

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA**

**SCUOLA POLITECNICA**

**DIME**

**Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica,  
Gestionale e dei Trasporti**



**TESI DI LAUREA  
IN  
INGEGNERIA MECCANICA**

**Calcolo del coefficiente di resistenza per un sensore di  
neutrini posizionato nei fondali marini del Golfo del Leone**

**Relatori:**

Chiar.<sup>mo</sup> Prof. Ing. Tanda Giovanni

Chiar.<sup>mo</sup> Prof. Ing. Bottaro Alessandro

**Correlatori:**

Dott. Ing. Guerrero Rivas Joel Enrique

Dott. Anghinolfi Marco

**Allievo:**

Andrea Barberis

Settembre 2019

# **Calcolo del coefficiente di resistenza per un sensore di neutrini posizionato nei fondali marini del Golfo del Leone**

## **Sommario**

Il KM3 Neutrino Telescope (KM3NeT) è un'infrastruttura di ricerca sottomarina che ospita telescopi per neutrini di nuova generazione. L'elemento principale è il Modulo Ottico Digitale (DOM), un sensore in grado di captare i fotoni emessi dall'interazione di un neutrino in un mezzo, l'acqua. Tale misurazione è però fortemente influenzata dalla posizione spaziale del DOM, alterata rispetto alla posizione nominale a causa delle correnti marine. L'obiettivo di questo studio è pertanto quello di determinare il coefficiente di drag dei diversi componenti della linea, approssimati a valori relativi a corpi elementari in fase di progetto (sfera e cilindro), al fine di avere un modello meccanico di previsione dello spostamento del sistema.

Tramite Fluidodinamica Computazionale, sono state definite geometrie, mesh e condizioni al contorno dei diversi componenti: DOM, cavi e boa sommitale. Al variare di alcuni parametri (direzione e velocità della corrente), sono state eseguite diverse simulazioni. Come ci si aspettava, i valori medi dei coefficienti di drag dei singoli componenti sono risultati diversi da quelli teorici.

# **Calculation of the coefficients of drag force for a neutrino sensor positioned in the seabed of the Gulf of Lion**

## **Abstract**

The KM3 Neutrino Telescope (KM3NeT) is an underwater research infrastructure that houses new-generation neutrino telescopes. The main element is the Digital Optical Module (DOM), a sensor capable of picking up the photons emitted by the interaction of a neutrino in a medium, water. However, this measurement is strongly influenced by the spatial position of the DOM, altered with respect to the nominal position due to sea currents. The objective of this study is therefore to determine the drag coefficient of the different components of the line, approximated to values for elementary bodies in the design phase (sphere and cylinder), in order to have a mechanical model for predicting the displacement of the system.

Through the use of Computational Fluid Dynamics software, geometries, meshes and boundary conditions of DOM, cables and top buoy were defined. When various parameters change (current direction and speed), various simulations have been performed. As expected, the average values of the drag coefficients of the individual components were different from the theoretical ones.

# Ringraziamenti

In chiusura di questo primo percorso universitario, tante sono le persone che, in maniera diretta e indiretta, hanno contribuito a tutto ciò. Ringraziarli è il minimo che io possa fare.

I miei ringraziamenti vanno al Professore Giovanni Tanda e al Professore Alessandro Bottaro per l'entusiasmo che mi hanno trasmesso e il tempo da loro dedicato per la riuscita di questo progetto. Un sentito ringraziamento anche all'Ingegnere Joel Guerrero per avermi guidato pazientemente nel mondo della Computational Fluid Dynamics e al Dottore Marco Anghinolfi dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare per aver condiviso questo importante progetto con me. Ringrazio inoltre la Professoressa Annalisa Marchitto per aver creduto in me all'inizio di questo percorso, sei mesi fa.

Ringrazio immensamente i miei genitori Paolo e Cristina, mio fratello Luca e la mia compagna Francesca, colonne portanti di tutti i miei ambiziosi progetti; grazie per continuare insieme a me a credere in ciò che faccio, ascoltandomi pazientemente e spronandomi ogni giorno a migliorare.

Grazie a tutti i miei compagni di studio: l'unione fa la forza, anche in università. Tutto è possibile se si è in buona compagnia e noi ne siamo la dimostrazione.

Infine, in qualità di sportivo, ringrazio: i miei tecnici Michelangelo e Santa per contribuire ogni giorno non solo alla mia formazione sportiva ma anche alla mia crescita personale; i miei compagni di ballo, persone su cui si può contare nei momenti più intensi; gli allievi dei miei corsi, per la loro immensa pazienza e comprensione quando, durante i corsi serali, la stanchezza della giornata prende il sopravvento.

# Indice

<b>Sommario</b> .....	I
<b>Abstract</b> .....	II
<b>Ringraziamenti</b> .....	III
<b>1 – Introduzione</b> .....	1
1.1 – Fisica delle particelle .....	1
1.1.1 – Il neutrino .....	1
1.1.2 – L’ ”astronomia multimessaggero” .....	1
1.1.3 – Osservare i neutrini .....	2
1.1.4 – Il progetto KM3Net .....	2
1.2 – Fluidodinamica: moti esterni .....	4
1.2.1 – Resistenza e portanza .....	5
1.2.2 – Coefficiente di resistenza e portanza .....	6
1.2.3 – Flussi attorno a sfere e cilindri .....	7
<b>2 – Caratteristiche di KM3Net</b> .....	9
2.1 – Scelta del sito .....	9
2.2 – Design di KM3Net – Fr .....	10
2.2.1 – Modulo ottico digitale (DOM) .....	10
2.2.2 – Detection Unit (DU) .....	11
2.3 – Posizionamento dei DOM .....	11
2.4 – Comportamento fluidodinamico di una Detection Unit .....	12
2.5 – Tecnica di rivelamento .....	14
2.6 – Stato attuale di KM3Net e primi dati .....	14
<b>3 – Modelli numerici</b> .....	15
3.1 – CFD: fluidodinamica computazionale .....	15
3.2 – Come è strutturata una simulazione .....	15
3.2.1 – Pre-processing .....	16
3.2.2 – Solving .....	16
3.2.3 – Post-processing .....	16
3.3 – Equazioni di governo .....	16
3.4 – Modelli di turbolenza .....	17

3.5 – Discretizzazione del dominio .....	19
3.6 – Condizioni al contorno .....	20
3.7 – Tipologia di solver .....	21
<b>4 – Geometrie e simulazioni .....</b>	<b>23</b>
4.1 – Definizione delle geometrie .....	23
4.1.1 – DOM .....	23
4.1.2 – Boa sommitale .....	25
4.1.3 – Cavi .....	27
4.1.4 – Dominio di calcolo .....	29
4.2 – Griglia di calcolo .....	30
4.2.1 – Eclusioni .....	31
4.2.2 – DOM .....	31
4.2.3 – Boa sommitale .....	33
4.2.4 – Cavi .....	34
4.3 – Struttura dell’elaborato .....	35
4.4 – Valori di riferimento .....	35
4.5 – Condizioni al contorno .....	36
4.6 – Impostazione di ANSYS Fluent per la simulazione .....	37
4.7 – Convergenza di una simulazione .....	38
<b>5 – Risultati .....</b>	<b>39</b>
5.1 – Ricerca della convergenza dei calcoli .....	39
5.2 – I valori di $C_D$ .....	40
5.3 – Visualizzazioni grafiche .....	42
5.3.1 – Visualizzazione della scia .....	42
5.3.2 – Visualizzazione delle strutture vorticose .....	52
<b>6 – Conclusioni .....</b>	<b>59</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>60</b>
<b>Simbologia .....</b>	<b>61</b>

# 1. Introduzione

## 1.1 Fisica delle particelle

### 1.1.1 Il neutrino

Il neutrino è una particella subatomica elementare con carica elettrica nulla appartenente al gruppo dei leptoni<sup>1</sup>. Esistono tre specie (o “sapori”) differenti di neutrini: elettronici ( $\nu_e$ ), muonici ( $\nu_\mu$ ) e tauonici ( $\nu_\tau$ ), a seconda del leptone che accompagna il neutrino stesso.

Ipotizzati privi di massa, recenti esperimenti dimostrano che un neutrino, creato con un certo sapore, con il passare del tempo può assumere un sapore diverso. Questo fenomeno, conosciuto come oscillazione dei neutrini, implica che la massa dei neutrini non sia nulla; gli studi finora condotti, però, hanno solo permesso di porre dei limiti superiori.

Caratteristica fondamentale dei neutrini è la loro completa assenza di carica, sia elettrica che di “colore”, rendendo l’interazione con la materia possibile soltanto tramite forza nucleare debole e forza gravitazionale. Ciò spiega la piccolissima probabilità d’interazione dei neutrini, che permette loro di attraversare distanze enormi senza subire interazione. Per questo motivo il neutrino ricopre un ruolo fondamentale nello studio descrittivo dell’Universo remoto.

### 1.1.2 L’ “astronomia multimessaggero”

Attualmente la maggior parte delle nostre conoscenze dell’Universo proviene dall’osservazione dei fotoni. Essi presentano numerosi vantaggi in qualità di vettori di informazioni: sono prodotti copiosamente, sono stabili ed elettricamente neutri, sono facili da rilevare e forniscono informazioni dettagliate sulle proprietà chimiche e fisiche della sorgente.

Il loro svantaggio è che alcune fonti di energia astrofisiche sono completamente opache ai fotoni, rendendo quindi impossibile determinare le proprietà di queste regioni mediante l’osservazione diretta. Ad esempio, i fotoni che osserviamo dal Sole provengono dalla sua fotosfera, molto lontana dal nucleo di fusione.

L’unico candidato attualmente noto per osservare il funzionamento interno degli oggetti astrofisici è il neutrino. Privo di carica elettrica e debolmente interagente con la materia, il neutrino può propagarsi nell’Universo senza essere deviato dai campi magnetici e senza essere assorbito, conservando così l’informazione sulla direzione di provenienza.

Il prezzo da pagare è però legato alla loro natura elusiva che rende difficile la loro osservazione e il disturbo legato alla radiazione cosmica<sup>2</sup>.

Grazie alla combinazione di neutrini, fotoni (onde elettromagnetiche) e onde gravitazionali, la cosiddetta “astronomia multimessaggero” costituisce un’innovativa via di esplorazione e ampliamento delle nostre conoscenze dell’Universo.

---

<sup>1</sup> In fisica, gruppo di particelle elementari. Si suddividono in elettroni, muoni, mesoni tau e neutrini. Fatta eccezione per il neutrino, le restanti particelle hanno carica elettrica negativa e positiva.

<sup>2</sup> Le radiazioni cosmiche (o astroparticelle) sono flussi di particelle subatomiche provenienti da vari corpi celesti ai quali è esposta la Terra. La loro natura è molto varia (la loro energia è distribuita su diversi ordini di grandezza), così come varia è la loro origine.

### 1.1.3 Osservare i neutrini

Abbiamo detto che i neutrini sono particelle che interagiscono molto difficilmente con la materia, tanto che la stessa Terra è praticamente trasparente per un neutrino. Di conseguenza la rivelazione (o cattura) è estremamente improbabile.

Data la rarità delle interazioni, è necessario realizzare rivelatori particolari, caratterizzati da un volume strumentato molto grande: le stime teoriche indicano un volume di almeno un chilometro cubo. Inoltre, per schermarsi dalla pioggia di radiazioni cosmiche che ininterrottamente bersagliano la Terra, i rivelatori devono essere installati in luoghi fortemente schermati. È però evidente che dispositivi di queste dimensioni non possono essere collocati in laboratori sotterranei. Una possibile soluzione, allora, è quella di strumentare opportunamente grandi volumi di un mezzo naturale.

In un mezzo trasparente, come l'acqua delle profondità marine o i ghiacciai polari, è possibile rivelare la radiazione luminosa prodotta per effetto Cherenkov dalle particelle secondarie (muoni), che i neutrini generano interagendo con la materia. Una griglia di alcune migliaia di sensori ottici disposti in un volume di circa un chilometro cubo è in grado di rivelare la debole luce prodotta permettendo di ricostruire la traccia del muone. Poiché quest'ultimo ha una direzione sostanzialmente uguale a quella del neutrino che l'ha prodotto, la sua rivelazione permette di risalire anche alla direzione del neutrino e di conseguenza all'osservazione della sua sorgente. Inoltre, ponendo il rivelatore nelle profondità marine (o dei ghiacci polari), la materia sovrastante funge anche da schermo contro il disturbo delle particelle cosmiche, che in superficie "accecherebbe" il rivelatore. L'acqua (o il ghiaccio) assolve, così, a un triplice compito: schermo protettivo dai raggi cosmici, bersaglio per l'interazione di neutrini e mezzo trasparente attraverso il quale si propaga la luce Cherenkov.

### 1.1.4 Il progetto KM3Net

Il Cubic Kilometre Neutrino Telescope, o KM3NeT, è un network multidisciplinare di rivelatori sottomarini con un volume strumentato totale di alcuni chilometri cubici, la cui realizzazione sarà completata entro il 2025. Dalle profondità del Mar Mediterraneo, l'infrastruttura fornisce un'ampia gamma di dati che abbracciano l'astrofisica delle particelle, la geofisica, l'oceanografia e la scienza del mare.

L'infrastruttura è distribuita su due siti: KM3NeT-Fr (Tolone, Francia) e KM3NeT-It (Portopalo di Capo Passero, Sicilia, Italia). Un terzo sito, KM3NeT-Gr (Pylos, Peloponneso, Grecia), è attualmente candidato per una futura espansione.

Per la sua posizione nell'emisfero settentrionale, KM3Net costituisce un osservatorio complementare al rivelatore IceCube<sup>3</sup>, offrendo così una completa visione del cielo.



*Figura 1.1 - Logo del progetto KM3Net*

---

<sup>3</sup> L'IceCube Neutrino Detector è un rivelatore di neutrini costruito in Antartide.

Gli obiettivi principali del progetto KM3NeT sono:

- i) scoperta e osservazione di sorgenti galattiche di neutrini ad alto contenuto energetico;
- ii) determinazione della gerarchia di massa dei neutrini.

Questi obiettivi sono fortemente motivati da due recenti scoperte:

- 1) 22 settembre 2017: il rivelatore di neutrini IceCube osserva un neutrino ad elevata energia, indice che era stato originato da un lontano oggetto celeste molto “attivo”;
- 2) L’avanzamento della ricerca sugli autostati di massa dei neutrini<sup>4</sup>.

Lo schema costruttivo di un singolo rivelatore comprende 115 stringhe. Su ognuna di esse sono montati 18 moduli ottici che ospitano 31 fotosensori ciascuno. Un singolo rivelatore costituisce quindi un array tridimensionale di fotosensori.

Nella sua posizione operativa la stringa è ancorata al fondale marino e tenuta in posizione verticale per mezzo di una boa posta alla sua estremità. Sul fondale marino una rete di cavi elettro-ottici e di junction box, a cui le stringhe sono connesse, permette sia la distribuzione della potenza elettrica alle stringhe sia la trasmissione dei dati verso terra.

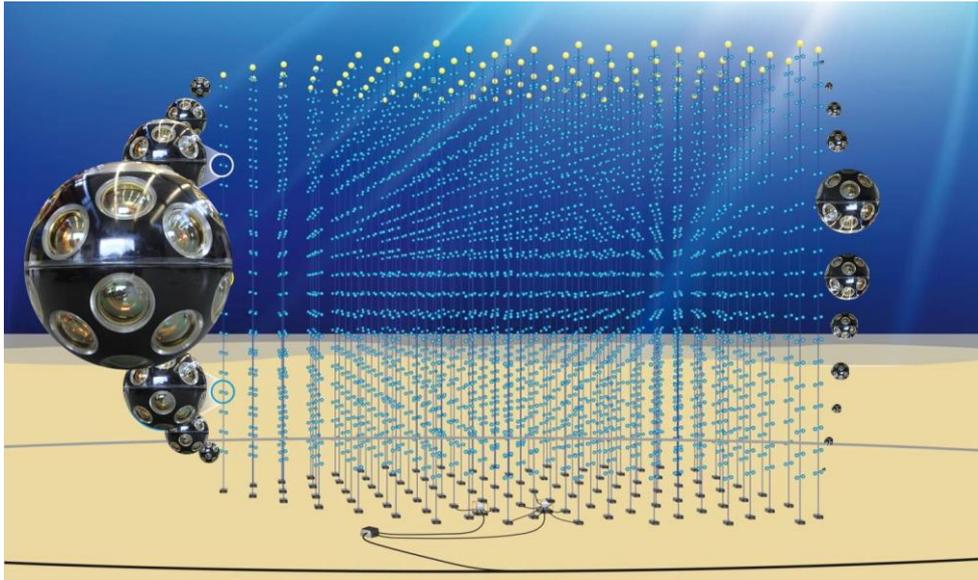
Il blocco costruttivo italiano KM3NeT-It è dedicato all’astronomia con neutrini ad alta energia (ARCA: Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss), mentre il blocco francese KM3NeT-Fr è configurato per studiare la gerarchia di massa dei neutrini (ORCA: Oscillation Research with Cosmics in the Abyss). Data la flessibilità di design di KM3NeT, l’implementazione tecnica di ARCA e ORCA è pressoché identica. Quello che differenzia i due blocchi è il layout geometrico e l’altezza delle stringhe. In ORCA, dove si vogliono misurare neutrini di più basse energie<sup>5</sup>, la distanza tra ciascun DOM è di circa 10 m e la distanza tra le stringhe di 20 m. In ARCA, invece, la distanza di ciascun DOM è di circa 36 m e lo spazio tra le stringhe di 100 m. In tal caso ciascuna stringa supera l’altezza di 800 m dal fondo marino. E’ chiaro che con queste dimensioni, una corrente marina anche di modesta intensità, sotto i 5-10 cm/s, può spostare la posizione di ciascun DOM rispetto alla posizione nominale di stringa completamente verticale.

Grazie all’installazione di strumenti dedicati alla geofisica, all’oceanografia e alle scienze del mare, KM3Net consente inoltre un monitoraggio permanente e in tempo reale dell’ambiente sottomarino.

---

<sup>4</sup> Ordine in cui sono disposte le masse delle tre specie di neutrino.

<sup>5</sup> L’energia di un neutrino si misura in elettronvolt (eV). Per neutrini di bassa energia si intende sotto i 100 GeV. Per neutrini di alta energia si supera il TeV.



*Figura 1.2 – Rappresentazione di un rivelatore KM3Net ancorato al fondale marino*

## **1.2 Fluidodinamica: moti esterni**

Nella pratica, il moto di fluidi attorno a corpi solidi è molto frequente ed è responsabile di numerosi fenomeni fisici, come la forza di resistenza che agisce sui veicoli terrestri e aerei, linee elettriche, edifici ecc. ecc. Pertanto, l'approfondimento di questi moti è fondamentale per la progettazione di molti sistemi di ingegneria come aeromobili, automobili, strutture, navi, sottomarini e tutti i tipi di turbine.

Per quanto apparentemente differenti, un fluido in movimento attorno a un corpo o un corpo in moto in un fluido fermo sono equivalenti ai fini dei moti esterni; ciò che conta è il moto relativo tra i due. Le caratteristiche aerodinamiche delle ali degli aeroplani, ad esempio, sono studiate convenientemente in un laboratorio posizionando le ali in galleria del vento e soffiando aria (condizione operativa opposta al reale funzionamento). I campi di flusso e le geometrie, per la maggior parte dei problemi di flusso esterno, sono però complicate da risolvere analiticamente e dobbiamo pertanto fare affidamento alla Fluidodinamica Computazionale (CFD).

Per comprendere meglio la seguente trattazione teorica, è necessario introdurre la velocità del fluido che si avvicina al corpo, chiamata velocità del flusso libero, indicata generalmente con  $V$ . La velocità del fluido varia da zero sulla superficie (condizione di aderenza) al valore del flusso libero lontano dalla superficie. La velocità del flusso libero può variare, ma generalmente viene considerata uniforme e costante per comodità. Gioca un ruolo fondamentale per il flusso e il campo di velocità la forma del corpo.

### 1.2.1 Resistenza e portanza

È esperienza comune che un corpo incontri una certa resistenza quando esso è in movimento in un fluido, in particolare un liquido. Un fluido può esercitare infatti forze e momenti su un corpo lungo diverse direzioni. Generalmente, quando un corpo in movimento è immerso in un fluido fermo, esso sperimenta solo forze di pressione normali alla superficie; quando invece il fluido è in movimento, il corpo sperimenta anche uno sforzo di taglio a causa della condizione di aderenza causata dagli effetti viscosi.

La forza che un fluido in moto esercita su un corpo nella direzione del flusso si chiama resistenza (drag in inglese). Tale forza è solitamente un effetto indesiderato da minimizzare: la riduzione della resistenza è infatti strettamente associata alla riduzione di consumo di carburante in automobili, sottomarini e aerei; maggiore sicurezza e durata delle strutture soggette a forti venti; riduzione del rumore e delle vibrazioni. In alcuni casi, invece, la resistenza produce un effetto positivo ed è necessario massimizzarla. In generale, sia le forze di pressione normali che lo sforzo di taglio hanno componenti nella direzione del flusso, contribuendo quindi alla risultante della forza di resistenza.

Le componenti di pressione e forze di taglio nella direzione normale al flusso tendono invece a muovere il corpo in quella direzione, e la loro risultante si chiama portanza (lift in inglese). Portanza e resistenza integrate su tutta la superficie del corpo studiato sono date da:

$$F_D = \int_A dF_D = \int_A (-P \cos \vartheta + \tau_w \sin \vartheta) dA \quad (1.1)$$

$$F_L = \int_A dF_L = - \int_A (P \sin \vartheta + \tau_w \cos \vartheta) dA \quad (1.2)$$

Come si può vedere dalla Fig. 1.3,  $\vartheta$  rappresenta l'angolo compreso tra la normale alla superficie del corpo e l'orizzontale, mentre  $PdA$  e  $\tau_w dA$  sono rispettivamente le forze di pressione e di taglio agenti su un elemento superficiale infinitesimo del corpo.

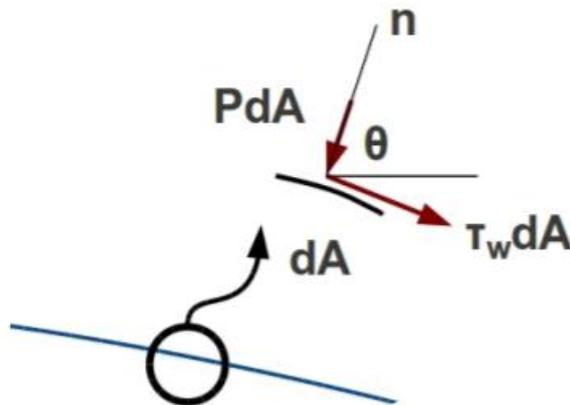


Figura 1.3 – Le componenti di pressione e di taglio agenti su un elemento infinitesimo di area  $dA$ .

### 1.2.2 Coefficiente di resistenza e portanza

Le forze di drag e lift dipendono da diversi fattori, tra cui i più importanti sono:

- densità del fluido  $\rho$ ;
- velocità del flusso libero  $V$ ;
- geometria del corpo: dimensione, forma e orientamento.

Non è pratico elencare le forze per una varietà di situazioni; è invece conveniente lavorare con numeri appropriati adimensionali, che rappresentano le caratteristiche di resistenza e portanza del corpo. Questi numeri sono il coefficiente di drag  $C_D$  e il coefficiente di lift  $C_L$  e sono così definiti:

$$\text{Coefficiente di drag} \quad C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (1.3)$$

$$\text{Coefficiente di lift} \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (1.4)$$

dove:

$F_D$  = portanza

$F_L$  = resistenza

$\rho$  = densità del fluido

$V$  = velocità del flusso imperturbato

$A$  = area frontale del corpo (area proiettata su un piano normale alla direzione del flusso).

Il termine a denominatore  $\frac{1}{2}\rho V^2$  è tipicamente chiamato pressione dinamica. I coefficienti di drag e lift sono principalmente funzioni della forma del corpo, ma in alcuni casi dipendono anche dal numero di Reynolds e dalla rugosità della superficie.

Tali coefficienti variano lungo la superficie a causa dei cambiamenti dello strato limite di velocità nella direzione del flusso. Di solito siamo però interessati alle risultanti delle forze, che possono essere determinate utilizzando i loro valori medi.

### 1.2.3 Flussi attorno a sfere e cilindri

Molte situazioni ricorrenti nella pratica coinvolgono flussi attorno a sfere e cilindri.

Come detto precedentemente, nella definizione del coefficiente di resistenza totale  $C_D$ <sup>6</sup>. Giocano un ruolo fondamentale la natura del flusso e il numero di Reynolds  $Re = \rho V D / \mu$ , dove:

$\rho$  = densità del fluido

$V$  = velocità del flusso imperturbato

$D$  = diametro della sfera o del cilindro

$\mu$  = viscosità dinamica del fluido.

Al variare del numero di Reynolds infatti varia la forza di resistenza che il corpo sperimenta, in quanto cambiano i contributi legati agli effetti viscosi o di pressione.

In particolare, per bassi numeri di Reynolds le forze di resistenza sono principalmente dovute all'attrito, mentre per Reynolds elevati sono legate agli effetti della pressione. Per intermedi valori di Reynolds, entrambi gli effetti sono significativi.

I valori medi dei coefficienti di drag  $C_D$  per una sfera e un cilindro liscio indefinito sono riportati in Fig. 1.4.

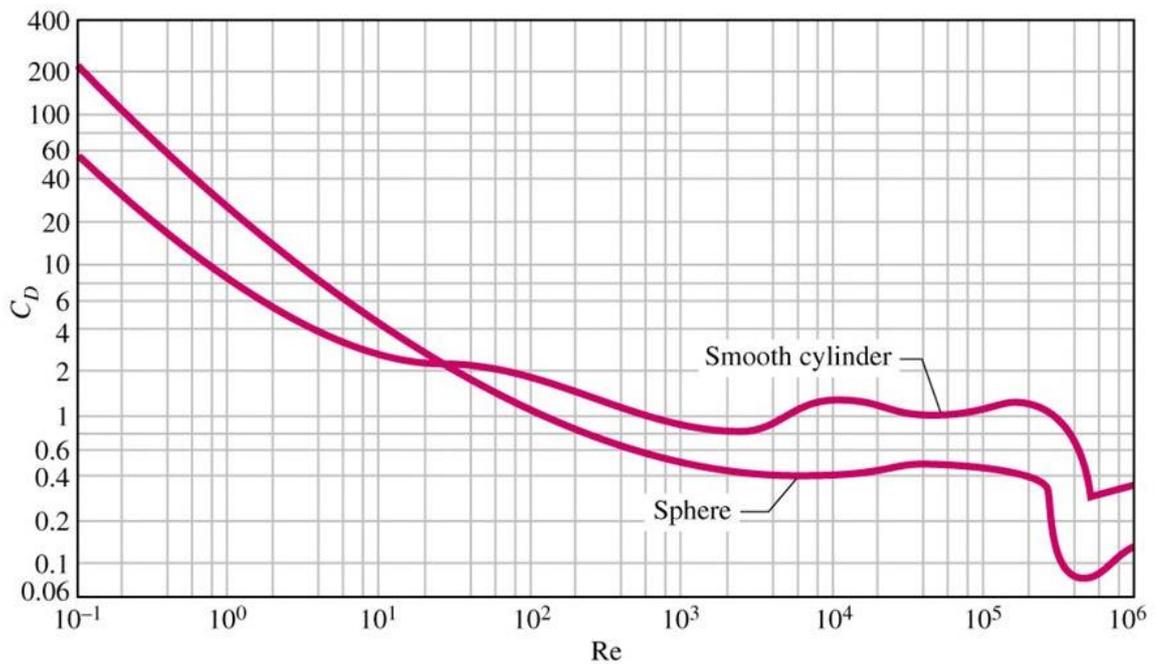


Figura 1.4 – Valori medi di  $C_D$  per flusso attorno a una sfera e a un cilindro indefinito, al variare di  $Re$

<sup>6</sup> Per coefficiente di resistenza totale si intende  $C_D = C_{D,pressione} + C_{D,attrito}$  dove i due coefficienti parziali fanno riferimento agli effetti di pressione e attrito valutati singolarmente, in maniera del tutto analoga all' Eq. (1.1).

Come si può vedere, l'andamento di  $C_D$  dipende fortemente da  $Re$ :

- Per  $Re \leq 1$ , si ha un moto di Stokes<sup>7</sup> e  $C_D$  diminuisce all'aumentare di  $Re$ . Per una sfera,  $C_D = 24/Re$ . In questo regime, non si ha separazione del flusso;
- A circa  $Re = 10$ , si inizia a verificare separazione sul retro del corpo con sviluppo di vortici a partire da circa  $Re = 90$ . La regione di separazione aumenta all'aumentare del numero di Reynolds fino a circa  $Re = 103$ . A questo punto, la resistenza è prevalentemente legata agli effetti di pressione.  $C_D$  continua a diminuire<sup>8</sup> all'aumentare di  $Re$ , fino a circa  $Re \approx 10^3$ ;
- Nell'intervallo  $10^3 \leq Re \leq 10^5$ ,  $C_D$  rimane pressoché costante. Il flusso nello strato limite è laminare mentre il flusso oltre il corpo è fortemente turbolento, con generazione di una scia turbolenta;
- Si registra nell'intervallo  $10^5 \leq Re \leq 10^6$  un improvviso calo di  $C_D$  a causa della turbolenza del flusso nello strato limite. Ciò comporta uno spostamento, nella parte posteriore del corpo, del punto di distacco del flusso, riducendo le dimensioni della scia e l'entità degli effetti di drag legati alla pressione.

Nella pratica, per il valore medio del coefficiente di drag  $C_D$  di un cilindro perpendicolare alla direzione del flusso, è preferibile far riferimento al rapporto altezza/diametro (in inglese *aspect ratio*), come si vede dalla Fig. 1.5:

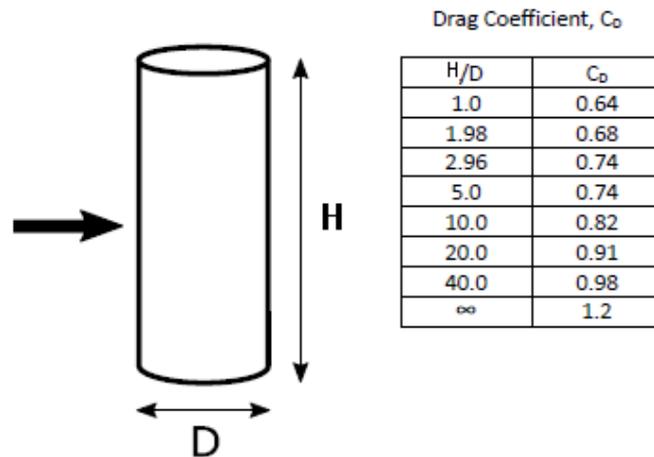


Figura 1.5 – Coefficiente di drag di un cilindro al variare dell'aspect ratio

Come si può notare, per un aspect ratio tendente a infinito (cilindro indefinito), le Figg. 1.4 e 1.5 riportano analoghi valori di  $C_D$ , ossia 1.2.

<sup>7</sup> Flusso caratterizzato da  $Re \ll 1$ , in cui gli effetti viscosi prevalgono su quelli inerziali.

<sup>8</sup> Una diminuzione di  $C_D$  non indica necessariamente una riduzione della forza di drag, in quanto essa è proporzionale al quadrato della velocità. A  $Re$  elevati pertanto, l'aumento della velocità è solitamente maggiore della diminuzione di  $C_D$ .

## 2. Caratteristiche di KM3Net

### 2.1 Scelta del sito

Il Mar Mediterraneo soddisfa i principali criteri per la scelta del sito quali:

- Vicinanza alla costa per installazione e riduzione dei costi;
- Profondità sufficiente per ridurre il rumore causato dai muoni atmosferici;
- Idonee proprietà ottiche dell'acqua;
- Basso livello di bioluminescenza;
- Velocità delle correnti marine limitate e stabili.

Gli studi preliminari portati avanti dai team di ricerca hanno selezionato i seguenti tre siti (Fig. 2.1):

- Tolone – Mar Ligure, profondità: 2500 m; distanza dalla costa 40km;
- Capo Passero – Mare Ionio, profondità: 3500 m; distanza dalla costa 100 km;
- Pylos – Mare Ionio, profondità: 4500 – 5200 m; distanza dalla costa 30-50 km.

Per ogni sito candidato sono state a lungo studiate le proprietà ottiche dell'acqua in profondità (assorbimento e diffusione) e le proprietà ambientali (temperatura, salinità, attività biologica, correnti d'acqua e sedimentazione).

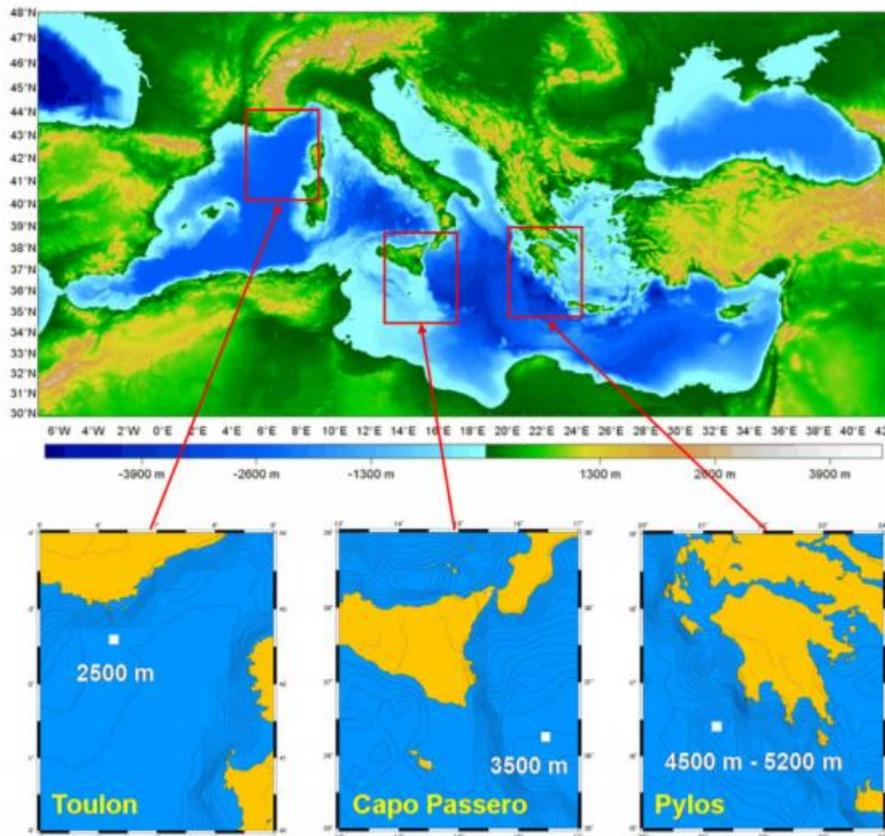


Figura 2.1 – I tre siti selezionati per le loro caratteristiche nel Mar Mediterraneo

## 2.2 Design di KM3Net – Fr

### 2.2.1 Modulo ottico digitale (DOM)

La componente principale del rivelatore è il modulo ottico digitale (DOM), ossia una sfera di vetro di diametro pari a 43.2 cm e 1.4 cm di spessore, in grado di sopportare l'enorme pressione tipica dei fondali marini. Al suo interno è installato un supporto in nylon, ottenuto tramite stampa 3D, su cui alloggiavano 31 foto-moltiplicatori (PMT) di lunghezza di 12.2 cm e 7.2 cm di diametro, in grado di rilevare la luce Cherenkov. Attorno alla faccia di ogni PMT è installato un anello riflettente, incrementando il diametro complessivo di un singolo foto-moltiplicatore a 8.5 cm: tale accorgimento permette di aumentare l'efficienza di ricezione dei fotoni del 20-40%. La faccia anteriore del foto-moltiplicatore è convessa con un raggio più piccolo del raggio interno della sfera di vetro; per assicurare il contatto ottico, la cavità tra il supporto e il vetro viene riempita con un gel. Il supporto e il gel sono sufficientemente flessibili da consentire la deformazione della sfera di vetro sotto la pressione idrostatica. A causa delle dimensioni ridotte del PMT, l'influenza del campo magnetico terrestre è trascurabile, garantendo migliore efficienza e purezza del segnale rispetto ai tradizionali moduli ottici che utilizzano un singolo PMT di grandi dimensioni.



*Figura 2.2 - Modulo ottico digitale (DOM)*

I PMT sono organizzati su 5 anelli da 6 PMT ciascuno, più un singolo PMT nella parte inferiore che punta verticalmente verso il basso. PMT successivi sono disposti ogni  $60^\circ$  in direzione azimutale e gli anelli sono tra loro sfalsati di  $30^\circ$ . Per l'ingombro che apporta ogni sensore, l'emisfero inferiore ospita 19 PMT, mentre 12 PMT sono collocati nell'emisfero superiore. Quando un fotone emesso per effetto Cherenkov colpisce un fotomoltiplicatore, quest'ultimo genera un piccolo impulso elettrico che, dopo essere stato opportunamente amplificato, viene inviato al sistema di elaborazione. Tramite un convertitore time-to-digital, vengono infine registrati tempi di arrivo e intensità di luce. Pertanto, ogni PMT è dotato di un circuito miniaturizzato che provvede ad alimentare il sensore stesso e ad amplificare il segnale emesso.

### 2.2.2 Detection Unit (DU)

Una singola Detection Unit è alta 200 m e ospita, a partire da 40 m dal fondo del mare, 18 DOM tra loro distanziate da 9 m. Ogni DU comprende due cavi paralleli da 4 mm di diametro in Dyneema<sup>1</sup> ai quali i DOM sono collegati tramite una gabbia in titanio. Sbarre aggiuntive vengono installate tra i sensori per mantenere le corde parallele e impedire la rotazione dell'intera stringa. L'alimentazione e la trasmissione dati sono affidate al VEOC (Vertical Electro-Optical Cable), un tubo in polietilene pressurizzato e riempito di olio che contiene due cavi in rame e 18 fibre ottiche. A causa delle forti instabilità causate dalla corrente marina, tra un DOM e un altro il VEOC viene fatto avvolgere in prossimità delle sbarre precedentemente citate, permettendo alla stringa, se necessario, di estendersi. In questo modo si escludono tensioni indesiderate sui cavi che potrebbero compromettere la loro integrità.

Sebbene il design dell'unità minimizzi la resistenza, viene introdotta sulla parte superiore una boa come ulteriore spinta di galleggiamento, al fine di ridurre lo spostamento orizzontale della parte superiore rispetto alla base in caso di grandi correnti marine. Infine, l'insieme è mantenuto sul fondale marino grazie al peso di un'ancora, opportunamente progettata per durare nel tempo e dimensionata affinché le correnti marine non la spostino.

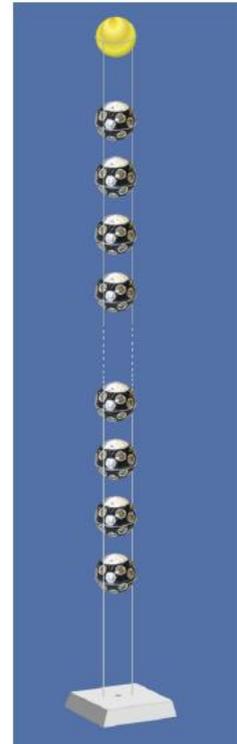


Figura 2.3 - Stringa di rilevamento

### 2.3 Posizionamento dei DOM

Non essendo la stringa un supporto rigido, per ricostruire la traiettoria della particella prodotta dall'effetto Cherenkov è necessario conoscere entro 10 cm la posizione di ciascun DOM, diversa da quella nominale a causa delle correnti marine. Anche se la velocità della corrente è generalmente inferiore ai 20 cm/s, è possibile che la parte superiore di ciascuna linea si sposti di alcuni metri rispetto alla verticale. Per ottenere ciò, su ogni DOM vengono implementati due sistemi di misura indipendenti.

Il primo sistema si basa su una serie di bussole e accelerometri che misurano gli angoli di inclinazione locali e l'orientazione della stringa. Il secondo sistema, basato sulla triangolazione acustica, è più preciso ma richiede un'elettronica più complessa e dispendiosa. In questo caso è un sensore piezo-acustico che consente di determinare la posizione spaziale del DOM tramite la misura dei tempi di arrivo di speciali segnali sonori (ping) emessi da sorgenti (acoustic beacons) poste intorno al rivelatore in posizioni note. Nonostante la tecnologia installata, risulta molto importante avere un riscontro dei valori misurati con la posizione dedotta da un modello in grado di prevedere lo spostamento di ciascun elemento della linea al variare della direzione e intensità della corrente marina. Un elemento fondamentale di questo modello è costituito dalla conoscenza dei coefficienti di drag relativi ai vari componenti della linea (DOM, boa sommitale, cavi di tensionamento ecc.). La forma di queste componenti non è sempre elementare e la valutazione del loro coefficiente di drag richiede lo studio dettagliato, argomento della mia tesi.

<sup>1</sup> Fibra sintetica ad alta resistenza, particolarmente adatta alla produzione di cavi da trazione

## 2.4 Comportamento fluidodinamico di una Detection Unit

Come precedentemente detto, una generica unità di rilevamento subirà uno spostamento rispetto alla posizione nominale a causa delle correnti marine. Tramite un modello puramente meccanico di sequenza di corpi rigidi, è possibile prevedere la disposizione di una DU, note velocità e direzione della corrente marina. Per il seguente modello, viene considerata unità l'insieme DOM (o boa sommitale) e cavi inferiori.

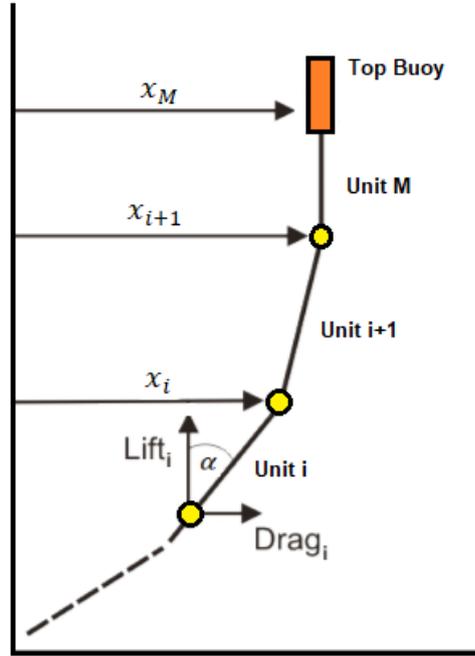


Figura 2.4 - Unità di rilevamento sottoposta a corrente marina

Alla base della i-esima unità, la forza verticale totale, ovvero la forza di lift  $F_{L_i}$ , è data da:

$$F_{L_i} = \sum_{j=i}^M f_{L_j} = \sum_{j=i}^M g(\rho_a W_j - m_j) \quad (2.1)$$

con  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ,  $\rho_a = 1025 \text{ kg/m}^3$  (densità dell'acqua di mare),  $m_j$  e  $W_j$  rispettivamente massa e volume della j-esima unità.

La forza orizzontale totale sperimentata dalla i-esima unità, ovvero la forza di drag  $F_{D_i}$ , è data invece da:

$$F_{D_i} = \sum_{j=i}^M f_{D_j} = \sum_{j=i}^M \frac{\rho_a}{2} (A_j C_j + A'_j C'_j) V^2 \quad (2.2)$$

L'area della sezione perpendicolare al flusso di un DOM o della boa superiore è denotata con  $A_j$ , mentre  $C_j$  è il coefficiente adimensionale di drag determinato dalla forma del corpo considerato. Le grandezze  $A'_j$  e  $C'_j$  denotano le grandezze equivalenti per i cavi. La velocità della corrente marina è invece indicata con  $V$ .

La Detection Unit si disporrà in una forma tale che:

$$\alpha_i = \tan^{-1} \frac{F_{Di}}{F_{Li}} \quad (2.3)$$

con  $\alpha_i$  l'angolo compreso tra la  $i$ -esima unità e la verticale.

In conclusione, l'escursione orizzontale della  $i$ -esima unità sarà dato da:

$$x_i = \sum_{j=1}^i r_j \sin(\alpha_i) \quad (2.4)$$

dove  $r_j$  è la lunghezza totale della  $j$ -esima unità.

Per la fase progettuale, la massima escursione orizzontale è stata calcolata per correnti a 30 cm/s, velocità massima per ogni sito candidato e con una probabilità di essere superata una volta ogni 10 anni di attività. Il coefficiente di resistenza è stato assunto pari a 0.5 per un DOM e 1.3 per un cilindro (cavi, boa sommitale). Altre forme sono state approssimate a questi due corpi elementari.

Lo scopo di questa tesi è pertanto quello di ottenere coefficienti di resistenza prossimi ai valori esatti dei diversi componenti al variare di intensità e direzione della corrente marina utilizzando la Computational Fluid Dynamics.

## 2.5 Tecnica di rivelamento

L'idea del telescopio di neutrini si basa sulla possibilità di misurare la luce Cherenkov emessa da particelle cariche altamente energetiche prodotte dalle interazioni dei neutrini all'interno o vicino il volume del rivelatore stesso, posto in elevate profondità. Dalla misura del tempo di arrivo e dell'ampiezza del segnale dei fotoni Cherenkov è possibile determinare il sapore, l'energia e la direzione del neutrino.

Uno dei problemi principali di tali telescopi è quello di attenuare le sorgenti di disturbo costituite in prevalenza da muoni atmosferici prodotti dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera. Scendendo ad elevate profondità marine, tale disturbo risulta ridotto di circa un milione di volte rispetto a quello a livello della superficie terrestre, a causa della perdita di energia che i muoni subiscono nell'attraversare l'acqua.

I muoni che raggiungono il rivelatore sono divisi in due tipologie in base al verso di propagazione: muoni dal basso verso l'alto, e viceversa. I muoni non possono attraversare spessori di materiale maggiori di qualche decina di km, per cui i muoni dal basso verso l'alto sono prodotti da neutrini ascendenti che, dopo aver attraversato la Terra, interagiscono nelle vicinanze della base del rivelatore. Questi neutrini ascendenti possono essere a loro volta prodotti dai raggi cosmici nell'emisfero opposto a quello del rivelatore (neutrini atmosferici) oppure direttamente dalle sorgenti galattiche o extragalattiche (neutrini astrofisici). Entrambi i tipi di neutrini sono di interesse per KM3: i muoni atmosferici sono infatti molto utili per verificare lo stato del rivelatore, fornendo informazioni, ad esempio, sulla sua calibrazione o eventuali effetti sistematici.

La lettura dei dati di KM3NeT si basa sul concetto All-data-to-shore, in cui tutti i segnali analogici dei PMT che superano una certa soglia vengono digitalizzati e mandati a terra, dove in tempo reale vengono processati.

## 2.6 Stato attuale di KM3Net e primi dati

Basandosi sull'esperienza del telescopio per neutrino ANTARES e altri progetti nel Mar Mediterraneo, la collaborazione KM3NeT, dopo un programma di ricerca e sviluppo per la costruzione di un DOM e di una unità di rilevamento, ha iniziato a distribuire le prime stringhe su entrambi i siti, ARCA e ORCA.

La prima unità (in inglese Detection Unit, DU) del sito italiano di KM3Net è stata installata nel dicembre 2015, seguita da altre due a maggio 2016. Nel periodo maggio 2016 – aprile 2017 sono state però operative solo due DU per motivi di ispezione. A causa di problemi legati all'infrastruttura di rete dei fondali marini, le operazioni sul rivelatore ARCA sono rimaste in attesa da aprile 2017 e riavviate con successo a gennaio 2019 con un solo DU funzionante.

Il primo DU del sito francese (ORCA1) è stato invece installato a settembre 2017 e ha funzionato fino a metà dicembre 2017, quando un guasto del cavo elettro-ottico principale ha reso impossibile alimentare il rivelatore. Dopo la riparazione, l'ultima avvenuta a giugno 2019, sono attualmente in funzione 4 DU.

I primi dati raccolti hanno permesso di verificare le procedure di calibrazione, testare la procedura di correzione dati per l'inefficienza del PMT e confrontare le simulazioni MC<sup>2</sup> con eventi misurati. Inoltre, anche se le stringhe installate sono poche, è stato già possibile selezionare neutrini ascendenti tra il gran numero di muoni atmosferici.

---

<sup>2</sup> Il metodo Monte Carlo è un'ampia classe di metodi usati per trarre stime attraverso simulazioni.

### 3. Modelli numerici

Esistono due approcci fondamentali per il design e l'analisi di sistemi ingegneristici che coinvolgono il moto dei fluidi: sperimentazione e calcolo. Il primo prevede in genere la costruzione di modelli testati in galleria del vento o altre strutture, mentre il secondo prevede la soluzione di equazioni differenziali, tramite metodo analitico o computazionale. I due metodi, in quanto complementari tra loro, vengono attualmente applicati per la risoluzione dei problemi di fluidodinamica. Nell'ambito di questa tesi è stato utilizzato esclusivamente il metodo computazionale, introdotto in questo capitolo.

#### 3.1 CFD: fluidodinamica computazionale

Qualsiasi flusso reale è descritto dalle equazioni della fluidodinamica, tipicamente alle derivate parziali e pertanto non risolvibili analiticamente. A tal proposito è stata sviluppata la fluidodinamica computazionale (Computational Fluid Dynamics, CFD), ossia l'insieme dei metodi di risoluzione di tali problemi che integrano i bilanci di materia, energia e quantità di moto tramite calcolatore. Tipicamente utilizzati come strumenti di ricerca sia a livello accademico che industriale, tali software risolvono i problemi fluidodinamici basandosi su griglie di calcolo che riproducono la geometria della situazione da analizzare.

I risultati che si ottengono sono molto variegati poiché è possibile monitorare e analizzare moltissime grandezze che caratterizzano il sistema, ottenendo persino immagini grafiche di grande impatto visivo, oltre a diverse tipologie di diagrammi e tabelle.

I punti deboli di questi modelli sono il notevole sforzo computazionale richiesto (tempi di calcolo elevati) e l'esigenza di un certo grado di competenza da parte dell'utente nell'utilizzo di tali software. Inoltre, dovendo integrare numericamente equazioni con un certo grado di complessità, ripetendo i calcoli su un considerevole numero di celle, sono possibili anche problemi di convergenza e stabilità della soluzione, che generalmente vengono affrontati e risolti con particolari accortezze nella creazione della griglia di calcolo e nella definizione delle condizioni al contorno.

#### 3.2 Come è strutturata una simulazione

Dal punto di vista operativo, ogni simulazione è costituita da tre fasi, schematizzate in Fig. 3.1 e descritte nei seguenti paragrafi: pre-processing, solving e post-processing.

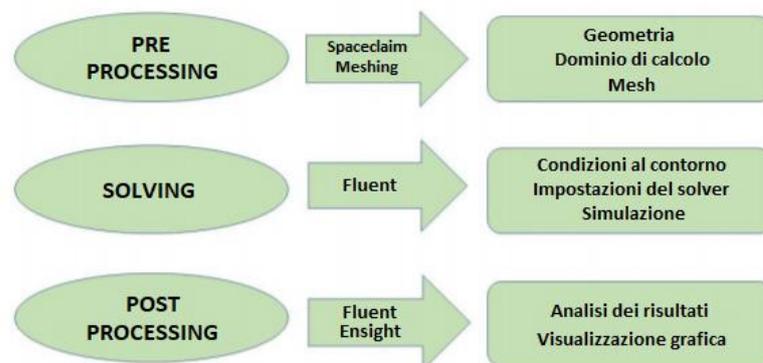


Figura 3.1 – Fasi delle simulazioni

### 3.2.1 Pre-processing

Il pre-processing è la prima fase della simulazione e prevede la costruzione o semplificazione della geometria, la definizione del dominio di calcolo e la creazione della mesh.

Per mesh (o griglia) si intende l'insieme di facce, spigoli e vertici che caratterizzano un oggetto, identificando così le celle o gli elementi in cui risolvere le equazioni di conservazione. Con la suddivisione del volume di calcolo in elementi, si ha una rappresentazione discreta della geometria e del problema con un numero finito di elementi. Per quanto la definizione della griglia sia fondamentale per l'ottenimento di una soluzione più accurata, al crescere del numero di celle aumenta il costo computazionale; è dunque fondamentale trovare un compromesso in fase di meshing.

### 3.2.2 Solving

La fase di calcolo prevede la scelta dei fluidi d'interesse, l'impostazione delle condizioni al contorno e operative e i metodi da utilizzare. In tale fase si prevede la risoluzione vera e propria delle equazioni.

Le condizioni al contorno sono applicate sulle superfici del volume di controllo e specificano i valori che una variabile deve assumere al contorno del dominio.

L'imposizione delle condizioni al contorno ad un'equazione differenziale è necessaria per determinare una delle infinite soluzioni possibili.

### 3.2.3 Post-processing

Il post-processing è l'ultima fase della simulazione CFD; è effettuato dopo la risoluzione delle equazioni e permette di visualizzare e analizzare i risultati ottenuti. Si può effettuare dunque la visualizzazione e l'analisi dei dati ottenuti e l'interpretazione di tali risultati.

Tramite tale fase si possono estrarre tutte le informazioni come i grafici tridimensionali, contorni bidimensionali, grafici e linee di corrente delle grandezze di interesse.

## 3.3 Equazioni di governo

Per flussi laminari stazionari di un fluido viscoso, incomprimibile e Newtoniano, le equazioni del moto sono rispettivamente l'equazione di conservazione della massa e della quantità di moto (*equazioni di Navier-Stokes*), ossia:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.1)$$

$$(\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P' + \nu\nabla^2\vec{V} \quad (3.2)$$

Nelle formule (3.1) e (3.2),  $\vec{V}$  è la velocità del fluido,  $\rho$  la sua densità e  $\nu$  la viscosità cinematica definita come  $\nu = \mu/\rho$ . Il termine gravitazionale in (3.2) è stato inglobato nella pressione modificata  $P' = P + \rho gz$ .

### 3.4 Modelli di turbolenza

Il modello in esame presenta un flusso turbolento (note velocità di corrente massima e dati relativi all'acqua marina, si ottiene un  $Re$  di circa 70 000) che, rispetto ad uno laminare, presenta molte complicazioni nel calcolo per via del fatto che si vengono a creare delle strutture di flusso non stazionarie, tridimensionali, casuali e vorticosi denominate *turbulent eddies*. Cercare di risolvere le equazioni della sezione 3.2 per ognuna di queste strutture (metodo DNS<sup>1</sup>), che hanno dimensioni molto diverse ed aumentano con l'aumentare di  $Re$ , anche con i computer più avanzati sarebbe richiesta una quantità enorme di tempo, tanto da non essere praticabile in campo ingegneristico.



Figura 3.2 – Il metodo DNS simula tutti i vortici rilevanti nel moto, dai più piccoli (dimensione  $\eta$ ) ai più grandi (dimensione  $L$ )

Per questo si applica una prima approssimazione attraverso le *large eddy simulations* (LES) che eseguono una sorta di filtraggio delle equazioni di Navier Stokes: in questa tipologia di soluzione si risolvono solo le strutture più grandi, mentre le più piccole vengono preventivamente modellizzate formulando l'ipotesi che esse siano isotrope. Sebbene le LES permettano un grande risparmio sulle risorse computazionali, nella pratica si procede con un'ulteriore approssimazione adottando un modello di turbolenza specifico, che permetta di non dover risolvere nessuna di queste strutture vorticosi introducendo nelle equazioni dei modelli matematici che tengono conto dell'effetto delle turbulent eddies.

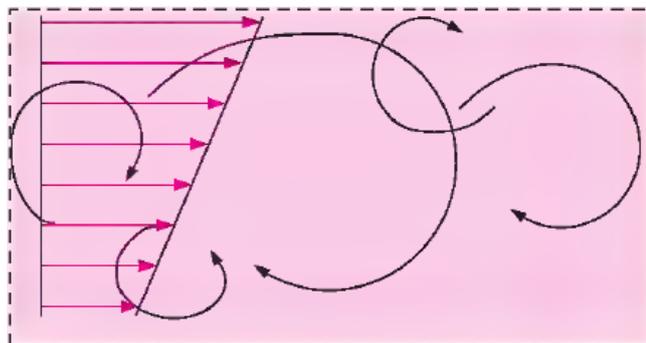


Figura 3.3 – Le LES sono una semplificazione del metodo DNS, in cui solo i vortici più grandi vengono risolti.

<sup>1</sup> La sigla DNS sta per Direct Numerical Simulation.

Il livello successivo di raffinatezza è quello di modellare tutti i vortici instabili con un modello di turbolenza. Non viene effettuato alcun tentativo di risolvere le caratteristiche di instabilità di uno qualsiasi dei turbolenti vortici, nemmeno di quelli più grandi. Vengono invece impiegati modelli matematici in grado di tener conto della miscelazione e diffusione causata dai vortici turbolenti. Per semplicità, consideriamo solo flussi stazionari e incomprimibili. Quando si adotta un modello di turbolenza, la (3.2) viene sostituita da una nuova equazione adattata secondo il metodo della decomposizione di Reynolds, la **Reynolds-averaged Navier Stokes** (RANS), qui riportata per moti stazionari, turbolenti e incomprimibili:

$$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla})\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P' + \nu\nabla^2\vec{V} + \vec{\nabla} \cdot (\tau_{ij,turbulent}) \quad (3.3)$$

Rispetto alla (3.2) è presente un termine additivo nel membro a destra, detto tensore delle sollecitazioni di Reynolds. Questo introduce 6 nuove variabili (è un tensore simmetrico), che devono essere ricavate attraverso l'introduzione di ulteriori equazioni di chiusura permettendo quindi di includere i suddetti modelli di turbolenza.

$$\tau_{ij,turbulent} = -\mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij} \quad (3.4)$$

Un metodo molto comune di ricavare il tensore di Reynolds consiste nell'introdurre l'ipotesi di Boussinesq (3.4), che permette di ridurre notevolmente i tempi ed i costi legati al calcolo introducendo la viscosità turbolenta  $\mu_t$  e l'energia cinetica turbolenta  $k$ . Poiché  $\mu$  e  $k$  sono quantità scalari isotrope, i modelli che adottano questa ipotesi presentano una sola (modello Spalart-Allamaras) o due equazioni ( $k - \varepsilon$  o  $k - \omega$ ) di chiusura<sup>2</sup>: nel caso l'anisotropia del fluido sia molto influente si deve ricorrere ai Reynolds Stress Models (RMS) che invece prevedono dalle 5 alle 7 equazioni di trasporto, aumentando la complessità del calcolo.

Nel particolare di questo lavoro è stato adottato il modello  $k - \omega$  SST<sup>3</sup> che prevede l'introduzione di due equazioni di trasporto, una per  $k$  ed una per il grado di dissipazione specifica  $\omega$ , che può essere interpretato come il rapporto tra  $\varepsilon$ , grado di dissipazione, e  $k$ . Rispetto al modello standard, nel modello SST  $k - \omega$  la viscosità turbolenta è modificata per tenere conto degli sforzi tangenziali turbolenti. Tale modello può essere è stato studiato per fondere il modello standard  $k - \omega$  con il modello  $k - \varepsilon$ , qui però non descritto.

---

<sup>2</sup> Introducendo una o due equazioni aggiuntive diventa necessario aggiungere una o due condizioni al contorno per effettuare il calcolo.

<sup>3</sup> La sigla sta per Shear Stress Transport.

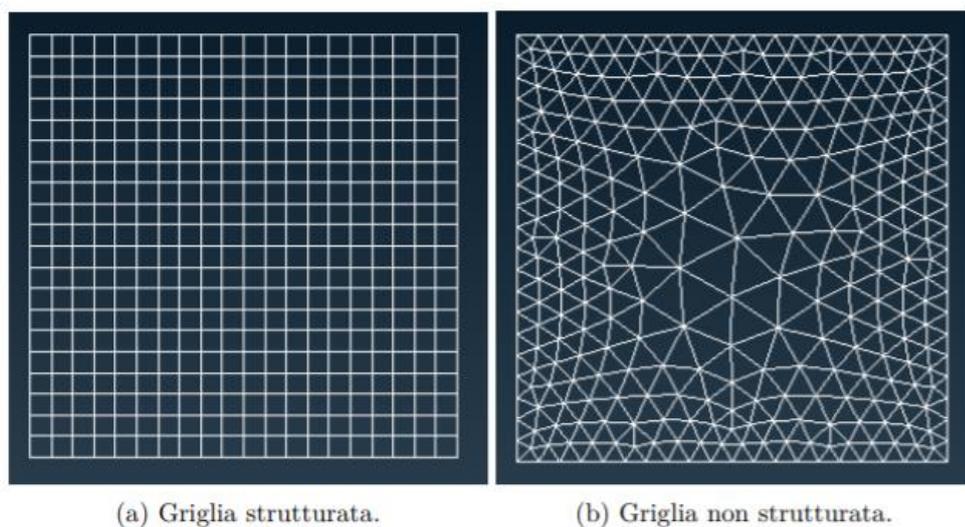
### 3.5 Discretizzazione del dominio

La fluidodinamica computazionale nasce per colmare la mancanza di una soluzione generale alle equazioni di Navier-Stokes, per cui è prevista come unica possibilità la risoluzione algebrica. Questa tipologiaolutiva è strettamente legata al concetto di discretizzazione del dominio, ossia alla suddivisione dello spazio di interesse in una griglia di elementi finiti, all'interno dei quali il calcolatore risolverà iterativamente le equazioni inerenti al problema. Esistono tre metodi di meshing:

- Metodo alle differenze finite (Finite Difference Method – FDM): primo metodo adottato nell'ambito della fluidodinamica, questo metodo consiste nel sostituire le derivate con il loro rapporto incrementale così che i termini differenziali diventino dei termini algebrici;
- Metodo agli elementi finiti (Finite Element Method – FEM): utilizzato nell'analisi strutturale e nella fluidodinamica per numeri di Reynolds maggiori alle decine di migliaia. Si suddivide il dominio in un numero elevato di elementi finiti, di cui poi ognuno rappresenta un campo di integrazione numerica;
- Metodo ai volumi finiti: approccio standard utilizzato nella maggior parte dei codici commerciali per la CFD, questo metodo si basa sull'integrazione delle equazioni differenziali alle derivate parziali che compongono il problema in un volume di controllo discreto, detto cella.

Una volta discretizzato il dominio apparirà una griglia di calcolo il più possibile simile alla geometria in studio, al fine di fornire risultati attendibili. Ad esempio, è importante un infittimento delle celle nei punti più salienti dal punto di vista del problema. È necessario comunque trovare un compromesso tra discretizzazione ed economicità di calcolo, in quanto più le celle sono fitte, e quindi numerose, e tanto più saranno necessarie risorse computazionali.

Dal punto di vista morfologico, si possono distinguere due tipologie di griglie visualizzabili in Fig. 3.4: griglie strutturate (celle prismatiche o esaedriche o regolari), griglie non strutturate (cioè celle tetraedriche o piramidali).



*Figura 3.4 – Esempi delle due tipologie di griglie*

La prima tipologia di griglia, adatta a geometrie semplici, è legata ad una generazione di celle a 4 lati (per casi in 2D) o a 6 facce (caso 3D) che, sebbene possano essere distorte, rimandano alle figure del rettangolo o del prisma rettangolare.

Nell'ambito dei calcoli tridimensionali, invece, uno degli ultimi sviluppi consiste nel poter sfruttare la generazione di griglie non strutturate con celle tetraedriche o piramidali di più facile esecuzione per il calcolatore.

Ovviamente quando le condizioni lo consentono è anche possibile realizzare griglie ibride che prevedano lo sfruttamento di entrambe le tipologie; unico limite è la necessità di possedere un programma pensato per realizzarle e risolverle entrambe.

### 3.6 Condizioni al contorno

Per ottenere un'accurata soluzione del problema è fondamentale imporre appropriate condizioni al contorno, in quanto esse determinano il tipo di flusso che verrà modellato. Il programma utilizzato Fluent mette a disposizione vari tipi di condizioni al contorno, le cui principali sono:

- **Wall condition:** la più semplice tipologia di condizioni al contorno. Applicare questa condizione implica che la componente della velocità normale alla superficie di tale parete sarà imposta uguale a zero. Inoltre, data la condizione di aderenza, anche la componente tangenziale della velocità per il fluido che lambisce la parete sarà impostata come nulla. Per definire una condizione di questo tipo occorre comunque aver ben presenti le equazioni che andranno ad essere risolte nel calcolo. Infatti, nel caso in cui fosse coinvolto un modello di turbolenza, è necessario fornire al programma anche la rugosità della parete (ha molta influenza sullo strato limite turbolento).
- **Inflow and Outflow condition** Una seconda tipologia riguarda le condizioni che possono essere imposte al fluido che entra nel dominio (inflow) o che esce (outflow). Per quanto riguarda la prima tipologia è possibile imporre una velocità all'ingresso (velocity inlet) o una pressione (pressure inlet). In entrambi i casi, se devono essere risolte equazioni legate alla turbolenza, occorre specificare anche le proprietà della turbolenza. Nel caso in cui invece s'imponesse una pressione sulla sezione di outlet, le caratteristiche della turbolenza andrebbero specificate sia nell'inlet sia nell'outlet. Un'altra possibilità risiede nella definizione all'outlet di una condizione di outflow: imporre che le proprietà del fluido (come velocità, temperatura, turbolenza) abbiano gradiente nullo in direzione normale all'outlet senza quantificare il loro valore.
- **Periodic and symmetry boundary condition** Esistono condizioni al contorno che non vengono realizzate imponendo proprietà su una parete o linea, ma richiamando un determinato tipo di simmetria o periodicità. Se la geometria studiata presenta ripetizioni, la condizione di periodicità consente di ridurre lo spazio studiato permettendo di conservare le risorse del computer. Nel caso in cui il fluido non dovesse attraversare la superficie interessata dalla condizione al contorno, si può invece adottare una condizione di simmetria.
- **Internal boundary condition** Si possono imporre condizioni al contorno anche all'interno del dominio fluido, mediante la realizzazione di superfici attraverso le quali il fluido non subisce alcuna interazione di forza. Imporre una superficie di questo genere risulta molto utile anche in loco di post-processing in quanto permette di rilevare dati all'interno del dominio fluido. Questa condizione è necessaria nel caso di mesh a multi-blocchi in quanto funge da elemento separatore.

### 3.7 Tipologia di solver

In base al problema, ANSYS FLUENT dispone di due solutori: *il pressure based-solver* e *il density based-solver*. Storicamente il primo veniva utilizzato per l'analisi di flussi lenti incompressibili, mentre il secondo era nato per studiare flussi ad elevate velocità comprimibili. Ad oggi entrambe le varianti hanno subito miglioramenti tali da ampliare la loro applicazione.

Entrambi sfruttano un metodo basato, oltre che sui volumi di controllo, sull'integrazione negli stessi delle equazioni di governo in modo da poter ottenere equazioni algebriche per ogni variabile dipendente, come velocità o pressione.

Il *pressure based-solver* è strutturato in modo da ricavare, tramite le equazioni RANS della continuità e quantità di moto, un'equazione di correzione di pressione tale che il campo di pressione corretto soddisfi l'equazione di continuità stessa.

L'algoritmo di risoluzione può essere *segregated* o *coupled*: il primo risolve le equazioni di quantità di moto e continuità (considerando il campo di pressione corretto) separatamente, mentre il secondo risolve simultaneamente entrambe le equazioni. La differenza tra i due risiede nella memoria computazionale richiesta e nella velocità di convergenza: in particolare, il secondo algoritmo garantisce una convergenza della soluzione più rapida del primo algoritmo, richiedendo però quasi il doppio della memoria RAM.

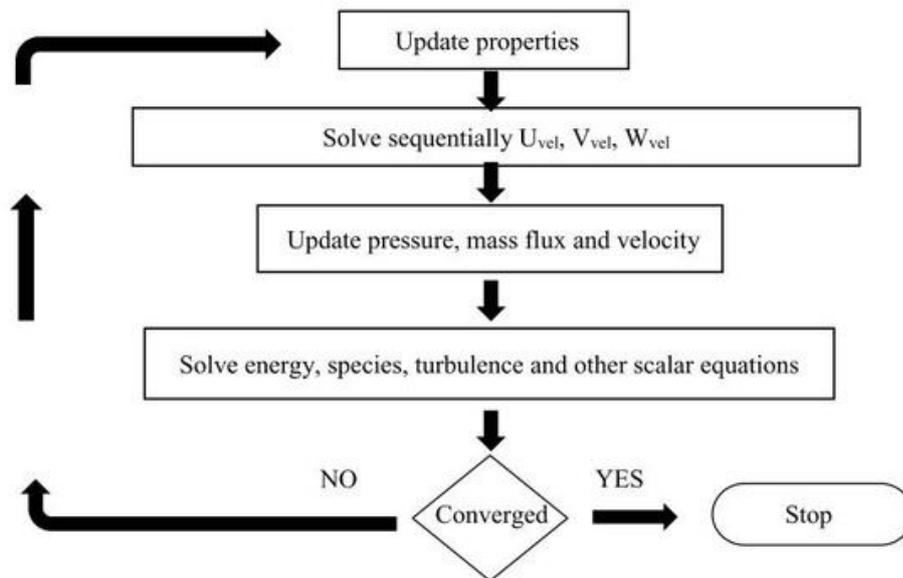


Figura 3.5 – Pressure based-solver, schema risolutivo del segregated algorithm

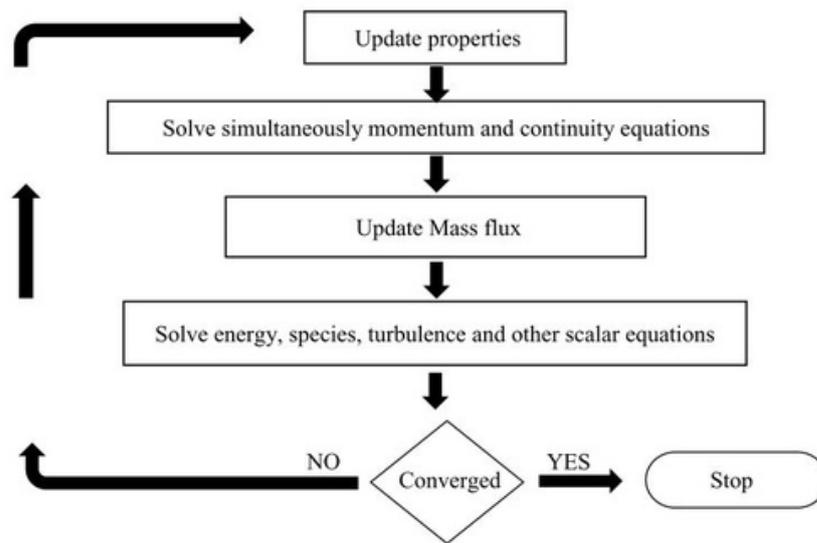


Figura 3.6 – Pressure based-solver, schema risolutivo del coupled algorithm

La seconda possibilità è data dal density based-solver, un algoritmo che risolve contemporaneamente le equazioni della continuità, del momento e dell'energia. Le equazioni riguardanti le grandezze scalari vengono invece risolte successivamente in sequenza. Anche questa modalità solutiva presenta un'ulteriore suddivisione. Infatti, il sistema di equazioni di governo può essere linearizzato in modo da essere reso esplicito od implicito. Nel caso di sistema implicito la soluzione contiene informazioni ottenute risolvendo simultaneamente le equazioni sull'intera griglia a ogni iterazione. Una soluzione esplicita è invece ottenuta da un metodo che è indipendente dagli altri dati incogniti, pertanto tramite una singola equazione è possibile ottenere nuove variabili ad ogni iterazione.

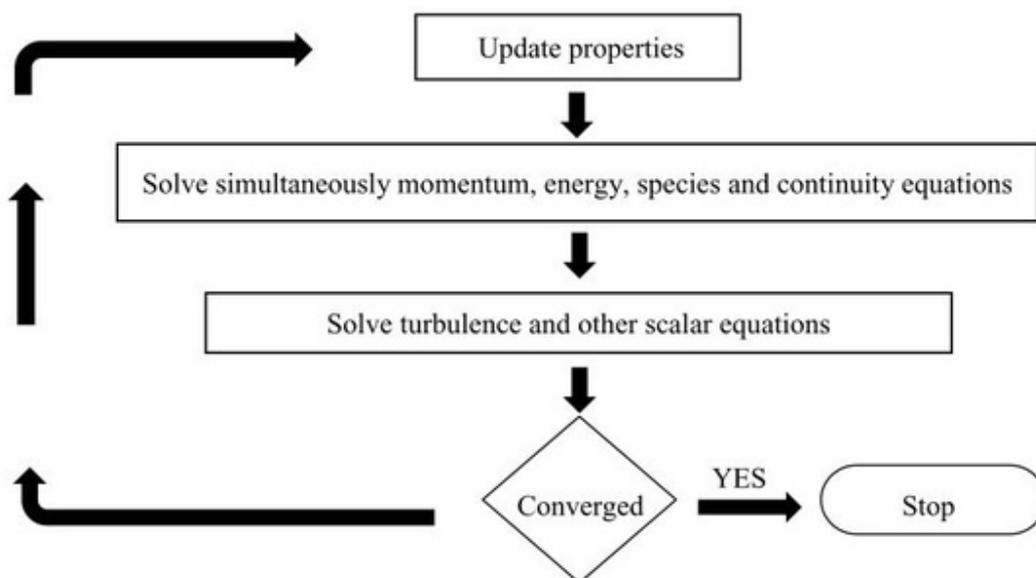


Figura 3.7 – Density based-solver, schema risolutivo

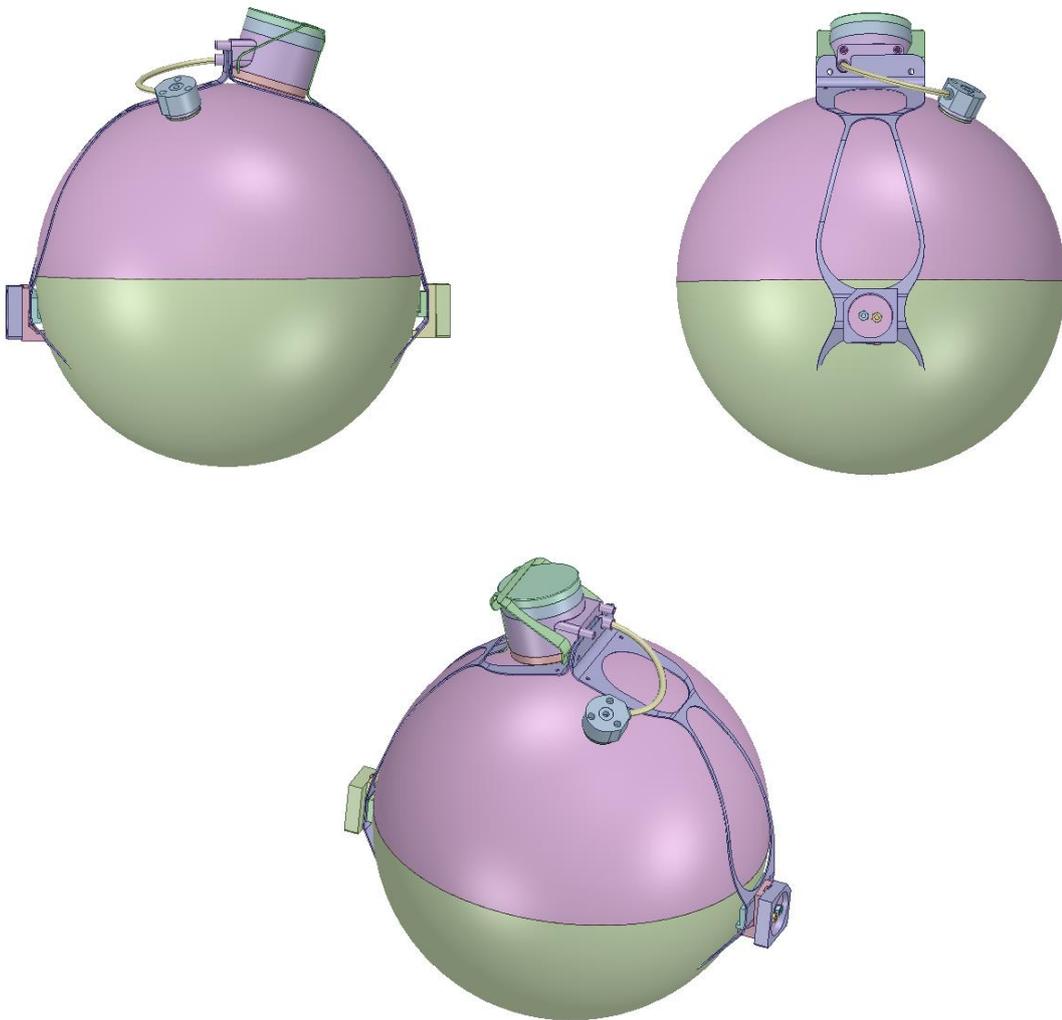
## 4. Geometrie e simulazioni

### 4.1 Definizione delle geometrie

Le geometrie utilizzate per il calcolo numerico cercano di riprodurre fedelmente quelle realmente installate, salvo effettuare alcune modifiche di pulizia di particolari poco influenti o che avrebbero reso eccessivamente oneroso il calcolo computazionale.

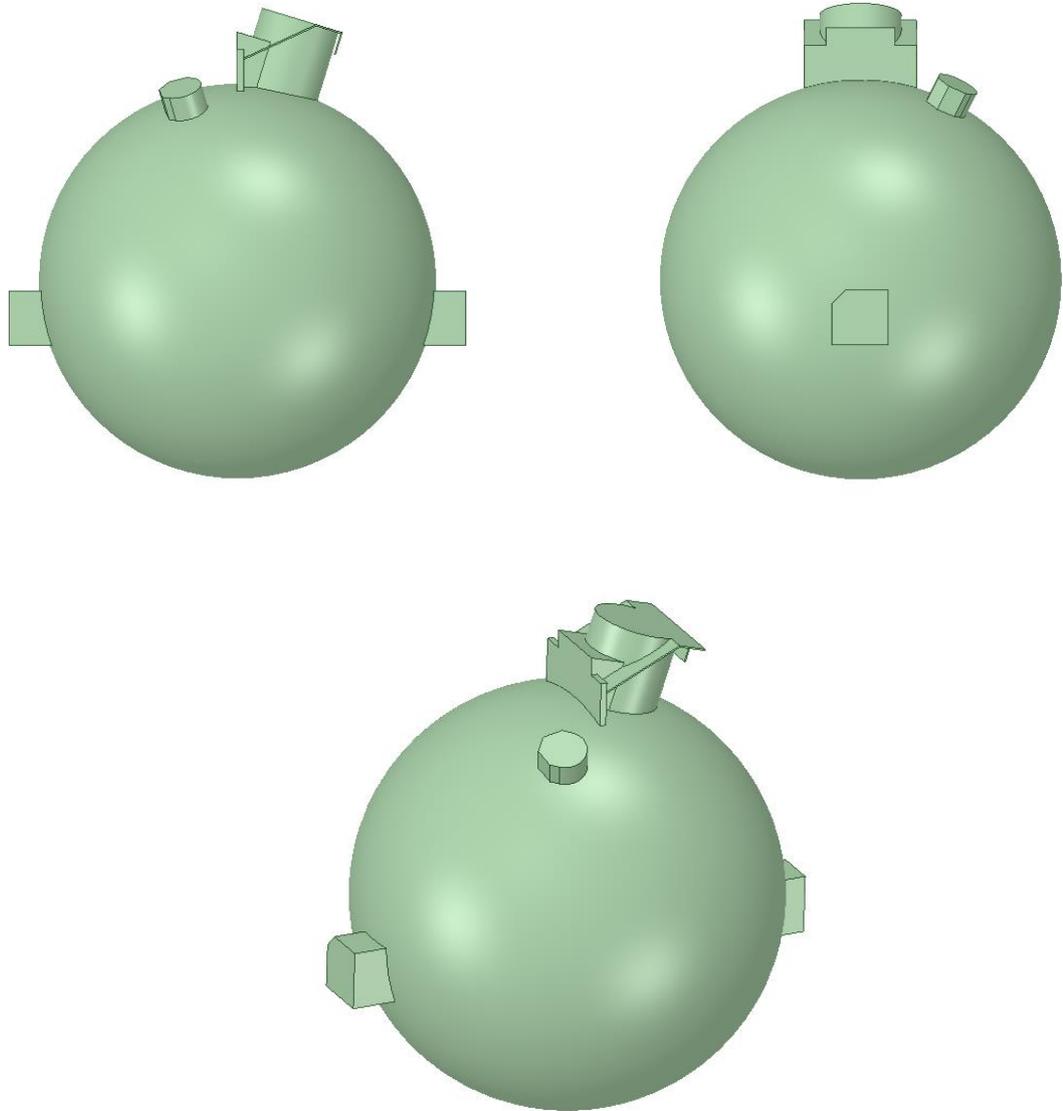
#### 4.1.1 DOM

Il file CAD originale rappresentativo della geometria del sensore ottico digitale si presenta così:



*Figura 4.1 – CAD originale del DOM in vista frontale, laterale, dall'alto*

Per i motivi precedentemente citati, è stato necessario semplificare la geometria nel seguente modo:

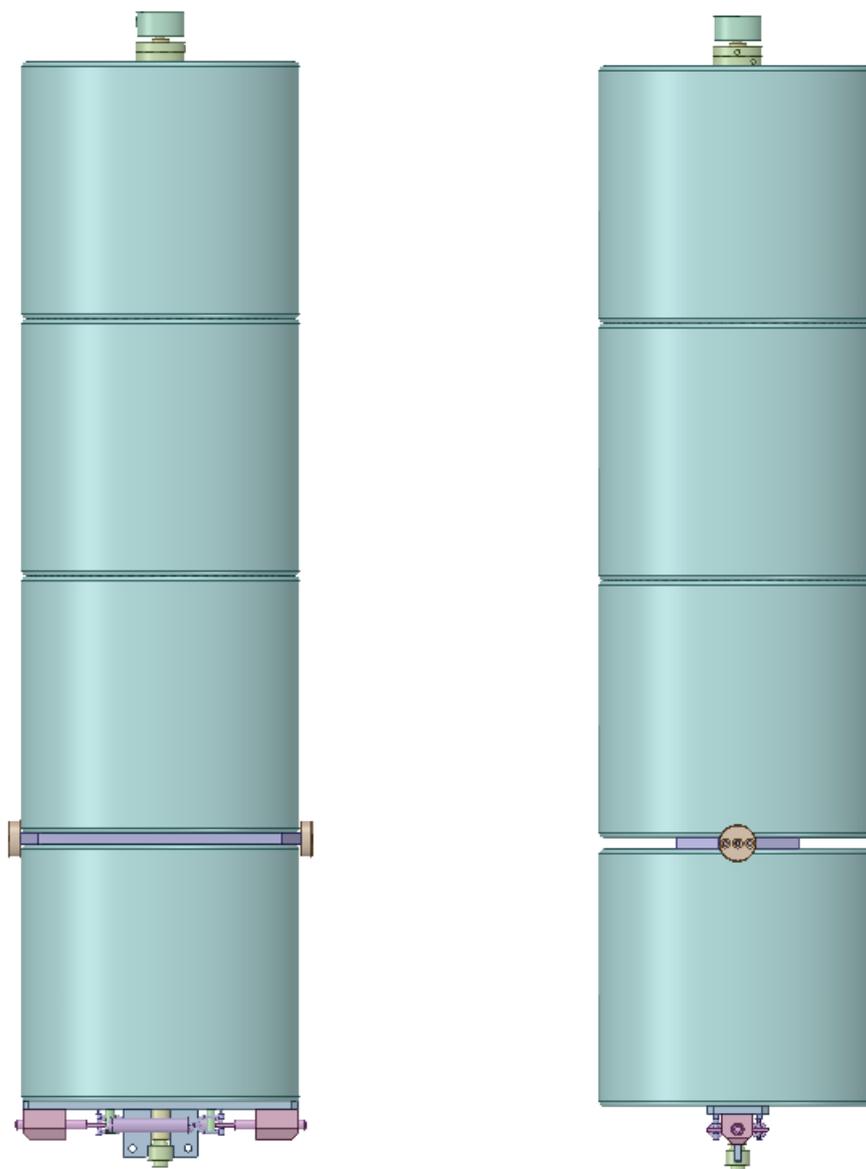


*Figura 4.2 – CAD semplificato del DOM in vista frontale, laterale, dall'alto*

In particolare, sono stati rimossi tutti i dettagli relativi ad arrotondamenti, restrizioni di sezione, viti e fori, cavi e relativi supporti. È stata rimossa anche la gabbia dell'emisfero superiore a causa della complessità di modellazione in fase di meshing (eccessivamente sottile e ricca di arrotondamenti).

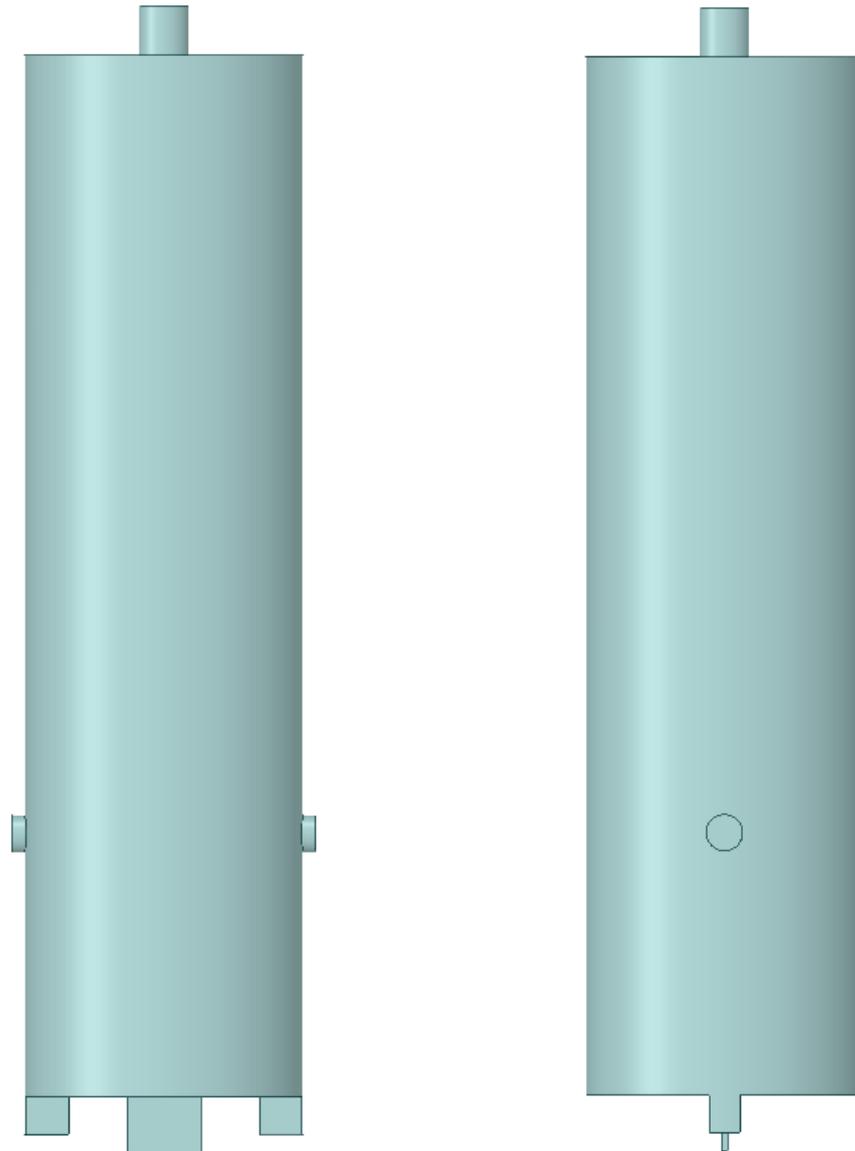
#### 4.1.2 Boa sommitale

Il file CAD originale rappresentativo della geometria della boa sommitale si presenta così:



*Figura 4.3 – CAD originale della boa sommitale in vista frontale e laterale*

Analogamente a prima, la geometria è stata notevolmente semplificata:

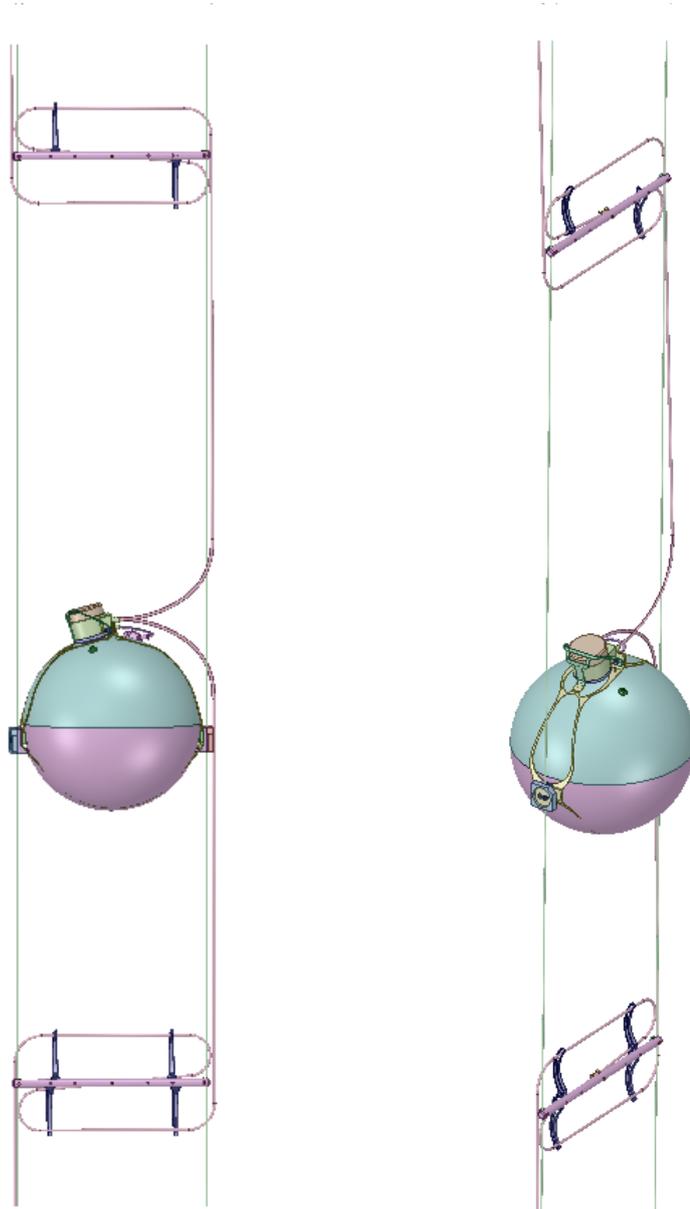


*Figura 4.4 - CAD semplificato della boa sommitale in vista frontale e laterale*

Per motivi di complessità in fase di meshing, sono stati rimossi tutti i componenti meccanici alla base della boa e tutti i restringimenti di sezione del cilindro.

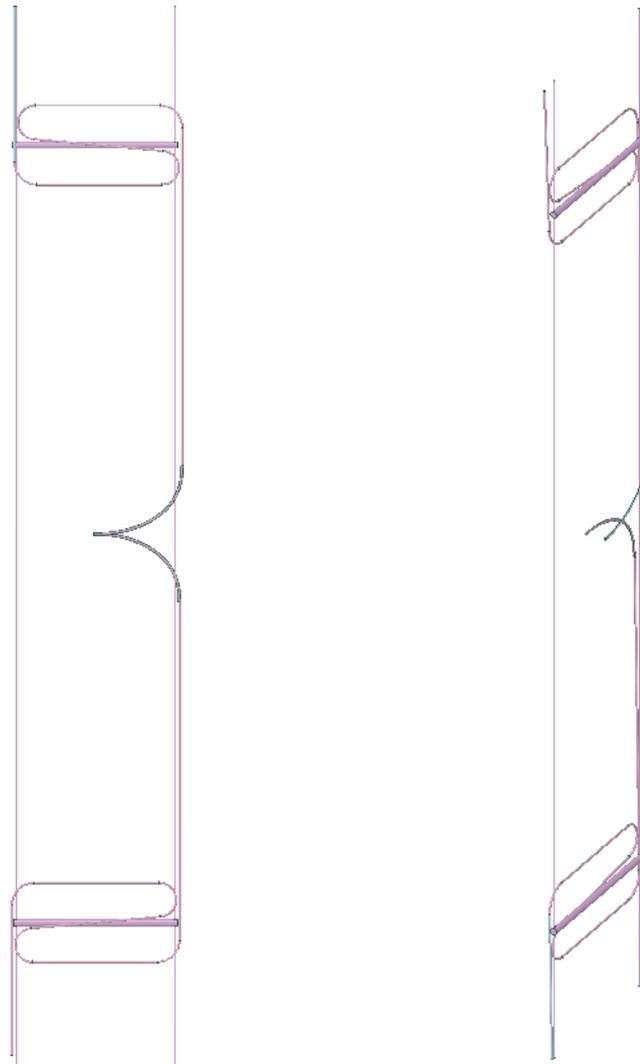
### 4.1.3 Cavi

Il file CAD originale relativo ai cavi è il seguente:



*Figura 4.5 - CAD originale dell'assieme DOM - cavi in vista frontale e isometrica*

Esclusivamente per i cavi, la geometria non è stata eccessivamente manipolata:

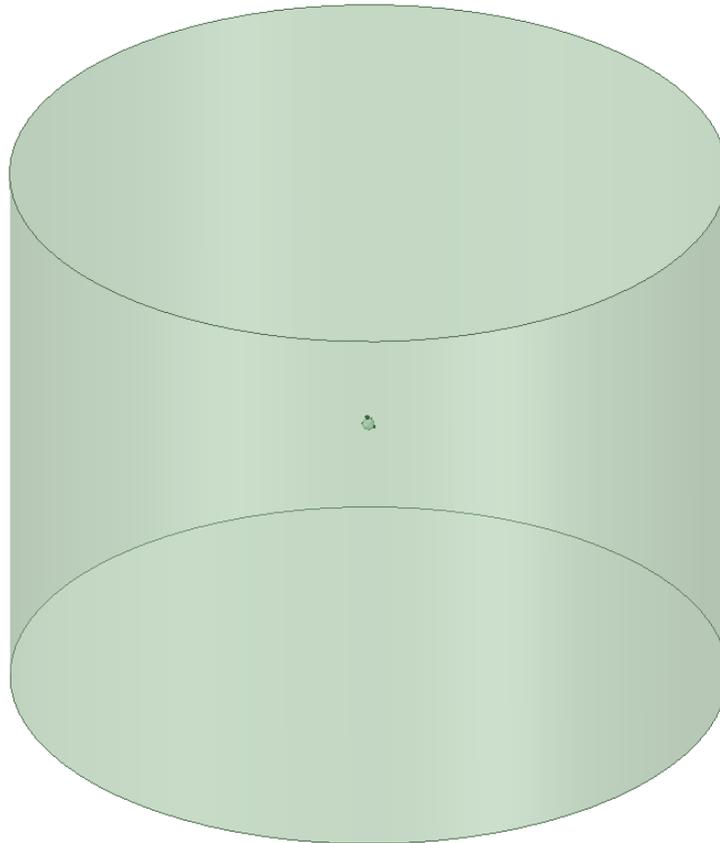


*Figura 4.6 - CAD semplificato dei cavi in vista frontale e isometrica*

L'unica modifica necessaria è stata la rimozione delle pinze in corrispondenza degli avvolgimenti dei cavi, per evitare di appesantire ulteriormente la mesh, già complessa.

#### 4.1.4 Dominio di calcolo

In fase di definizione delle diverse geometrie, per quanto concerne il dominio di calcolo so è optato per un volume (detto *enclosure*) cilindrico. In questo modo non è stato necessario modificare la geometria in studio al variare della direzione della corrente marina.



*Figura 4.7 – Enclosure cilindrico relativo al DOM*

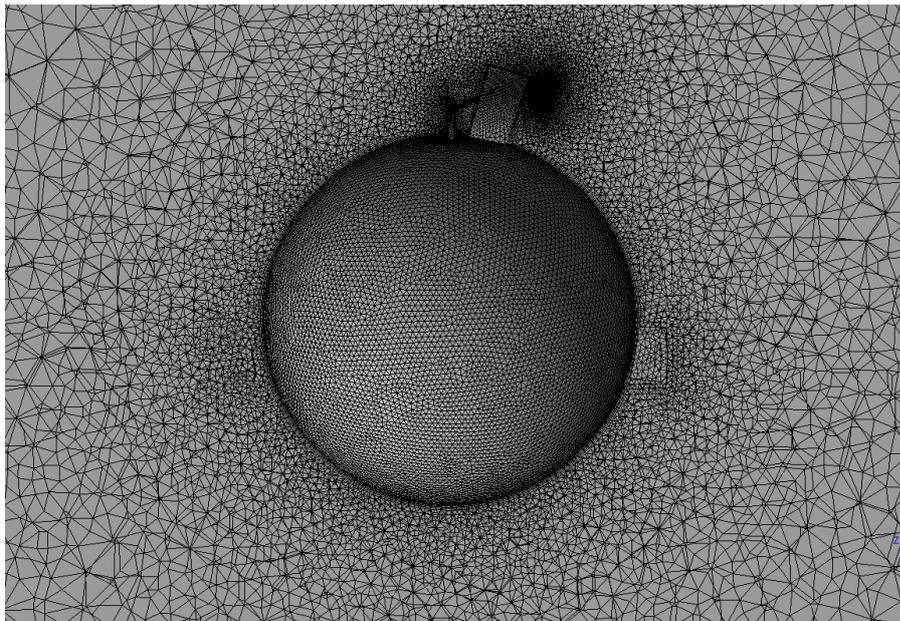
Come si può notare dalla Fig. 4.7, l'enclosure è stato sovradimensionato rispetto alla geometria interna per evitare che gli effetti di bordo influenzassero i risultati delle simulazioni.

## 4.2 Griglia di calcolo

Per generare la griglia di calcolo è stato impiegato il programma proposto ANSYS Meshing, che si occupa esclusivamente del pre-processing della geometria partendo dall'importazione del file CAD 3D.

A causa delle complesse geometrie in studio si è ritenuto opportuno sfruttare una griglia non strutturata per la discretizzazione del dominio, poiché una strutturata non avrebbe permesso di risolvere adeguatamente i campi di moto che si sviluppano in prossimità dei corpi e la scia (se non infittendo la stessa in maniera eccessiva). Per la maggior parte della geometria sono state utilizzate celle a conformazione triangolare, mentre in prossimità dei corpi celle quadrate per risolvere meglio lo strato limite.

Al fine di ottimizzare la soluzione numerica solo ove necessario, si è provveduto a fornire alla griglia un infittimento variabile a seconda della zona interessata. Nella porzione di volume di controllo adiacente al corpo da studiare è presente una mesh più fitta in quanto è in tale zona che si verificano le situazioni di più complessa modellizzazione. Le regioni più distanti da questa presentano invece una discretizzazione più grossolana non essendo interessate da complessi fenomeni fisici.

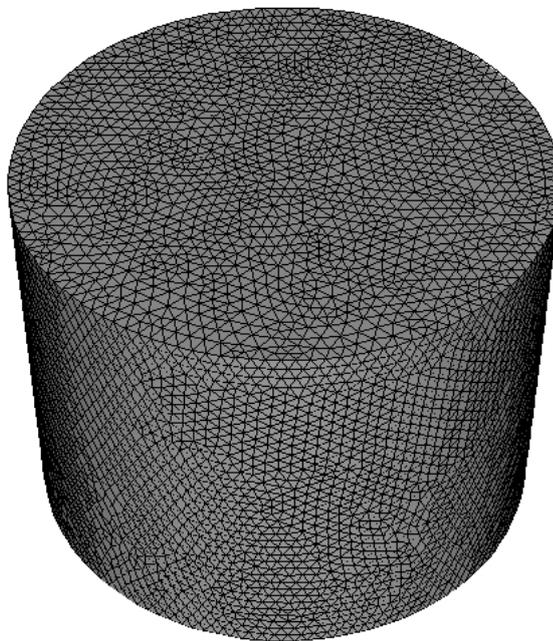


*Figura 4.8 – Esempio di infittimento della mesh interna al dominio di calcolo, in prossimità del corpo in oggetto di studio*

Ogni componente presenta inoltre considerazioni specifiche relative all'infittimento delle celle in prossimità dei particolari.

#### 4.2.1 Enclosure

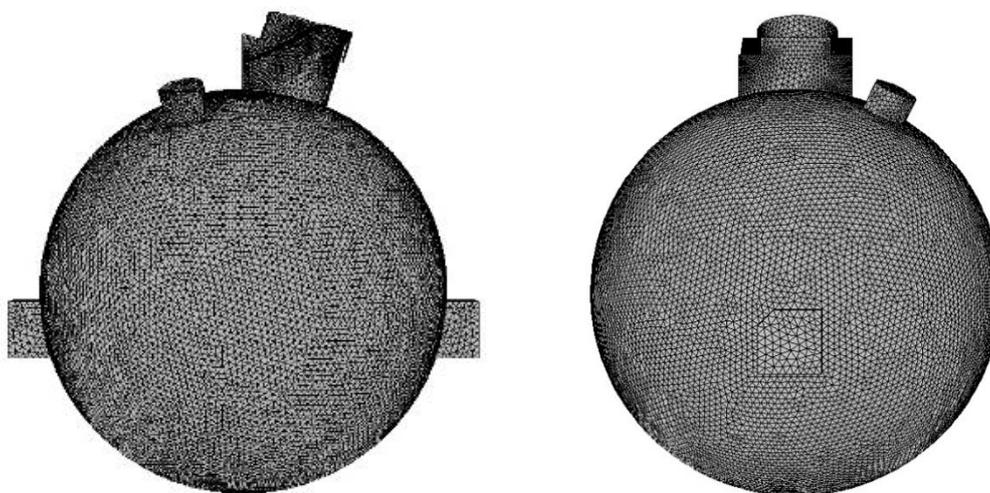
Per il dominio di calcolo, comune a tutte le simulazioni, è stata generata la seguente mesh:



*Figura 4.9 – Vista isometrica della mesh dell'enclosure cilindrico*

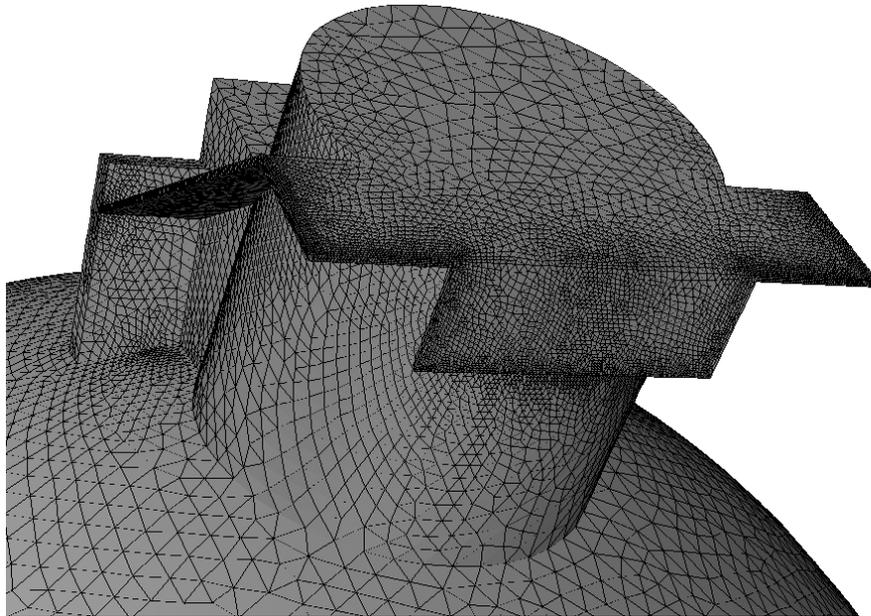
#### 4.2.2 DOM

Per il DOM è stata generata la seguente mesh:



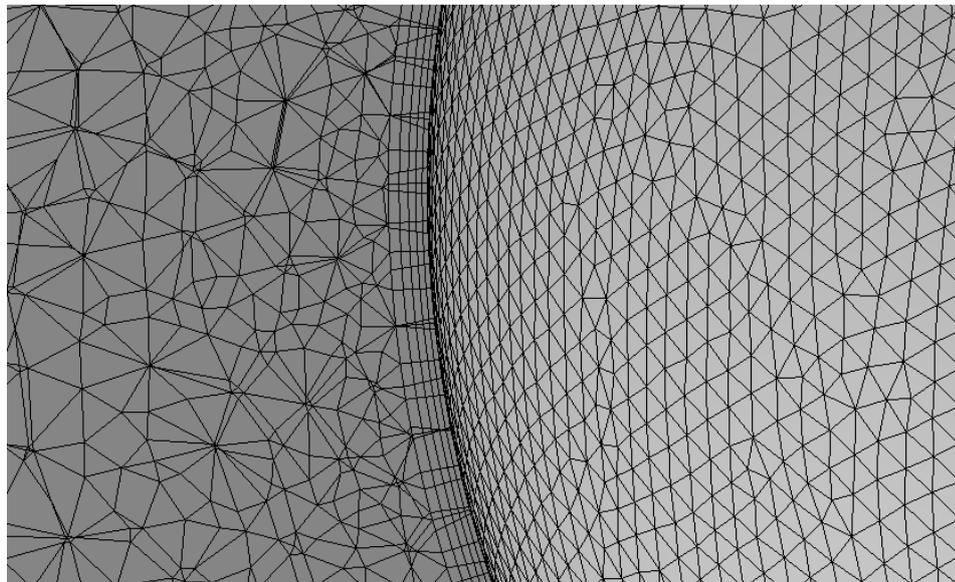
*Figura 4.10 – Vista frontale e laterale della mesh generata per il DOM*

La presenza dei supporti laterali, del supporto superiore e del penetratore rende la geometria più articolata e complessa ed è pertanto necessario adottare accorgimenti per infittire le celle in prossimità di tali particolari.



*Figura 4.11 – Particolare del supporto superiore del DOM, con infittimento delle celle in prossimità di intersezioni e geometrie sottili*

Oltre a queste attenzioni, sono stati inseriti in fase di meshing 5 strati di celle quadrate in prossimità delle superfici per migliorare ulteriormente la simulazione in CDF.

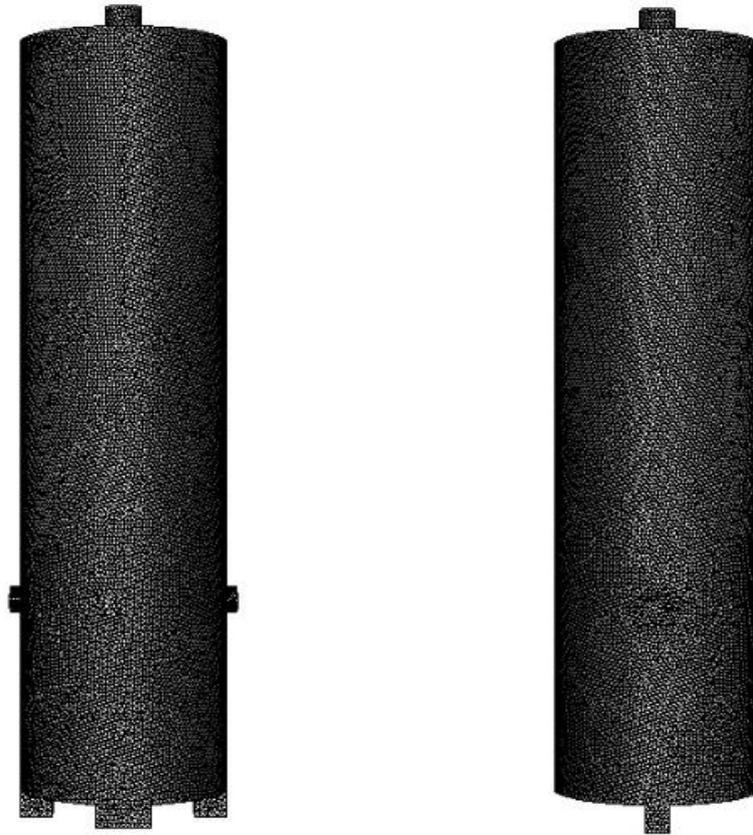


*Figura 4.12 – 5 strati di celle quadrate in corrispondenza del DOM*

Tali accorgimenti hanno portato la mesh definitiva, comprensiva di enclosure, ad avere un numero di celle pari a 3192363.

### 4.2.3 Boa sommitale

Per la boa sommitale è stata generata la seguente mesh:



*Figura 4.13 - Vista frontale e laterale della mesh generata per la boa sommitale*

Analogamente al DOM, per la boa sono stati adottati gli stessi accorgimenti, tra cui infittimento delle celle in corrispondenza dei corpi sporgenti e inserimento di 5 strati di celle quadrate adiacenti alle superfici del corpo per migliorare la simulazione. Essendo comunque la geometria più semplice del DOM, il numero di celle totali ammonta a 2189808.

#### 4.2.4 Cavi

A causa del ridotto diametro dei cavi, la visualizzazione della geometria complessiva non permette di apprezzare la costruzione della mesh. Vengono pertanto riportate di seguito immagini relative a determinati particolari quali porzione di cavo e sbarra aggiuntiva.



*Figura 4.14 – Particolare della mesh dei cavi*



*Figura 4.15 – Particolare della mesh della sbarra aggiuntiva*

Per discretizzare una geometria come questa, caratterizzata da diametro dei cavi molto ridotto, è stato necessario generare una mesh da circa 20 milioni di celle, richiedendo pertanto un elevato sforzo computazionale.

### 4.3 Struttura dell'elaborato

Come già spiegato nel sotto paragrafo 1.2.2, la forza di drag dipende da diversi fattori, tra cui densità del fluido  $\rho$ , velocità del flusso libero  $V$  e geometria del corpo. Per ottenere un quadro più completo del sistema in studio, sono state eseguite più simulazioni per le diverse geometrie al variare di tali parametri. In particolar modo:

- 1) DOM: per il sensore sono state eseguite 9 simulazioni in cui sono stati fatti variare velocità e direzione del flusso (variazione di geometria);
- 2) Boa sommitale: data la forte simmetria, per la boa sommitale sono state eseguite 3 simulazioni al variare esclusivamente della velocità della corrente marina;
- 3) Cavi: a causa della complessità della geometria, l'elevato numero di celle della mesh hanno eccessivamente prolungato la durata di esecuzione di una simulazione, per cui è stata condotta solo una simulazione, con velocità di 20 cm/s e incidenza frontale.

### 4.4 Valori di riferimento

Al fine di ottenere il coefficiente di drag di un corpo sono necessari valori di riferimento utili ad adimensionalizzare la forza di drag estrapolata dalla simulazione. In particolare, le grandezze richieste sono, dalla formula (1.3):

- Densità del fluido  $\rho_a$ ;
- Velocità del flusso indisturbato  $V$ ;
- Area frontale del corpo in studio  $A$ .

Oltre a questi valori, direttamente utili all'ottenimento del coefficiente di drag, è stato inserito per completezza il valore della pressione operativa (in atmosfere), utile per la distribuzione della pressione assoluta sulla superficie del corpo.

L'unico valore costante per tutte le simulazioni è la densità dell'acqua marina  $\rho_a$ , assunta pari a  $1025 \text{ kg/m}^3$ .

Come precedentemente spiegato, il valore della velocità del flusso indisturbato  $V$  è stato fatto variare durante le diverse simulazioni. Per simulare al meglio le condizioni operative più frequenti senza aumentare eccessivamente il numero di simulazioni, sono stati assunti come valori di velocità rispettivamente 20, 10 e 5 cm/s.

Per i diversi componenti in studio, l'area frontale è stata assunta costante e pari all'area frontale (area proiettata in direzione X), trascurando la minima variazione al variare della direzione del flusso. Le diverse aree sono riassunte nella seguente tabella.

*Tabella 4.1 – Aree proiettate dei diversi componenti della DU*

Componente	Area [ $\text{m}^2$ ]
DOM	0.145
Boa sommitale	0.803
Cavi	0.085

Per quanto riguarda la pressione operativa, per DOM e cavi essa è stata assunta pari a 240 atm, valore relativo alla sfera installata più in profondità. La boa sommitale, installata invece sulla sommità dell'unità, sperimenta una pressione operativa circa pari a 224 atm.

## 4.5 Condizioni al contorno

Per quanto concerne le condizioni al contorno imposte sulle diverse superfici della mesh, al contrario delle altre considerazioni, per tutte le simulazioni è stata adottata la medesima impostazione:

1. *velocity inlet* sulla superficie di ingresso del fluido, ossia la superficie laterale del cilindro;
2. *wall condition* sulle superfici solide (DOM, cavi, boa sommitale);
3. *simmetry boundary condition* sulle superfici superiore e inferiore dell'enclosure.

Come precedentemente spiegato, l'unica condizione a variare tra le diverse simulazioni eseguite è la condizione 1 relativa a velocità e direzione della corrente marina: ciò è stato possibile variando modulo e direzione del vettore velocità in fase di impostazione dei dati.<sup>1</sup>

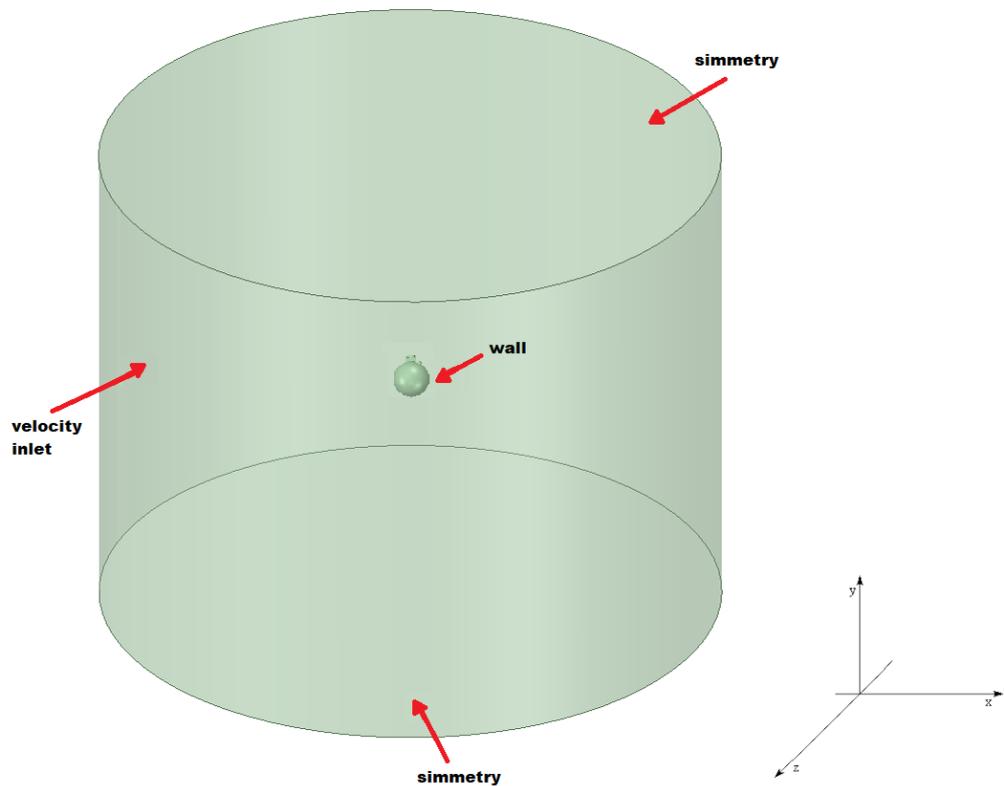


Figura 4.16 – Dominio di calcolo con condizioni al contorno

---

<sup>1</sup> Lavorando con un enclosure cilindrico, per impostare le condizioni al contorno è necessario specificare le componenti cartesiane  $x,y,z$  del vettore velocità. Solitamente Fluent utilizza l'impostazione "Normal to boundary", in questo caso inutilizzabile.

## 4.6 Impostazione di ANSYS Fluent per la simulazione

Una volta create le geometrie e generate per ognuna la griglia di calcolo, le si esportano e si impostano i parametri desiderati per la simulazione. Per fare ciò è stato utilizzato il codice di calcolo ANSYS Fluent v17.

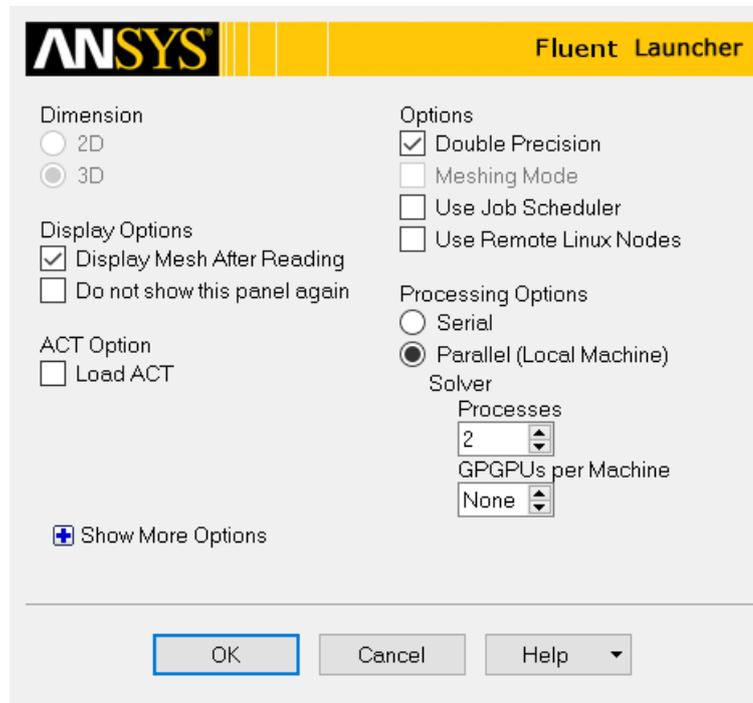


Figura 4.17 – Menù iniziale di ANSYS Fluent

Oltre alla spunta 3D, legata alla tridimensionalità dei componenti considerati, per tutte le simulazioni è stata utilizzata l'opzione *Double Precision* per avere maggiore precisione di calcolo e *Parallel*, per sfruttare tutti i core del processore del computer.

Successivamente si passa a impostare il solutore. Per tutti i calcoli sono stati scelti il modello di moto stazionario (*steady*) e modello SST  $k - \omega$  per la modellizzazione della turbolenza. Una volta specificati anche i materiali del flusso (acqua marina), vengono impostate le condizioni al contorno come precedentemente spiegato e si scelgono i metodi di soluzione. Nel caso di questo lavoro sono state risolte esclusivamente le equazioni della continuità e della quantità di moto (riportate nella sezione 3.3) attraverso un solutore pressure-based, accoppiando velocità e pressione con l'algoritmo di tipo COUPLED.

Si imposta infine il monitoraggio delle forze e coefficienti di interesse: durante la simulazione verranno visualizzati i grafici di  $C_D$  e  $F_D$  in funzione del numero di iterazioni; i loro valori sono stati inoltre salvati in itinere in due file. Da queste curve, spesso ad andamento periodico si trarranno, effettuando la media, il valore di  $C_D$  associati al componente in studio.

## 4.7 Convergenza di una simulazione

Per verificare che le equazioni coinvolte nel calcolo iterativo siano giunte a convergenza si fa uso dei residui, il cui numero dipende dai fenomeni fisici presenti nel modello (in sostanza i residui si valutano sulle equazioni di governo). La presenza della turbolenza impone inoltre l'inserimento delle equazioni legate ai modelli di turbolenza nelle equazioni di cui è necessaria la valutazione dei residui.

Il principio di controllo è il seguente: se tali residui assumeranno un valore prossimo allo zero senza più variarlo per un numero consistente di iterazioni, il calcolo verrà considerato terminato con successo. A livello di valori numerici si considerano giunte a convergenza le equazioni i cui residui assumono valori nell'ordine di  $10^{-3}$ . L'andamento leggermente oscillante che caratterizza tutte le simulazioni effettuate in questo studio è imputabile all'impostazione di moto stazionario in fase di setup: il problema è infatti caratterizzato da fenomeni turbolenti non stazionari, che avrebbero però richiesto eccessive risorse computazionali.

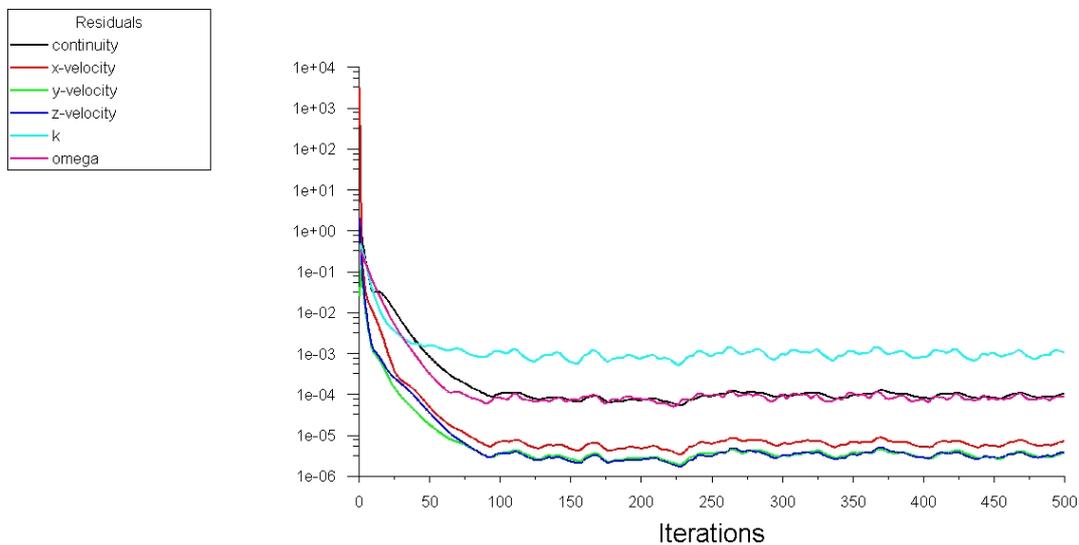


Figura 4.18 – DOM: andamento dei residui,  $V=10$  cm/s, frontale

Sebbene la valutazione dei residui dia in molte situazioni la certezza della convergenza delle equazioni non è sempre così. Infatti, esistono numerosi metodi per analizzare la correttezza del calcolo che risultano essere ottimali per determinate situazioni: ad esempio, è buona norma visionare, insieme ai residui, il valore di altre quantità quali la forza e il coefficiente di drag. Fluent infatti rende possibile monitorare durante il calcolo anche svariate grandezze legate a condizioni di parete od integrali di volume o superficie (in modo da considerare il valore di tale variabile in un numero considerevole di celle).

## 5. Risultati

Come già anticipato, lo studio è stato effettuato su DOM, cavi e boa sommitale. Per ogni corpo è stato calcolato il coefficiente di drag al variare di intensità e direzione di incidenza della corrente marina, per un totale di 13 simulazioni. I valori assunti dalla velocità sono 5, 10 e 20 cm/s con incidenza frontale, laterale e intermedia.

### 5.1 Ricerca della convergenza dei calcoli

Alla luce di quanto riportato nel paragrafo 4.7, nella presente indagine sono stati monitorati i residui delle seguenti variabili:

1. la continuità;
2. le tre componenti della velocità, esplicative della convergenza dell'equazione del momento;
3.  $k$  e  $\omega$ , legati alle equazioni dei modelli di turbolenza.

Nelle singole simulazioni si è cercata una convergenza di tipo "periodico". Quando il valore di  $C_D$  comincia a oscillare con ampiezza e lunghezza d'onda circa costanti intorno a un valore e questo andamento prosegue per un numero di iterazioni ragionevolmente lungo, si può affermare che il calcolo iterativo si è assestato e si assume la media dei periodi più significativi come valore di  $C_D$ . In alcuni casi è stato invece riscontrato un andamento oscillatorio attorno a un valore medio ma in presenza di picchi e valli senza ampiezza d'oscillazione e lunghezza d'onda costanti.

In numerosi casi si è assistito a un andamento che sembrava già periodico dopo un basso numero di iterazioni (50 circa). Le figure seguenti riportano, per esempio, i grafici di  $C_D$  in funzione del numero di iterazioni per DOM investito frontalmente dalla corrente marina di intensità pari a 20 cm/s.

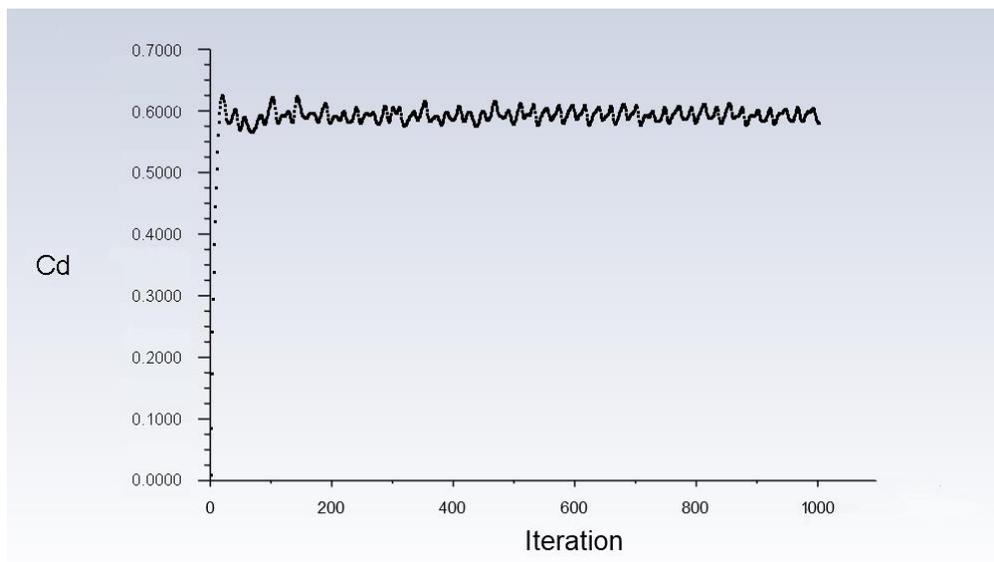


Figura 5.1 – DOM: grafico di  $C_D$ ,  $V=20$  cm/s, incidenza frontale

## 5.2 I valori di $C_D$

I valori del coefficiente di resistenza sono stati calcolati mediando i loro andamenti per un intervallo di iterazioni scelto di caso in caso osservando la periodicità delle funzioni. Nelle successive tabelle sono raccolti tutti i risultati relativi a DOM, boa sommitale e cavi.

*Tabella 5.1 – Coefficienti di drag ottenuti per il DOM*

Velocità [cm/s]	$C_D$		
	Frontale	45° gradi	Laterale
20	0.592	0.542	0.516
10	0.598	0.556	0.517
5	0.612	0.576	0.529

*Tabella 5.2 – Coefficienti di drag ottenuti per la boa sommitale*

Velocità [cm/s]	$C_D$
20	0.434
10	0.462
5	0.532

*Tabella 5.3 – Coefficienti di drag ottenuti per i cavi*

Velocità [cm/s]	$C_D$
20	0.631

Di seguito vengono riportati i grafici  $Re-C_D$  relativi ai componenti DOM e boa sommitale.

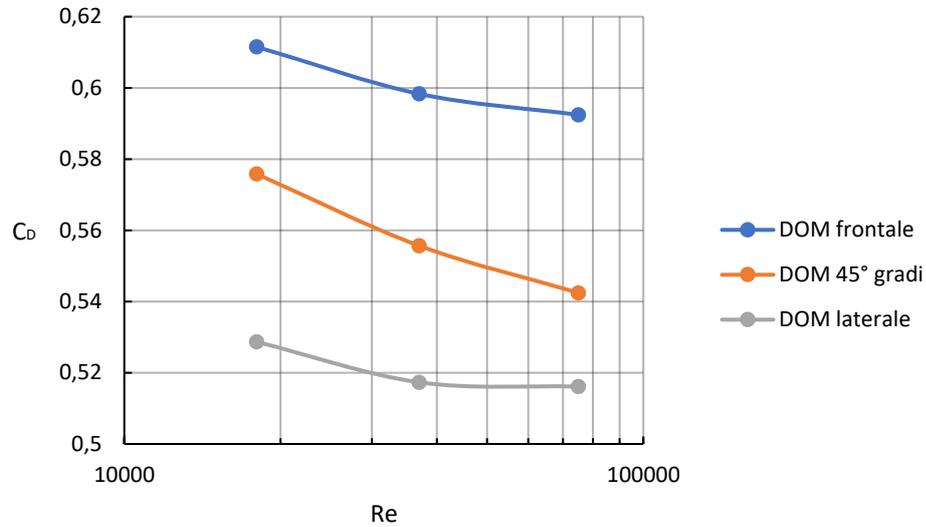


Figura 5.2 – DOM: andamento di  $C_D$  in funzione del numero di Reynolds in scala logaritmica ( $\rho=1025 \text{ kg/m}^3$ ,  $D=0.43 \text{ m}$ ,  $\mu=0.0012 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )

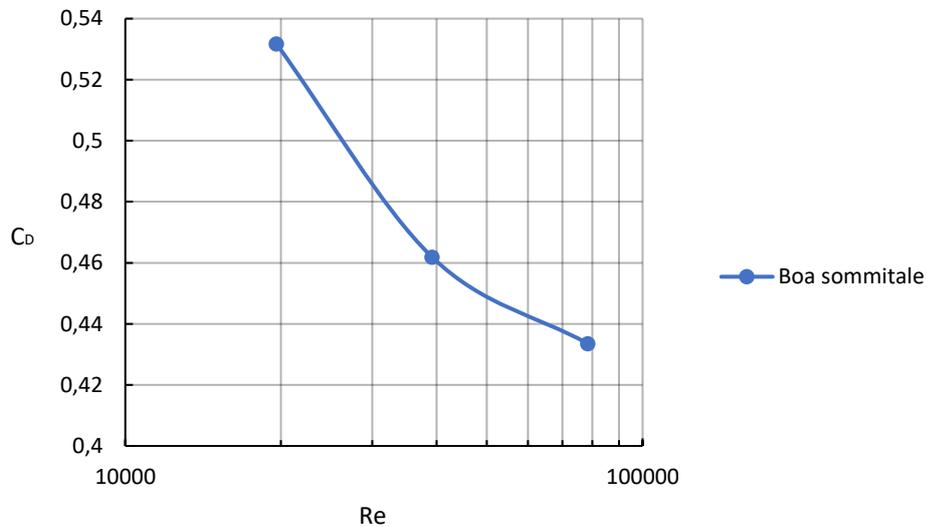


Figura 5.3 – Boa sommitale: andamento di  $C_D$  in funzione del numero di Reynolds in scala logaritmica ( $\rho=1025 \text{ kg/m}^3$ ,  $D=0.459 \text{ m}$ ,  $\mu=0.0012 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ )

Si può notare, nel grafico  $Re-C_D$  relativo al DOM, un andamento molto interessante di  $C_D$ : la forte asimmetria del sensore, quindi la direzione di incidenza della corrente marina, ha un netto impatto sulla variazione del coefficiente di drag, che progressivamente si riduce.

### 5.3 Visualizzazioni grafiche

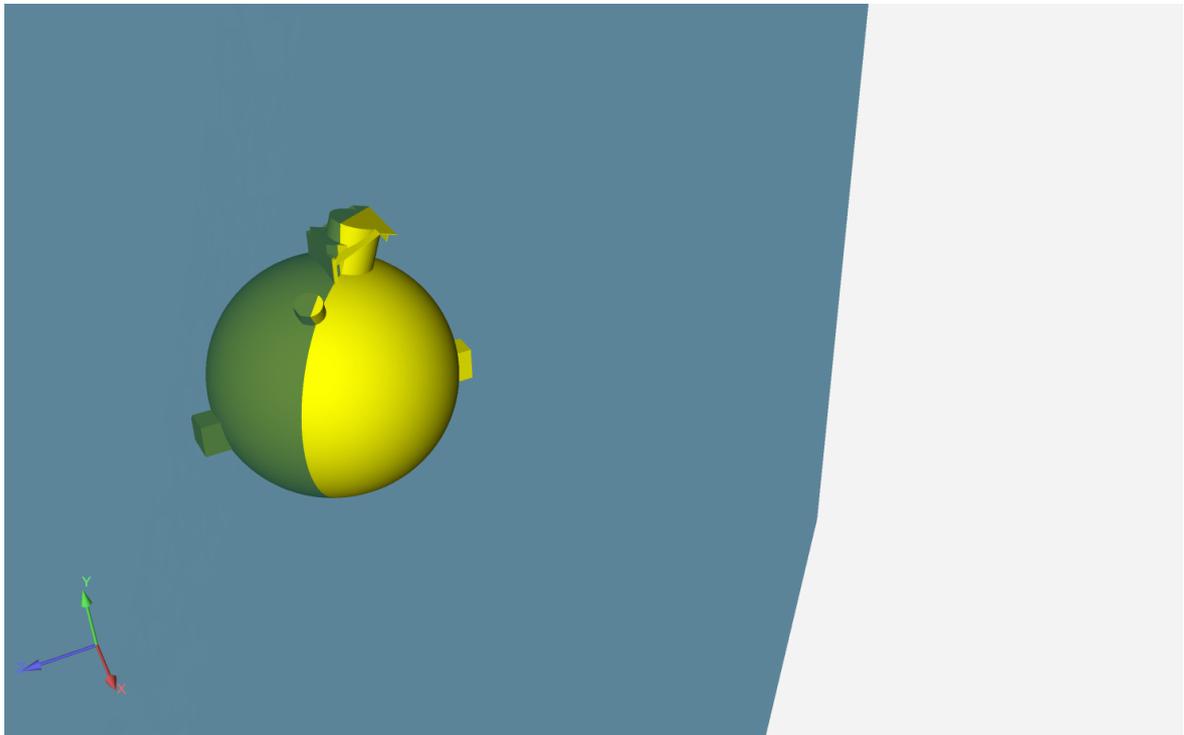
Dopo aver acquisito i dati relativi da ogni simulazione, per visualizzare le distribuzioni delle grandezze fisiche del problema a schermo è stato utilizzato il software di post-processing Enight 2019 R1. Da questo è possibile ottenere, ad esempio, visualizzazioni in due o tre dimensioni di velocità, pressione, vorticità e svariate altre grandezze.

In merito al mio lavoro, vengono riportate di seguito le immagini relative alle scie generate dalla corrente che investe il componente e visualizzazioni 3D dei vortici che si sviluppano nella scia, paragonate tra i diversi casi studiati.

#### 5.3.1 Visualizzazione della scia

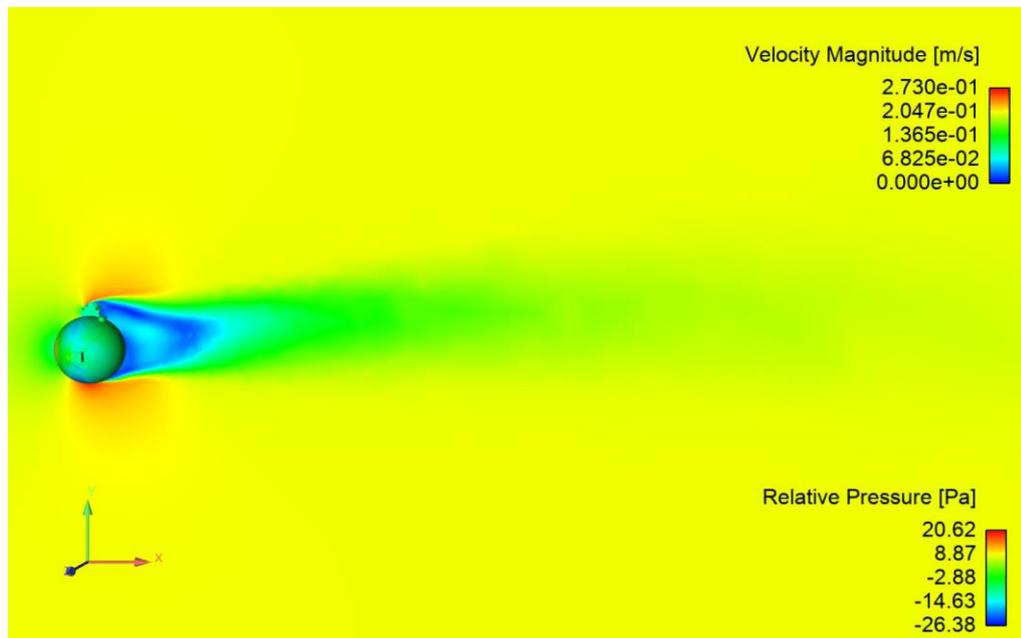
Nelle seguenti pagine sono raccolte le immagini relative alla scia che si genera a seguito di una corrente fluida in moto che investe un corpo.

Per ogni caso riportato sono specificate le diverse condizioni operative. Per ottenere le seguenti visualizzazioni, è stato necessario effettuare una sezione del corpo con un piano opportunamente orientato, come nell'esempio di Fig. 5.4.

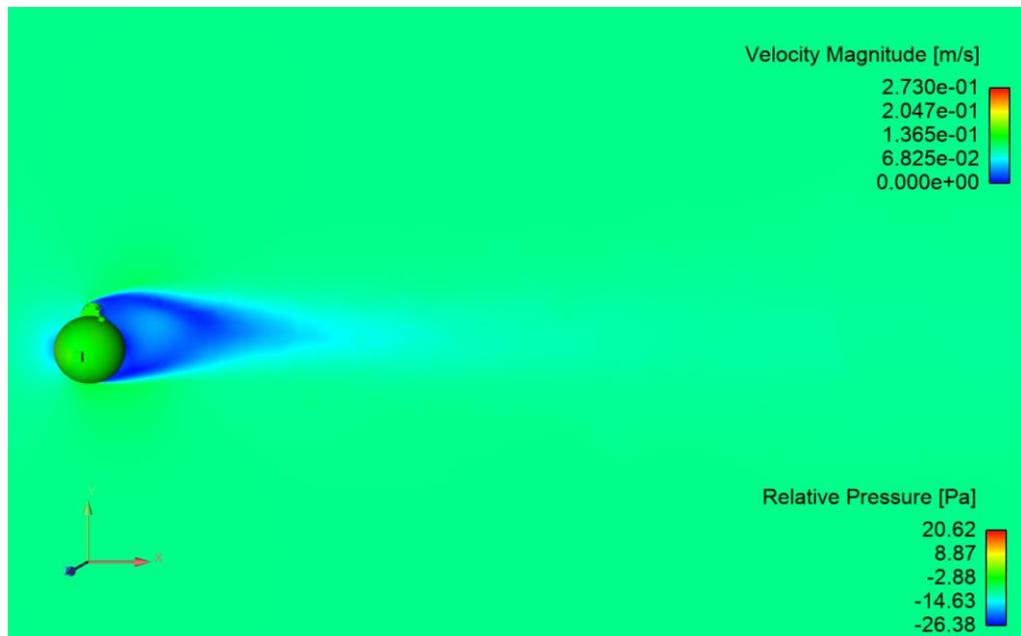


*Figura 5.4 – Sezione di un DOM, nel caso di angolo di incidenza della corrente marina di 45° gradi*

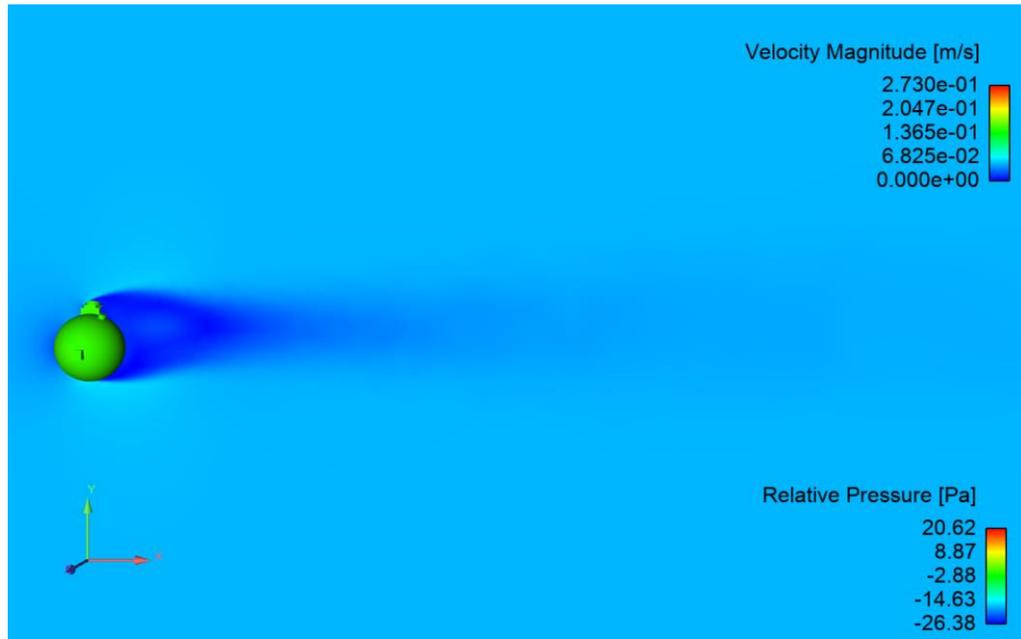
- 1) DOM investita dalla corrente marina frontalmente, immagini al variare della velocità:



*Figura 5.5 – Scia, incidenza frontale,  $V = 20 \text{ cm/s}$*

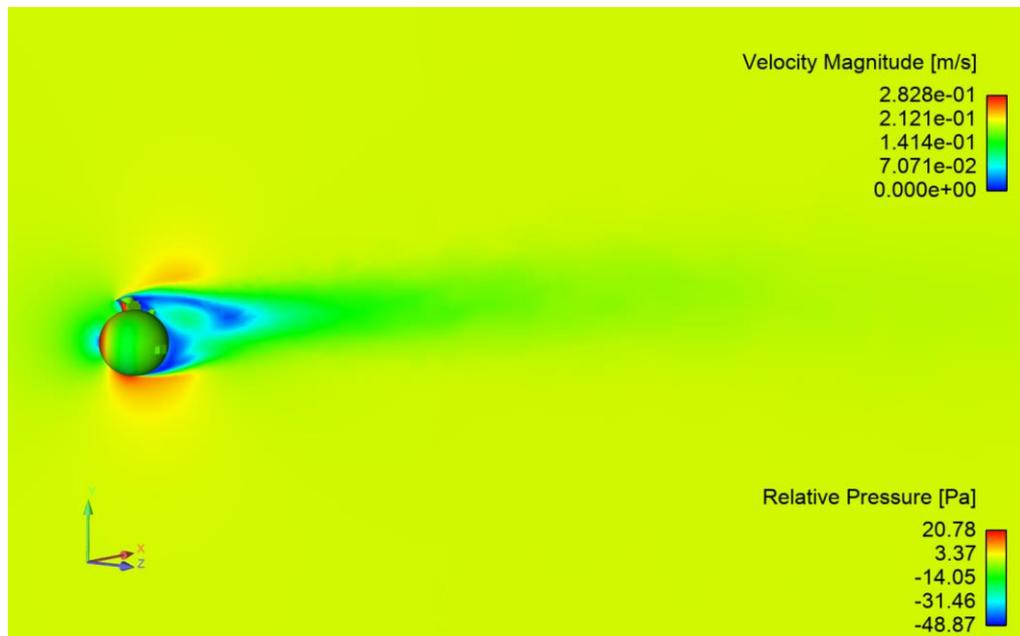


*Figura 5.6 – Scia, incidenza frontale,  $V = 10 \text{ cm/s}$*

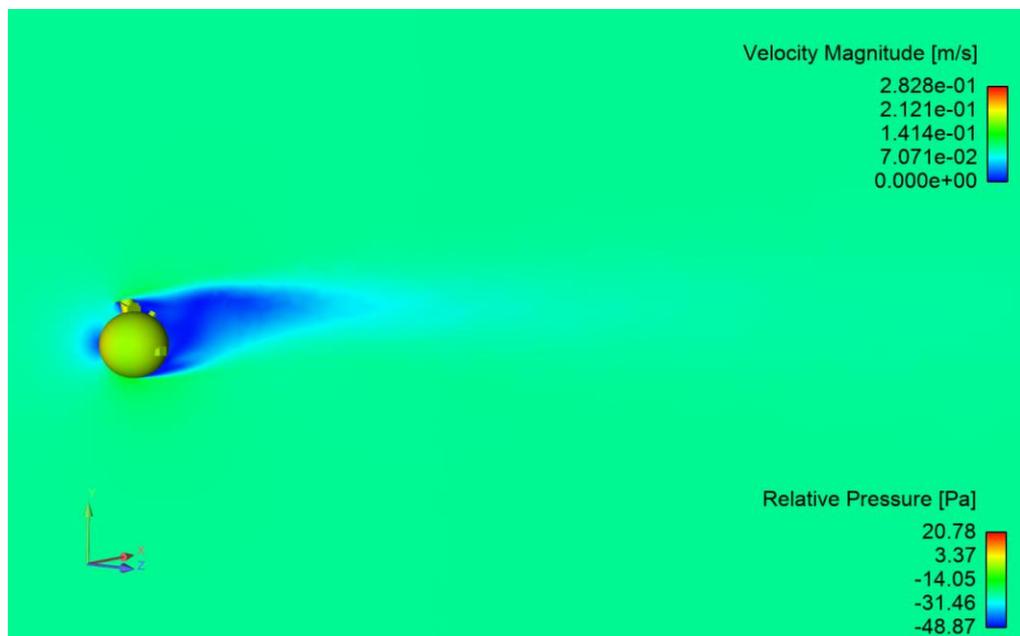


*Figura 5.7 – Scia, incidenza frontale,  $V = 5 \text{ cm/s}$*

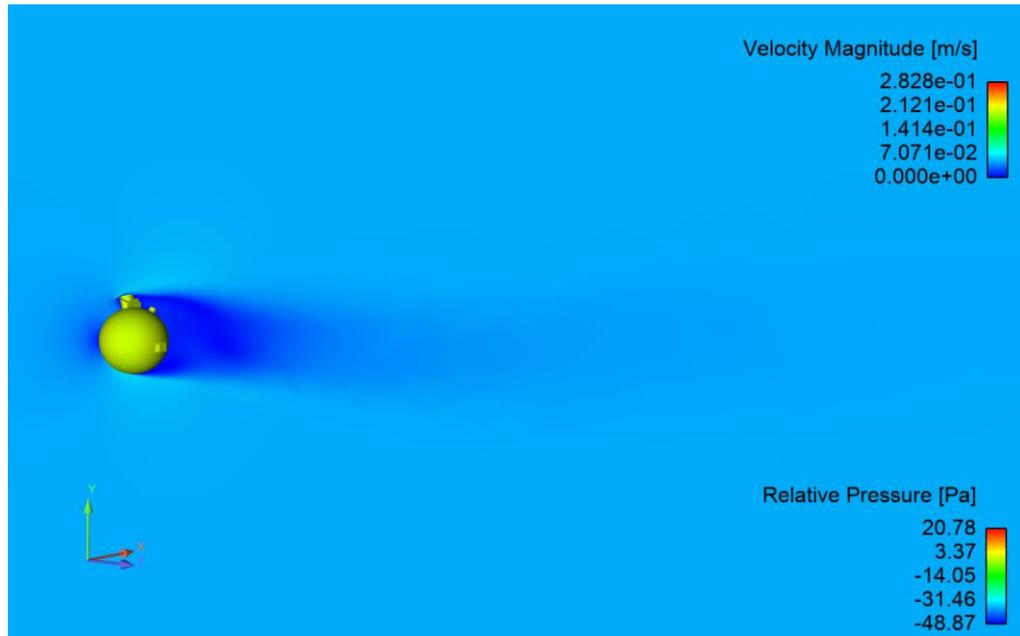
- 2) DOM investita dalla corrente marina di un angolo di 45° gradi rispetto all'asse x, immagini al variare della velocità:



*Figura 5.8 – Scia, incidenza 45° gradi,  $V = 20 \text{ cm/s}$*

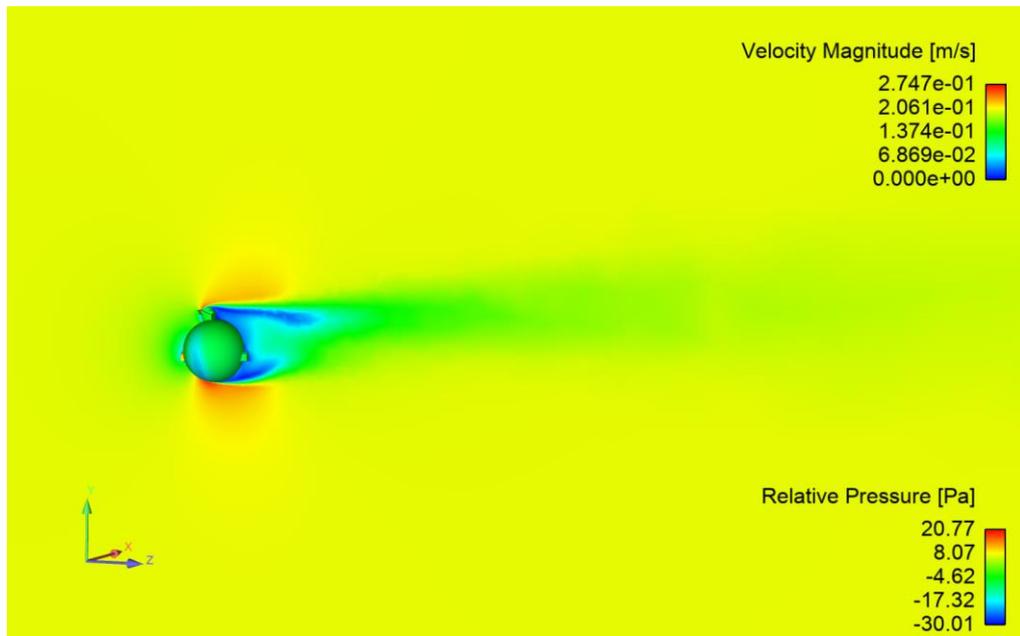


*Figura 5.9 – Scia, incidenza 45° gradi,  $V = 10 \text{ cm/s}$*

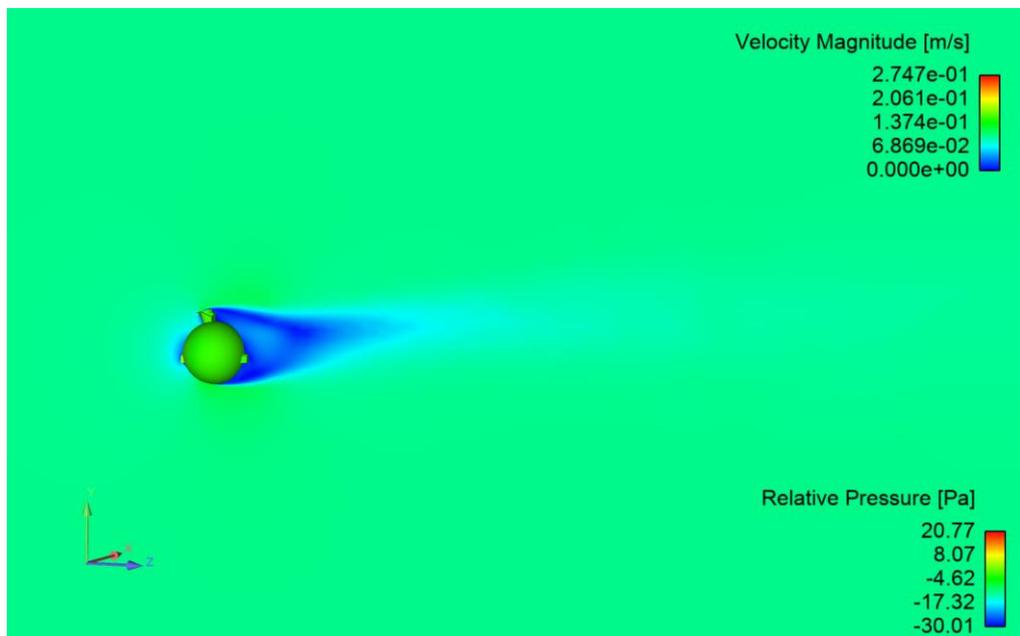


*Figura 5.10 – Scia, incidenza 45° gradi,  $V = 5 \text{ cm/s}$*

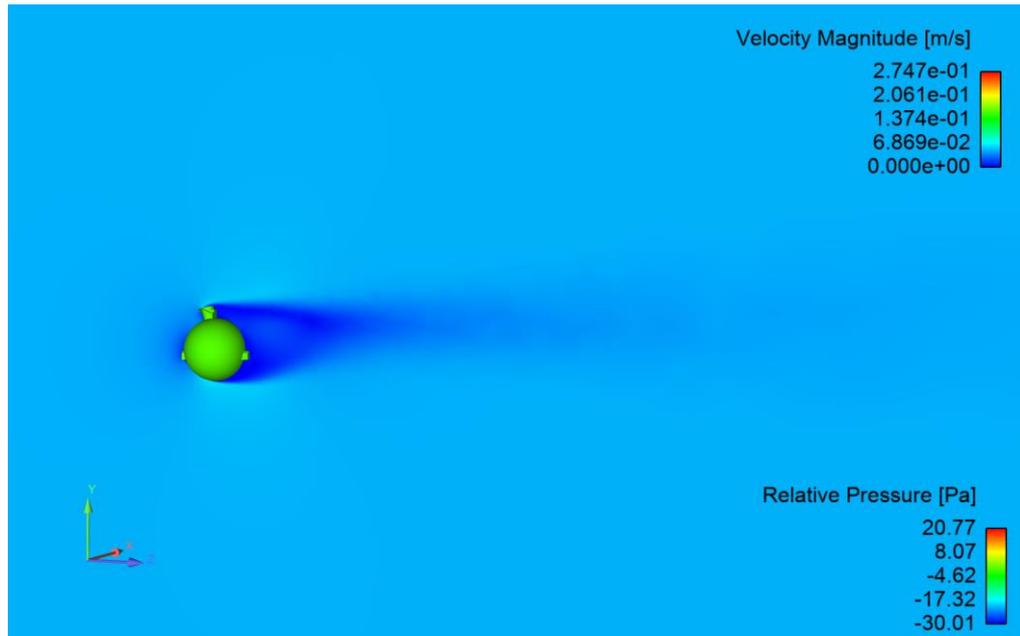
3) DOM investita dalla corrente marina lateralmente, immagini al variare della velocità:



*Figura 5.11 – Scia, incidenza laterale,  $V = 20 \text{ cm/s}$*

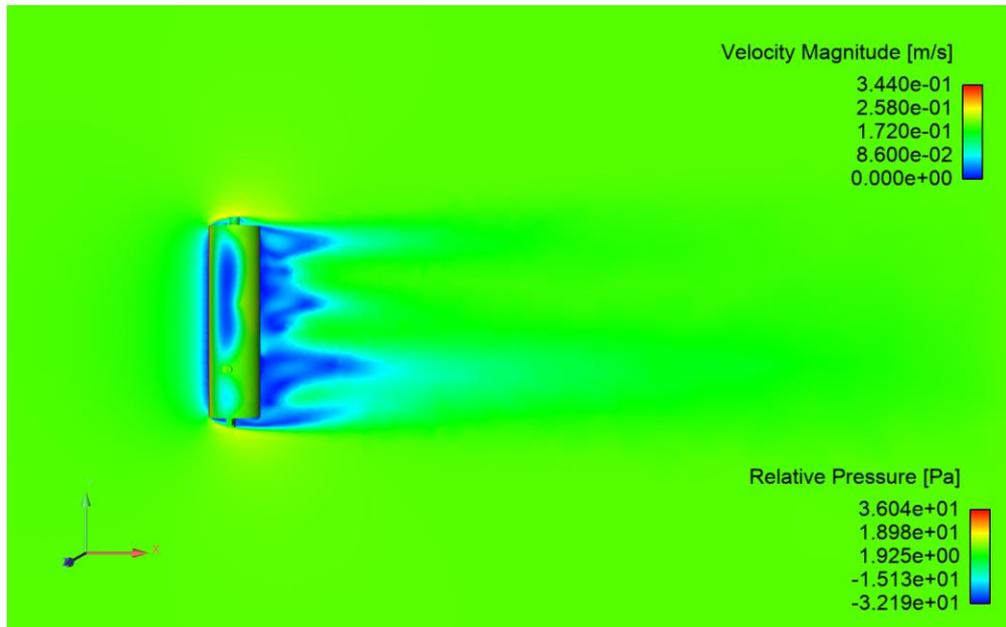


*Figura 5.12 – Scia, incidenza laterale,  $V = 10 \text{ cm/s}$*

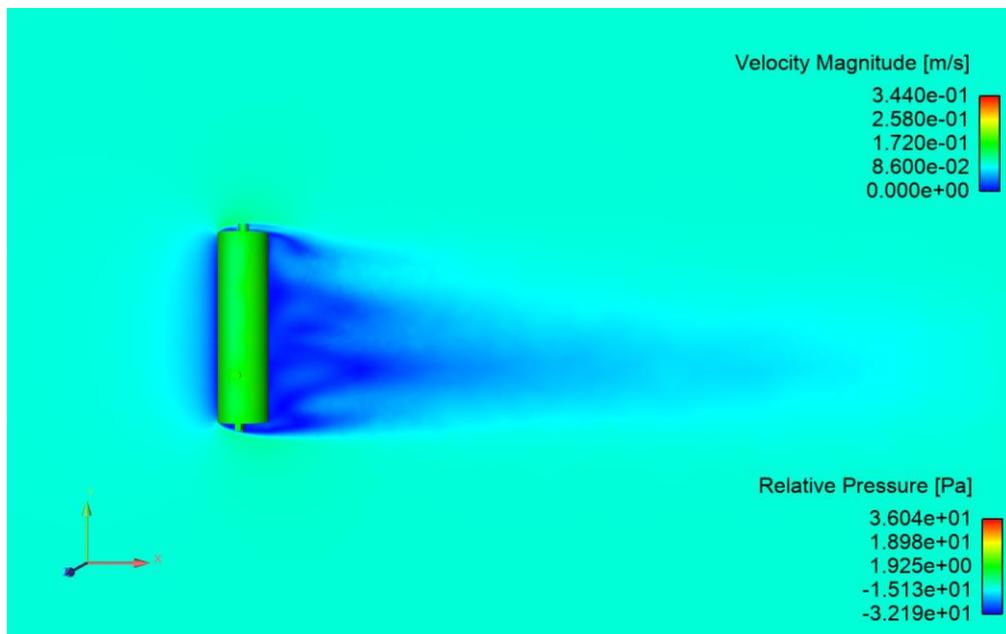


*Figura 5.13 – Scia, incidenza laterale,  $V = 5 \text{ cm/s}$*

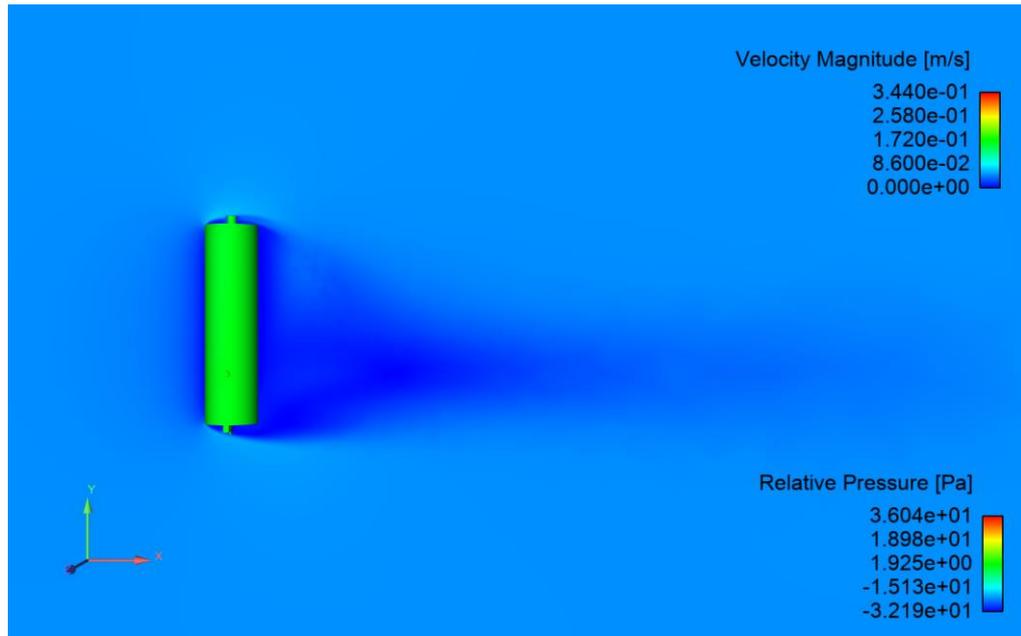
- 4) Boa sommitale investita dalla corrente marina frontalmente, immagini al variare della velocità:



*Figura 5.14 – Scia, incidenza frontale,  $V = 20 \text{ cm/s}$*

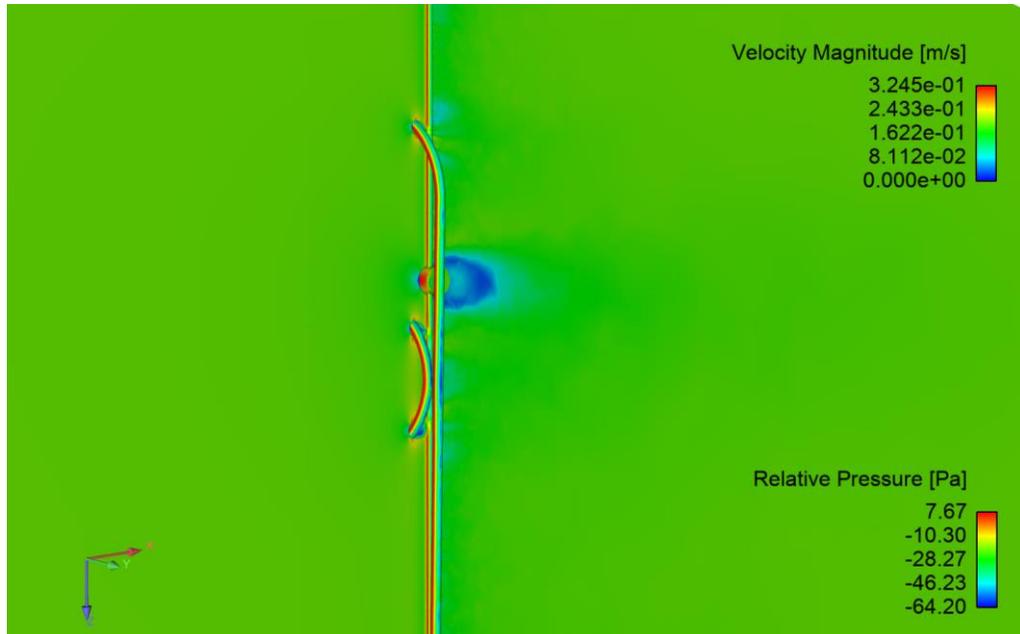


*Figura 5.15 – Scia, incidenza frontale,  $V = 10 \text{ cm/s}$*

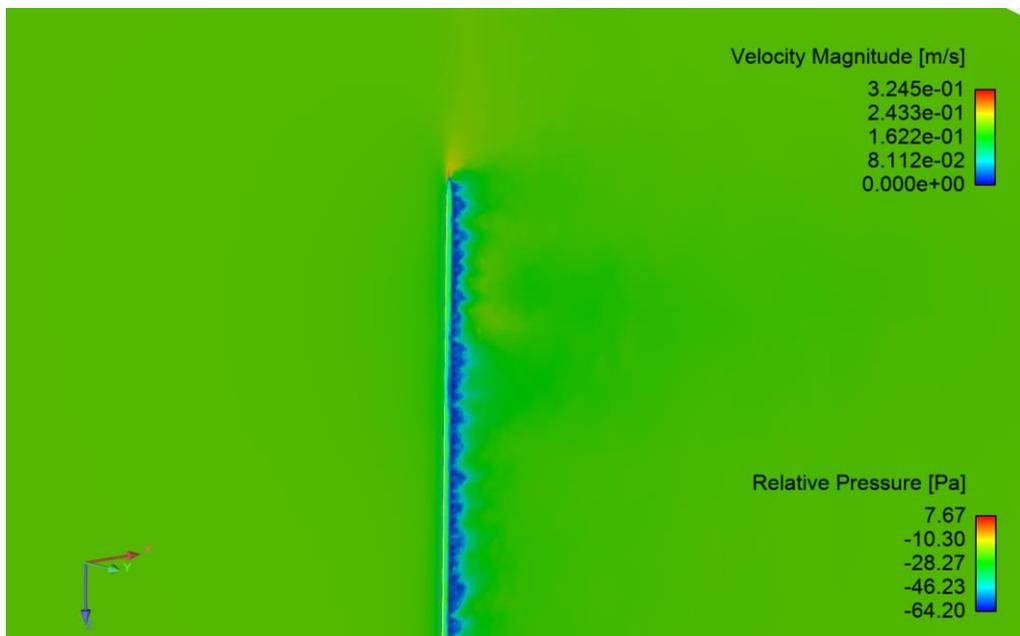


*Figura 5.16 – Scia, incidenza frontale,  $V = 5 \text{ cm/s}$*

- 1) Cavi investiti dalla corrente marina frontalmente, caso  $V = 20 \text{ cm/s}$   
A causa delle ridotte dimensioni della geometria, vengono riportati dati relativi a particolari del componente (sbarre aggiuntive, avvolgimenti)



*Figura 5.17 – Scia relativa alla sbarra, incidenza frontale,  $V = 20 \text{ cm/s}$*



*Figura 5.18 – Scia relativa al cavo VEOC, incidenza frontale,  $V = 20 \text{ cm/s}$*

### 5.3.2 Visualizzazioni delle strutture vorticose

Per avere una chiara visualizzazione delle strutture vorticose che si dipartono dal componente e proseguono nella scia e le strutture formate dalla corrente marina sul corpo, si ricorre al Q-criterio, dove Q è il secondo invariante del gradiente di velocità  $\nabla\vec{V}$ . Tale parametro definisce vortice una regione se ogni punto in essa presenta  $Q>0$ .

In particolare, nelle seguenti figure compaiono le superfici tridimensionali che identificano le regioni che hanno Q maggiore di un valore assegnato (variabile per le diverse configurazioni). Le principali differenze che si riscontrano nelle seguenti visualizzazioni sono, come prevedibile, al variare della velocità e della direzione di incidenza della corrente marina.

- 1) DOM investita dalla corrente marina frontalmente, immagini al variare della velocità:

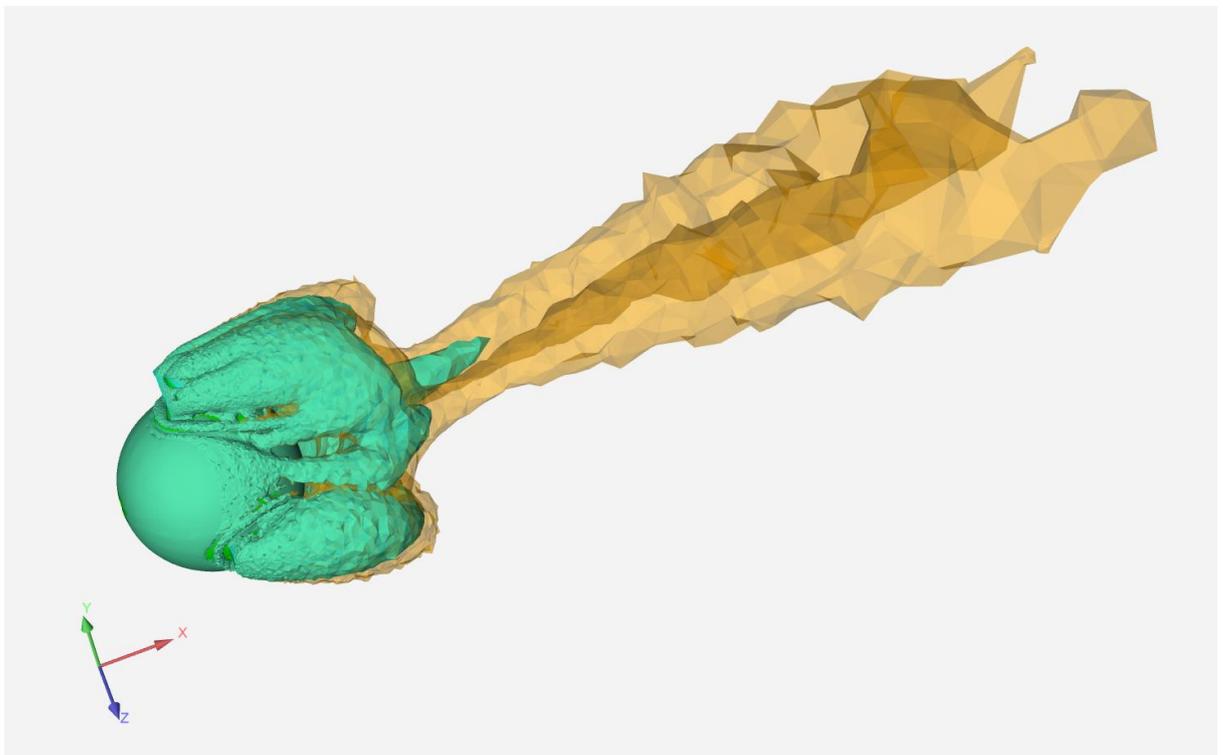
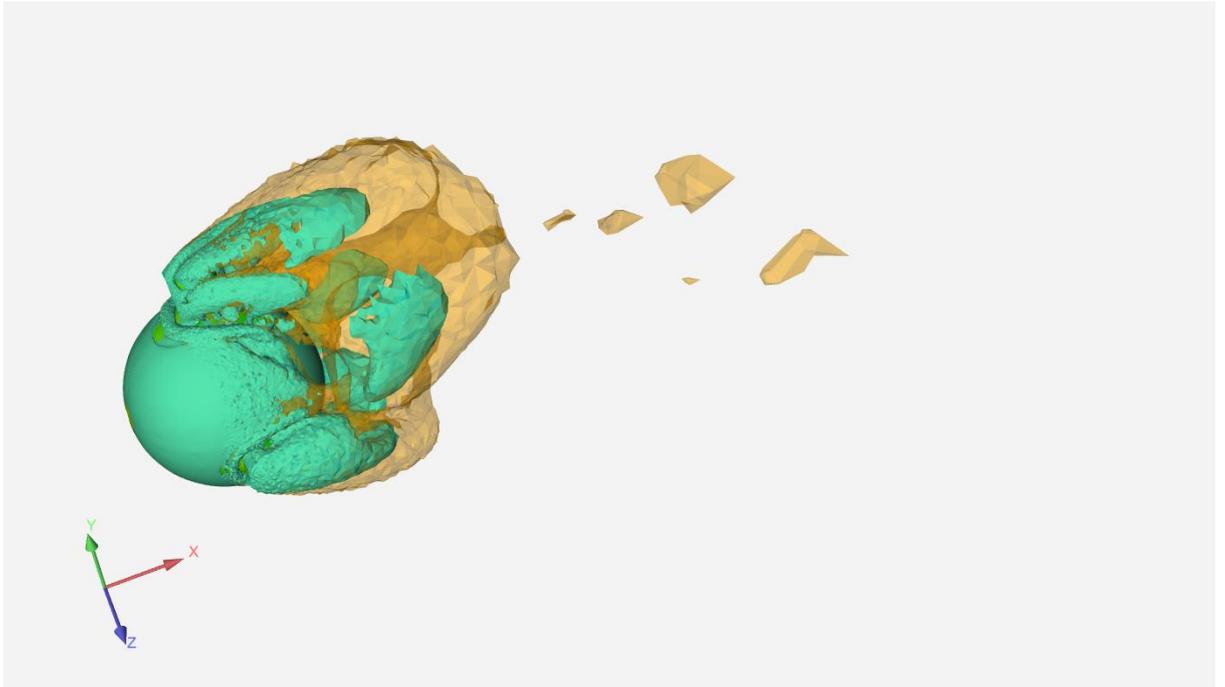
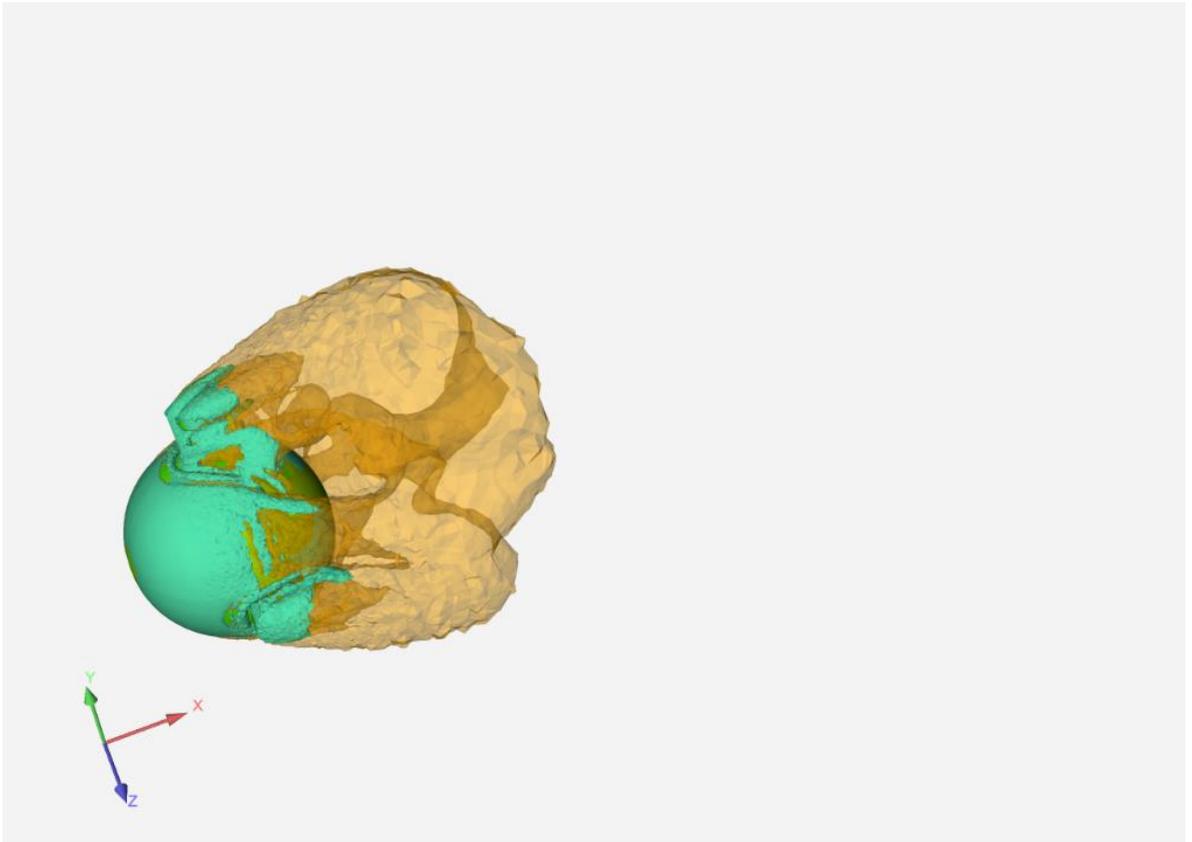


Figura 5.19 – Q-criterion, incidenza frontale,  $V = 20\text{cm/s}$

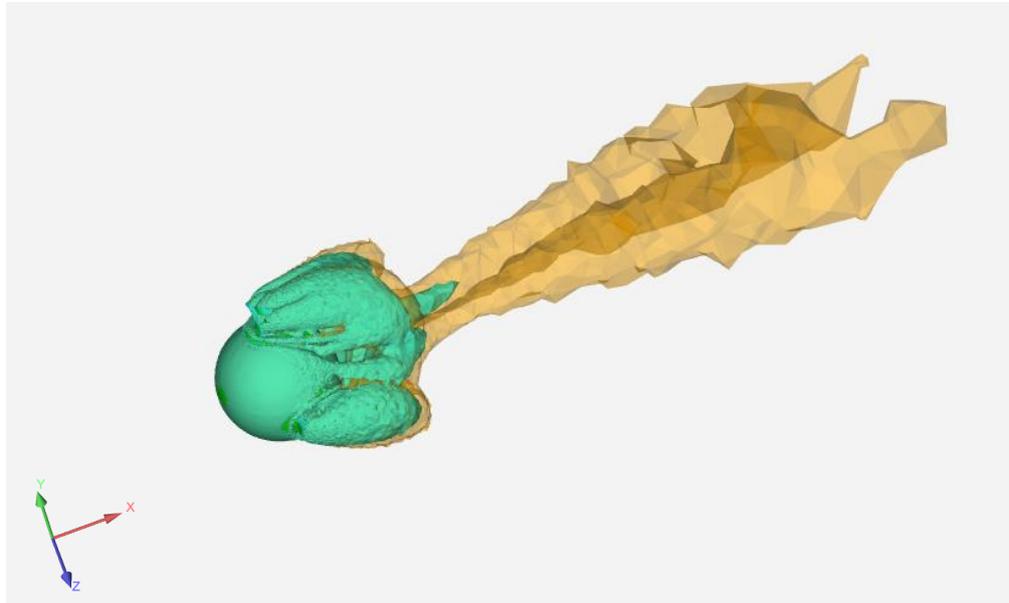


*Figura 5.20 – Q-criterion, incidenza frontale,  $V = 10 \text{ cm/s}$*

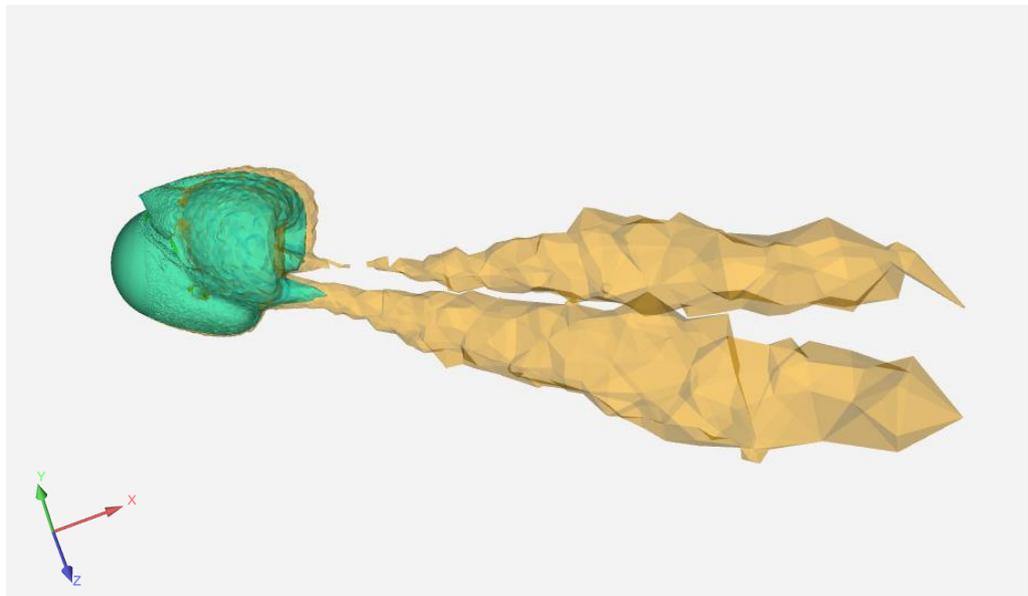


*Figura 5.21 – Q-criterion, incidenza frontale,  $V = 5 \text{ cm/s}$*

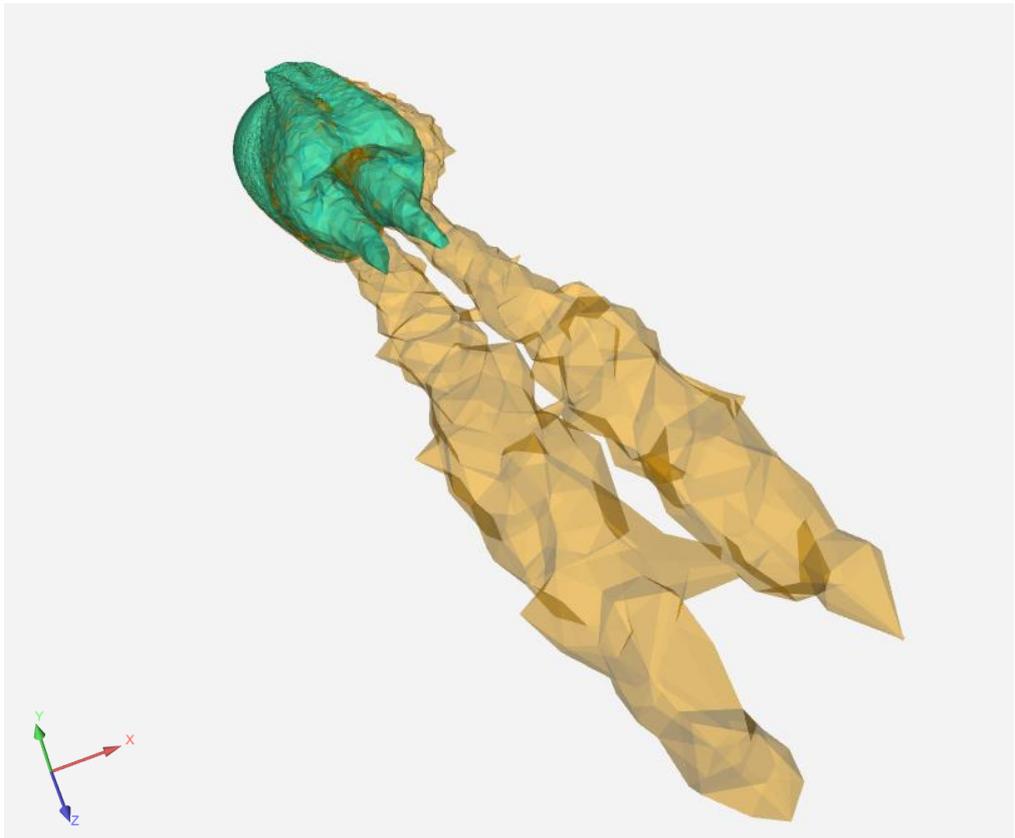
- 2) DOM investita dalla corrente marina a  $V = 20$  cm/s, immagini al variare della direzione di incidenza:



*Figura 5.22 – Q-criterion,  $V = 20$  cm/s, incidenza frontale*

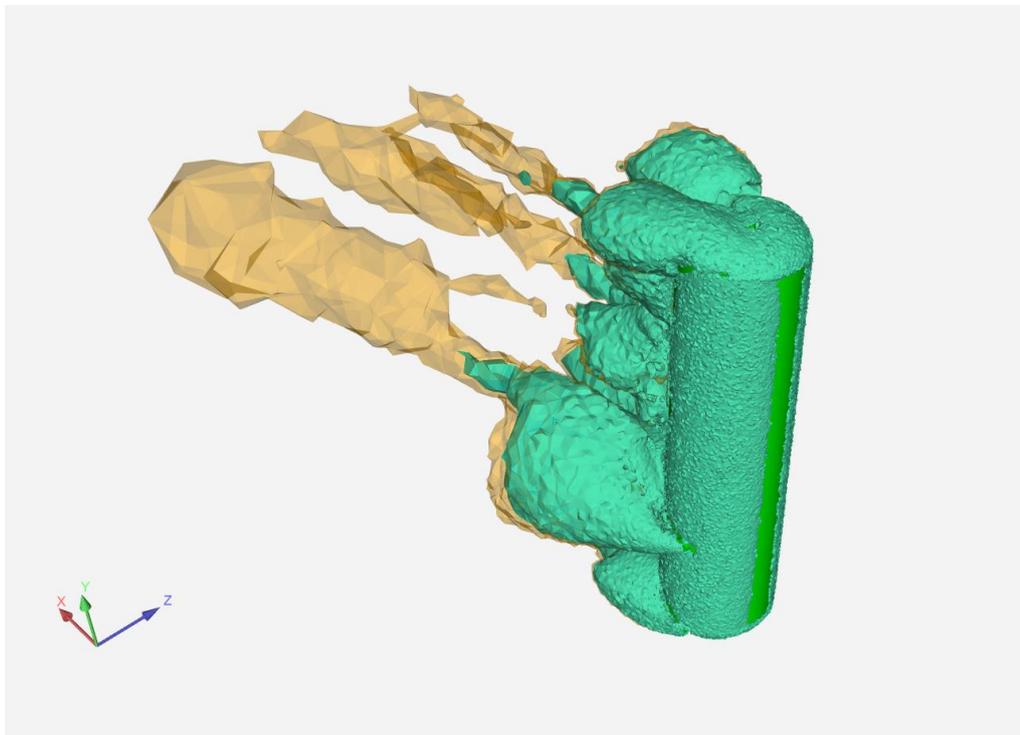


*Figura 5.23 – Q-criterion,  $V = 20$  cm/s, incidenza 45° gradi*

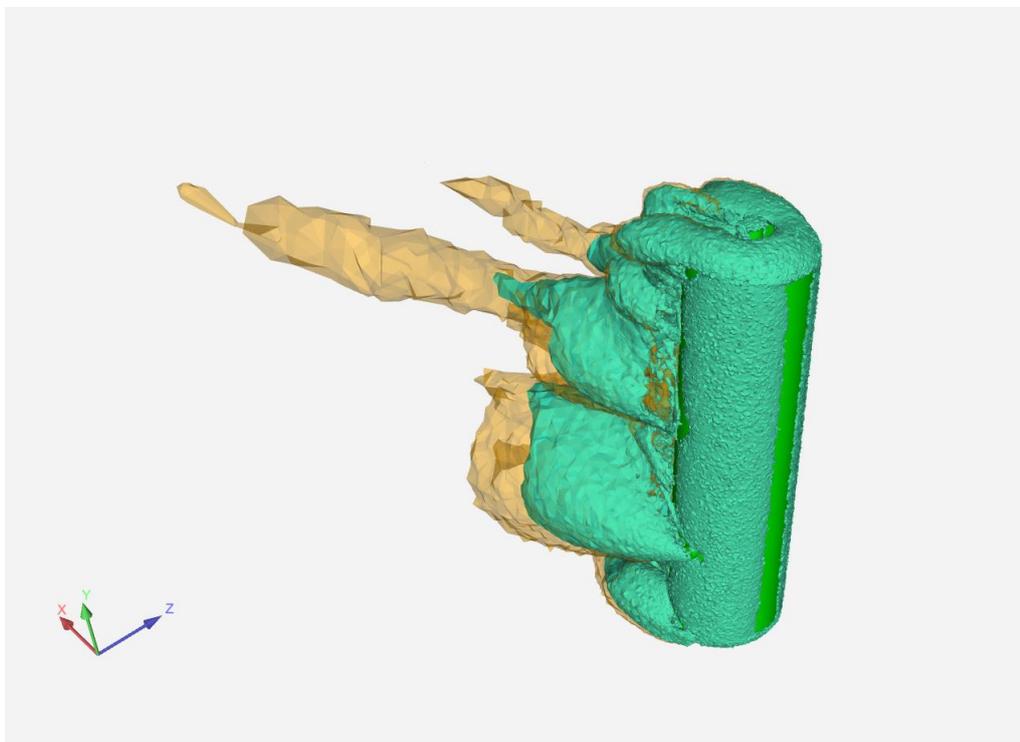


*Figura 5.24 – Q-criterion,  $V = 20$  cm/s, incidenza laterale*

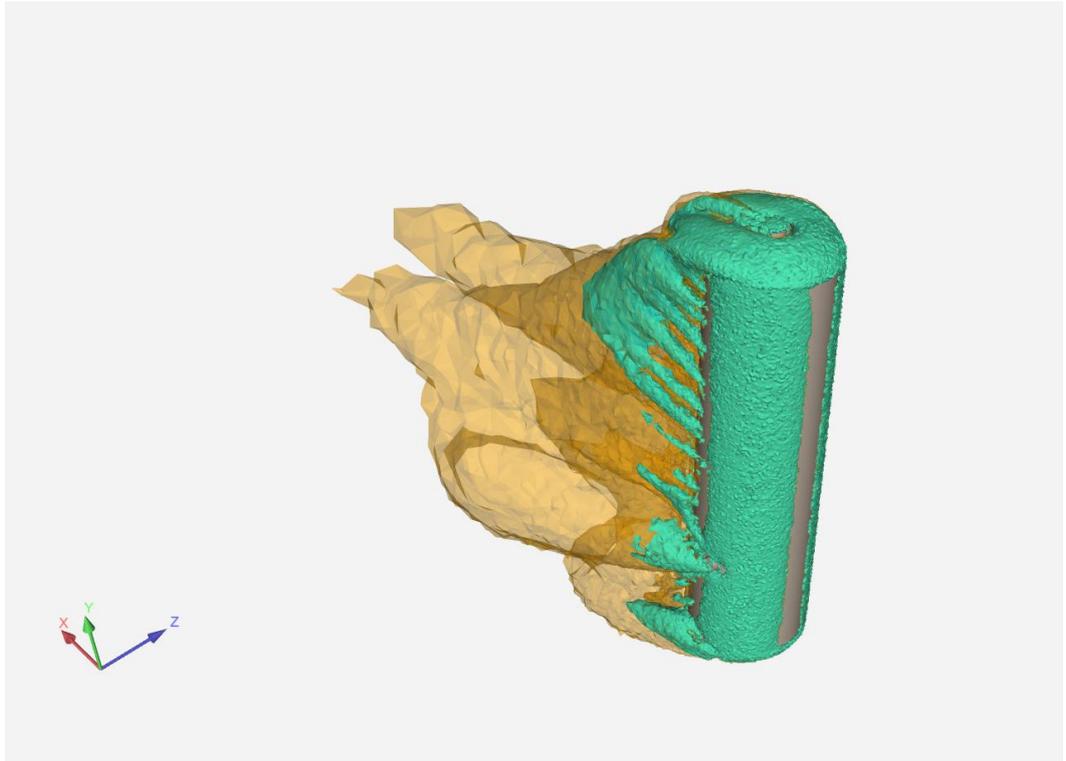
- 3) Boa sommitale investita dalla corrente marina frontalmente, immagini al variare della velocità:



*Figura 5.25 – Q-criterion, incidenza frontale,  $V = 20$  cm/s*

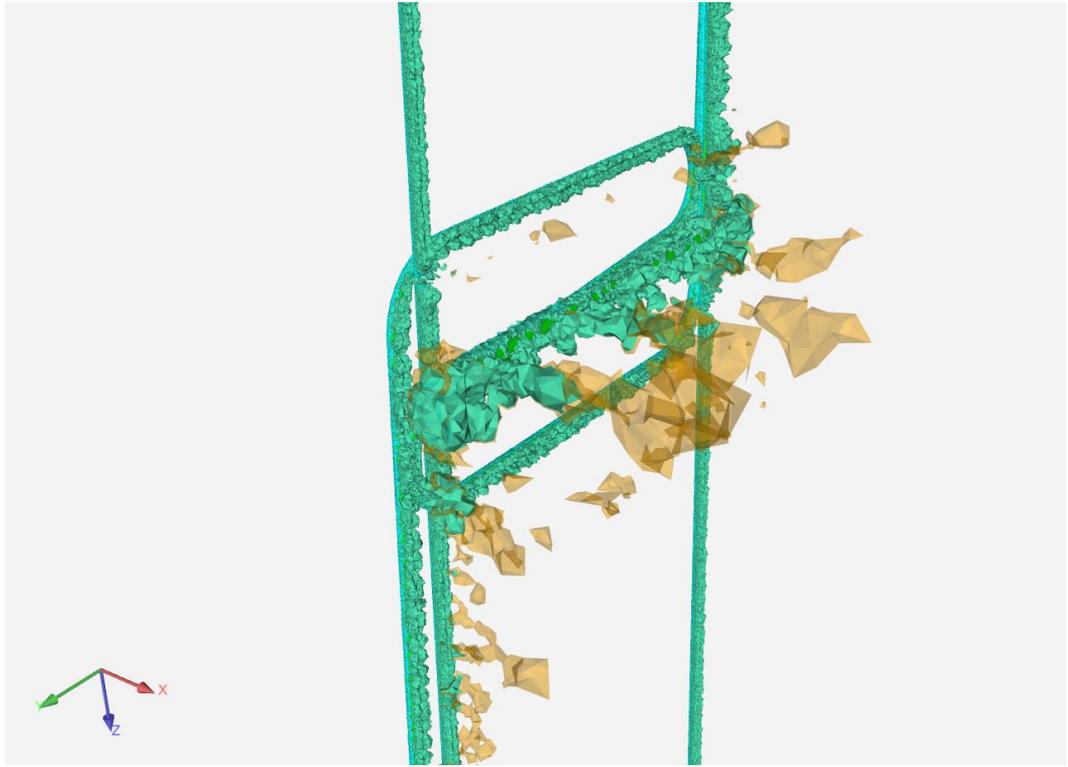


*Figura 5.26 – Q-criterion, incidenza frontale,  $V = 10$  cm/s*

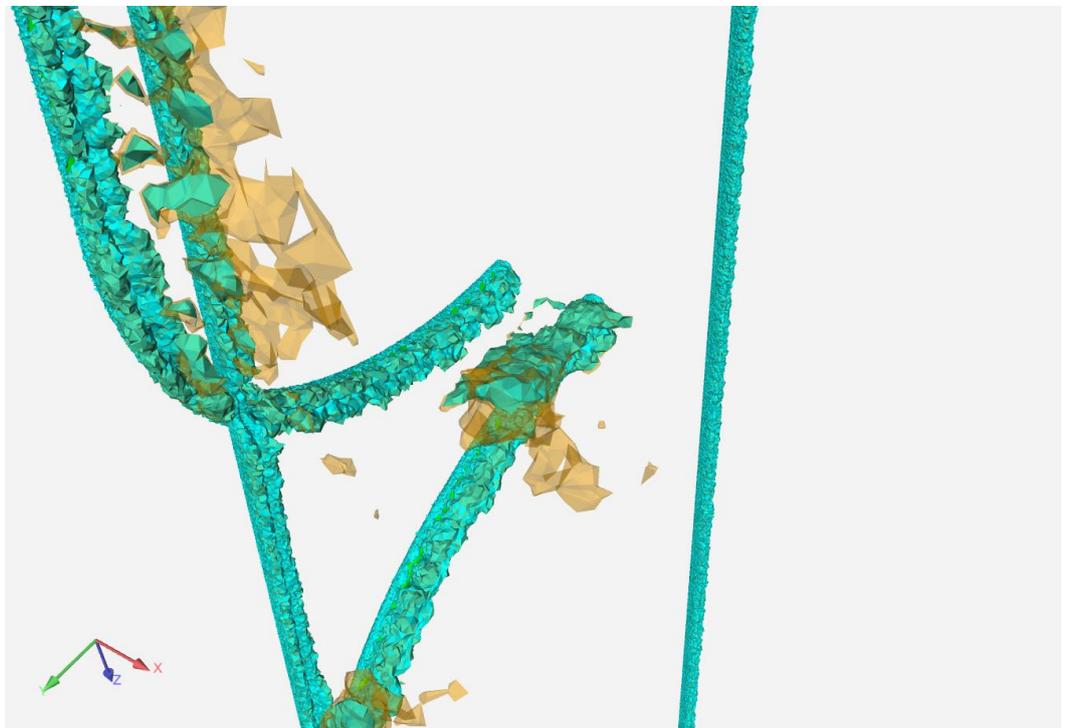


*Figura 5.27 – Q-criterion, incidenza frontale,  $V = 5 \text{ cm/s}$*

4) Cavi investiti dalla corrente marina frontalmente, caso  $V = 20 \text{ cm/s}$



*Figura 5.28 – Q-criterion, particolare della sbarra: incidenza frontale,  $V = 20 \text{ cm/s}$*



*Figura 5.29 – Q-criterion, particolare dei cavi: incidenza frontale,  $V = 20 \text{ cm/s}$*

## 6. Conclusioni

La presente tesi di laurea triennale si è sviluppata semplificando, in primo luogo, le geometrie originali dei componenti studiati, ossia DOM, boa sommitale e cavi. Queste sono state successivamente discretizzate, cercando di non appesantire eccessivamente le mesh. Impostato Fluent, sono state eseguite 13 simulazioni per tutti i componenti della DU.

Per il DOM, le simulazioni effettuate hanno confermato le aspettative: il coefficiente di drag ottenuto risulta essere lievemente maggiore del valore supposto in fase di progetto, preso dalla letteratura pari a 0.5.

Per la boa sommitale si è invece ottenuto un valore del coefficiente di drag più basso del valore di 1.3 supposto in fase di progetto. Il motivo risiede nel fatto che tale valore teorico sia riferito a un cilindro infinitamente lungo (*aspect ratio*,  $H/D = \infty$ ). La boa sommitale, per quanto poco si discosti dalla geometrica cilindrica, presenta un aspect ratio di 3.5, a cui viene associato un valore teorico del coefficiente di drag pari a 0.74.

Poche invece sono le considerazioni relative ai cavi, la cui complessa geometria ha permesso di studiare un singolo caso.

Possibili sviluppi di ricerca futuri possono essere rivolti a realizzare geometrie più fedeli ai componenti reali, coinvolgendo un Unsteady Solver, non utilizzato per i casi sopra studiati. Sempre tramite fluidodinamica computazionale, ulteriori studi potrebbero riguardare lo sviluppo di un modello più accurato, rimuovendo l'ipotesi di corpo rigido per i cavi: in questo modo potrebbe essere possibile studiare possibili avvitamenti dell'unità, ottenendo così anche previsioni di configurazioni della totale stringa.



Figura 6.1 – Rappresentazione della reale escursione orizzontale di una DU

## **Bibliografía**

Adrián-Martínez S., Aiello S., Anghinolfi M. et al., 2016, KM3NeT 2.0 - Letter of Intent for ARCA and ORCA

ANSYS Fluent 14.5, Tutorial Guide, 2012

Berbee E., 2018, KM3NeT DU: Description of components

Carr J., Hallewell G, Holford A. et al., 2008, KM3NeT - Conceptual Design Report

Cengel Y. A., Cimbala J. M., 2005, Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications, McGraw-Hill

Jones D.A., Clarke D.B., 2008, Simulation of Flow Past a Sphere using the Fluent Code

# Simbologia

## Simboli

$f$	forza sperimentata da un singolo componente della DU
$k$	energia cinetica turbolenta
$x$	spostamento orizzontale di una DU
$r$	lunghezza dei cavi tra due DOM consecutive
$A$	area proiettata
$C$	coefficiente adimensionale
$D$	diametro cilindro/sfera
$F$	forza
$H$	altezza di un cilindro
$P$	pressione
$V$	velocità della corrente marina
$W$	volume di un componente di una DU
$\alpha$	angolo compreso tra un'unità e la verticale
$\varepsilon$	grado di dissipazione
$\vartheta$	angolo compreso tra la normale alla superficie del corpo e l'orizzontale
$\mu$	viscosità
$\rho$	densità
$\tau$	sforzi di taglio
$\nu$	sapore di un neutrino
$\omega$	grado di dissipazione specifica

## Apici e pedici

$a$	acqua
$i$	referito all' $i$ -esima unità
$j$	referito alla $j$ -esima unità
$w$	wall
$D$	drag (resistenza)
$L$	lift (portanza)

## Abbreviazioni e acronimi

ARCA	Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss
CAD	Computer-Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
DNS	Direct Numerical Simulation
DOM	Modulo Ottico Digitale
DU	Detection Unit
FDM	Finite Difference Method
FEM	Finite Element Method
KM3Net	Cubic Kilometre Neutrino Telescope
LES	Large Eddy Simulation
MC	Metodo Montecarlo
ORCA	Oscillation Research with Cosmics in the Abyss

PMT	Photomultiplier Tube
RANS	Reynolds-averaged Navier Stokes
SST	Shear Stress Transport
VEOC	Vertical Electro-Optical Cable