



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in ingegneria meccanica

**Estrazione di energia dal moto ondoso tramite WEC-RESEN: una
analisi numerica preliminare**

Wave energy extraction by WEC-RESEN: a preliminary numerical
analysis

Relatore:

Prof. Maurizio Brocchini

Tesi di Laurea di:

Eleonora Pantaleoni

Correlatore:

Prof. Gianluca Zitti

A.A.2019 / 2020

ABSTRACT

L'obiettivo di questa tesi è lo studio dei fenomeni di interazione tra un'onda marina e un dispositivo galleggiante di tipo WEC Resen, atto alla conversione di energia elettrica dal moto ondoso. Questo studio è stato effettuato confrontando i risultati di un modello non-lineare prodotti dalle simulazioni di fluidodinamica computazionale (CFD) con quanto ci si aspetta da un modello dinamico lineare, adattato al caso oggetto di studio. La dinamica oscillatoria di un modello fisico semplificato bidimensionale, forzato con un'onda, è stata riprodotta tramite simulazioni CFD, svolte per mezzo del software Ansys Fluent. Di fatto, è stata simulata l'interazione tra un'onda regolare e un corpo rettangolare, che rappresenta la struttura del dispositivo galleggiante WEC Resen, libero di muoversi in direzione verticale. In seguito è stata simulata anche l'interazione tra un'onda irregolare e lo stesso corpo di forma rettangolare. Da queste simulazioni sono stati ricavati lo spostamento in direzione verticale in funzione del tempo e la forza agente sul corpo galleggiante in direzione verticale in funzione del tempo. Questi risultati sono stati analizzati nel dominio delle frequenze, e confrontati con quanto previsto dal modello dinamico lineare. Dal confronto si evince che il modello lineare non costituisce una rappresentazione esatta dei fenomeni simulati, ma ne costituisce tuttavia una buona approssimazione.

ABSTRACT

This thesis focus on the study of the interaction between a sea wave and a floating device such as WEC Resen, used to convert energy from waves. This study consists in the comparison between the results of a non-linear model (given by computational fluid dynamics simulations) and what is expected from a linear dynamic model, adapted to the case under study. The oscillatory dynamics of a simplified two-dimensional physical model, forced with a wave, was reproduced by means of CFD simulations, with the Ansys Fluent software. The interaction between a regular wave and a rectangular body was simulated. This body represents the structure of the WEC Resen floating device, free to move in a vertical direction. Later, the interaction between an irregular wave and the same rectangular body was also simulated. From these simulations the shift in the vertical direction and the force acting on the floating body in the vertical direction, both as a function of time, have been obtained. These results were analyzed in the frequency domine, and compared with what is predicted by the linear dynamic model. The comparison shows that the linear model isn't an exact representation of the simulated phenomena, but it is a good approximation.

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	- 5 -
1.1 DISPOSITIVI WAVE-ENERGY-CONVERTER.....	- 6 -
1.1.1 Dispositivi a colonna d'acqua oscillante.....	- 7 -
1.1.2 Overtopping devices.....	- 11 -
1.1.3 Wave-activated-body.....	- 14 -
1.2 DISPOSITIVO WEC RESEN.....	- 20 -
2. TEORIE DELLE ONDE.....	- 24 -
2.1. Teoria lineare: teoria di Airy.....	- 26 -
2.1.1 Percorso delle particelle d'acqua e moto delle onde.....	- 28 -
2.2 Teoria del secondo ordine: teoria di Stokes.....	- 30 -
2.3 Spettro di JONSWAP.....	- 31 -
3. MODELLO DINAMICO LINEARE DEI WEC GALLEGGIANTI.....	- 34 -
4. MATERIALI E METODI.....	- 39 -
4.1 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC.....	- 39 -
4.1.1 Fisica del moto dei fluidi.....	- 39 -
4.1.2 Condizioni al contorno.....	- 43 -
4.1.3 Discretizzazione del modello.....	- 44 -
4.1.4 Metodo di discretizzazione ai volumi finiti.....	- 46 -
4.1.5 Convergenza.....	- 49 -
4.1.6 Meshing.....	- 49 -
4.1.7 Modello bifase: modello VOF.....	- 52 -
4.1.8 Modelli di turbolenza.....	- 53 -
4.2 ANSYS FLUENT SOFTWARE.....	- 55 -
4.3 METODO UTILIZZATO PER L'ANALISI IN FREQUENZA.....	- 57 -
4.3.1 Analisi armonica di Fourier.....	- 57 -
4.3.2 Analisi in frequenza secondo la trasformata di Fourier.....	- 58 -
5. SIMULAZIONI CFD.....	- 59 -
5.1 Modello dinamico lineare adattato al WEC Resen.....	- 59 -
5.2 Simulazione di un onda 2D.....	- 61 -
5.3 Simulazione di un onda 2D con corpo fisso.....	- 68 -
5.4 Simulazione di un onda regolare 2D con corpo libero di muoversi in direzione verticale ..	- 73 -
5.5 Simulazione di un onda irregolare 2D con corpo libero di muoversi in direzione verticale-	- 79 -

6. RISULTATI	- 82 -
6.1 Risultati simulazione di un'onda regolare 2D	- 82 -
6.2 Risultati simulazione dell'interazione tra un'onda regolare 2D e un corpo fisso	- 83 -
6.3 Risultati simulazione dell'interazione tra un'onda 2D e un corpo libero di muoversi in direzione verticale	- 85 -
6.3.1 Onda regolare	- 85 -
6.3.2 Onda irregolare.....	- 91 -
7. CONCLUSIONI.....	- 98 -
RIFERIMENTI	- 99 -
APPENDICE A	- 101 -
APPENDICE B	- 102 -

1. INTRODUZIONE

I Wave Energy Converter (WEC) sono dispositivi in grado di ricavare energia dal moto ondoso. In questa tesi si analizza l'interazione tra le onde del mare e la struttura del dispositivo WEC Resen. Il moto oscillatorio dei dispositivi WEC galleggianti viene spesso analizzato per mezzo di un modello dinamico lineare, basato sulla seconda legge di Newton, e parametrizzando le forzanti seguendo la teoria lineare delle onde. Un metodo per riprodurre le interazioni tra onda e struttura in modo non lineare è quello di utilizzare le simulazioni numeriche CFD. In questo studio il moto del dispositivo WEC Resen verrà riprodotto per mezzo di simulazioni numeriche CFD, svolte con il software di simulazione Ansys Fluent. In particolare, si simulerà l'interazione del dispositivo galleggiante sia con un'onda regolare, che con un'onda irregolare. In seguito si svolgerà un'analisi in frequenza delle forze agenti sul corpo galleggiante calcolate per mezzo delle simulazioni CFD. I risultati ottenuti da questa analisi verranno confrontati con quanto previsto dal modello dinamico lineare. L'obiettivo finale di questa tesi, infatti, è quello confrontare i risultati delle simulazioni numeriche CFD con il modello dinamico lineare. In particolare, si vuole osservare quanto il modello lineare si avvicini alla realtà e se ne rappresenti una approssimazione accettabile. Prima di entrare nel vivo di questo studio, si illustrano brevemente le varie tipologie esistenti di dispositivi WEC.

1.1 DISPOSITIVI WAVE-ENERGY-CONVERTER

I Wave-Energy-Converters (WEC) sono dispositivi capaci di generare energia elettrica utilizzando l'energia delle onde di mare. Un WEC è formato da tre parti fondamentali [12]:

1. Struttura: è la struttura fisica del dispositivo che comprende tutti i vari componenti che interagiscono con l'onda.
2. Fondamenta e ormeggi: comprende tutto ciò che viene utilizzato per fissare il dispositivo al fondale marino.
3. Power Take Off (PTO): è il sistema con cui l'energia meccanica estratta dalle onde viene convertita in energia elettrica. Esistono diversi tipi di PTO, tra cui ad azionamento meccanico, idraulico o elettrico.

Attualmente esiste un'ampia varietà di tecnologie di questo tipo. Una classificazione dei WEC è basata sul principio di funzionamento. Secondo questa classificazione, i WEC sono raggruppati in tre principali categorie [1]:

- Dispositivi a colonna d'acqua oscillante (OWCs),
- Overtopping devices (ODs),
- Wave-activated bodies (WAB). Questo gruppo comprende una vasta gamma di dispositivi, a loro volta classificati in “primarily vertical motion-based” (heave) e “primarily horizontal motion-based” (surge). Questi ultimi sono a loro volta suddivisi in bottom-fixed WEC e floating WEC. Per brevità della trattazione, con l'abbreviazione OWSC si intendono i primarily horizontal motion WEC, mentre con il termine heaving buoy si intendono i vertical motion WEC. Inoltre esistono anche numerosi dispositivi WAB che lavorano sfruttando il moto rotatorio e il moto di beccheggio (movimento oscillatorio intorno all'asse trasversale baricentrico). In questi ultimi dispositivi, per l'estrazione di energia, vengono sfruttati i movimenti di inclinazione relativi tra le sezioni incernierate [5].

Nei paragrafi successivi vengono analizzati i diversi principi di funzionamento delle varie tipologie di WEC.

1.1.1 Dispositivi a colonna d'acqua oscillante

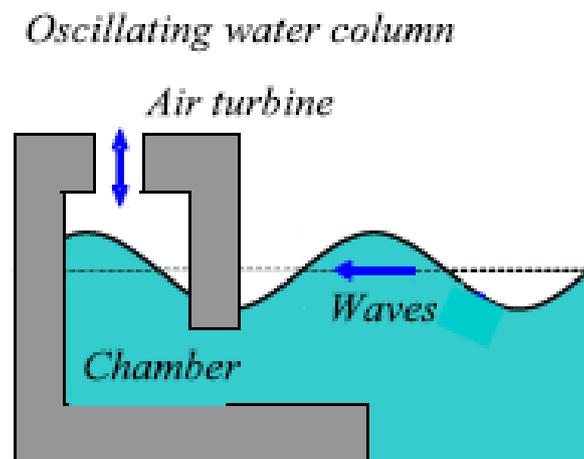


Fig.1.1 schema di un dispositivo a colonna d'acqua oscillante (Babarit, A. (2017). Ocean Wave Energy Conversion. Elsevier)

Questo tipo di dispositivo è costituito da una camera riempita parzialmente con acqua, che comunica con il mare aperto attraverso un'apertura posta al di sotto della superficie dell'acqua. Nella parte superiore è presente un'altra apertura, che garantisce la comunicazione con l'aria dell'ambiente esterno e su cui è posizionata una turbina ad aria. Quando le onde interagiscono con il dispositivo, attraverso l'apertura sottomarina, provocano un innalzamento del livello medio dell'acqua all'interno della camera. L'aria nella parte superiore della cavità viene quindi compressa e fuoriesce attraverso l'orifizio nella parte superiore. Quando l'onda si ritira, il livello medio dell'acqua nella camera diminuisce. Nella parte superiore della cavità si genera quindi una depressione e l'aria dell'esterno viene aspirata. La superficie libera interna alla camera si comporta come un pistone liquido. Nell'apertura superiore si ottiene un moto di aria alternato, che viene convertito in energia elettrica da una turbina ad aria [1].

Analogamente ai dispositivi di tipo overtopping, che verranno descritti nel dettaglio nel paragrafo successivo, un vantaggio dei dispositivi a colonna d'acqua oscillante è quello di non avere parti in movimento, ad eccezione della turbina. Tuttavia, queste due tipologie di dispositivi sono estremamente massicce e per questo presentano costi significativi. Inoltre l'uso in grande scala di dispositivi a colonna d'acqua oscillante risulta difficile da immaginare per ragioni estetiche/paesaggistiche. Una soluzione a questo problema potrebbe essere l'utilizzo di tali dispositivi nelle strutture portuali [1].

Un esempio di WEC a colonna d'acqua oscillante è il WEC REWEC3 situato nel porto di Civitavecchia [6]. (Fig.1.2)

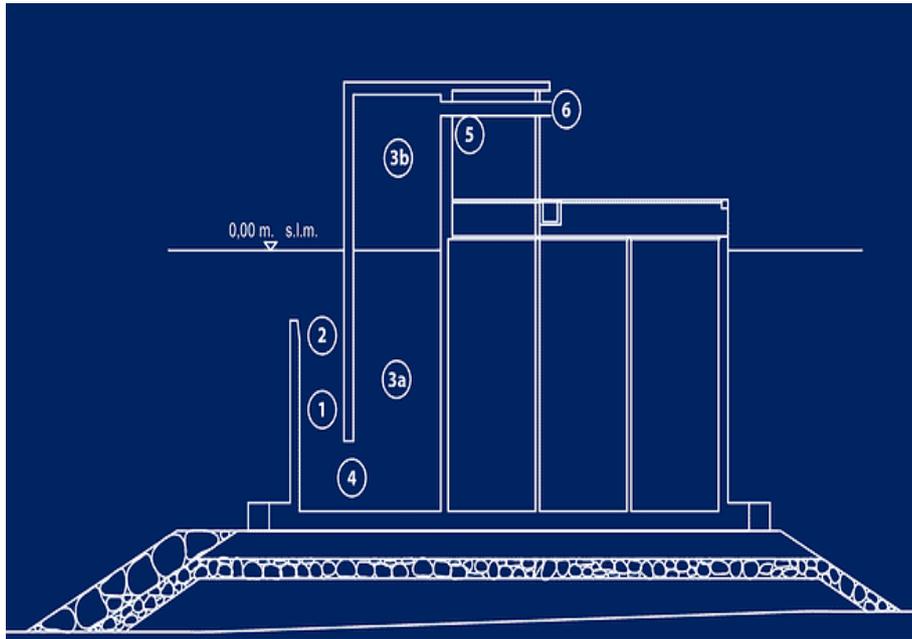


Fig.1.2 schema del WEC situato nel porto di Civitavecchia S. (2020, March 18). ENERGIA RINNOVABILE DAL MARE. STSITALIASRL. <https://www.sts-italia.it/energia-rinnovabile-dal-mare/>

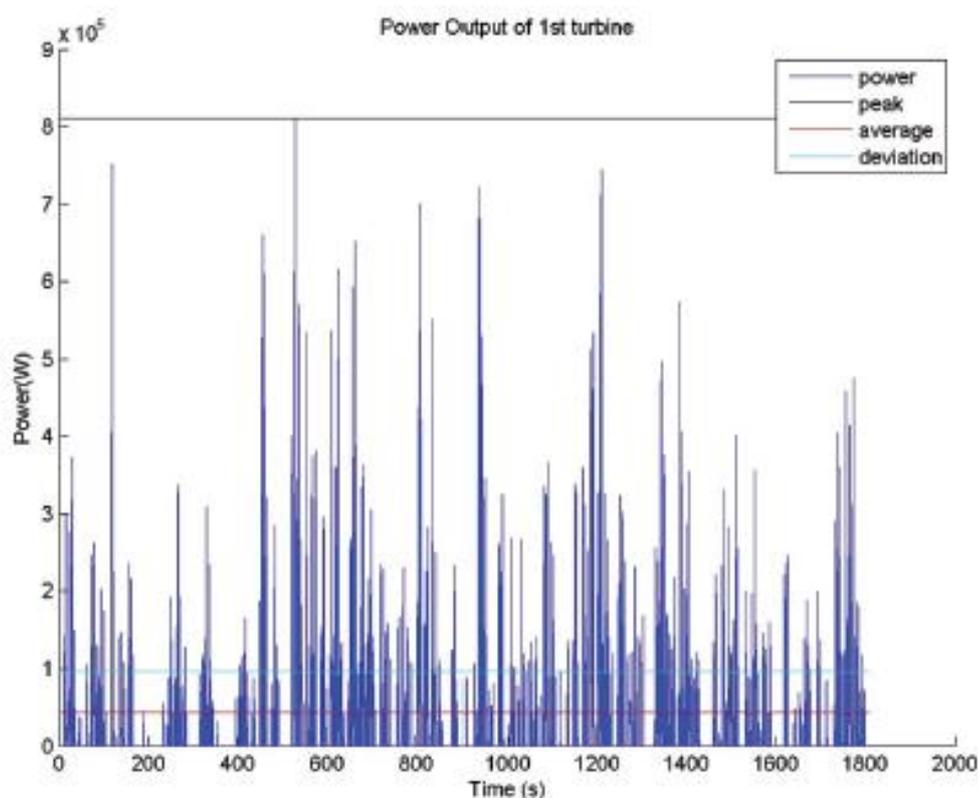
Lo schema del WEC di Civitavecchia è composto dalle seguenti parti (Fig.1.2):

- 1) Condotto verticale.
 - 2) Apertura sotto la superficie dell'acqua.
 - 3) Camera interna. Nella parte inferiore contiene acqua (3a) nella parte superiore è presente una sacca d'aria (3b)
 - 4) Apertura di collegamento tra camera interna e condotto verticale.
 - 5) Condotto d'aria
 - 6) Turbina bidirezionale (indipendentemente dalla direzione del flusso d'aria, gira sempre nella stessa direzione, in modo da produrre energia in modo continuativo)
- [6].

Uno dei maggiori svantaggi dei dispositivi a colonna ad acqua oscillante è la scarsa performance delle turbine ad aria. L'efficienza di una turbina Wells combinata con un generatore elettrico è dell'ordine del 45% [1]. Gran parte dell'energia assorbita dal moto ondoso viene dispersa durante la conversione dell'energia meccanica. Un altro inconveniente delle turbine ad aria, inoltre, è il rumore.

I WEC a colonna d'acqua oscillante solitamente sono composti da più di una colonna d'acqua montate sulla stessa struttura, in questo caso si parla di sistemi di colonne d'acqua oscillanti (oscillating water columns arrays, OWCA).

La potenza prodotta dai dispositivi a colonna d'acqua oscillante presenta un profilo altamente oscillatorio, che riflette l'andamento delle onde. La figura 1.3 riporta l'andamento della potenza elettrica prodotta da una colonna ad acqua oscillante. Si può notare che la potenza varia molto velocemente: da zero a un valore di picco in pochi secondi. La potenza media è 20 volte minore della potenza di picco e la deviazione standard di potenza è più del doppio della potenza media. Ovviamente non è possibile utilizzare un tale profilo di potenza nella rete elettrica, per questo è necessario un sistema di accumulo di energia, che comporta dei costi aggiuntivi al dispositivo [1].



+

Fig.1.3 (Babarit, A. (2017). *Ocean Wave Energy Conversion*. Elsevier)

Per un sistema di 32 colonne ad acqua oscillante (simile al dispositivo “Leancon” Fig.1.5), la potenza elettrica prodotta è riportata in Fig.1.4. Si può osservare che il rapporto tra la massima potenza e la potenza media si riduce di un ordine di grandezza rispetto al caso precedente. Inoltre, nel caso di sistema di colonne ad acqua oscillante, la

deviazione standard è minore della potenza media. Anche in quest'ultimo caso è necessario un sistema di immagazzinamento di energia, ma la capacità di tale sistema, e di conseguenza i costi ad esso correlati, sono significativamente ridotti [1].

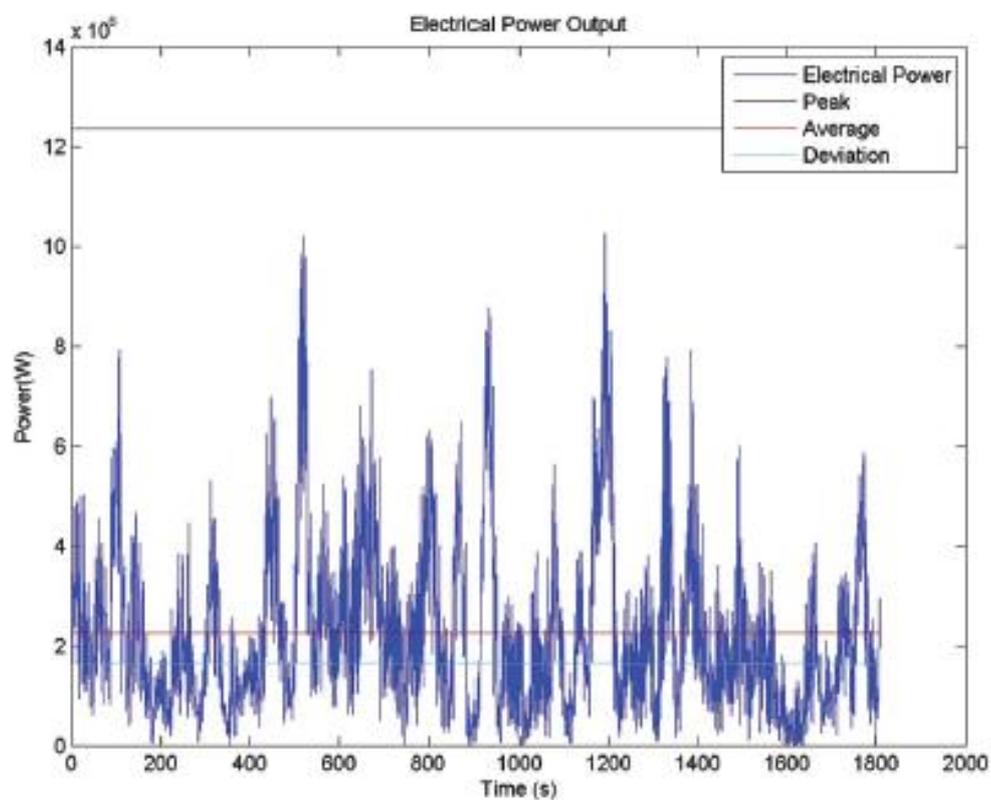


Fig.1.4 (Babarit, A. (2017). *Ocean Wave Energy Conversion*. Elsevier)



Fig.1.5 dispositivo Leancon (The LEANCON Wave Energy Device(2020).
<http://leancon.com/>)

1.1.2 Overtopping devices

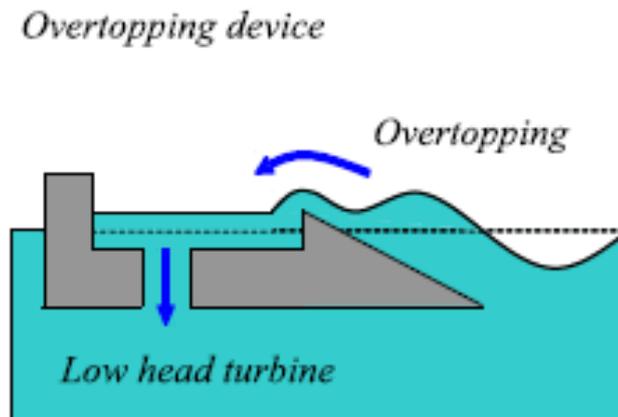


Fig.1.6 schema di un dispositivo del tipo "overtopping device" (Babarit, A. (2017). *Ocean Wave Energy Conversion*. Elsevier)

Il principio di funzionamento dei dispositivi di overtopping consiste nell'utilizzare il run-up generato dalle onde frangenti su una spiaggia per riempire un serbatoio situato sopra il livello del mare (Fig.1.6). Conducendo l'acqua dal serbatoio di nuovo al mare attraverso una turbina a bassa prevalenza collegata ad un generatore elettrico, l'energia delle onde viene convertita in energia elettrica [1].

Il principale esempio di dispositivo di tipo overtopping è il "Wave Dragon" (Fig.1.8), sviluppato dalla compagnia danese "Wave Dragon Aps" [4]. Tale dispositivo è ancorato al fondale e opera in acque relativamente profonde (25-40m di profondità). In questo modo è possibile sfruttare al meglio le onde, prima che perdano energia quando raggiungono le aree costiere.

Il "Wave Dragon" è composto da tre elementi principali [4]:

1. Due riflettori d'onda, collegati alla struttura principale, che dirigono le onde verso la rampa. Questi riflettori d'onda permettono di aumentare significativamente l'altezza delle onde e di conseguenza permettono un maggior assorbimento di energia.
2. La struttura principale, costituita da una rampa a doppia curvatura e da un serbatoio d'acqua.
3. Una serie di turbine a elica a bassa prevalenza, per convertire l'energia potenziale dell'acqua del serbatoio in energia elettrica.

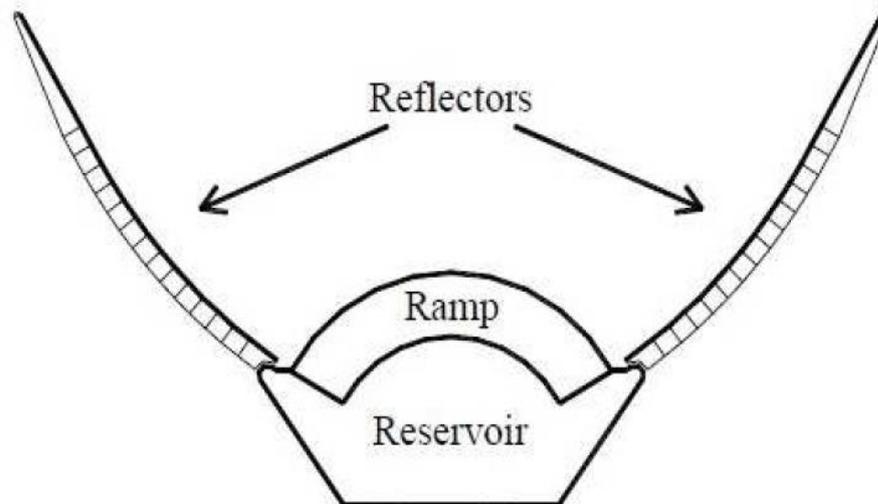


Fig.1.7 schema del dispositivo Wave dragon (Overtopping Wave Energy Converters: general aspects and stage of development. (2011). Giovanna Bevilacqua Barbara Zanuttigh. http://amsacta.unibo.it/3062/1/overtopping_devicex.pdf)

Dopo essere state indirizzate verso la rampa dai due riflettori, le onde sovrastano la rampa e l'acqua riempie il serbatoio, che è posto ad un livello maggiore rispetto a quello del mare circostante. L'acqua del serbatoio torna al mare passando attraverso una serie di turbine idrauliche, collegate ad un generatore elettrico, permettendo di convertire l'energia delle onde in energia elettrica.

Il "Wave Dragon" è un dispositivo molto semplice da un punto di vista meccanico, presenta solo una tipologia di parti in movimento: le turbine. Questa caratteristica è molto utile per qualsiasi dispositivo che opera al largo, dove la manutenzione è difficile da eseguire [4].



Fig.1.8 Wave Dragon prototype (Overtopping Wave Energy Converters: general aspects and stage of development. (2011). Giovanna Bevilacqua Barbara Zanuttigh. http://amsacta.unibo.it/3062/1/overtopping_devicex.pdf)

Un altro esempio di dispositivo del tipo overtopping è il Seawave Slot-cone generator (SSG) (Fig.1.9) [2]. A differenza del Wave dragon, questo dispositivo è posto sulla

costa. L'SSG è costituito da tre serbatoi posti uno sopra l'altro. L'acqua, per tracimazione, viene raccolta nei serbatoi e successivamente fatta scorrere attraverso una turbina multistadio che alimenta un sistema di generazione elettrica. La struttura a tre livelli garantisce un alto livello di efficienza e consente di sfruttare sia onde di elevata dimensione, che creano la maggior parte dell'energia, sia onde di dimensioni più modeste. La tecnologia sfruttata dal dispositivo SSG presenta i seguenti vantaggi:

- Non necessita di ormeggi in acque profonde o lunghi cavi elettrici subacquei.
- Si può installare facilmente.
- La manutenzione è semplice.

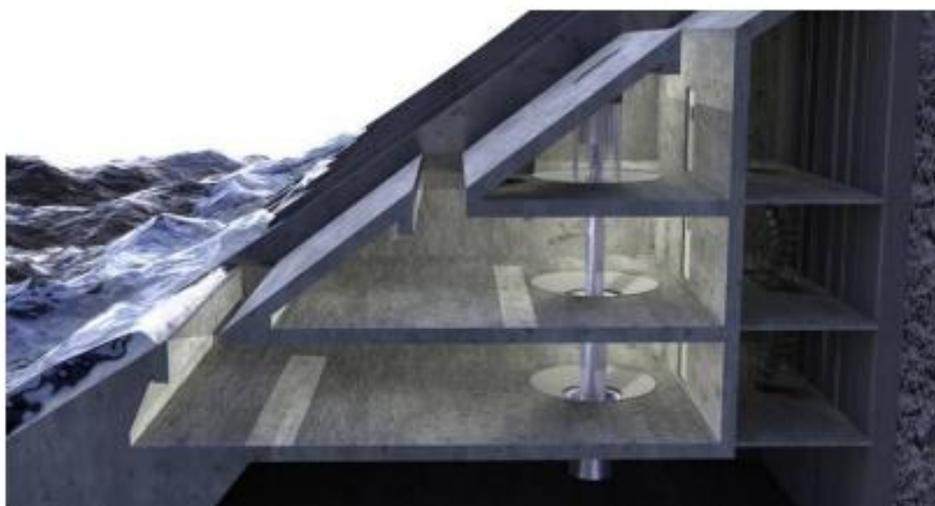


Fig.1.9 schema del dispositivo Seawave Slot-cone generator (SSG) (Vicinanza, D., Margheritini, L., Kofoed, J. P., & Buccino, M. (2012). The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments. Energies)

1.1.3 Wave-activated-body

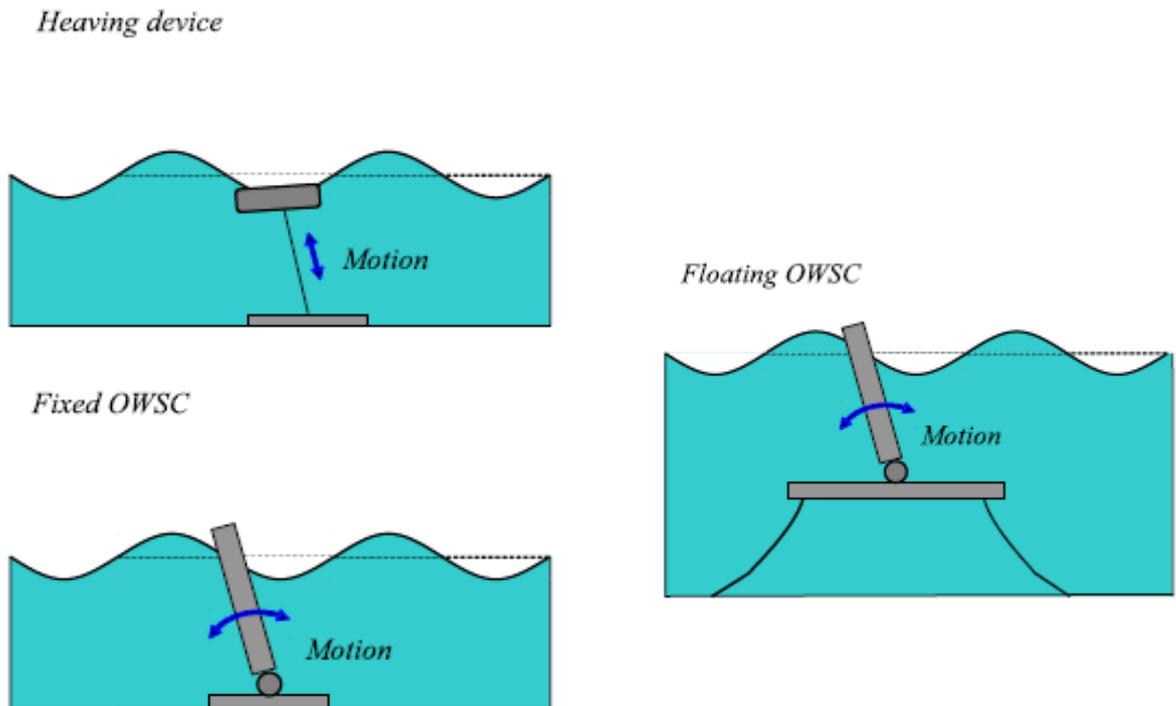


Fig.1.10 schemi delle principali tipologie di dispositivi a corpo attivato dall'onda (Babarit, A. (2017). Ocean Wave Energy Conversion. Elsevier)

I Wave Energy Converter del tipo wave-activated-body (corpi attivati dalle onde) comprendono una vasta gamma di dispositivi. Il principio di base è lo stesso per tutte le tipologie: uno o più galleggianti vengono messi in movimento dalle onde. Il moto relativo tra il galleggiante e il fondale (nel caso di WEC fissati al fondale), o tra le parti galleggianti stesse, viene trasformato in energia elettrica da un convertitore (power take off system: PTO). La progettazione di questi dispositivi è molto varia e dipende dal numero di galleggianti utilizzati e dal tipo di moto sfruttato (verticale, orizzontale, rotatorio, ecc.). In Fig.1.10 sono riportate alcune delle principali tipologie di wave-activated-body [1].

1.1.3.1 WEC basati principalmente sul moto verticale (“heaving buoy”)

Acque poco profonde

Il principio di funzionamento di questa tipologia di dispositivi consiste nello sfruttare il moto verticale di uno o più galleggianti sottoposti all'azione delle onde. Il galleggiante è solitamente di forma cilindrica ed è libero di muoversi sulla superficie dell'acqua. È ormeggiato al fondale marino tramite una fune. Tra il punto di ormeggio nel fondale e la fune, oppure tra la fune e il galleggiante, è situato il sistema power-take-off (PTO).

Analogamente ai dispositivi a colonna d'acqua oscillante, la potenza prodotta presenta un profilo altamente oscillatorio [1].

Un esempio di dispositivo di tipo “heaving buoy” è il dispositivo CETO. Questo WEC non galleggia sulla superficie dell'acqua ma è sommerso, tuttavia il principio di funzionamento è lo stesso di tutti i dispositivi di tipo heaving buoy. La buona capacità di galleggiamento del corpo permette di mantenere in tensione la fune che connette il galleggiante ad un sistema di power-take-off a cilindro idraulico. Nella versione 5 (Fig.1.11), il sistema PTO è posizionato tra il punto di ormeggio nel fondale marino e la fune. Quando il corpo galleggiante oscilla per effetto delle onde, attiva il cilindro idraulico. Si ottiene così un flusso di fluido pressurizzato che viene successivamente utilizzato per attivare un generatore elettrico tramite un motore idraulico. Nella versione 6 dello stesso dispositivo, il sistema PTO a cilindro idraulico viene posizionato tra il galleggiante e la fune per facilitarne l'accesso.

Analogamente ai dispositivi a colonna d'acqua oscillante, più WEC del tipo heaving buoy possono essere montati su una stessa struttura di supporto, in modo da migliorarne l'efficienza [1].

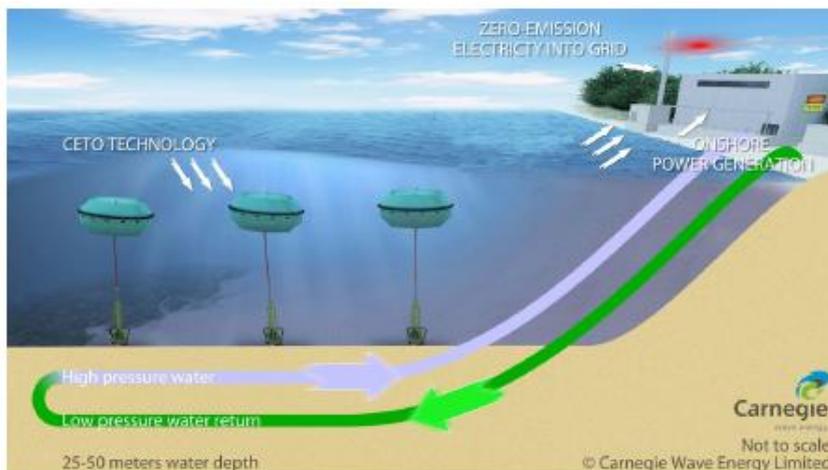


Fig.1.11 schema del dispositivo CETO versione 5 (Babarit, A. (2017). Ocean Wave Energy Conversion. Elsevier)

Acque profonde

In acque profonde non è economicamente fattibile utilizzare il fondale marino come punto fisso e si utilizzano sistemi galleggianti. Un esempio di WEC di tipo “floating heaving buoy” è il PowerBuoy wave energy converter (Fig.1.12). Questo dispositivo è formato da un elemento galleggiante di forma toroidale che può scorrere su un'asta centrale, anch'essa galleggiante. Per l'azione delle onde il toro oscilla rispetto all'asta centrale. Questo moto relativo tra i due elementi galleggianti viene utilizzato per ricavare energia dal moto ondoso. Il sistema di Power Take Off di questo dispositivo è

composto da cilindri idraulici, accumulatori e motori idraulici ed un generatore elettrico [1].



*Fig.1.12 Dispositivo WEC PoweBuoy.
(Babarit, A. (2017). Ocean Wave Energy
Conversion. Elsevier)*

È possibile utilizzare molti galleggianti posizionati uno vicino all'altro e collegati da giunti. In questo caso si parla di sistemi di dispositivi "heaving buoy". Per effetto delle onde i galleggianti si alzano e si abbassano uno dopo l'altro, in questo caso viene quindi sfruttato il moto relativo tra due galleggianti adiacenti. Un esempio di questa tipologia di dispositivo è il Pelamis (Fig.1.13). Questo dispositivo consiste in cinque cilindri sommersi per metà collegati tramite un'articolazione uno all'altro. Il moto relativo tra i cilindri viene utilizzato per attivare un sistema Power-take-off idraulico. Il sistema di ormeggio di questo dispositivo consiste in una fune flessibile connessa alla prima sezione del dispositivo [1].



*Fig.1.13 dispositivo Pelamis.
(Babarit, A. (2017). Ocean
Wave Energy Conversion.
Elsevier)*

La differenza tra i sistemi di dispositivi galleggianti e i dispositivi galleggianti singoli sta nel fatto che questi ultimi sono indifferenti alla direzione delle onde

(omnidirezionali), mentre i sistemi di galleggianti i cui elementi sono collegati da giunture hanno prestazioni migliori se allineati alla direzione di propagazione delle onde (unidirezionali). Questo aspetto ha conseguenze importanti per quanto riguarda il sistema di ormeggio. Per i dispositivi unidirezionali è necessario che l'ormeggio abbia flessibilità sufficiente da permettere al dispositivo di allinearsi alla direzione di propagazione dell'onda [1].

Un problema frequente riscontrato nei WEC di tipo “activated bodys” è la fine corsa. Normalmente i WEC galleggianti hanno la possibilità di muoversi entro certi limiti (dovuti per esempio all'utilizzo di generatori lineari o cilindri idraulici nel sistema di Power-take-off). Per via della natura aleatoria delle onde non è possibile garantire che il WEC non raggiunga una posizione limite ed è quindi necessario munirlo di un dispositivo di fine corsa: una parte meccanica in grado di attenuare e fermare il moto. Generalmente questi punti di fine corsa sono punti fragili, causa di guasto. Di conseguenza si cerca di progettare i dispositivi in modo da evitare il raggiungimento dei punti di fine corsa, ma in questo modo si rischia un sottoutilizzo dei sistemi di Power-take-off e quindi prestazioni più scarse dell'intero WEC. Questo problema è particolarmente critico per i dispositivi che utilizzano componenti lineari (cilindri idraulici, generatori lineari, ecc.), mentre per i dispositivi che utilizzano componenti rotanti (come pompe idrauliche, argani, generatori rotanti diretti, ecc.) è estremamente ridotto [1].

1.1.3.2 WEC basati principalmente sul moto orizzontale

Osservando il mare si potrebbe avere l'impressione che le onde siano un fenomeno principalmente verticale, dove la superficie dell'acqua oscilla in alto e in basso. Tuttavia il moto orizzontale delle particelle d'acqua associato alle onde è dello stesso ordine di grandezza di quello verticale, o addirittura maggiore nel caso di acque poco profonde. Per questo è possibile ricavare energia dalle onde sfruttando il moto orizzontale delle particelle di fluido. I WEC basati sul moto orizzontale possono essere fissati al fondale marino oppure possono essere mobili.

I WEC fissati al fondale si presentano sotto forma di un corpo di forma allungata posizionato in verticale e libero di ruotare rispetto al punto di ancoraggio. L'azione delle onde fa oscillare il corpo avanti e indietro. Il moto relativo di rotazione viene sfruttato per attivare il sistema di Power-take-off. Spesso questi dispositivi sono chiamati OWSCs (Oscillating Wave Surge Converter) e possono essere fissati

direttamente al fondale oppure possono essere montati su un riferimento mobile. Un esempio di questa tipologia di dispositivi è l'Oyster WEC (Fig.1.14). Questo dispositivo è fissato direttamente al fondale, perciò è installato vicino alla costa (in acque profonde 10-15 m). L'asse di rotazione è situato vicino al fondale. Altri esempi di OWSCs fissati al fondale sono i dispositivi Waveroller e SurgeWEC. La differenza principale con il dispositivo Oyster è data al fatto che in questi dispositivi sono completamente immersi, mentre l'Oyster fuoriesce dall'acqua [1].

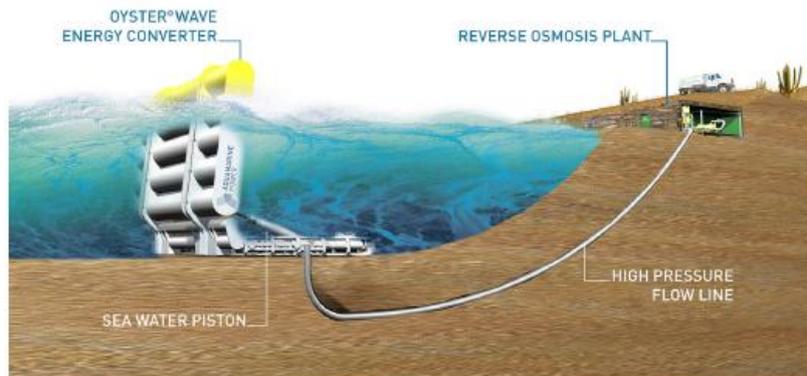


Fig.1.14 schema di funzionamento del dispositivo Oyster. (Babarit, A. (2017). Ocean Wave Energy Conversion. Elsevier)

Da un punto di vista idrodinamico la soluzione con i dispositivi completamente immersi è meno efficiente. Infatti, la parte superiore dei corpi dei dispositivi costituisce una fonte di distacco di vortici e quindi una fonte di smorzamento, una parte dell'energia delle onde viene quindi persa. Per tutti i WEC fissati al fondale, va notato che la variazione del livello medio dell'acqua dovuta all'escursione della marea può essere svantaggiosa. Una soluzione a questo problema è quella di utilizzare un sistema mobile. Questo modello di WEC è costituito da uno o più corpi verticali montati su una piattaforma mobile. La piattaforma è ormeggiata al suolo. Il moto rotatorio relativo tra i corpi e la piattaforma viene convertito in energia elettrica. Un esempio di un dispositivo che utilizza questo principio di funzionamento è il dispositivo Langlee (Fig.1.15) [1].

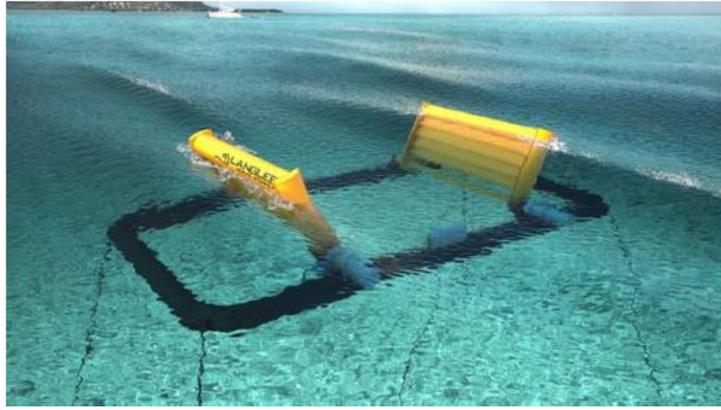


Fig.1.15 dispositivo Langlee (Babarit, A. (2017). Ocean Wave Energy Conversion. Elsevier)

Un altro dispositivo che utilizza lo stesso principio di funzionamento dei OWSC è il Salter's Duck (Fig.1.16). Questo dispositivo consiste in un galleggiante di forma simile a quella del becco di un'anatra (da cui deriva il nome). Il galleggiante è libero di ruotare attorno ad un asse fisso e il moto di rotazione relativo viene utilizzato per ricavare energia elettrica. L'asse fisso si può ottenere collegando un significativo numero di galleggianti lungo una spina [1].



Fig.1.16 rappresentazione del galleggiante utilizzato nel dispositivo Slater's Duck e collegamento di numerosi dispositivi di questo tipo lungo una spina. (Babarit, A. (2017). Ocean Wave Energy Conversion. Elsevier)

Le prestazioni del Salter's Duck sono molto buone, grazie alla particolare forma del galleggiante. Questo aspetto si può notare dalla figura 1.17, che rappresenta un test del dispositivo in condizione di onde regolari. L'onda si propaga da destra a sinistra. A destra si possono notare facilmente la variazione del livello dell'acqua, dovuta alla propagazione dell'onda, e le traiettorie circolari delle particelle di fluido. Nella parte sinistra si può notare che il livello dell'acqua varia appena e che le particelle di fluido sono quasi ferme. Quindi si può osservare che l'energia delle onde viene quasi totalmente assorbita dal dispositivo.

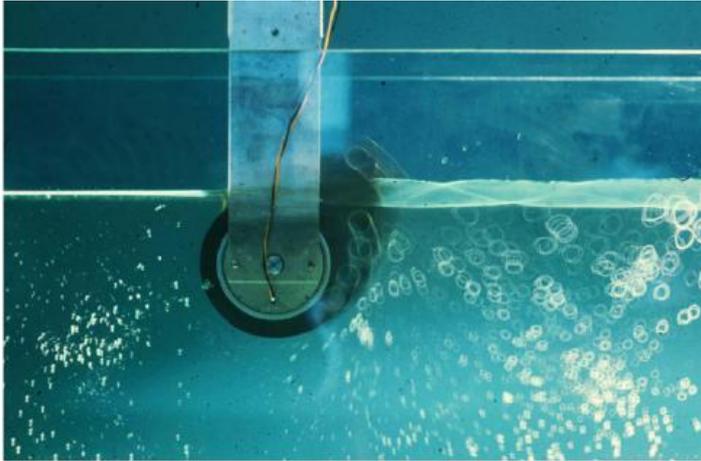


Fig.1.17 visualizzazione del moto delle particelle di fluido durante un test del dispositivo Salter's Duck. (Babarit, A. (2017). Ocean Wave Energy Conversion. Elsevier)

Il dispositivo WEPTOS (Fig.1.18) utilizza la stessa tecnologia del Salter's Duck. È formato da una struttura composta da due braccia regolabili a forma di V. La punta della V è posta di fronte alle onde e l'apertura dell'angolo è regolabile in modo da limitare la superficie esposta alle onde in condizioni di tempesta. WEC del tipo Salter's Duck sono montati su ciascun braccio [1].



Fig.1.18 dispositivo WEPTOS (Babarit, A. (2017). Ocean Wave Energy Conversion. Elsevier)

Un problema dei dispositivi di tipo OWSC è che le loro prestazioni dipendono fortemente dalla direzione delle onde. Questo è un problema che interessa principalmente i dispositivi mobili posizionati al largo, per i dispositivi posti vicino alla costa e fissati al fondale questo problema non sussiste: le onde si propagano in tante direzioni diverse, per via dei fenomeni di rifrazione e riflessione presenti in prossimità della costa [1].

1.2 DISPOSITIVO WEC RESEN

In questo paragrafo viene descritto il dispositivo Wave Energy Converter Resen (Fig.1.19) [7], oggetto delle simulazioni svolte in questo studio.

Impianti di estrazione di gas e petrolio, strumenti oceanografici e altre operazioni sottomarine, si affidano a strumenti e macchinari autonomi. I metodi convenzionali di alimentazione di questi strumenti situati in mare aperto sono poco efficienti: richiedono rifornimento, ricarica, assistenza e pulizia. Tutte queste operazioni sono costose e a volte non è possibile svolgerle per via delle condizioni meteorologiche avverse. Per questo motivo la fornitura di energia viene a volte interrotta, impedendo la trasmissione dei dati, che a sua volta riduce le applicazioni degli strumenti. Il dispositivo WEC Resen permette di alimentare con continuità tali strumenti e macchinari, inoltre consente anche di trasmettere i dati raccolti da questi strumenti in tempo reale.

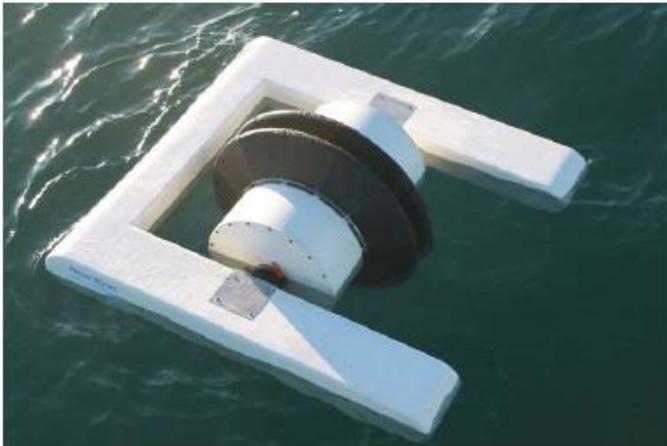


Fig.1.19 prototipo del dispositivo WEC Resen utilizzato per i test effettuati dall'università di Aalborg. (Review of 5kW wave energy LOPF buoy design study and test. (2017). Department of Civil Engineering, Aalborg University).

Il WEC Resen è leggero e di dimensioni modeste: nella sperimentazione svolta dall'università di Aalborg è stato testato un prototipo di dimensioni 170 x 170 x 100 cm e peso tra 250 e 350 kg [3]. Come si vedrà nei paragrafi successivi, nelle simulazioni svolte per questo studio verrà analizzato il comportamento di un corpo di forma rettangolare di dimensioni e peso simili.

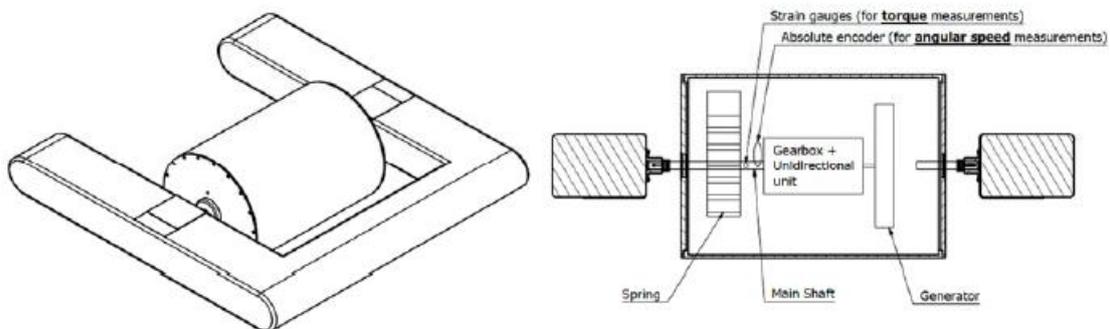


Fig.1.20 Schema del dispositivo WEC Resen. (Review of 5kW wave energy LOPF buoy design study and test. (2017). Department of Civil Engineering, Aalborg University).

Il dispositivo WEC Resen è formato da due parti galleggianti: una parte a forma di “C” e una parte cilindrica posta all’interno dell’altra e collegata ad essa tramite dei perni. Il cilindro è libero di ruotare rispetto alla parte a forma di “C”, inoltre all’interno del cilindro è situato il sistema PTO. (Fig.1.20). Quando le onde spingono il galleggiante lateralmente o lo spostano in alto e in basso, il cilindro viene messo in rotazione rispetto al galleggiante e da questo movimento relativo tra le due parti galleggianti il dispositivo ricava energia elettrica. Il WEC Resen è ancorato al fondale per mezzo di un sistema di ormeggio formato da una fune fissata al suolo da una vite oppure da un blocco pesante. Dai test effettuati dall’università di Aalborg, le potenze meccaniche minime e massime misurate sono 20 e 70 W, per onde di ampiezza tra 0,15 e 0,6 m. La massima efficienza (>70%) si ha per onde di altezza tra 0,15 e 0,25 m e periodo tra 1,6 e 2,2 s [3].

La potenza generata dal dispositivo viene trasmessa tramite un cavo, situato all’interno della fune di ancoraggio, al fondale, dove può alimentare strumenti o dispositivi qui posizionati. I dati raccolti dagli strumenti posti sul fondale marino sono poi trasmessi al galleggiante per mezzo di un cavo in fibra ottica, anch’esso situato all’interno della fune di ormeggio. Da qui i dati vengono trasmessi via satellite a una rete locale (Fig.1.21) [7].

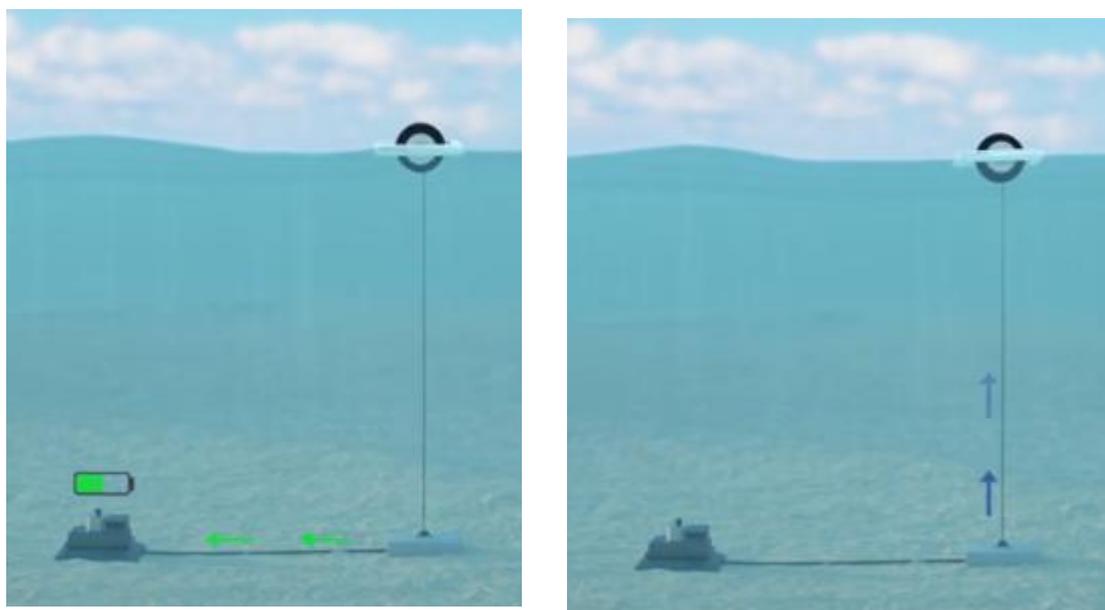


Fig.1.21 Schema di funzionamento del WEC Resen. Nella figura di sinistra il dispositivo trasmette potenza allo strumento situato sul fondale, in quella di destra lo strumento situato sul fondale trasmette dati al Resen. (Resen Waves. <http://www.resenwaves.com/>(2020))

Nei capitoli a seguire si esporrà in primo luogo la descrizione teorica del moto ondoso: si illustreranno le principali teorie utilizzate per la rappresentazione di un’onda marina regolare (teoria di Airy e teoria di Stokes) e si illustrerà la rappresentazione di un’onda irregolare per mezzo dello spettro di JONSWAP (capitolo 2). Successivamente si

illustrerà il modello dinamico lineare che descrive il moto di un dispositivo galleggiante nel caso generale (capitolo 3). Nel capitolo successivo (capitolo 4) si illustrerà il metodo di modellazione CFD, che è un modello non lineare. In particolare si spiegheranno le equazioni che vengono risolte dai software CFD, le relative condizioni al contorno, la modellazione bifase VOF, la discretizzazione del dominio e la generazione della mesh, il problema della convergenza e il modello di turbolenza k-epsilon. A seguire (capitolo 5) verranno descritte le quattro simulazioni svolte in questo studio: la prima consiste nella simulazione di un'onda lineare regolare, la seconda riproduce l'interazione tra quest'onda e un corpo fisso, la terza l'interazione tra la stessa onda ed un corpo galleggiante libero di muoversi in direzione verticale e la quarta l'interazione tra un'onda irregolare rappresentata da uno spettro di JONSWAP ed un corpo galleggiante libero di muoversi in direzione verticale. Il corpo galleggiante, presente nelle simulazioni tre e quattro, costituisce un'approssimazione bidimensionale di una componente oscillante del dispositivo WEC Resen. L'oggetto di questa tesi è, infatti, quello di studiare l'interazione tra questo dispositivo e le onde del mare. Infine si svolgerà un'analisi nel dominio delle frequenze dei risultati relativi alle forze che si esercitano sul corpo galleggiante, ottenuti dalle simulazioni CFD. I risultati di questa analisi verranno poi confrontati con le frequenze previste dal modello dinamico lineare e si valuterà quanto la rappresentazione data dal modello lineare sia vicina a quella data dalle simulazioni numeriche CFD (capitolo 6).

2. TEORIE DELLE ONDE

I WEC sfruttano le onde marine comuni, o onde superficiali. Queste onde iniziano a manifestarsi per effetto del vento con piccole increspature della superficie libera, chiamate onde capillari, di lunghezza d'onda di qualche centimetro e ampiezza dell'ordine del millimetro. In questa prima fase esiste un gioco di equilibrio tra l'azione del vento e le forze intrinseche dell'acqua di mare (viscosità e tensione superficiale). Se l'energia del vento è insufficiente a rompere l'equilibrio la superficie torna calma, altrimenti, se il vento supera determinati valori di intensità e di durata, iniziano a formarsi onde di maggior ampiezza e periodo che possono mantenersi e propagarsi anche se il vento cessa. Nonostante il vento continui a soffiare le onde raggiungono un limite oltre il quale non crescono ulteriormente, a causa di perdite energetiche che bilanciano l'energia fornita dal vento. In queste condizioni le onde sono considerate completamente sviluppate. Quando il vento cessa di soffiare, le onde continuano a propagarsi per distanze anche molto ampie senza significative perdite di energia. Esistono quindi due principali tipologie dello stato di mare [9][10]:

- Mare vivo: insieme caotico di creste di forma diversa, dove sono però individuabili la lunghezza d'onda e l'altezza. È presente nell'area di formazione del moto ondoso, ovvero dove si ha trasferimento di energia dal vento alla massa d'acqua.
- Mare lungo e morto (“swell waves”): è costituito dalle onde provenienti da una zona lontana di burrasca (mare lungo) o da quelle residue in un tratto di mare dove ha soffiato un forte vento (mare morto).

Nella realtà le onde presenti in uno stato di mare sono generate sia dall'effetto di un vento che soffiava in precedenza che dal vento locale. Inoltre, non si considerano gli attriti, l'unica forza agente sulle onde marine comuni è la forza di gravità, per questo vengono chiamate onde gravitazionali.

Prima di analizzare le teorie delle onde è necessario definire alcuni parametri [9][10]:

- l'altezza dell'onda (H), che è la distanza nella direzione verticale tra una cresta e il cavo dell'onda;
- ampiezza dell'onda (a), ovvero la distanza tra la cresta ed il livello imperturbato della superficie marina. Si può considerare pari alla metà dell'altezza ($H=2a$)

- la lunghezza d'onda (λ), che è la distanza tra due punti simili dell'onda (per esempio tra cresta e cresta o tra cavo e cavo)
- il periodo (T), che è il tempo impiegato da un'onda per ripetersi.

Inoltre è importante definire anche alcuni altri parametri, quali [9][10]:

- la ripidità dell'onda

$$s = \frac{H}{\lambda}$$

- pulsazione dell'onda

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ da cui la frequenza dell'onda: } f = \frac{\omega}{2\pi}$$

- celerità (o velocità) dell'onda (c)

$$c = \frac{\lambda}{T}$$

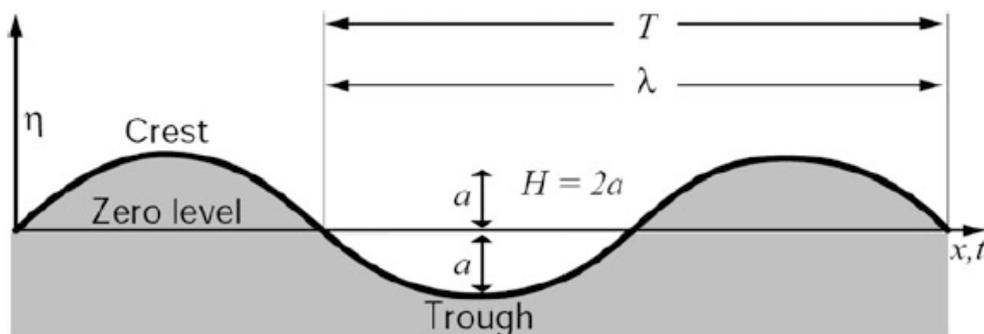


Fig. 2.1 Rappresentazione dei parametri necessari a definire un'onda. (Pecher, A., & Kofoed, J. P. (2016). *Handbook of Ocean Wave Energy* (Ocean Engineering & Oceanography 7) (1st ed. 2017 ed.). Springer)

La ripidità dell'onda viene spesso utilizzata per distinguere le onde tra lineari e non lineari: se la ripidità è minore di 0,01 vale la relazione lineare, ma se la ripidità aumenta la teoria lineare non risulterà più appropriata a descrivere l'onda e bisognerà servirsi di una teoria non lineare di ordine maggiore. La figura 2.2 mostra l'adeguatezza delle varie teorie delle onde basata sulla ripidità dell'onda ($s = \frac{H}{\lambda}$) e sulla profondità relativa dell'acqua ($\frac{h}{gT^2}$) [10].

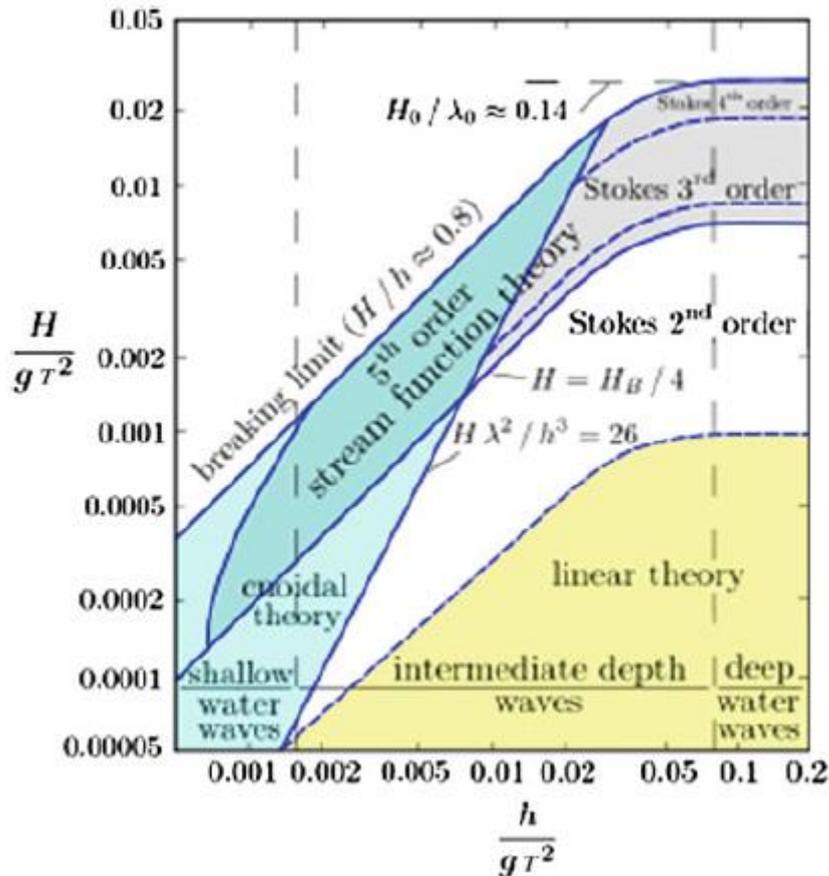


Fig.2.2 Teorie delle onde in base alla ripidità dell'onda e alla profondità relativa dell'acqua (Pecher, A., & Kofoed, J. P. (2016). Handbook of Ocean Wave Energy (Ocean Engineering & Oceanography 7) (1st ed. 2017 ed.). Springer)

2.1. Teoria lineare: teoria di Airy

La teoria lineare relativa la propagazione di onde proposta da Airy, permette di descrivere semplicemente la propagazione e la cinematica delle onde lungo la superficie di un fluido omogeneo, portando ad una rappresentazione sinusoidale del profilo d'onda [9]. Questa teoria è di fondamentale importanza in quanto descrive il comportamento dell'onda con espressioni semplici. Queste espressioni, anche se non vengono sempre perfettamente verificate nella realtà, si avvicinano però abbastanza bene, in molti casi, a descrivere il comportamento del moto ondoso reale.

Ipotesi [9]:

- ripidità piccola ($H/\lambda < 0,01$),
- la profondità e la lunghezza d'onda sono costanti, il fondo è liscio e impermeabile,
- fluido omogeneo, incomprimibile e non viscoso,
- si trascura la forza di Coriolis,

- si trascura la tensione superficiale,
- il moto è irrotazionale e bidimensionale
- le onde non variano la loro forma nel tempo

Secondo la teoria lineare di Airy lo scostamento rispetto alla superficie media dell'acqua è una sinusoidale di equazione [9]:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right]$$

Mentre la celerità (velocità di propagazione) dell'onda è pari a:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \left(2\pi \frac{d}{\lambda} \right)}$$

La celerità dell'onda si può anche esprimere in funzione del periodo (T) come:

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi}{\lambda} d$$

Dove:

- g è l'accelerazione di gravità
- T è il periodo
- d è la profondità del fondale
- λ è la lunghezza d'onda
- tanh è la funzione tangente iperbolica:

$$\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$

Se l'argomento x della funzione tangente iperbolica tende a zero, allora la funzione tende all'argomento stesso. Se l'argomento della funzione tangente iperbolica tende a 1, allora la funzione tende a 1.

Da ciò deriva che:

- per acque basse: $2\pi \frac{d}{\lambda}$ tende a zero, quindi $c = \sqrt{gd}$
- per acque profonde: $2\pi \frac{d}{\lambda}$ tende a 1, quindi $c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$

Eguagliando le due equazioni

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad \text{e} \quad c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}}$$

si ottengono le seguenti equazioni di uso pratico per acque profonde, che permettono di ricavare λ e c in funzione del periodo T :

- $\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} = 1,56T^2 \text{ m}$
- $c = \frac{gT}{2\pi} = 1,56T \text{ m/s}$

Un'importante caratteristica delle onde oceaniche è che generalmente sono dispersive, il che significa che l'energia dell'onda non viaggia alla stessa velocità del profilo dell'onda [10]. La velocità della cresta dell'onda è chiamata celerità dell'onda (c), mentre la velocità di propagazione dell'energia è chiamata velocità di gruppo (c_g). In acque profonde la velocità di gruppo è pari alla metà della celerità dell'onda:

$$c_g = \frac{c}{2}$$

In generale la velocità di gruppo è pari a:

$$c_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\frac{4\pi d}{\lambda}}{\sinh\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)} \right] c$$

Per acque poco profonde:

$$c_g = \sqrt{gz} = c$$

2.1.1 Percorso delle particelle d'acqua e moto delle onde

Come già detto, secondo la teoria lineare di Airy lo spostamento della superficie dell'acqua è dato da una sinusoide di equazione:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right]$$

Tuttavia questa oscillazione della superficie è in realtà il risultato di un moto ellittico delle particelle di acqua, il quale si estende anche molto al di sotto della superficie [10].

L'ampiezza del moto diminuisce esponenzialmente all'aumentare della profondità (Fig.2.3). Dalla teoria lineare di Airy si può ricavare il raggio dell'orbita delle particelle in funzione della profondità [9]:

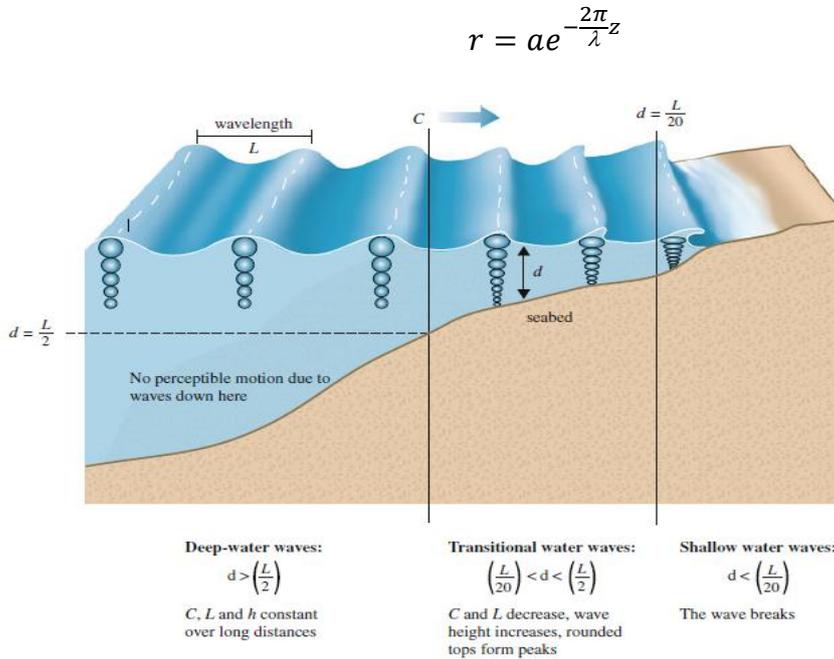


Fig.2.3 percorso delle particelle d'acqua nel moto dell'onda. (Pecher, A., & Kofoed, J. P. (2016). Handbook of Ocean Wave Energy (Ocean Engineering & Oceanography 7) (1st ed. 2017 ed.). Springer)

Quindi lo spostamento verticale delle particelle d'acqua è dato da [10]:

$$\zeta(z) = \frac{H}{2} \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] \frac{\sinh \left[\frac{2\pi(z+d)}{\lambda} \right]}{\sinh \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \right)}$$

Dove d rappresenta la distanza tra il fondale e la superficie dell'acqua.

Mentre lo spostamento orizzontale delle particelle d'acqua è dato da [10]:

$$\xi(z) = -\frac{H}{2} \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] \frac{\cosh \left[\frac{2\pi(z+d)}{\lambda} \right]}{\sinh \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \right)}$$

Di conseguenza il moto delle particelle in acque profonde è circolare, ma diventa ellittico mano a mano che la profondità dell'acqua (d) diminuisce. In particolare la variazione del moto delle particelle dipende dalla profondità dell'acqua in relazione alla lunghezza d'onda. In questo modo si possono definire tre zone (Fig.2.3) [10]:

- 1) Acque profonde, dove il fondale non influenza le onde. La profondità dell'acqua è maggiore della metà della lunghezza d'onda ($d > \frac{\lambda}{2}$).
- 2) Acque basse, la profondità dell'acqua è minore di 1/20 della lunghezza d'onda ($d < \frac{\lambda}{20}$).
- 3) Profondità intermedia, ($\frac{\lambda}{20} < d < \frac{\lambda}{2}$).

Ad una profondità di mezza lunghezza d'onda, il moto delle particelle d'acqua indotto dall'onda è circa il 4% di quello sulla superficie, perciò si può trascurare. Poiché questi limiti dipendono dalla lunghezza d'onda, la definizione di acque profonde non è fissa. Ovvero, un sito si può considerare in condizioni di acque profonde per piccole lunghezze d'onda, mentre per un'onda differente, di lunghezza d'onda maggiore, va considerato in condizioni di acque intermedie [10].

2.2 Teoria del secondo ordine: teoria di Stokes

La teoria di Stokes è una generalizzazione della teoria lineare di Airy e fornisce risultati accettabili nelle acque profonde e intermedie [12]. Per quanto riguarda acque poco profonde, invece, altre teorie (come quella di Cnoidale) forniscono risultati più attinenti alla realtà. Un parametro che viene utilizzato per definire l'applicabilità della teoria di Stokes è il numero adimensionale di Ursell [12].

$$U_{rs} = \frac{H\lambda^2}{z^3}$$

Per numeri di Ursell piccoli ($U_{rs} \ll 100$) è possibile utilizzare la teoria di Stokes, mentre per $U_{rs} > 40$ è necessario utilizzare la teoria di Cnoidale. Inoltre esiste una limitazione sulla ripidità dell'onda: se $s = \frac{H}{\lambda} > 0,1412$ la superficie libera non risulta più periodica, pertanto le soluzioni di Stokes non risultano più valide. Anche per questa teoria le ipotesi di partenza prevedono un fluido non viscoso, incomprimibile e il cui moto è irrotazionale [12].

Secondo la teoria di Stokes lo spostamento della superficie d'acqua è [12]:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh \frac{2\pi}{\lambda} d (2 + \cosh \frac{4\pi}{\lambda} d)}{(\sinh \frac{2\pi}{\lambda} d)^3} \cos \left[4\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right]$$

L'espressione che descrive il profilo dell'onda ottenuta attraverso la teoria di Stokes è data dall'addizione all'onda superficiale di Airy di un termine di secondo ordine, la cui ampiezza dipende dalla ripidità dell'onda e il cui periodo è dimezzato rispetto a quello dell'onda di Airy. Questa teoria è applicabile ad onde la cui ripidità è maggiore di 0,01 (la teoria di Airy è applicabile per onde di ripidità < 0,01), tuttavia il valore della ripidità non deve essere un numero elevato ($\frac{H}{\lambda} \ll 1$). Se si considerano onde di ampiezza finita, quando l'ampiezza aumenta, il termine del secondo ordine incrementa il suo "peso"

nell'equazione. La celerità dell'onda secondo la teoria di Stokes è data dalle seguente espressione:

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi}{\lambda} z}$$

Come si può notare tale espressione è la stessa della teoria lineare di Airy, perciò anche in questo caso la celerità dell'onda (c) è indipendente dalla ripidità. Conseguentemente anche le espressioni della celerità dell'onda e della lunghezza d'onda per acque profonde, risultano uguali al caso della teoria lineare precedentemente illustrata. Come si vedrà nel capitolo 5, la teoria di Stokes del secondo ordine verrà utilizzata nello svolgimento delle simulazioni svolte in questo studio.

2.3 Spettro di JONSWAP

Un modo di caratterizzare uno stato di mare è quello basato su un'analisi spettrale temporale e spaziale dell'altezza istantanea della superficie libera. L'andamento della superficie dell'acqua, $\eta(t)$, può essere descritto come onda irregolare, data dalla sovrapposizione di onde regolari lineari e, perciò, è rappresentabile tramite una somma di N termini sinusoidali [11].

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cos(\omega_i t + \varphi_i)$$

N è un numero molto grande che dipende dal moto ondoso. Mentre a_i è l'ampiezza, ω_i la pulsazione e φ_i la fase della i -esima componente. I valori a_i rappresentano i pesi delle varie componenti di pulsazione ω_i . Impiegare una rappresentazione spettrale significa caratterizzare uno stato di mare con la successione discreta delle ampiezze a_i , date in funzione delle frequenze ω_i (o f_i , con $\omega_i = 2\pi f_i$). Nel continuo, invece, si ha una funzione $a(\omega)$ (o $a(f)$). Nella pratica si fa però spesso ricorso alla funzione che lega ω_i (o f_i) con a_i^2 (spettro di potenza). L'utilità di questa rappresentazione è data dal fatto che il quadrato dell'ampiezza di un'oscillazione sinusoidale è proporzionale alla sua energia. Infatti l'energia di un'onda regolare di ampiezza a è data da [9]:

$$E = \frac{1}{2} g \rho a^2 \lambda$$

Nel seguito lo spettro di potenza viene indicato come $S(\omega)$.

Esistono numerose rappresentazioni dello spettro $S(\omega)$, una delle più utilizzate nel campo delle analisi dello stato di mare, è lo spettro JONSWAP. Questa rappresentazione dello spettro dipende principalmente da due parametri fondamentali [1]:

- H_s : Altezza significativa dell'onda, definita come la media del terzo delle altezze delle onde più alte rilevate in un certo intervallo temporale.
- T_p : Periodo di picco, ovvero il periodo relativo al valore massimo di $S(f)$. Da questo deriva la frequenza di picco $f_p = 1/T_p$

Questi parametri possono essere interpretati come valori rappresentativi delle grandezze misurate nelle osservazioni. Per un dato spettro, la definizione di stato del mare viene quindi ridotta alla coppia (T_p, H_s) .

La formulazione dello spettro JONSWAP è la seguente [1]:

$$S(f) = \alpha \frac{5}{16} \frac{H_s^2}{T_p^4} \frac{1}{f^5} e^{-\frac{5}{4} \frac{1}{(T_p f)^4}} \gamma e^{\frac{(f T_p - 1)^2}{2\sigma^2}}$$

Dove:

- σ è un parametro che quantifica la larghezza dello spettro attorno alla frequenza di picco e che assume valore diverso a seconda delle frequenze: $\sigma = 0,07$ se $\omega < 1/T_p$ e $\sigma = 0,09$ se $\omega > 1/T_p$.
- α = parametro di scala, che per l'Adriatico è pari a 0.862
- γ = coefficiente di diffusione spettrale, che per l'Adriatico è pari a 1.63

In figura 2.4 sono illustrati tre esempi significativi di spettri JONSWAP, con diversi valori di H_s e f_p .

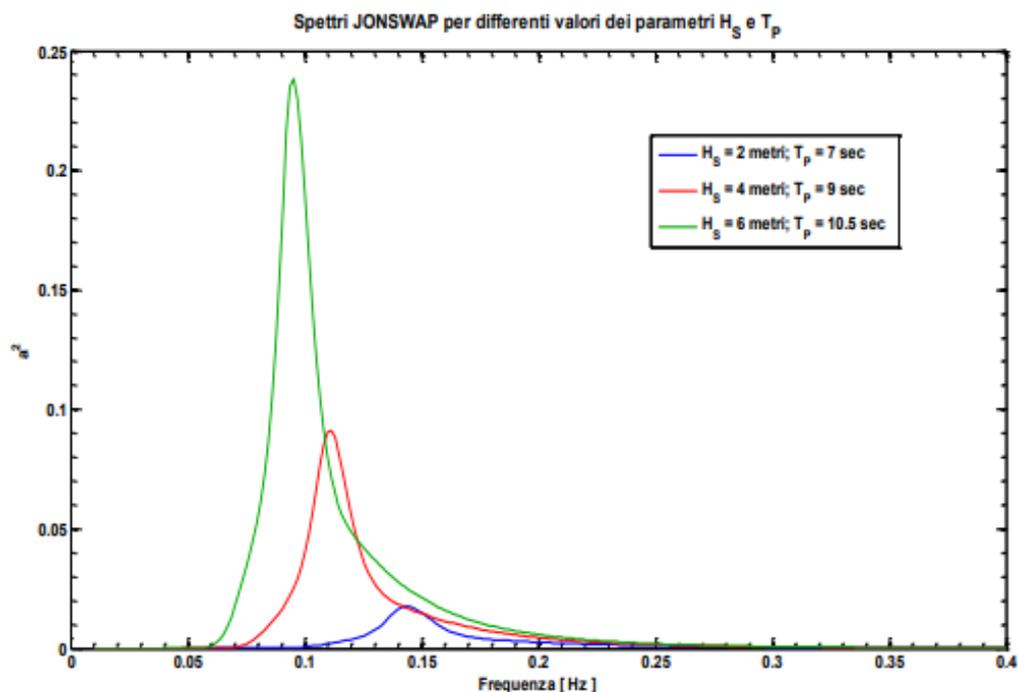


Fig.2.4 spettri JONSWAP per differenti valori di altezza significativa e periodo di picco.
(ONDE REALI. (2017–2018). E. Foti.)

In figura 2.5 è riportato lo spettro di un tipico stato di mare, caratterizzato da altezza significativa (H_s) pari a 0,5 m e periodo di picco (T_p) pari a 4 s. Nell'asse delle ascisse è riportata la frequenza, mentre in quella delle ordinate è riportato il valore dello spettro di JONSWAP. Lo spettro di figura 2.5 verrà utilizzato per simulare un'onda irregolare nelle simulazioni descritte nel paragrafo 5.5.

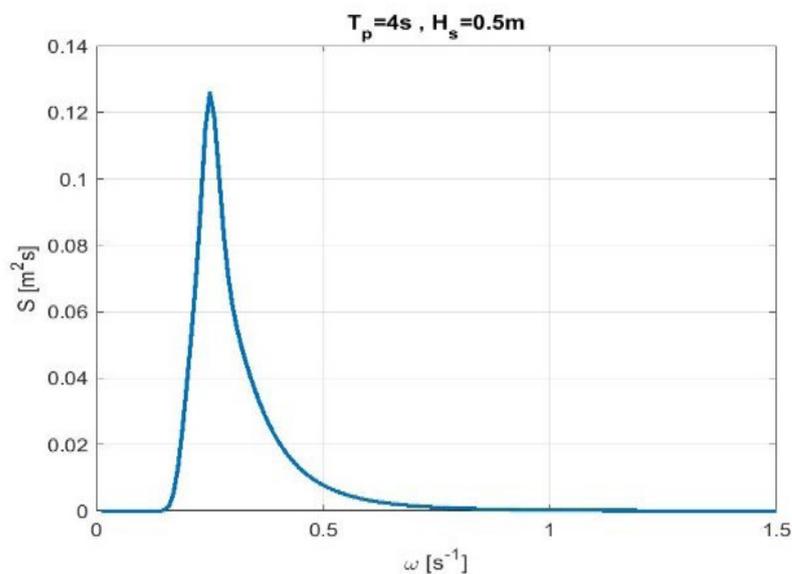


Fig.2.5 Spettro di JONSWAP di uno stato di mare di altezza significativa di 0,5 m e periodo di picco di 4 s

3. MODELLO DINAMICO LINEARE DEI WEC GALLEGGIANTI

In questo capitolo verrà illustrato il modello lineare dinamico analitico utilizzato per studiare i WEC galleggianti. Nei capitoli successivi tale modello verrà adattato al caso oggetto di studio e successivamente verrà confrontato con il modello non lineare utilizzato nelle simulazioni CFD. Si riporta di seguito una trattazione generale di questo modello dinamico lineare.

Si assumono le seguenti ipotesi [13][14][15]:

- fluido ideale, incomprimibile
- moto irrotazionale,
- l'ampiezza dell'onda è molto piccola rispetto alla lunghezza dell'onda, in modo da poter utilizzare la teoria lineare delle onde (capitolo 2).

Il moto di un dispositivo WEC galleggiante può essere descritto da un modello dinamico lineare basato sulla seconda legge di Newton, quindi può essere rappresentato da un'equazione del tipo:

$$m\ddot{\eta} + b\dot{\eta} + c\eta = d$$

Dove m rappresenta la massa del corpo, η rappresenta lo spostamento del corpo ($\ddot{\eta}$ e $\dot{\eta}$ sono rispettivamente l'accelerazione e la velocità), mentre i termini d , b e c parametrizzano le forze agenti sul corpo. Un dispositivo WEC è generalmente sottoposto alle seguenti forze [13][14][15]:

- forza idrostatica, risultante dalla combinazione tra la forza di gravità e la forza di galleggiamento (f_H)
- forza di smorzamento (f_v), dipende dalla velocità e tiene in considerazione gli effetti delle perdite viscosive.
- forza della molla di fine corsa (f_{es})
- forza del sistema PTO (f_{PTO})
- la forza di ancoraggio (f_m), dovuta al sistema di ormeggio
- la forza di interazione con l'onda. Questa componente si suddivide a sua volta in: forza di eccitazione (f_{exc}), dovuta all'interazione con le onde incidenti, e forza di radiazione (f_{rad}), dovuta all'interazione con le onde generate dal moto del corpo stesso.

Matematicamente il moto indotto dalla combinazione di queste forze è descritto dalla seguente equazione:

$$(m_a + m)\ddot{\eta} = -f_v - f_H + f_{exc} - f_{rad} - f_{es}(t) - f_{PTO}(t) - f_m(t)$$

Dove m_a e m sono rispettivamente la massa aggiunta e la massa del galleggiante, mentre $\ddot{\eta}$ corrisponde all'accelerazione del corpo.

Massa aggiunta (m_a)

Le forze che si generano in seguito al moto del corpo sono solitamente chiamate forze di radiazione. Normalmente queste forze si suddividono in forze di massa aggiunta, proporzionali all'accelerazione del corpo, e la forza di smorzamento dovute all'interazione tra il corpo e le onde generate dal suo movimento (f_{rad}), proporzionali alla velocità del corpo. Fisicamente, la massa aggiunta è un'inerzia che si aggiunge al sistema in esame, poiché un corpo che accelera o decelera all'interno di un fluido deve spostare un certo volume di fluido circostante. È importante notare che non si tratta di una massa fissa di acqua: in linea di principio, infatti, tutta l'acqua è influenzata dal movimento del corpo galleggiante. Il coefficiente di massa aggiunta, in sostanza, indica quanto aumenta la forza di inerzia dovuta all'interazione tra il corpo e il fluido circostante, quando il corpo viene accelerato [14][15].

La forza di smorzamento (f_v),

In molti casi è probabile che l'ipotesi di linearità e irrotazionalità non vengano rispettate. Infatti, nella realtà, effetti non lineari ed effetti viscosi limitano l'ampiezza del moto. Un modo comune di modellare quest'ultimo effetto consiste nell'aggiungere un termine quadratico di smorzamento f_v [13]:

$$f_v = \frac{1}{2} \rho C_D A_D |v - v_0| (v - v_0)$$

Dove: v e v_0 sono rispettivamente la velocità del corpo e la velocità indisturbata del fluido.

C_D e A_D sono rispettivamente un coefficiente di attrito e un'area caratteristica.

La forza di radiazione (f_{rad}) [14]:

$$f_{rad} = Z \dot{\eta}$$

Dove Z è il coefficiente di resistenza della radiazione. L'utilizzo di questa forza nel modello dinamico del moto del dispositivo permette di tenere conto dello smorzamento del moto oscillatorio del galleggiante dovuto al trasferimento di energia alle onde irradiate dal moto del corpo stesso.

Forza idrostatica (f_H)

Questa forza è la risultante tra la forza di gravità (mg) e la forza di galleggiamento idrostatica (ρgV). Perciò:

$$f_H = (m - \rho V)g$$

Dove m è la massa del corpo, ρ la densità dell'acqua e V il volume di corpo immerso nell'acqua.

Forza di eccitazione (f_{exc})

Se si considera il caso particolare di un'onda regolare, come visto nel capitolo 2, l'equazione che descrive l'andamento della superficie è data da:

$$\eta = \frac{H}{2} \cos \left[\left(2\pi \frac{x}{\lambda} - \omega t \right) \right]$$

La forza di eccitazione può essere così espressa [14][15]:

$$f_{exc}(t) = |f_{exc}| \cos (\omega t + \theta)$$

Come si può notare, secondo la teoria potenziale lineare, la forza di eccitazione (f_{exc}) ha un andamento sinusoidale di frequenza pari alla frequenza dell'onda che interagisce con il galleggiante (ω). L'ampiezza della forza di eccitazione si può ricavare come segue:

$$|f_{exc}| = k_3 \rho g \frac{H}{2} \pi l^2$$

Dove l rappresenta la dimensione caratteristica del corpo galleggiante (per esempio nel caso di galleggianti sferici l è pari al raggio). k_3 è il coefficiente della forza di eccitazione e dipende dall'onda incidente e dalle dimensioni del galleggiante.

Se si considera il caso generico di un'onda irregolare formata dalla sovrapposizione di più onde regolari, la forza di eccitazione può essere così espressa [13]:

$$f_{exc} = \sum_i \left(\sqrt{2S(f_i)\Delta f} \right) \operatorname{Re}[\overline{f_{exc}}(f_i)] \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)$$

Dove:

- $S(f)$ è lo spettro del campo dell'onda incidente
- Δf è un adeguato gradino di frequenza
- φ_i è l'insieme di fasi dell'onda incidente
- $\operatorname{Re}[\overline{f_{exc}}(f_i)]$ è la parte reale di vettori complessi della forza di eccitazione per metro di ampiezza d'onda nel dominio della frequenza.

Come si può notare la forza risultante corrisponde ad una sommatoria di sinusoidi di frequenze pari a quelle delle sinusoidi che formano l'onda di eccitazione.

Forza della molla di fine corsa (f_{es})

Per prevenire la rottura dei dispositivi WEC dovuta alla interazione con onde incidenti di ampiezza troppo elevata, vengono utilizzate delle molle per bloccare il movimento quando l'ampiezza supera i limiti imposti dai vincoli. Tale forza si può scomporre in due forze: una superiore (f_{esu}) e una inferiore (f_{esl}) [15].

$$f_{esu} = \begin{cases} k_u[\eta(t) - l_u], & \eta(t) > l_u \\ 0, & \eta(t) \leq l_u \end{cases}$$

$$f_{esl} = \begin{cases} k_l[\eta(t) + l_l], & \eta(t) < -l_l \\ 0, & \eta(t) \geq -l_l \end{cases}$$

Dove k_u e k_l sono rispettivamente i coefficienti superiore e inferiore della molla di fine corsa, mentre l_u e l_l sono rispettivamente gli allungamenti superiore e inferiore della molla di fine corsa.

Forza del power-take-off (f_{pto})

Come si è visto nel capitolo 1 il power-take-off (PTO) è il sistema che converte l'energia meccanica del moto del galleggiante in energia elettrica. Nel caso di un dispositivo OWC sarà una turbina ad aria. Mentre nel caso di WEC di tipo activated body, il PTO può essere costituito da componenti idraulici (pistoni e motori idraulici) in combinazione con un generatore elettrico, oppure può essere completamente elettrico. Nel caso delle turbine e di PTO completamente elettrico c'è una relazione lineare tra forza e velocità, e quindi il sistema PTO si può modellare come uno smorzatore lineare.

In caso di sistemi PTO idraulici, una migliore rappresentazione si ottiene utilizzando un modello di smorzamento di Coulomb.

- Modello lineare. Nel caso generale [13]:

$$f_{pto} = -m_{pto}\ddot{\eta} - B_{pto}\dot{\eta} - K_{pto}\eta$$

Dove m_{pto} è la massa del PTO, B_{pto} è un coefficiente di smorzamento e K_{pto} è la costante della molla (se presente) del PTO.

- Modello idraulico basato sulla teoria dello smorzamento di Coulomb. Come nel caso lineare, sono presenti i termini della massa, della molla e il termine dello smorzamento [13]:

$$f_{pto} = -m_{pto}\ddot{\eta} - C_{pto}\text{sign}(\dot{\eta}) - K_{pto}\eta$$

Forza di ancoraggio (f_m)

Per alcuni dispositivi l'effetto della forza di ancoraggio ha effetti trascurabili nell'assorbimento di energia (nei casi in cui l'ancoraggio serve solo per contrastare la deriva e le forze di corrente). In questi casi i sistemi di ormeggio sono rappresentati da semplici molle lineari regolate per mantenere il dispositivo in posizione, che hanno minima influenza sulla potenza assorbita [13].

Nel capitolo 5 (paragrafo 5.1), si adatterà il modello dinamico lineare appena descritto al caso oggetto di studio, ovvero l'interazione tra le onde e il dispositivo galleggiante WEC Resen.

4. MATERIALI E METODI

4.1 COMPUTATIONAL FLUID DYNAMIC

Nel presente capitolo si introdurrà la fluidodinamica computazionale, che corrisponde al metodo utilizzato per l'analisi dell'interazione tra le onde marine e il dispositivo WEC Resen svolta in questo studio. In primis verranno illustrate le equazioni cardine del CFD, ovvero le equazioni di conservazione. Successivamente si illustreranno brevemente quali sono le condizioni al contorno fondamentali per le simulazioni CFD. A seguire si tratteranno brevemente i concetti di discretizzazione e convergenza (fondamentali nella fluidodinamica computazionale) e infine si introdurranno brevemente il fenomeno della turbolenza e il relativo modello utilizzato nelle simulazioni svolte per questo studio.

4.1.1 Fisica del moto dei fluidi

Le forze agenti su un elemento fluido sono di due tipologie [19]:

1. Forze di superficie: si esplicano quando due corpi sono a contatto e sono proporzionali alla superficie di contatto. Se V' è una porzione del volume di fluido V delimitata da S' , allora il fluido esterno a V' esercita una forza \mathbf{F} sul fluido interno tramite la superficie S' . In particolare: su una superficie infinitesima dS' di normale esterna \mathbf{n} il fluido esterno esercita una forza $d\mathbf{F}$ di intensità proporzionale a dS' stesso.

$$d\mathbf{F} = \mathbf{t}dS'$$

Dove la costante di proporzionalità è il vettore tensione \mathbf{t} , che dipende dalla posizione della superficie infinitesima dS' , dalla normale \mathbf{n} e dal tempo.

$$\mathbf{t} = \mathbf{t}(\mathbf{x}, \mathbf{n}, t) = \frac{d\mathbf{F}}{dS'}$$

Perciò la forza complessiva che il fluido esterno esercita su quello interno è pari a:

$$\mathbf{F} = \int_{S'} \mathbf{t}dS'$$

2. Forze di volume o di massa: agiscono senza contatto su ogni molecola di fluido contenuta in V' , sono proporzionali a V' stesso o alla sua massa m . Un esempio è la forza gravitazionale.

Il moto di un fluido è governato dalle tre equazioni di conservazione [16]: conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia. Questi principi

fondamentali possono essere espressi in termini di equazioni matematiche che, nella loro forma più generale, sono equazioni differenziali alle derivate parziali. La fluidodinamica computazionale è un ramo della fluidodinamica che utilizza metodi numerici e algoritmi allo scopo di risolvere e analizzare tali equazioni.

Siano:

- ρ la densità del fluido,
- \mathbf{v} il vettore velocità,
- V il volume di controllo,
- S la superficie chiusa che delimita il volume di controllo
- \mathbf{n} vettore normale alla superficie S .
- $\frac{d}{dt}$ la derivata materiale: $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla$
- \mathbf{g} l'accelerazione di gravità
- \mathbf{t} il vettore delle tensioni precedentemente definito.

Equazione di conservazione della massa (equazione di continuità)

La massa m di un volume materiale di fluido è costante nel tempo [19].

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d}{dt} \int_V \rho dV = 0$$

Applicando il teorema del trasporto si ottiene:

$$\int_V \left[\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} \right] dV = 0$$

Da cui, per l'arbitrarietà di V , deriva la forma differenziale dell'equazione di continuità:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

Ovvero:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

Un fluido incomprimibile ha densità costante, perciò in questo caso l'equazione di continuità diventa:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$$

Il principio di conservazione della massa può anche essere espresso in forma integrale:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \oint_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

Dove $\oint_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS$ è la portata massica (Q_m). In caso di fluido incomprimibile (densità costante) si ottiene $Q_m=0$, il che significa che nel volume di controllo V non può accumularsi fluido.

Equazioni di conservazione della quantità di moto

La variazione nel tempo della quantità di moto di un volume materiale di fluido è causata dalla risultante delle forze che l'esterno esercita sul volume di fluido [19].

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV = \int_V \rho \mathbf{g} dV + \int_S \mathbf{t} dS$$

Applicando il teorema del trasporto si ottiene facilmente che:

$$\int_V \rho \left(\frac{d\mathbf{v}}{dt} - \mathbf{g} \right) dV = \int_S \mathbf{t} dS$$

Sia \mathbf{T} il tensore delle tensioni, che comprende tensioni normali (T_{ij} con $i=j$) e tensioni tangenziali (T_{ij} con $i \neq j$). Tra \mathbf{t} e \mathbf{T} vale la relazione: $\mathbf{t} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{n}$

Dalle due equazioni precedenti si può ricavare l'equazione di Cauchy:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \rho \mathbf{g} + \nabla \cdot \mathbf{T}$$

Per fluidi newtoniani vale il seguente legame costitutivo:

$$\mathbf{T} = (-p + \lambda \nabla \cdot \mathbf{v}) + 2\mu \mathbf{D}$$

Dove:

- p è la pressione
- λ è il coefficiente di viscosità di volume
- μ è il coefficiente di viscosità dinamica

- \mathbf{D} è una matrice i cui termini sono pari a: $D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$.

Dalle equazioni di Cauchy e dal legame costitutivo dei fluidi newtoniani si ottiene l'equazione di Navier-Stokes:

$$\rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v}$$

Ossia:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = \rho \mathbf{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v}$$

Che può essere così espressa:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_1}{dt} + U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_1}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_1}{\partial x_3} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx_1} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 U_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U_1}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_1}{\partial x_3^2} \right) \\ \frac{\partial U_2}{dt} + U_1 \frac{\partial U_2}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_2}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_2}{\partial x_3} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx_2} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 U_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U_2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_2}{\partial x_3^2} \right) - g \\ \frac{\partial U_3}{dt} + U_1 \frac{\partial U_3}{\partial x_1} + U_2 \frac{\partial U_3}{\partial x_2} + U_3 \frac{\partial U_3}{\partial x_3} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx_3} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 U_3}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 U_3}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_3}{\partial x_3^2} \right) \end{aligned}$$

Dove x_1 , x_2 , e x_3 sono le 3 direzioni del riferimento cartesiano, mentre U_1 , U_2 e U_3 sono le tre componenti della velocità nelle tre direzioni.

La forma integrale dell'equazione di Navier-Stokes è la seguente:

$$\int_V \frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} dV + \int_S \rho \mathbf{v} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dS = \int_V \rho \mathbf{g} dV + \int_S \mathbf{t} dS$$

Equazione di conservazione dell'energia

Questa equazione non è necessaria per lo svolgimento delle simulazioni dell'interazione tra un'onda e un dispositivo WEC galleggiante, poiché i fluidi che interagiscono con il corpo sono incomprimibili e non vi è alcun scambio termico tra fluido e struttura. Tuttavia per completezza si riporta comunque questa equazione. Un'espressione del principio di conservazione dell'energia è la prima legge della termodinamica. Tale legge, se applicata ad un elemento di un fluido in moto, risulta la seguente: la variazione

temporale di energia in un elemento fluido è pari alla somma tra il flusso di calore netto entrante e potenza meccanica entrante dovuta alle forze di volume e di superficie [18].

L'energia di un elemento fluido è data dalla somma tra l'energia interna e l'energia cinetica per unità di massa ($v^2/2$) dell'elemento. Il termine relativo al flusso di calore tiene conto degli scambi termici dovuti sia ai fenomeni di radiazione sia ai gradienti di temperatura.

Le tre equazioni precedentemente descritte governano qualsiasi moto di un fluido. Nei modelli CFD vengono implementate le forme integrali delle leggi di conservazione e, imponendo le giuste condizioni al contorno, è possibile trovare le soluzioni di un problema specifico. La scelta più appropriata e accurata delle condizioni al contorno è molto importante per la fluidodinamica computazionale, come si vedrà nel paragrafo successivo.

4.1.2 Condizioni al contorno

Le tre equazioni di Navier-Stokes e l'equazione di continuità contengono quattro variabili dipendenti, U_1 , U_2 , U_3 e P . Le condizioni al contorno sono necessarie per la risoluzione delle equazioni differenziali che determinano il sistema. In particolare, i risultati delle simulazioni dipendono dalle condizioni di ingresso e uscita, dalle condizioni alle pareti, dalle condizioni iniziali e dalle quattro equazioni differenziali che governano il moto dei fluidi [16]. Si illustrano ora le principali condizioni al contorno:

1) Condizioni di flusso in ingresso/uscita (Inlet / Outlet)

Solitamente le condizioni di ingresso vengono definite come “velocity inlet”. Nella maggior parte dei programmi CFD è possibile definire tali condizioni assegnando la velocità media perpendicolare alla superficie di ingresso, oppure una distribuzione di velocità sulla superficie di ingresso. Un'alternativa alla condizione al contorno di “velocity inlet” è quella di “pressure inlet”, per cui si assegna la pressione di ingresso in luogo della velocità. Quest'ultima tipologia di condizione di inlet, è necessaria quando non è noto se il flusso entra o esce dalla superficie di ingresso, ma è nota la pressione.

La condizione di uscita maggiormente utilizzata dai software CFD, è quella di “pressure outlet”. L'utilizzo di questa tipologia di condizione di uscita è appropriato nel caso siano presenti più uscite e nel caso in cui il flusso di uscita sia vicino a una condizione di flusso completamente sviluppato.

2) Condizioni alle pareti (walls)

La condizione al contorno usuale per la velocità alle pareti è la “no-slip condition”: la velocità relativa tra la parete e il fluido è posta pari a zero. Questa condizione può essere inappropriata per fluidi non newtoniani e sistemi multifase. Mentre per il trasferimento di calore ci sono diverse scelte per le condizioni al contorno, ad esempio: flusso di calore fisso, temperatura fissa, trasferimento di calore convettivo, trasferimento di calore per radiazione o una combinazione di queste condizioni al contorno. Le simulazioni svolte nel capitolo 5 non prevedono nessuno scambio di calore e i fluidi interessati sono fluidi newtoniani, perciò la condizione al contorno assegnata alle pareti del dominio sarà sempre di tipo “no-slip condition”.

Oltre alle condizioni al contorno è, inoltre, molto importante definire le condizioni iniziali [16]. Poiché le equazioni di Navier–Stokes e l’equazione di continuità non sono equazioni lineari e contengono, oltre alle derivate spaziali, anche quelle temporali, la risoluzione avviene discretizzando il problema e risolvendolo in maniera iterativa. È necessario quindi avere una soluzione iniziale “di tentativo” da cui il risolutore può iniziare le iterazioni. Più le condizioni iniziali sono prossime alla soluzione esatta, minore sarà il numero di iterazioni necessario a raggiungere una soluzione accettabile. È inoltre necessario specificare le condizioni iniziali per tutte le variabili che devono essere calcolate.

4.1.3 Discretizzazione del modello

Nella maggior parte dei casi di interesse pratico, non è possibile risolvere le equazioni di Navier-Stokes analiticamente. Per questo per risolvere tali equazioni si ricorre a un metodo numerico. La strategia del CFD è quella di rimpiazzare il dominio continuo con un dominio discreto utilizzando una griglia [17]. Nel dominio continuo ogni variabile di flusso è definita ad ogni punto del dominio, mentre nel dominio discreto ogni variabile è definita solo nei punti della griglia (nodi). In questo modo è possibile risolvere le equazioni solamente nei nodi, i valori negli altri punti si ottengono per interpolazione dei valori ottenuti nei punti della griglia. Le equazioni differenziali che governano il moto del fluido e le condizioni al contorno sono definite nelle variabili continue p (pressione) e v (velocità). Queste possono essere approssimate nel dominio discreto dalle variabili discrete p_i e v_i . Il sistema discreto così ottenuto è un ampio insieme di

equazioni algebriche nelle variabili discrete. Esistono tre modelli di discretizzazione utilizzati dai software CFD [17]:

- Alle differenze finite: consiste nel sostituire le derivate con il loro rapporto incrementale così che i termini differenziali diventino dei termini algebrici. Data l'equazione differenziale lineare in una dimensione:

$$\frac{du}{dx} + u = 0 \quad 0 < x < 1; u(0) = 0$$

Il dominio viene suddiviso in i nodi, e la distanza tra ogni nodo è pari a Δx . Per ogni nodo si ha:

$$\left(\frac{du}{dx}\right)_i + u_i = 0$$

Dove il pedice i indica il nodo i -esimo. La rappresentazione in serie di Taylor di u_{i-1} è:

$$u_{i-1} = u_i - \Delta x \left(\frac{du}{dx}\right)_i + O(\Delta x^2)$$

Da cui:

$$\left(\frac{du}{dx}\right)_i = \frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} + O(\Delta x^2)$$

Considerando il termine $O(\Delta x^2)$ trascurabile, l'equazione iniziale diventa:

$$\frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} + u_i = 0$$

Questa è un'equazione algebrica che può essere facilmente risolta numericamente da un calcolatore. Il metodo di discretizzazione alle differenze finite è il metodo più semplice, tuttavia la maggior parte dei software CFD utilizza il metodo ai volumi finiti oppure il metodo agli elementi finiti, che permettono la modellazione di flussi in geometrie complesse.

- Agli elementi finiti: viene utilizzato nell'analisi strutturale e nella fluidodinamica per numeri di Reynolds maggiori alle decine di migliaia.
- Ai volumi finiti: è la più diffusa in ambito CFD ed è quella che viene utilizzata dal software di simulazione Ansys Fluent, usato nelle simulazioni svolte in questo studio. Questo metodo verrà spiegato nel dettaglio nel paragrafo successivo.

4.1.4 Metodo di discretizzazione ai volumi finiti

Si suddivide il dominio di fluido in piccoli volumi, detti celle. La forma integrale delle equazioni di conservazione viene applicata al volume di controllo definito da ciascuna cella, in questo modo si ottiene un sistema di equazioni algebriche per ciascuna di esse [17]. Per esempio, la forma integrale dell'equazione di conservazione della massa per fluidi incomprimibili è data da:

$$\oint_S \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

Dove S è la superficie del volume di controllo e \mathbf{n} è il vettore normale uscente da tale superficie. Fisicamente, questa equazione indica che il flusso netto di volume nel volume di controllo è zero. Si consideri la cella rettangolare mostrata in figura 4.1[17]:

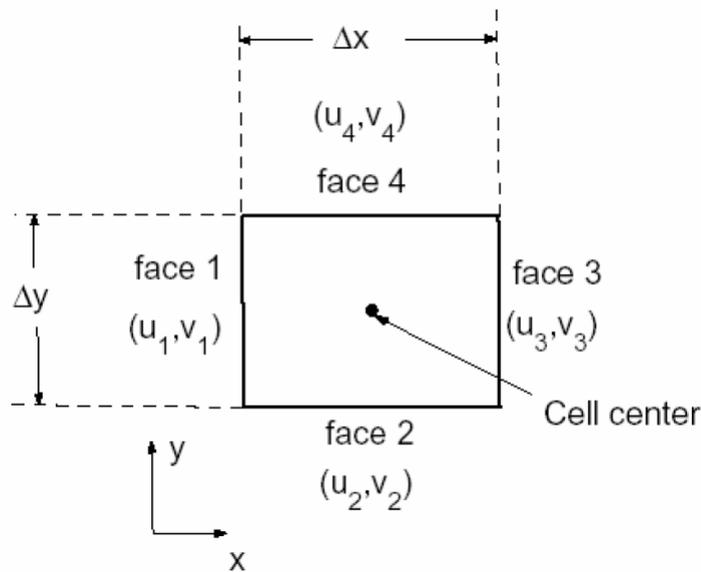


Fig.4.1 rappresentazione cella 2D e applicazione del metodo di discretizzazione a volumi finiti (Mohammad Rahmati. (2020). Introduction to CFD. Northumbria University).

La velocità nella faccia i -esima è da:

$$\mathbf{v}_i = u_i \mathbf{i} + v_i \mathbf{j}$$

Applicando la legge di conservazione della massa sul volume di controllo dato dalla cella si ottiene:

$$-u_1 \Delta y - v_2 \Delta x + u_3 \Delta y + v_4 \Delta x = 0$$

Questa è la forma discreta dell'equazione di continuità per la cella: le derivate parziali che esprimono il principio di conservazione della massa possono essere riscritte in ogni cella come contributo algebrico. L'equazione da risolvere, quindi, viene sostituita in ogni cella da un insieme di equazioni algebriche lineari. Di solito le variabili vengono calcolate nei centri delle celle e i valori sulle facce (u_1, v_2 , ecc.) sono ottenuti interpolando opportunamente i valori nei centri di celle adiacenti. La discretizzazione delle equazioni di conservazione della quantità di moto (equazioni di Navier-Stokes) e di conservazione dell'energia si ottengono in modo analogo. Inoltre questo esempio di discretizzazione secondo il metodo ai volumi finiti può essere esteso a celle di qualsiasi forma sia in 2D che in 3D. Le equazioni algebriche vengono risolte numericamente in modo iterativo: i calcoli vengono ripetuti varie volte finché non si raggiunge la convergenza (di cui si tratterà nel paragrafo 4.1.5).

La discretizzazione del dominio causa un errore numerico nella soluzione, detto errore di discretizzazione [17][28]. Questo errore diminuisce quando la grandezza di ogni cella tende a zero, perciò una sufficiente diminuzione della grandezza delle celle riduce questo errore. Tuttavia se la grandezza delle celle viene ridotta eccessivamente, il numero di celle presenti aumenterebbe notevolmente, di conseguenza aumenterebbe anche lo sforzo computazionale richiesto e la soluzione delle equazioni di conservazione su tutte le celle del dominio potrebbe richiedere tempi di simulazione proibitivi.

Un altro aspetto di cui tenere conto è la non-linearità dell'equazioni di conservazione della quantità di moto, dovuta al termine convettivo $\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}$ ed al termine viscoso $\mu \nabla^2 \mathbf{v}$ [17][28]. Inoltre fenomeni come la turbolenza o le reazioni chimiche introducono ulteriori non-linearità. La natura altamente non-lineare delle equazioni che governano il moto dei fluidi rende difficoltoso ottenere soluzioni numeriche accurate per flussi complessi di interesse pratico. La strategia utilizzata dai software CFD è quella di linearizzare le equazioni rispetto ad un valore ipotizzato della soluzione e iterare finché l'ipotesi non coincide con la soluzione a un livello di tolleranza specificato. Questo procedimento viene illustrato nell'esempio seguente. Si consideri l'equazione non lineare data da [17] :

$$\frac{du}{dx} + u^2 = 0 \quad 0 < x < 1; u(0) = 0$$

Per semplicità della trattazione si consideri la discretizzazione secondo il metodo alle differenze finite: tale equazione si può quindi così discretizzare:

$$\frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} + u_i^2 = 0$$

Questa è un'equazione algebrica non lineare, per via della presenza del termine u_i^2 .

Per linearizzare tale equazione si ipotizza un valore soluzione di tentativo u_{gi} e si definisce $\Delta u_i = u_i - u_{gi}$

$$\text{Quindi } u_i^2 = u_{gi}^2 + 2u_{gi}\Delta u_i + \Delta u_i^2$$

Si ipotizza che $\Delta u_i \ll u_{gi}$ perciò si ha:

$$u_i^2 \cong u_{gi}^2 + 2u_{gi}\Delta u_i = u_{gi}^2 + 2u_{gi}(u_i - u_{gi})$$

Quindi:

$$u_i^2 \cong 2u_{gi}u_i - u_{gi}^2$$

Perciò l'equazione algebrica linearizzata è:

$$\frac{u_i - u_{i-1}}{\Delta x} + 2u_{gi}u_i - u_{gi}^2 = 0$$

Da qui inizia il procedimento iterativo: nella prima iterazione si parte dal valore ipotizzato u_{gi} . Per ogni iterazione successiva, il valore u_i ottenuto nell'iterazione precedente viene utilizzato come valore ipotizzato. In particolare:

iterazione 1: $u_{gi}^{(1)}$ (ipotesi iniziale)

iterazione 2: $u_{gi}^{(2)} = u_i^{(1)}$

iterazione 3: $u_{gi}^{(3)} = u_i^{(2)}$

iterazione n: $u_{gi}^{(n)} = u_i^{(n-1)}$

Dove l'apice indica l'avanzamento del processo iterativo. Si continuano le iterazioni fino a quando la soluzione converge (paragrafo 4.1.5).

4.1.5 Convergenza

Riprendendo quanto detto nel paragrafo precedente, il processo iterativo prosegue fino a quando la differenza tra i valori di u_i e u_g , chiamata residuo, non raggiunge un valore sufficientemente piccolo. Si può definire il residuo R come il valore RMS (root mean square) della differenza tra u e u_g su tutta la griglia [17]:

$$R = \sqrt{\frac{\sum_i^N (u_i - u_{gi})^2}{N}}$$

È utile scalare questo residuo con il valore medio di u nel dominio. Un residuo non scalato di 0,01 sarebbe relativamente piccolo se il valore medio di u nel dominio fosse di 5000 ma sarebbe relativamente grande se il valore medio fosse 0,1. Il ridimensionamento assicura che il residuo sia una misura relativa piuttosto che assoluta. Dividendo il residuo precedentemente definito per il valore medio di u nel dominio, si ottiene:

$$R = \left(\sqrt{\frac{\sum_i^N (u_i - u_{gi})^2}{N}} \right) \left(\frac{N}{\sum_i^N u_i} \right) = \frac{\sqrt{N \sum_i^N (u_i - u_{gi})^2}}{\sum_i^N u_i}$$

Si terminano le iterazioni quando il residuo R risulta inferiore ad un certo valore, indicato come il criterio di convergenza. Il criterio di convergenza utilizzato per ciascuna equazione di conservazione dipende dal software utilizzato e dal problema analizzato. Solitamente i software CFD, tra cui anche Ansys, basano i criteri di convergenza su uno o più parametri, proponendo dei valori di default.

4.1.6 Meshing

In questo paragrafo verranno illustrate le principali caratteristiche riguardo alla griglia che suddivide il dominio in celle, ovvero la mesh [16]. Il processo della generazione della mesh è molto importante nelle simulazioni CFD, infatti mesh non adeguate inficiano il calcolo, impedendo la convergenza del risultato. Ci sono due tipologie di mesh: la mesh strutturata e quella non strutturata. La prima è formata da quadrilateri nel caso 2D e da esaedri (elementi a sei facce) nel caso 3D (Fig.4.2). La seconda è costituita da elementi differenti: quadrilateri e triangoli nel caso 2D e tetraedri, esaedri, piramidi, prismi e dodecaedri nel caso 3D (Fig.4.2) [16]. Solitamente una mesh strutturata

presenta proprietà numeriche migliori, tuttavia non è sempre possibile utilizzare questa tipologia di mesh per geometrie complesse.

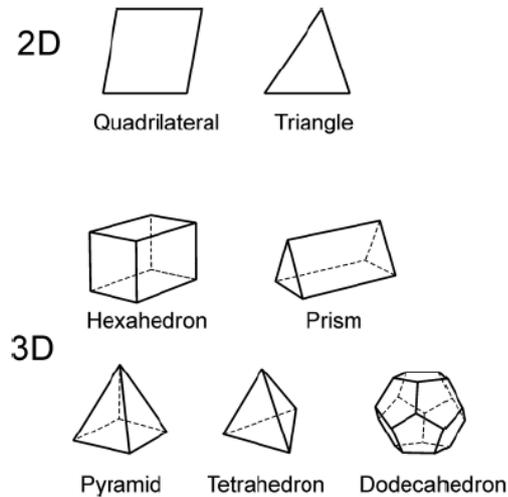


Fig. 4.2 tipologie di celle nel caso 2D e 3D Andersson, B., Andersson, R., Håkansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., & Wachem, V. B. (2011). Computational Fluid Dynamics for Engineers (1st ed.). Cambridge University Press.

Come già detto le dimensioni delle celle (Δx) giocano un ruolo fondamentale per quanto riguarda l'accuratezza della soluzione: più fitta è la mesh più accurata sarà la soluzione. In molti casi è utile utilizzare griglie con differenti dimensioni in differenti zone del dominio. Per esempio, in prossimità delle pareti che delimitano corpi di interesse per simulazione, è opportuno utilizzare mesh molto fitte, mentre per le zone lontane da queste pareti non è necessario avere celle di dimensioni ridotte: si crea una mesh i cui elementi aumentano di dimensioni mano a mano che ci si allontana dalle pareti del corpo.

4.1.6.1 Overset mesh

I software CFD mettono a disposizione dell'utente una particolare gestione della mesh, che permette di semplificare e velocizzare le simulazioni che presentano parti in movimento. Si tratta dell'overset mesh [21][23]. In generale, una difficoltà comune nel simulare moti complessi di fluidi, sta nel fatto che alcune geometrie possono non essere adeguatamente rappresentate da un'unica mesh continua. In molti casi, infatti, caratteristiche geometriche distinte sono rappresentate al meglio da diversi tipi di mesh. La preparazione della mesh finale può quindi essere lunga e complicata. L'overset mesh prevede di sovrapporre mesh distinte, ognuna adeguata alla geometria del componente che contiene e al suo ruolo nella simulazione. In questo modo, consente di gestire

agevolmente lo spostamento di corpi nel dominio di simulazione, senza dover creare una mesh totalmente nuova ad ogni spostamento di questi. Utilizzando il metodo di Overset meshing, generalmente, si creano due mesh distinte [21]:

- La mesh del background, che contiene tutto il dominio.
- Una mesh locale che contiene una componente geometrica particolare.

La mesh di ciascuna componente viene, quindi, sovrapposta a quella del background. Mentre la componente si sposta sul background, cambia la zona di sovrapposizione e le soluzioni dei sistemi definiti sulle due mesh vengono relazionate interpolando i dati tra le varie zone sovrapposte. In base alla relazione tra le soluzioni definite nel dominio di background e della mesh locale, le celle delle due mesh sono suddivise in 4 tipologie (Fig.5.17) [21]:

- “active cells”, dove vengono risolte le equazioni che governano il problema.
- “passive cells”, dove nessuna equazione viene risolta.
- “acceptor cell” e “donor cells”, sono le celle di collegamento tra le due mesh.
- “orphan cells”, sono delle celle di tipo “acceptor cells” a cui non corrisponde nessuna cella di tipo “donor cell”. La presenza di orphan cells va evitata, indica che vi è una sovrapposizione insufficiente tra le due mesh, oppure che la risoluzione delle mesh non è adeguata.

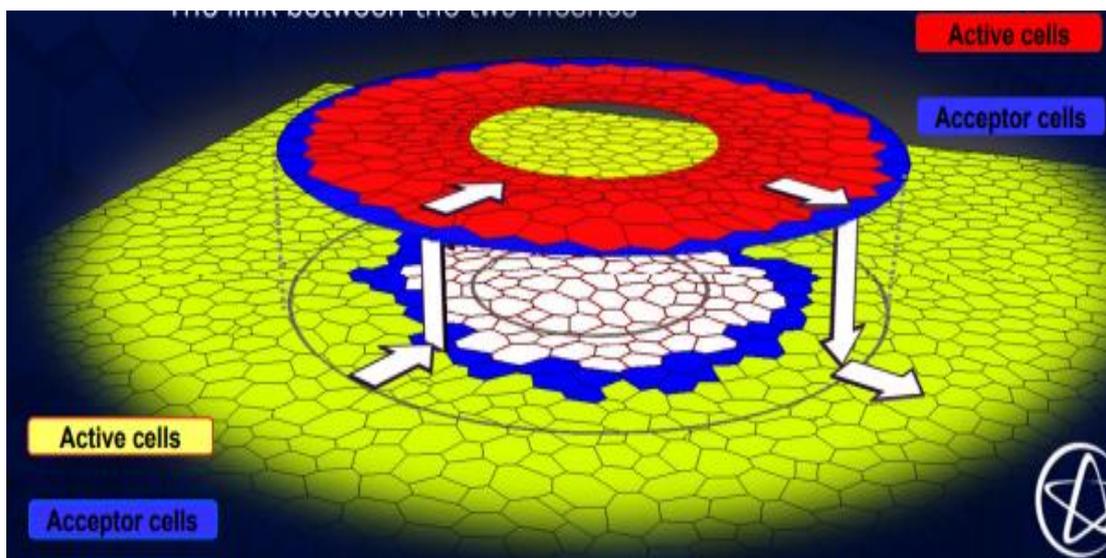


Fig.5.17 rappresentazione schematica delle tipologie di celle presenti nella mesh di tipo overset.
(Best Practices Workshop: Overset Meshing. (2013). [Slides].

http://mdx2.plm.automation.siemens.com/sites/default/files/Presentation/Kynan_Overset_Final.pdf

L'utilizzo di una mesh di tipo overset consente di evitare l'utilizzo di altri metodi di gestione della mesh dinamica, come i metodi di remeshing e smoothing, che non sempre consentono di avere un buon controllo delle caratteristiche della mesh locale e sono più onerosi computazionalmente, poiché prevedono una rigenerazione della mesh ad ogni time step. Utilizzando l'overset mesh, invece, le mesh non devono deformarsi per permettere il movimento della geometria [23].

4.1.7 Modello bifase: modello VOF

Nella fluidodinamica computazionale, il modello "Volume of Fluid" (VOF) è una tecnica numerica che permette di tracciare e localizzare una superficie libera (o un'interfaccia fluido-fluido) [20]. Il metodo si basa sull'idea di una funzione frazionaria C , funzione scalare definita come la frazione di volume di un fluido (per esempio l'aria) nel volume di controllo (il volume di una cella della griglia computazionale). Quando in una cella non è presente l'aria il valore di C è zero; quando nella cella è presente tale fluido, $C = 1$; quando nella cella è presente l'interfaccia tra i due fluidi (interfaccia tra acqua e aria), $0 < C < 1$. Con questo metodo, la superficie libera non è definita nettamente, ma è distribuita sull'altezza di una cella. Pertanto, per ottenere risultati accurati, è necessario aumentare la risoluzione della griglia in prossimità della zona di interfaccia. Se consideriamo un sistema composto da n -fluidi, per il fluido m -esimo l'equazione di trasporto è data da:

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla C_m = 0$$

Dove ∇ è il gradiente e \mathbf{v} un vettore $\in \mathcal{R}^n$. Per ogni cella vale inoltre il seguente vincolo:

$$\sum_{m=1}^n C_m = 1$$

Per ogni cella proprietà come la densità sono quindi calcolate come una media delle frazioni di volume di tutti i fluidi presenti nella cella, come segue:

$$\rho = \sum_{m=1}^n \rho_m C_m$$

Queste proprietà vengono poi utilizzate per risolvere un unico sistema di equazioni di equilibrio della quantità di moto.

Il metodo VOF non è dispendioso dal punto di vista computazionale ed è in grado di affrontare problemi altamente non lineari in cui la superficie libera subisce bruschi cambiamenti topologici. Utilizzando il metodo VOF, si evita anche di dover utilizzare complicati algoritmi di deformazione della mesh per il tracciamento della superficie libera.

4.1.8 Modelli di turbolenza

Esistono due differenti tipologie di regime per i moti dei fluidi: il regime laminare e quello turbolento. I flussi laminari sono caratterizzati da campi di velocità poco variabili nello spazio e nel tempo in cui i singoli strati di fluido si muovono l'uno sull'altro senza generare correnti incrociate. Questi flussi si verificano per numeri di Reynolds bassi/moderati e sono presenti quando la viscosità del fluido è sufficientemente grande da smorzare eventuali perturbazioni. Al contrario, il moto di un fluido in regime turbolento è caratterizzato da ampie fluttuazioni di velocità e pressione sia nello spazio che nel tempo. Flussi turbolenti si verificano per numeri di Reynolds alti [17]. Per analizzare moti turbolenti si utilizza la scomposizione di Reynolds [16]:

$$\mathbf{v} = \langle \mathbf{v} \rangle + \mathbf{v}' = \mathbf{V} + \mathbf{v}'$$

$$p = \langle p \rangle + p' = P + p'$$

Dove \mathbf{v}' e p' sono gli scarti dai valori medi \mathbf{V} e P . Tali scarti, per definizione, hanno media nulla:

$$\langle \mathbf{v}' \rangle = 0 \text{ e } \langle p' \rangle = 0$$

Applicando alle equazioni di conservazione la decomposizione di Reynolds si ottengono le equazioni che governano il moto turbolento [16].

L'equazione di continuità per il moto turbolento diventa:

$$\frac{\partial (V_i + v'_i)}{\partial x_i} = 0$$

Mentre l'equazione di Navier-Stokes diventa:

$$\rho \frac{\partial V_i}{\partial t} + V_i \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\rho \langle v'_i v'_j \rangle)}{\partial x_j}$$

Questa equazione viene chiamata equazione di Reynolds. L'insieme di equazioni formato dall'equazione di continuità e dalle tre equazioni di Navier-Stokes viene comunemente chiamato "RANS equations". Come si può notare l'equazione di Reynolds è molto simile a quella di Navier-Stokes, tuttavia presenta un termine in più (l'ultimo).

Il termine $\frac{\partial(\rho\langle v'_i v'_j \rangle)}{\partial x_j}$ complica molto la soluzione delle equazioni del moto, poiché ora le quattro equazioni scalari (di continuità e le 3 equazioni di Navier-Stokes) non sono sufficienti a descrivere le 10 incognite: $V_i, P, \rho\langle v'_i v'_j \rangle$. Perciò è possibile ottenere una soluzione solamente aggiungendo delle ulteriori equazioni. Tali equazioni aggiuntive vengono date dai modelli di turbolenza.

Esistono numerosi modelli di turbolenza, tuttavia in questa trattazione verrà brevemente descritto il modello k-epsilon, che è quello utilizzato nelle simulazioni svolte in questo studio (capitolo 5).

Nel modello k-epsilon vengono introdotte altre due equazioni differenziali di bilancio: una riferita all'energia cinetica turbolenta k e l'altra alla velocità di dissipazione ε [27]. Siano:

$$k = \frac{1}{2} \langle (v'_i)^2 \rangle$$

$$\varepsilon = 2 \nu_T E_{ij} E_{ij}$$

Le equazioni di bilancio per l'energia cinetica turbolenta e per la velocità di dissipazione sono:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k V_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_T E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon V_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_T E_{ij} E_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

Tali equazioni significano:

Variazione di k (o ε) + Trasporto k (o ε) per convezione = trasporto k (o ε) per diffusione + Produzione k (o ε) - Riduzione k (o ε)

Dove:

- $E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v'_j}{\partial x_i} \right)$
- μ_T rappresenta la viscosità turbolenta: $\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$
- I termini: $C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_\varepsilon, \sigma_k$ sono delle costanti il cui valore può essere derivato sperimentalmente e nelle simulazione CFD tali valori sono assegnati.

4.2 ANSYS FLUENT SOFTWARE

Come precedentemente spiegato, la fluidodinamica computazionale (CFD) è l'insieme di tutti i metodi di risoluzione delle equazioni di conservazione che governano il moto dei fluidi. I software CFD risolvono i problemi fluidodinamici basandosi su griglie di calcolo che riproducono le caratteristiche del sistema studiato. Per arrivare a soluzioni precise i programmi CFD hanno bisogno di precise condizioni al contorno per ciascuna superficie descritta nel dominio.

Il software Ansys Fluent attualmente è uno dei software di simulazione CFD più diffusi al mondo [23][27]. Permette di modellare fenomeni di ogni tipo: flusso di fluidi, moti turbolenti, trasferimento di calore e reazioni chimiche. Per le simulazioni svolte nel capitolo 5 è stato utilizzato il software Ansys Fluent 19.2. Questo software è dotato di un foglio di lavoro (workbench) nel quale si crea lo schema per la risoluzione del problema (Fig.4.3).

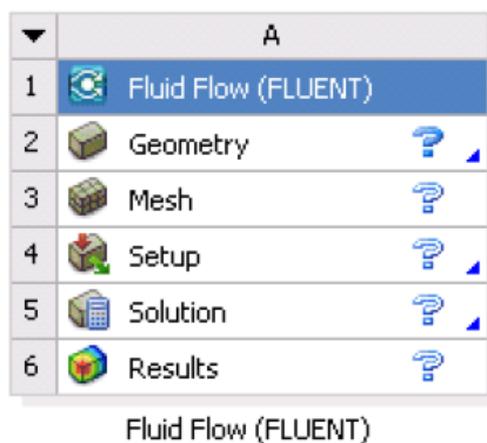


Fig 4.3 Schema del progetto di una simulazione numerica in Ansys Fluent, visualizzato nel workbench.

Nel workbench vengono visualizzati tutti i passaggi necessari per lo svolgimento delle simulazioni CFD (Fig.4.4). Ad ogni passaggio corrisponde un sottoprogramma che permettere di:

- Definire la geometria del problema: il modello geometrico non è altro che un disegno in 3D (o 2D), ed è la base di partenza per qualsiasi analisi CFD.
- Definire le caratteristiche della mesh: questo passaggio consiste nella creazione della griglia computazionale secondo il metodo di discretizzazione ai volumi finiti (paragrafo 1.4/1.5). La mesh, per fornire dei risultati attendibili, dovrà il più possibile adattarsi alla geometria del problema, ad esempio infittendosi nei punti con geometria più complessa.
- Impostare i modelli utilizzati e le condizioni al contorno (set-up): in questo passaggio viene definita la fisica del problema. Vengono definiti i modelli utilizzati (tra cui anche il modello di turbolenza) e vengono definite le condizioni al contorno.
- Svolgimento del calcolo: in questo passaggio il simulatore risolve numericamente le equazioni di conservazione in ogni nodo della mesh.
- Visualizzare i risultati: il sottoprogramma relativo alla voce “results” permette di visualizzare graficamente i risultati ottenuti. Questo passaggio viene comunemente chiamato “post-processing”.

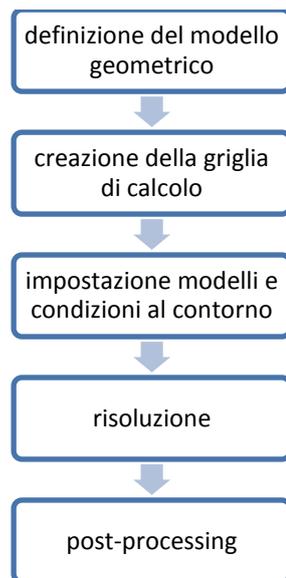


Fig.4.4. schema dei passaggi necessari allo svolgimento di una qualsiasi simulazione CFD

4.3 METODO UTILIZZATO PER L'ANALISI IN FREQUENZA

Nel capitolo 6 verrà svolta un'analisi in frequenza dei risultati ottenuti dalle simulazioni, in particolare verranno analizzate le forze che si esercitano su un corpo galleggiante.

4.3.1 Analisi armonica di Fourier

In questo paragrafo si illustrerà brevemente lo svolgimento di un'analisi armonica [22].

Sia $f(t)$ una funzione periodica del tempo di periodo T . In matematica, la serie di Fourier è una rappresentazione di una funzione periodica mediante una combinazione lineare di funzioni sinusoidali. La funzione $f(t)$, poiché periodica per ipotesi, può essere rappresentata dalla serie di Fourier come segue:

$$f(t) = a_0 + \sum_1^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_1^{\infty} b_n \sin(n\omega t)$$

Dove a_n e b_n sono i coefficienti da calcolare.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin(n\omega t) dt$$

La serie di Fourier rappresenta un numero infinito di componenti di frequenza che addizionate danno la funzione $f(t)$. Queste componenti di frequenza costituiscono uno spettro discreto e le ampiezze corrispondenti ad ogni frequenza discreta sono date dai coefficienti a_n e b_n , in particolare l'ampiezza c_n è data da:

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

Tutte le componenti di frequenza sono armoniche della frequenza fondamentale $1/T$. Sebbene lo spettro di frequenze possa consistere di un numero infinito di frequenze discrete, le loro ampiezze diventano sempre più piccole all'aumentare di n , ed in pratica è sufficiente considerare solo un numero finito di frequenze.

Nel capitolo 6 si svolgerà un'analisi armonica della forza agente sul corpo galleggiante del tutto analoga a quella appena spiegata. Dopo aver verificato che l'andamento della

forza sia periodico nel tempo, la funzione $f(t)$ rappresenterà l'andamento della forza. Si considerano le prime 20 armoniche, ovvero $n=20$. Si calcolano i coefficienti a_n e b_n , e quindi c_n per mezzo di un codice in Visual Basic, riportato in appendice A. Infine si riporta su un grafico l'ampiezza di ciascuna armonica, ottenendo così lo spettro discreto della forza.

4.3.2 Analisi in frequenza secondo la trasformata di Fourier

In questo paragrafo si illustrerà brevemente lo svolgimento di un'analisi in frequenza utilizzando il metodo della trasformata di Fourier [22].

In analisi matematica, la trasformata di Fourier è un il modello dinamico lineare a trasformata integrale, cioè un operatore che trasforma una funzione in un'altra funzione, che permette di scrivere una funzione dipendente dal tempo nel dominio delle frequenze. Sia, ora, la funzione $h(t)$ una funzione non periodica. La trasformata di Fourier di questa funzione è data da:

$$g(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

Dove f rappresenta la frequenza.

Ciò porta ad uno spettro continuo. In generale $g(f)$ è complessa e si può tracciare la sua ampiezza e fase per avere lo spettro di frequenza della funzione del tempo $h(t)$. La quantità $|g(f)|$ rappresenta l'andamento dell'ampiezza della funzione $h(t)$ rispetto alla frequenza f .

Nel capitolo 6, oltre che all'analisi armonica, si svolgerà anche un'analisi in frequenza di questo tipo. Tale analisi interesserà l'andamento della forza agente su un corpo galleggiante nel caso di interazione tra onda regolare e corpo (paragrafo 5.3) e onda irregolare e corpo (paragrafo 5.4). Per entrambi i casi lo svolgimento dell'analisi in frequenza è lo stesso. La funzione $h(t)$ corrisponde all'andamento della forza nel tempo. Per mezzo del codice in Visual Basic riportato in appendice B, si calcola la quantità $|g(f)|$, che corrisponde all'ampiezza della forza in funzione della frequenza. A questo punto sarà possibile tracciare il grafico dello spettro continuo della forza che agisce su un corpo galleggiante.

5. SIMULAZIONI CFD

In questo capitolo viene spiegato lo svolgimento delle simulazioni CFD effettuate in questo studio. Vengono svolte quattro simulazioni, di complessità crescente.

1. Nella prima (paragrafo 5.1) si simula un'onda marina lineare in un dominio 2D.
2. Nella seconda (paragrafo 5.2), invece, si simula l'interazione tra la stessa onda della prima e un corpo fisso di forma rettangolare.
3. La terza e la quarta simulazione sono le più importanti per questo studio: nella terza (paragrafo 5.3), si simula l'interazione tra la stessa onda della prima simulazione (onda regolare), con un corpo galleggiante libero di muoversi in direzione verticale, di forma e dimensioni uguali a quelle del corpo fisso della seconda simulazione.
4. Nella quarta si riproduce l'interazione tra un'onda irregolare, definita per mezzo dello spettro di JONSWAP, e lo stesso corpo galleggiante della precedente simulazione.

Questo corpo di forma rettangolare costituisce un'approssimazione bidimensionale di una componente oscillante del dispositivo WEC Resen, oggetto di questo studio. Da queste ultime due simulazioni si prenderanno in considerazione i risultati relativi allo spostamento lungo la direzione verticale (y) del corpo e quelli relativi alla forza agente sul galleggiante in direzione verticale. Questi dati verranno poi analizzati nel capitolo 6.

5.1 Modello dinamico lineare adattato al WEC Resen

In questo paragrafo il modello dinamico lineare descritto nel capitolo 3 viene riportato per il caso in esame: l'interazione tra le onde marine e la struttura del dispositivo WEC Resen. Nei capitoli che seguono si confronteranno i risultati ottenuti dalle simulazioni svolte in questo studio con il modello dinamico lineare illustrato in questo paragrafo. Sia nella modellazione lineare che in quella CFD si vuole analizzare l'interazione tra il corpo e l'onda, trascurando le forze di PTO, di fine corsa e di ormeggio. Inoltre, si impone che il corpo sia libero di muoversi solamente in direzione verticale. Quindi l'equazione del moto si può scrivere come segue:

$$(m_a + m)\ddot{y} = -f_v - f_H + f_{exc}$$

Dove m corrisponde alla massa del corpo, mentre \ddot{y} rappresenta l'accelerazione del corpo galleggiante in direzione verticale. f_H è la forza idrostatica, f_v è la forza di smorzamento e f_{exc} è la forza di eccitazione dovuta all'interazione con le onde.

I termini $m_a\ddot{y}$ e f_v rappresentano entrambi delle forze che ostacolano il moto del corpo: nel primo caso si tratta della forza di inerzia dovuta all'interazione tra il corpo in movimento e il fluido circostante, mentre nel secondo caso si tratta della forza di smorzamento dovuta agli effetti viscosi ed all'interazione tra il corpo e le onde generate dal suo movimento. Questi due termini e i termini f_H e f_{exc} rappresentano tutte le varie forze di interazione tra fluido e struttura che entrano in gioco durante l'interazione tra un'onda e un corpo galleggiante. Perciò si può scrivere tale forza di interazione tra fluido e struttura come:

$$f_{FS} = -m_a\ddot{y} - f_v - f_H + f_{exc}$$

Perciò l'equazione che governa il moto del corpo è data da:

$$m\ddot{y} = f_{FS}$$

Nel caso di onde regolari, secondo la teoria lineare, questa forza di interazione tra fluido e struttura è di tipo sinusoidale ed ha frequenza pari a quella dell'onda incidente. Se l'eccitazione è data dalla sovrapposizione di più onde regolari, la forza risultante è anch'essa data dalla sovrapposizione di sinusoidi con frequenze pari alle frequenze delle onde regolari che formano l'eccitazione.

Nelle simulazioni CFD viene calcolata la stessa forza di interazione tra il fluido e la struttura del dispositivo WEC Resen, tenendo conto di tutti gli effetti idrodinamici. Perciò si ha:

$$f_{CFD} = -m_a\ddot{y} - f_v - f_H + f_{exc}$$

Le simulazioni CFD, come già detto, non utilizzano un modello numerico lineare. Nel capitolo 6 si svolgerà un'analisi in frequenza delle forze agenti sul corpo galleggiante calcolate per mezzo delle simulazioni. Sarà poi interessante osservare se i risultati ottenuti da questa analisi si avvicinano a quanto previsto dal modello lineare e se questo modello rappresenta un'approssimazione soddisfacente della realtà.

5.2 Simulazione di un'onda 2D

In questa simulazione verrà analizzato l'andamento di un'onda di ampiezza 2 m, lunghezza d'onda di 40 m e periodo di 5,06 s. La superficie libera dell'acqua è posta ad un'altezza di 21 m dal fondale, perciò è il caso di acque profonde (infatti la profondità dell'acqua è maggiore della metà della lunghezza d'onda).

Geometria

Il dominio del problema è un rettangolo di dimensioni 70x35 m e la superficie libera dell'onda è situata a 21 m dal fondale (Fig.5.1)

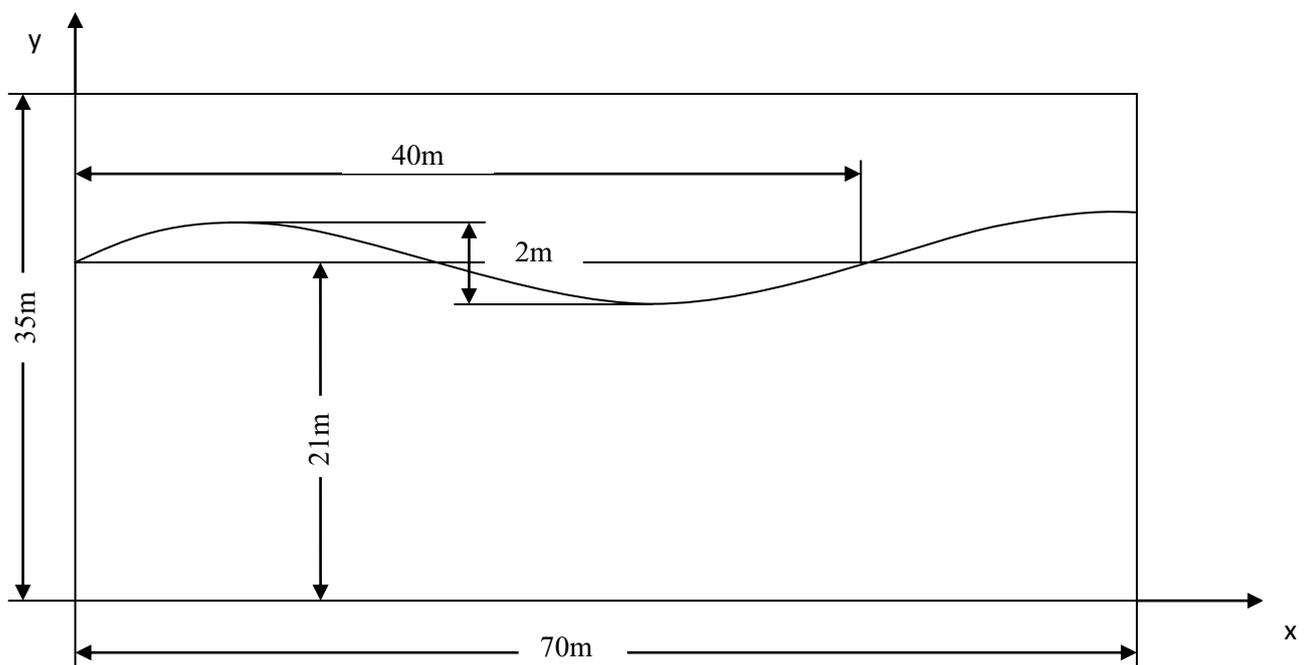


Fig.5.1 Schema della geometria della simulazione di un'onda 2D

Successivamente il dominio viene diviso in tre diverse fasce orizzontali (Fig.5.2), che serviranno a definire tre zone con mesh di dimensioni differenti, come si vedrà in seguito. Le tre zone hanno rispettivamente dimensioni pari a 18 m, 6 m e 11 m.

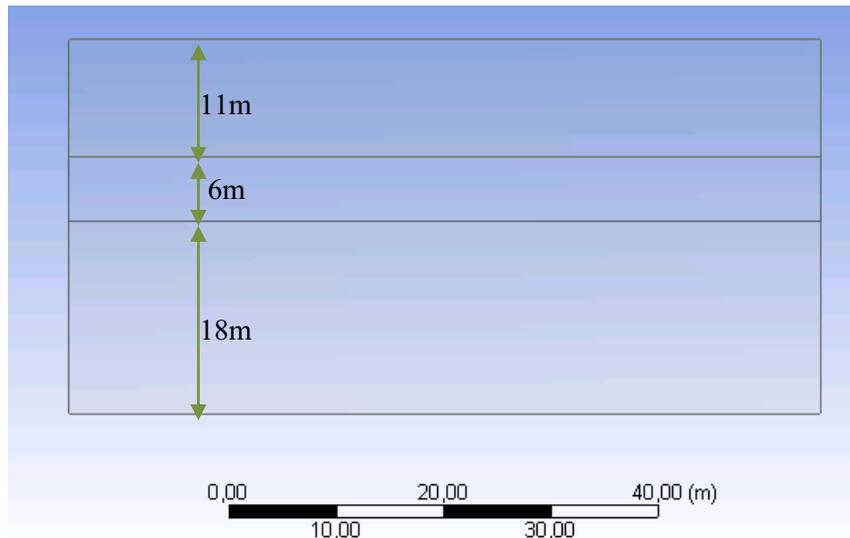


Fig.5.2 Schema della suddivisione del dominio in tre fasce orizzontali.

Mesh

Come già accennato, vengono assegnate tre mesh differenti: la fascia centrale presenta un mesh più fitta rispetto a quella delle due fasce laterali (Fig.5.3), poiché in questa regione è situata la superficie libera dell'onda e perciò è necessario avere elementi di dimensioni minori per poter avere risultati con risoluzione maggiore e ridurre l'errore di discretizzazione. La mesh è formata da elementi rettangolari di dimensioni massime pari a:

- 0,5 m nelle 2 fasce superiore ed inferiore,
- 0,15 m nella fascia centrale.

Con queste dimensioni della griglia si ottengono 27'647 nodi e 26'800 elementi.

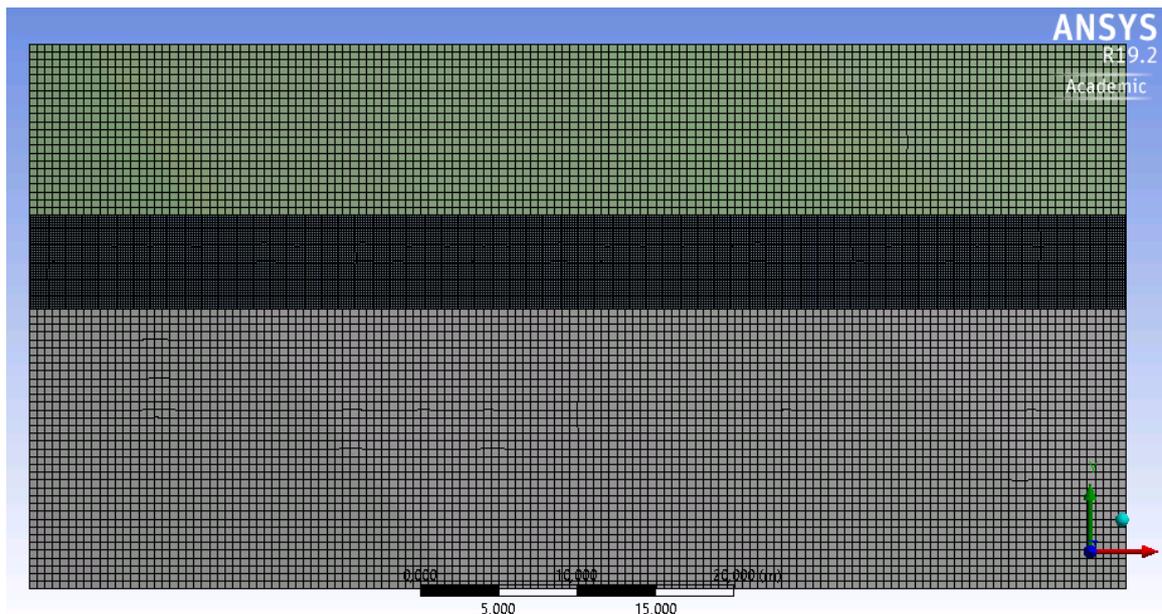


Fig.5.3 Mesh della simulazione di un'onda 2D

Le sezioni sono denominate come riportato in figura 5.4.

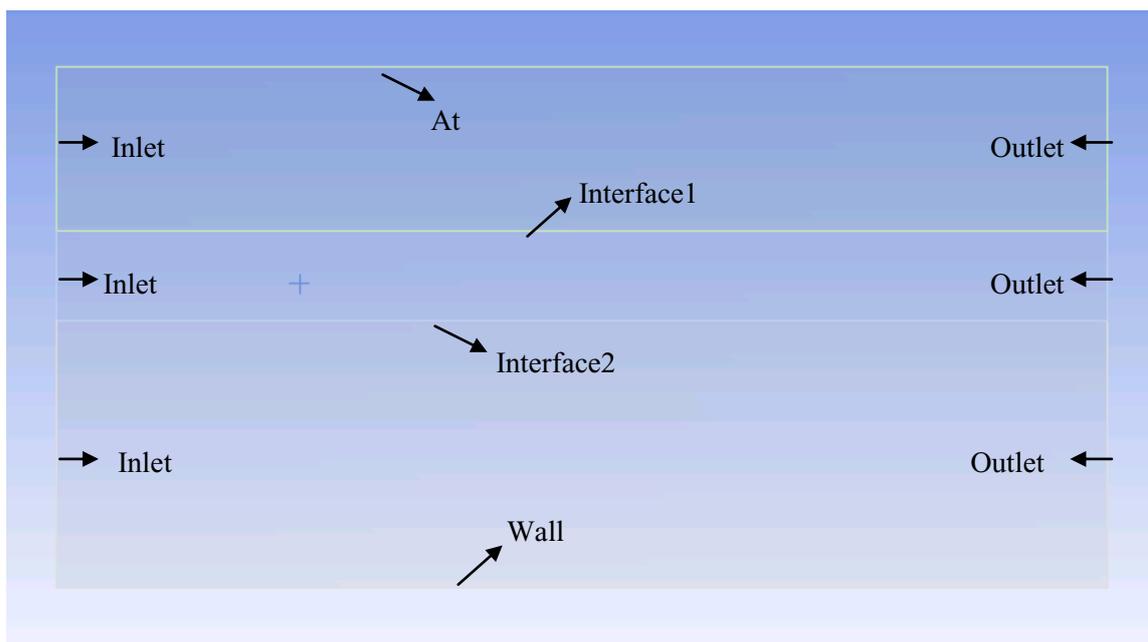


Fig.5.4. Denominazione delle sezioni.

Set-up

La simulazione è di tipo “transient”, poiché il comportamento della superficie dell’acqua sottoposto al passaggio di un’onda è un fenomeno che dipende dal tempo. Inoltre, è assegnata l’accelerazione di gravità: $g=-9,81$ m/s in direzione y .

Il problema è caratterizzato dalla presenza di due fasi: aria (fase primaria) e acqua (fase secondaria), per questo per la simulazione viene utilizzato il metodo “Volume of fluid” (VOF), illustrato nel capitolo precedente (paragrafo 4.1.7). In particolare si utilizza il modello “open channel flow” [23]. (Fig.5.5)

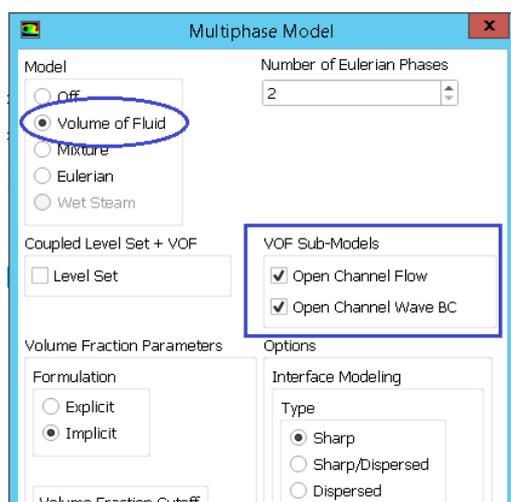


Fig.5.5 impostazioni del modello VOF e Open Channel Flow

L’utilizzo del metodo VOF e di del modello Open Channel Flow permette di simulare onde. In particolare la loro propagazione e il comportamento della superficie dell’acqua. Infatti, selezionando il modello Open channel flow, è possibile definire nelle condizioni al contorno le caratteristiche dell’onda che si vuole simulare. Come si vedrà successivamente le caratteristiche dell’onda vengono definite nelle condizioni al contorno dell’Inlet, mentre nelle condizioni dell’Outlet viene specificata l’altezza a cui si trova la superficie libera.

Il modello di turbolenza utilizzato in questa simulazione è il modello k-epsilon, ed è descritto nel capitolo 4.

Le condizioni al contorno sono poste come segue:

1. Alle sezioni “Inlet”, “Inlet1” e “Inlet2” vengono assegnate le condizioni al contorno di “velocity inlet”. Come già accennato, in queste sezioni vengono assegnati valori di flusso coerenti con le caratteristiche dell’onda: la superficie

libera media è posta ad un'altezza di 21m, l'ampiezza dell'onda è pari a 2m e la lunghezza d'onda è di 40m. Viene utilizzata la “Second order stoke wave theory” (descritta nel capitolo 2) e le onde sono definite come “short gravity waves”, poiché l'unica forza agente è la forza di gravità (capitolo 2). (Fig.5.6).

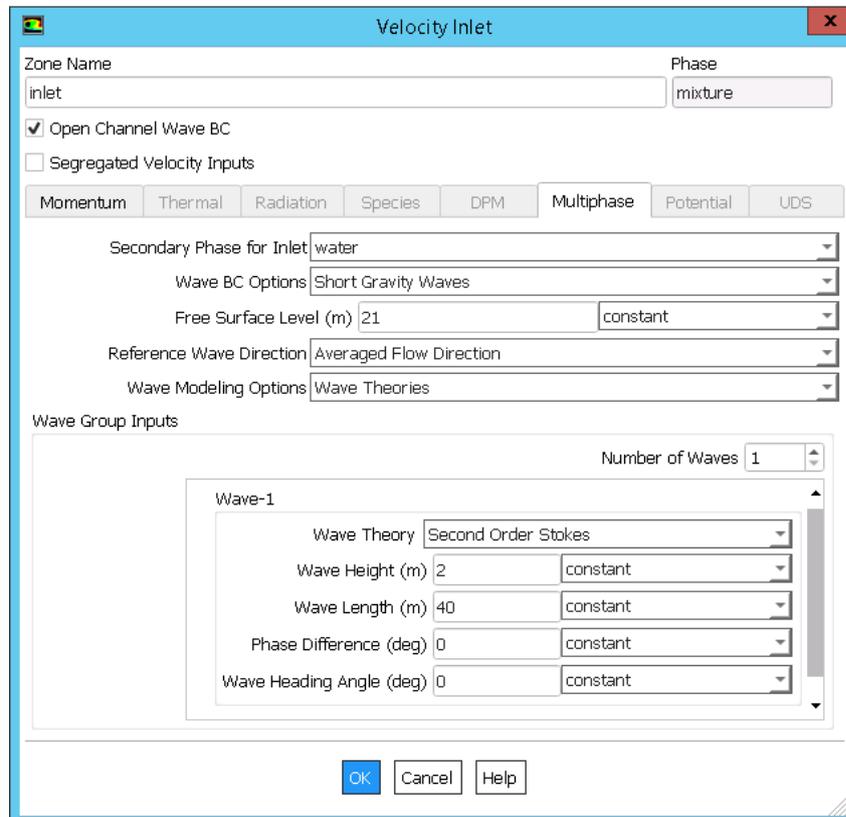


Fig.5.6 impostazioni dell'Inlet

2. Alle sezioni “atm”, “Outlet”; “Outlet1” e “Outlet2” vengono assegnate le condizioni al contorno di “pressure-outlet” e anche in queste sezioni si impone la superficie libera dell'onda ad un'altezza di 21 m, mentre il fondo viene posto a 0 m. (Fig.5.7)

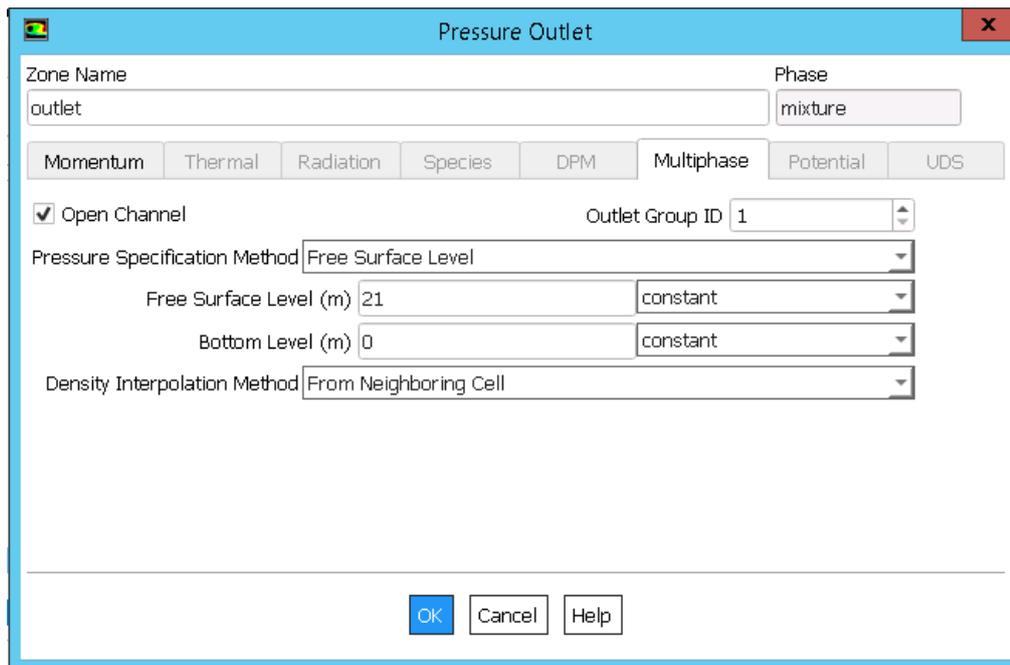


Fig.5.7 impostazioni dell'Outlet

3. La tipologia delle sezioni “Interface1” e “Interface2” è definita come “interface”.
4. La condizione al contorno assegnata alla sezione “wall” è una condizione di parete, ovvero no-slip condition.

Nelle condizioni operative la densità specificata è pari a quella dell'aria (ovvero $1,225 \text{ kg/m}^3$) e la pressione ad un'altezza di 30 m (in prossimità del limite superiore del dominio) è uguale a quella atmosferica (101325 Pa).

Per quanto riguarda le “Cell-zone conditions” si seleziona l'opzione “numerical beach treatment”, per evitare che negli Outlet si generino delle onde riflesse. Le impostazioni utilizzate per il Numerical Beach sono riportate in figura 5.8.

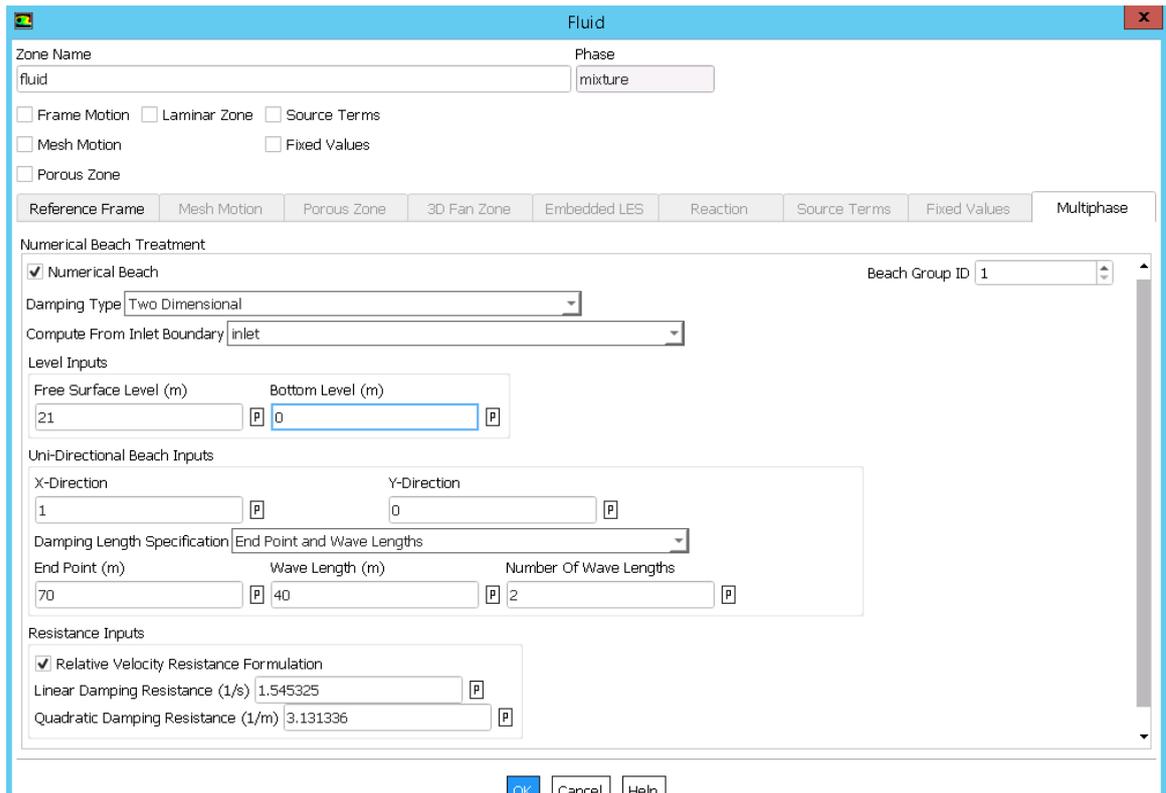


Fig.5.8 impostazioni del Numerical Beach

La tipologia di inizializzazione utilizzata è quella ibrida; mentre come metodo di inizializzazione si impone il metodo di tipo “flat”, in questo modo si impone che all’istante iniziale della simulazione sulla superficie che separa aria e acqua non sia presente nessuna onda (la superficie è piatta). (Fig.5.9)

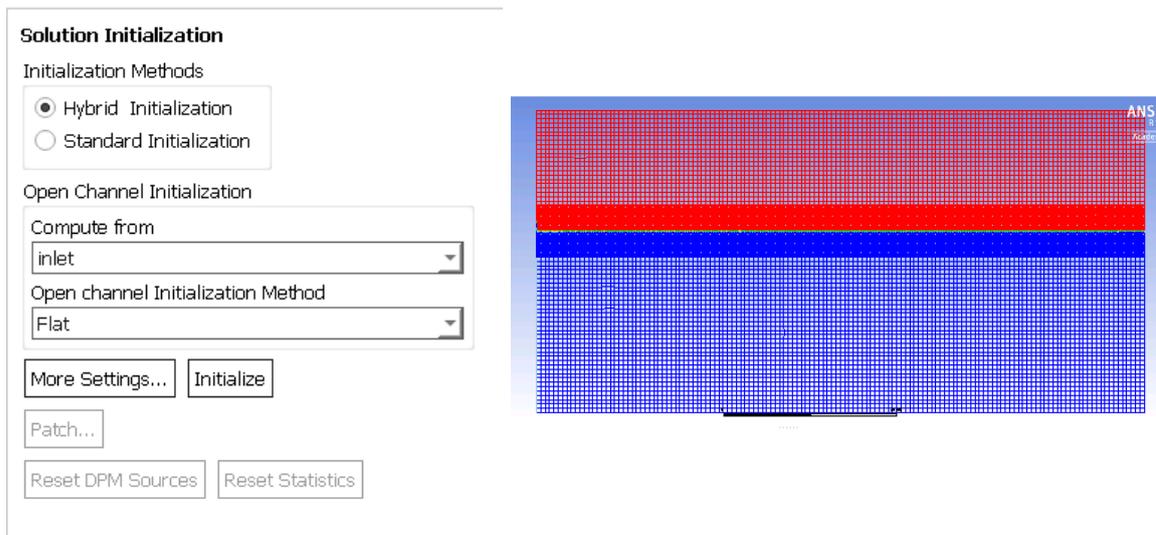


Fig.5.9 impostazioni di inizializzazione della simulazione di un’onda 2D e stato della superficie dell’acqua all’istante iniziale

La simulazione consta di 350 time steps della dimensione di 0,2 s, per un tempo totale simulato di 70 s, che coincide con circa 14 periodi dell'onda. Il numero massimo di iterazioni per ogni time step è pari a 20 (Fig.5.10).

Run Calculation

Check Case... Preview Mesh Motion...

Time Stepping Method: Fixed
Time Step Size (s): 0.2
Number of Time Steps: 350

Settings...

Options

Extrapolate Variables
 Data Sampling for Time Statistics
Sampling Interval: 1
Time Sampled (s): 0
 Solid Time Step
 User Specified
 Automatic

Max Iterations/Time Step: 20
Reporting Interval: 1

Fig.5.10 impostazioni per il calcolo

I risultati di questa simulazione sono riportati nel paragrafo 6.1.

5.3 Simulazione di un onda 2D con corpo fisso

Geometria:

In questa simulazione il dominio del fluido è un rettangolo di dimensioni 70x35 m, come nella simulazione precedente, ma un corpo fisso è inserito nel dominio ed è costituito da un rettangolo di dimensioni 1,8x0,2 m. La base inferiore del corpo fisso è posta ad una distanza di 20,9 m dall'asse x, mentre l'altezza a 2 m dall'asse y (Fig.5.11).

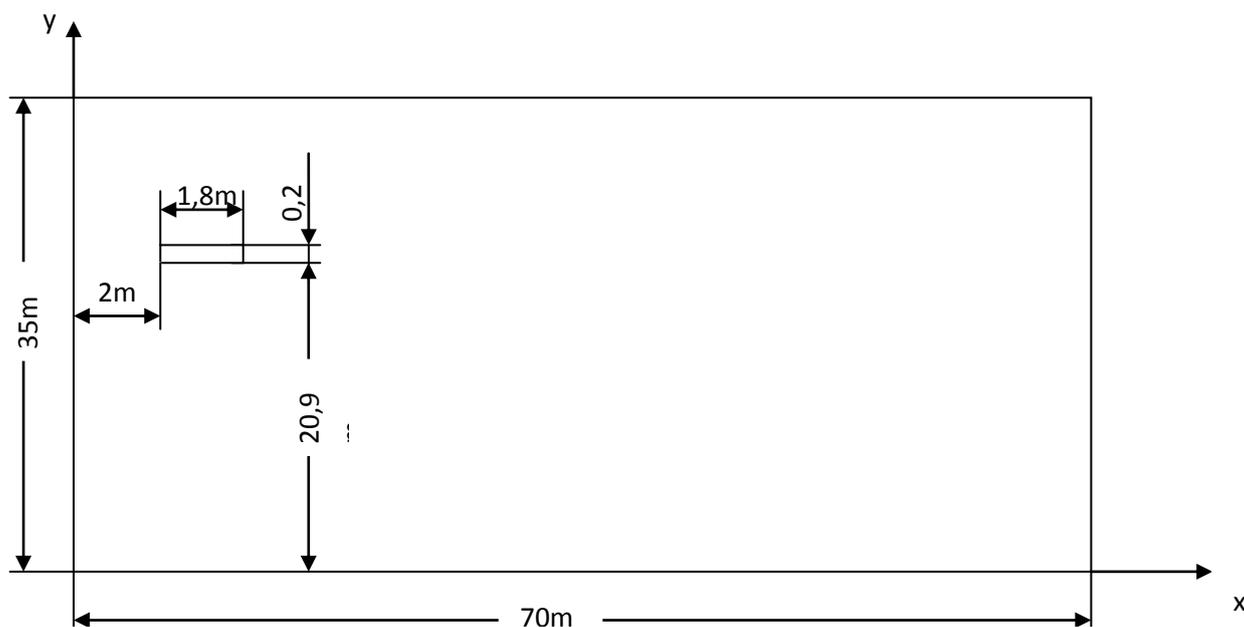


Fig.5.11 schema della geometria della simulazione di un'onda 2D che interagisce con un corpo fisso

Il rettangolo viene sottratto dal dominio del fluido (Fig.5.12), poiché tale geometria non rappresenta una parte del dominio di fluido, ma bensì un corpo solido. Alle pareti di tale rettangolo verrà successivamente assegnata la condizione al contorno di “wall” .

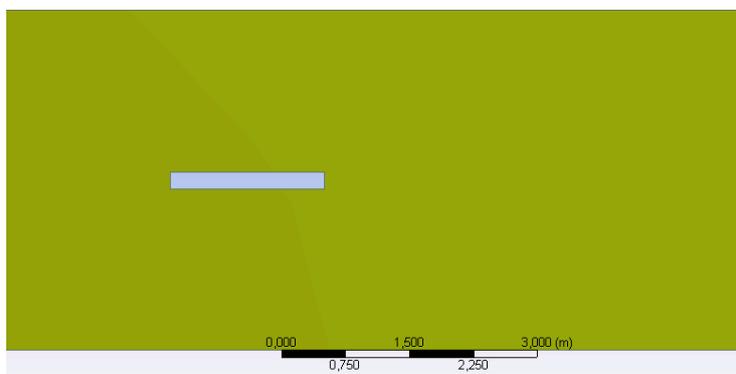


Fig.5.12 rappresentazione dell'operazione Booleana nella geometria del problema: il corpo (rettangolo minore) viene sottratto dal rettangolo maggiore che rappresenta il dominio del fluido.

Come nella simulazione precedentemente descritta, il dominio viene suddiviso in tre zone. In questo caso, però, la prima zona ha un'ampiezza di 19 m, la seconda di 4 m e la terza di 12 m, come riportato in figura 5.13.

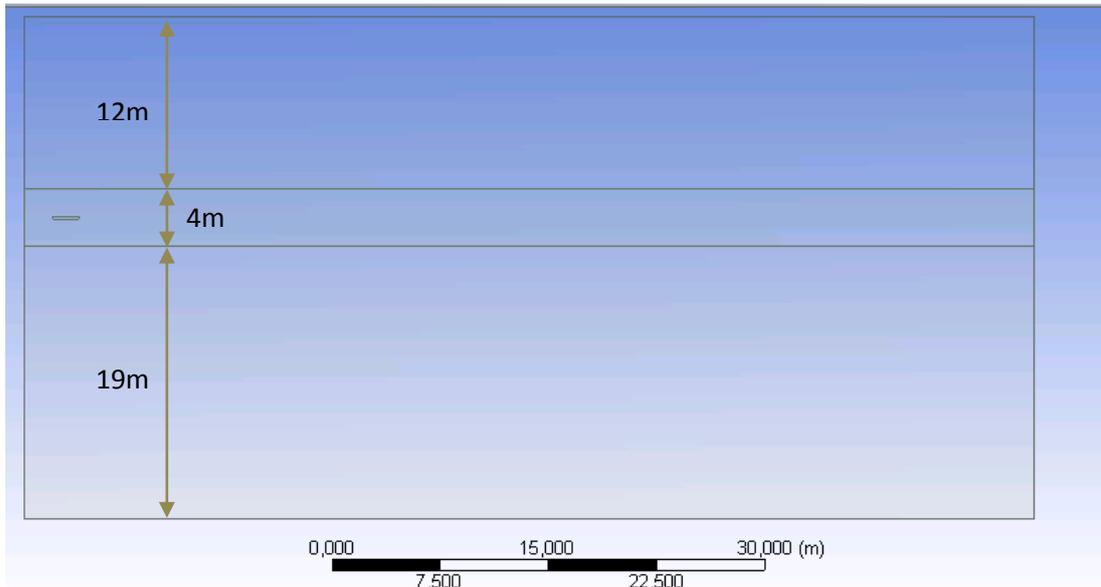


Fig.5.13 suddivisione del dominio in tre parti.

Mesh:

Analogamente al caso precedente, vengono create 3 mesh con caratteristiche differenti: una più fine nella fascia centrale e 2 più grossolane nelle fasce esterne. Anche in questo caso gli elementi della mesh hanno dimensione massima pari a 0,15 m nella fascia centrale, mentre nelle due fasce esterne hanno dimensione massima pari a 0,5 m. (Fig.5.14)

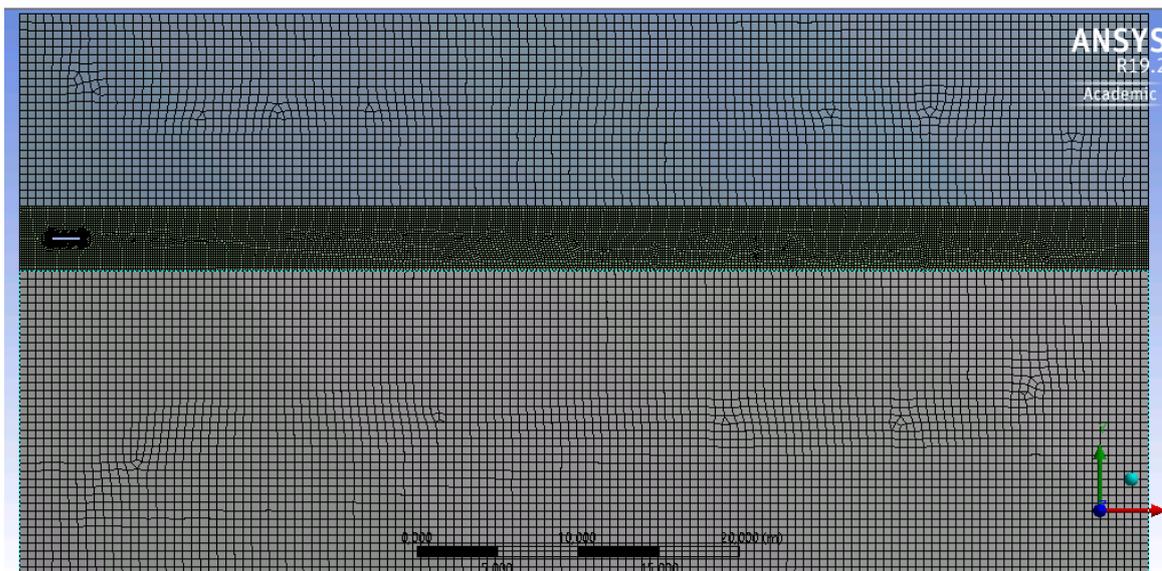


Fig.5.14 mesh della simulazione di un'onda 2D che interagisce con un corpo fisso.

Per migliorare la qualità dei risultati è conveniente infittire la mesh in prossimità del corpo fisso: alle pareti del corpo la dimensione massima degli elementi è posta pari a 0,03 m (Fig.5.15).

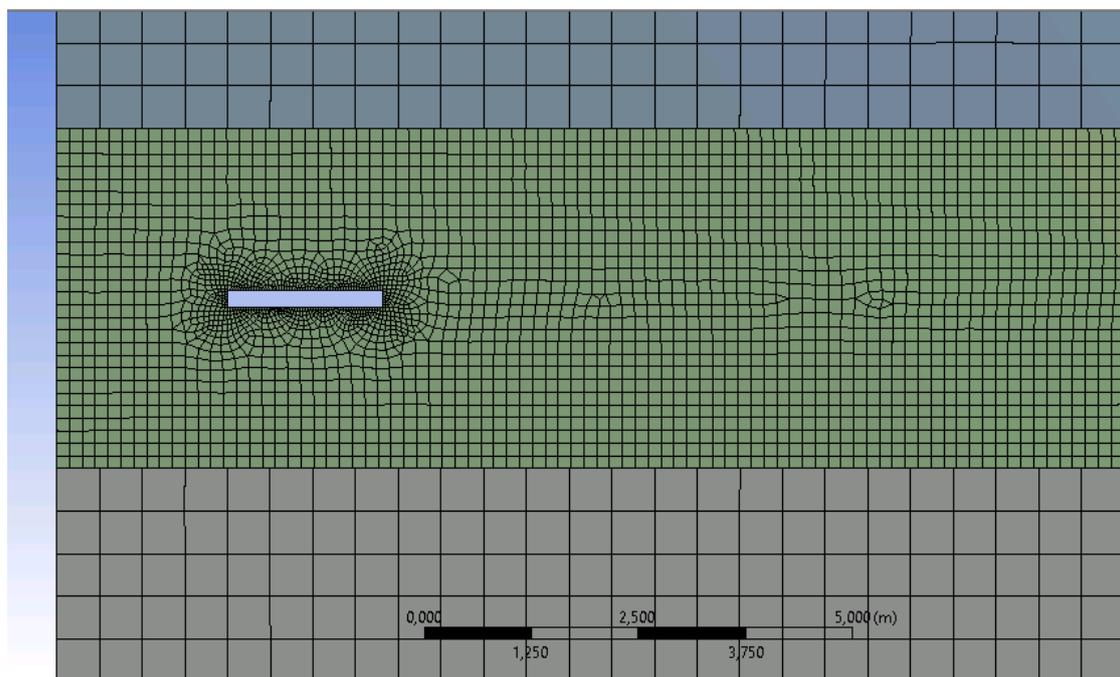


Fig.5.15 dettaglio della mesh in prossimità del corpo fisso.

Così facendo si ottengono 21'656 nodi e 20'832 elementi.

Le sezioni sono nominate come riportato nella seguente figura (Fig.5.16).

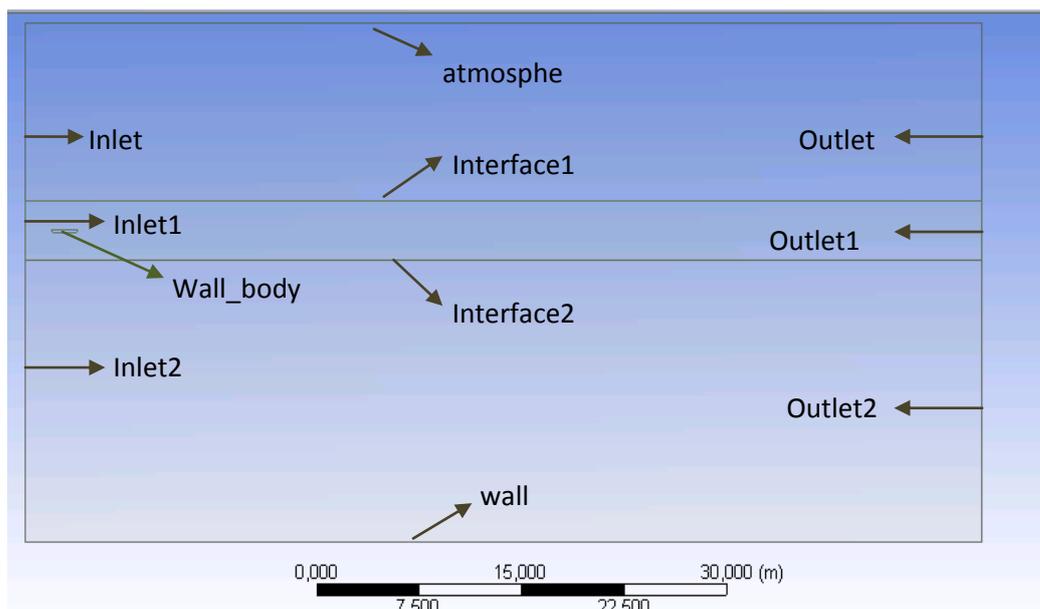


Fig.5.16 denominazione delle sezioni

Set up

Il set-up di questa simulazione è del tutto analogo a quella precedente. Per ricapitolare:

- La simulazione è di tipo “transient” e l’accelerazione di gravità g è pari a $-9,81$ in direzione y .
- Si utilizza il metodo VOF ed il modello Open channel flow.
- Il modello di turbolenza è quello k-epsilon.
- Le condizioni al contorno sono poste come segue:
 1. Le sezioni “Inlet”, “Inlet1” e “Inlet2” sono di tipo “velocity inlet”. La superficie libera dell’onda è posta ad un’altezza di 21 m, l’ampiezza è pari a 2 m e la lunghezza d’onda è di 40 m. Viene utilizzata la “Second order stoke wave theory” e le onde sono definite come “short gravity waves”.
 2. Le sezioni “atm”, “Outlet”; “Outlet1” e “Outlet2” vengono definite come “pressure-outlet”, la superficie libera dell’onda è posta ad un’altezza di 21 m, mentre il fondo viene posto a 0 m.
 3. La tipologia delle sezioni “Interface1” e “Interface2” è definita come “interface”.
 4. La tipologia delle sezioni denominate “wall” è definita come “wall”. Come anticipato, anche le pareti del rettangolo, denominate “wall_body” vengono definite come “wall”, poiché corrispondono alle sezioni che delimitano un corpo solido che rappresenta il dispositivo WEC Resen.
- Nelle condizioni operative la densità specificata è pari $1,225 \text{ kg/m}^3$ (densità dell’aria) e la pressione ad un’altezza di 30 m è uguale a quella atmosferica (101325 Pa).
- Nella sezione “Cell-zone conditions” si seleziona l’opzione “numerical beach treatment”,
- Si effettua un’inizializzazione di tipo ibrido; come metodo di inizializzazione si impone il metodo di tipo “flat”.
- Vengono utilizzati 100 time steps, ognuno di 0,2 s. vengono quindi simulati 20 s (5 periodi) e il numero massimo di iterazioni per ogni time step è pari a 20.

I risultati di questa simulazione sono riportati nel paragrafo 6.2.

5.4 Simulazione di un onda regolare 2D con corpo libero di muoversi in direzione verticale

L'obiettivo di questa simulazione è quello di valutare l'andamento della forza in direzione verticale che agisce sul corpo galleggiante e lo spostamento lungo y di questo. A tale scopo, nel corso del processo di calcolo vengono salvati dei file contenenti i dati relativi alla forza agente sul corpo galleggiante e relativi alla sua posizione.

Geometria

In questa simulazione viene utilizzata l'overset mesh, illustrata nel capitolo precedente (paragrafo 4.1.6.1), perciò vengono definite due geometrie distinte:

- La prima è quella relativa al background, rappresenta l'intero dominio e consiste in un rettangolo di dimensioni 70x35 m suddiviso in tre fasce orizzontali rispettivamente di 18 m, 6m e 11m (analogamente alla prima simulazione, paragrafo 5.1). inoltre la fascia centrale viene suddivisa verticalmente in due parti: di 30 m e 40m (Fig.5.18).

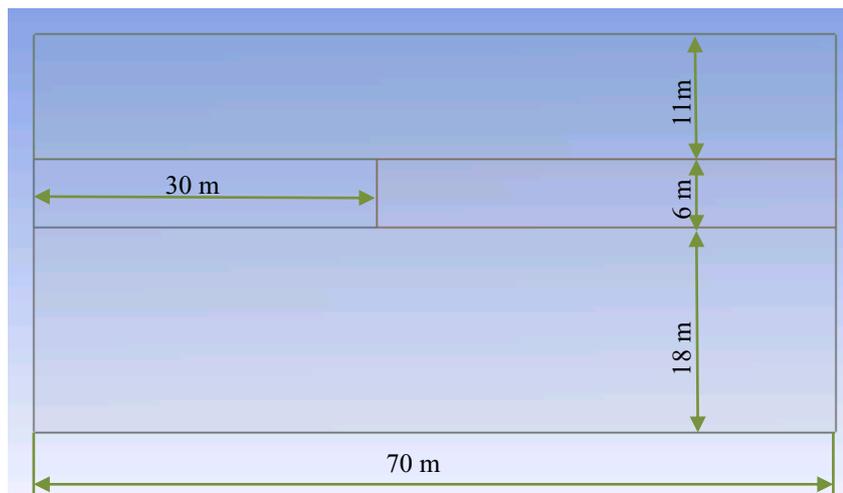


Fig.5.18 rappresentazione della geometria del background.

- la seconda geometria è quella relativa al corpo galleggiante. Come per la simulazione precedente (paragrafo 5.2), il corpo è rappresentato da un rettangolo di dimensioni 1,8 x 0,2 m. In questo caso il rettangolo è posto a 10 m dall'asse y e a 20,9 m dall'asse x. In questa geometria viene anche definita la forma dell'overset mesh, ovvero della mesh che circonda il corpo di interesse (il galleggiante di forma rettangolare) che verrà sovrapposta alla mesh del background. La geometria di questa mesh è riportata in figura 5.19).

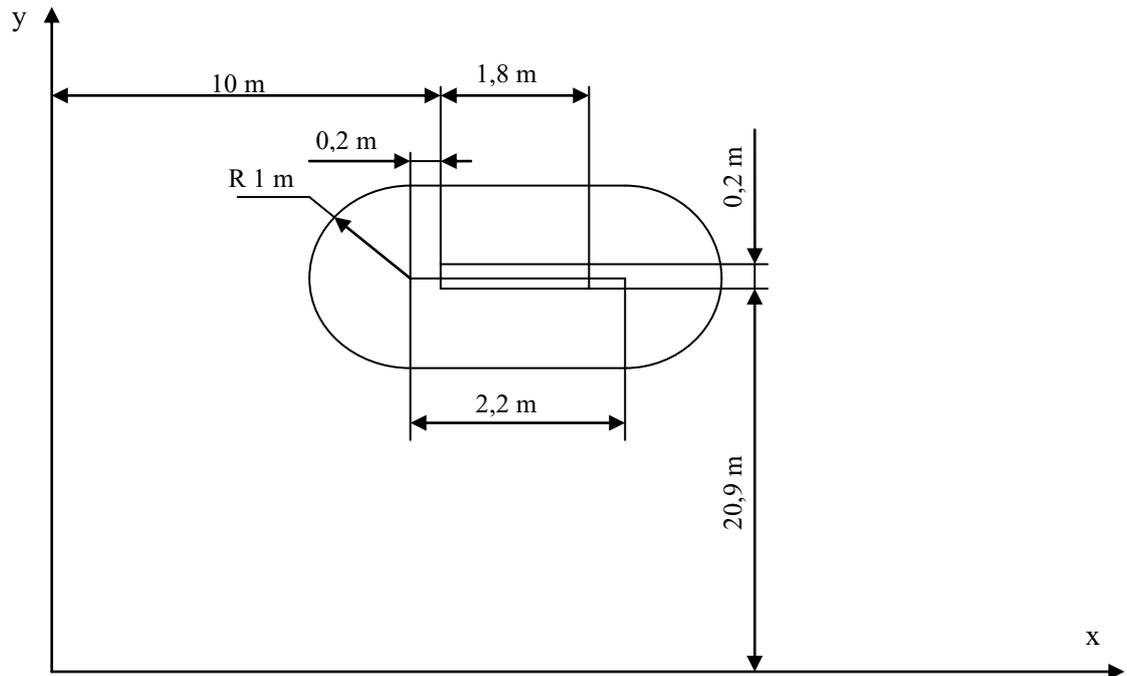


Fig.5.19 rappresentazione non in scala della geometria del galleggiante e della relativa overset mesh.

Come per la simulazione precedente, rettangolo che rappresenta il corpo fisso viene sottratto dalla geometria del fluido circostante (Fig.5.20)

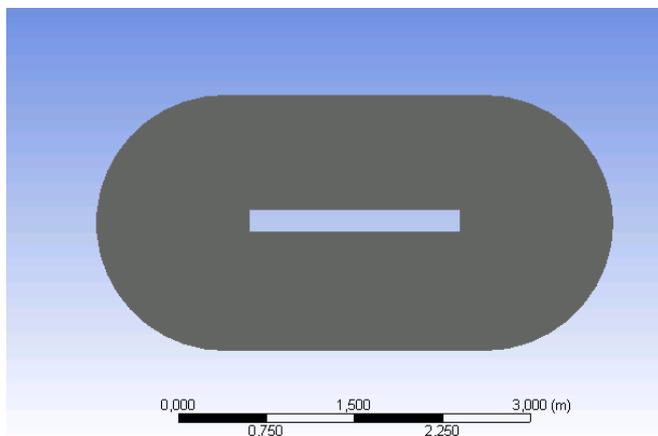


Fig.5.20 rappresentazione dell'operazione Boolean nella geometria dell'overset mesh: il corpo (rettangolo) viene sottratto dall'ovale che rappresenta il fluido circostante.

Mesh

La mesh di ciascuna delle due geometrie viene creata separatamente:

1. per il background le 4 zone della geometria hanno elementi di dimensioni differenti. Le due fasce esterne, come nei casi precedenti, hanno elementi di forma rettangolare e dimensione massima pari a 0,5 m; la fascia centrale è suddivisa in due parti: quella di destra ha elementi rettangolari di dimensioni

massime pari a 0,15 m, mentre per quella di sinistra la dimensione degli elementi è di 0,05 m. Sono presenti 92'169 nodi e 90'800 elementi (Fig.5.21).

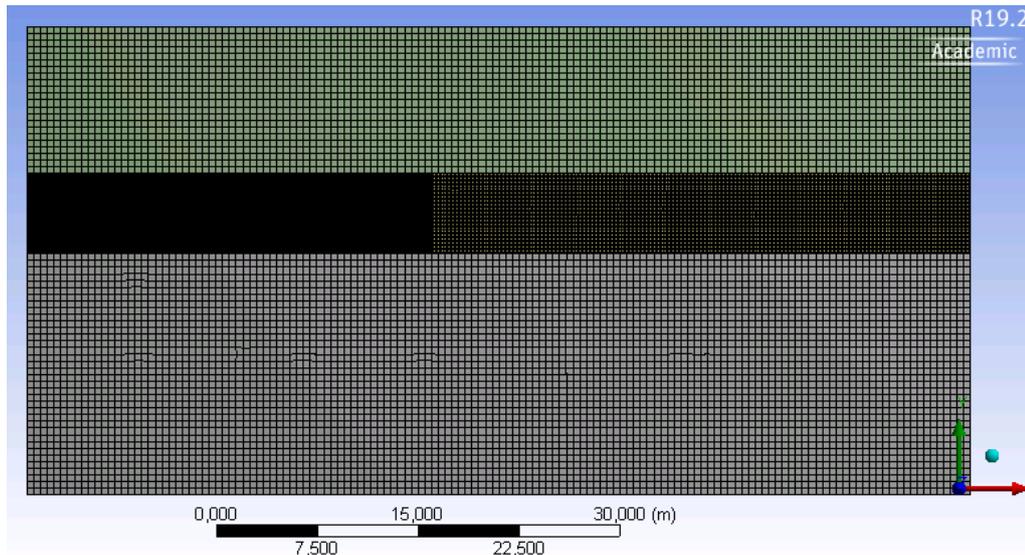


Fig.5.21 Mesh del background

Le sezioni vengono denominate come riportato in figura 5.22.

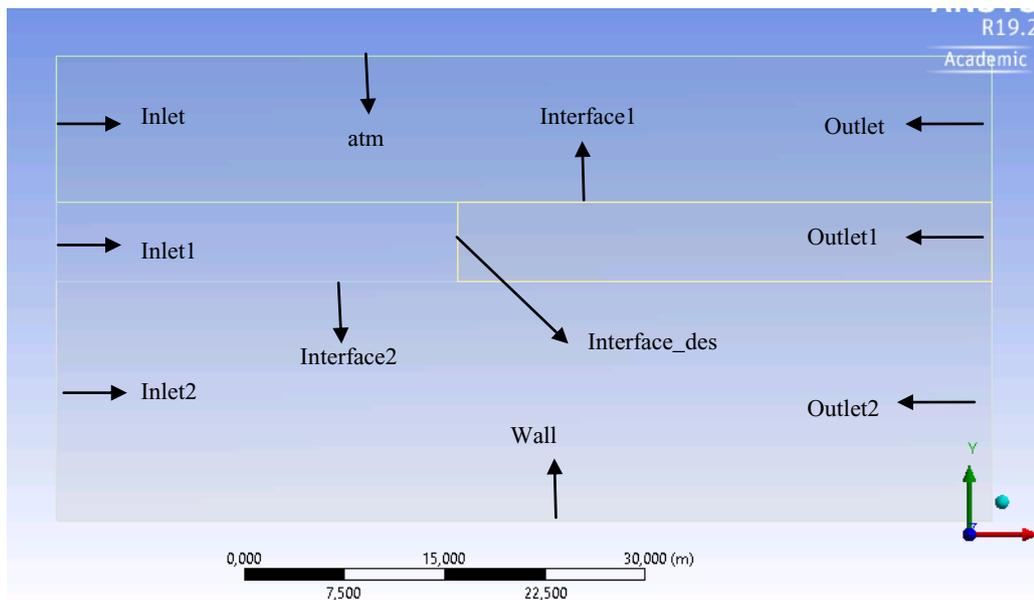


Fig.5.22 denominazione delle sezioni del background

2. Per la mesh di tipo overset che circonda il galleggiante si utilizzano elementi di forma triangolare di dimensione massima pari a 0,05 m. È importante che le dimensioni delle due mesh da sovrapporre siano molto simili: per questo motivo gli elementi della mesh di overset e della mesh nella zona di sinistra della fascia centrale del background hanno la stessa dimensione massima. Inoltre nelle

vicinanze del corpo è opportuno avere un mesh più fitta, perciò sul bordo del rettangolo viene imposto che le dimensioni massime degli elementi siano di 0,03 m. L'overset mesh è perciò composta da 3'641 nodi e 6'920 elementi (Fig.5.23).

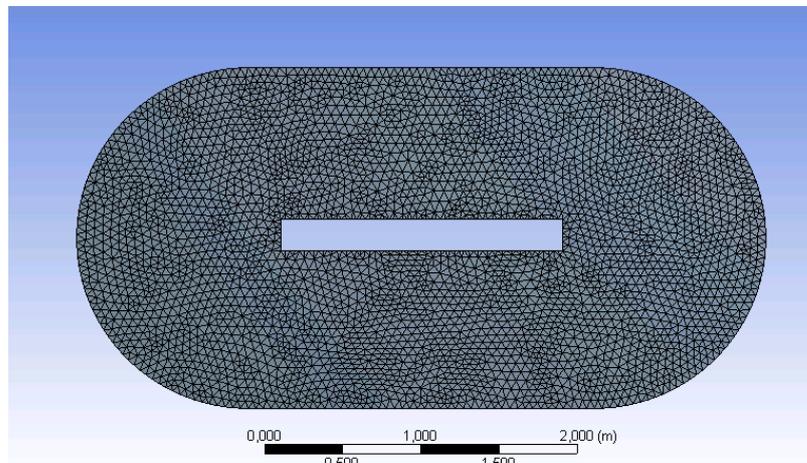


Fig.5.23 overset mesh del componente galleggiante

Le sezioni di questa geometria sono denominate come riportato in figura 5.24

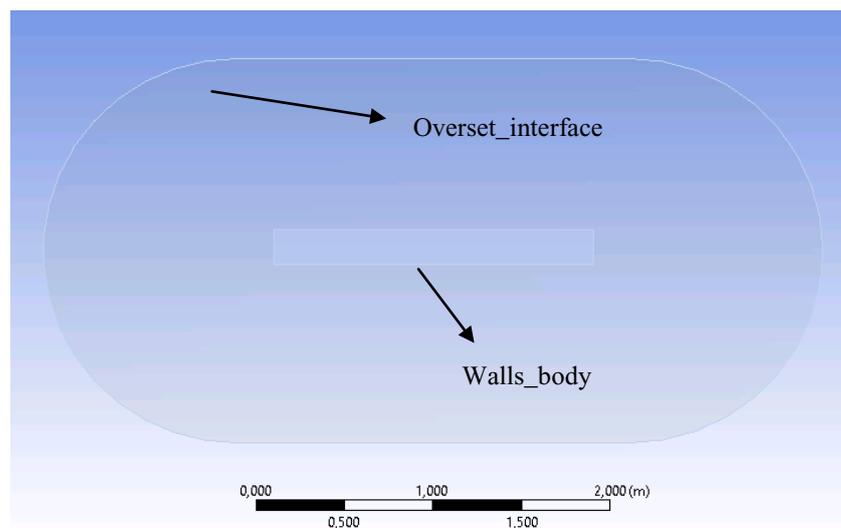


Fig.5.24 denominazione delle sezioni nella mesh di overset

L'area compresa tra il rettangolo e l'ovale circostante è denominata "overset_fluid".

Set-up

Le due mesh distinte vengono trasferite nel programma di calcolo "ansys fluent" e vengono automaticamente sovrapposte dal software (Fig.5.25).

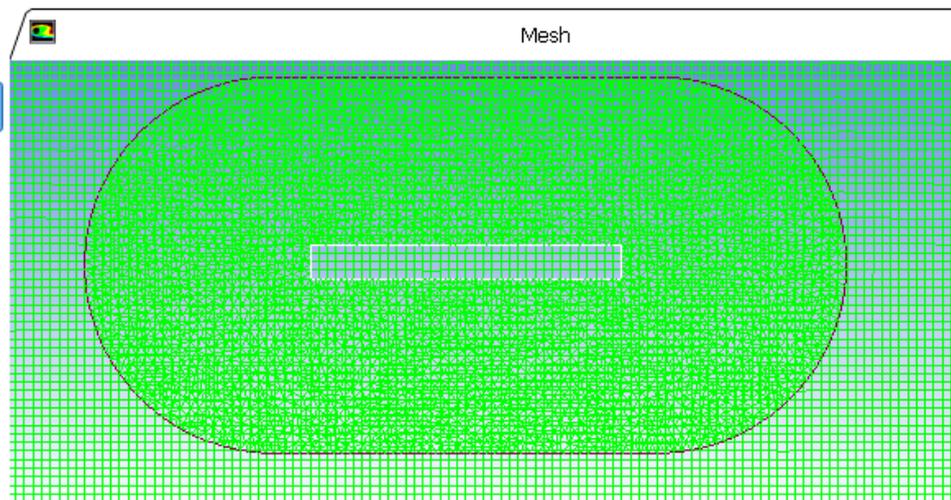


Fig.5.25 sovrapposizione dell'overset mesh (mesh che circonda il corpo) alla mesh del background

La prima parte del set-up è molto simile a quella delle due simulazioni precedenti: la simulazione è di tipo “transient” e l’accelerazione di gravità g è pari a $-9,81$ in direzione y . Si utilizza il metodo VOF ed il modello Open channel flow. Anche in questa simulazione il modello di turbolenza utilizzato è quello comunemente denominato k-epsilon. Inoltre, questa simulazione viene svolta utilizzando 6 processori in parallelo, le due simulazioni precedenti, invece, sono state svolte in serie. Le condizioni al contorno sono analoghe ai casi precedenti:

- Le sezioni “Inlet”, “Inlet1” e “Inlet2” sono “velocity inlet”. La superficie libera dell’onda è posta ad un’altezza di 21 m, l’ampiezza è pari a 2 m e la lunghezza d’onda è di 40 m. Viene utilizzata la “Second order stoke wave theory” e le onde sono definite come “short gravity waves”.
- Le sezioni “atm”, “Outlet”; “Outlet1” e “Outlet2” vengono definite come “pressure-outlet”, la superficie libera dell’onda è posta ad un’altezza di 21 m, mentre il fondo viene posto a 0 m.
- La tipologia delle sezioni “Interface1” e “Interface2” è definita come “interface”.
- La tipologia della sezione “wall” è definita come “wall”.

Le sezioni che nelle simulazioni precedenti non erano presenti sono così definite:

- La sezione “interface_des” è definita come “interface”.
- Per la sezione “overset_interface” viene invece selezionata la tipologia “overset interface”. Questa condizione al contorno fa sì che durante il calcolo avvenga lo scambio di informazioni e l’interpolazione dei dati tra le due zone sovrapposte.

Anche in questa simulazione nelle condizioni operative la densità specificata è posta pari $1,225 \text{ kg/m}^3$ (densità dell'aria) e la pressione ad un'altezza di 30 m è uguale a quella atmosferica (101325 Pa). Inoltre nella sezione “ Cell-zone conditions” si seleziona l'opzione “numerical beach treatment”.

In questa simulazione il corpo è caratterizzato da una dinamica, volendo riprodurre il moto verticale del galleggiante provocato dall'interazione con un'onda. Per questo si utilizza una mesh dinamica (“dynamic mesh”). Come già spiegato precedentemente, poiché si utilizza l'overset mesh, non è necessario utilizzare i metodi di remeshing. La dinamica assegnata al moto del galleggiante è di tipo “Six degrees of freedom” (6DOF). Questo risolutore, per calcolare il movimento traslatorio e rotatorio del centro di massa del corpo, utilizza le forze e i momenti risultanti dalla pressione e dalle tensioni tangenziali agenti sul corpo galleggiante. L'equazione che governa il moto traslazionale del centro di massa è:

$$\ddot{\eta}_G = \frac{1}{m} \sum f_G$$

Dove $\ddot{\eta}_G$ rappresenta il vettore accelerazione del centro di massa del corpo, m è la massa del corpo e f_G è il vettore delle forze agenti sul centro di massa.

Per quanto riguarda il moto rotatorio, l'equazione risulta è:

$$\dot{\omega}_B = L^{-1}(\sum M_B - \omega_B \times L \omega_B)$$

Dove L è il tensore di inerzia, M_B è il vettore dei momenti applicati al corpo e ω_B è la velocità angolare del corpo.

Una volta che le accelerazioni angolari e di traslazione vengono calcolate dalle due equazioni precedenti, vengono derivate per integrazione numerica le velocità e gli spostamenti nel time step corrente. Gli spostamenti a loro volta vengono utilizzati nei calcoli della mesh dinamica per aggiornare la posizione del corpo in movimento. In questa simulazione viene analizzato solamente il moto di traslazione verticale del corpo, perciò il simulatore risolverà solamente la prima delle due equazioni sopra riportate relativa alla traslazione in direzione verticale. Come riportato in figura 5.26 nelle proprietà del 6DOF vengono definite:

- La massa del corpo, che è pari a 180 kg.
- La direzione di traslazione, ovvero la direzione y.
- I limiti entro cui il corpo è libero di muoversi: $19\text{ m} < y < 23\text{ m}$.

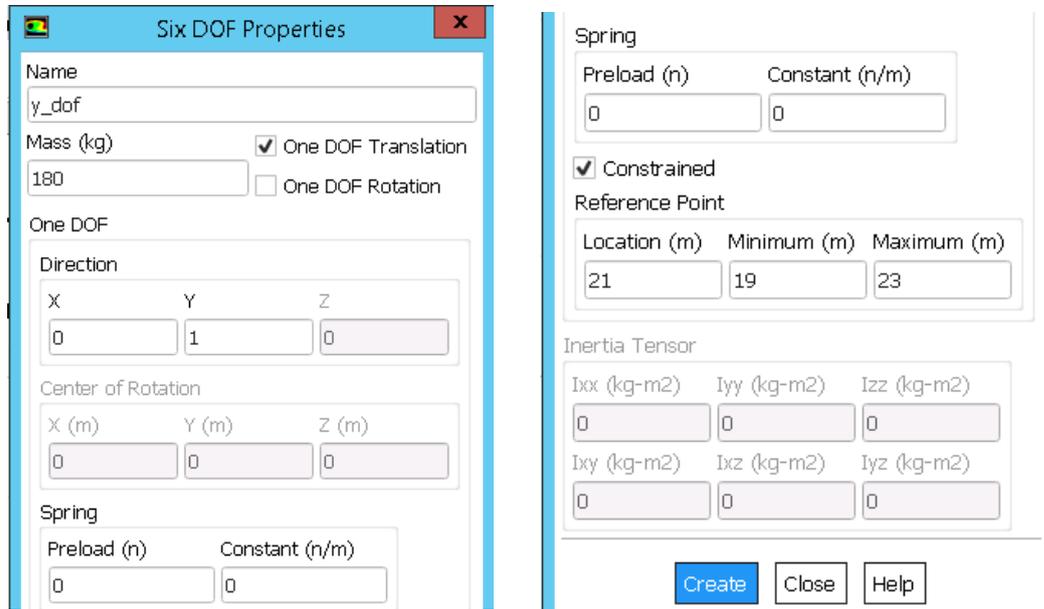


Fig.5.26 impostazione delle proprietà del risolutore 6DOF

Vengono poi definite le zone della mesh in movimento (Dynamic mesh zones), che corrispondono alle sezioni “walls_body”, “overset_interface” e all’area “overset_fluid”. In questo modo si impone che l’oveset mesh che circonda il corpo galleggiante è libera di muoversi (in direzione verticale) rispetto alla mesh del background.

Anche in questo caso si effettua un’inizializzazione di tipo ibrido e come metodo di inizializzazione si impone il metodo di tipo “flat”.

Vengono utilizzati 5023 time steps, ognuno di 0,01 s e il numero massimo di iterazioni per ogni time step è pari a 100. Vengono quindi simulati circa 10 periodi (il periodo dell’onda simulata è di 5,06 s). Questa quantità di periodi permette di effettuare una soddisfacente analisi in frequenza dei risultati, come si vedrà nel capitolo successivo.

I risultati di questa simulazione sono riportati nel paragrafo 6.3.1.

5.5 Simulazione di un onda irregolare 2D con corpo libero di muoversi in direzione verticale

L’obiettivo di questa simulazione è quello di analizzare l’interazione tra un onda irregolare e un corpo galleggiante libero di muoversi in direzione verticale. Come per la

simulazione precedente, nel corso del processo di calcolo vengono salvati dei file contenenti i dati relativi alla forza verticale agente sul corpo galleggiante e relativi alla sua posizione in direzione y.

La geometria e la mesh utilizzate in questa simulazione sono del tutto uguali a quelle usate nella simulazione dell'interazione tra un'onda regolare e un corpo galleggiante libero di muoversi in direzione verticale (paragrafo 5.4). Anche il set-up è del tutto simile al caso precedente, l'unica differenza sta nelle impostazioni dei tre inlet. In questo caso, infatti, non si implementa un'onda regolare, ma un'onda irregolare, che può essere rappresentata da uno spettro (capitolo 2). Le impostazioni utilizzate per simulare l'onda irregolare sono definite in ciascuno dei tre "velocity inlet" e sono riportate in figura 5.27.

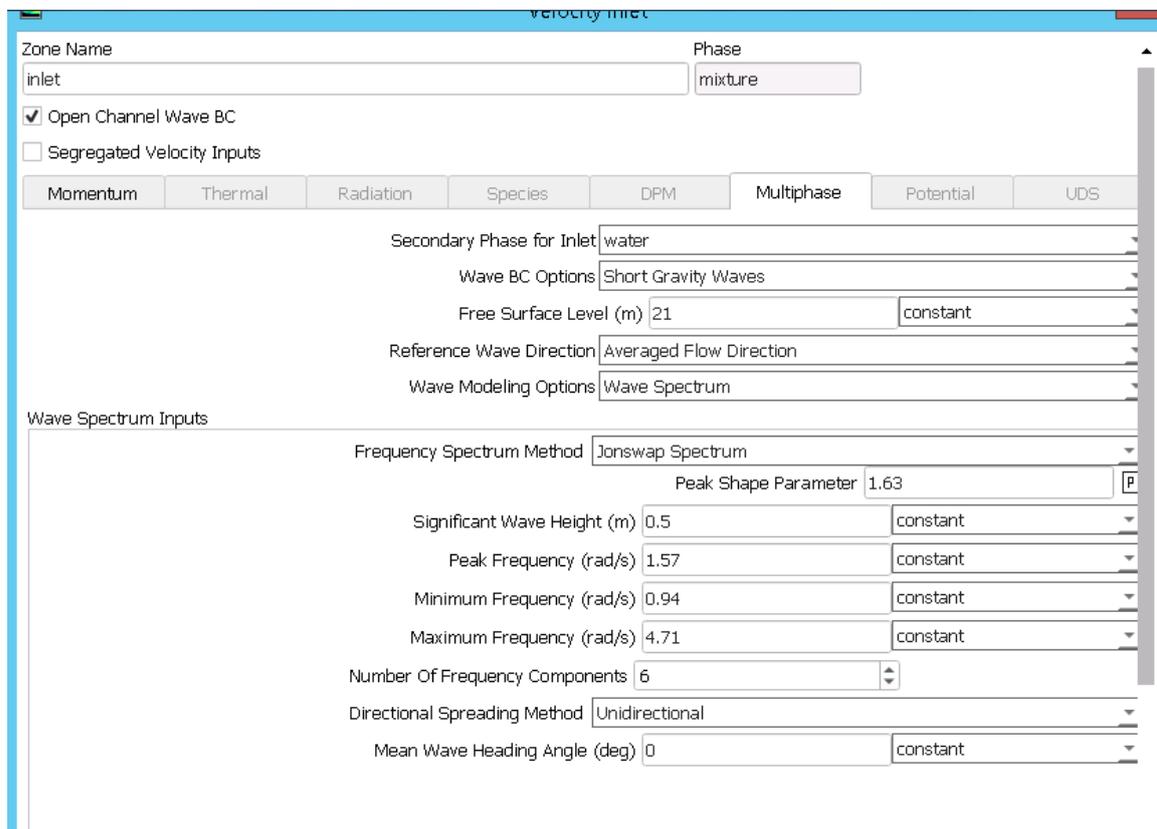


Fig.5.27 impostazione delle caratteristiche dello spettro dell'onda irregolare.

Si impongono i seguenti parametri:

- altezza significativa (H_s) è pari a 0,5 m.
- coefficiente di diffusione spettrale (γ) è pari a 1.63, come definito nel capitolo 2

Utilizzando i valori riportati nel grafico dello spettro di JONSWAP (capitolo 2, figura 2.5), si impongono i seguenti parametri per la definizione dello spettro dell'onda irregolare :

- Frequenza di picco (f_p) è pari a 0,25 Hz ($T_p=4$ s): che corrisponde a 1,57 rad/s.
- La frequenza massima è pari a 0,75 Hz, ovvero 4,71 rad/s.
- La frequenza minima è pari a 0,15 Hz, ovvero 0,94 rad/s.

Inoltre, per simulare l'onda irregolare, si impone che siano presenti 6 componenti di frequenza, ovvero che l'onda risultante sia data dalla sovrapposizione di sei sinusoidi di frequenze diverse.

I risultati di questa simulazione sono riportati nel paragrafo 6.3.2.

6. RISULTATI

In questo capitolo si riportano i risultati ottenuti dalle simulazioni presentate nel capitolo precedente. In particolare verranno analizzati i risultati della simulazione con il corpo libero di muoversi in direzione verticale, sia in caso di onda regolare che irregolare. Tuttavia, per completezza della trattazione, si riportano anche i risultati grafici della simulazione di un'onda regolare e dell'interazione tra un'onda regolare e un corpo fisso.

Nella tabella 6.1 si riportano i parametri utilizzati nelle simulazioni.

	Tipologia di onda	Frequenza onda	Altezza dell'onda	Moto	Time step size	Tempo simulato
Simulazione 5.2	Onda regolare	0,2 Hz	2 m	Nessun corpo è presente	0,2 s	70 s
Simulazione 5.3	Onda regolare	0,2 Hz	2 m	Corpo fisso	0,2 s	20 s
Simulazione 5.4	Onda regolare	0,2 Hz	2 m	Corpo libero di muoversi in direzione verticale	0,01 s	50 s
Simulazione 5.5	Onda irregolare	0,15-0,75 Hz Frequenza di picco = 0,25 Hz	Altezza significativa: 0,5 m	Corpo libero di muoversi in direzione verticale	0,01 s	50 s

Tabella 6.1 riepilogo dei parametri principali utilizzati nelle simulazioni.

6.1 Risultati simulazione di un'onda regolare 2D

La figura 6.1 rappresenta l'andamento di un'onda regolare di lunghezza d'onda 40 m, periodo di 5,06 s e altezza di 2 m. Per semplicità della trattazione si riporta solamente l'istante finale della simulazione (70 s). Per avere una visione completa dell'andamento dell'onda regolare nel tempo si rimanda al video: "VIDEO_SIMULAZIONE_ONDA_REGOLARE". La zona rossa rappresenta la fase 1, ovvero l'aria, mentre la zona blu rappresenta la fase 2, l'acqua.

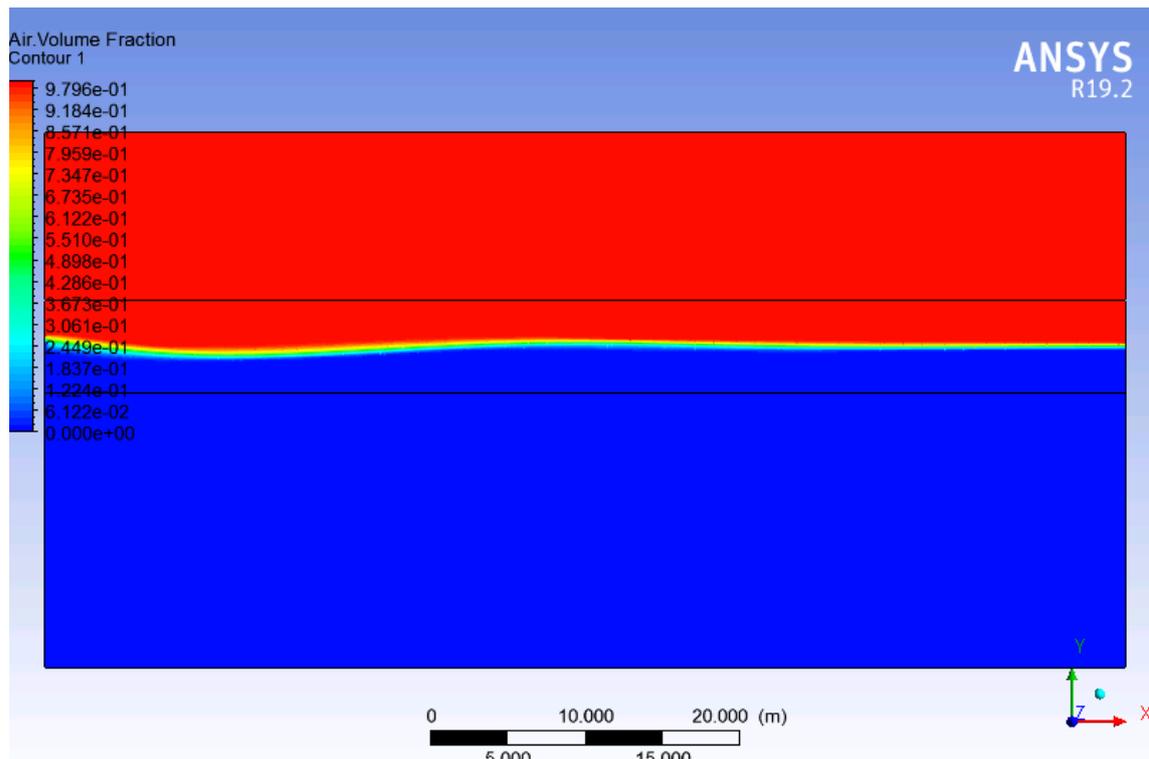


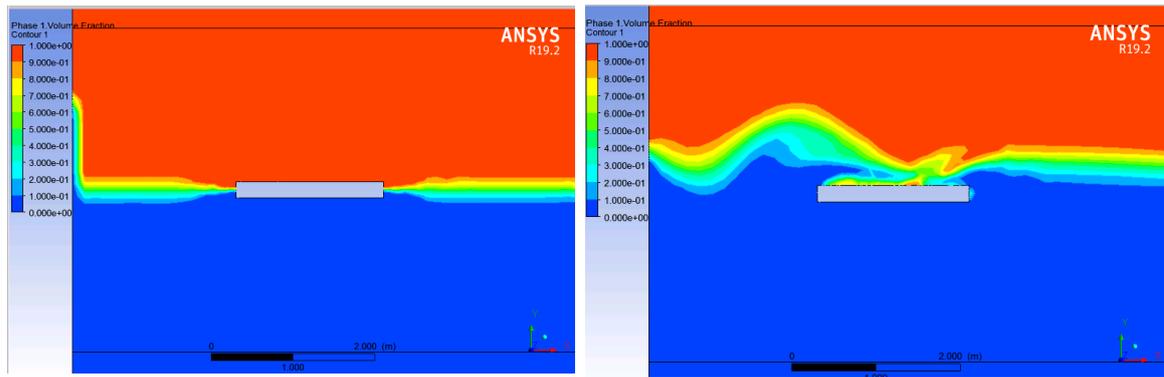
Fig 6.1 onda regolare all'istante finale della simulazione.

Il risultato di questa simulazione non è di interesse per lo studio di questa tesi, tuttavia viene riportato per completezza. Lo svolgimento di questa simulazione è servito per imparare a simulare un'onda regolare con il software CFD Ansys Fluent.

6.2 Risultati simulazione dell'interazione tra un'onda regolare 2D e un corpo fisso

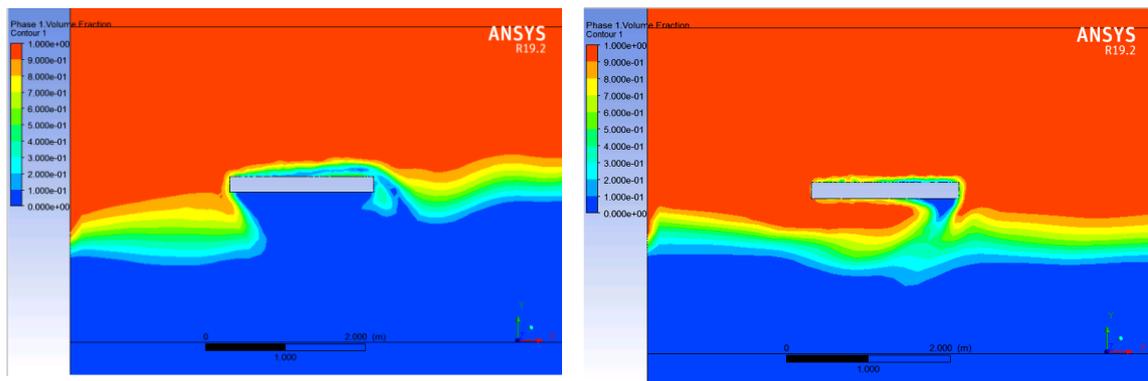
La figura 6.2 rappresenta l'andamento dell'onda regolare quando questa interagisce con un corpo fisso di forma rettangolare a istanti temporali diversi. Per avere una visione completa dell'interazione tra l'onda regolare e il corpo fisso, si rimanda al video "VIDEO_SIMULAZIONE_INTERAZIONE_ONDA_REGOLARE_CON_CORPO_FISSO". Anche in questo caso la zona rossa rappresenta l'aria, mentre la zona blu rappresenta l'acqua.

Per facilitare l'osservazione dei risultati, nelle figure viene riportata solamente la parte di dominio in prossimità del corpo.



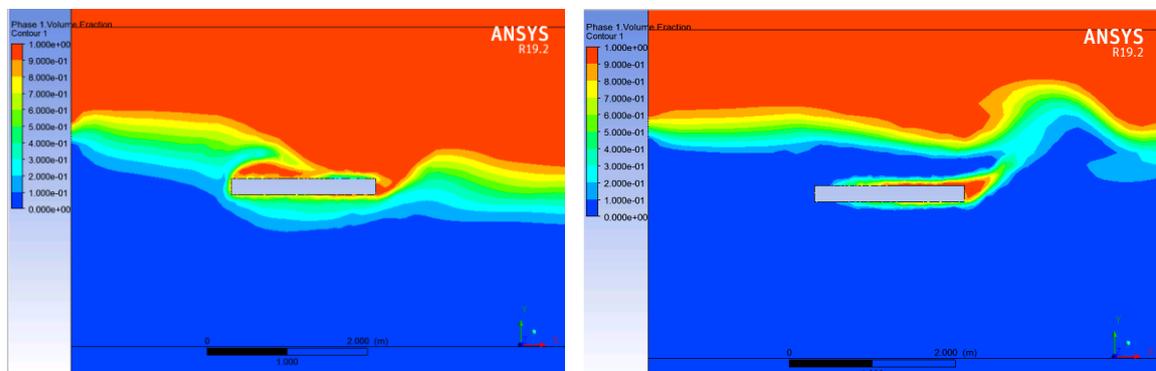
Istante iniziale: 0s.

Istante: 0.8s



Istante: 2s

Istante: 3.2s



Istante : 4.4s

Istante: 5.6s

Fig.6.2 Interazione onda 2D con un corpo fisso a istanti temporali diversi.

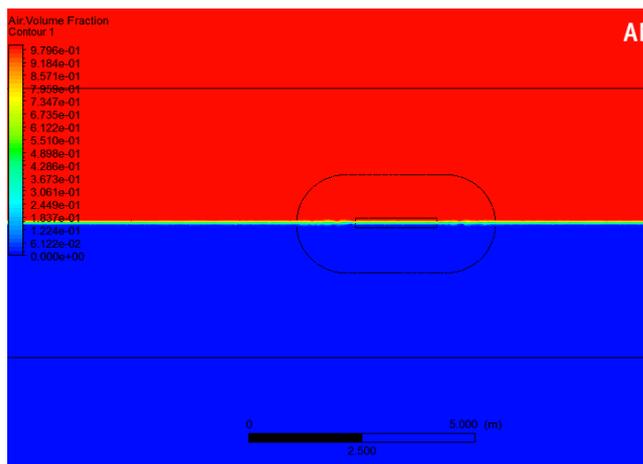
Dalla figura 6.2 si nota come la presenza del corpo fisso provochi il frangimento dell'onda. I risultati di questa simulazione non sono necessari per lo scopo di questo studio. Infatti, l'obiettivo di questa tesi è quello di confrontare il modello dinamico lineare con il modello numerico non lineare delle simulazioni CFD nel caso di corpo galleggiante in movimento. Tuttavia lo svolgimento di questa simulazione è stato

necessario per prendere familiarità con l'utilizzo del software Ansys e imparare a svolgere una simulazione dell'interazione tra un'onda e un corpo di forma rettangolare.

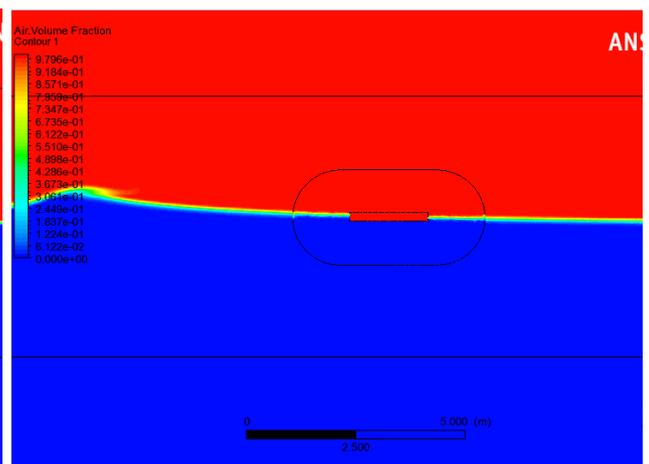
6.3 Risultati simulazione dell'interazione tra un'onda 2D e un corpo libero di muoversi in direzione verticale

6.3.1 Onda regolare

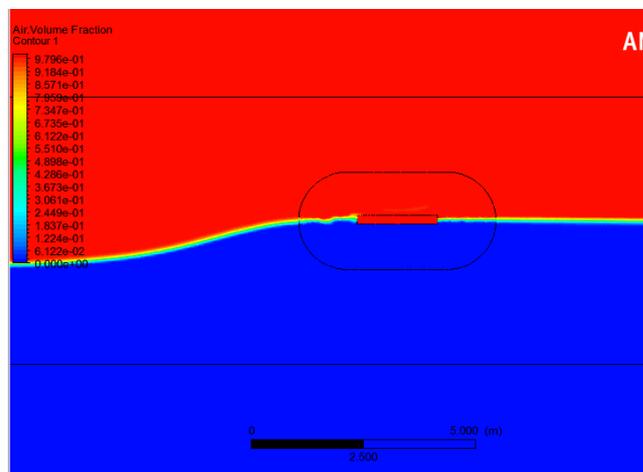
La figura 6.3 rappresenta l'interazione tra l'onda regolare e il galleggiante di forma rettangolare, libero di muoversi in direzione verticale a istanti temporali diversi. Per avere una visione completa dell'interazione tra l'onda e il corpo si rimanda al video: "VIDEO_SIMULAZIONE_INTERAZIONE_ONDA_REGOLARE_CON_CORPO_MOBILE". Anche in questo caso la zona rossa rappresenta l'aria, mentre la zona blu rappresenta l'acqua. Come per il caso precedente, per facilitare la visualizzazione dei risultati, si riporta solamente la zona di dominio circostante al corpo galleggiante.



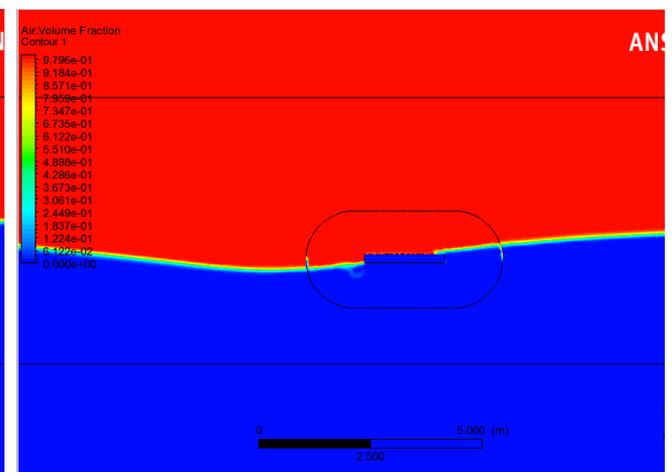
Istante iniziale: 0 s



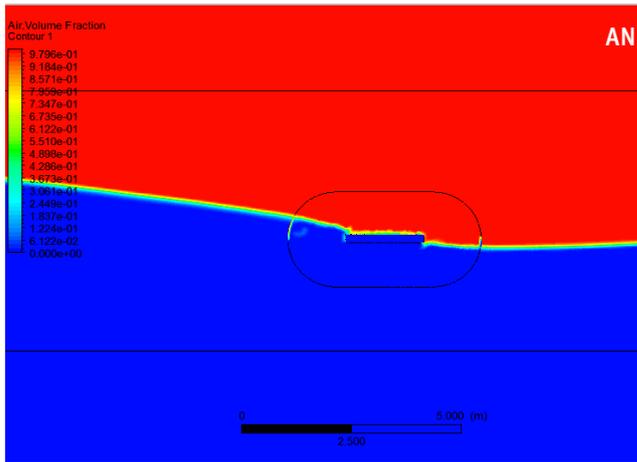
Istante: 1,24 s



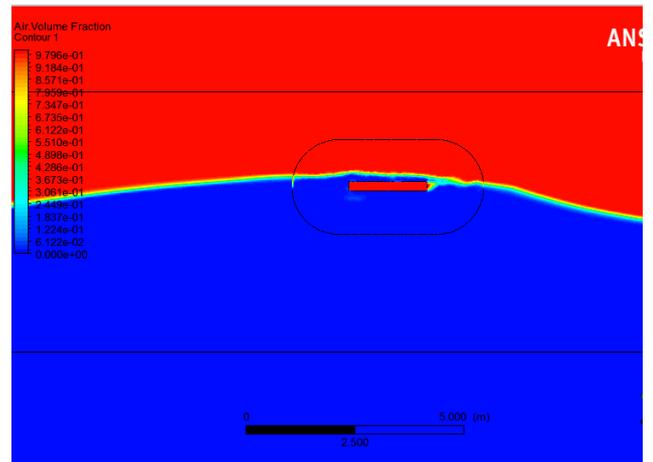
Istante: 2,52 s



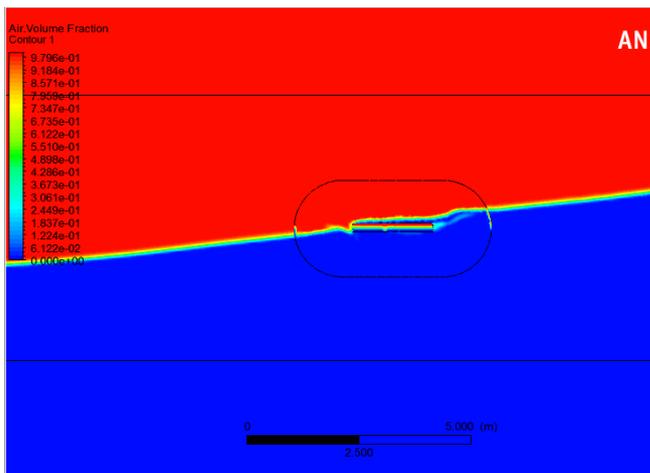
Istante: 3,76 s



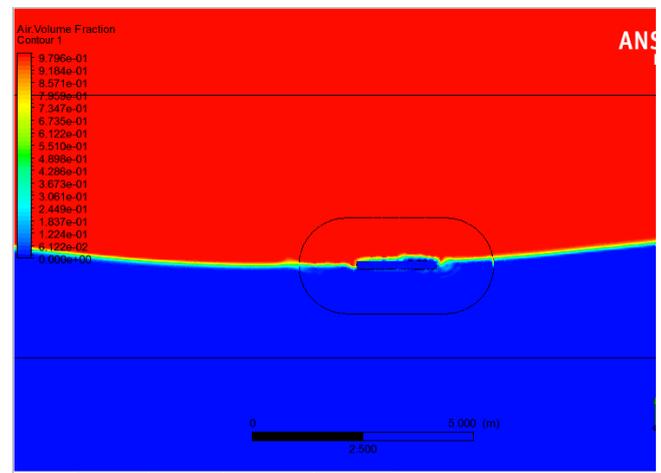
Istante: 5 s (circa un periodo).



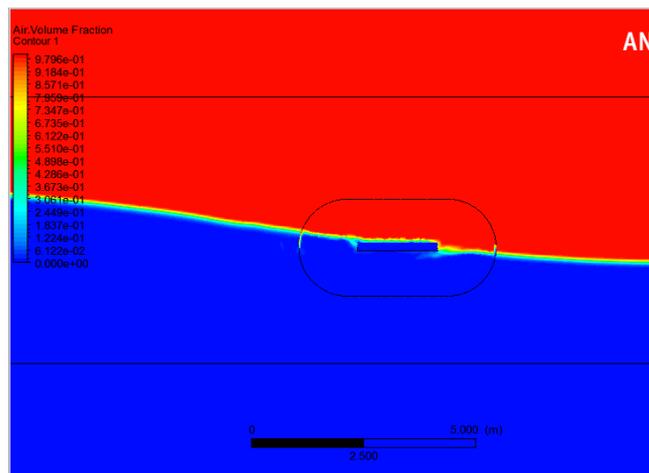
Istante: 6,24 s



Istante: 7,52 s



Istante: 8,76 s



Istante: 10 s (due periodi)

Fig. 6.3 Interazione onda regolare 2D con un corpo libero di muoversi in direzione verticale a istanti temporali diversi.

Nel grafico che segue (Fig.6.4) si riporta l'andamento dello spostamento lungo y del corpo in funzione del tempo. Come si può osservare tale spostamento ha un andamento sinusoidale di periodo pari a circa 5 s, ovvero il periodo dell'onda.

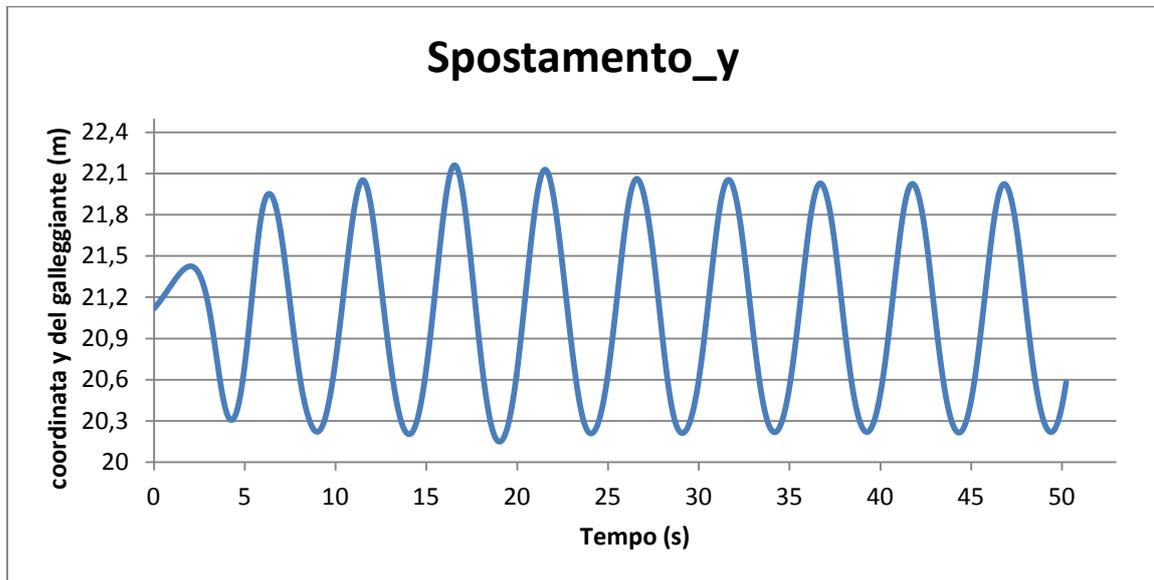


Fig.6.4 grafico dello spostamento in direzione verticale (lungo y) del corpo galleggiante in funzione del tempo, nel caso di onda regolare.

I valori della forza, dovuta al fluido risultante sul corpo in direzione verticale in funzione del tempo sono riportati nel grafico seguente (Fig.6.5)

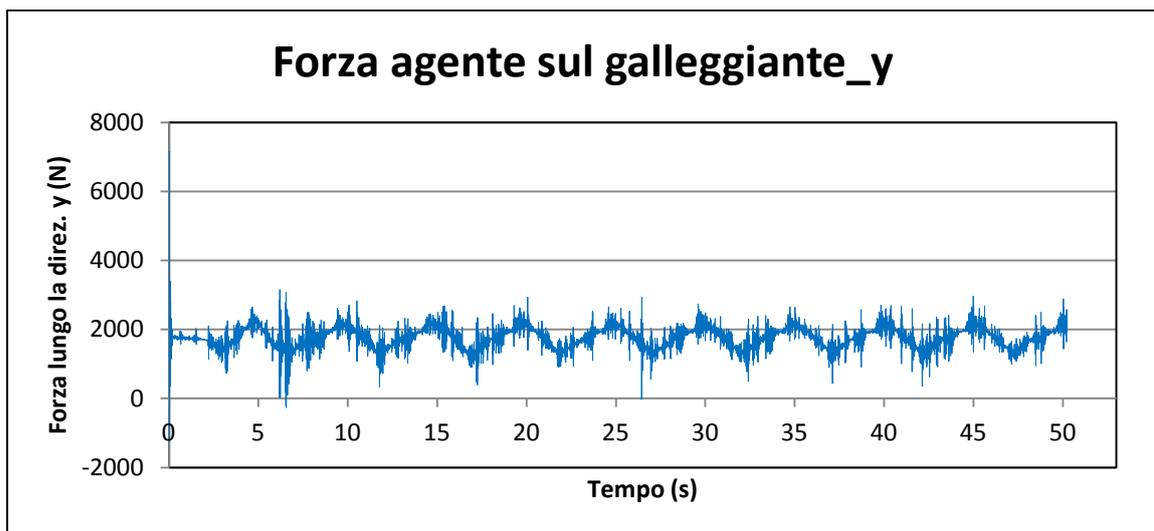


Fig.6.5 grafico della forza in direzione verticale (lungo y) agente sul corpo galleggiante in funzione del tempo, nel caso di onda regolare.

Come si può facilmente notare dal grafico in figura 6.5, l'andamento della forza lungo y è periodico nel tempo. Per questo è possibile svolgerne l'analisi armonica, descritta nel capitolo 4. Per svolgere l'analisi armonica di Fourier, è necessario togliere la prima parte transitoria dell'andamento della forza. Per questo l'analisi si svolge a partire dal tempo 4,6 s. Come si può ben vedere dal grafico in figura 6.5, infatti, l'andamento della forza nell'intervallo di tempo 0-4,6 non è periodico e questa parte di segnale coincide con la parte transitoria. Per mezzo di un programma scritto in Visual Basic (riportato in appendice A), si calcolano le ampiezze della forza per ognuna delle n frequenze (ovvero si calcolano i vari coefficienti c_n). Come già anticipato, si considerano 20 armoniche e, inoltre, l'ampiezza c_0 , corrispondente al valore medio della forza, non viene riportata per avere maggior chiarezza nei grafici. Perciò si ha $n=1 \dots 20$. Il grafico di figura 6.6 riporta l'ampiezza della forza per ognuna delle 20 armoniche considerate. Tale grafico corrisponde allo spettro discreto della forza agente sul corpo galleggiante lungo la direzione verticale. Nell'asse delle ordinate viene riportata l'ampiezza della forza in Newton, mentre nell'asse delle ascisse vengono riportate la frequenze in Hz. Si ricorda che la frequenza dell'onda è pari a 0,2 Hz e questa corrisponde alla frequenza fondamentale.

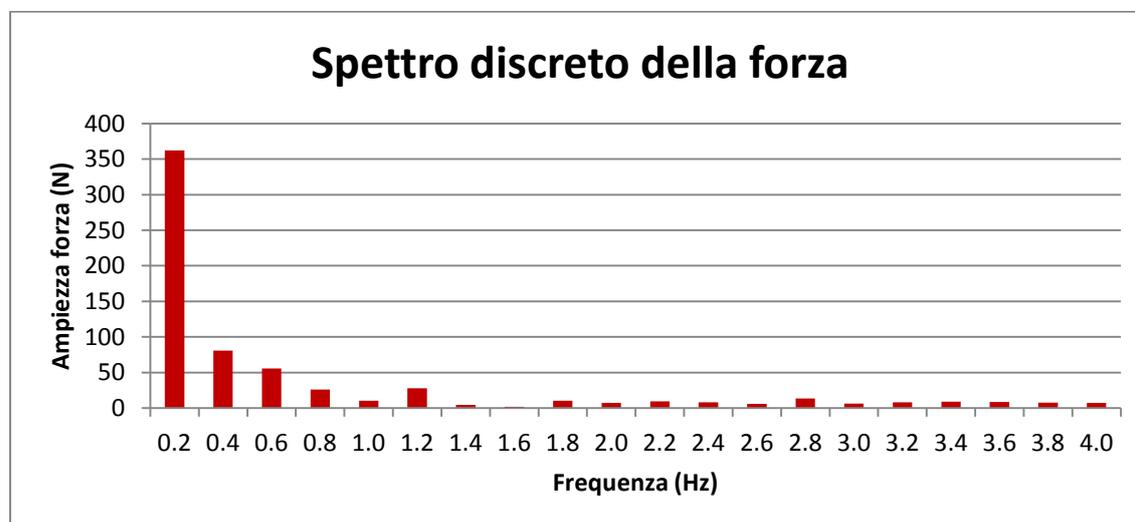


Fig.6.6 spettro discreto della forza agente sul corpo galleggiante nel caso di onda regolare.

Nella tabella 6.2 si riportano i valori dell'ampiezza della forza per ciascuna frequenza.

FREQUENZA (Hz)	AMPIEZZA FORZA (N)
0,2	361,9524

0,4	80,69199
0,6	55,66786
0,8	26,20318
1,0	10,54878
1,2	27,90217
1,4	4,838394
1,6	1,981881
1,8	10,48808
2,0	7,208137
2,2	9,537737
2,4	8,163472
2,6	5,990939
2,8	13,43918
3,0	6,455312
3,2	8,406277
3,4	8,889473
3,6	8,687996
3,8	7,976101
4,0	7,212114

Tabella 6.2 ampiezza della forza per ciascuna armonica

Come ci si aspettava la prima armonica è quella che presenta ampiezza maggiore, tuttavia anche la seconda e la terza armonica hanno ampiezze significative, anche se decisamente inferiori: la seconda armonica, infatti, ha ampiezza pari a circa il 22% di quella della prima, mentre la terza è circa il 15% della prima. Questi risultati confermano il fatto che il modello lineare dinamico dei WEC galleggianti (presentato nel capitolo 3) sia un'approssimazione accettabile della realtà. Dall'analisi armonica, infatti, risulta che la componente principale della forza agente sul corpo galleggiante è

una sinusoide di frequenza uguale alla frequenza dell'onda. Tale risultato è coerente con il modello dinamico lineare, che prevede che la forza agente sul corpo sia una sinusoide di frequenza pari alla frequenza dell'onda. La presenza della seconda armonica, inoltre, è in linea con il fatto che nella simulazione viene utilizzata la teoria lineare di Stokes del secondo ordine. Come già detto nel capitolo 2, tale teoria prevede la presenza di un termine del secondo ordine, la cui frequenza è doppia rispetto a quella dell'altro termine del primo ordine.

Per completezza della trattazione si svolge anche l'analisi in frequenza secondo la trasformata di Fourier. Si riporta di seguito lo spettro continuo della forza agente sul corpo galleggiante (Fig.6.7).

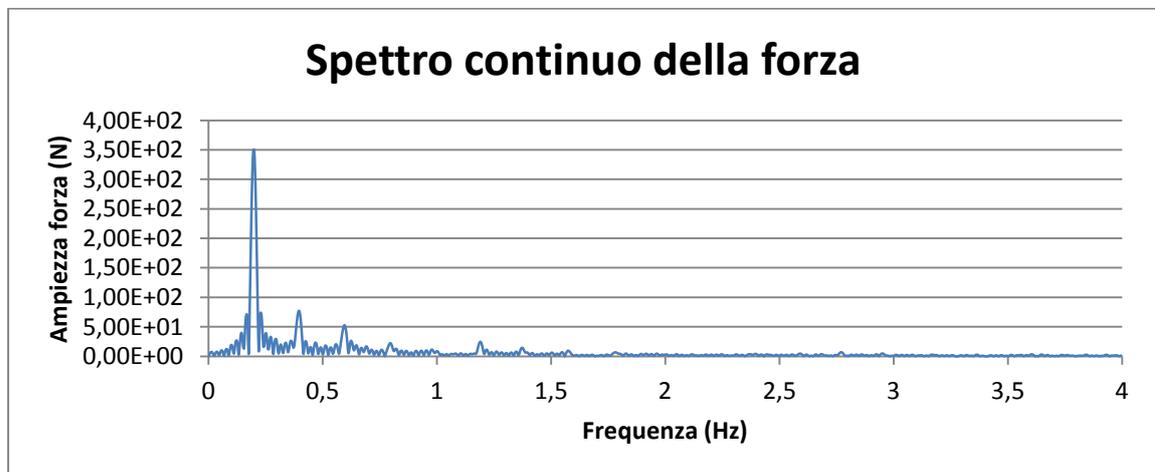


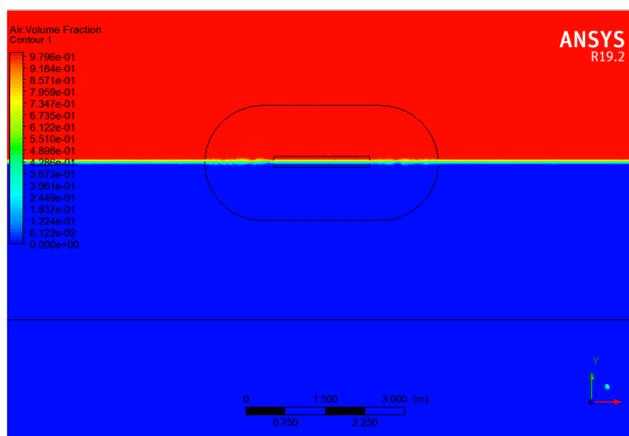
Fig.6.7 spettro continuo della forza agente sul corpo galleggiante nel caso di onda regolare.

Anche dallo spettro continuo (Fig.6.7) si può notare che le frequenze a cui corrispondono le ampiezze maggiormente significative sono: la frequenza fondamentale (0,2 Hz), il doppio di tale frequenza (0,4 Hz) e il suo triplo (0,6 Hz). Tali frequenze corrispondono alla prima, seconda e terza armonica rappresentate nello spettro discreto.

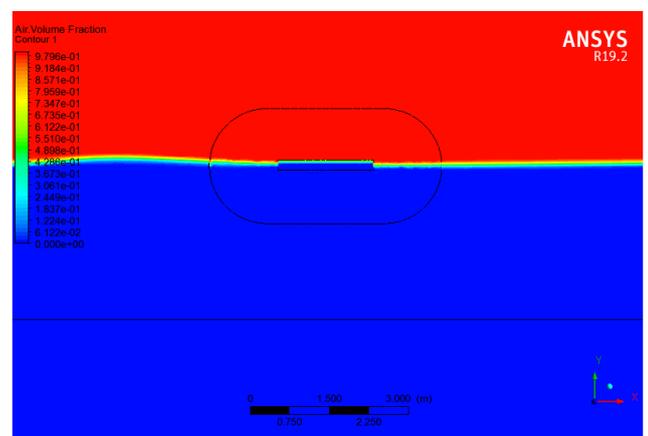
Dall'osservazione di entrambi questi spettri, si può dunque affermare che il modello dinamico lineare si avvicina alla descrizione della realtà, ma non ne costituisce una rappresentazione del tutto precisa. Infatti, dalla simulazione svolta, si deduce che la forza agente sul corpo galleggiante è data dalla sovrapposizione di tre sinusoidi, di cui la prima ha frequenza pari a quella dell'onda. Il contributo alle altre due sinusoidi (di frequenza doppia e tripla della prima) è decisamente ridotto, per questo motivo il modello dinamico lineare è, in prima approssimazione, accettabile.

6.3.2 Onda irregolare

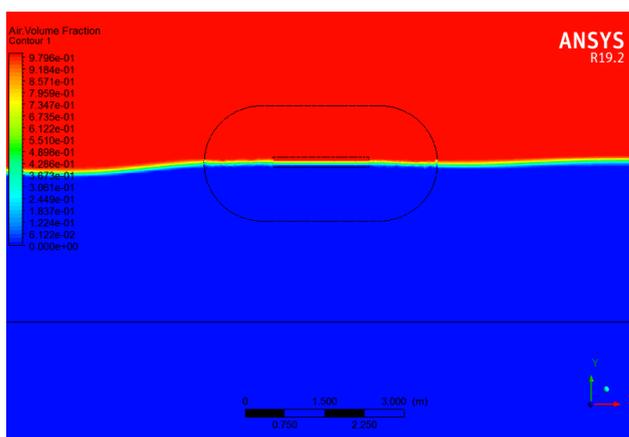
La figura 6.8 rappresenta l'interazione tra l'onda irregolare e il galleggiante di forma rettangolare libero di muoversi in direzione verticale a istanti temporali diversi. Per avere una visione completa dell'interazione tra l'onda irregolare e il corpo si rimanda al video: "VIDEO_SIMULAZIONE_INTERAZIONE_ONDA_IRREGOLARE_CON_CORPO_MOBILE". Viene riportato un intervallo di tempo pari a 20 s. Anche in questo caso la zona rossa rappresenta l'aria, mentre la zona blu rappresenta l'acqua. Come per i casi precedenti, per facilitare la visualizzazione dei risultati, si riporta solamente la zona di dominio circostante al corpo galleggiante.



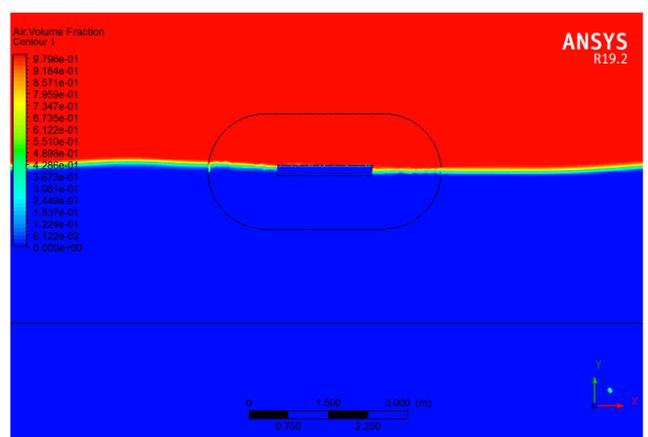
Istante: 0 s (istante iniziale)



Istante: 5 s



Istante: 10 s



Istante: 15 s

Fig. 6.8 Interazione onda irregolare 2D con un corpo libero di muoversi in direzione verticale a istanti temporali diversi.

Nel grafico di seguito (Fig.6.9) si riporta l'andamento dello spostamento lungo y del corpo in funzione del tempo. Come si può osservare tale spostamento non ha un andamento sinusoidale, ma è dato dalla sovrapposizione di più sinusoidi.

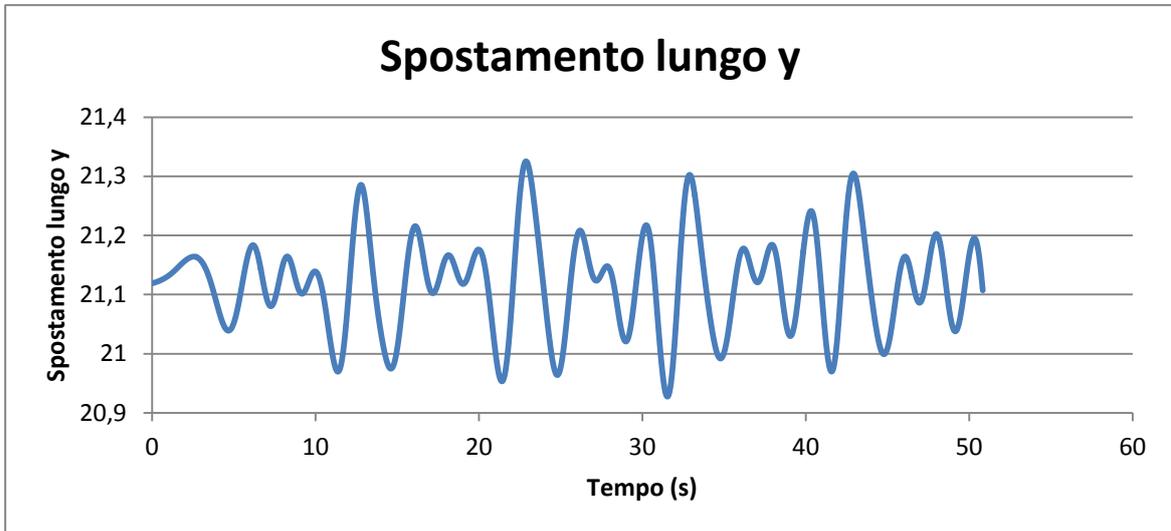


Fig.6.9 grafico dello spostamento in direzione verticale (lungo y) del corpo galleggiante in funzione del tempo, nel caso di onda irregolare.

I valori della forza risultante del fluido sul corpo galleggiante in direzione verticale in funzione del tempo sono riportati nel grafico seguente (Fig.6.10)

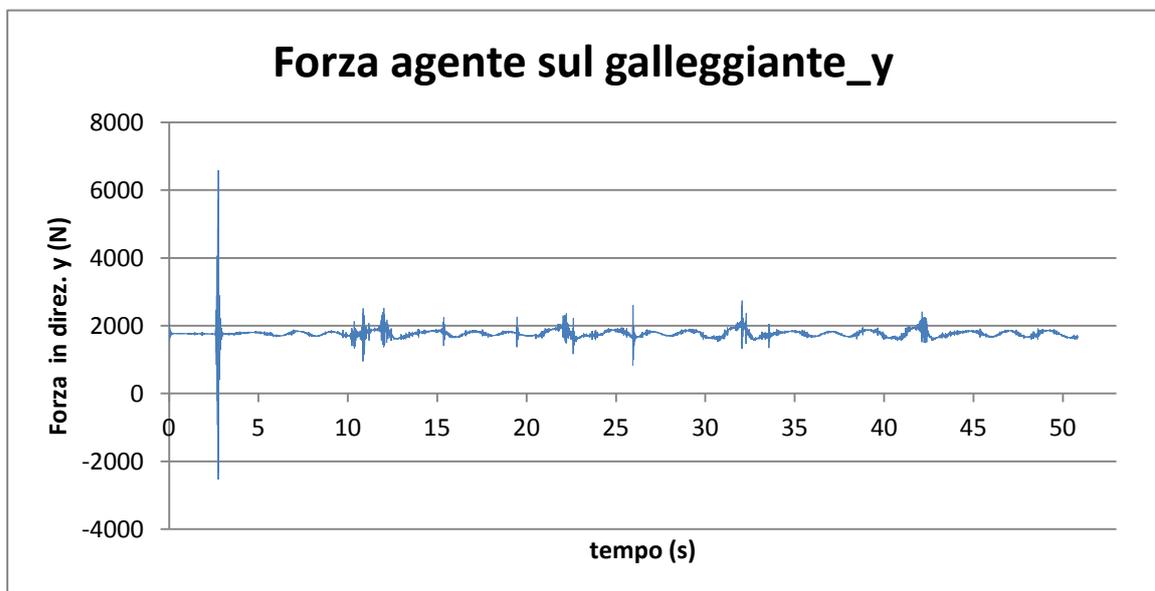


Fig.6.10 grafico della forza in direzione verticale (lungo y) agente sul corpo galleggiante in funzione del tempo, nel caso di onda irregolare.

Si svolge, ora, l'analisi in frequenza secondo la trasformata di Fourier, descritta nel capitolo 4. Per svolgere tale analisi, è necessario togliere la parte transitoria della forza. Per questo si toglie la parte di segnale compresa tra 0 e 10 s. Questa analisi si svolge sia per lo spostamento verticale che per la forza lungo y agente sul corpo galleggiante e permette di tracciare lo spettro continuo di entrambe le grandezze. Per mezzo di un programma scritto in Visual Basic (riportato in appendice B), si calcola l'ampiezza dello spostamento in funzione della frequenza (ovvero si calcola la funzione $|g(f)|$, descritta nel capitolo 4). Analogamente, con il medesimo programma si calcola l'ampiezza della forza in funzione della frequenza. Sia per l'analisi della forza che per quella dello spostamento, non viene considerato il valore medio di tali grandezze, che viene sottratto alla funzione $|g(f)|$. Si riporta di seguito lo spettro continuo dello spostamento lungo y del corpo galleggiante nel caso di interazione con onda irregolare (Fig.6.11).

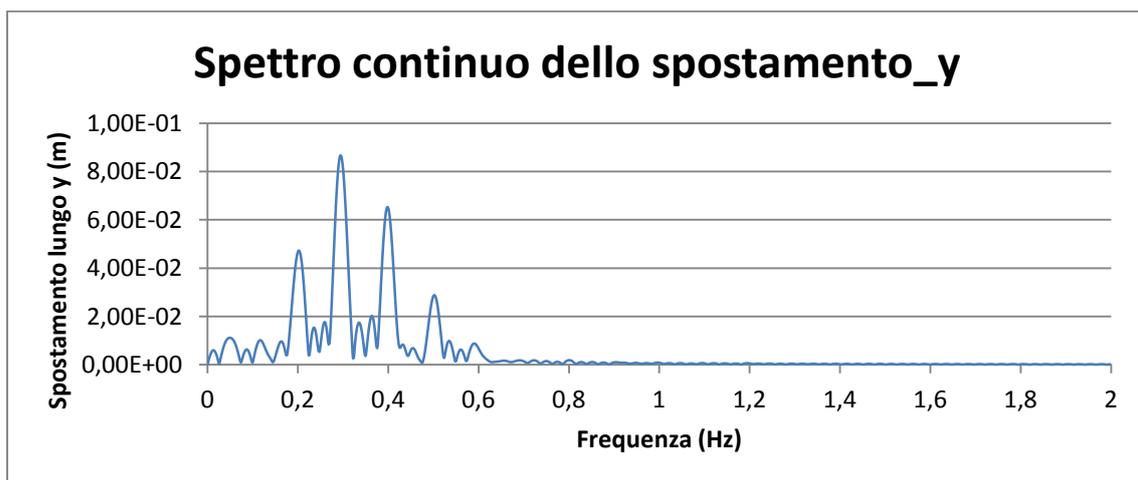


Fig.6.11 spettro continuo dello spostamento del corpo galleggiante in direzione verticale, nel caso di onda irregolare.

Il grafico di figura 6.12 riporta l'ampiezza della forza in funzione della frequenza. Tale grafico corrisponde allo spettro continuo della forza agente sul corpo galleggiante lungo la direzione verticale. Nell'asse delle ordinate viene riportata l'ampiezza della forza in Newton, mentre nell'asse delle ascisse viene riportate la frequenze in Hz. Si ricorda che per la simulazione è stato utilizzato uno spettro la cui frequenza minima è pari a 0,15 Hz e quella massima è pari a 0,75 Hz.

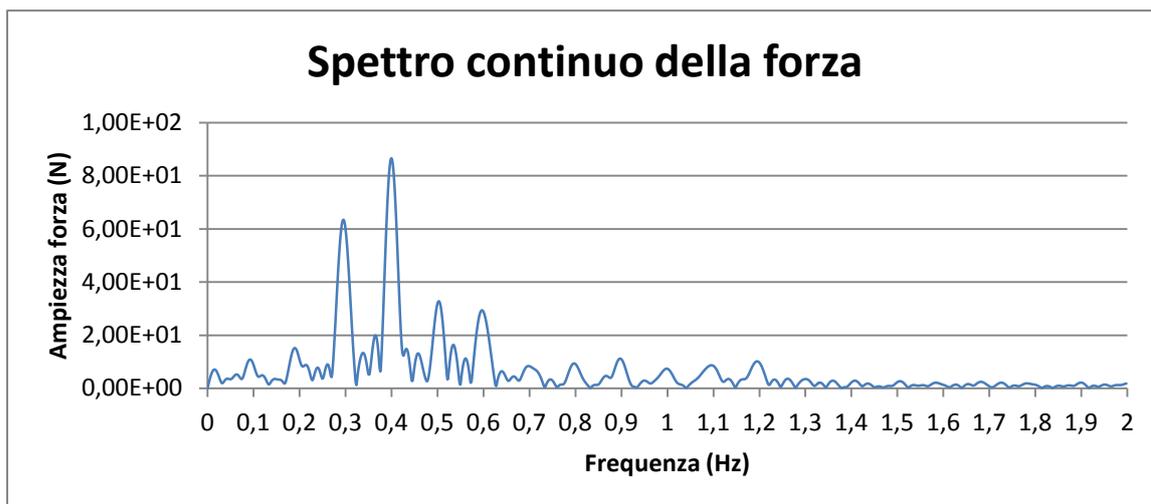
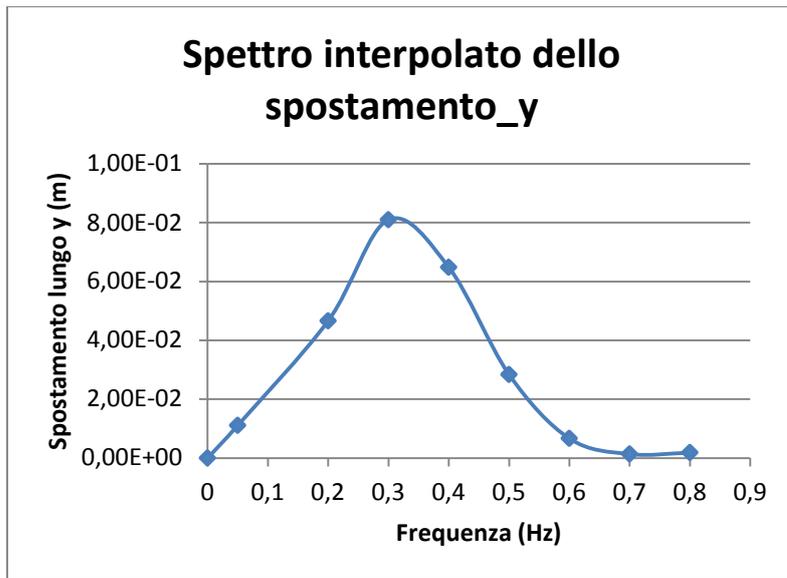


Fig.6.12 spettro continuo della forza agente sul corpo galleggiante nel caso di onda irregolare.

Come si può notare gli spettri continui della forza e dello spostamento presentano dei picchi in corrispondenza delle stesse frequenze, ovvero: 0,2 Hz, 0,3 Hz, 0,4 Hz ,0,5 Hz e 0,6 Hz. Tuttavia le relative ampiezze sono diverse. Se si confrontano questi spettri con quello utilizzato nella simulazione per rappresentare l'onda irregolare (che coincide con lo spettro di JONSWAP riportato nel capitolo 2 Fig.2.5) si può notare che i principali picchi si trovano all'interno del range di frequenze utilizzato per definire lo spettro dell'onda irregolare (0,15-0,75 Hz). Utilizzando le frequenze corrispondenti ai picchi e le relative ampiezze dello spettro dello spostamento (come in tabella 6.3), si può costruire il grafico di figura 6.13.

Frequenza (Hz)	Ampiezza spostamento (m)
0	2,02E-15
0,05	0,0111
0,2	0,046618
0,3	0,080991
0,4	0,064829
0,5	0,02838
0,6	0,006672
0,7	0,001378
0,8	0,00186

Tabella 6.3 ampiezze dello spostamento corrispondenti alle frequenze di picco



6.13 spettro ottenuto per interpolazione dello spettro del grafico 6.10

Come si può notare il grafico riportato in figura 6.13 presenta un andamento molto simile allo spettro di JONSWAP (fig.6.14) utilizzato per rappresentare l'onda irregolare. Per visualizzare meglio questa similitudine si riporta di seguito lo spettro di JONSWAP utilizzato per descrivere l'onda irregolare nella simulazione descritta nel paragrafo 5.5 (Fig.6.14)

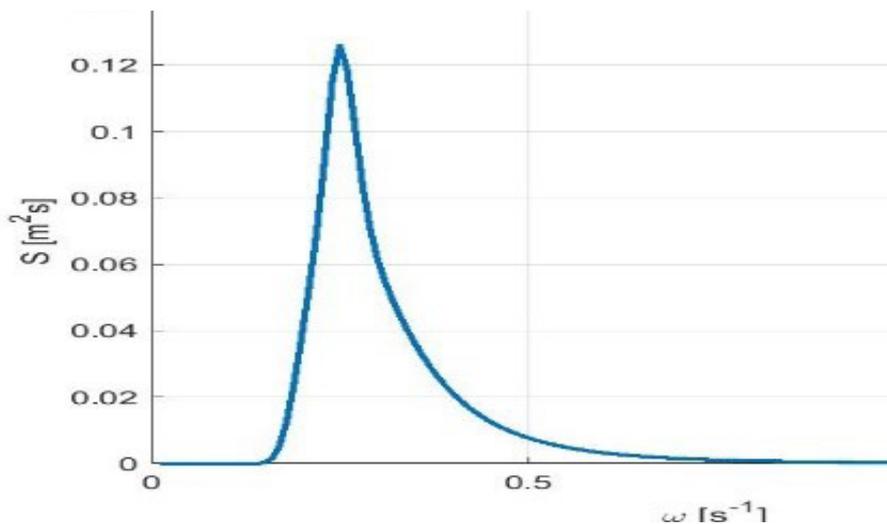


Fig.6.14 Spettro di JONSWAP di uno stato di mare di altezza significativa di 0,5 m e periodo di picco di 4 s

Come si può notare dal grafico 6.13 la frequenza corrispondente al massimo dello spettro interpolato è pari a 0,3 Hz. Questa frequenza è molto simile alla frequenza di

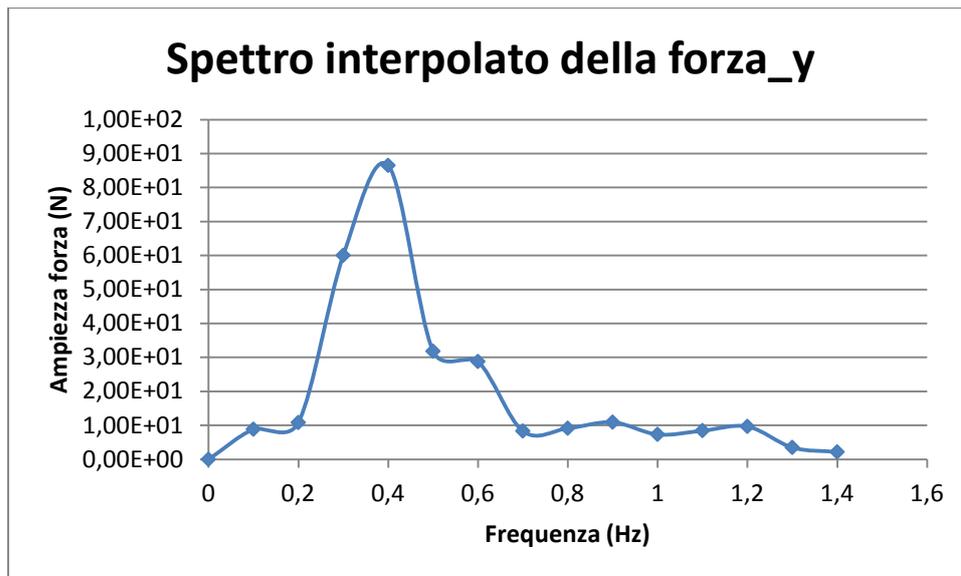
picco dello spettro di JONSWAP dell'onda irregolare (Fig.6.14), pari a 0,25 Hz. Dal confronto tra lo spettro di JONSWAP che definisce l'onda irregolare e lo spettro interpolato dello spostamento del corpo galleggiante, si può concludere che lo spettro ottenuto per lo spostamento è in linea con lo spettro utilizzato per la definizione dell'onda irregolare di eccitazione, come ci si poteva aspettare.

Seguendo lo stesso procedimento per lo spettro della forza, si riportano in tabella 6.4 le frequenze corrispondenti ai picchi e le relative ampiezze dello spettro della forza.

Frequenza (Hz)	Ampiezza della forza (N)
0	2,93E-12
0,1	8,861022
0,2	10,83751
0,3	60,05313
0,4	86,53511
0,5	31,8328
0,6	28,79335
0,7	8,327281
0,8	9,153245
0,9	10,9432
1	7,3454
1,1	8,455108
1,2	9,681844
1,3	3,501072
1,4	2,182202

Tabella 6.4 ampiezze della forza corrispondenti alle frequenze di picco

Si può quindi costruire il grafico dello spettro interpolato della forza (Fig.6.15).



6.15 spettro ottenuto per interpolazione dello spettro del grafico 6.11

Come si può notare il grafico in figura 6.15 ha un andamento che si avvicina molto a quello dello spettro di JONSWAP (Fig.6.14), ma presenta alcune differenze. In particolare, la frequenza a cui corrisponde l'ampiezza massima è pari a 0,4 Hz, mentre per lo spettro di JONSWAP, utilizzato per rappresentare l'onda irregolare, la frequenza di picco corrisponde a 0,25 Hz. Le due frequenze di picco sono differenti tra i due spettri, anche se non eccessivamente. Da questa differenza si può confermare quanto detto nel paragrafo 6.3.1: il modello dinamico lineare si avvicina alla descrizione della realtà, ma non ne costituisce una rappresentazione del tutto precisa. Secondo tale modello lineare, infatti, lo spettro della forza dovrebbe avere la stessa forma di quello dell'onda irregolare. Da quanto emerso dall'analisi in frequenza dei risultati ottenuti dalle simulazioni CFD, che non utilizzano un modello lineare, si evince che lo spettro della forza di interazione tra fluido e corpo galleggiante non è del tutto uguale a quello dell'onda irregolare. Infatti i due spettri presentano frequenze di picco differenti: quella dello spettro della forza è spostata verso valori maggiori rispetto a quella dello spettro dell'onda irregolare.

7. CONCLUSIONI

In questo studio sono state svolte delle simulazioni numeriche CFD per studiare l'interazione tra le onde del mare e il dispositivo galleggiante WEC Resen. I risultati ottenuti, relativi alla forza agente sul galleggiante e al suo spostamento in direzione verticale, sono stati analizzati in frequenza e confrontati con quanto previsto dal modello dinamico lineare. Come si è visto dall'analisi armonica di Fourier della forza risultante dall'interazione tra l'onda regolare e il corpo galleggiante, la frequenza a cui corrisponde l'ampiezza maggiore è pari alla frequenza dell'onda. Tuttavia anche le frequenze relative alla seconda e terza armonica hanno ampiezze significative, anche se decisamente inferiori: la seconda armonica, infatti, ha ampiezza pari a circa il 22% di quella della prima armonica, mentre la terza è circa il 15%. Il modello dinamico lineare prevede che la forza agente sul corpo sia una senoide di frequenza pari alla frequenza dell'onda. La presenza di sinusoidi di frequenza doppia e tripla di quella dell'onda costituisce una differenza tra il modello dinamico lineare e quello CFD. Tuttavia l'ampiezza relativamente piccola di queste due componenti conferma il fatto che il modello dinamico lineare non costituisce una rappresentazione esatta dei fenomeni simulati, ma ne costituisce una buona approssimazione. Questa conclusione viene confermata anche dai risultati ottenuti dall'analisi in frequenza della simulazione dell'interazione tra un'onda irregolare e un corpo galleggiante. Da questa analisi, infatti, si nota che gli spettri dell'onda irregolare e della forza hanno un andamento molto simile, ma presentano il massimo dell'ampiezza in corrispondenza di frequenze diverse. La differenza tra le due frequenze di picco è significativa ma decisamente non elevata, perciò anche da questo confronto si evince che il modello dinamico lineare sia un'approssimazione accettabile della realtà, ma non ne costituisca una rappresentazione del tutto fedele.

RIFERIMENTI

- [1] Babarit, A. (2017). *Ocean Wave Energy Conversion: Resource, Technologies and Performance* (1sted.) ISTE Press - Elsevier.
- [2] Vicinanza, D., Margheritini, L., Kofoed, J. P., & Buccino, M. (2012). *The SSG Wave Energy Converter: Performance, Status and Recent Developments*. *Energies*,
- [3] (Review of 5kW wave energy LOPF buoy design study and test. (2017). Department of Civil Engineering, Aalborg University).
- [4] *Overtopping Wave Energy Converters: general aspects and stage of development*. (2011). Giovanna Bevilacqua Barbara Zanuttigh.
http://amsacta.unibo.it/3062/1/overtopping_devicex.pdf
- [5] L. Pietra, M. Tello, J. Bhattacharjee and C. Guedes Soares. (2011). Review and classification of wave energy converters. Centre for Marine Technology and Engineering (CENTEC), Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.,
- [6] S. (2020, March 18). *Energia Rinnovabile dal mare*. STSITALIASRL. <https://www.sts-italia.it/energia-rinnovabile-dal-mare>
- [7] *Resen Waves*. <http://www.resenwaves.com/>(2020, October 19))
- [8] *The LEANCON Wave Energy Device*(2020). <http://leancon.com/>
- [9] Tossarelli, G. (2014). *Meteorologia marittima a Lezione 3 e 4 [Slides]*. Unipi.
https://www.unipi.it/index.php/offerta/item/download/3229_1a2b1d142ceecc3b2403cc52b4102d0c
- [10] (Pecher, A., & Kofoed, J. P. (2016). *Handbook of Ocean Wave Energy (Ocean Engineering & Oceanography 7)* (1st ed. 2017 ed.). Springer)
- [11] *Onde reali*. (2017–2018). E. Foti.
- [12] Reboli T. *Energia dal mare: analisi prestazionale di dispositivi per la conversione energetica da moto ondoso in ambiente rilevante*. Tesi di dottorato. Università degli studi di Genova, scuola politecnica, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica, Gestionale e dei Trasporti, 2019. Relatore A. Traverso
- [13] Babarit, A., Hals, J., Muliawan, M. J., Kurniawan, A., Moan, T., & Krokstad, J. (2012). Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. *Renewable Energy*, 41, 44–63. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.10.002>
- [14] Beirão, P. J. B. F. N., & dos Santos Pereira Malça, C. M. (2014). Design and analysis of buoy geometries for a wave energy converter. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 5(2–3), 1. <https://doi.org/10.1007/s40095-014-0091-7>
- [15] Beirão, P., & Valério, D. (2015). Numerical comparison between deep water and intermediate water depth expressions applied to a wave energy converter. *AIMS Energy*, 3(4), 525–546. <https://doi.org/10.3934/energy.2015.4.525>

- [16] Andersson, B., Andersson, R., Håkansson, L., Mortensen, M., Sudiyo, R., & Wachem, V. B. (2011). *Computational Fluid Dynamics for Engineers* (1st ed.). Cambridge University Press.
- [17] Mohammad Rahmati. (2020). *Introduction to CFD*. Northumbria University
- [18] Equazioni della fluidodinamica e metodologia CFD. (2020). [Slides]. Unina. <https://www.docenti.unina.it/webdocenti-be/allegati/materiale-didattico/545846>
- [19] Brocchini, M. (2018–2019). *Appunti di idraulica*. Università Politecnica delle Marche.
- [20] Wikipedia contributors. (2020, July 6). Volume of fluid method. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Volume_of_fluid_method
- [21] Best Practices Workshop: Overset Meshing. (2013). [Slides]. http://mdx2.plm.automation.siemens.com/sites/default/files/Presentation/Kynan_Overset_Final.pdf
- [22] Connor, F. R. (1979). *fondamenti di elettronica e telecomunicazioni SEGNALI*. franco muzzio editore.
- [23] Ansys Fluent users guide. (2009). Afs.Enea.It. https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug//main_pre.htm
- [24] ANSYS Fluent Tutorial Guide. (2011). Ansys.
- [25] ANSYS Fluent Getting Started Guide. (2012). Ansys.
- [26] ANSYS Fluent User's Guide. (2013). Ansys.
- [27] Fico F. *Analisi numerica dello scambio termico monofase di R1234yf in minitubi microaletti*. Tesi di laurea magistrale. Università degli studi di Padova, 2018. Relatore: L. Rossetto
- [28] Sperandio I. *prove numeriche per il miglioramento dell'efficienza di una turbina idrocinetica a coclea*. Tesi di laurea in ingegneria meccanica .Università politecnica delle Marche, 2017. Relatore: Brocchini M.
- [29] Tombolini T. *Valutazione numerica degli effetti della geometria di un dispositivo WEC sulla potenza estraibile da moto ondoso*. Tesi di laurea in ingegneria civile e ambientale .Università politecnica delle Marche, 2019. Relatore: Brocchini M.

APPENDICE A

Codice in visual basic utilizzato per l'analisi armonica di Fourier.

```
Module1.vb
Module Module1
    Public Xt(50000) As Double
    Public Nx, T, Kmax, Tstep, Ck(50000) As Double
End Module

Public Sub SerieFourier(ByRef Xt As Double(), ByRef Nx As Double, T As Double, ByRef Kmax As Double, Tstep As Double, Ck As Double())
    Dim Ak(50), Bk(50), W0, Pi, Time, NumPer As Double

    Pi = 4 * Math.Atan(1)
    W0 = 2 * Pi / T
    NumPer = Tstep * Nx / T

    For k = 1 To Kmax
        Ak(k) = 0
        Bk(k) = 0
        For i = 0 To Nx - 1
            Time = i * Tstep
            Ak(k) = Ak(k) + Tstep * Xt(i) * Math.Cos(k * W0 * Time)
            Bk(k) = Bk(k) + Tstep * Xt(i) * Math.Sin(k * W0 * Time)
        Next
        Ak(k) = Ak(k) * 2 / T / NumPer
        Bk(k) = Bk(k) * 2 / T / NumPer
    Next

    For k = 1 To Kmax
        Ck(k) = Math.Sqrt(Ak(k) * Ak(k) + Bk(k) * Bk(k))
    Next
End Sub

End Module
```

APPENDICE B

Codice in visual basic utilizzato per l'analisi in frequenza secondo la trasformata di Fourier.

```
Module2.vb
Module Module1
Public Xt(50000) As Double
Public Nk, Nf, Tstep, Fstep, Xf(50000) As Double

Public Sub TrasformataFourier(ByRef Xt As Double(), ByRef Nk As Double, ByRef Nf As Double, ByRef Tstep As Double, Fstep As Double, Xf As Double())

Dim Pi, Tim, Frq, Re, Im, Wt, XtAve As Double

Pi = 4 * Math.Atan(1)

'Nk = 5000
'Tstep = 0.01
'Frq = 0.067
'For i = 0 To Nk - 1
'Tim = i * Tstep
'Wt = 2 * Pi * Frq * Tim
'Xt(i) = 2 * Math.Sin(Wt) + 1.5 * Math.Cos(5 * Wt) + 2
'Next

XtAve = 0
For i = 0 To Nk - 1
XtAve += Xt(i)
Next
XtAve = XtAve / Nk

For j = 0 To Nf - 1
Frq = j * Fstep
Re = 0
Im = 0
For i = 0 To Nk - 1
Tim = i * Tstep
Wt = 2 * Pi * Frq * Tim
Re += (Xt(i) - XtAve) * Math.Cos(Wt) * Tstep
Im -= (Xt(i) - XtAve) * Math.Sin(Wt) * Tstep
Next
XtAve = XtAve / Nk

For j = 0 To Nf - 1
Frq = j * Fstep
Re = 0
Im = 0
For i = 0 To Nk - 1
Tim = i * Tstep
Wt = 2 * Pi * Frq * Tim
Re += (Xt(i) - XtAve) * Math.Cos(Wt) * Tstep
Im -= (Xt(i) - XtAve) * Math.Sin(Wt) * Tstep
Next
Xf(j) = Math.Sqrt(Re * Re + Im * Im) / (Nk * Tstep) * 2
Next
End Sub

End Module
```