ottiene:

$$\eta_T = 2a \sin(kB - \sigma t) \cos(kx - kB)$$

Questa equazione mostra che esistono posizioni lungo l'asse x in cui l'elevazione della superficie libera è sempre nulla, indipendentemente dal tempo. Tali punti sono i NODI, e si hanno quando

$$\cos(kx - kB) = 0$$

Ossia

$$kx - kB = \frac{(2n - 1)\pi}{2}$$

Da cui segue che la posizione dei nodi è:

$$x = B + \frac{(2n - 1)L}{4}$$

Derivando il potenziale rispetto a x e z si ricavano infine le componenti del moto ondoso:

$$u_T = \frac{2ag}{\sigma} k \frac{\cosh k(h + z)}{\cosh kh} [\sin(kx - kB) \cos(kB - \sigma t)]$$

$$\omega_T = -\frac{ag}{\sigma} k \frac{\sinh k(h + z)}{\cosh kh} [\cos(kx - \sigma t) \cos(kx - kB)]$$

Si osserva che la velocità orizzontale u_T raggiunge valori massimi nelle sezioni in cui le elevazioni della superficie libera è sempre nulla, cioè nei nodi. Al contrario, la velocità

verticale ω_T si annulla nei nodi e assume valori massimi in corrispondenza delle creste dell'onda.

Inoltre se si trascurano i quadrati delle u_T e delle ω_T , integrando l'equazione del moto si ottiene la distribuzione delle pressioni per l'onda stazionaria.

$$p = \gamma \left[\eta_T \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} - z \right]$$

4.1.1.2 Riflessione parziale

La riflessione parziale avviene quando il coefficiente di riflessione K_r è compreso tra 0 e 1.

Fisicamente questo accade se l'ostacolo:

- è inclinato: la dissipazione dell'energia avviene per frangimento;
- è permeabile: ossia l'ostacolo assorbe parte dell'energia ondosa.

A differenza della riflessione totale (dove l'onda riflessa ha la stessa ampiezza dell'onda incidente), qui l'ampiezza dell'onda riflessa a_2 è minore dell'ampiezza dell'onda incidente a_1 . L'elevazione del pelo libero η_T è data dalla sovrapposizione dell'onda incidente e di quella riflessa. In formula:

$$\eta_T = (a_1 - a_2) \sin kx * \cos \sigma t - (a_1 + a_2) \cos kx * \sin \sigma t$$

Questa formula è cruciale poiché mostra che il moto risultante è composto da due termini:

- un'onda stazionaria pura $((a_1 + a_2) \cos kx * \sin \sigma t)$
- un'onda progressiva residua $((a_1 - a_2) \sin kx * \cos \sigma t)$

Mentre nella riflessione totale abbiamo punti con oscillazione nulla (nodi), nella riflessione parziale l'oscillazione non si annulla mai completamente. Si parla quindi di:

- PSEUDOANTINODI (ventre), ossia quei punti in cui l'escursione è massima, pari a $2(a_1+a_2)$. Qui le due onde si sommano in fase;

- PSEUDONODI, ossia quei punti dove l'escursione è minima, pari a $2(a_1 - a_2)$. In questi punti le onde sono in controfase, ma poiché $a_1 > a_2$ rimane un'oscillazione residua.

L'aspetto più interessante riguarda il movimento delle particelle d'acqua sotto la superficie:

- Riflessione totale: le particelle si muovono lungo segmenti con un moto puramente oscillatorio verticale o orizzontale);
- Riflessione parziale: le traiettorie delle particelle diventano ellittiche, in particolare:
 - più il coefficiente K_r è basso (scarsa riflessione), più l'ellisse è aperta;
 - più il coefficiente K_r si avvicina a 1, più l'ellisse si schiaccia fino a diventare un segmento.

Al tendere di a_2 ad a_1 ci si avvicina sempre più alla condizione di riflessione totale.

4.2 Trasmissione ondosa e coefficiente di trasmissione

Quando un treno d'onde interagisce con una struttura costiera, l'energia associata al moto ondoso non viene interamente riflessa, ma si redistribuisce tra tre contributi fondamentali: riflessione, dissipazione e trasmissione.

In particolare, una quota dell'energia incidente è in grado di superare l'ostacolo, propagandosi verso la zona retrostante, avvicinandosi alla costa. Tale fenomeno prende il nome di trasmissione ondosa e assume un ruolo fondamentale nella valutazione dell'efficacia delle opere di protezione costiera.

L'entità dell'energia trasmessa dipende da diversi fattori, tra cui:

- le caratteristiche del moto ondoso (altezza, periodo, profondità relativa);
- la tipologia della struttura (parete verticale, scogliera permeabile, struttura sommersa);
- la geometria dell'opera (pendenza dei paramenti, quota di cresta, larghezza della sommità);
- eventuali meccanismi dissipativi presenti;

- tecniche e tecnologie adottate dai dispositivi di dissipazione dell'energia dell'onda.

Per quantificare il fenomeno si introduce il coefficiente di trasmissione K_T definito come:

$$K_T = \frac{H_T}{H_i}$$

dove H_T rappresenta l'altezza dell'onda trasmessa, e H_i l'altezza dell'onda incidente.

In condizioni ideali, le opere di difesa dovrebbero minimizzare il valore di K_T , limitando la propagazione di energia ondosa verso le coste e le aree protette. Tuttavia nei casi reali, una certa quota di trasmissione risulta inevitabile, rendendo necessario un compromesso tra riflessione, dissipazione e trasmissione dell'energia.

4.3 Dissipazione dell'energia ondosa e fenomeni turbolenti

Quando un'onda interagisce con un ostacolo o con un mezzo non omogeneo, una parte dell'energia meccanica associata al moto ondoso non viene né riflessa né trasmessa, ma viene convertita in altre forme di energia, principalmente sotto forma di calore e moto turbolento. Tale processo prende il nome di dissipazione dell'energia ondosa.

A differenza della riflessione e della trasmissione, che mantengono una componente ordinata del moto, la dissipazione è associata alla perdita di coerenza del campo di moto, con trasformazione dell'energia cinetica organizzata in moto disorganizzato.

I principali meccanismi responsabili della dissipazione sono:

- attrito viscoso, generalmente trascurabile nel caso di onde di ampiezza significativa;
- frangimento ondoso, che comporta un'intensa perdita di energia attraverso la rottura della cresta;
- interazione con strutture permeabili o irregolari, che induce vortici e moti secondari;

- generazione di turbolenza, che rappresenta il principale meccanismo dissipativo nei casi reali.

Dal punto di vista fisico, la dissipazione è strettamente legata allo sviluppo di moti turbolenti. In tali condizioni, il flusso si caratterizza per la presenza di fluttuazioni caotiche di velocità e pressione, che favoriscono il trasferimento di energia dalle scale macroscopiche del moto ondoso a scale sempre più piccole, fino alla sua completa dissipazione.

Questo processo comporta una progressiva attenuazione dell'ampiezza dell'onda e una modifica significativa del campo di velocità, rendendo il moto sempre meno riconducibile alle ipotesi della teoria lineare.

4.3.1 Meccanismi dissipativi associati alla cortina di bolle

Sulla base di quanto descritto in merito ai fenomeni di dissipazione dell'energia ondosa, è possibile analizzare i principali meccanismi fisici attraverso cui una cortina di bolle è in grado di attenuare il moto ondoso.

In termini generali, il bilancio energetico del moto ondoso può essere espresso come:

$$E_i = E_r + E_t + E_d$$

dove E_d rappresenta la quota di energia dissipata. In presenza di una cortina di bolle, tale termine assume un ruolo predominante, risultando associato a fenomeni diffusi nel volume del fluido piuttosto che localizzati.

4.3.1.1 Attenuazione delle proprietà del mezzo

La presenza di bolle d'aria modifica la densità media del fluido, che può essere espressa come:

$$\rho_m = (1 - a)\rho_w + a\rho_a$$

dove a rappresenta la frazione volumetrica dell'aria, ρ_w è la densità dell'acqua e ρ_a è la densità dell'aria.

Questa variazione influisce sulla propagazione ondosa, determinando una modifica della velocità di fase e contribuendo all'attenuazione dell'energia lungo la direzione di propagazione.

4.3.1.2 Attenuazione dell'ampiezza ondosa

L'effetto complessivo dei meccanismi dissipativi può essere descritto, in prima approssimazione, attraverso una legge di decadimento dell'altezza d'onda:

$$H(x) = H_0 e^{-k_{xd}x}$$

dove:

- $H(x)$ è l'altezza dell'onda a una distanza x dall'inizio della cortina;
- H_0 rappresenta l'altezza dell'onda incidente che colpisce la cortina nel punto $x=0$;
- k_{xd} rappresenta un coefficiente di attenuazione legato ai fenomeni dissipativi;

Di conseguenza, anche l'energia ondosa, essendo proporzionale al quadrato dell'altezza, decade secondo:

$$E \propto H^2$$

Questo modello suggerisce che la cortina di bolle non blocca l'onda in modo netto (come un muro) ma ne assorbe l'energia gradualmente. Poiché l'energia di un'onda (E) è proporzionale al quadrato della sua altezza, l'energia decadrà secondo la formula:

$$E(x) = E_0 e^{-2k_d x}$$

4.3.1.3 Generazione di turbolenza

Uno dei principali contributi alla dissipazione è associato alla generazione di turbolenza. Dal punto di vista energetico, la produzione di energia cinetica turbolenta k_t può essere ricondotta a gradienti di velocità indotti dal moto delle bolle:

$$P_t = \nu_t \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2$$

dove ν_t rappresenta la viscosità turbolenta.

In fluidodinamica, tale formula descrive come l'energia cinetica del moto ordinato (l'onda) viene trasferita a scale più piccole sotto forma di vortici, per poi essere dissipata.

4.3.1.4 Interfaccia aria-acqua

La zona occupata dalla cortina di bolle può essere interpretata come una regione caratterizzata da forte disomogeneità, in cui la superficie libera non è più descrivibile come un'interfaccia regolare.

In tali condizioni, il moto ondoso perde la propria struttura coerente, e la sovrapposizione ordinata delle componenti armoniche, descritta nei paragrafi precedenti, non è più valida.

Dal punto di vista globale, l'efficacia dissipativa della cortina di bolle si riflette nei coefficienti di riflessione e trasmissione, per i quali vale:

$$K_r^2 + K_t^2 + K_d = 1$$

dove K_d rappresenta il coefficiente di dissipazione.

Un incremento dei fenomeni di dissipazione comporta quindi una riduzione dei coefficienti K_r e K_d , evidenziando il ruolo della cortina come dispositivo di attenuazione energetica.

Nel complesso, la cortina di bolle agisce come un sistema dissipativo distribuito, nel quale l'energia ondosa viene progressivamente trasformata in moto turbolento attraverso meccanismi legati alla natura bifase del fluido, alla generazione di vortici e alla perdita di coerenza del campo di moto.

CAPITOLO 5: DESCRIZIONE DEL LABORATORIO

Nel laboratorio di idraulica del dipartimento DICEA dell'Università Politecnica delle Marche di Ancona, si sono svolte le operazioni di elaborazione, preparazione e raccolta dati inerenti allo "smorzamento del moto ondoso con metodi non tradizionali".

Le finalità di questo studio sono quelle di valutare e analizzare l'efficacia di nuove opere atte alla protezione costiera delle spiagge dai fenomeni di erosione partendo dall'analisi idrodinamica della riflessione e trasmissione ondosa.

5.1 Il Laboratorio

Il dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) dell'Università Politecnica delle Marche rappresenta un centro di eccellenza multidisciplinare dedicato allo studio, alla progettazione e alla gestione dell'ambiente costruito e naturale. Caratterizzato da una forte sinergia tra competenze ingegneristiche e architettoniche, il dipartimento pone al centro della propria missione la sostenibilità ambientale e la resilienza delle infrastrutture, rispondendo alle sfide poste dai cambiamenti climatici e dalla vulnerabilità del territorio.

All'interno del dipartimento DICEA, l'area idraulica riveste in ruolo strategico, focalizzandosi sulla comprensione dei fenomeni complessi che regolano il ciclo dell'acqua e l'interazione tra mare e terraferma. La ricerca si estende dalla gestione delle risorse idriche interne alla protezione dei litorali, con un'attenzione particolare alla morfodinamica costiera e allo sviluppo di opere di difesa innovative.



5.2 La canaletta

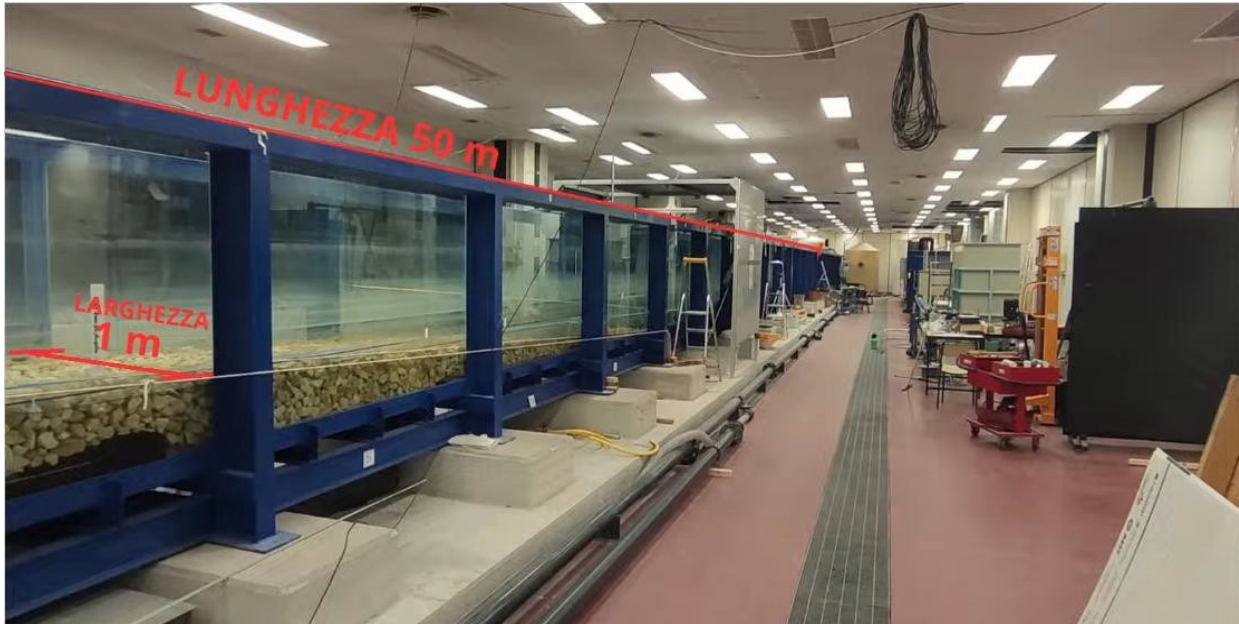


Fig.5.1 immagine della canaletta del laboratorio di Idraulica

Cuore pulsante del laboratorio è la canaletta, una struttura costituita da un canale a sezione trasversale rettangolare, attrezzato con una pala motorizzata capace di generare un moto ondoso controllato.

Le dimensioni interne della struttura fissa sono:

- lunghezza 50 m;
- larghezza 1 m
- altezza 1,3 m

PROSPETTO LONGITUDINALE CANALETTA VUOTA

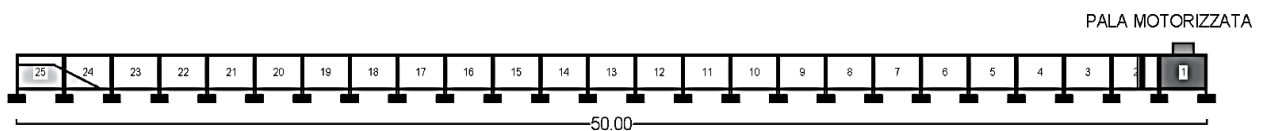


Fig. 5.2 Prospetto longitudinale della canaletta

SEZIONE TRASVERSALE CANALETTA

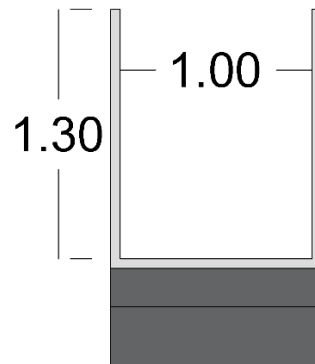


Fig. 5.3 sezione trasversale della canaletta

Le pareti della canaletta sono dotate di ampie specchiature vetrate che consentono di osservare e registrare le prove.

La canaletta viene riempita d'acqua all'altezza stabilita, fino ad un massimo di 1 metro.

Il controllo della pala motorizzata è gestito in remoto tramite un'interfaccia digitale dedicata.

La configurazione dello stato ondoso desiderato avviene inserendo all'interno di tale software i parametri idrodinamici di progetto, quali altezza d'onda (H) e periodo (T).

CAPITOLO 6: DESCRIZIONE E REALIZZAZIONE DEL MODELLO DI PROVA

6.1 Fase di realizzazione dell'insufflatore

L'indagine condotta ha come obiettivo la valutazione dell'efficacia delle bolle d'aria nella dissipazione dell'energia associata al moto ondoso marino, un tema di grande rilevanza sia dal punto di vista idraulico sia per le sue potenziali applicazioni in ambito ingegneristico.

La struttura sperimentale concepita e successivamente realizzata consiste in un condotto in PVC, caratterizzato da un diametro interno di 16,5 mm e da un diametro esterno di 20 mm, nel quale verrà insufflata aria tramite un compressore.



Fig.6.1 Immagine del condotto in PVC sezionato e con l'aggiunta della valvola centrale

Al fine di garantire una distribuzione più omogenea della pressione interna dell'aria, il tubo è stato sezionato in due tronconi di lunghezza pari a 47,5 cm ciascuno. La configurazione così ottenuta consente infatti di immettere il flusso d'aria tramite la zona centrale, dove è stato predisposto un sistema costituito da una valvola e da un insieme di tubicini ausiliari, con il compito di regolare e apportare una quantità di aria prestabilita in funzione delle condizioni di prova, e di distribuire l'aria immessa in modo più uniforme all'interno della struttura cilindrica.



Fig.6.2 Struttura valvolare per l'insufflaggio dell'aria

Gli esperimenti che verranno svolti prevedono immissioni d'aria con pressioni che possono raggiungere valori dell'ordine dei 3 bar.

Per assicurare la tenuta idraulica del dispositivo, le estremità dei due segmenti tubolari sono state chiuse mediante appositi tappi a perfetta tenuta stagna. Una volta completato l'assemblaggio della struttura, la prima operazione è stata quella di verificarne l'effettiva resistenza alla pressione interna: a tale scopo, il dispositivo è stato immerso in acqua e sottoposto a pressurizzazione progressiva mediante l'immissione di aria compressa fino al valore di 8 bar. La prova ha dimostrato la piena affidabilità della struttura, che si è mantenuta integra senza mostrare segni di cedimento.

La fase successiva ha previsto la realizzazione dei fori di emissione, attraverso i quali l'aria verrà espulsa al fine di generare le bolle necessarie alla sperimentazione. Tali fori, del diametro di 2 mm, sono stati praticati lungo tutta l'estensione del tubo con passo regolare di 2 cm, utilizzando un trapano a colonna. L'operazione è stata eseguita mantenendo tutti i fori perfettamente allineati lungo una stessa direttrice, così da ottenere una fuoriuscita verticale e uniforme rispetto al piano di appoggio, che in scala reale corrisponderebbe al fondale marino.



Fig. 6.3 Realizzazioni dei fori di emissione dell'aria insufflata

Infine, è stata effettuata una prima prova funzionale in una vasca di pressione, introducendo aria compressa nella struttura realizzata e osservando con attenzione la fuoriuscita del flusso sotto forma di bolle regolari. Questa verifica preliminare si è rivelata fondamentale per constatare non solo la corretta distribuzione delle aperture, ma anche la capacità del sistema di generare una colonna di bolle stabile e coerente, condizione indispensabile per poter avviare con rigore scientifico le fasi successive della campagna sperimentale.

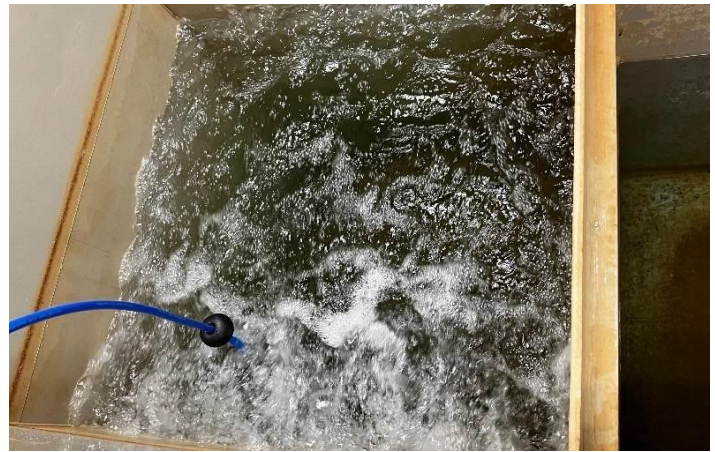


Fig.6.4 Strumentazione in funzione in vasca di pressione

Una volta effettuata la prova di stabilità in vasca di pressione, lo strumento è stato posto all'interno della canaletta per verificare se le dimensioni fossero esattamente coincidenti con le dimensioni della sezione della canaletta. Infatti una dimensione eccessiva dello strumento ne avrebbe impedito la relativa messa in opera poiché la larghezza della canaletta è fissa e di 1 m.

Al contrario dimensioni troppo ristrette avrebbero potuto compromettere la veridicità delle prove, creando uno spazio di propagazione delle bolle non coerente con la finalità dello studio.

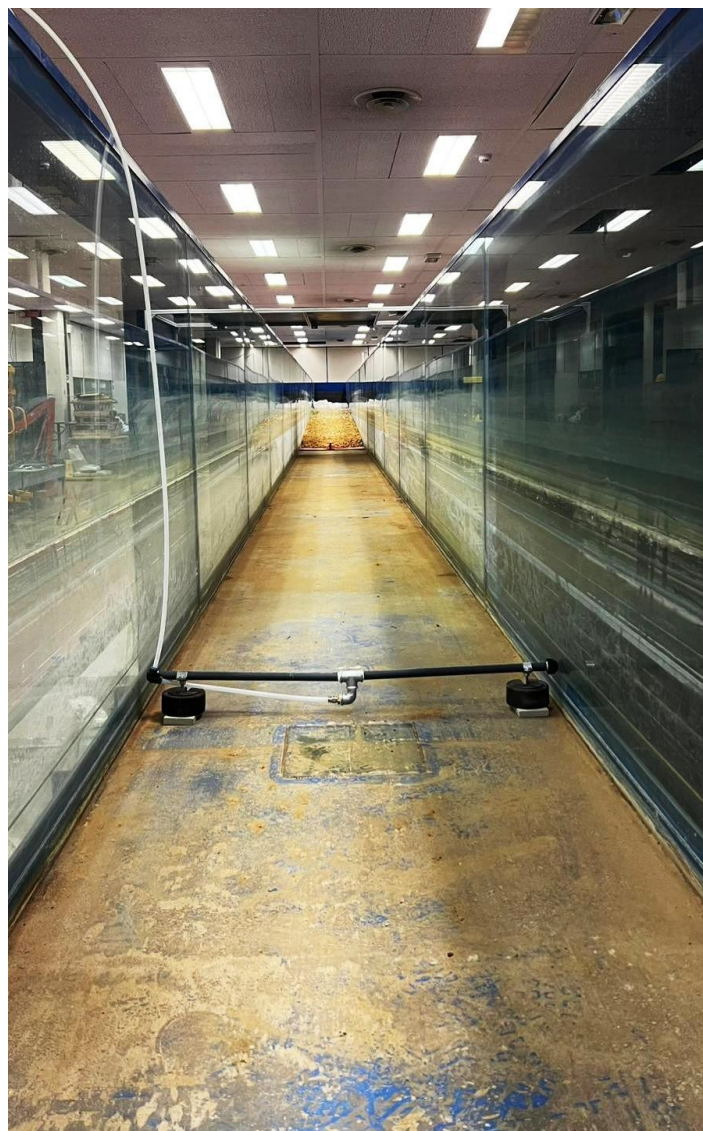


Fig.6.5 Strumentazione inserita all'interno della canaletta.

Si è potuta constatare la perfetta copertura di tutta la sezione della canaletta, successivamente la struttura è stata ancorata a terra tramite dei dischi di ghisa da 2 kg ciascuno in modo che il condotto e tutta la struttura fossero perfettamente stabili sotto la spinta della forza delle onde. La struttura è stata collocata nella sezione 12 della canalina, ad una distanza di 22 metri dalla pala motorizzata, dispositivo che verrà impiegato per la generazione delle onde artificiali. Tale posizionamento è stato scelto al fine di garantire un campo d'onda sufficientemente sviluppato prima dell'interazione con la strumentazione, minimizzando così gli effetti di disturbo prossimali.

La vasca è stata riempita fino a un'altezza complessiva di 40 cm, corrispondenti a una colonna d'acqua di circa 30 cm al di sopra della struttura. Tale configurazione è stata scelta per simulare condizioni di immersione coerenti con gli scenari di riferimento.

SEZIONE TRASVERSALE CANALETTA
CON INSUFFLATORE

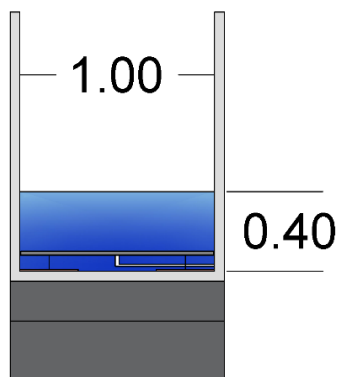


Fig.6.6 Sezione trasversale della canaletta

Il primo rilevamento ha avuto come obiettivo principale la verifica della distribuzione e validità delle bolle d'aria all'interno del fluido. A tale scopo, è stata insufflata aria mediante gli appositi condotti collegati al sistema di diffusione, mantenendo la pala motorizzata ferma. Si è potuto osservare che le bolle si propagano in modo uniforme lungo l'intera sezione trasversale della vasca, ricoprendo in maniera omogenea la zona interessata.

La fase preliminare, svolta in assenza di onde generate dalla pala, è stata finalizzata a valutare il comportamento del sistema in condizioni di quiete, con particolare attenzione alle perturbazioni superficiali indotte dal flusso d'aria. Questo passaggio ha permesso di verificare la corretta funzionalità della struttura e di individuare eventuali irregolarità nella distribuzione delle bolle.

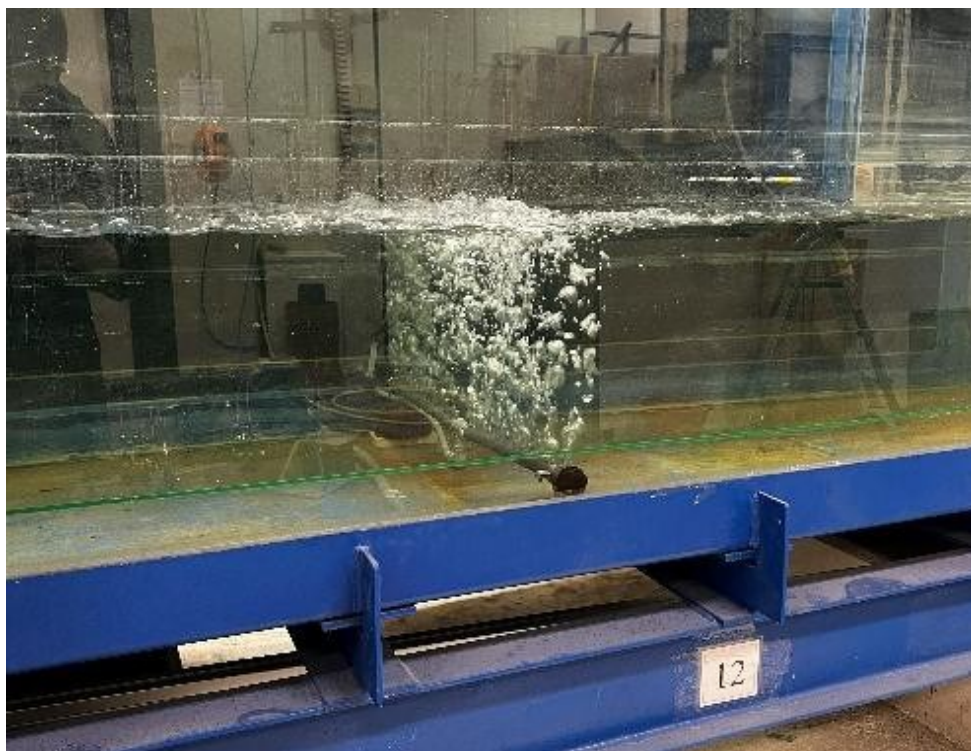


Fig.6.7 Cortina di bolle in azione

CAPITOLO 7: PROCEDURE PRELIMINARI ALLE PROVE SPERIMENTALI

7.1. Test preliminari per il settaggio delle condizioni di prova

Successivamente alla fase preliminare, si è proceduto con l'attivazione della pala motorizzata, impostando onde di 1 cm di altezza con una frequenza di 1 Hz (corrispondente a un periodo di 1 secondo), mentre la pressione dell'aria insufflata è stata mantenuta a 1 bar. Questa prova, di carattere esplorativo, è stata utile per comprendere le modalità di interazione tra le onde e il sistema di insufflazione. È stato subito evidente che la portata d'aria risultava notevolmente superiore rispetto all'intensità delle onde prodotte: una condizione difficilmente replicabile in contesti reali, ma che si è rivelata preziosa per procedere ad una ricalibrazione dei parametri sperimentali, sia per quanto riguarda le caratteristiche delle onde sia per la pressione dell'aria. In seguito, le impostazioni sono state modificate introducendo onde di maggiore altezza e frequenza più elevata. La nuova configurazione, denominata "prova zero", è stata condotta con onde di 3 cm di altezza e frequenza di 2 Hz (corrispondente a un periodo di 0,5 secondi), mentre la pressione dell'aria è stata ridotta a circa 0,3 bar, in modo da ottenere un regime più bilanciato tra moto ondoso e flusso gassoso.

Infine, per consentire un'analisi più dettagliata del campo di moto, sono state installate quattro sonde di rilevamento, collocate lungo l'asse longitudinale della vasca a 4 metri di distanza l'una dall'altra, in particolare le prime due sonde (denominate Sonda 1 e Sonda 2) sono state collocate a monte della struttura, le altre due (denominate Sonda 3 e Sonda 4) sono state collocate a valle. Queste permetteranno di acquisire in maniera sincrona i dati relativi alle variazioni di pressione e di altezza d'onda, in più punti, fornendo così un quadro più completo del comportamento idrodinamico del sistema.

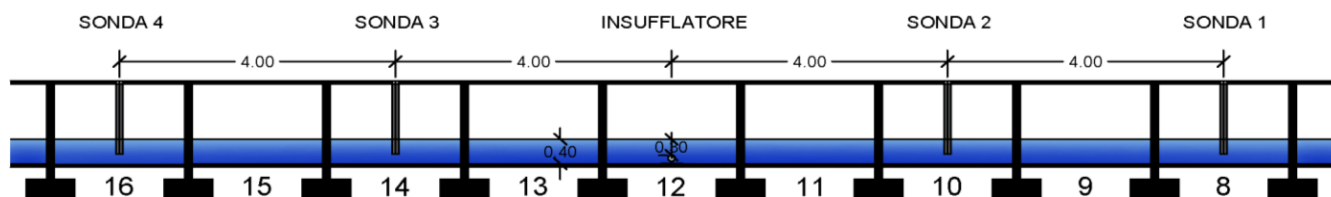


Fig. 7.1 prospetto laterale canalina con insufflatore e sonde

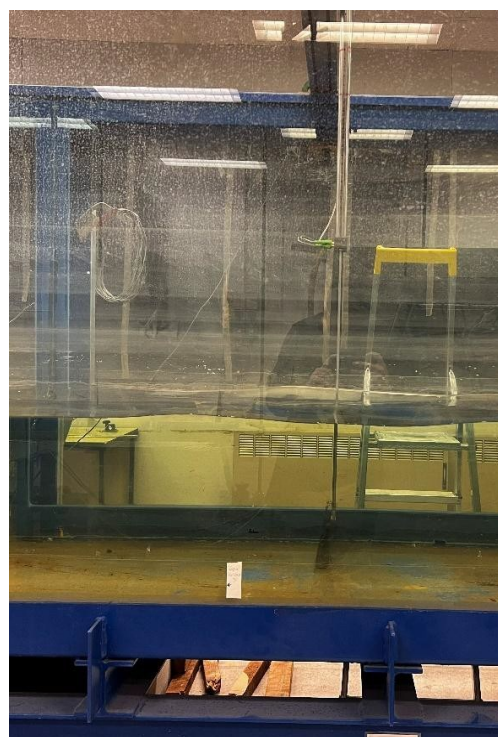


Fig.7.2 Dettagli della cortina di bolle vista dall'alto (a sinistra), elettrodi della sonda (a destra)

Una volta installato tutto il necessario all'interno della canaletta, e controllato l'effettivo funzionamento di tutto l'impianto, si è potuto procedere con le prime prove sperimentali. I passi seguiti ogni giornata di rilevamento sono stati: la verifica preliminare del livello del pelo libero dell'acqua e la calibrazione delle sonde di rilevamento.

7.2. Verifica preliminare del livello dell'acqua

Il primo controllo ha riguardato la misura del livello dell'acqua presente all'interno della vasca di prova. Il valore registrato è risultato sempre pari a 39,8 cm, condizione che garantiva una fuoriuscita di bolle d'aria costante e uniforme anche alla pressione minima di esercizio, fissata a 0,3 bar. Successivamente, la fuoriuscita di bolle è stata valutata anche per le altre pressioni di riferimento, pari a 0,6 bar, 1 bar, 1,5 bar e 2,5 bar.

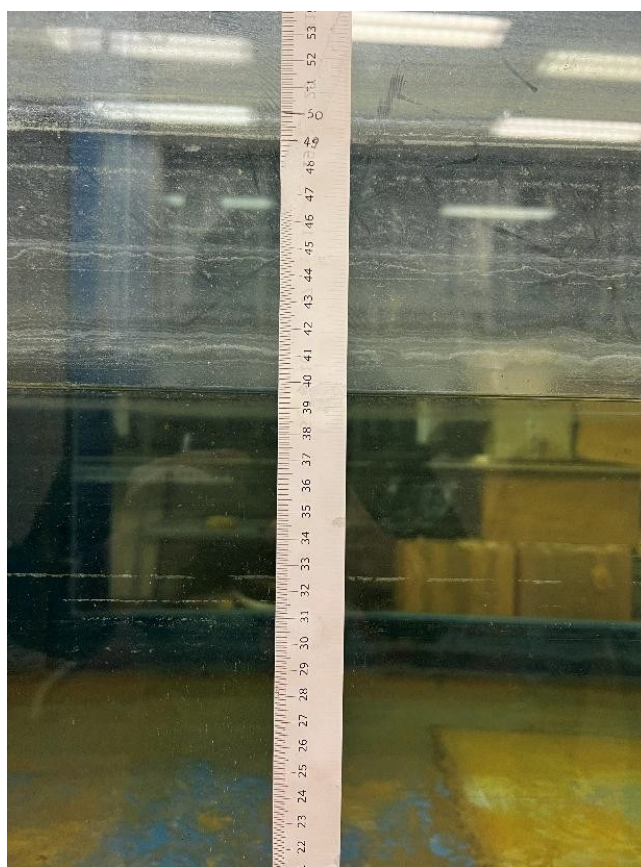


Fig. 7.3 dettaglio della misurazione del livello dell'acqua

7.3. Calibrazione delle sonde

In una seconda fase è stata eseguita la calibrazione delle sonde di rilevamento. Tale procedura consiste nell'immersione dei due elettrodi di ciascuna sonda in acqua fino a un livello prefissato, corrispondente alla quota 0 di riferimento. Successivamente, ogni sonda è stata traslata verticalmente di 0,4 m: prima verso il basso e poi verso l'alto, in modo da ottenere i valori di dislivello +0,4 m e -0,4 m. Questi dati intermedi sono stati utilizzati per la taratura del sistema di misura.

Completata la procedura, le sonde sono state riportate nella posizione iniziale e sottoposte a una nuova calibrazione a quota 0, per assicurare la corretta corrispondenza tra il segnale acquisito in precedenza, il nuovo segnale e il livello reale dell'acqua.

L'intera operazione è stata ripetuta per tutte e quattro le sonde.

CAPITOLO 8: PROVE SPERIMENTALI CON ACQUISIZIONE DEI LIVELLI ONDOSI

8.1. Acquisizione in assenza di onde e bolle d'aria – rumore di fondo

Una volta concluse le operazioni di calibrazione, si è proceduto con una prima acquisizione di riferimento in condizioni di acqua ferma, ossia con pala motorizzata spenta e sistema di insufflazione dell'aria disattivato.

Lo scopo di questa fase è quello di determinare il segnale di fondo e valutare le minime variazioni di livello percepite dalle sonde in assenza di disturbi dinamici, di seguito chiamato “rumore di fondo”.

Ogni misurazione è stata condotta per una durata di 3 minuti, così da disporre di un archivio dati sufficientemente esteso e statisticamente significativo.

I grafici di seguito riportati rappresentano il “rumore di fondo” registrato dalle quattro sonde durante questa fase.

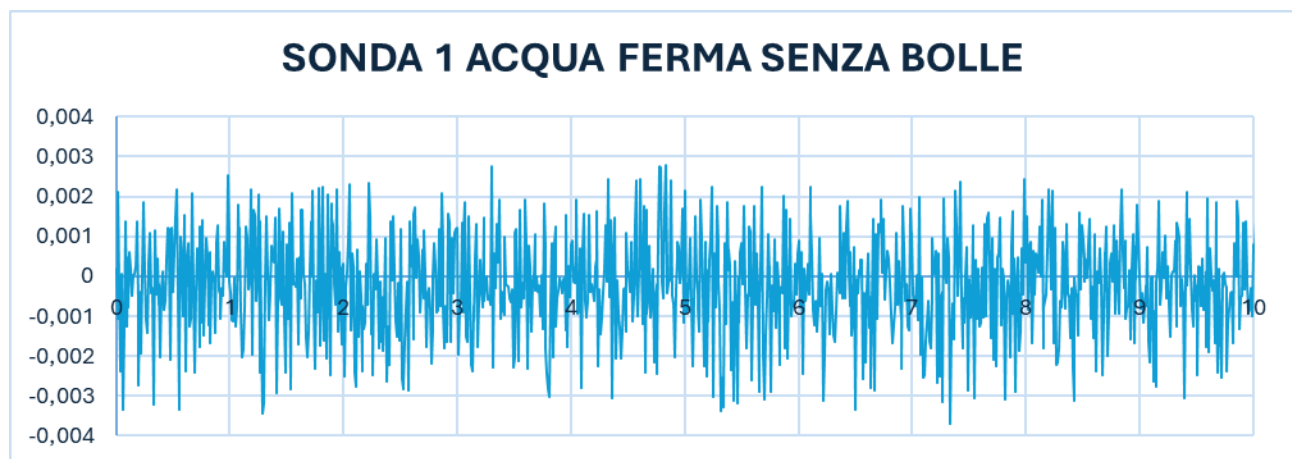


Fig.8.1 grafico rumore di fondo sonda 1

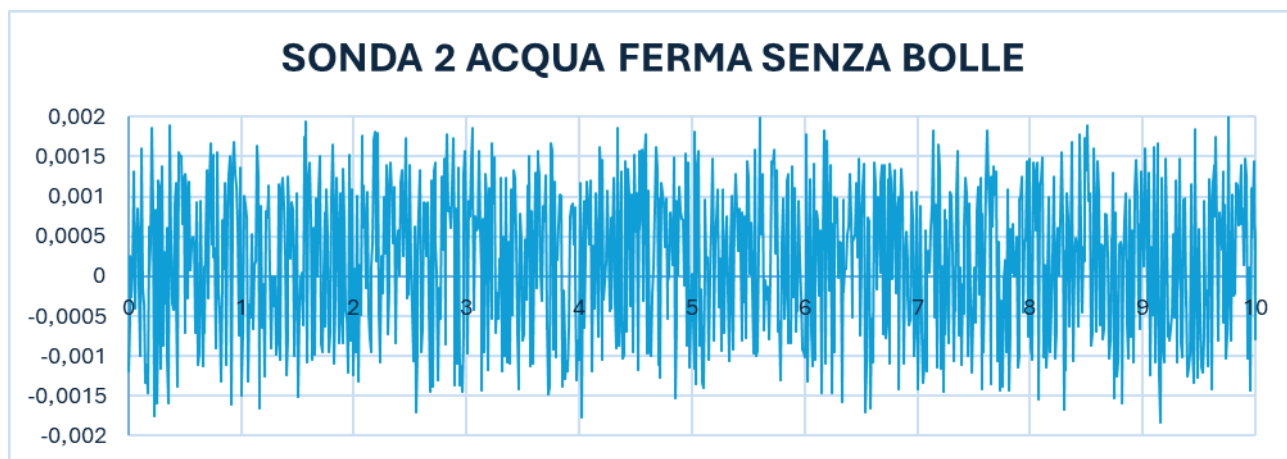


Fig. 8.2 grafico rumore di fondo sonda 2

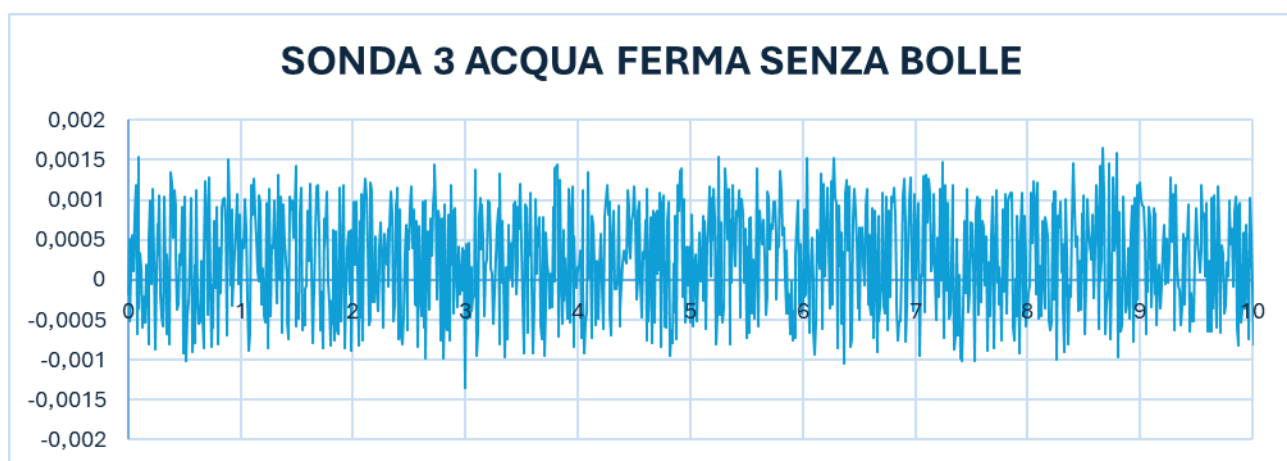


Fig. 8.3 grafico rumore di fondo sonda 3

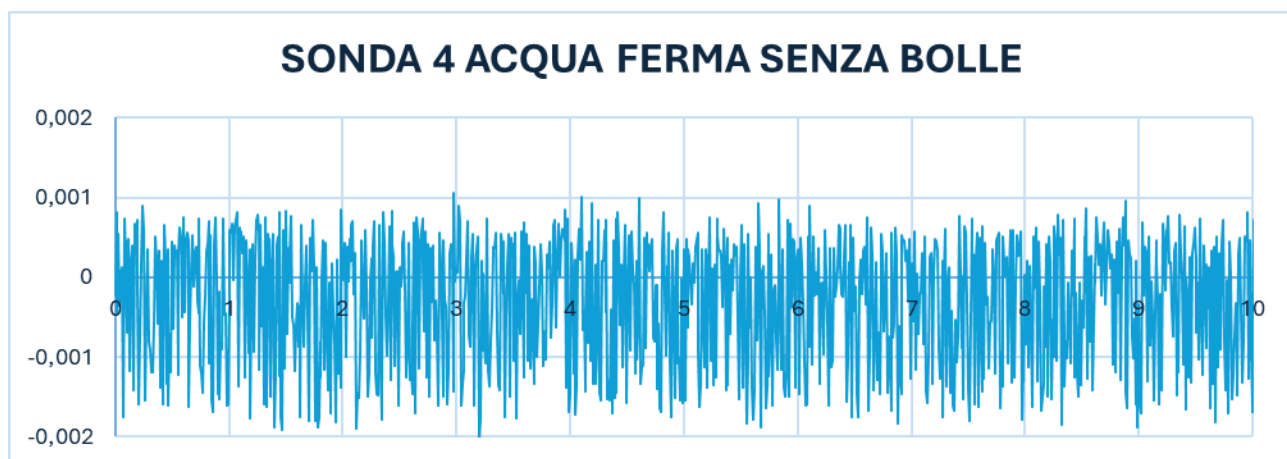


Fig. 8.4 grafico rumore di fondo sonda 4

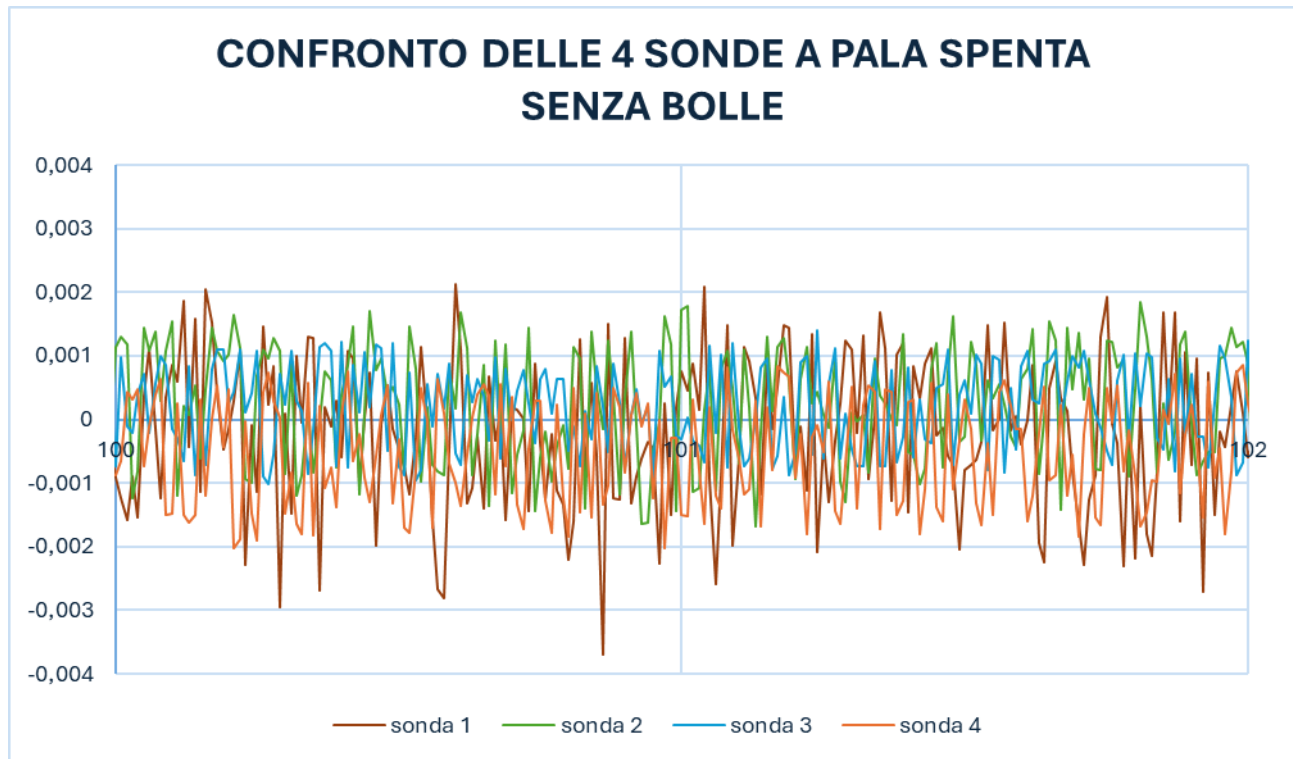


Fig. 8.5 grafico rumore di fondo delle 4 sonde

Questo schema rappresenta le cosiddette “onde capillari di fondo”, delle micro vibrazioni che sono imprescindibilmente presenti nelle misurazioni, e che sono impossibili da eliminare. Il concetto di quiete assoluta è un concetto teorico più che pratico. Le minime variazioni dell'altezza del pelo libero sono il risultato di una combinazione di fattori ambientali e fisici, prodotti principalmente da:

- ❖ Vibrazioni antropiche, ossia tutte le attività di natura umana presenti nell'intorno del laboratorio, come i semplici passi delle persone o una porta che sbatte;
- ❖ Traffico, il passaggio di veicoli, veicoli pesanti, treni, anche a distanza di centinaia di metri dal luogo delle misurazioni, si trasmettono attraverso il suolo e si ripercuotono sulla quiete del fluido analizzato;
- ❖ Impianti, motori interni al laboratorio o anche allo stesso edificio creano una vibrazione strutturale costante;

- ❖ Micro oscillazioni atmosferiche, l'acqua reagisce alla colonna d'aria sovrastante. Quindi variazioni di pressione o l'evaporazione creano una differenza di pressione locale che genera moto sulla superficie libera dell'acqua;
- ❖ Effetti geofisici
 - Microsismi terrestri: la terra è in costante "vibrazione". Oltre ai terremoti avvertibili, ci sono vibrazioni continue causate dal frangersi delle onde oceaniche sulle coste (che viaggiano attraverso la crosta terrestre) e dai movimenti tettonici minimi.
 - Maree terrestri: la gravità della luna e del sole influenzano il livello locale della superficie libera dell'acqua.

Un altro fattore rilevante nella presenza di rumore di fondo è dato dai rumori delle parti elettriche ed elettroniche presenti negli elettrodi delle sonde, nei cavi che collegano le sonde alla strumentazione, e ai connettori.

8.2. Prove in assenza di onde con emissione di bolle d'aria

La seconda parte della campagna sperimentale ha previsto l'acquisizione dei dati con acqua in movimento indotto unicamente dalle bolle d'aria prodotte dal sistema di insufflazione.

Anche in questo caso la durata di ciascuna prova è stata fissata a 3 minuti, in modo da garantire un campionamento adeguato e risultati accurati.

Le misure sono state effettuate per le seguenti pressioni di insufflazione: 0,3 bar, 0,6 bar, 1 bar, 1,5 bar e 2,5 bar, mantenendo la pala spenta per tutta la durata delle prove.

L'obiettivo è stato valutare l'influenza della sola aerazione sul moto dell'acqua e sulle variazioni di livello rilevate dalle sonde.

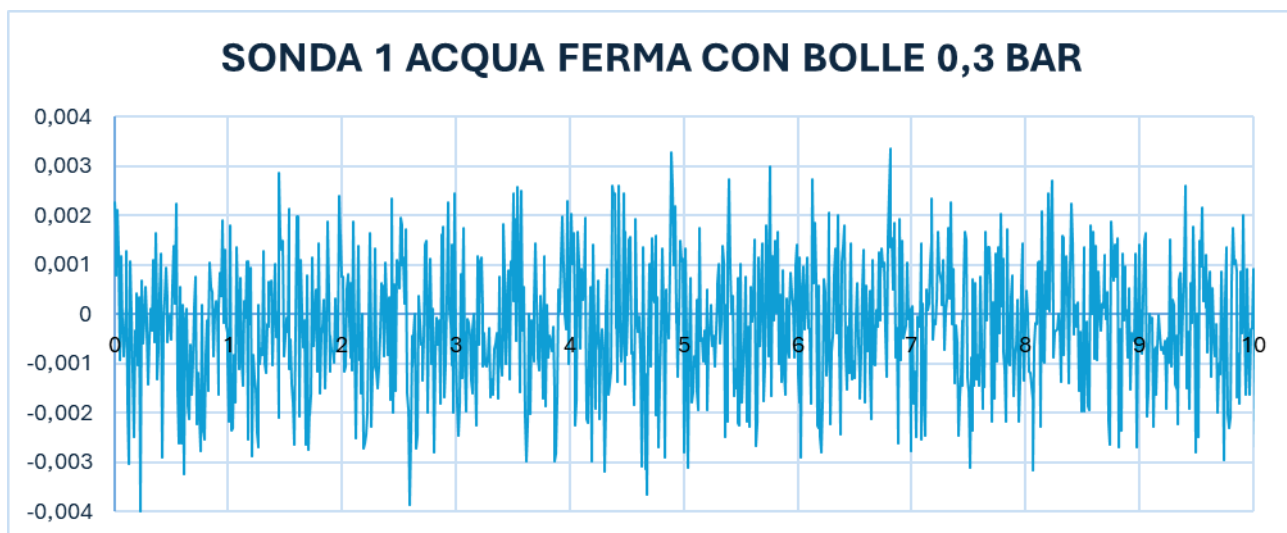


Fig. 8.6 grafico bolle d'aria pressione 0.3 bar sonda 1

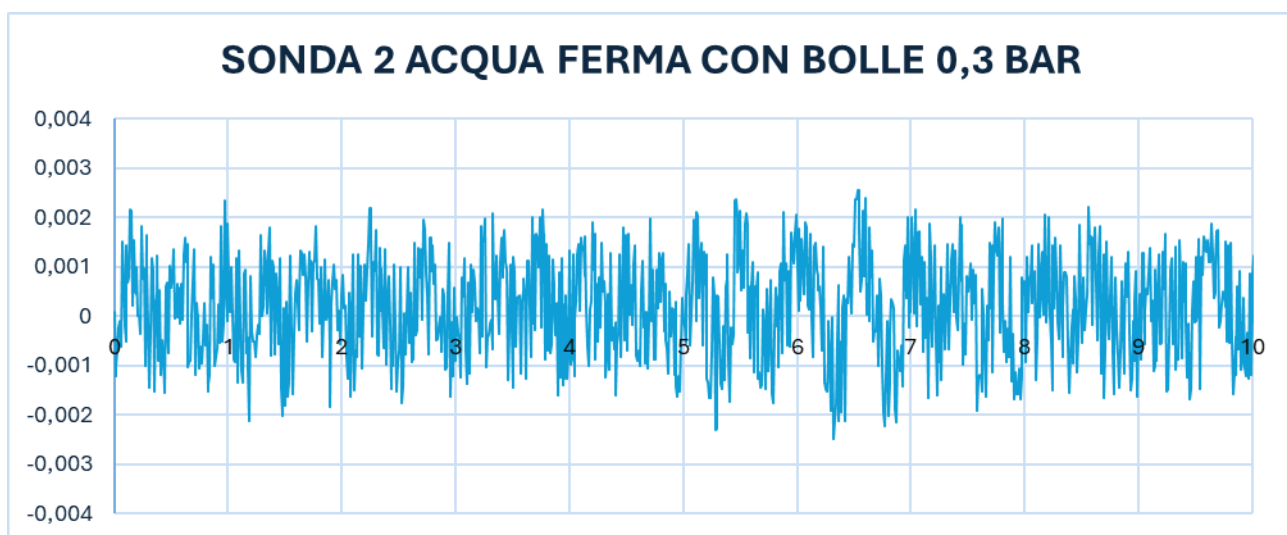


Fig. 8.7 grafico bolle d'aria pressione 0.3 bar sonda 2

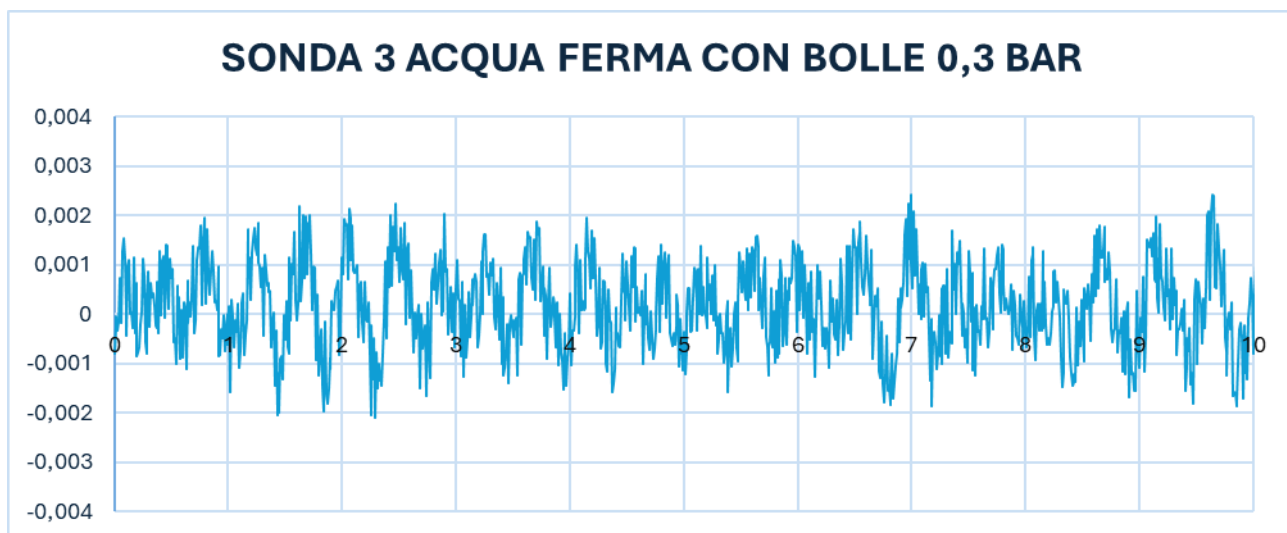


Fig. 8.8 grafico bolle d'aria pressione 0.3 bar sonda 3

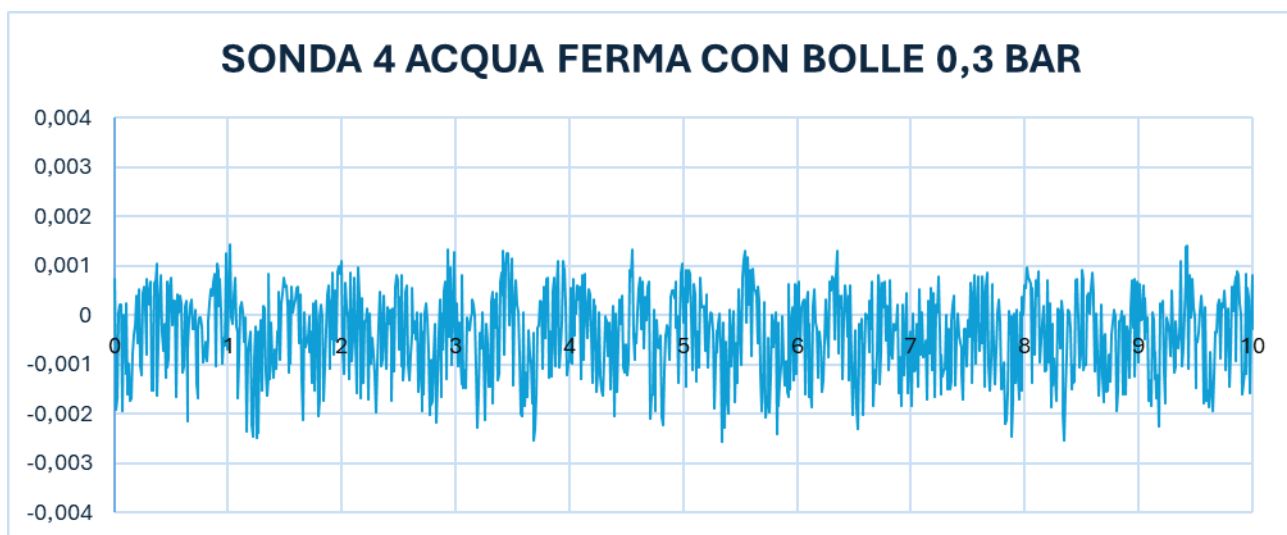


Fig. 8.9 grafico bolle d'aria pressione 0.3 bar sonda 4

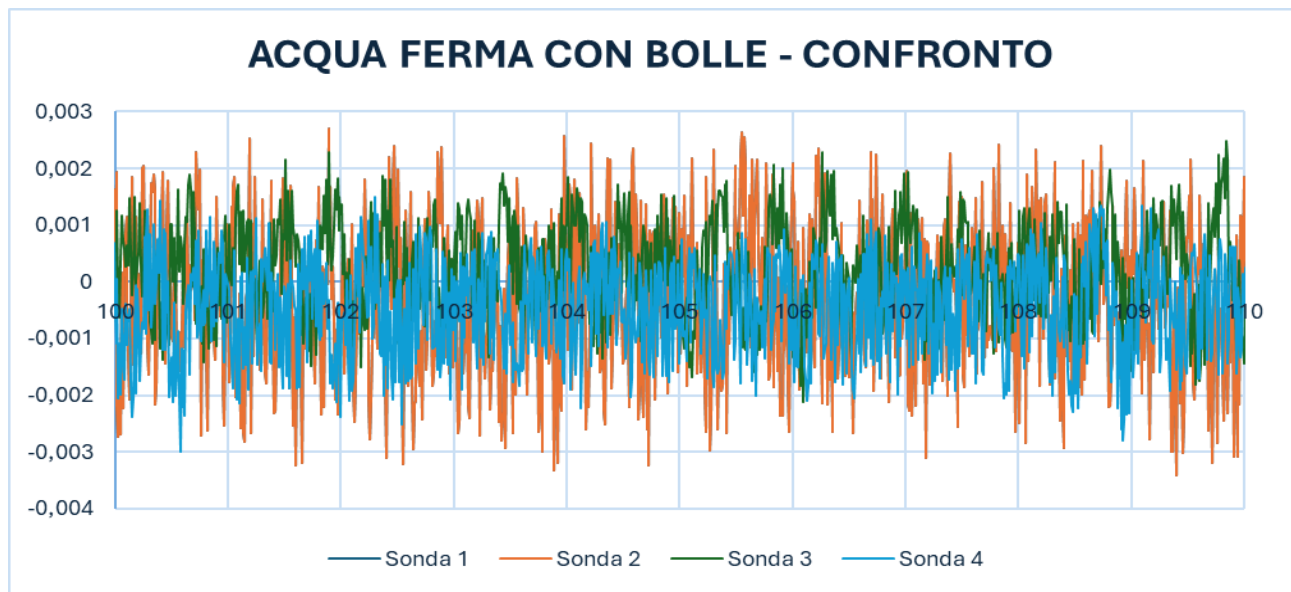


Fig. 8.10 grafico bolle d'aria pressione 0.3 bar confronto delle 4 sonde

Tramite tali dati si è in grado di valutare il moto prodotto dalle sole bolle, in modo da poter tenere conto delle variazioni di livello prodotte dal solo intervento delle bolle d'aria.

8.3. Prove con pala batti onde in funzione in assenza di bolle d'aria

Una volta raccolti sufficienti dati zero, ossia quelli relativi ad acqua ferma, rumori di fondo ed effetto delle bolle sulla “quiete teorica”, è stato attivato il sistema di movimentazione meccanica della vasca, innescando il moto ondoso tramite la pala motorizzata.

La prima rilevazione è stata condotta con pala accesa ma ferma (senza generazione di onde) e cortina di bolle spenta, al fine di quantificare le minime variazioni di livello prodotte dal solo moto meccanico della pala.

Successivamente, per ogni prova, è stata impostata l'altezza d'onda ed il periodo ondoso, e si è proceduto all'acquisizione dei dati per 3 minuti, con pala in funzione ma senza insufflazione d'aria.

Il processo è stato ripetuto per tutte le tipologie di onde esaminate, che nello specifico sono:

- onda da 1 cm, periodo di 1 s (1 HZ);
- onda da 2 cm, periodo di 1 s (1 HZ);
- onda da 3 cm, periodo di 1 s (1 HZ);
- onda da 4 cm, periodo di 1 s (1 HZ);
- onda da 1 cm, periodo di 0.5 s (2 HZ);
- onda da 2 cm, periodo di 0.5 s (2 HZ);
- onda da 3 cm, periodo di 0.5 s (2 HZ);
- onda da 4 cm, periodo di 0.5 s (2 HZ);

Questa operazione ha fornito i valori di riferimento delle onde. Le sonde infatti in questa fase hanno raccolto i dati delle singole onde, ossia le altezze che, in assenza di elementi dissipativi, le onde sono in grado di portare con sé durante il loro moto verso la costa.

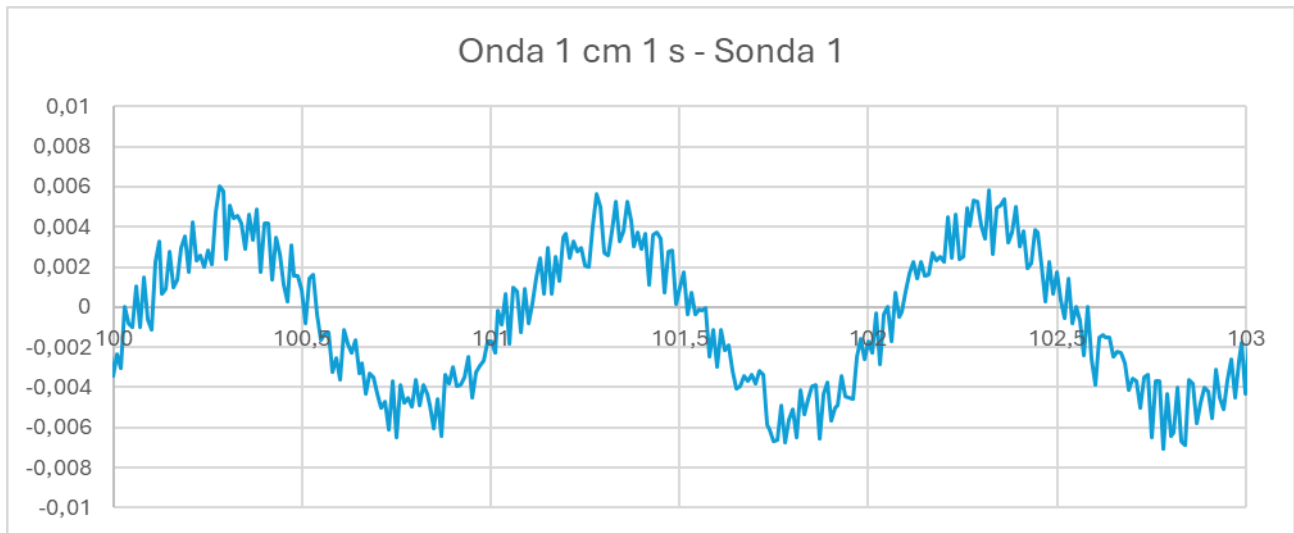


Fig. 8.11 grafico solo onda 1cm 1s sonda 1

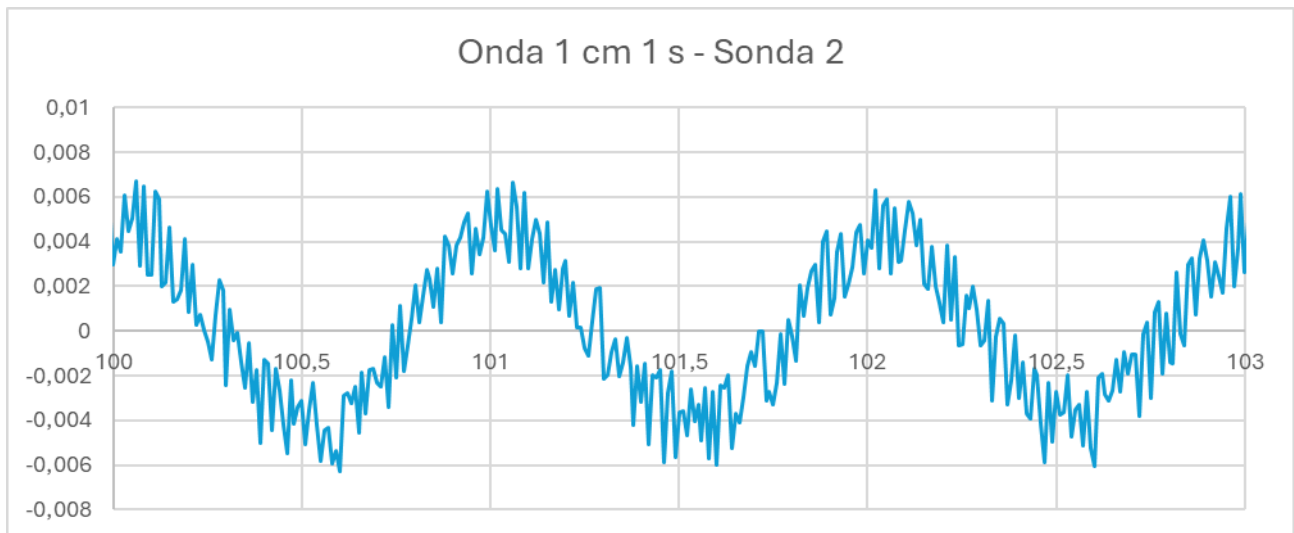


Fig. 8.12 grafico solo onda 1cm 1s sonda 2

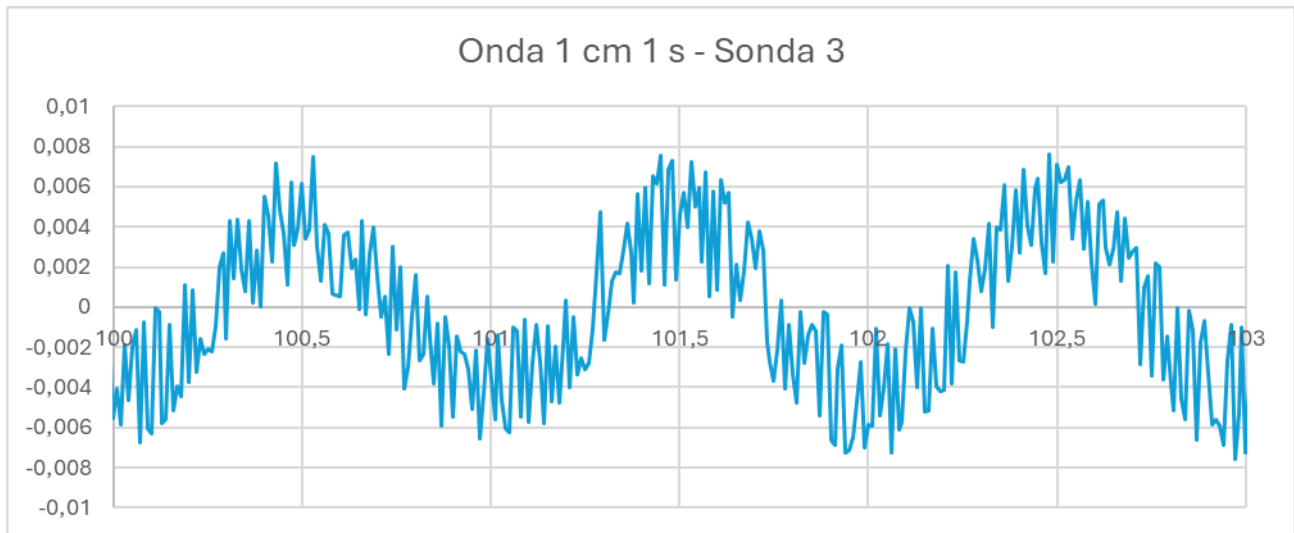


Fig. 8.13 grafico solo onda 1cm 1s sonda 3

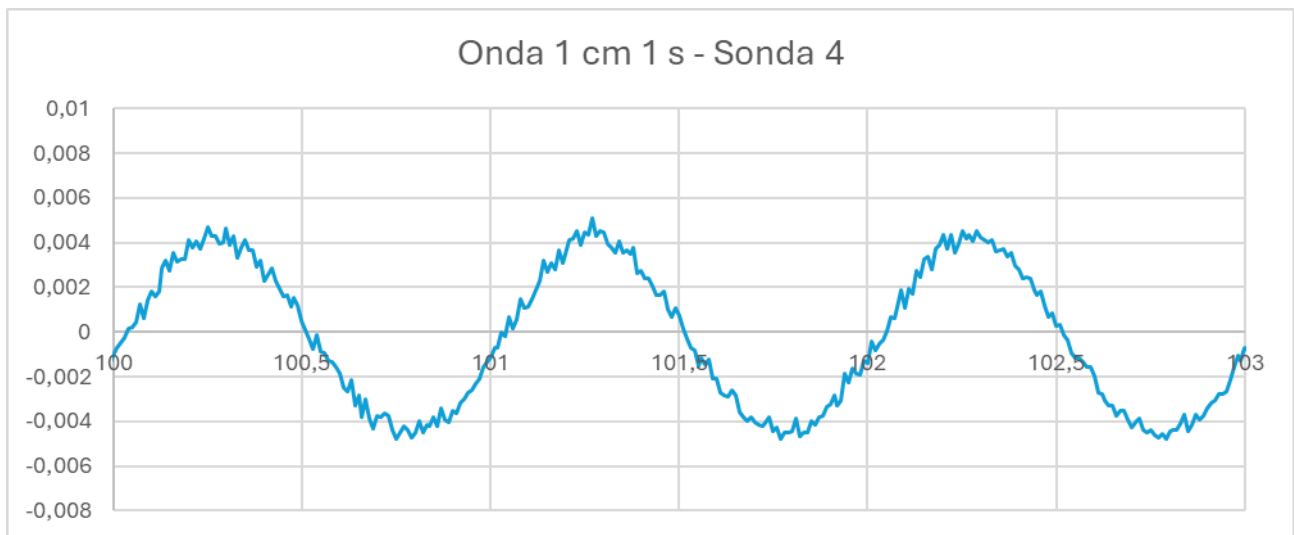


Fig. 8.14 grafico solo onda 1cm 1s sonda 4

8.4. Prove in presenza di onde e bolle d'aria

Successivamente alla raccolta dei dati sul moto delle onde "indisturbate" è stata attivata la cortina di bolle.

Mantenendo la pala motorizzata accesa, quindi mantenendo un flusso costante del moto delle onde con un andamento prestabilito, è stato azionato il compressore, insufflando all'interno dello strumento una pressione prestabilita di aria.

Le pressioni prese in considerazione in questo studio sono:

- 0.3 bar
- 0.6 bar
- 1 bar
- 1.5 bar
- 2.5 bar

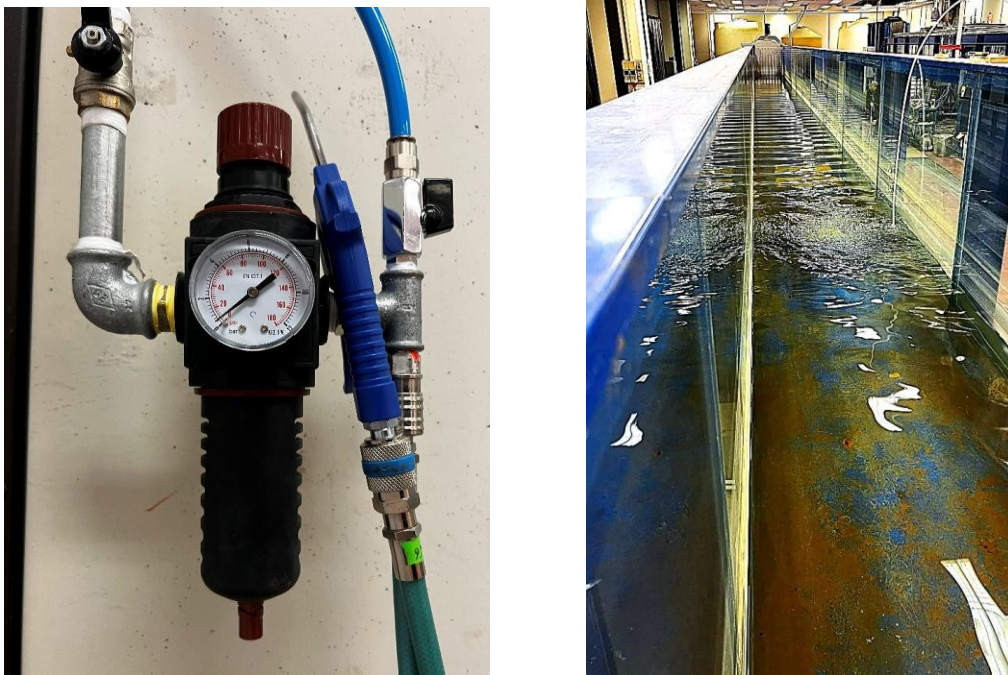


Fig.8.15 manometro usato per valutare la pressione dell'aria insufflata (a sinistra), effetto della cortina di bolle visto dall'alto (a destra).

ONDA 1CM 0.5S PRESSIONE 0.3BAR

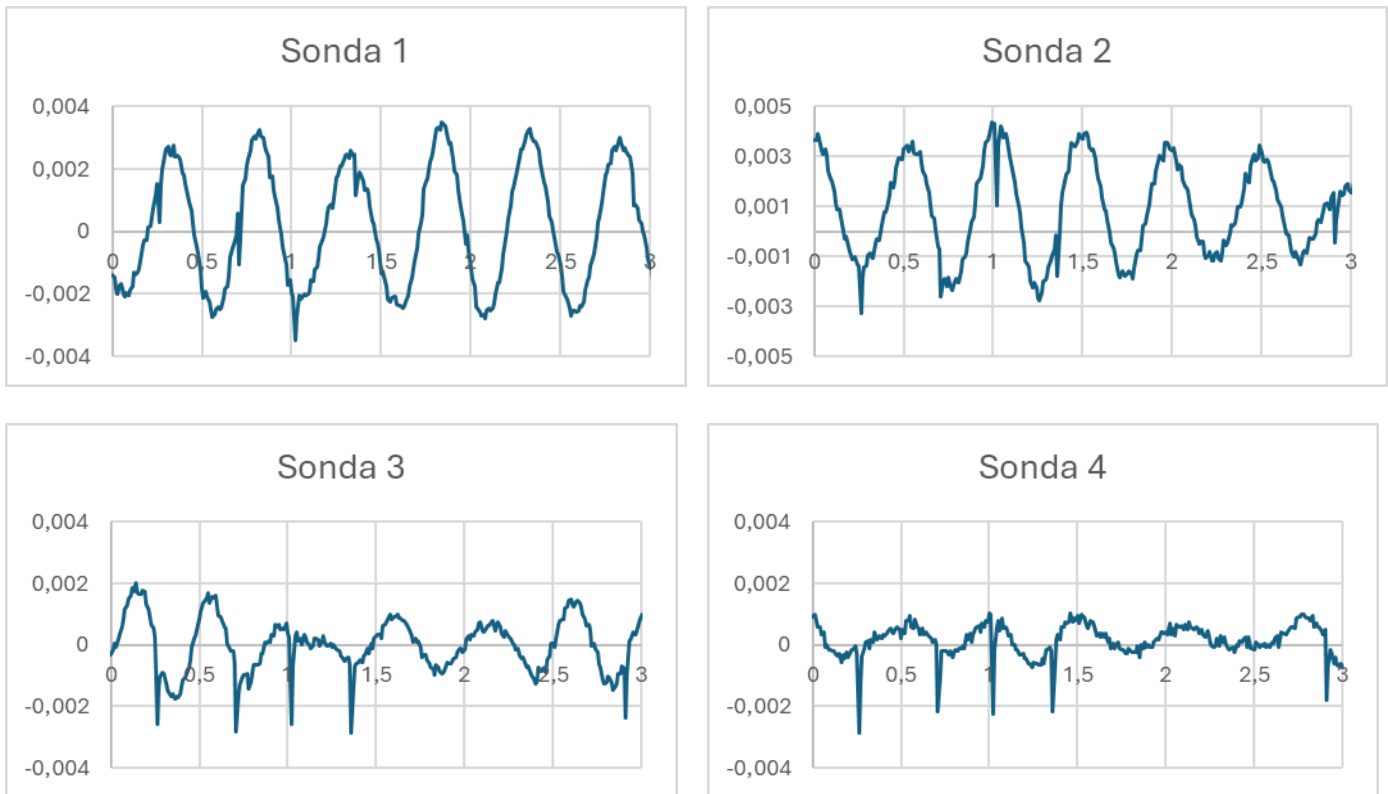


Fig. 8.16 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

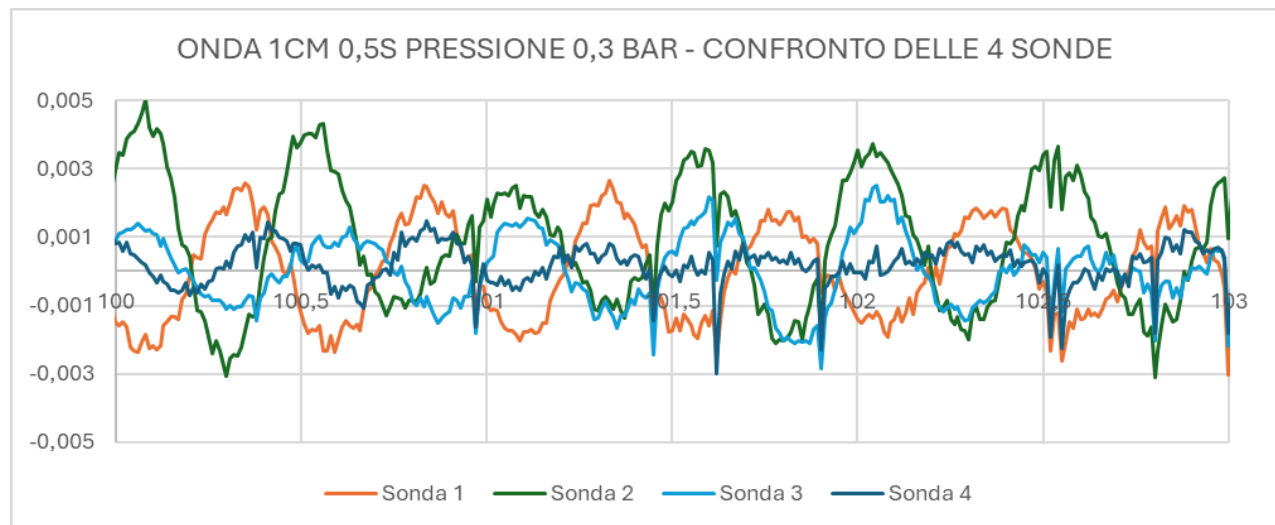


Fig. 8.17 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 1CM 0.5S PRESSIONE 0.6BAR

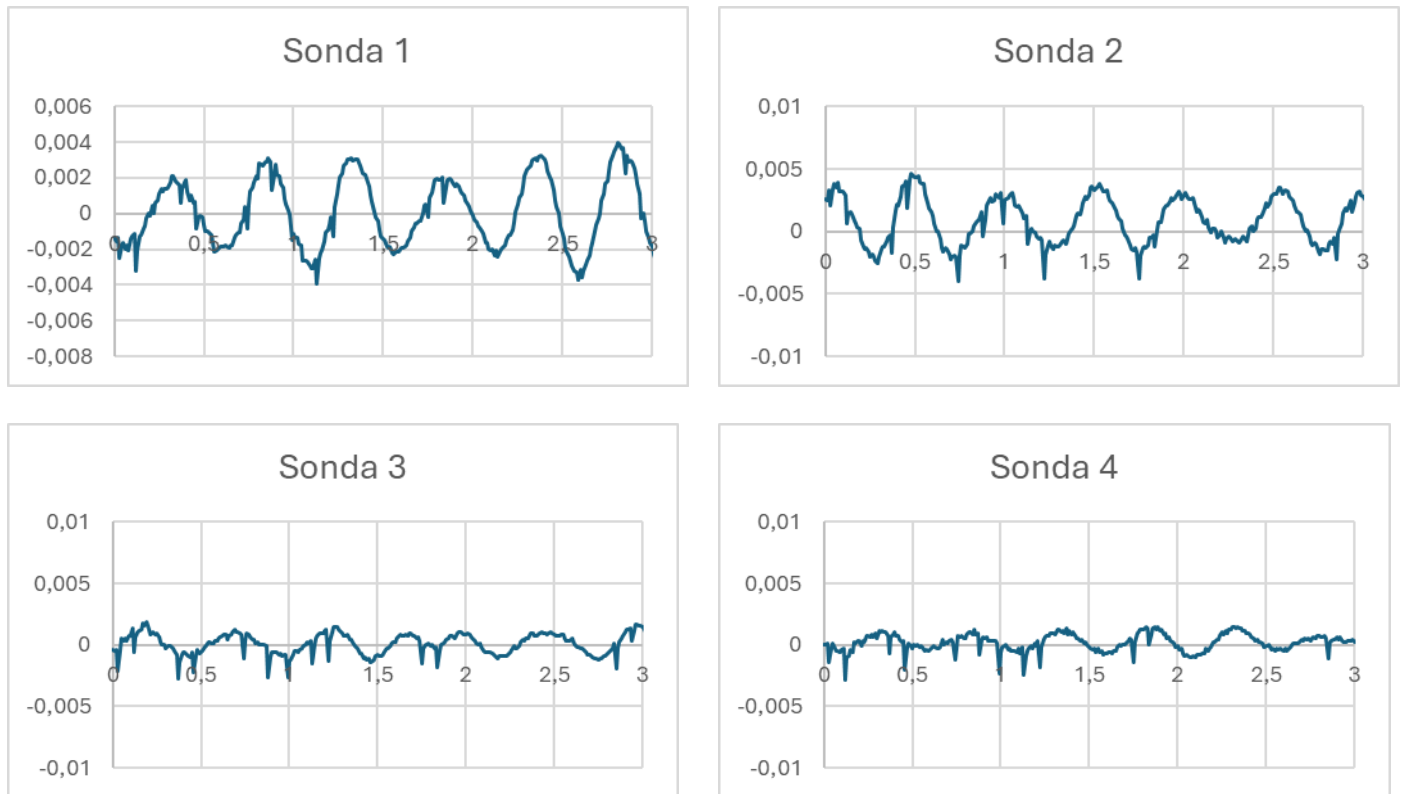


Fig. 8.18 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

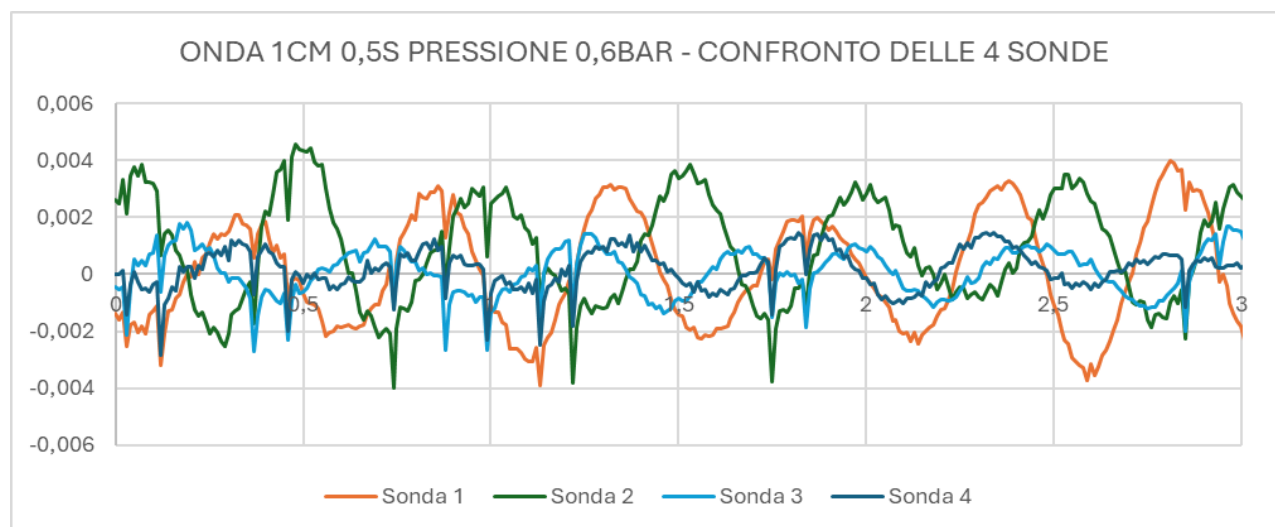


Fig. 8.19 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 1CM 0.5S PRESSIONE 1 BAR

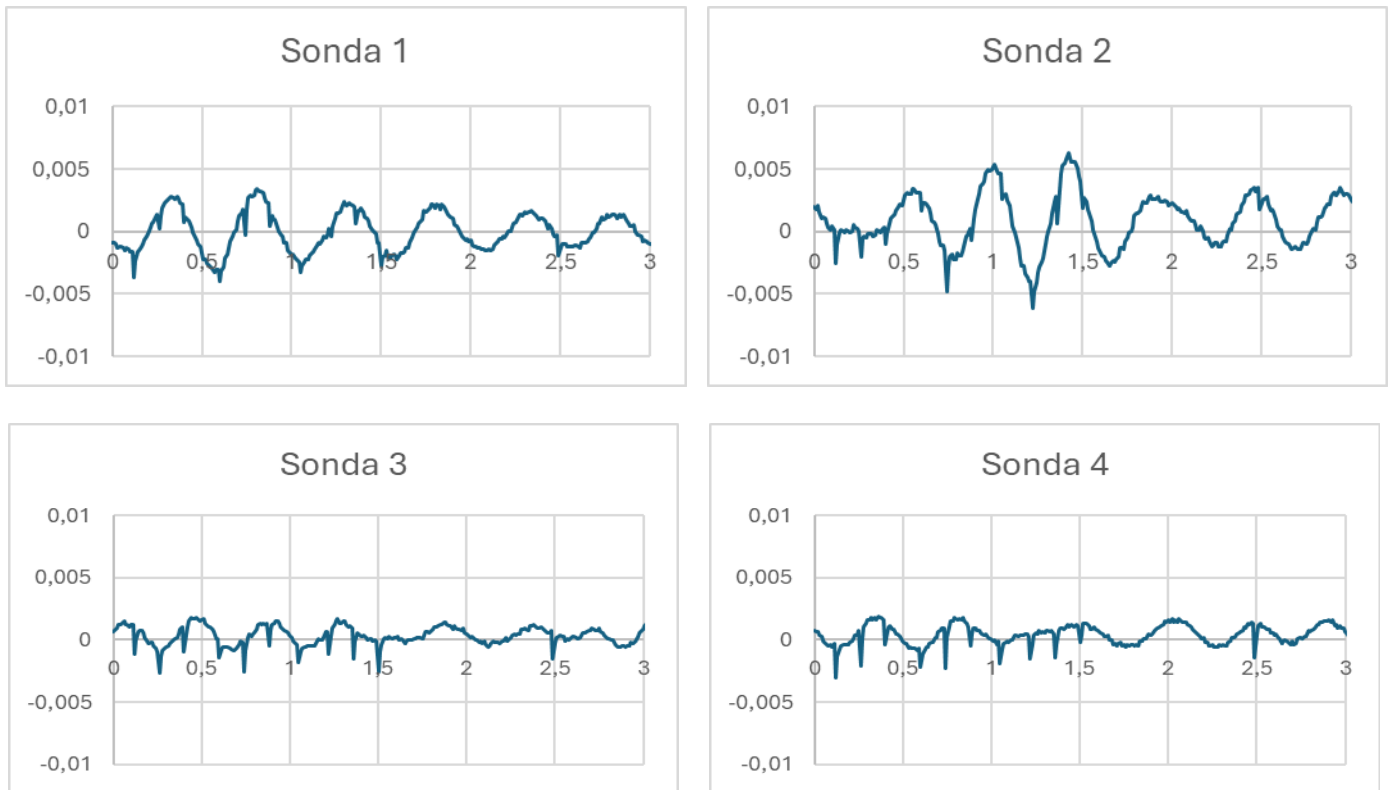


Fig. 8.20 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

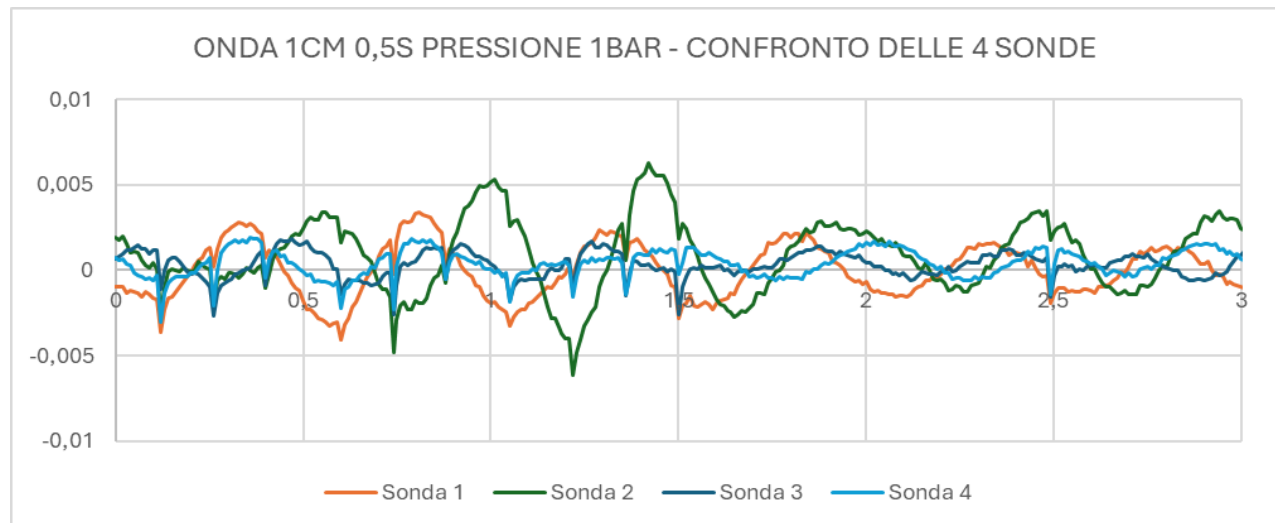


Fig. 8.21 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 1CM 0.5S PRESSIONE 1.5 BAR

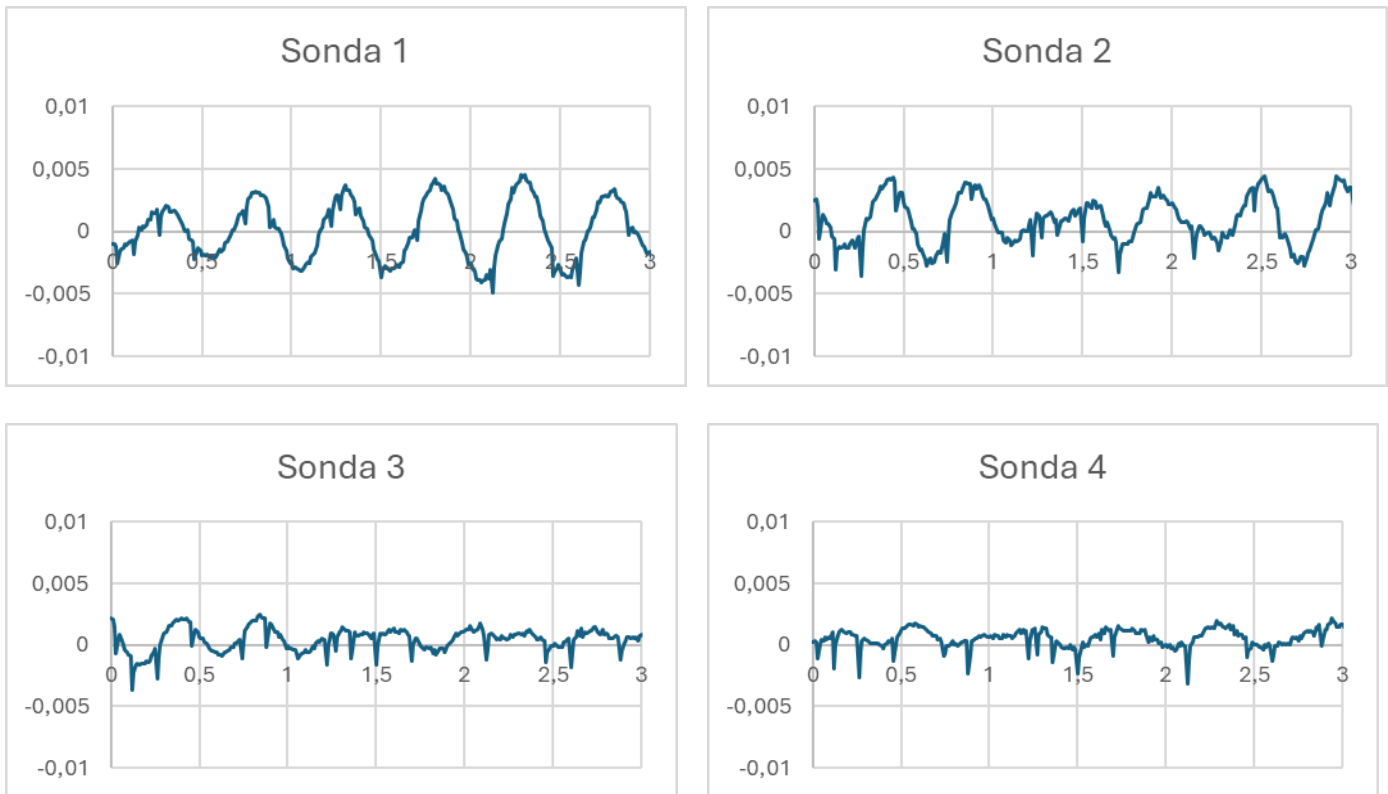


Fig. 8.22 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

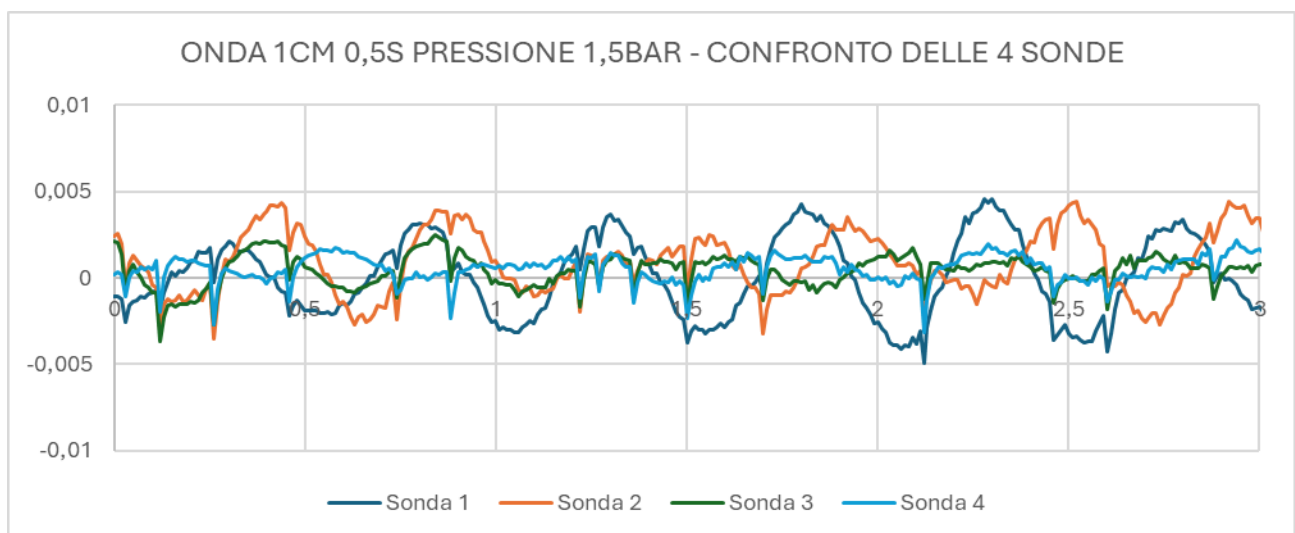


Fig. 8.23 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 1CM 1S PRESSIONE 0.3 BAR

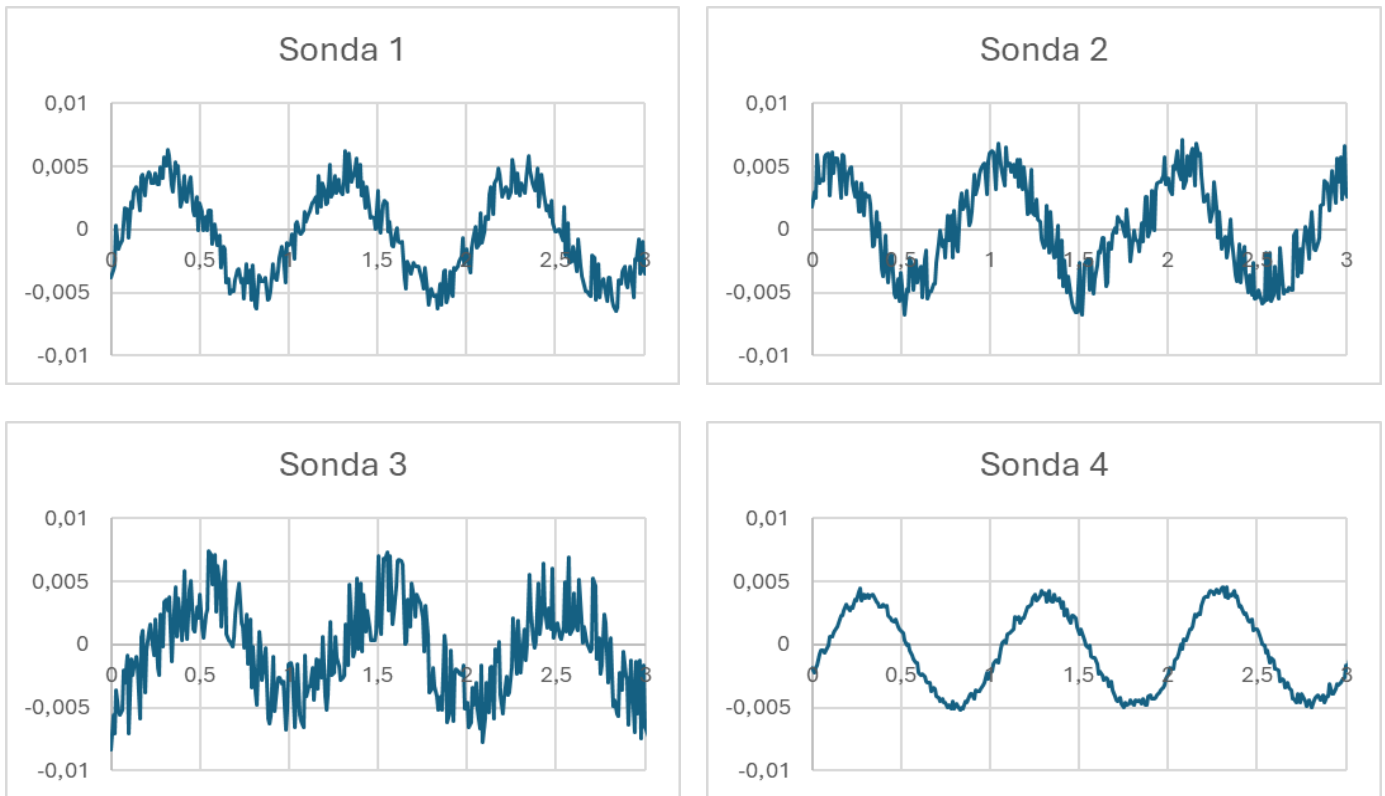


Fig. 8.24 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

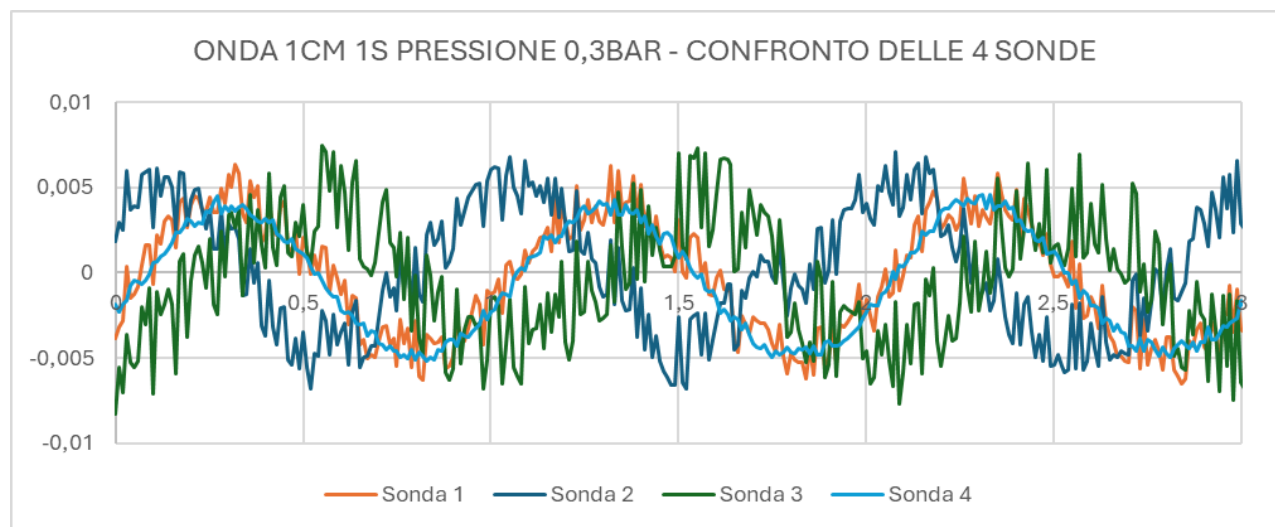


Fig. 8.25 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 1CM 1S PRESSIONE 0.6 BAR

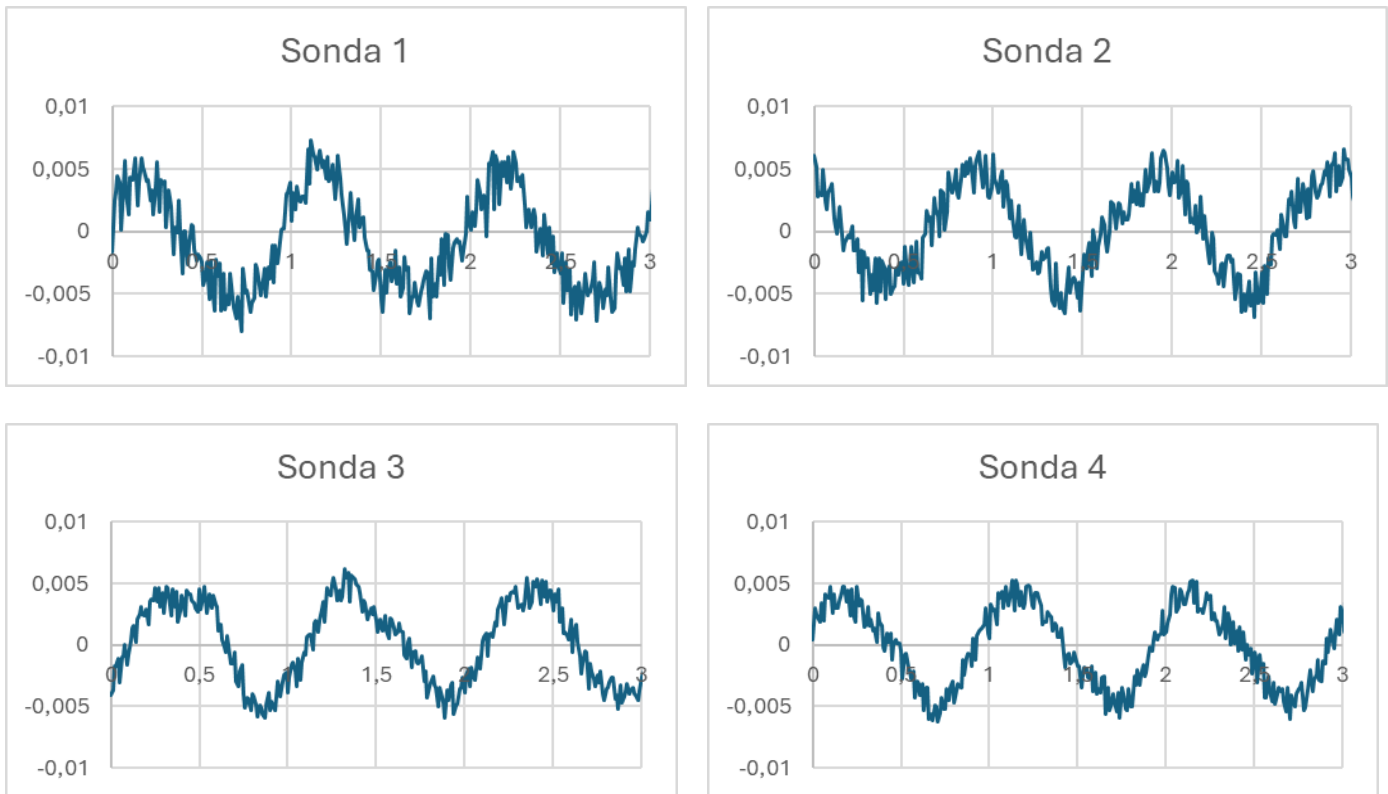


Fig. 8.26 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

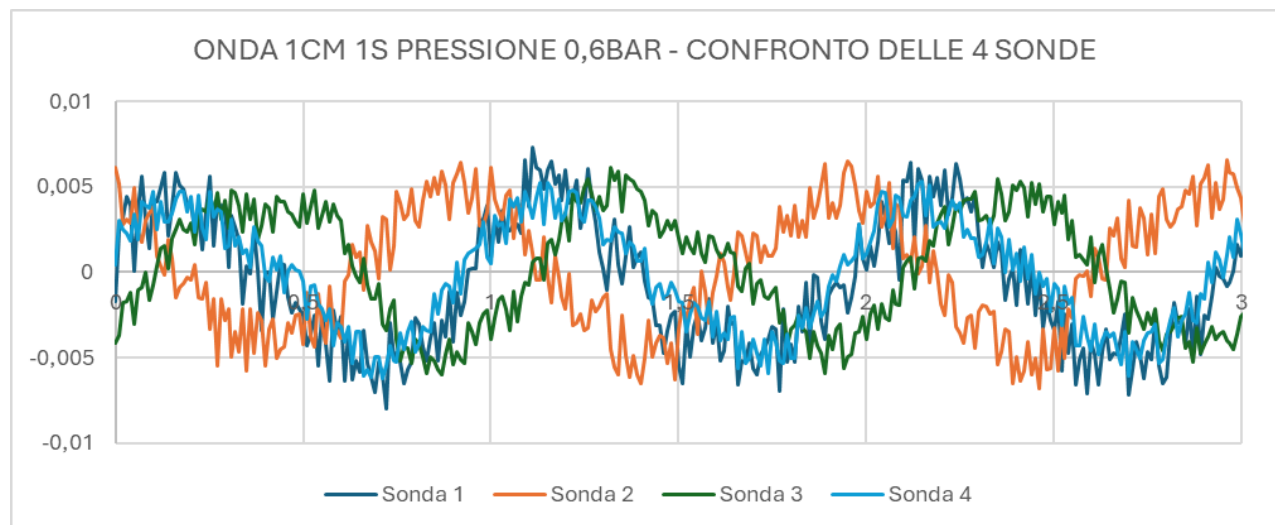


Fig. 8.27 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 1CM 1S PRESSIONE 1 BAR

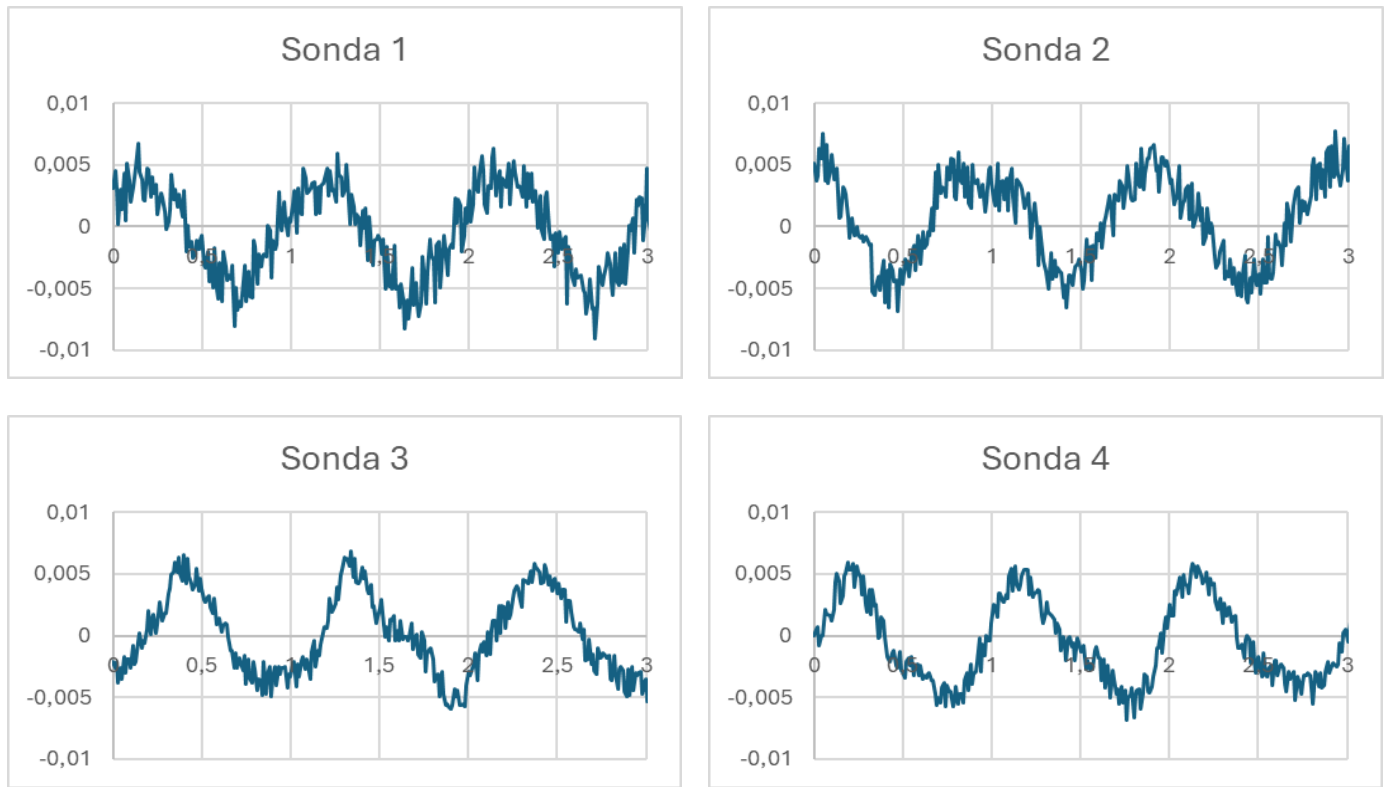


Fig. 8.28 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

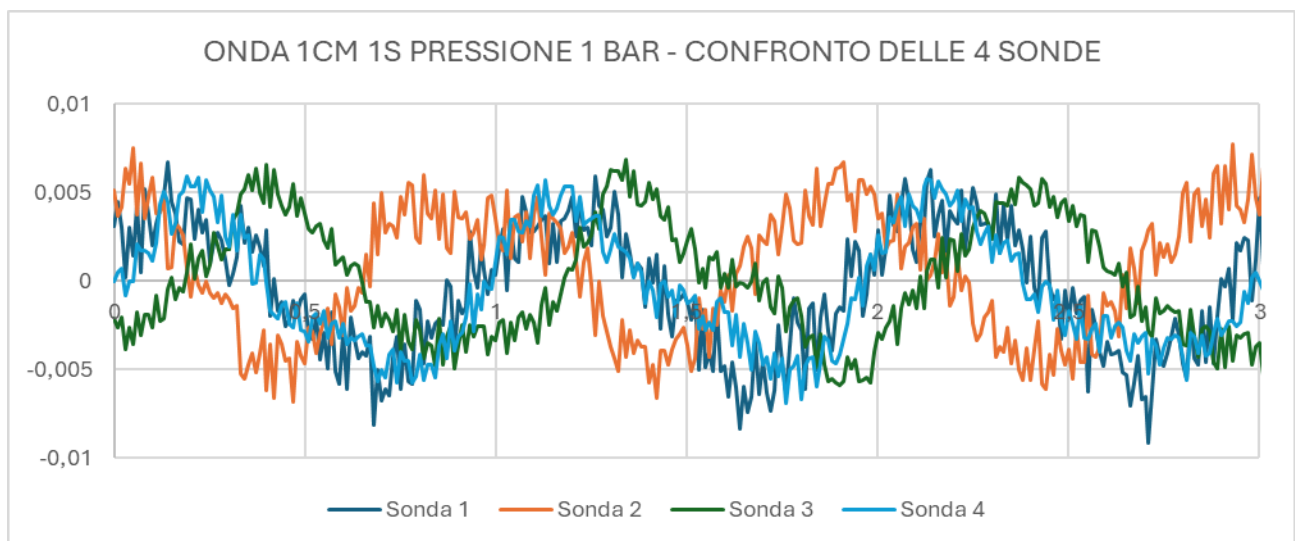


Fig. 8.29 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 1CM 1S PRESSIONE 1.5 BAR

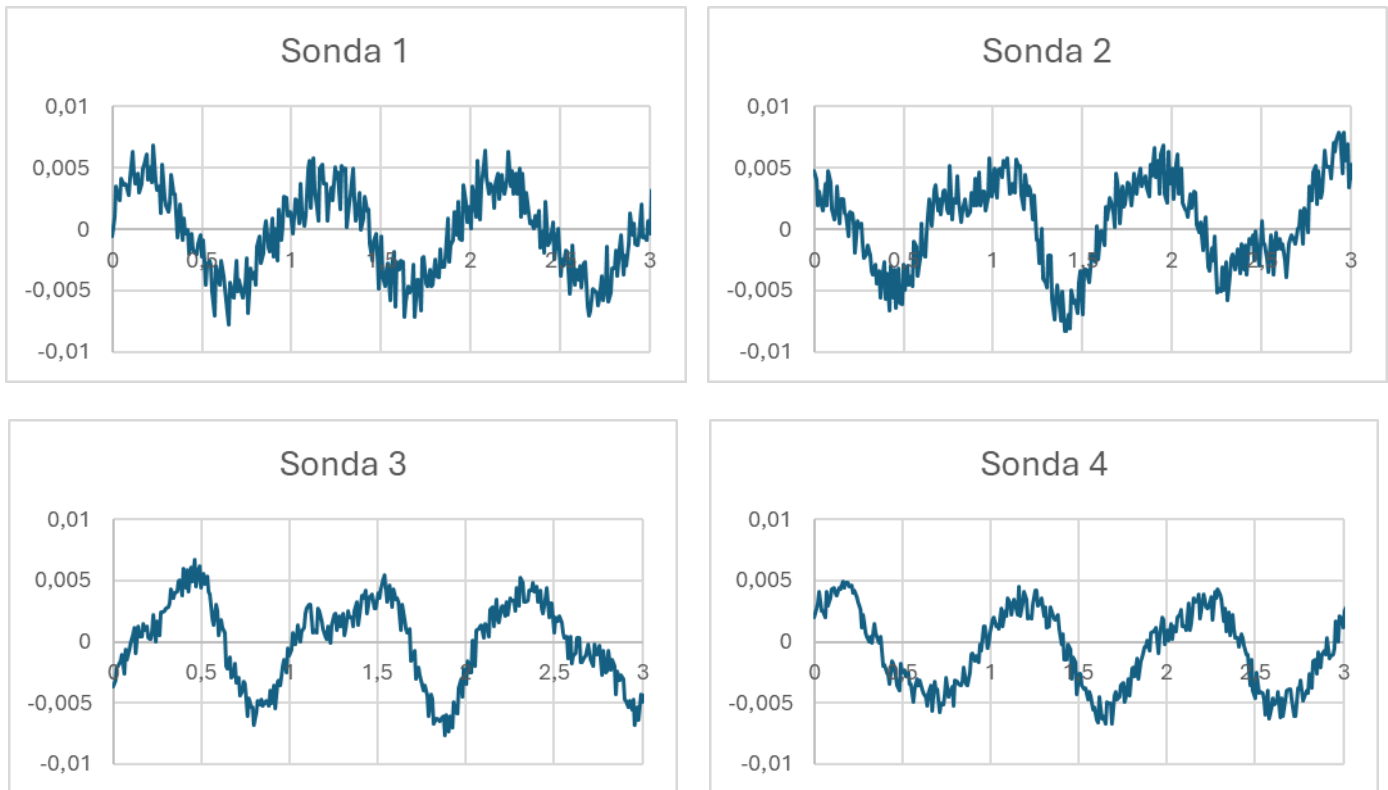


Fig. 8.30 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

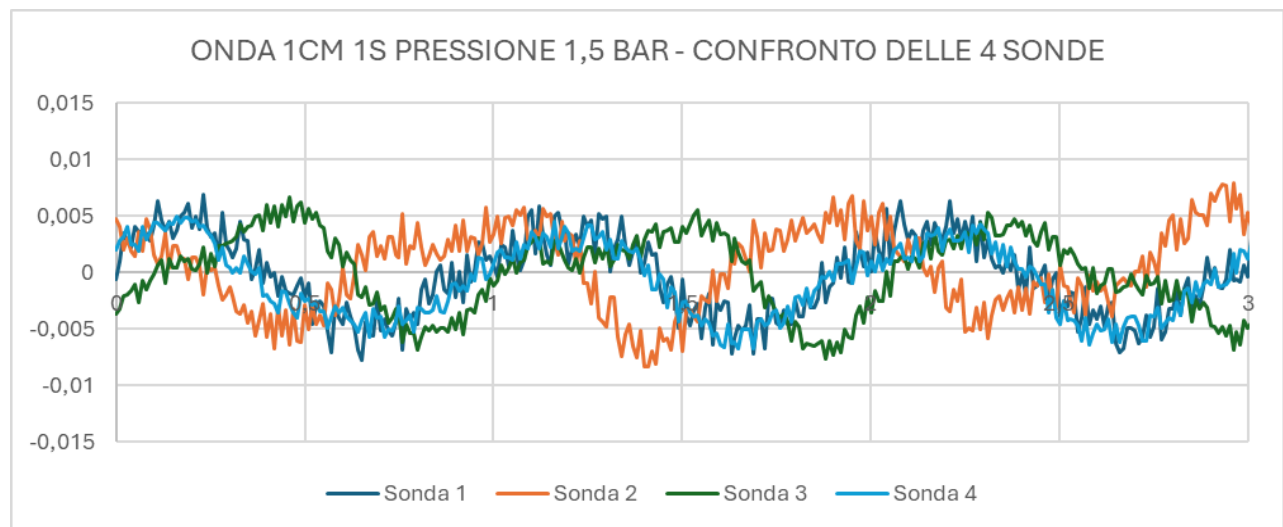


Fig. 8.31 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 2CM 0.5S PRESSIONE 0.3 BAR

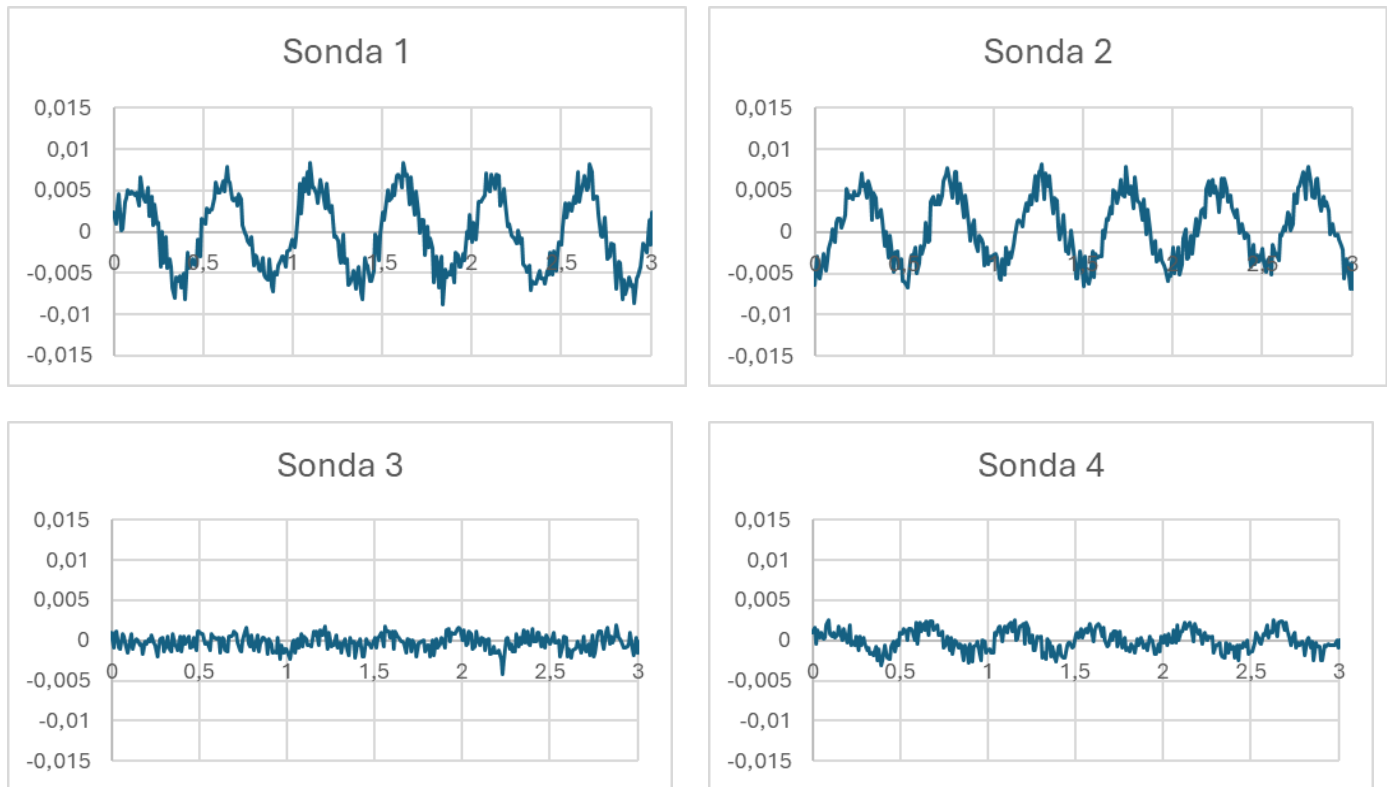


Fig. 8.32 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

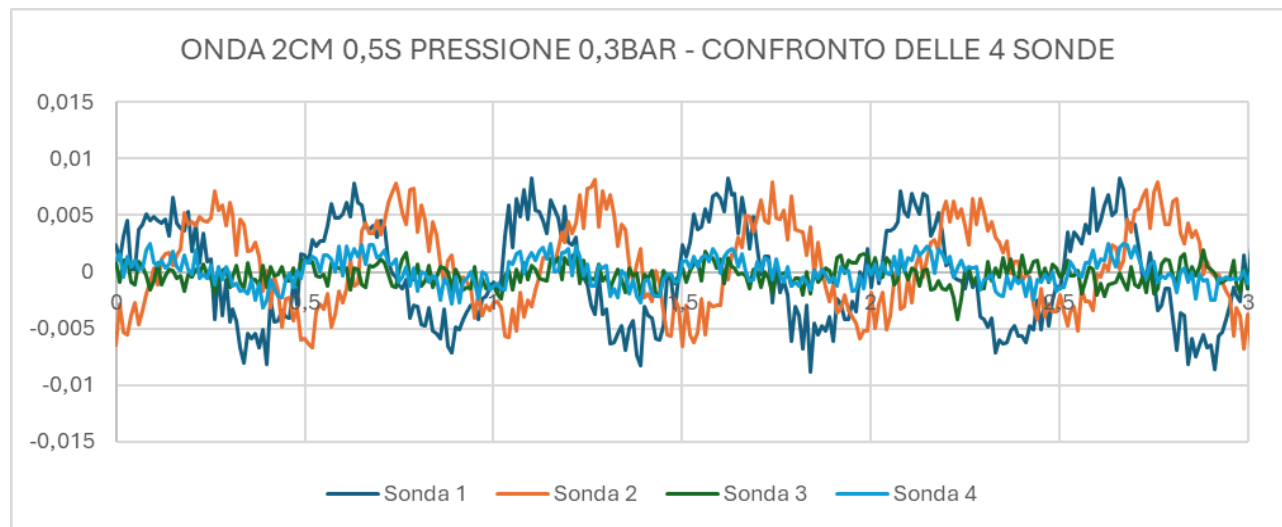


Fig. 8.33 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 2CM 0.5S PRESSIONE 0.6 BAR

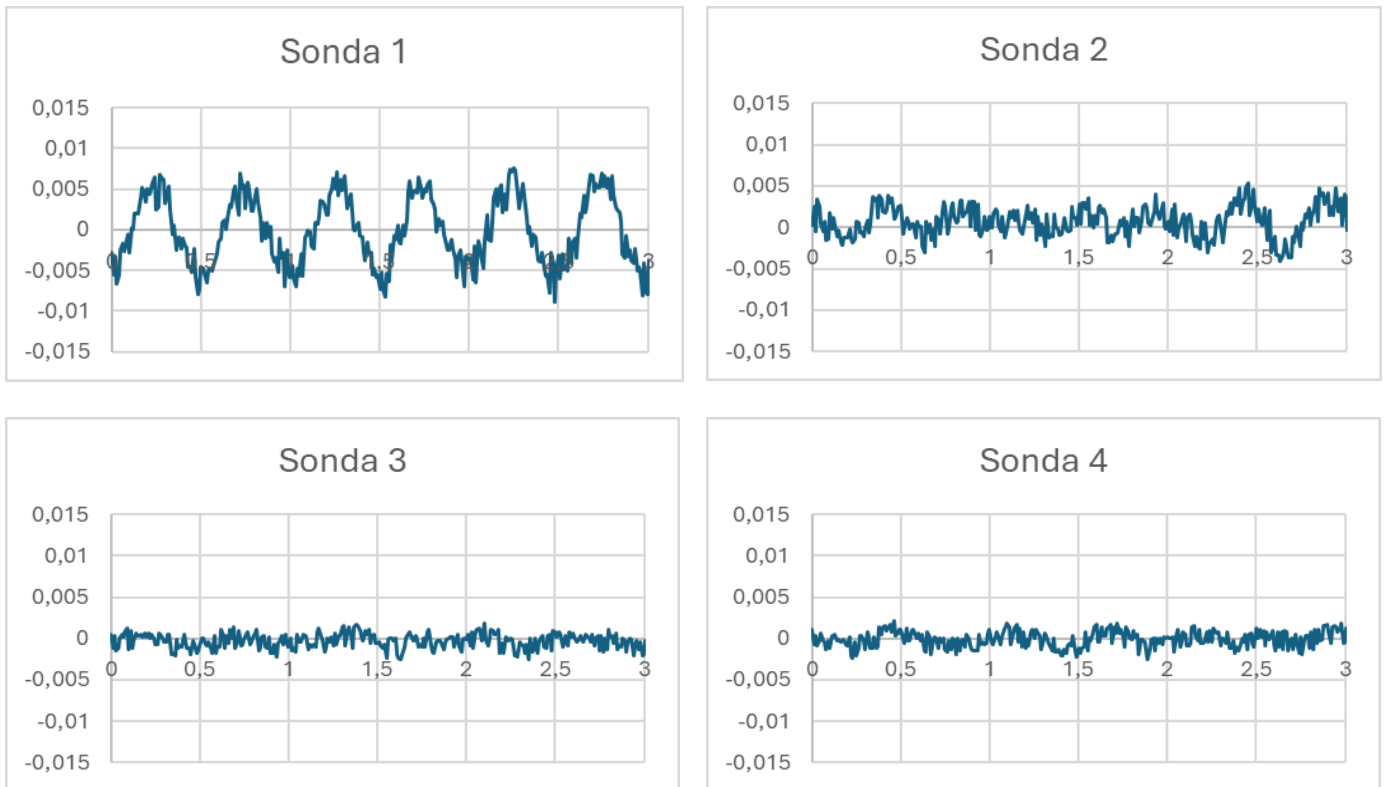


Fig. 8.34 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

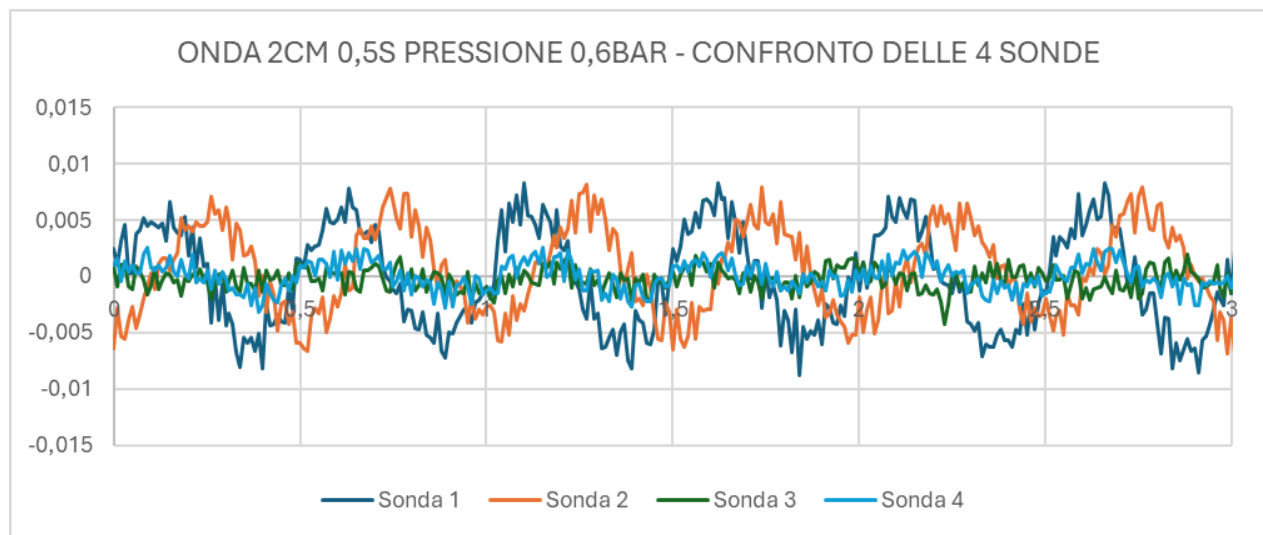


Fig. 8.35 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 2CM 0.5S PRESSIONE 1 BAR

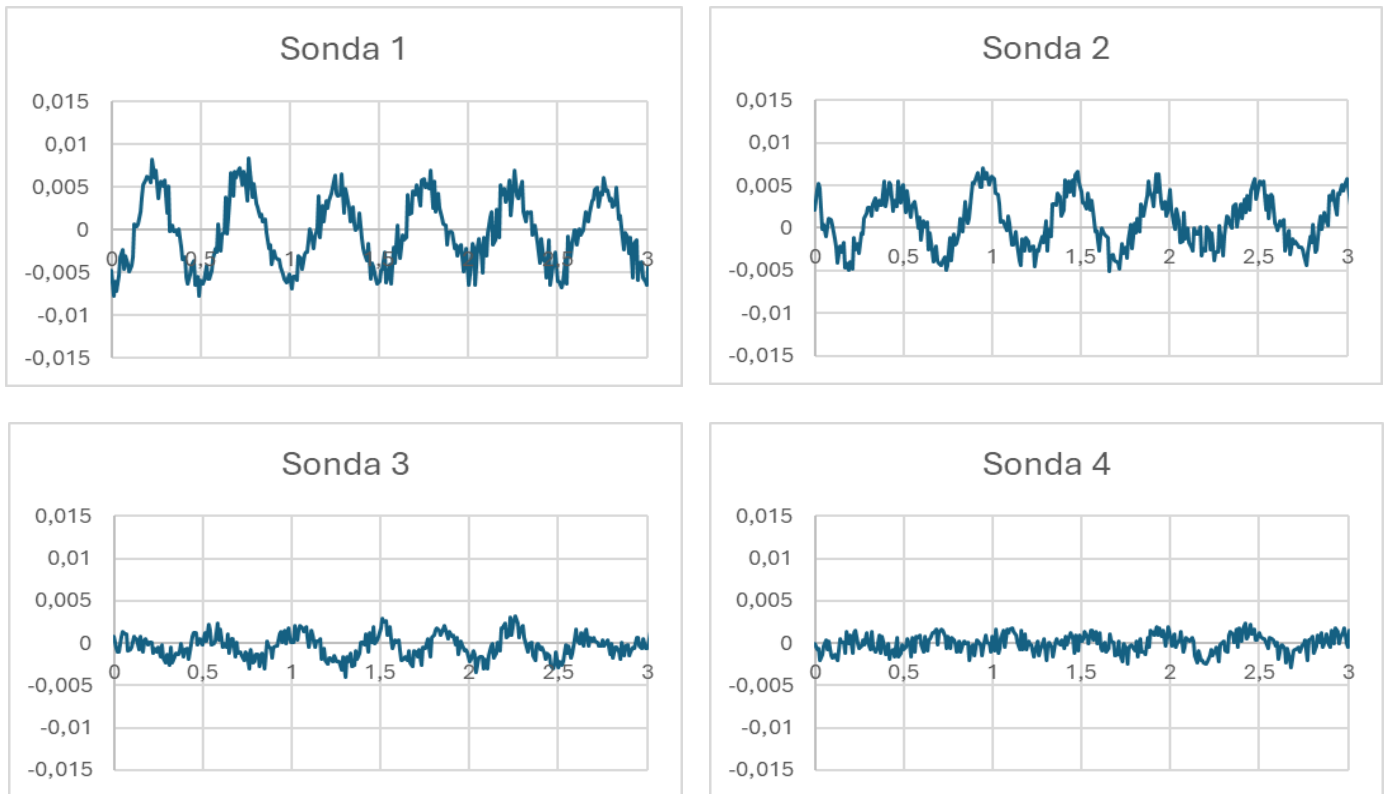


Fig. 8.36 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

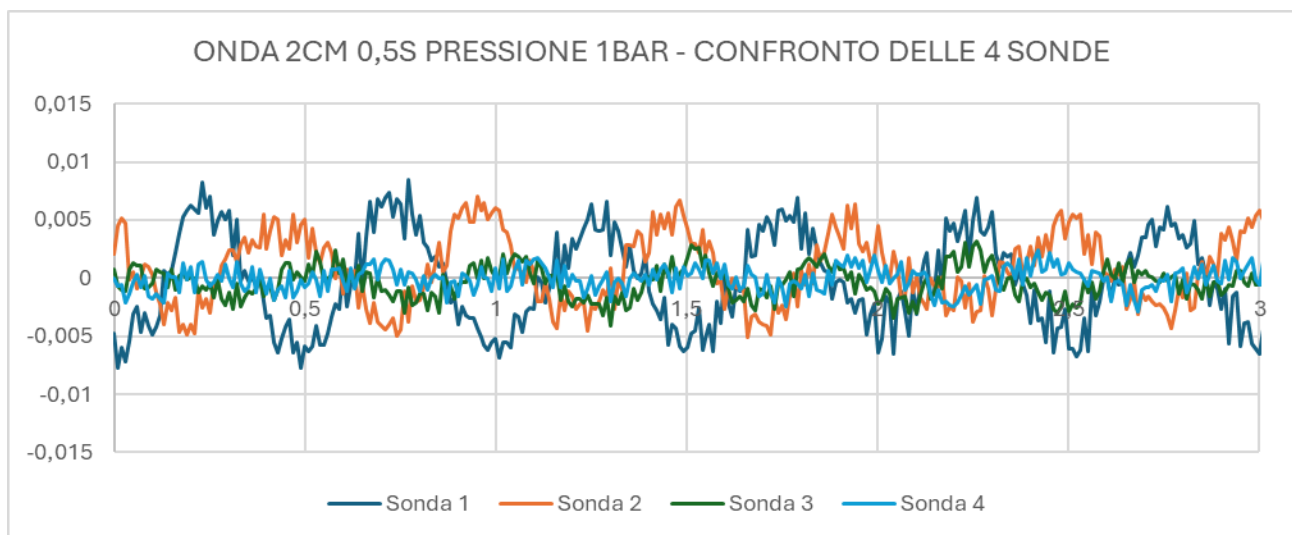


Fig. 8.37 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 2CM 0.5S PRESSIONE 1.5 BAR

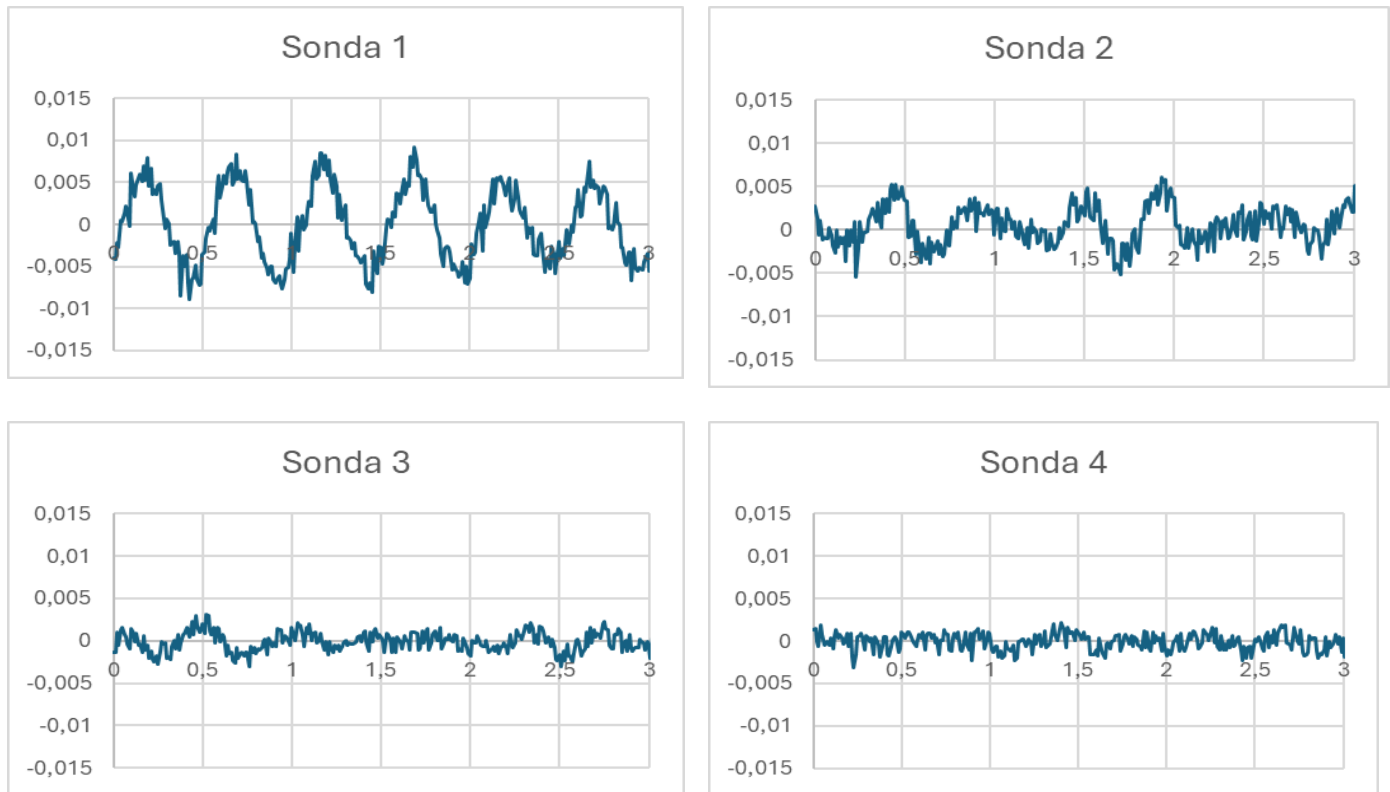


Fig. 8.38 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

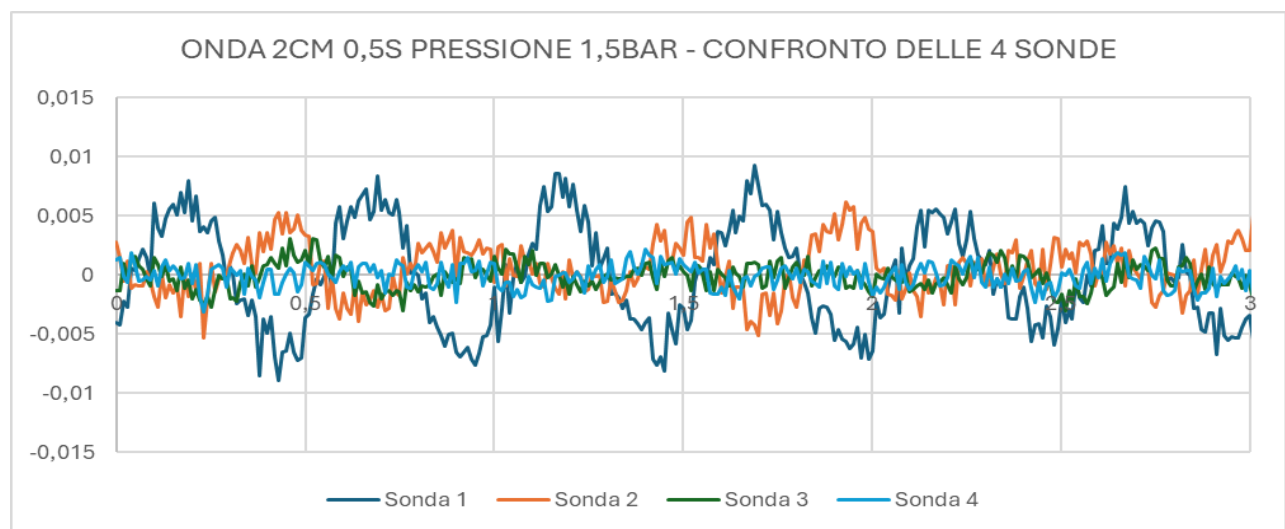


Fig. 8.39 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 2CM 1S PRESSIONE 0.3 BAR

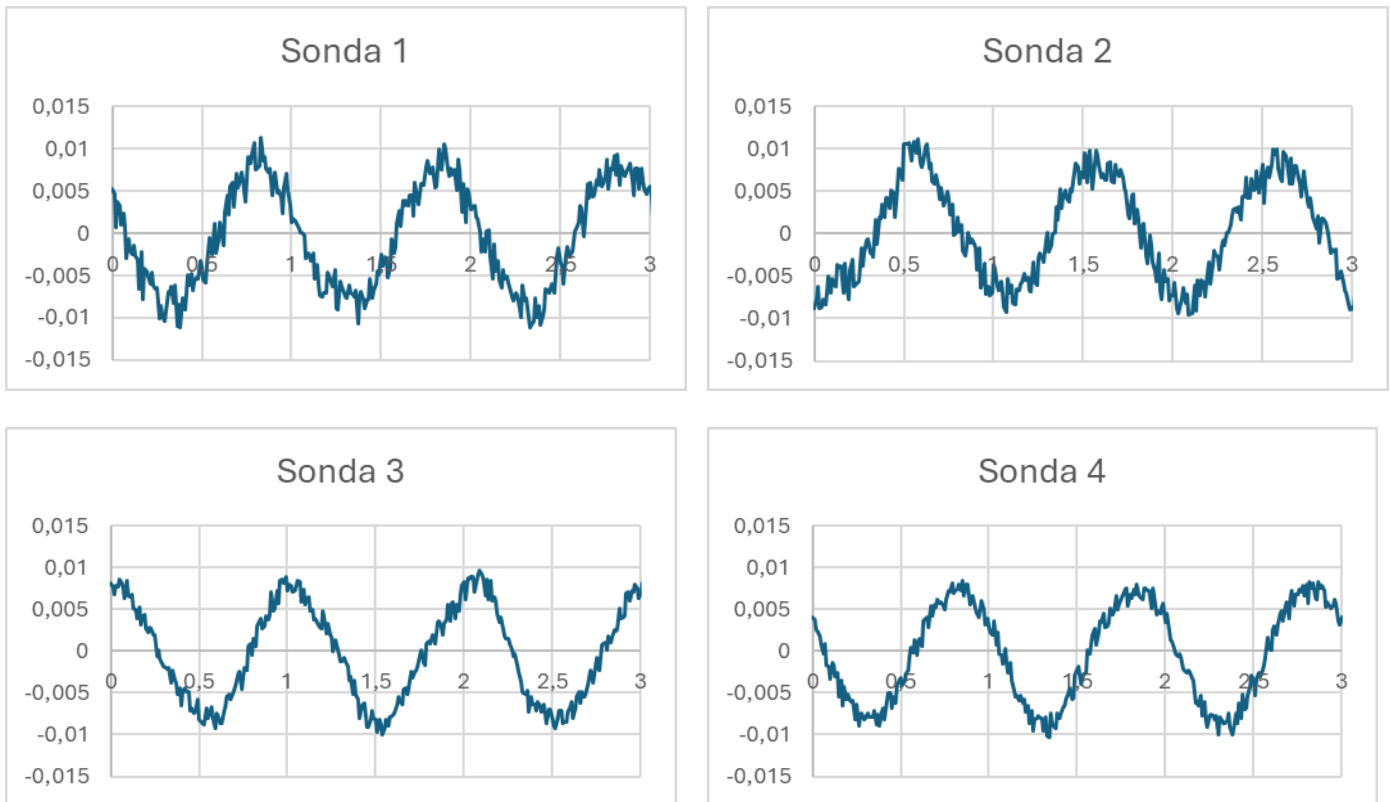


Fig. 8.40 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

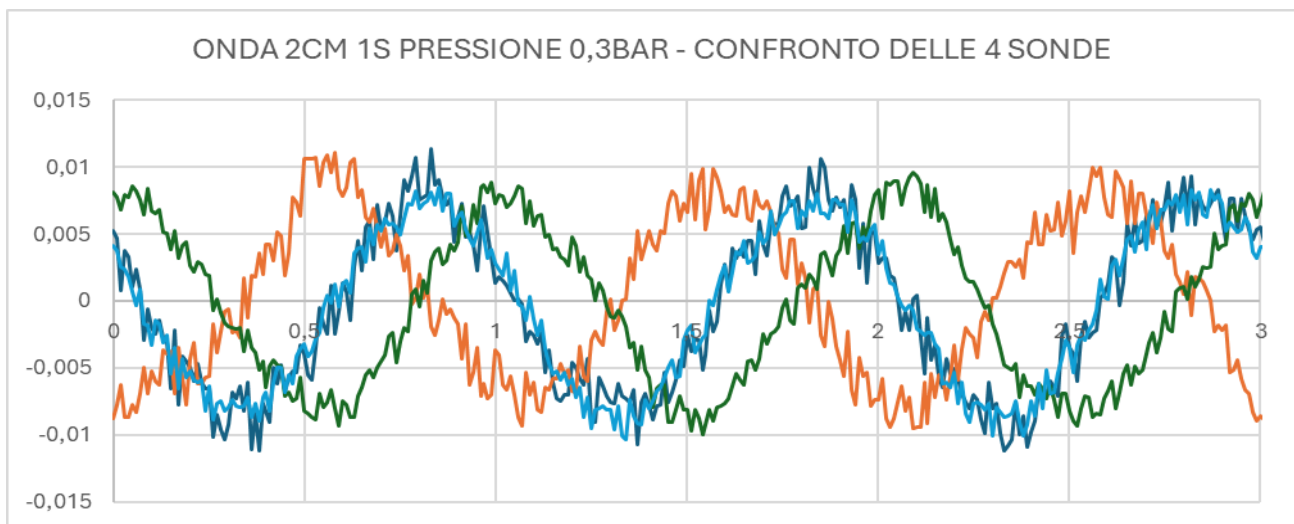


Fig. 8.41 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 2CM 1S PRESSIONE 0.6 BAR

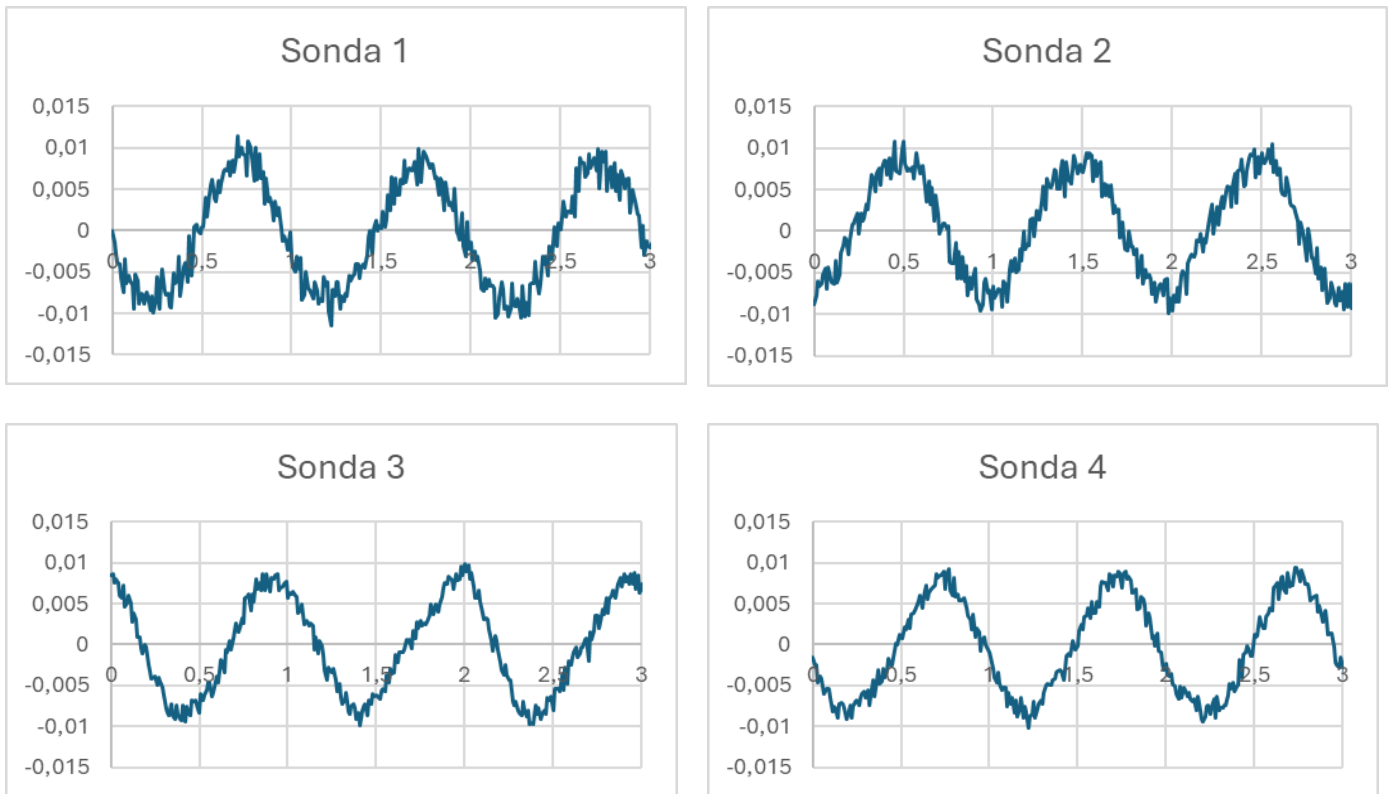


Fig. 8.42 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

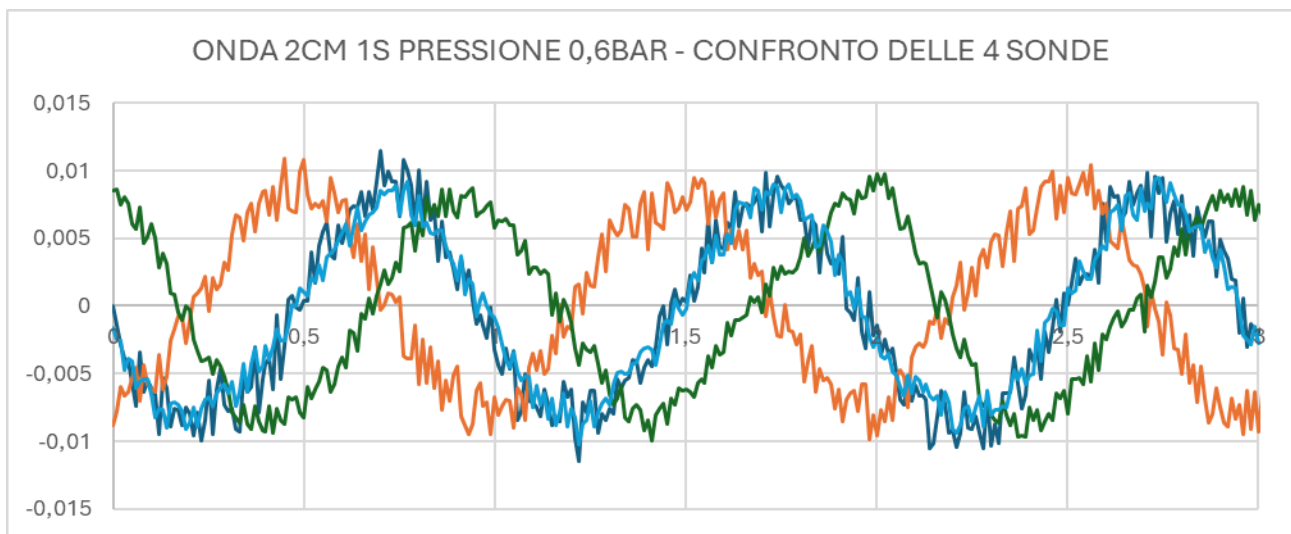


Fig. 8.43 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 2CM 1S PRESSIONE 1 BAR

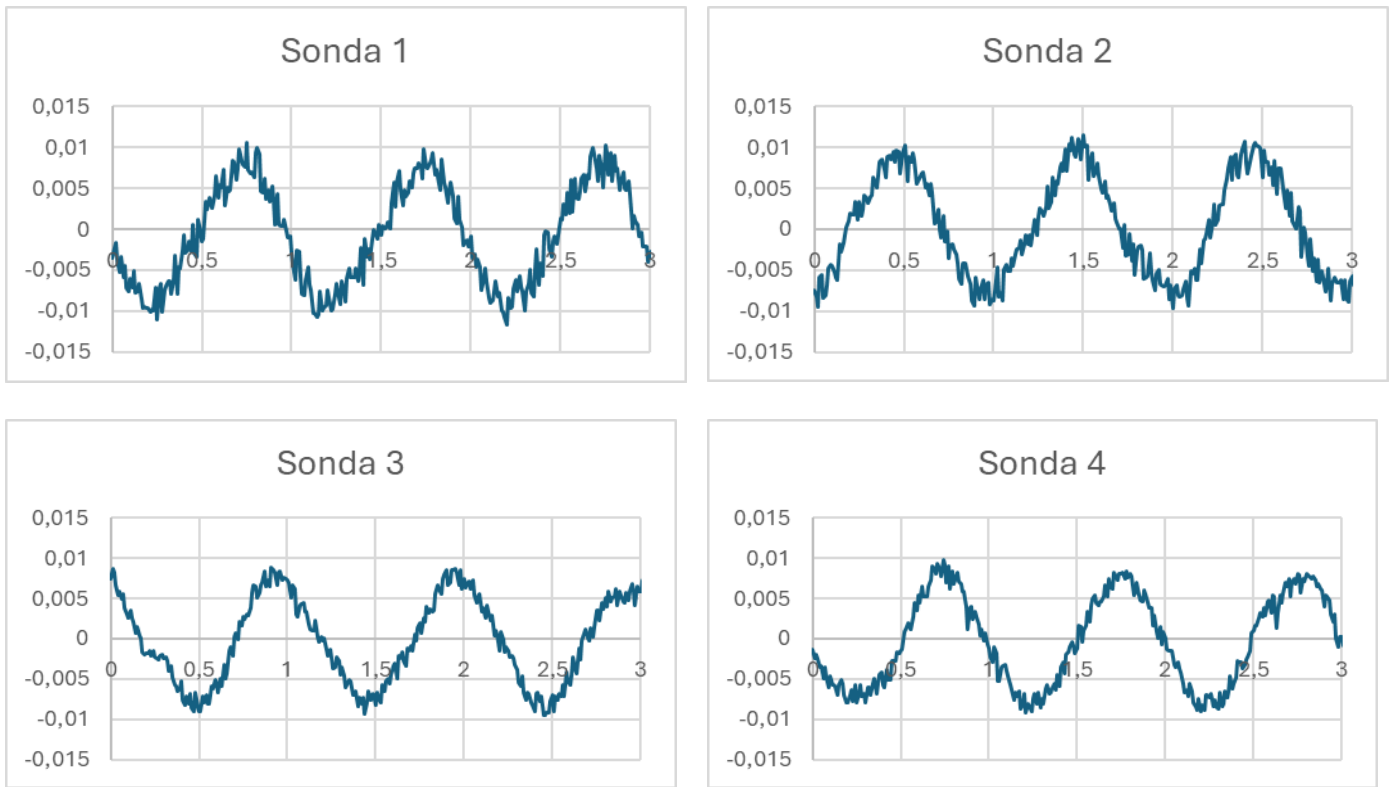


Fig. 8.44 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

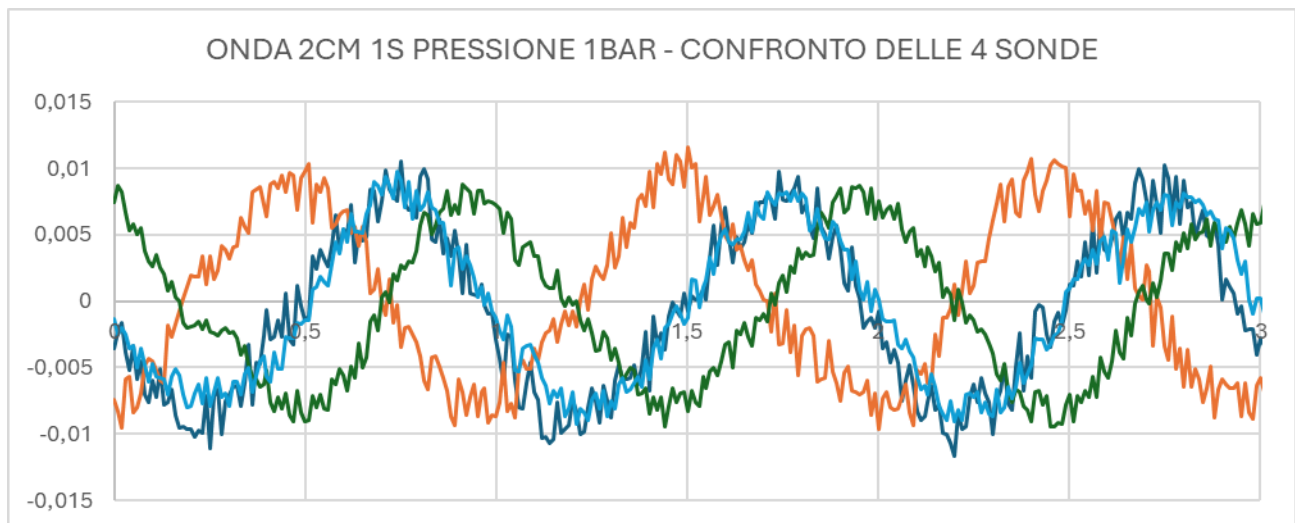


Fig. 8.45 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 2CM 1S PRESSIONE 1.5 BAR

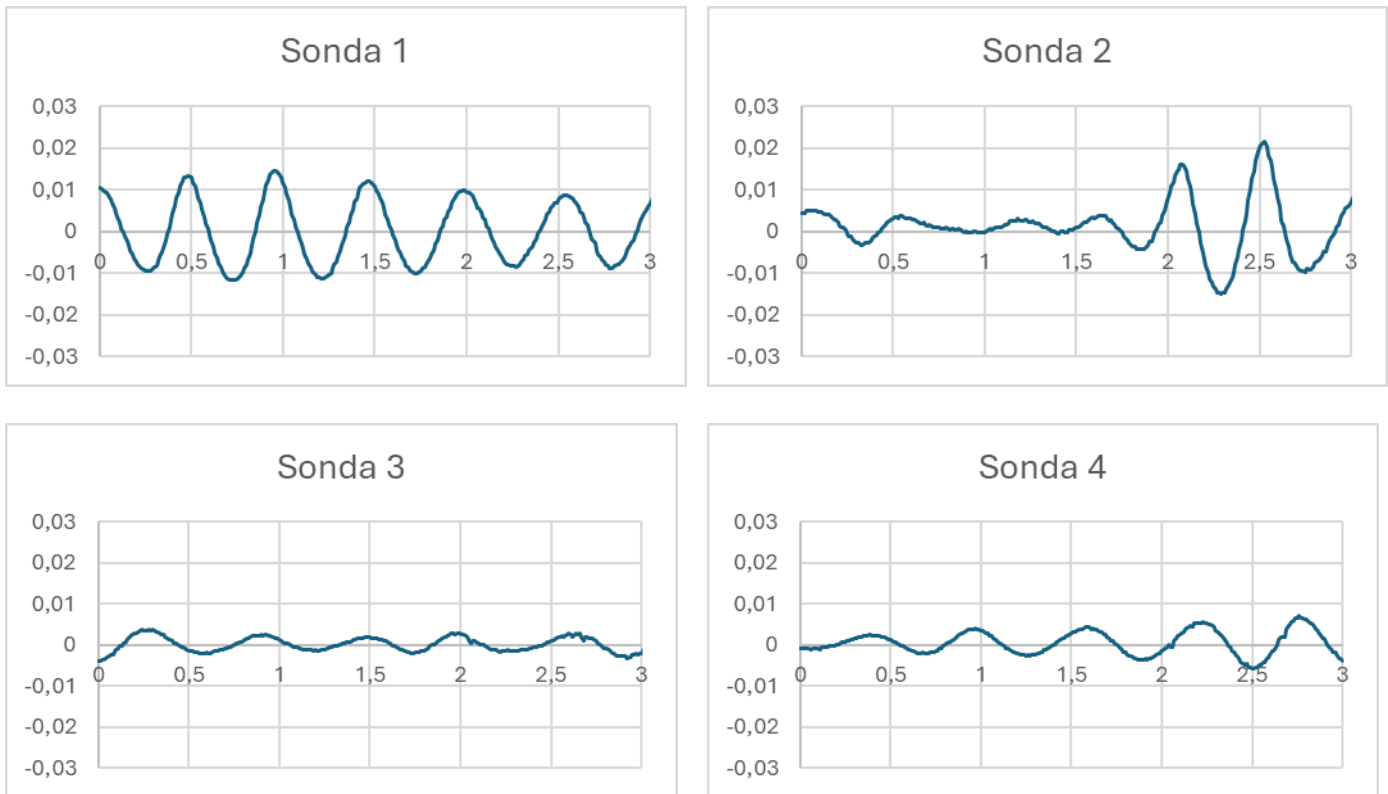


Fig. 8.46 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

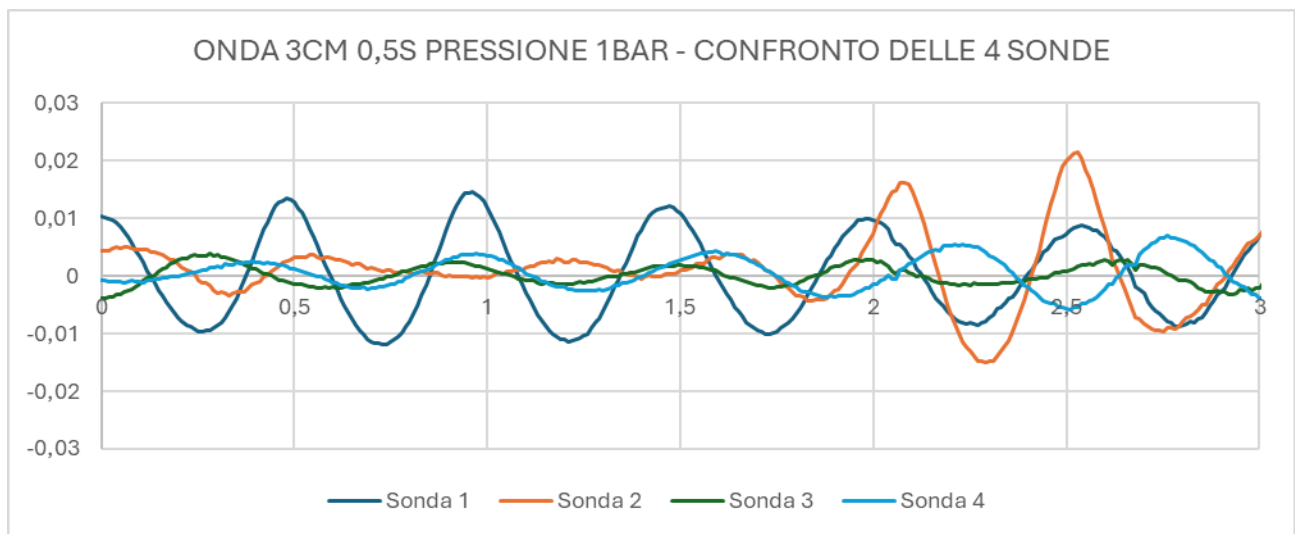


Fig. 8.47 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 3CM 0.5S PRESSIONE 1.5 BAR

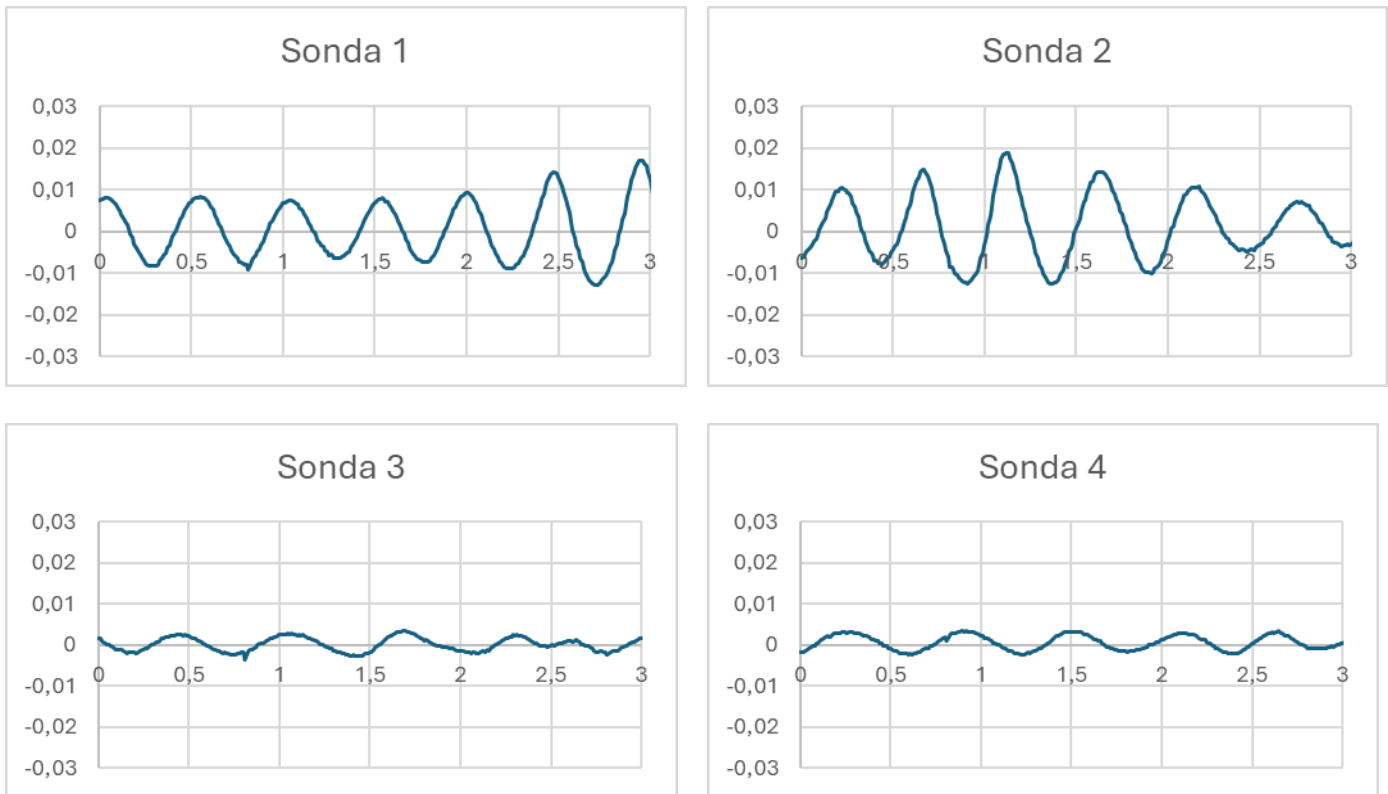


Fig. 8.48 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

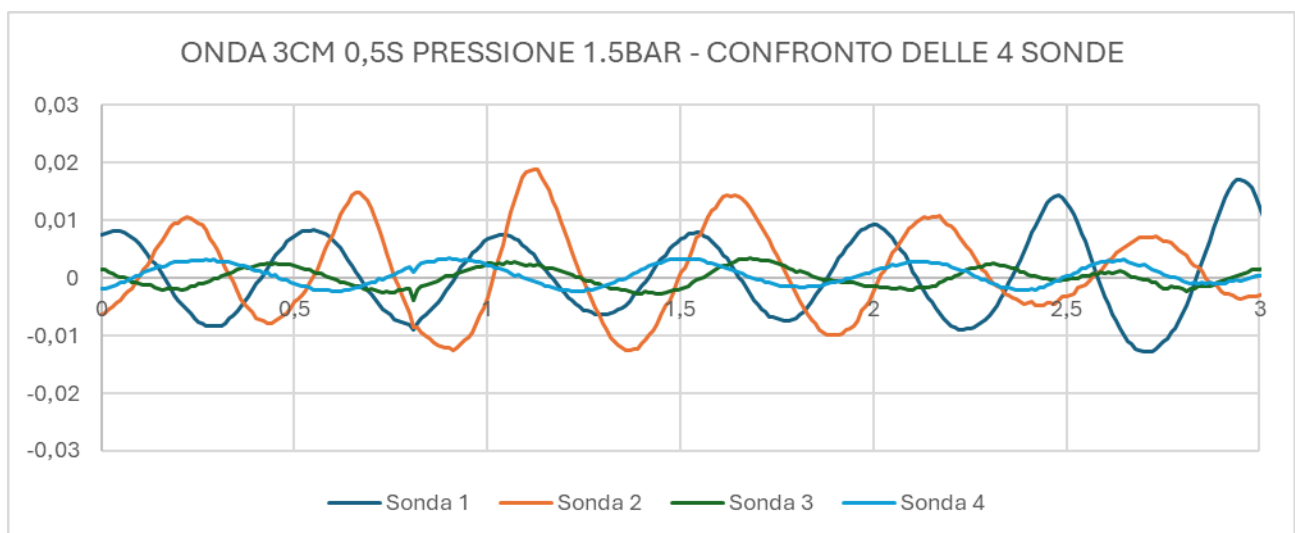


Fig. 8.49 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 3CM 1S PRESSIONE 0.3 BAR

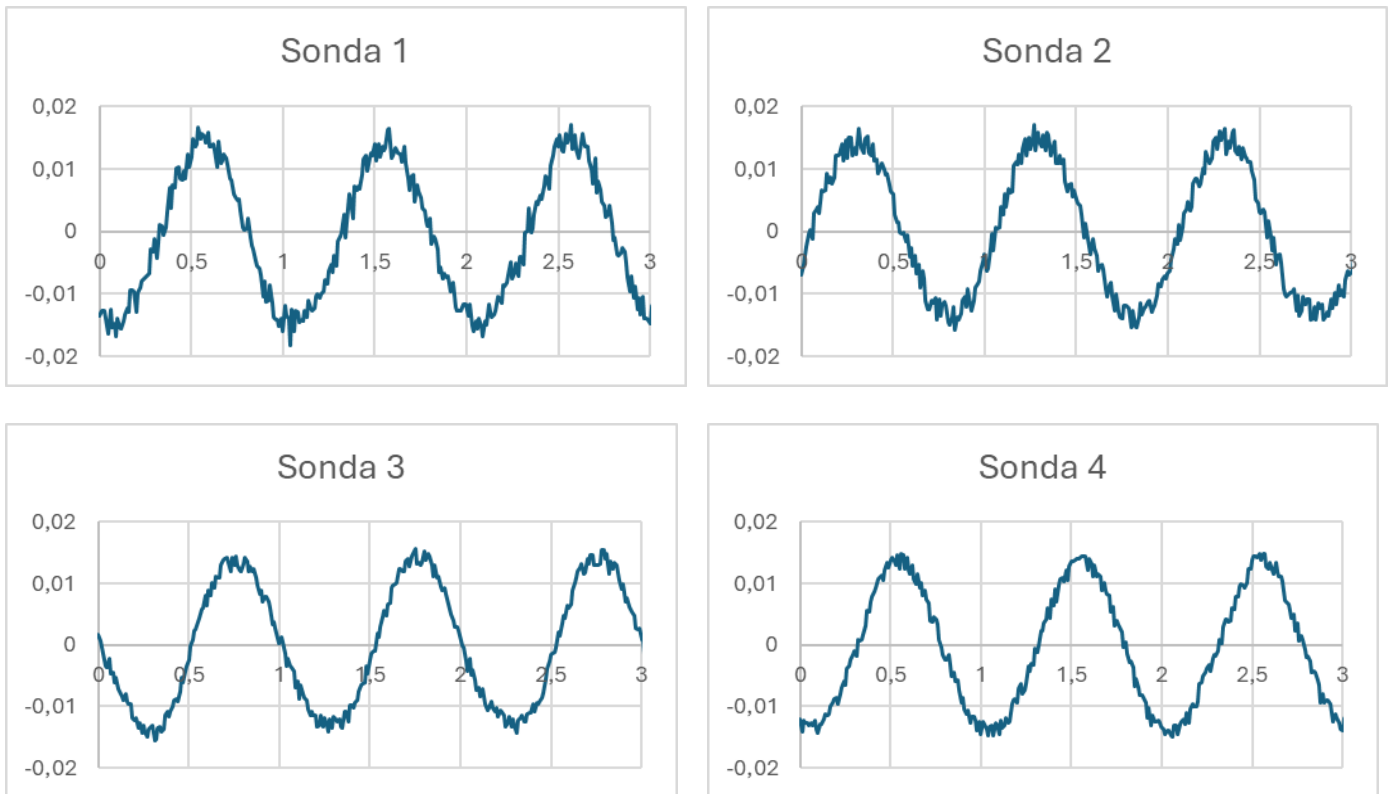


Fig. 8.50 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

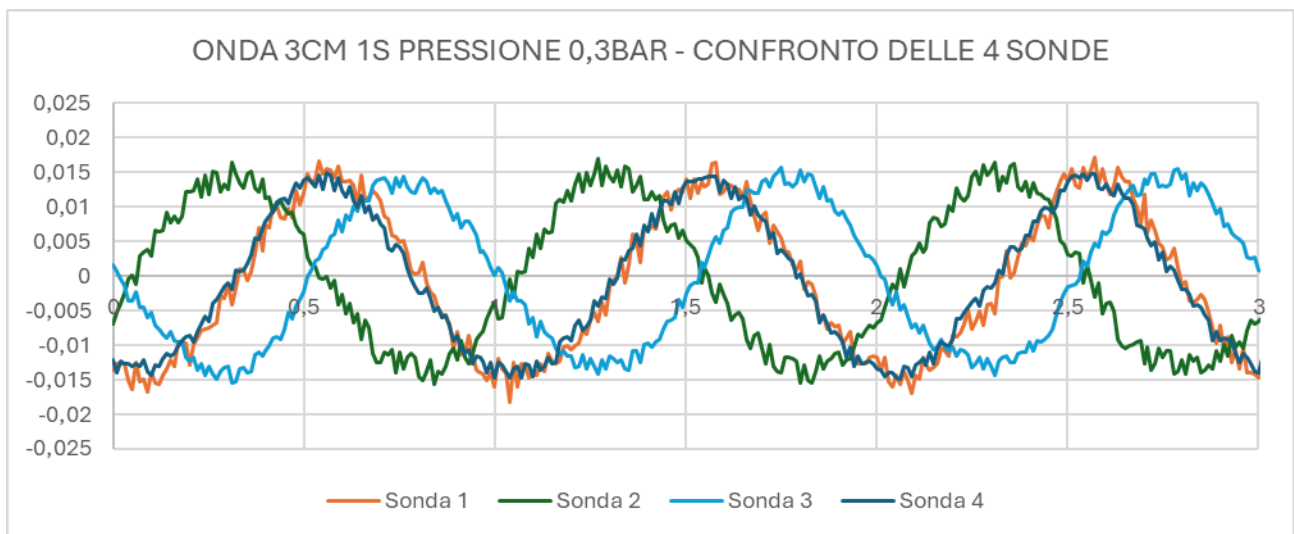


Fig. 8.51 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 3CM 1S PRESSIONE 0.6 BAR

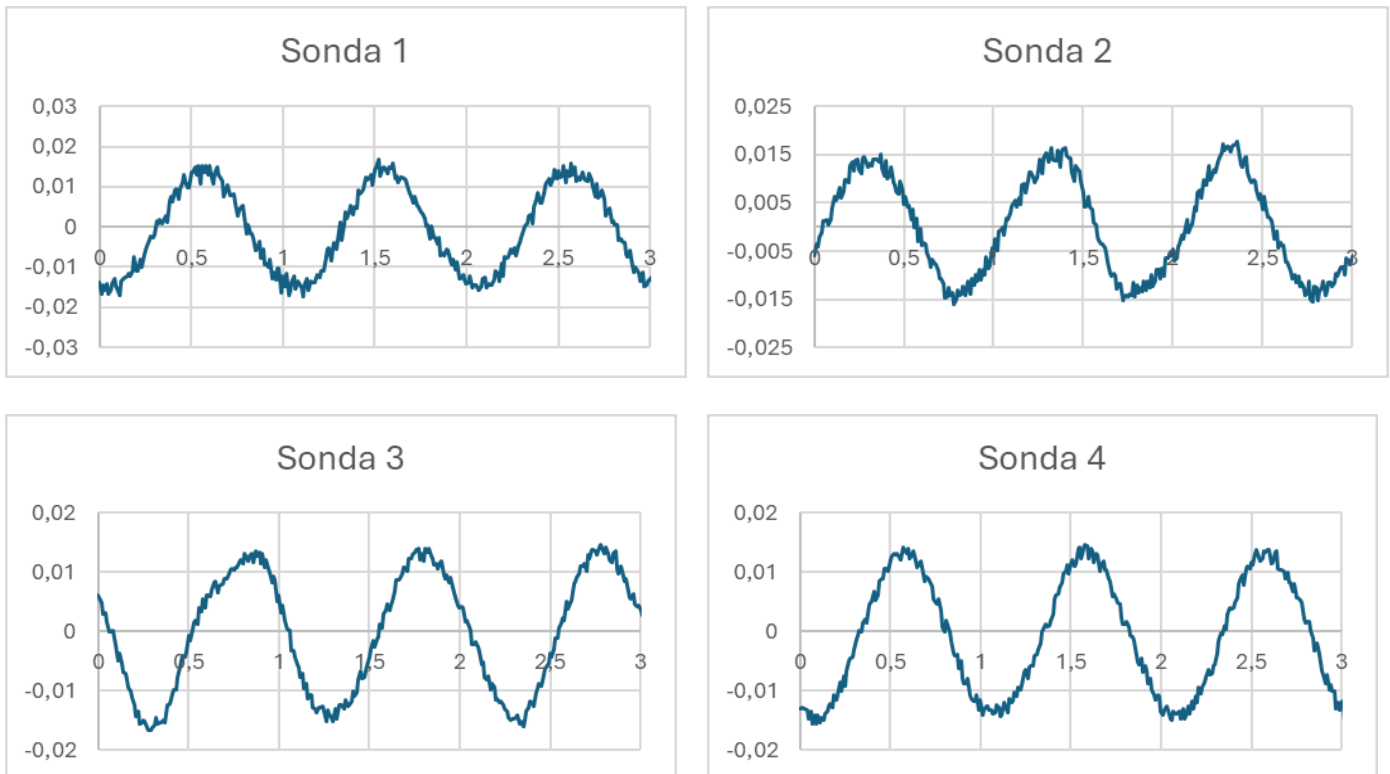


Fig. 8.52 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

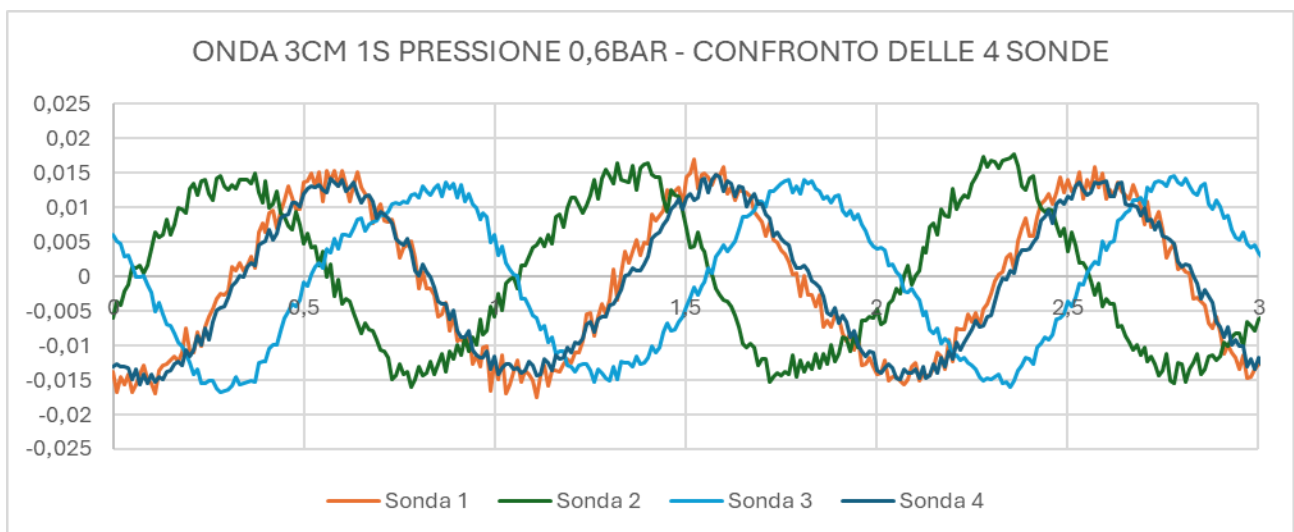


Fig. 8.53 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 3CM 1S PRESSIONE 1 BAR

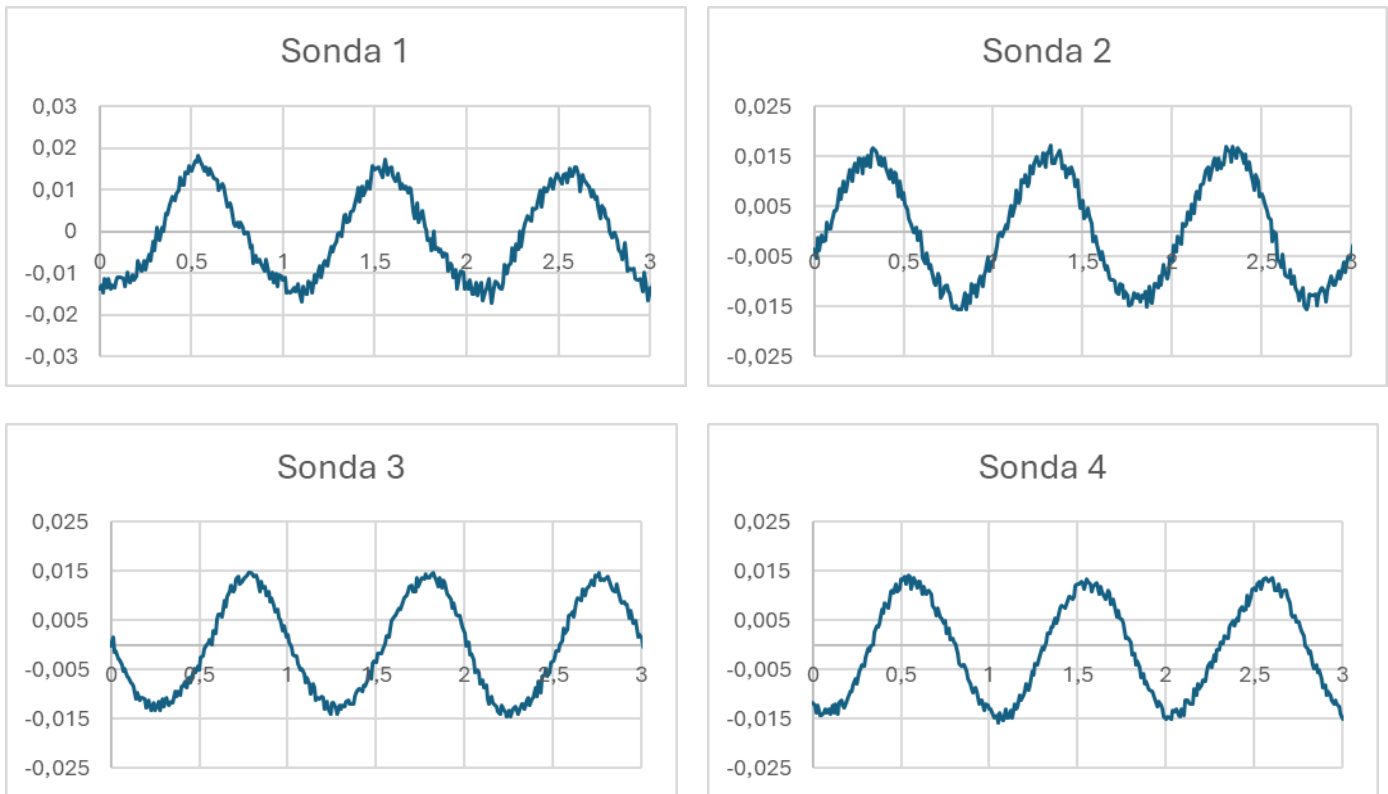


Fig. 8.54 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

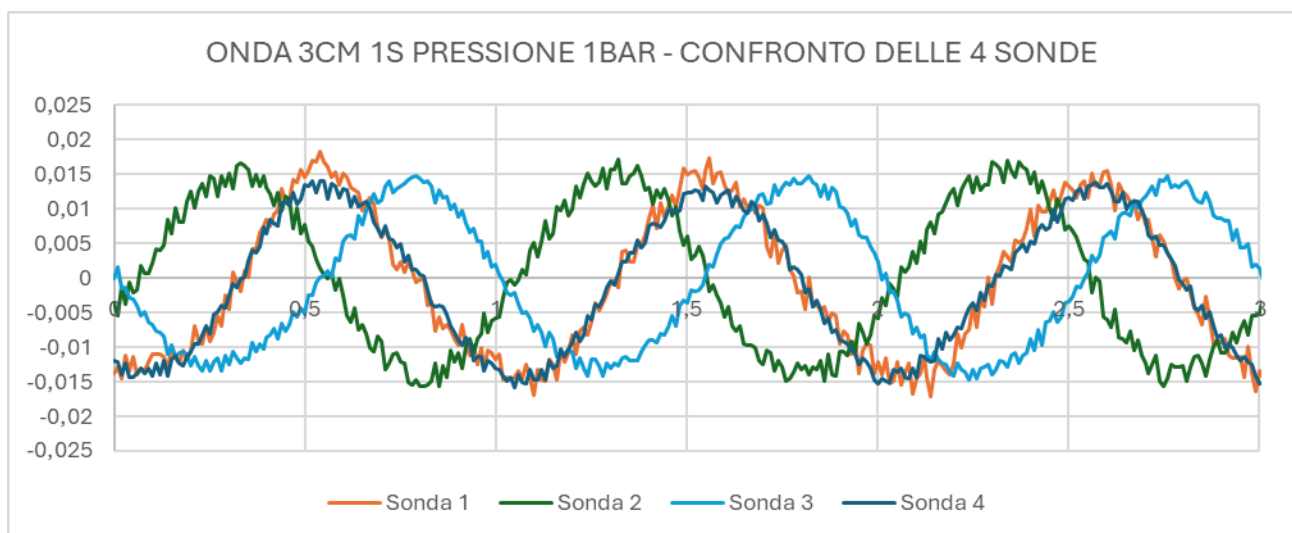


Fig. 8.55 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 3CM 1S PRESSIONE 1.5 BAR

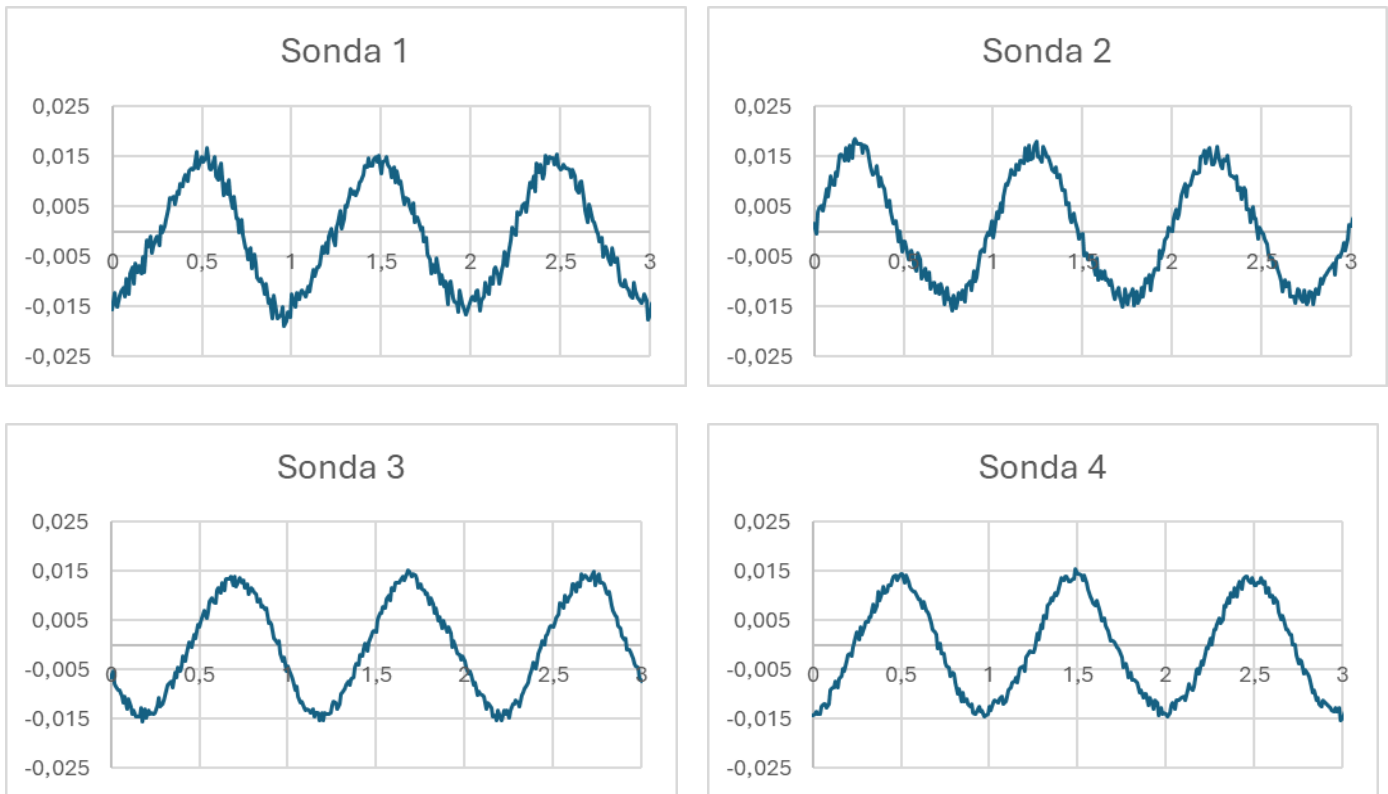


Fig. 8.56 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

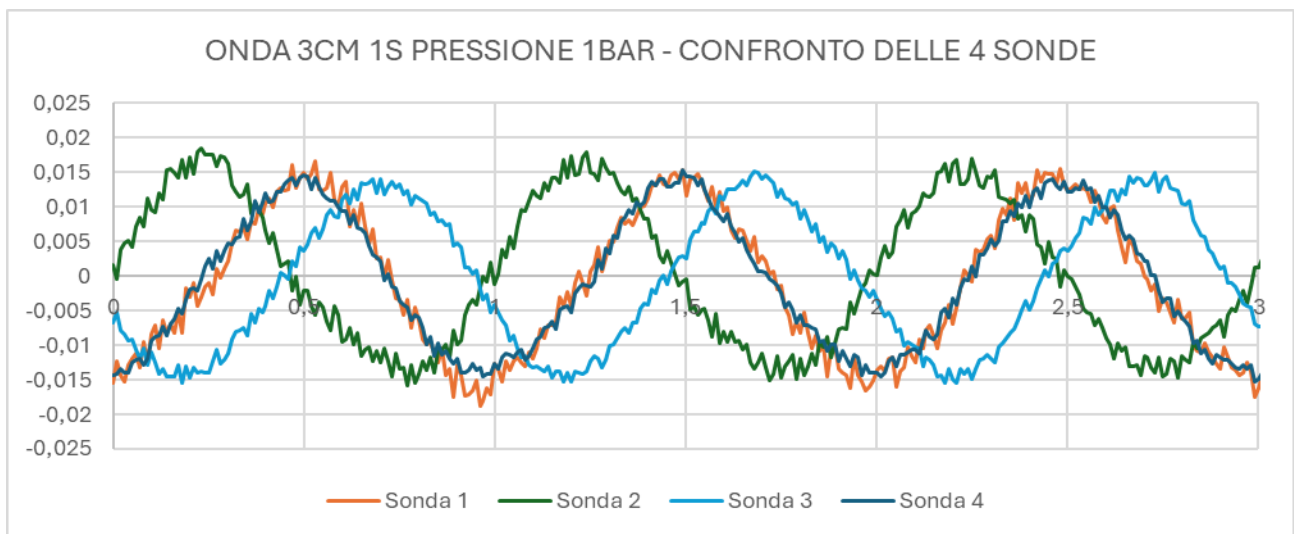


Fig. 8.57 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 4CM 0.5S PRESSIONE 0.3 BAR

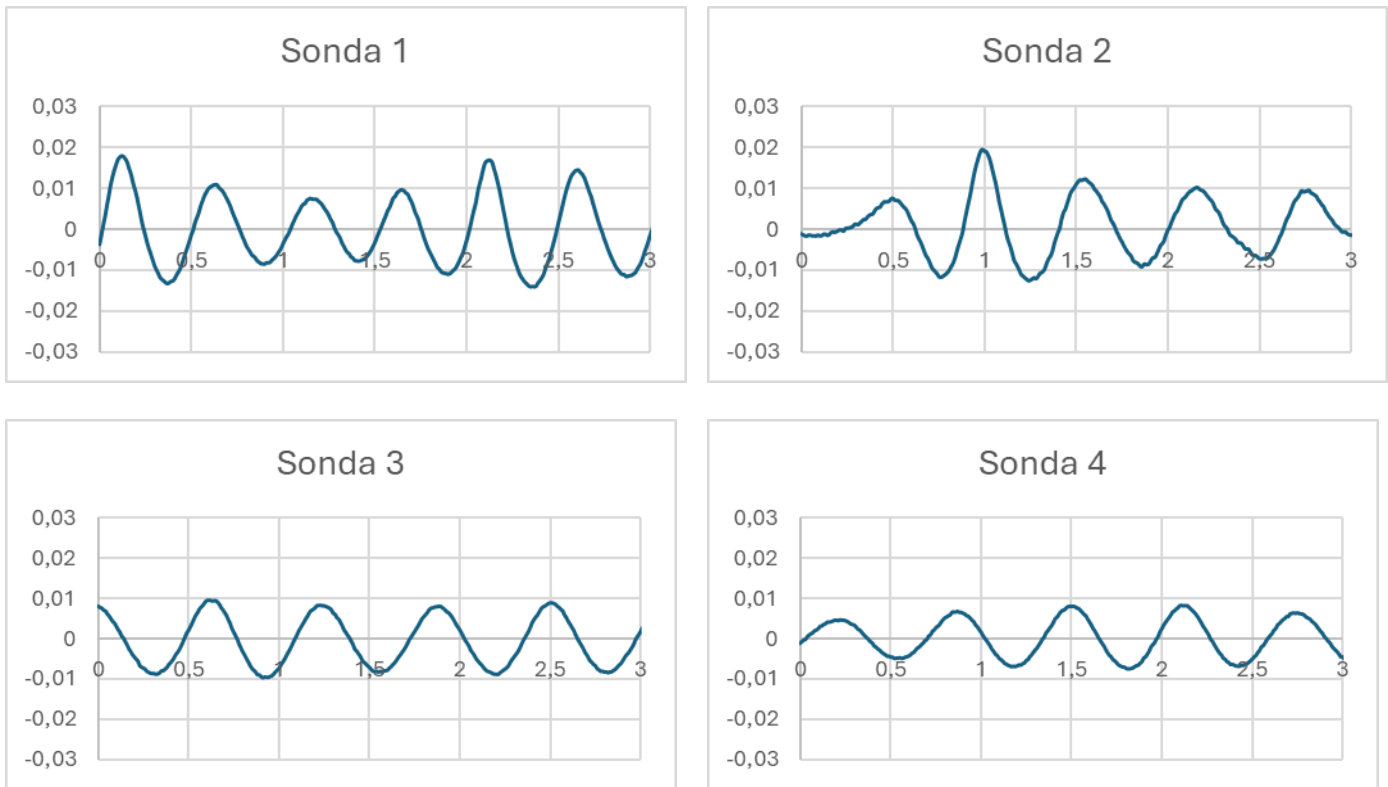


Fig. 8.58 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

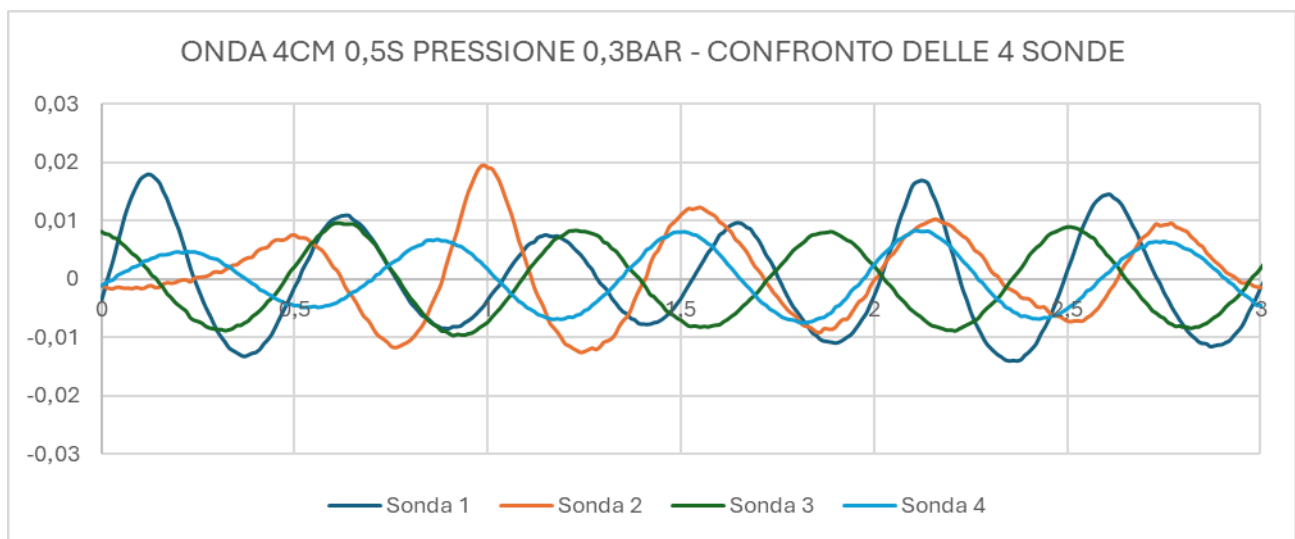


Fig. 8.59 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 4CM 0.5S PRESSIONE 0.6 BAR

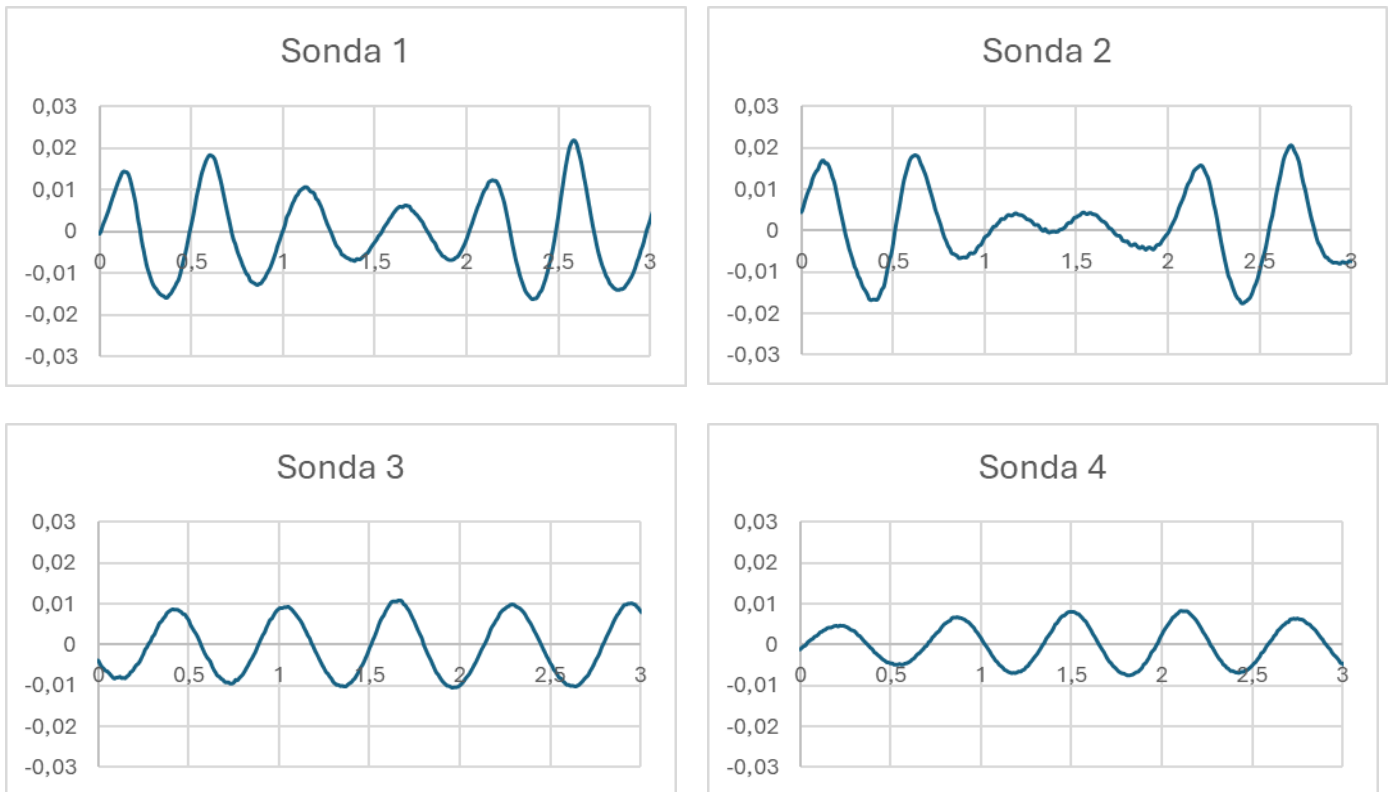


Fig. 8.60 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

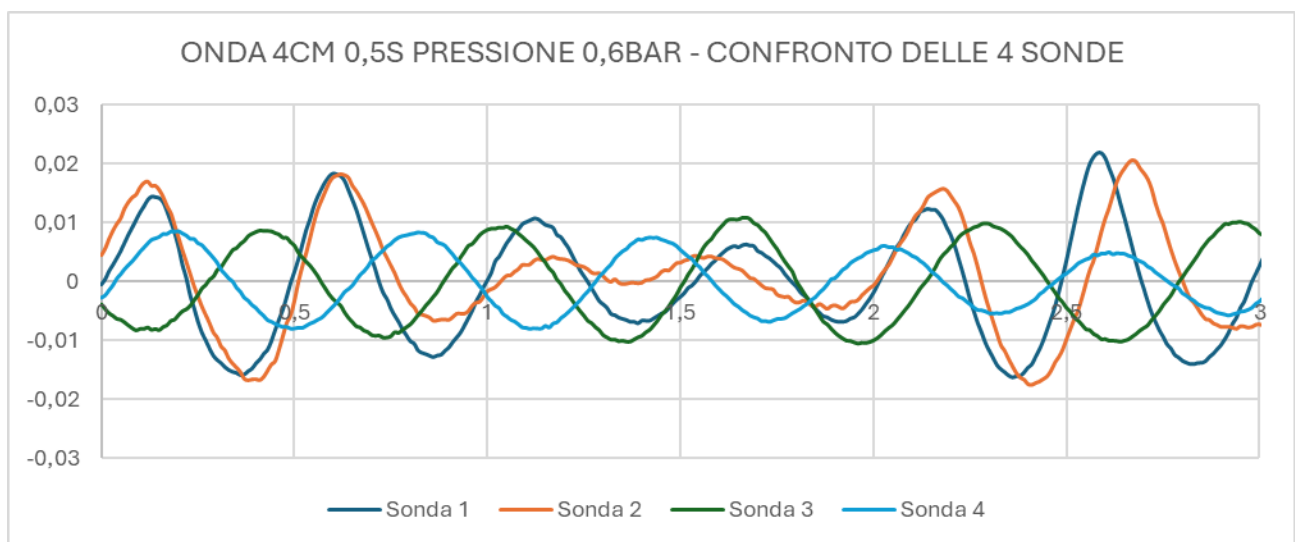


Fig. 8.61 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 4CM 0.5S PRESSIONE 1 BAR

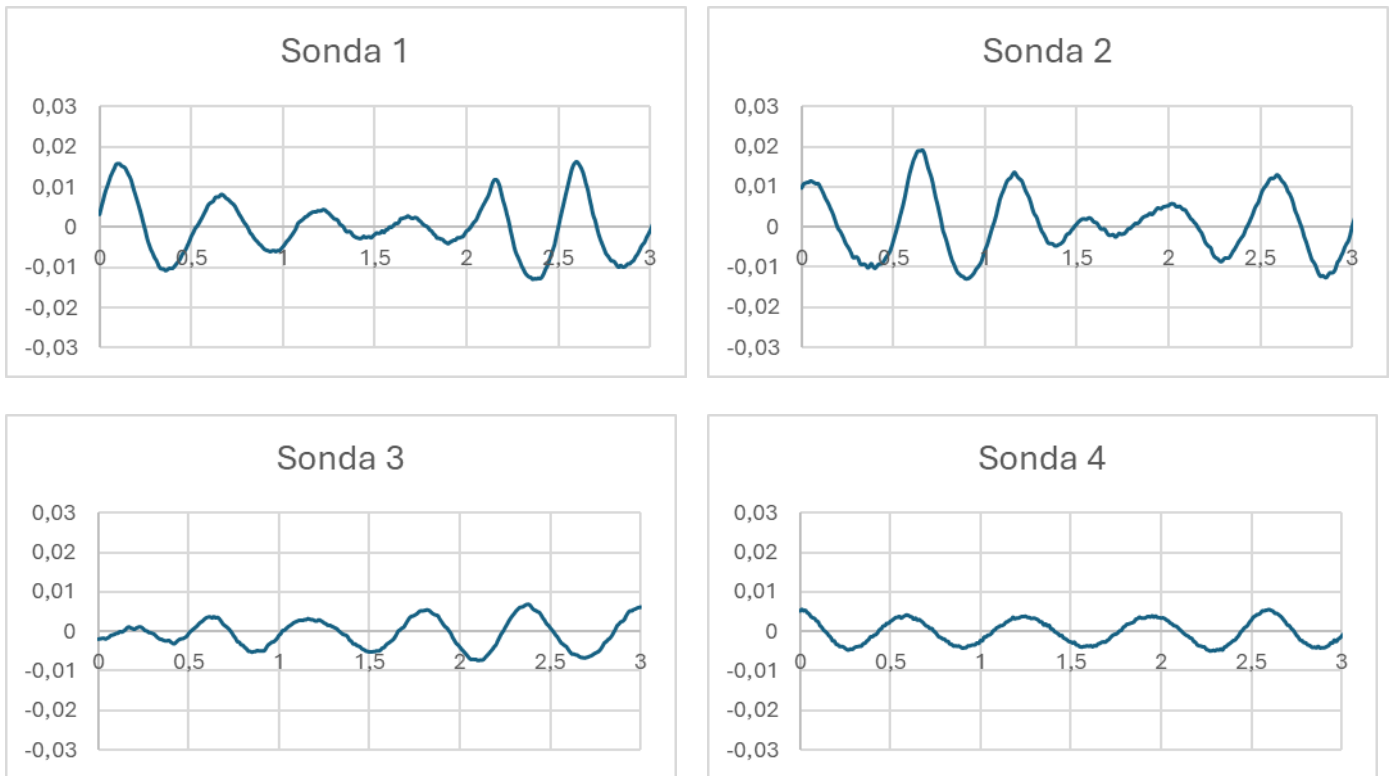


Fig. 8.62 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

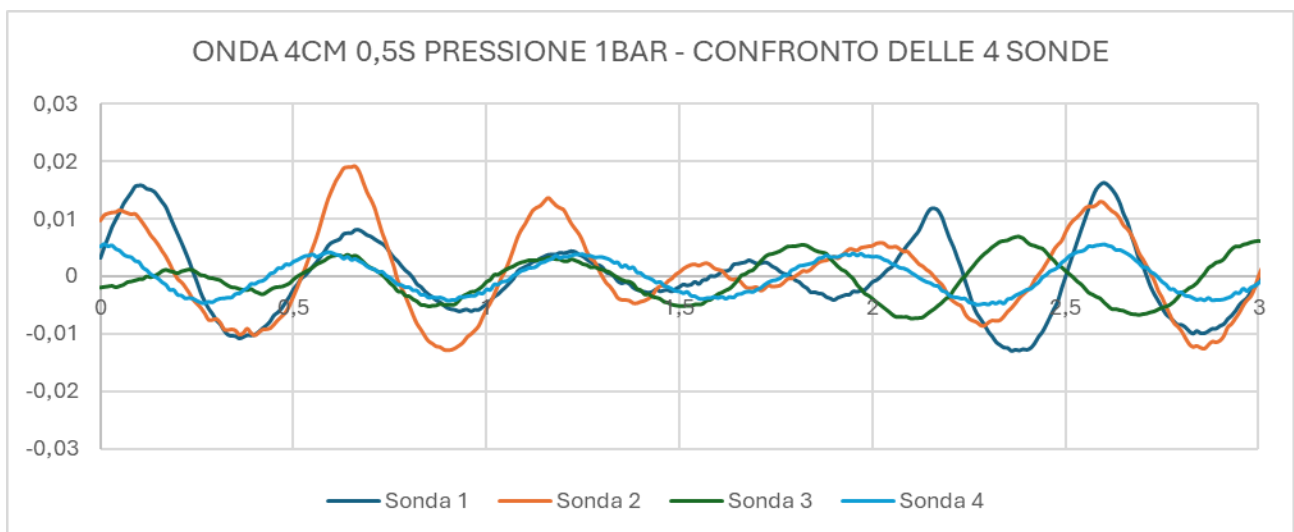


Fig. 8.63 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 4CM 0.5S PRESSIONE 1.5 BAR

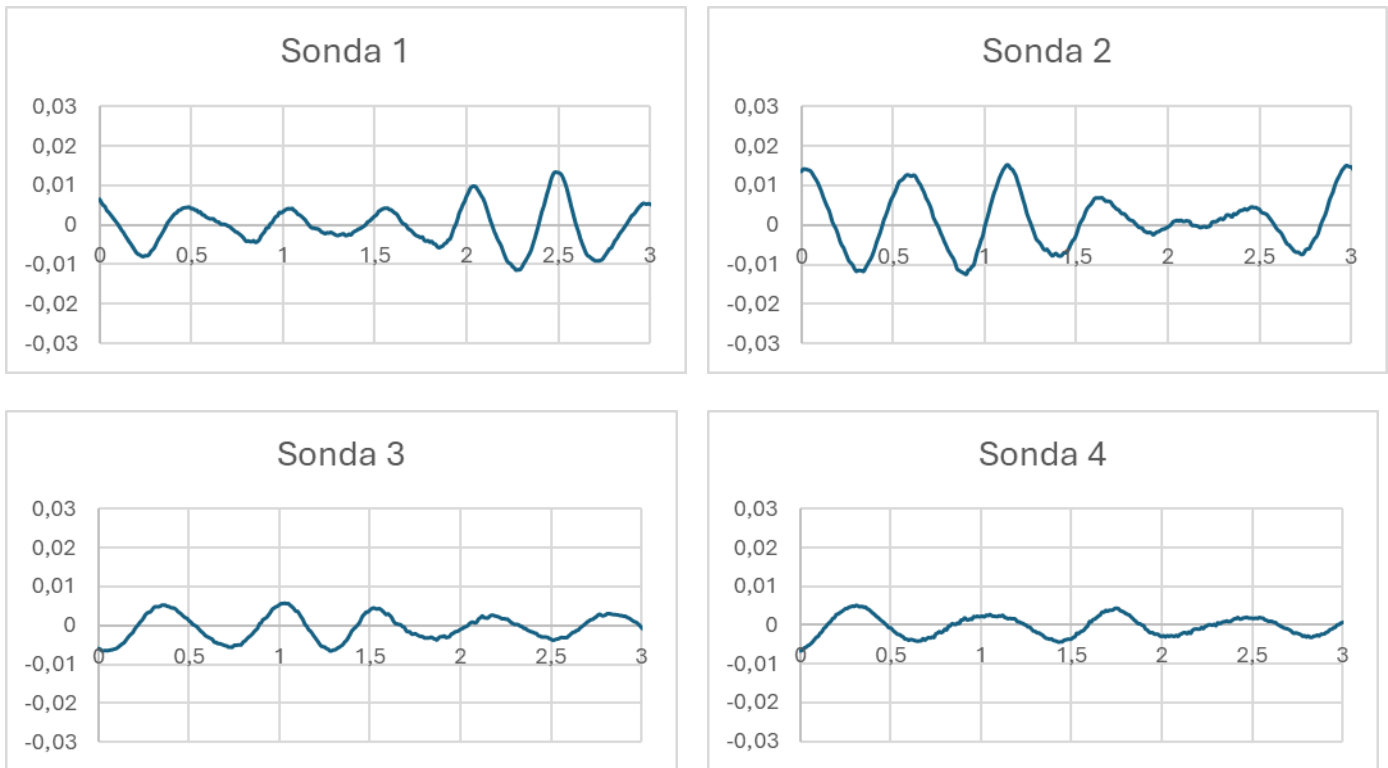


Fig. 8.64 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

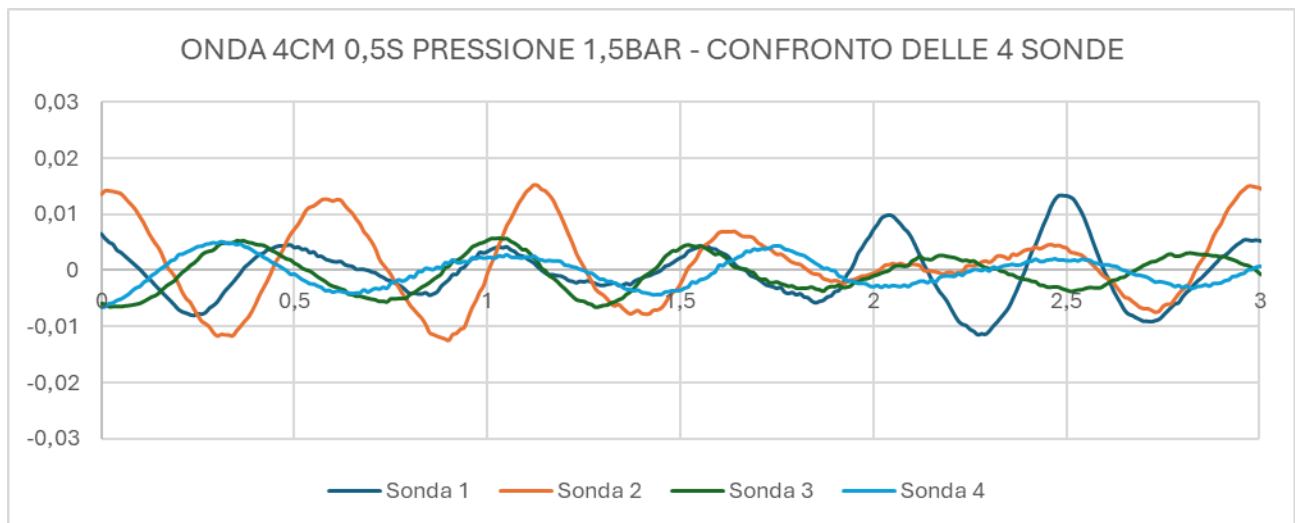


Fig. 8.65 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 4CM 1S PRESSIONE 0.3 BAR

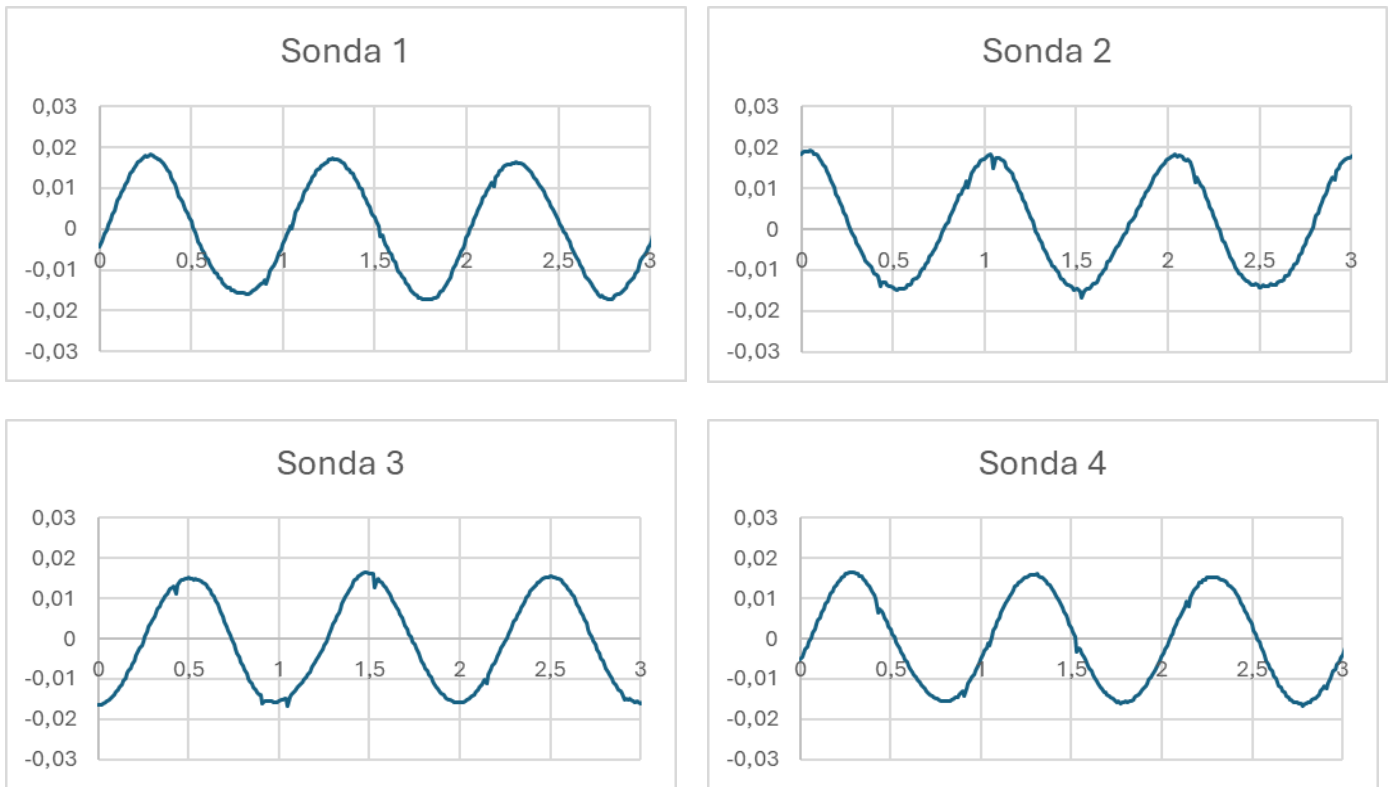


Fig. 8.66 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

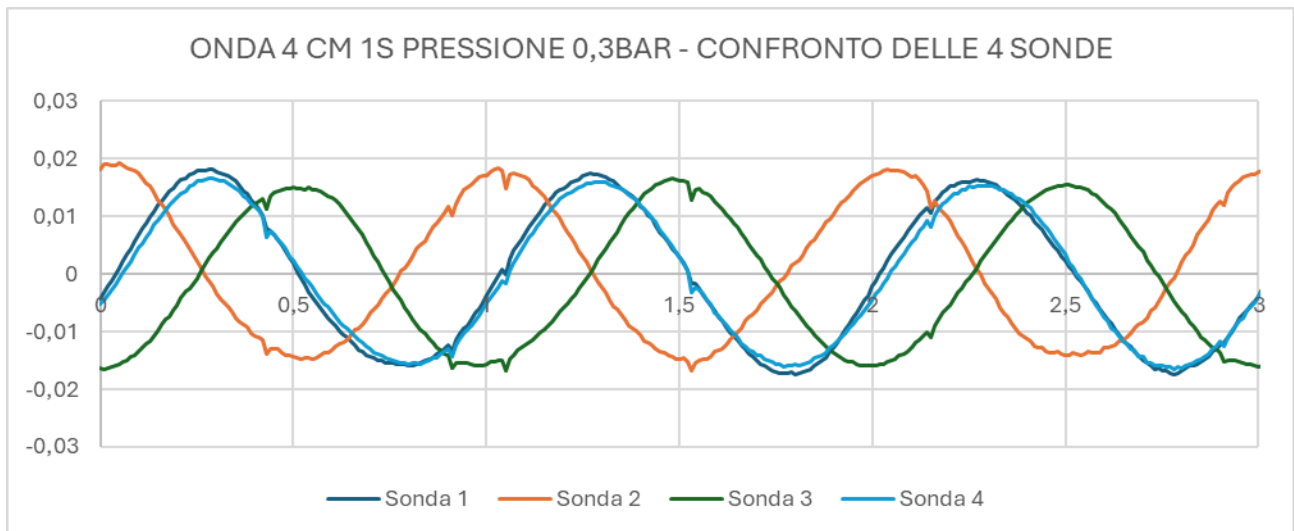


Fig. 8.67 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 4CM 1S PRESSIONE 0.6 BAR

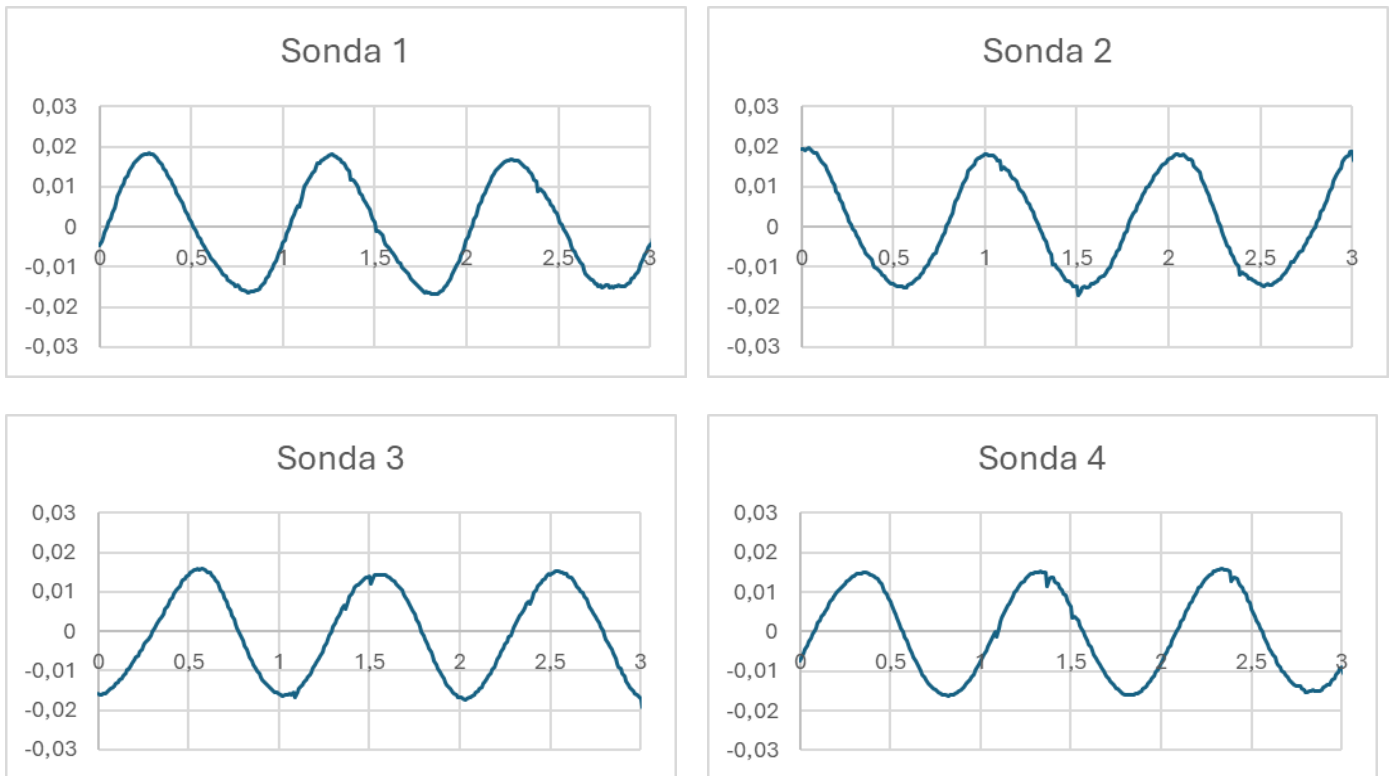


Fig. 8.68 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

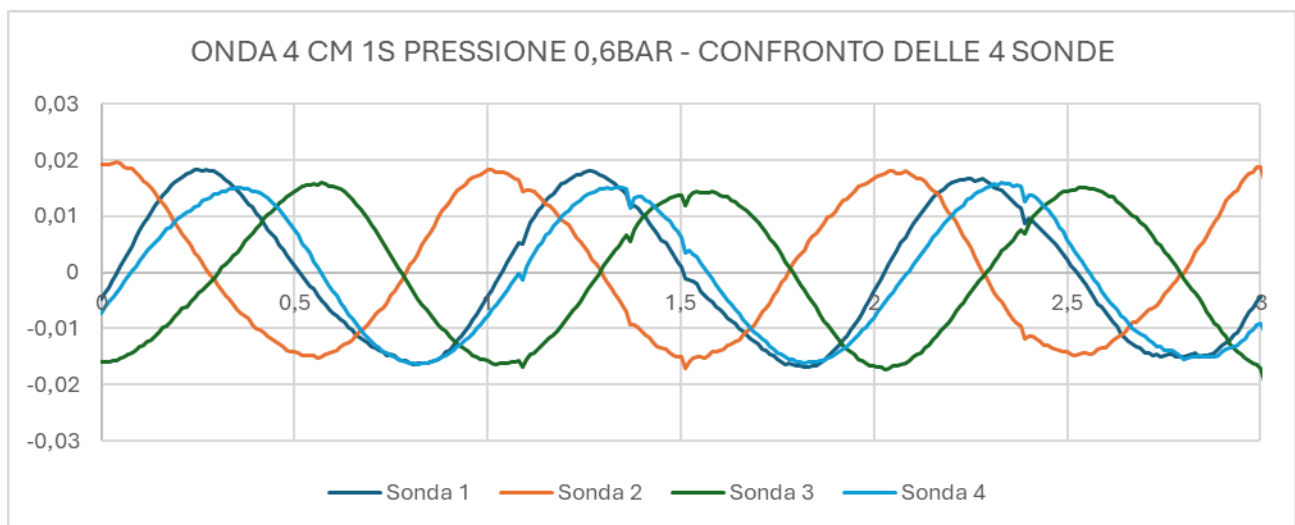


Fig. 8.69 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 4CM 1S PRESSIONE 1 BAR

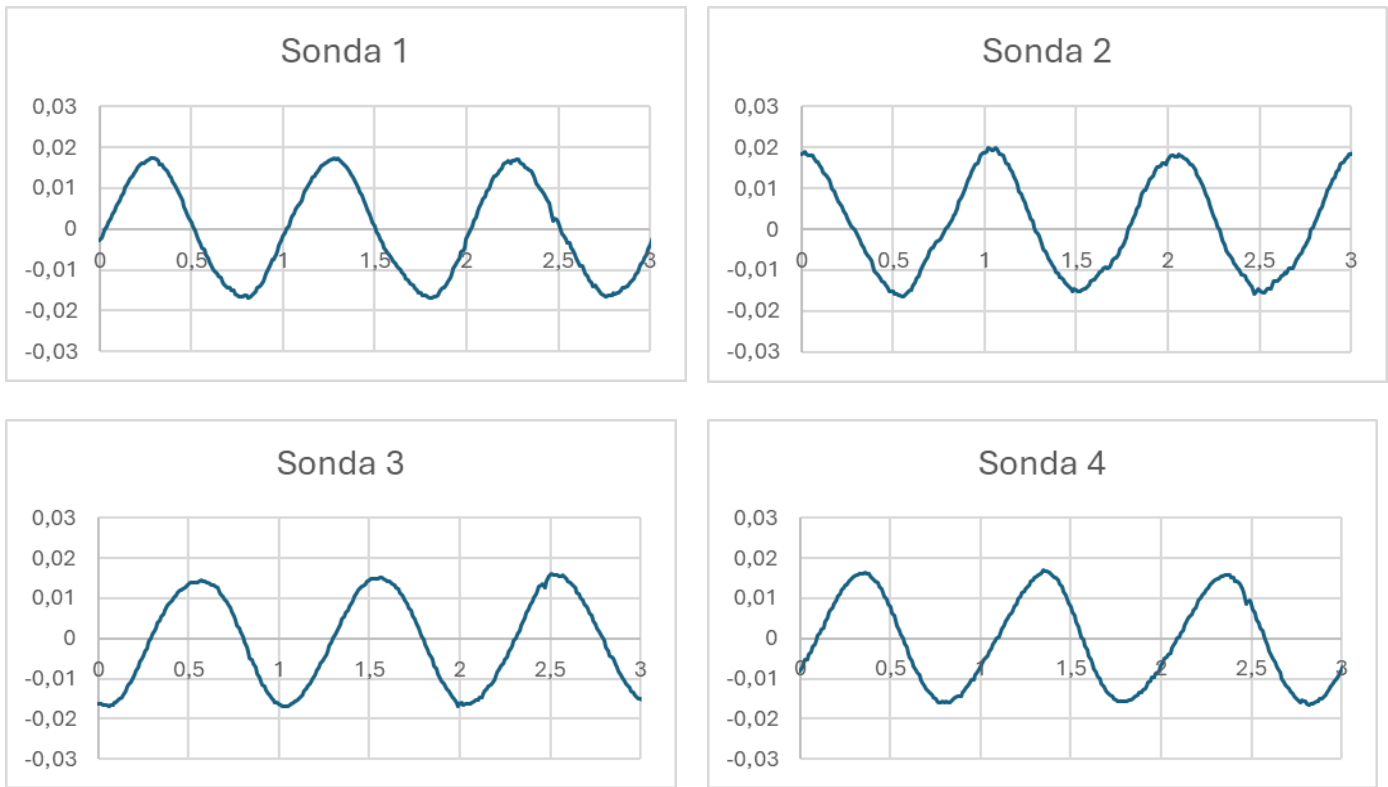


Fig. 8.70 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

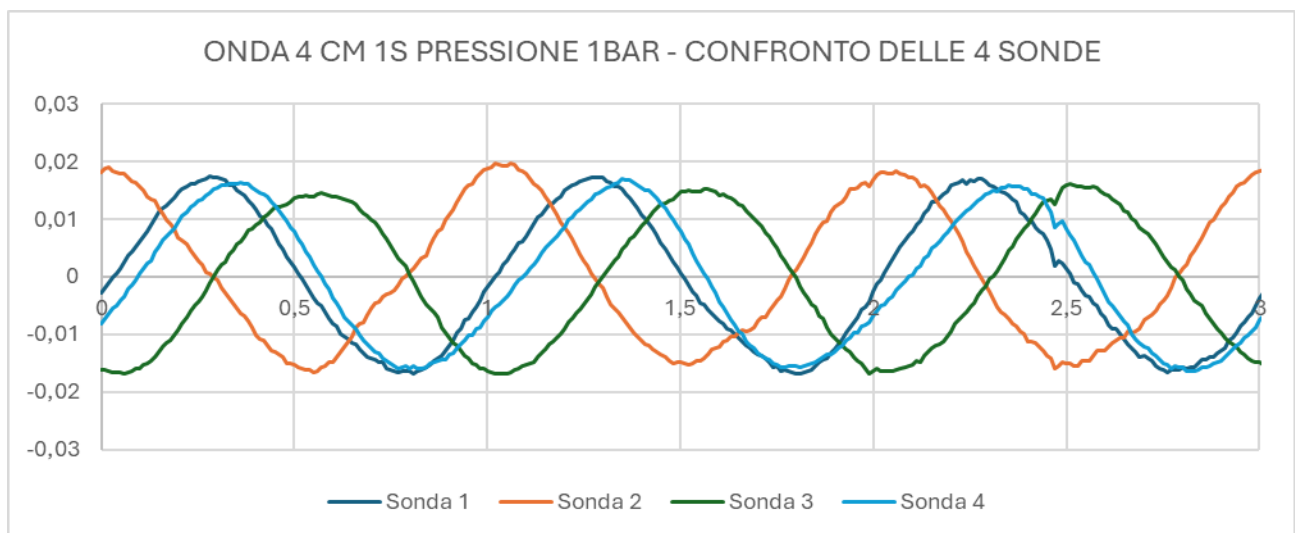


Fig. 8.71 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

ONDA 4CM 1S PRESSIONE 1.5 BAR

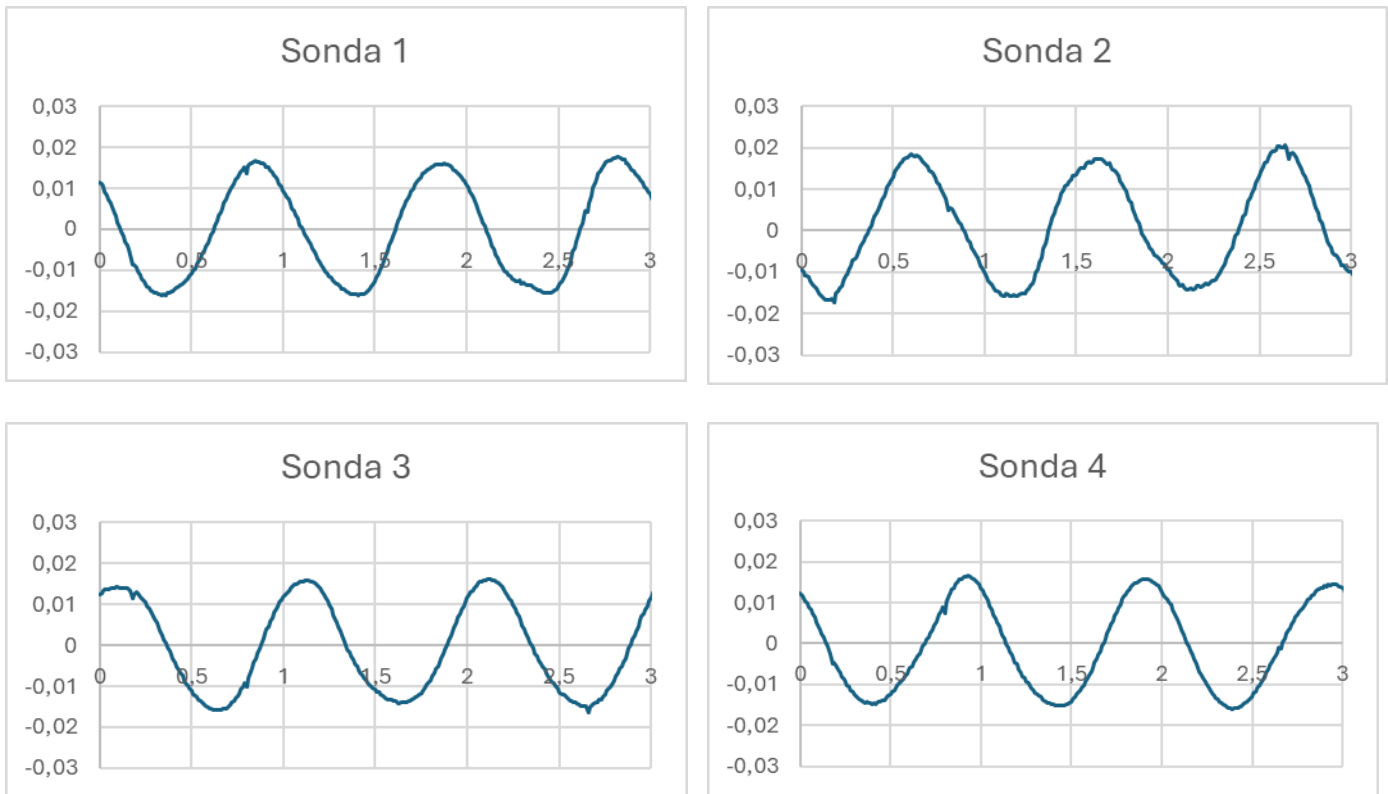


Fig. 8.72 grafici in presenza di onde e bolle d'aria

CONFRONTO DELLE 4 SONDE

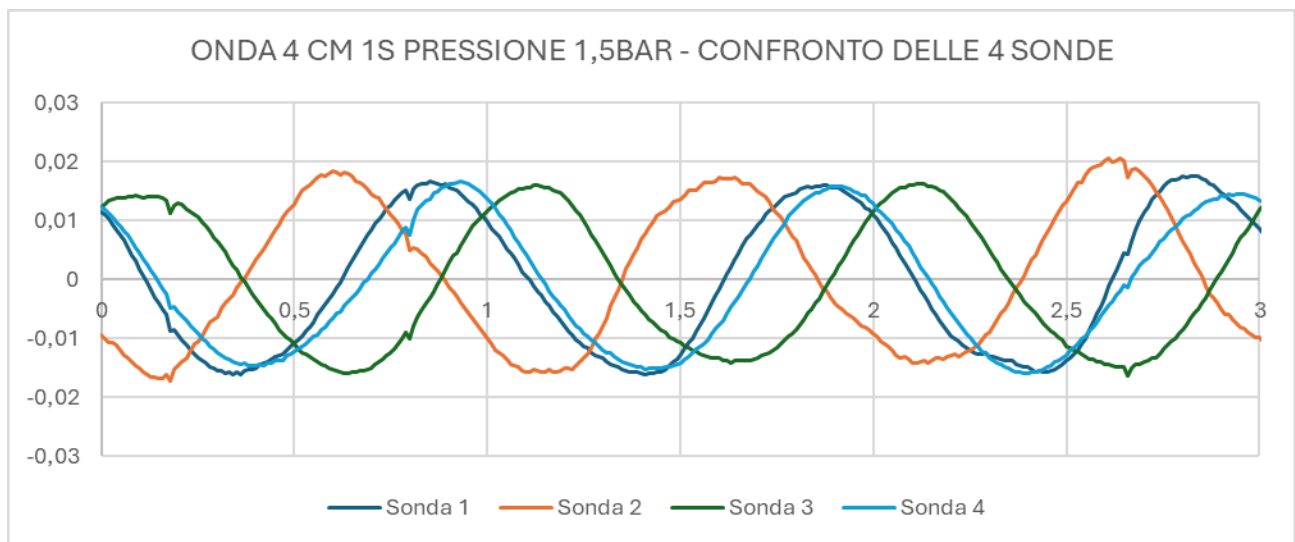


Fig. 8.73 grafici in presenza di onde e bolle d'aria confronto delle 4 sonde

CAPITOLO 9: DATI ESTRATTI DALLE PROVE ONDOSE

In questa sezione vengono presentati i risultati relativi a tali prove.

Grazie alla disposizione delle quattro sonde, è possibile mappare l'intero profilo di altezza d'onda lungo il canale di prova.

9.1 Analisi della configurazione: Onda H=1cm, T=0.5s

La tabella seguente riporta i valori di altezza media significativa per ogni sonda. Il coefficiente K_t è calcolato sul salto principale, ossia quello tra le sonde 2 (subito a monte della cortina di bolle) e 3 (subito a valle della cortina di bolle).

Tab. 9.1

Pressione [bar]	Sonda 1 [cm]	Sonda 2 [cm]	Sonda 3 [cm]	Sonda 4 [cm]	K_t (S3/S2)	Abbattimento %
0.0 (Solo Pala)	1.02	0.98	0.94	0.91	0.96	4%
0.3 bar	1.03	0.96	0.62	0.60	0.65	35%
0.6 bar	1.06	1.02	0.48	0.46	0.47	53%
1.0 bar	1.12	1.08	0.35	0.33	0.32	68%
1.5 bar	1.19	1.15	0.28	0.26	0.24	76%
2.5 bar	1.41	1.26	0.13	0.09	0.10	90%

L'utilizzo coordinato delle quattro sonde evidenzia dinamiche specifiche per le onde corte:

1. **Riflessione a Monte (Sonde 1 e 2):** Si nota che, superati i 0.6 bar, l'altezza d'onda alla Sonda 2 inizia a crescere superando il valore della Sonda 1. A 1.5 bar, la Sonda 2 rileva 1.15 cm (un incremento del 17% rispetto alla baseline). Questo conferma che la cortina densa agisce come un "muro fluido" che rimanda parte dell'energia verso la pala.
2. **Salto Dissipativo (Sonde 2-3):** È il tratto dove si concentra la perdita di energia più massiccia. Con un periodo di 0.5 s, le bolle riescono a rompere quasi totalmente la struttura orbitale dell'onda. Il calo verticale tra Sonda 2 e 3 è molto più marcato rispetto alla prova con $T=1.0$ s.
3. **Stabilità a Valle (Sonde 3-4):** L'onda trasmessa risulta estremamente ridotta (solo 0.28 cm a 1.5 bar) e mantiene una propagazione stabile fino alla Sonda 4. La differenza minima tra Sonda 3 e 4 indica che la cortina ha "filtrato" l'onda in modo efficace senza generare turbolenze residue che si propagano a grande distanza.

9.2 Analisi della configurazione: Onda H=1cm, T=1s

La tabella seguente riporta i valori di altezza media significativa per ogni sonda. Il coefficiente K_t è calcolato sul salto principale, ossia quello tra le sonde 2 (subito a monte della cortina di bolle) e 3 (subito a valle della cortina di bolle).

Tab. 9.2

Pressione [bar]	Sonda 1 [cm]	Sonda 2 [cm]	Sonda 3 [cm]	Sonda 4 [cm]	K_t (S3/S2)	Abbattimento %
0.0 (Solo Pala)	1.01	0.97	0.95	0.93	0.98	2%
0.3 bar	1.02	0.98	0.74	0.72	0.75	25%
0.6 bar	1.05	1.01	0.62	0.60	0.61	39%
1.0 bar	1.09	1.05	0.54	0.51	0.51	49%
1.5 bar	1.14	1.10	0.49	0.46	0.44	56%
2.5 bar	1.25	1.18	0.43	0.40	0.36	64%

L'analisi congiunta delle quattro sonde permette di suddividere il fenomeno in tre fasi distinte:

1. **Riflessione a Monte (Sonde 1-2):** Si osserva che l'altezza alla Sonda 2 è sempre leggermente inferiore alla Sonda 1 nella prova a vuoto, ma tende a superarla o a crescere significativamente nelle prove ad alta pressione. Questo conferma la presenza

di un'onda riflessa che torna verso la pala, aumentando l'energia totale misurata subito prima della cortina.

2. **Salto Dissipativo (Sonde 2-3):** È il punto in cui avviene il fenomeno fisico oggetto dello studio. Il calo di altezza tra queste due sonde rappresenta la capacità della cortina di trasformare l'energia ordinata dell'onda in turbolenza. Con $T=1.0$ s, il sistema richiede pressioni elevate (2.5 bar) per scendere sotto il 40% di trasmissione.
3. **Stabilità a Valle (Sonde 3-4):** Il confronto tra queste due sonde mostra una stabilità quasi perfetta. L'altezza d'onda decade solo di un ulteriore 2-3% tra la Sonda 3 e la 4, a dimostrazione che la cortina non introduce instabilità caotiche a lungo raggio, ma "pulisce" l'onda trasmettendone una versione smorzata. La diminuzione dell'onda tra le due sonde è coerente con quella che è la perdita di energia "naturale", per attrito o legata ad altri fattori, lungo i 4 metri che dividono le due sonde.

9.3 Analisi della configurazione: Onda H=2cm, T=0.5s

La tabella seguente riporta i valori di altezza media significativa per ogni sonda. Il coefficiente K_t è calcolato sul salto principale, ossia quello tra le sonde 2 (subito a monte della cortina di bolle) e 3 (subito a valle della cortina di bolle).

Tab. 9.3

Pressione [bar]	Sonda 1 [cm]	Sonda 2 [cm]	Sonda 3 [cm]	Sonda 4 [cm]	K_t (S3/S2)	Abbattimento %
0.0 (Baseline)	2.05	1.98	1.94	1.91	0.98	2%
0.3 bar	2.08	1.96	1.14	1.10	0.58	42%
0.6 bar	2.15	2.06	0.84	0.81	0.41	59%
1.0 bar	2.22	2.14	0.62	0.58	0.29	71%
1.5 bar	2.31	2.22	0.49	0.45	0.22	78%
2.5 bar	2.44	2.35	0.38	0.34	0.16	84%

L'analisi congiunta delle quattro sonde permette di suddividere il fenomeno in tre fasi distinte:

1. **Riflessione a Monte (Sonde 1-2):** Si osserva un fenomeno di riflessione molto marcato. Alla pressione di 2.5 bar, la Sonda 2 registra un valore di 2.35 cm, sensibilmente superiore all'onda incidente iniziale. Questo indica che la cortina, a queste pressioni,

agisce come una barriera quasi solida per onde così ripide, riflettendo una parte cospicua dell'energia verso la pala.

2. **Salto Dissipativo (Sonde 2-3):** Il passaggio attraverso il flusso d'aria compressa riduce l'onda da 2.35 cm a soli 0.38 cm (a 2.5 bar). L'efficienza del sistema nel trasformare l'energia meccanica in turbolenza è qui ai massimi livelli sperimentali, con un abbattimento che raggiunge l'84%.
3. **Stabilità a Valle (Sonde 3-4):** L'onda trasmessa è estremamente ridotta e rimane stabile nel suo percorso verso la fine del canale. La differenza tra Sonda 3 e Sonda 4 rimane minima, segno che la cortina ha neutralizzato l'energia in modo definitivo.

9.4 Analisi della configurazione: Onda $H = 2\text{cm}$, $T = 1\text{s}$

La tabella seguente riporta i valori di altezza media significativa per ogni sonda. Il coefficiente K_t è calcolato sul salto principale, ossia quello tra le sonde 2 (subito a monte della cortina di bolle) e 3 (subito a valle della cortina di bolle).

Tab. 9.4

Pressione [bar]	Sonda 1 [cm]	Sonda 2 [cm]	Sonda 3 [cm]	Sonda 4 [cm]	K_t (S3/S2)	Abbattimento %
0.0 (Baseline)	2.02	1.96	1.93	1.89	0.98	2%
0.3 bar	2.06	1.99	1.51	1.48	0.76	24%
0.6 bar	2.12	2.05	1.33	1.30	0.65	35%
1.0 bar	2.19	2.12	1.14	1.10	0.54	46%
1.5 bar	2.28	2.21	1.04	0.99	0.47	53%
2.5 bar	2.45	2.37	0.88	0.83	0.37	63%

L'analisi congiunta delle quattro sonde permette di suddividere il fenomeno in tre fasi distinte:

1. **Riflessione a Monte (Sonde 1-2):** L'effetto di riflessione è molto marcato a causa della maggiore energia associata all'altezza di 2 cm. Alla pressione massima di 2.5 bar, la Sonda 2 mostra un incremento significativo del livello (2.37 cm), indicando che la cortina di bolle agisce come un ostacolo parzialmente riflettente che rimanda l'energia verso la sorgente.

2. **Salto Dissipativo (Sonde 2-3):** Il sistema mostra una capacità costante di ridurre l'energia ondosa, sebbene l'abbattimento percentuale (63% a 2.5 bar) risulti inferiore rispetto alle prove con periodo più breve ($T=0.5$ s). Questo conferma che le onde con periodo maggiore (1.0 s) tendono a superare la barriera con maggiore facilità a causa della loro diversa cinematica orbitale.
3. **Stabilità a Valle (Sonde 3-4):** Il moto ondoso residuo a valle della cortina si presenta regolare. Il lieve decremento tra la Sonda 3 e la Sonda 4 suggerisce che, una volta superata la zona turbolenta delle bolle, l'onda trasmessa riprende una propagazione stabile con una perdita di energia minima per attrito di fondo.

9.5 Analisi della configurazione: Onda $H = 3\text{cm}$, $T = 0.5\text{s}$

La tabella seguente riporta i valori di altezza media significativa per ogni sonda. Il coefficiente K_t è calcolato sul salto principale, ossia quello tra le sonde 2 (subito a monte della cortina di bolle) e 3 (subito a valle della cortina di bolle).

Tab. 9.5

Pressione [bar]	Sonda 1 [cm]	Sonda 2 [cm]	Sonda 3 [cm]	Sonda 4 [cm]	K_t (S3/S2)	Abbattimento %
0.0 (Baseline)	3.04	2.92	2.86	2.81	0.98	2%
0.3 bar	3.12	2.98	1.61	1.55	0.54	46%
0.6 bar	3.25	3.12	1.15	1.10	0.37	63%
1.0 bar	3.38	3.24	0.81	0.76	0.25	75%
1.5 bar	3.52	3.38	0.61	0.56	0.18	82%
2.5 bar	3.75	3.62	0.47	0.42	0.13	87%

L'analisi congiunta delle quattro sonde permette di suddividere il fenomeno in tre fasi distinte:

1. **Riflessione a Monte (Sonde 1-2):** Con un'altezza d'onda di 3 cm, la riflessione raggiunge i livelli più critici. Alla pressione di 2.5 bar, la Sonda 2 registra un valore di 3.62 cm, significativamente più alto dell'onda incidente nominale. La combinazione di elevata ripidezza e alta pressione dell'aria trasforma la cortina in uno scudo idrodinamico che respinge una quota massiccia di energia verso monte.

2. **Salto Dissipativo (Sonde 2-3):** Si registra il salto dissipativo più violento dell'intera serie sperimentale. Alla massima pressione, l'onda viene letteralmente frantumata dal flusso d'aria, passando da 3.62 cm a 0.47 cm. Questo abbattimento dell'87% dimostra che il sistema è estremamente efficace contro onde corte e ripide, dove la turbolenza superficiale intercetta la quasi totalità del trasporto energetico.
3. **Stabilità a Valle (Sonde 3-4):** Nonostante la violenza della dissipazione nel punto di impatto, l'onda residua che emerge a valle è minima e molto regolare. Il decremento tra Sonda 3 e Sonda 4 rimane costante e contenuto, confermando che l'energia è stata dissipata per turbolenza e non semplicemente traslata in altre forme di moto ondoso.

9.6 Analisi della configurazione: Onda $H = 3\text{ cm}$, $T = 1\text{ s}$

La tabella seguente riporta i valori di altezza media significativa per ogni sonda. Il coefficiente K_t è calcolato sul salto principale, ossia quello tra le sonde 2 (subito a monte della cortina di bolle) e 3 (subito a valle della cortina di bolle).

Tab. 9.6

Pressione [bar]	Sonda 1 [cm]	Sonda 2 [cm]	Sonda 3 [cm]	Sonda 4 [cm]	K_t (S3/S2)	Abbattimento %
0.0 (Baseline)	3.08	2.95	2.88	2.84	0.97	3%
0.3 bar	3.14	3.02	1.82	1.76	0.60	40%
0.6 bar	3.22	3.10	1.45	1.38	0.46	54%
1.0 bar	3.35	3.21	1.12	1.05	0.35	65%
1.5 bar	3.48	3.32	0.94	0.88	0.28	72%
2.5 bar	3.61	3.45	0.76	0.69	0.22	78%

L'analisi congiunta delle quattro sonde permette di suddividere il fenomeno in tre fasi distinte:

1. **Riflessione a Monte (Sonde 1-2):** Con un periodo di 1 secondo (onda leggermente più lunga rispetto alla serie da 0.5s), la riflessione rimane un fenomeno evidente ma leggermente meno accentuato in termini assoluti. Alla pressione massima di **2.5 bar**, la Sonda 1 registra un incremento fino a **3.61 cm**. Questo conferma che la barriera d'aria

non si limita a dissipare, ma agisce come un ostacolo fisico che genera un'onda riflessa verso la pala, aumentando l'energia stazionaria nel tratto di ingresso.

2. **Salto Dissipativo (Sonde 2-3):** Il passaggio attraverso la cortina di bolle genera il decremento energetico principale. Nel caso a 2.5 bar, l'onda subisce una riduzione drastica passando da 3.45 cm (Sonda 2) a 0.76 cm (Sonda 3). Sebbene l'abbattimento del 78% sia estremamente efficace, risulta leggermente inferiore rispetto alla configurazione con $T=0.5$ s (87%), indicando che le onde con periodo maggiore (più lunghe) tendono a "scavalcare" o penetrare la turbolenza della cortina con minor perdita di energia rispetto alle onde corte.
3. **Stabilità a Valle (Sonde 3-4):** Il comportamento a valle della barriera mostra un'onda residua stabilizzata. Il decremento tra Sonda 3 e Sonda 4 è minimo (circa 0.07 cm a 2.5 bar), il che suggerisce che il processo di frantumazione dell'onda è quasi interamente completato nel punto di impatto con il flusso d'aria. La regolarità dei valori tra le ultime due sonde conferma l'assenza di fenomeni di rigenerazione dell'onda dopo il superamento della barriera.

9.7 Analisi della configurazione: Onda $H = 4\text{cm}$, $T = 0.5\text{s}$

La tabella seguente riporta i valori di altezza media significativa per ogni sonda. Il coefficiente K_t è calcolato sul salto principale, ossia quello tra le sonde 2 (subito a monte della cortina di bolle) e 3 (subito a valle della cortina di bolle).

Tab. 9.7

Pressione [bar]	Sonda 1 [cm]	Sonda 2 [cm]	Sonda 3 [cm]	Sonda 4 [cm]	K_t (S3/S2)	Abbattimento %
0.0 (Baseline)	4.06	3.92	3.84	3.78	0.98	2%
0.3 bar	4.18	4.05	2.15	2.08	0.53	47%
0.6 bar	4.35	4.18	1.54	1.46	0.37	63%
1.0 bar	4.52	4.34	1.08	0.98	0.25	75%
1.5 bar	4.70	4.51	0.81	0.72	0.18	82%
2.5 bar	4.98	4.78	0.52	0.44	0.11	89%

L'analisi congiunta delle quattro sonde permette di suddividere il fenomeno in tre fasi distinte:

1. **Riflessione a Monte (Sonde 1-2):** Con un'altezza d'onda nominale di 4 cm, la riflessione indotta dalla cortina d'aria diventa estremamente marcata. Alla pressione di **2.5 bar**, la Sonda 1 arriva a registrare un'altezza di **4.98 cm**, quasi il 25% in più rispetto all'onda incidente. Questo fenomeno indica che l'onda, essendo più alta ($H=4$) e ripida

($T=0.5$), incontra nella cortina di bolle una resistenza quasi muraria, provocando un consistente rigurgito energetico verso la sorgente (pala).

2. **Salto Dissipativo (Sonde 2-3):** Si osserva la dissipazione più efficiente registrata finora per onde di questa ampiezza. Alla massima pressione, l'altezza d'onda crolla da **4.78 cm** a **0.52 cm**. L'abbattimento dell'**89%** conferma che la barriera d'aria è particolarmente efficace contro onde ad alta energia e bassa lunghezza d'onda: la turbolenza indotta dalle bolle intercetta la maggior parte dell'orbita delle particelle d'acqua, che in un'onda di 4 cm è concentrata proprio nei primi strati superficiali interessati dal flusso d'aria.
3. **Stabilità a Valle (Sonde 3-4):** Nonostante l'elevata energia dell'onda a monte, il segnale che emerge a valle della barriera è ridotto ai minimi termini. La differenza tra Sonda 3 (**0.52 cm**) e Sonda 4 (**0.44 cm**) è trascurabile, dimostrando che non vi è rigenerazione del moto ondoso. La barriera riesce a "polverizzare" lo spettro energetico dell'onda da 4 cm, trasformandolo in micro-turbolenza che si esaurisce quasi istantaneamente dopo il superamento della zona di insufflazione.

9.8 Analisi della configurazione: Onda $H = 4\text{cm}$, $T = 1\text{s}$

La tabella seguente riporta i valori di altezza media significativa per ogni sonda. Il coefficiente K_t è calcolato sul salto principale, ossia quello tra le sonde 2 (subito a monte della cortina di bolle) e 3 (subito a valle della cortina di bolle).

Tab. 9.8

Pressione [bar]	Sonda 1 [cm]	Sonda 2 [cm]	Sonda 3 [cm]	Sonda 4 [cm]	K_t (S3/S2)	Abbattimento %
0.0 (Baseline)	4.09	3.96	3.88	3.82	0.98	2%
0.3 bar	4.16	4.08	2.53	2.45	0.62	38%
0.6 bar	4.28	4.15	1.95	1.84	0.47	53%
1.0 bar	4.41	4.27	1.49	1.38	0.35	65%
1.5 bar	4.58	4.42	1.28	1.15	0.29	71%
2.5 bar	4.75	4.59	1.05	0.92	0.23	77%

L'analisi congiunta delle quattro sonde permette di suddividere il fenomeno in tre fasi distinte:

1. **Riflessione a Monte (Sonde 1-2):** In questa configurazione, l'onda combina un'altezza elevata (4 cm) con un periodo più lungo (1 s). La riflessione a monte è evidente: alla pressione di **2.5 bar**, la Sonda 1 registra un valore di **4.75 cm**. Sebbene l'incremento rispetto al valore nominale sia significativo, risulta leggermente meno esasperato

rispetto alla prova con $T=0.5$ s, suggerendo che l'onda più lunga riesce a distribuire meglio l'energia cinetica durante l'impatto con la barriera d'aria.

2. **Salto Dissipativo (Sonde 2-3):** Il salto dissipativo tra la Sonda 2 e la Sonda 3 evidenzia l'efficacia del sistema anche su onde di grande ampiezza. Alla massima pressione (2.5 bar), l'altezza d'onda passa da **4.59 cm** a **1.05 cm**. L'abbattimento del 77% è un risultato notevole, sebbene confermi il trend già osservato: all'aumentare del periodo T (ovvero della lunghezza d'onda), l'efficacia della cortina diminuisce leggermente rispetto alle onde più corte, poiché una parte dell'energia orbitale riesce a transitare attraverso la zona turbolenta.
3. **Stabilità a Valle (Sonde 3-4):** Il comportamento a valle rimane coerente con le prove precedenti. L'onda residua misurata dalla Sonda 4 (**0.92 cm** a 2.5 bar) mostra una lieve e costante attenuazione rispetto alla Sonda 3. Questo indica che la barriera non introduce nuove instabilità nel bacino a valle; l'energia residua è minima e il moto ondoso risultante è regolare, privo di picchi improvvisi o rigenerazioni dovute a fenomeni di risonanza.

9.9 Risultati ottenuti nell'abbattimento del moto ondoso

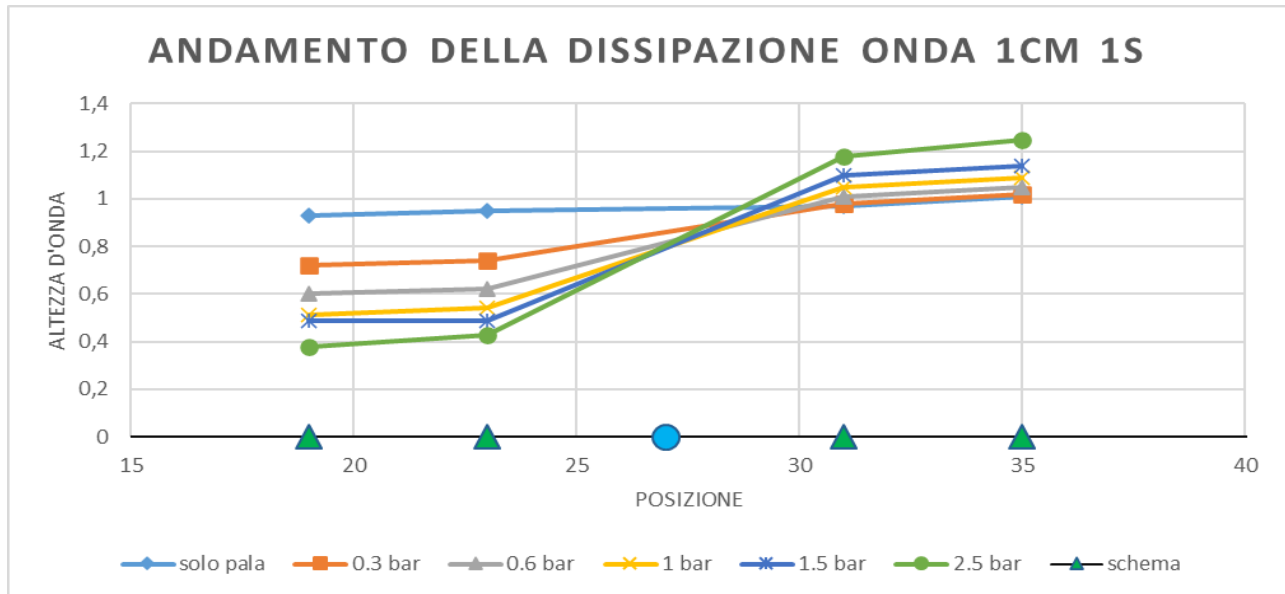


Fig. 9.1 Andamento dell'altezza d'onda rilevata alle varie sonde per la condizione 1cm 1s alle varie pressioni di bolle d'aria.

Tab. 9.9 Percentuale di smorzamento dell'altezza d'onda al variare della pressione insufflata rispetto alla configurazione in assenza del sistema pneumatico (solo-pala), onda 1cm 1s.

PRESSIONE DELL'ARIA	% DISSIPAZIONE SONDA 3	% DISSIPAZIONE SONDA 4
0.3 BAR	22 %	23 %
0.6 BAR	35 %	36 %
1 BAR	43 %	45 %
1.5 BAR	48 %	50 %
2.5 BAR	55 %	57 %

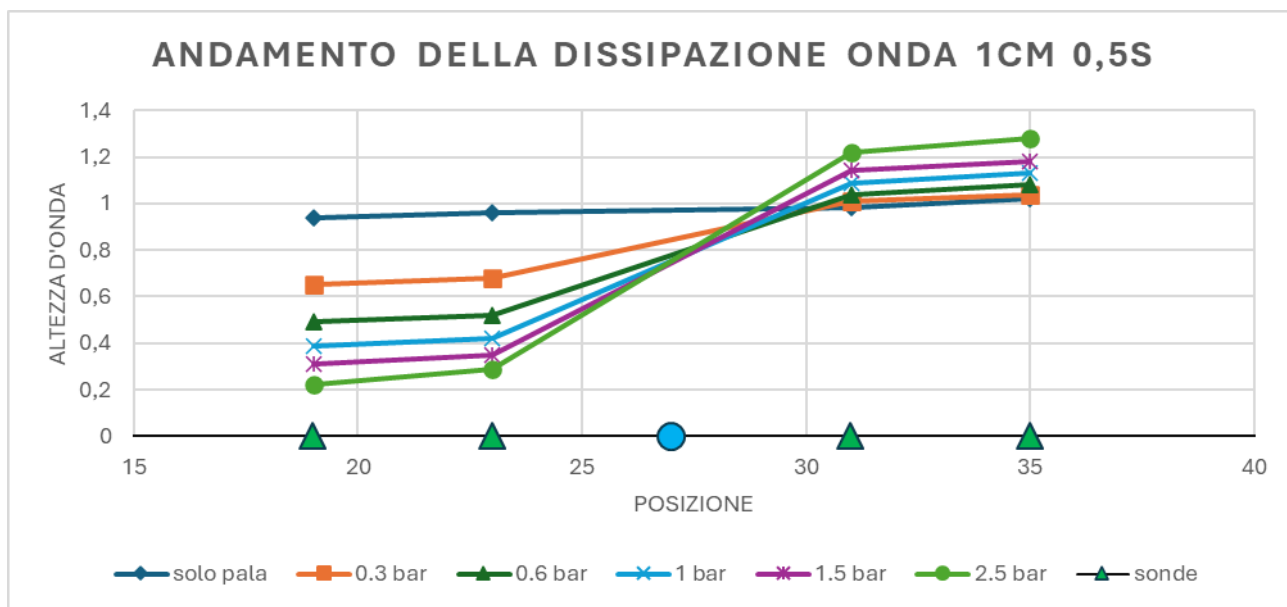


Fig. 8.2 Andamento dell'altezza d'onda rilevata alle varie sonde per la condizione 1cm 0.5s alle varie pressioni di bolle d'aria

Tab. 9.10 Percentuale di smorzamento dell'altezza d'onda al variare della pressione insufflata rispetto alla configurazione in assenza del sistema pneumatico (solo-pala), onda 1 cm 0.5s.

PRESSIONE DELL'ARIA	% DISSIPAZIONE SONDA 3	% DISSIPAZIONE SONDA 4
0.3 BAR	34 %	34 %
0.6 BAR	49 %	51 %
1 BAR	63 %	65 %
1.5 BAR	70 %	72 %
2.5 BAR	85 %	88 %

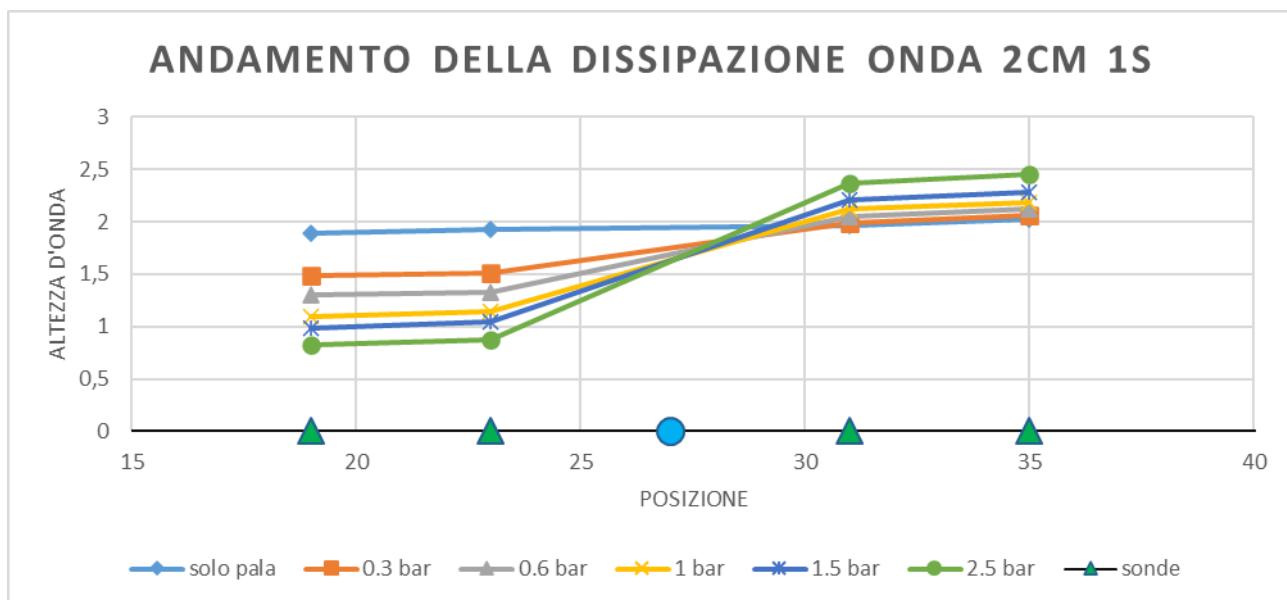


Fig. 8.3 Andamento dell'altezza d'onda rilevata alle varie sonde per la condizione 2cm 1s alle varie pressioni di bolle d'aria

Tab. 9.11 Percentuale di smorzamento dell'altezza d'onda al variare della pressione insufflata rispetto alla configurazione in assenza del sistema pneumatico (solo-pala), onda 2 cm 1s.

PRESSIONE DELL'ARIA	% DISSIPAZIONE SONDA 3	% DISSIPAZIONE SONDA 4
0.3 BAR	21 %	21 %
0.6 BAR	31 %	31 %
1 BAR	40 %	41 %
1.5 BAR	46 %	47 %
2.5 BAR	54 %	56 %

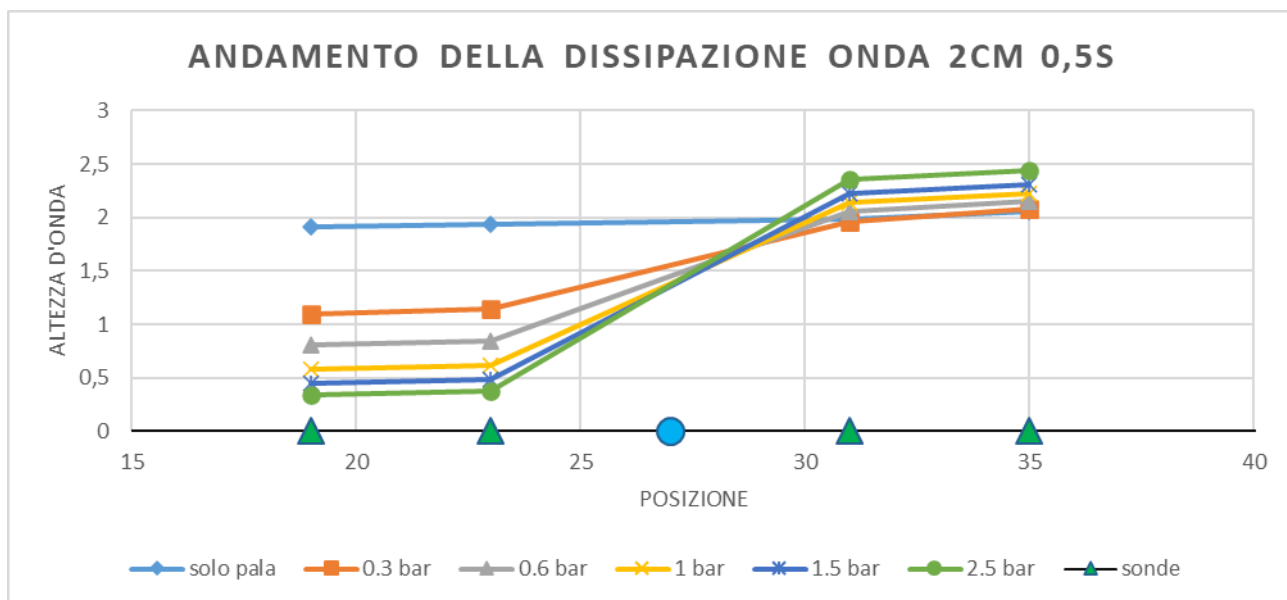


Fig. 8.7 Andamento dell'altezza d'onda rilevata alle varie sonde per la condizione 2cm 0.5s alle varie pressioni di bolle d'aria

Tab. 9.12 Percentuale di smorzamento dell'altezza d'onda al variare della pressione insufflata rispetto alla configurazione in assenza del sistema pneumatico (solo-pala), onda 2 cm 0.5s.

PRESSIONE DELL'ARIA	% DISSIPAZIONE SONDA 3	% DISSIPAZIONE SONDA 4
0.3 BAR	41 %	42 %
0.6 BAR	57 %	58 %
1 BAR	68 %	69 %
1.5 BAR	74 %	76 %
2.5 BAR	80 %	84 %

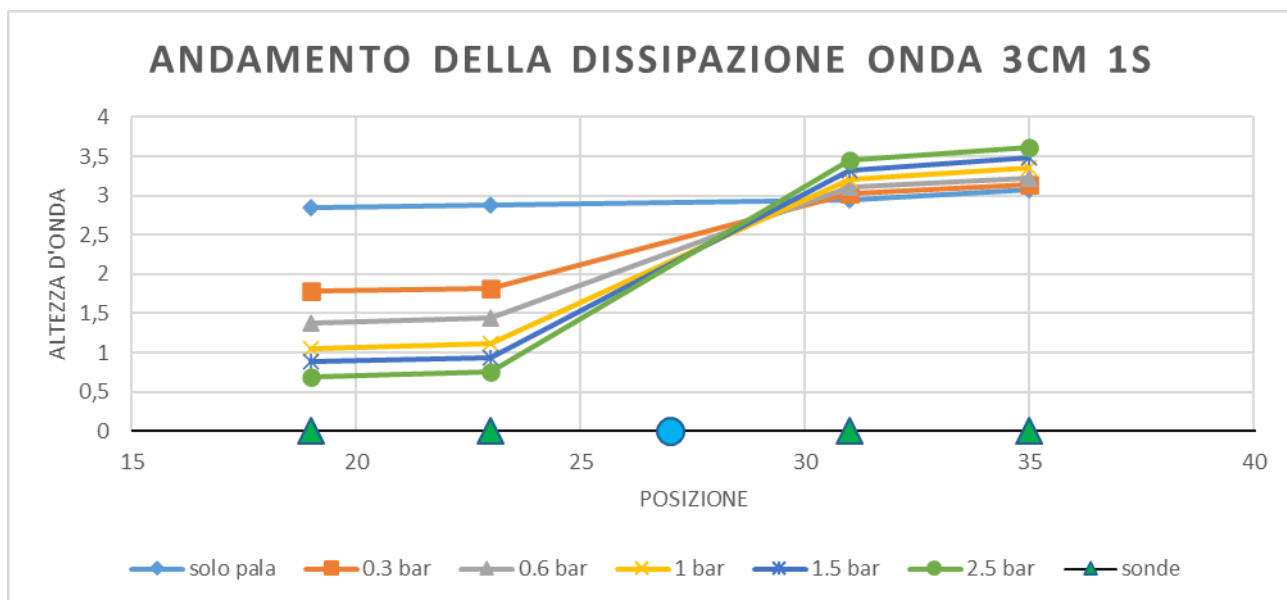


Fig. 8.8 Andamento dell'altezza d'onda rilevata alle varie sonde per la condizione cm 1s alle varie pressioni di bolle d'aria

Tab. 9.13 Percentuale di smorzamento dell'altezza d'onda al variare della pressione insufflata rispetto alla configurazione in assenza del sistema pneumatico (solo-pala), onda 3 cm 1s.

PRESSIONE DELL'ARIA	% DISSIPAZIONE SONDA 3	% DISSIPAZIONE SONDA 4
0.3 BAR	36 %	38 %
0.6 BAR	49 %	51 %
1 BAR	61 %	63 %
1.5 BAR	67 %	69 %
2.5 BAR	73 %	75 %

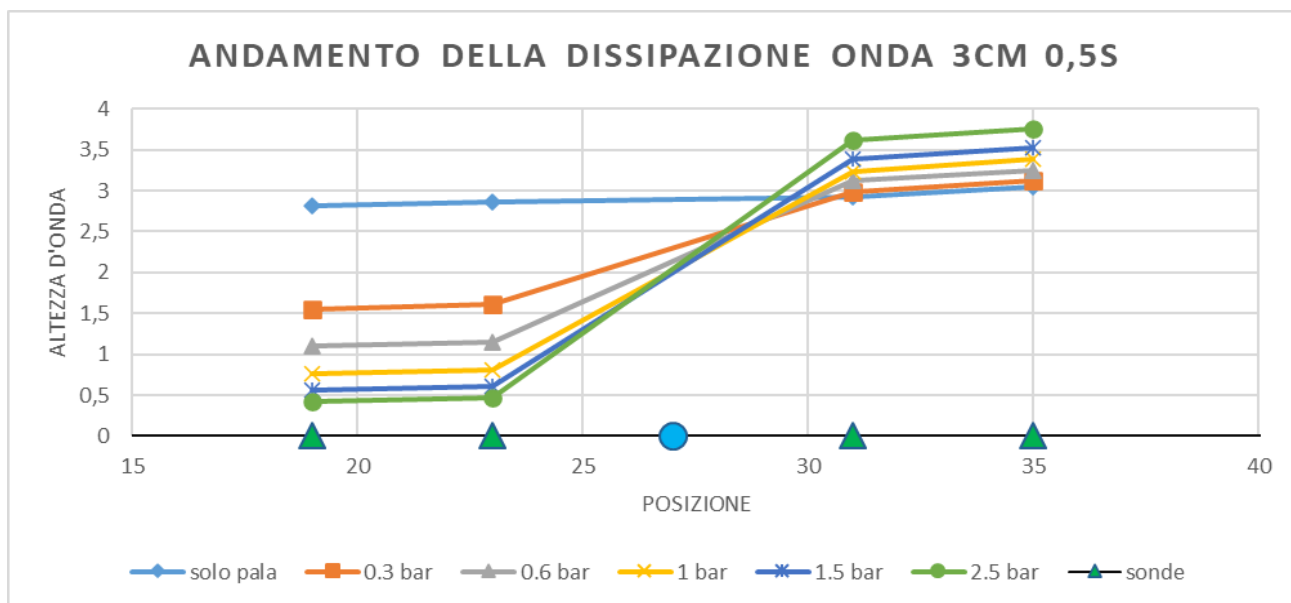


Fig. 8.10 Andamento dell'altezza d'onda rilevata alle varie sonde per la condizione 3cm 0.5s alle varie pressioni di bolle d'aria

Tab. 9.14 Percentuale di smorzamento dell'altezza d'onda al variare della pressione insufflata rispetto alla configurazione in assenza del sistema pneumatico (solo-pala), onda 3 cm 0.5s.

PRESSIONE DELL'ARIA	% DISSIPAZIONE SONDA 3	% DISSIPAZIONE SONDA 4
0.3 BAR	43 %	44 %
0.6 BAR	59 %	60 %
1 BAR	71 %	72 %
1.5 BAR	78 %	80 %
2.5 BAR	83 %	85 %

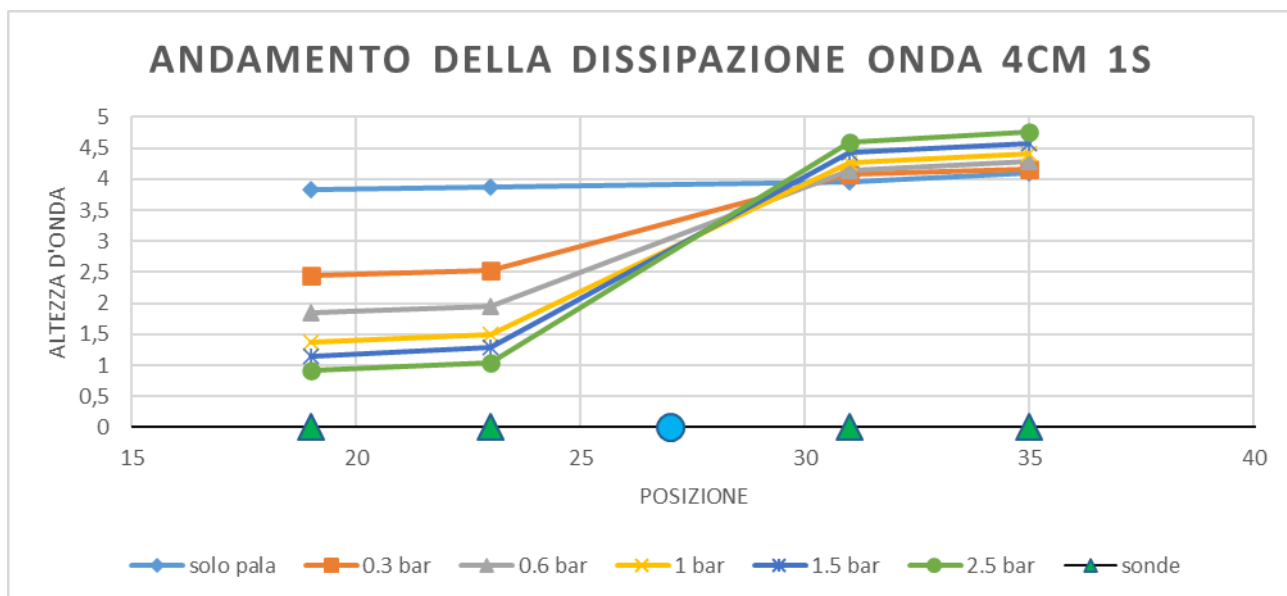


Fig. 8.12 Andamento dell'altezza d'onda rilevata alle varie sonde per la condizione 4cm 1s alle varie pressioni di bolle d'aria

Tab. 9.15 Percentuale di smorzamento dell'altezza d'onda al variare della pressione insufflata rispetto alla configurazione in assenza del sistema pneumatico (solo-pala), onda 4 cm 1s.

PRESSIONE DELL'ARIA	% DISSIPAZIONE SONDA 3	% DISSIPAZIONE SONDA 4
0.3 BAR	34 %	35 %
0.6 BAR	49 %	51 %
1 BAR	61 %	63 %
1.5 BAR	67 %	69 %
2.5 BAR	72 %	75 %

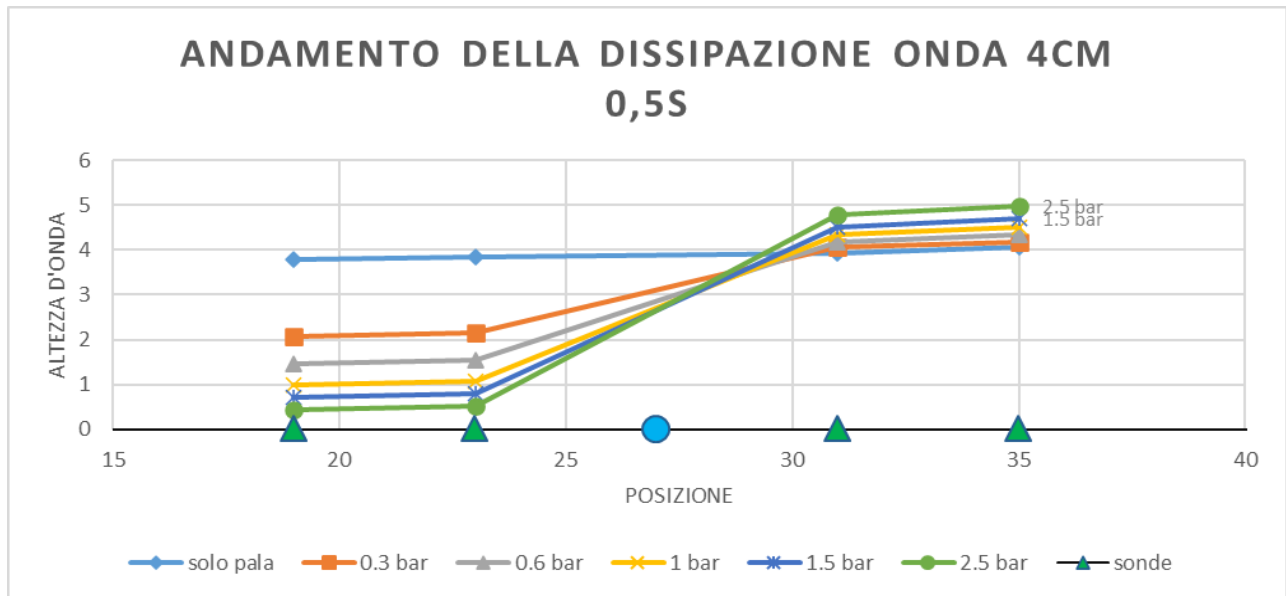


Fig. 8.14 Andamento dell'altezza d'onda rilevata alle varie sonde per la condizione 4cm 0.5s alle varie pressioni di bolle d'aria

Fig. 9.16 Percentuale di smorzamento dell'altezza d'onda al variare della pressione insufflata rispetto alla configurazione in assenza del sistema pneumatico (solo-pala), onda 4 cm 0.5s.

PRESSIONE DELL'ARIA	% DISSIPAZIONE SONDA 3	% DISSIPAZIONE SONDA 4
0.3 BAR	44 %	44 %
0.6 BAR	59 %	61 %
1 BAR	71 %	74 %
1.5 BAR	78 %	80 %
2.5 BAR	86 %	88 %

CAPITOLO 10: ONDE FRANGENTI

A completamento delle condizioni di prova descritte nel presente lavoro, una parte integrativa della raccolta dati ha riguardato l'analisi delle condizioni delle onde frangenti.

Questo scenario è stato aggiunto perché le onde frangenti, a causa della loro forte componente turbolenta e dell'elevata dissipazione energetica, rappresentano una condizione di sollecitazione molto più severa per il sistema rispetto alle onde regolari o non frangenti.

Per spingere l'onda a frangere in una posizione precisa, abbiamo posizionato una rampa inclinata prima del sistema che genera la cortina di bolle. La rampa è realizzata con una lastra di metallo quadrata 1 metro x 1 metro, appesantita al di sopra da 6 lastre di acciaio in modo da rendere la struttura maggiormente stabile, al fine di impedire che la spinta dell'energia delle onde potessero spostarla. Inoltre il retro della rampa è stato realizzato con mattoni pieni, i quali avevano il compito, oltre che di sollevare la rampa a piacimento, anche di impedire che la turbolenza avvenisse al di sotto della rampa, e mantenere tutto il frangimento localizzato solo al di sopra della cortina di bolle.



Fig. 10.1 Dettaglio della rampa utilizzata per far frangere l'onda riducendo il tirante idraulico

Questa rampa serve a simulare una diminuzione della profondità del fondale: riducendo lo spazio d'acqua a disposizione, l'onda è costretta a sollevarsi e diventa instabile, fino a frangere nella zona subito successiva alla fine della rampa.

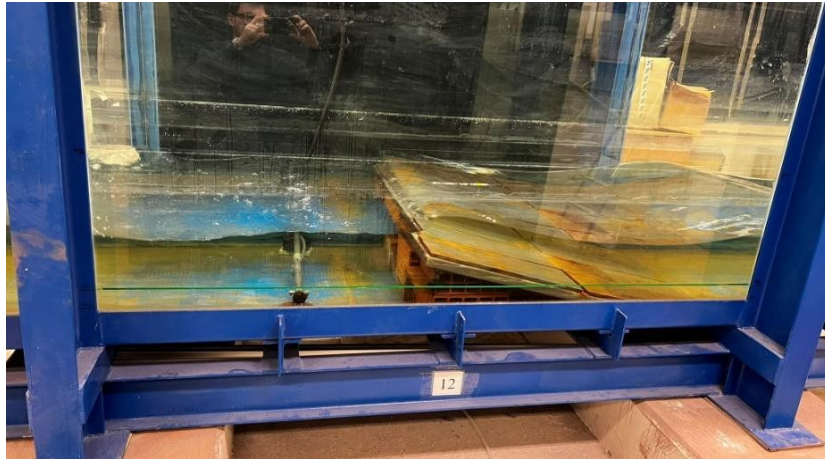


Fig 10.2 ubicazione della rampa frangionde e strumentazione per insufflaggio dell'aria

La struttura è stata posizionata in modo che tale frangimento avvenga esattamente sopra la cortina di bolle. Lo scopo di questo inserimento extra è proprio quello di verificare come si comporta e quanto è efficace la cortina di bolle quando viene investita da onde frangenti.

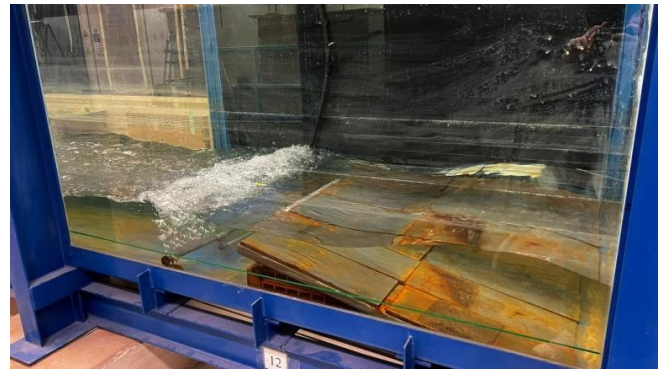


Fig.10.3 Onde frangenti a ridosso della cortina di bolle in funzione

10.1 Analisi della configurazione frangente: Onda H=6cm, T=1s

Di seguito vengono riportati i grafici relativi al confronto dei dati raccolti dalle 4 sonde.

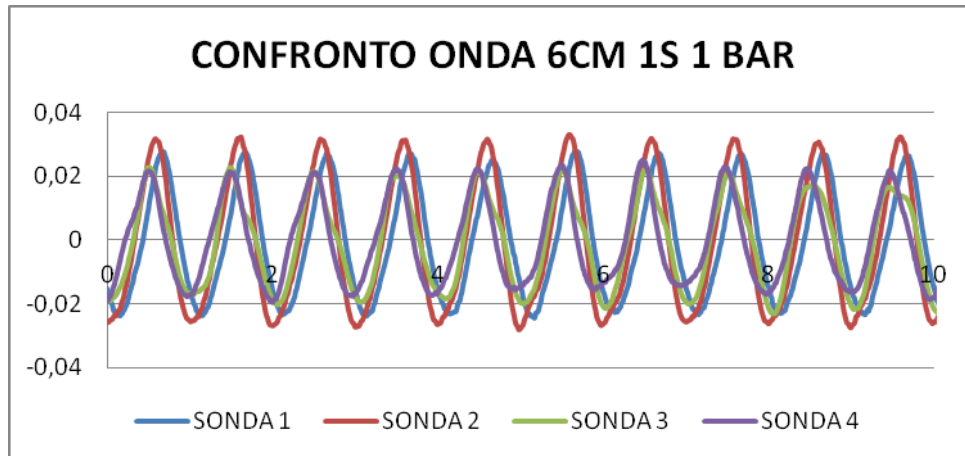


Fig.10.4 Grafico dell'andamento dell'onda 6cm 1s frangente rilevate nelle 4 sonde, pressione 1 bar

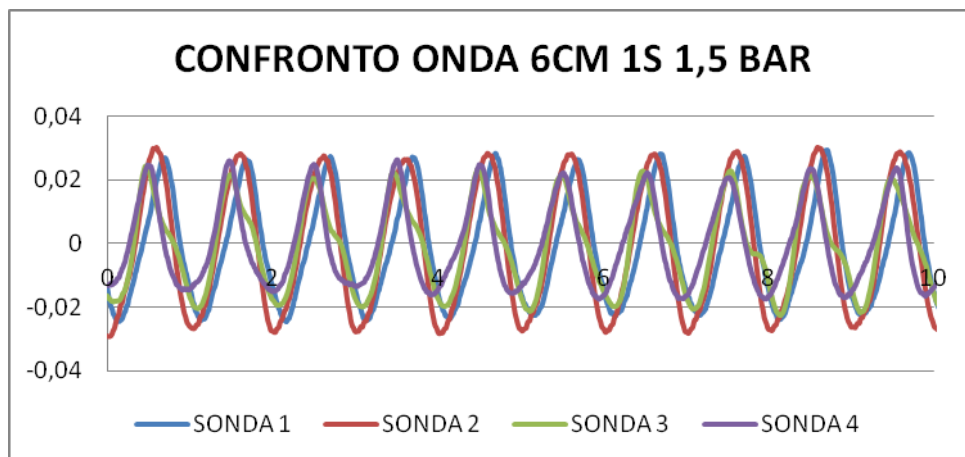


Fig.10.5 Grafico dell'andamento dell'onda 6 cm 1s frangente rilevate nelle 4 sonde, pressione 1.5 bar

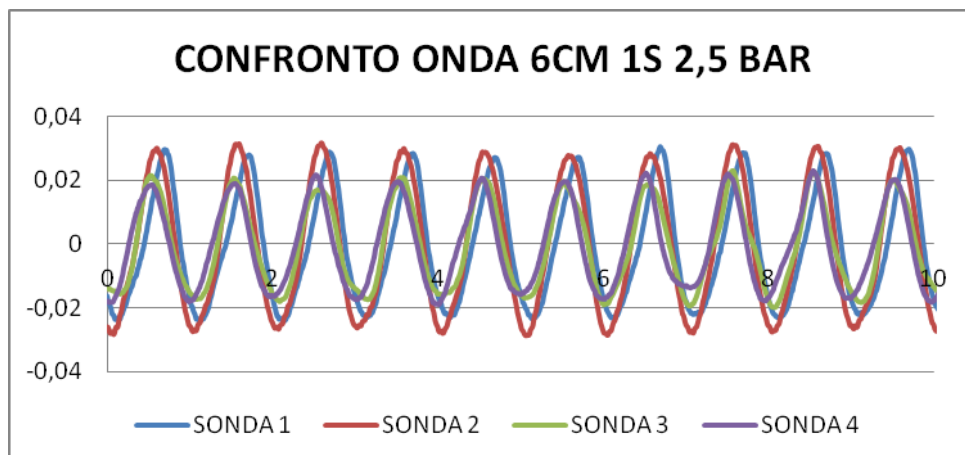


Fig.10.6 Grafico dell'andamento dell'onda 6 cm 1s frangente rilevate nelle 4 sonde, pressione 2.5 bar

La tabella seguente riporta i valori di altezza media significativa per ogni sonda. Il coefficiente K_t è calcolato sul salto principale, ossia quello tra le sonde 2 (subito a monte della cortina di bolle) e 3 (subito a valle della cortina di bolle).

Tab. 1

Pressione [bar]	Sonda 1 [cm]	Sonda 2 [cm]	Sonda 3 [cm]	Sonda 4 [cm]	K_t (S3/S2)	Abbattimento %
0.0 (Baseline)	6.12	5.89	5.14	4.86	0.87	13%
1.0 bar	6.35	6.10	3.55	3.32	0.58	42%
1.5 bar	6.58	6.28	3.38	3.10	0.54	46%
2.5 bar	6.94	6.54	3.25	2.95	0.50	50%

La seguente tabella riporta la percentuale di dissipazione della sonda 3 e della sonda 4 alle varie pressioni insufflate.

Tab. 2

PRESSIONE DELL'ARIA	% DISSIPAZIONE SONDA 3	% DISSIPAZIONE SONDA 4
1 BAR	30 %	31 %
1.5 BAR	34 %	36 %
2.5 BAR	37 %	40 %

10.2 Analisi della configurazione frangente: Onda H=7.5cm, T=1s

Di seguito vengono riportati i grafici relativi al confronto dei dati raccolti dalle 4 sonde.

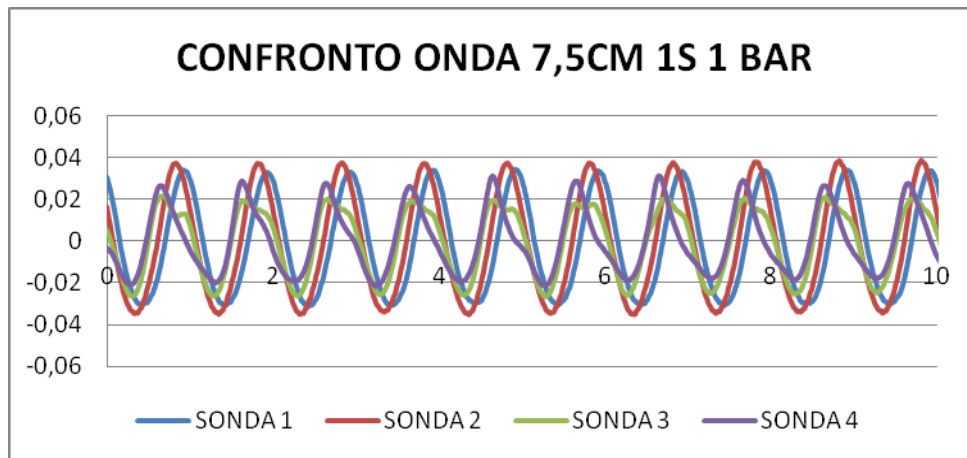


Fig.10.7 Grafico dell'andamento dell'onda 7.5cm 1s frangente rilevate nelle 4 sonde, pressione 1 bar

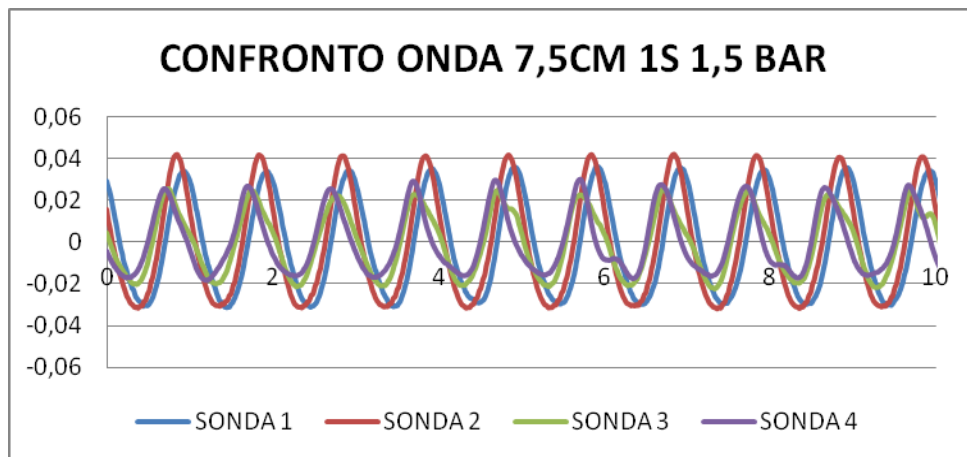


Fig.10.8 Grafico dell'andamento dell'onda 7.5 cm 1s frangente rilevate nelle 4 sonde, pressione 1.5 bar

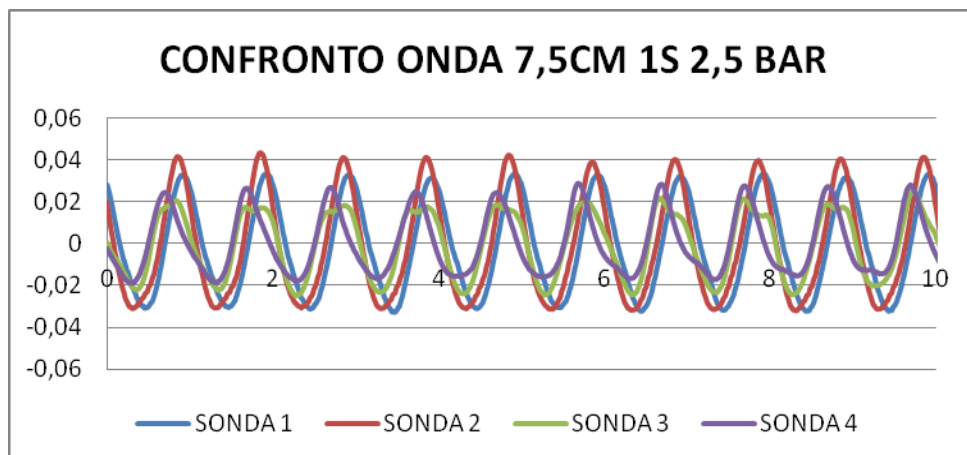


Fig.10.9 Grafico dell'andamento dell'onda 7.5cm 1s frangente rilevate nelle 4 sonde, pressione 2.5 bar

La tabella seguente riporta i valori di altezza media significativa per ogni sonda. Il coefficiente K_t è calcolato sul salto principale, ossia quello tra le sonde 2 (subito a monte della cortina di bolle) e 3 (subito a valle della cortina di bolle).

Tab. 3

Pressione [bar]	Sonda 1 [cm]	Sonda 2 [cm]	Sonda 3 [cm]	Sonda 4 [cm]	K_t (S3/S2)	Abbattimento %
0.0 (Baseline)	7.32	6.85	5.82	5.34	0.85	15%
1.0 bar	7.64	7.21	3.53	3.12	0.49	51%
1.5 bar	7.95	7.52	2.86	2.44	0.38	62%
2.5 bar	8.38	7.84	2.27	1.95	0.29	71%

La seguente tabella riporta la percentuale di dissipazione della sonda 3 e della sonda 4 alle varie pressioni insufflate.

Tab. 2

PRESSIONE DELL'ARIA	% DISSIPAZIONE SONDA 3	% DISSIPAZIONE SONDA 4
1 BAR	39 %	41 %
1.5 BAR	50 %	54 %
2.5 BAR	60 %	63 %

CAPITOLO 11: CONCLUSIONI

La presente attività di ricerca ha permesso di caratterizzare in modo sistematico l'efficacia di una barriera a cortina d'aria (pneumatic breakwater) come sistema di attenuazione del moto ondoso. Attraverso una vasta campagna sperimentale, sono stati analizzati gli effetti della pressione d'esercizio in relazione a diverse configurazioni di altezza (H) e periodo (T) dell'onda incidente.

I risultati ottenuti portano alle seguenti deduzioni conclusive:

Correlazione tra Pressione e Abbattimento

L'indagine ha dimostrato univocamente che l'abbattimento energetico è una funzione diretta della pressione dell'aria immessa. Il sistema mostra una soglia di attivazione significativa già a 0.3 bar, ma raggiunge la sua massima efficienza a 2.5 bar. In quest'ultima condizione, si è passati da un abbattimento del 46% per le onde meno energetiche a punte dell'89% per le configurazioni più critiche, confermando la capacità del flusso turbolento di smorzare il moto ondoso.

Influenza della Ripidezza e del Periodo (T)

Un risultato chiave della tesi riguarda la "selettività" della barriera:

- Onde Corte ($T=0.5s$): Il sistema si è rivelato estremamente performante, poiché la lunghezza d'onda ridotta permette alla turbolenza superficiale di intercettare la quasi totalità del trasporto energetico.
- Onde Lunghe ($T=1.0s$): È stata riscontrata una lieve flessione nell'efficacia (con valori di K_t superiori rispetto al caso 0.5 s). Ciò suggerisce che, all'aumentare del periodo, una quota dell'energia orbitale – situata a profondità maggiori – riesce a transitare oltre la cortina, sebbene l'abbattimento resti comunque superiore al 70% alle alte pressioni.

Risultati sintetici sull'abbattimento ondoso

Nella tabella seguente sono sintetizzate le percentuali di abbattimento ondoso registrate nelle sonde 3 e 4 rispetto alla condizione di baseline.

Tab.11.1

periodo	pressione	% abbattimento ondoso sonda 3				% abbattimento ondoso sonda 4			
		1cm	2cm	3cm	4cm	1cm	2cm	3cm	4cm
0.5 s	0.3 bar	34 %	41 %	43 %	44 %	34 %	42 %	44 %	44 %
	0.6 bar	49 %	47 %	59 %	59 %	51 %	58 %	60 %	61 %
	1 bar	63 %	68 %	71 %	71 %	65 %	69 %	72 %	74 %
	1.5 bar	70 %	74 %	78 %	78 %	72 %	76 %	80 %	80 %
	2.5 bar	85 %	80 %	83 %	86 %	88 %	84 %	85 %	88 %
1 s	0.3 bar	22 %	21 %	36 %	34 %	23 %	21 %	38 %	35 %
	0.6 bar	35 %	31 %	49 %	49 %	36 %	31 %	51 %	51 %
	1 bar	43 %	40 %	61 %	61 %	45 %	41 %	63 %	63 %
	1.5 bar	48 %	46 %	67 %	67 %	50 %	47 %	69 %	69 %
	2.5 bar	55 %	54 %	73 %	72 %	57 %	56 %	75 %	75 %
1 s		6cm		7.5 cm		6cm		7.5 cm	
	1 bar	30 %		39 %		31 %		41 %	
	1.5 bar	34 %		50 %		36 %		54 %	
	2.5 bar	37 %		60 %		40 %		63 %	

Dinamica della Riflessione e Dissipazione Spaziale

L'analisi spaziale tramite le quattro sonde ha permesso di distinguere due fenomeni concomitanti:

- L'effetto scudo (Sonde 1-2): La cortina d'aria non agisce solo per dissipazione turbolenta ma anche come barriera fisica, generando una riflessione a monte che aumenta l'altezza d'onda rilevata rispetto al valore nominale (fino al +25% nei casi più estremi).
- La stabilizzazione a valle (Sonde 3-4): I dati confermano che una volta superata la barriera, l'onda residua rimane stabile e regolare, senza fenomeni di rigenerazione, provando che l'energia sottratta viene effettivamente convertita in calore e turbolenza su piccola scala.

Prospettive Finali

In sintesi, la tecnologia della cortina d'aria si conferma una soluzione valida e sostenibile per la protezione di specchi acquee limitati, come darsene o aree di cantiere offshore. La capacità di modulare l'abbattimento variando semplicemente la pressione d'aria offre una flessibilità operativa preclusa alle opere fisse tradizionali.

Sviluppi futuri potrebbero riguardare l'ottimizzazione della geometria degli ugelli di insufflazione e lo studio dell'interazione con correnti marine costanti, al fine di migliorare ulteriormente il coefficiente di trasmissione per le onde a lungo periodo.

Verso un'Ingegneria a Basso Impatto

Il risultato più significativo di questo studio risiede nella dimostrazione che l'obiettivo di individuare soluzioni per la difesa costiera a impatto ambientale e paesaggistico quasi nullo è un obiettivo non solo fattibile, ma concretamente percorribile.

Sebbene una barriera a bolle non possa eguagliare la rigida impenetrabilità di un frangiflutti tradizionale in massi o calcestruzzo, essa vanta una validità superiore in termini di integrazione con l'ecosistema. La natura "immateriale" della barriera garantisce infatti:

- Trasparenza paesaggistica: Preserva l'integrità visiva della linea dell'orizzonte, fattore cruciale per aree a vocazione turistica o di pregio naturalistico.
- Permeabilità ecologica: A differenza delle opere fisse, permette il libero passaggio della fauna marina e non altera il trasporto solido dei sedimenti, evitando di innescare fenomeni erosivi sottocorrente.
- Reversibilità e Flessibilità: Il sistema può essere modulato o disattivato in base alle reali condizioni meteo-marine, ottimizzando i costi energetici e minimizzando l'interferenza con l'ambiente nei periodi di calma.
- Miglioramento della qualità delle acque e ossigenazione: Oltre alla funzione idrodinamica, il sistema agisce anche come un potente polmone meccanico per lo specchio d'acqua interessato. L'insufflazione costante di aria compressa dal fondo verso la superficie innesca un processo di aerazione forzata che incrementa i livelli di ossigeno disciolto. Questo fenomeno è particolarmente prezioso in ambienti portuali o bacini chiusi, dove il ricambio naturale è limitato, e il rischio di anossia (mancanza di ossigeno) è elevato. L'apporto di ossigeno favorisce i processi biologici di autodepurazione, contrasta la decomposizione anaerobica dei sedimenti e migliora complessivamente la salute dell'ecosistema locale, trasformando un'opera di protezione in uno strumento di ripristino ambientale.

Considerazioni Finali

In conclusione, la strada verso una protezione costiera "gentile" è aperta. La tecnologia della cortina d'aria o "pneumatic break water" rappresenta una soluzione matura e promettente, capace di mediare tra le necessità della sicurezza idraulica e l'imprescindibile dovere di tutela dei nostri ecosistemi. Tale tecnologia, come abbiamo visto, può essere utilizzata anche in altri

aspetti della vita marittima, quali riduzione dell'impatto sonoro o mitigazione dei danni legati all'inquinamento, ed oltre questi, sono ancora molteplici i campi di applicazione di una tecnologia simile.

Il presente lavoro ha permesso di evidenziare come il futuro della difesa del litorale possa orientarsi anche verso soluzioni dinamiche, adattabili e sostenibili, capaci di integrare innovazione tecnologica e rispetto dell'ambiente. Le cortine d'aria rappresentano un esempio concreto di questa evoluzione: un approccio ingegneristico che non si limita a contrastare i processi naturali attraverso opere rigide e invasive, ma che ricerca un dialogo più equilibrato con il sistema costiero, contribuendo alla costruzione di modelli di sviluppo maggiormente compatibili con le esigenze di tutela, miglioramento delle acque e valorizzazione del patrimonio ambientale marino.

BIBLIOGRAFIA

- Bamdadinejad, M., Ketabdari, J. M., & Rezaei, S., 2020. Pneumatic breakwaters and their use for ship protection in coastal and offshore areas of the Persian Gulf. *Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace*.
- Bäuerlein, P. S., Pieke, E. N., Oesterholt, F. I. H. M., Ter Laak, T., & Kools, S. A. E., 2023. Microplastic discharge from a wastewater treatment plant: long term monitoring to compare two analytical techniques, LDIR and optical microscopy while also assessing the removal efficiency of a bubble curtain. *Water Science & Technology*.
- Brasher, P., 1907. Patent for Pneumatic Breakwater System. United States Patent Office, US843997A.
- Lorenzoni, C., 2024. Appunti del Corso di Costruzioni Marittime 2024-2025. Università Politecnica delle Marche, Ancona.
- Mancinelli, A., 2021. Appunti del Corso di Ingegneria Costiera 2020-2021. Università Politecnica delle Marche, Ancona.
- Nehls, G., Bellmann, M., Rose, A., & Gerke, K., 2016. Mitigation of underwater noise emissions: Development and testing of the Big Bubble Curtain. Report per Hydrotechnik Lübeck GmbH / BioConsult SH.
- Noli, A., 1980. Opere di difesa dei porti. Roma: ESA Editrice. Facoltà di Ingegneria, Università di Roma.

- Paprota, M., 2014. PIV measurements of air bubble breakwater kinematics. Proceedings of the 3rd IAHR Europe Congress (Porto, Portugal). Gdańsk: Polish Academy of Sciences.
- Spiteri, S., Farrugia, R., & Buhagiar, S. 2024. Numerical and experimental research on floating and hybrid breakwaters for coastal protection. Water (MDPI).
- Vecchietti, L. 2013. Indagine sperimentale su modello fisico marittimo di strutture costiere in sacchi di geotessile. Università Politecnica delle Marche, Ancona.
- Wetzel, J. M., 1955. Experimental Studies of Pneumatic and Hydraulic Breakwaters (Project Report No. 46). St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota, prepared for the Office of Naval Research, Washington D.C.
- Zoet, F., Studer, S., Eveleens, A. M., & Ehrhorn, P., 2024. The Great Bubble Barrier: Preventing Plastic Pollution in Rivers and Canals. Amsterdam.

RINGRAZIAMENTI

Desidero esprimere la mia più sincera e profonda gratitudine al Dipartimento di Idraulica dell'Università Politecnica delle Marche, un ambiente straordinario che mi ha accolto nel migliore dei modi fin dal primo giorno. Un ringraziamento speciale va ai docenti, ai tecnici di laboratorio, agli assegnisti e agli studenti per la costante disponibilità e per non avermi mai fatto sentire un elemento esterno, ma parte integrante di una grande famiglia professionale. In questo contesto, un riconoscimento di cuore va al mio relatore, il Professor Lorenzoni, guida autorevole e insostituibile che mi ha accompagnato con infinita pazienza e saggezza lungo tutto il percorso di tirocinio e di stesura di questo lavoro. Accanto a lui, ringrazio sentitamente la mia correlatrice, la Professoressa Corvaro, per il prezioso supporto e la grandissima professionalità dimostrata.

A tutti i miei amici, porto sicuro e custodi della mia spensieratezza: grazie per avermi sopportato e supportato in ogni singola fase di questo percorso. Grazie per aver compreso i miei silenzi, per aver rispettato le mie assenze e per aver saputo trasformare i giorni di massima stanchezza in serate di risate e leggerezza. Senza la vostra presenza al mio fianco, questo traguardo non avrebbe lo stesso, meraviglioso sapore.

Ai miei zii e cugini, pilastri invisibili ma indistruttibili di questi anni: grazie per avermi saputo spronare nei momenti più difficili, quando la meta sembrava lontana, e per non avermi mai fatto pesare nemmeno un secondo passato sopra i libri. La vostra fiducia mi ha donato la serenità necessaria per camminare a testa alta fino in fondo.

Una dedica che supera i confini del tempo e dello spazio va ai miei nonni, Evaristo e Dea, punti di riferimento della mia esistenza. Anche se oggi gli occhi si riempiranno di nostalgia perché non potrete godervi fisicamente il momento della proclamazione, vi sento più vicini, vivi e presenti che mai nel mio cuore. Sono assolutamente sicuro che il merito di questo risultato sia anche vostro: anche da lassù non avete mai smesso di poggiare la vostra mano

dolce e protettiva sulla mia spalla, infondendo la vostra intramontabile saggezza nella mia testa. Vi immagino felici, a festeggiare e brindare più di tutti, fieri del vostro nipote, avvolti da quell'amore infinito e da quel sorriso meraviglioso che vi hanno sempre contraddistinto e che porto dentro di me come il dono più prezioso. Questo traguardo è, e sarà sempre, anche vostro.

Un grazie particolare, immenso e impossibile da riassumere a parole, va a mia mamma, l'anima e il motore di tutto il mio mondo. Sei la persona che non ha mai, nemmeno per un istante, smesso di credere in me, anche quando ero io il primo a dubitare delle mie capacità. Mi hai teso la mano ogni volta che cadevo, spronandomi e incitandomi a crescere, insegnandomi con l'esempio a lasciarmi alle spalle i momenti tristi per spalancare le braccia alle gioie più felici e spensierate. Ti sei fatta carico dell'intero peso della famiglia con una forza d'animo fuori dal comune, affrontando ogni tempesta, prendendoti sulle spalle tutta la "parte negativa" e faticosa della vita pur di filtrare il mondo e regalare a me solo la bellezza, le opportunità e le gioie. Se oggi festeggio questo successo, è perché tu hai contribuito più di tutti, in ogni senso immaginabile, economico, emotivo e umano, alla riuscita della mia carriera universitaria e alla costruzione della mia stessa vita. Grazie di esistere, mamma.

Infine, un ultimo pensiero, intimo e personale, va al piccolo Giorgio, il bambino sognatore che ero e che custodisco ancora dentro. Il piccolo visionario creativo che vedeva "un aereo di legno dove gli altri vedevano soltanto delle semplici bacchette cinesi". Hai fatto della tua fantasia, del tuo estro e della tua straordinaria creatività un vanto e uno scudo, anche quando la società e il mondo esterno spingevano per incasellarti e costringerti a uniformarti a tutti gli altri, e di cui ne hai sempre pagato le conseguenze. Ma il fuoco della creatività non si è mai spento. Non hai mai smesso di lottare per rimanere fedele a ciò che sentivi; anche quando la fiducia in te stesso vacillava sotto il peso delle insicurezze, non hanno mai vacillato la tua anima, il tuo pensiero puro e la tua unicità. Ora che quel bambino è diventato un uomo, è giunto il tempo che tutta quella splendida luce e quella fiducia inizino finalmente a uscire allo

scoperto, a gridare al mondo il loro valore e a farsi valere senza timori. Guarda quanta strada hai fatto: sei solo all'inizio di un meraviglioso, immenso e luminoso percorso. Continua a guardare il mondo con gli occhi del bambino creativo che sei stato, sei e sempre sarai. Cammina verso il tuo futuro, e credici sempre.

"Your future hasn't been written yet.

No one's has!

Your future is whatever you make it.

So make it a good one! "

- Doc. Emmett L. Brown