## Politecnico di Torino

# Corso di laurea magistrale in ingegneria energetica e nucleare

Innovazione nella produzione di energia

Tesi di laurea magistrale

## Progettazione di un laboratorio sperimentale per lo studio della dispersione di inquinanti in piattaforme oil&gas supportata da modellazione CFD



Relatori

Prof. Carpignano Andrea

Candidato

Tortora Andrea

Prof. Ganci Francesco

Anno accademico 2016-2017

## Indice

1.	Introduzione				
-	1.1.	Cos	'è l'off-shore	. 12	
1.1.1.			Sistemi di produzione off-shore	. 12	
1.1.2. S			Sistemi di produzione a struttura fissa	. 13	
	1.1.	3.	Sistemi di produzione a struttura galleggiante	. 16	
	1.1.	4.	La sicurezza	. 17	
-	1.2.	L'of	f-shore in Italia	. 18	
	1.2.	1.	Cenni storici	. 18	
	1.2.	2.	Caratteristiche installazioni off-shore italiane	. 19	
-	1.3.	Ana	lisi di rischio	. 22	
	1.3.	1.	Definizioni utili per l'analisi di rischio	. 23	
	1.3.	2.	Approcci all'analisi di rischio	. 25	
2.	Crit	icità (	della modellazione CFD	. 28	
2	2.1.	Mod	dello numerico	. 29	
2	2.2.	Mes	sh e Wall y+	. 31	
-	2.3.	Con	dizioni al contorno	. 35	
	2.3.	1.	Intensità della turbolenza	. 35	
	2.3.	2.	Scala di lunghezza della turbolenza	. 36	
3.	Pro	getta	zione del laboratorio	. 37	
	3.1.	ll ve	nto: descrizioni delle principali variabili d'interesse	. 37	
	3.1.	1.	Rappresentazione del vento	. 38	
	3.1.	2.	Interazione fluido-struttura	. 41	
	3.1.	3.	Caratteristiche del vento nel Mar Adriatico	. 43	
3.2. Descrizione caso studio		crizione caso studio	. 44		
	3.2.	1.	Geometria del laboratorio	. 44	
3.2.2.		2.	Teoria delle gallerie del vento	. 45	
3.2.3.		3.	Scalabilità del modello	. 47	
3.2.4.		4.	Modello piattaforma	. 49	
3.3. Giu		Gius	stificazione e scelta dei criteri utilizzati	. 54	
	3.3.1.		Criteri geometrici	. 55	
	3.3.	2.	Criteri tecnici	. 59	
	3.3.3.		Parametri CFD	. 63	
3.4. Des		Des	crizione delle simulazioni effettuate	. 63	

	3.4.1.	Storico delle simulazioni	69			
	3.4.2.	Soluzione ideale di riferimento	74			
	3.4.3.	Soluzione reale	85			
4.	Risultati .					
4	.1. Anal	lisi dei Contour				
4	.2. Anal	lisi dei profili di velocità	98			
5.	Conclusio	oni e sviluppi futuri	102			
Bibliografia10						
Rin	Ringraziamenti					
APPENDICE A						
APP	APPENDICE B					
APP	ENDICE C.		115			

## Indice delle Figure

Figura 1. Schema piattaforma fissa	. 14
Figura 2. Piattaforma Statfjord	. 14
Figura 3. Compilant tower	. 15
Figura 4. Piattaforma TLP	. 16
Figura 5. Confronto tra tipologia di piattaforme	. 17
Figura 6. Carta delle concessioni di coltivazione delle piattaforme marine in alto Mar Adriatio	0
	. 19
Figura 7. Carta delle concessioni di coltivazione delle piattaforme marine basso Mar Adriatic	o e
Sicilia	. 20
Figura 8. VEGA A	. 21
Figura 9. Classificazione del Rischio	. 23
Figura 10. Campo d'applicazione metodologie per la valutazione di rischio	. 25
Figura 11. albero degli eventi	. 27
Figura 12. Equilibrio tra teoria-sperimentazione-CFD	. 29
Figura 13. Confronto tra scala della turbolenza e modelli numerici	. 31
Figura 14. Mesh strutturata	. 32
Figura 15. Mesh non strutturata	. 32
Figura 16. Mesh ibrida	. 33
Figura 17. Suddivisione della near-wall region in funzione dello Wall v+	. 34
Figura 18. Circolazione del vento nell'emisfero	. 37
Figura 19. Profilo di velocità media del vento e atmosfera turbolenta	. 39
Figura 20. Spettro di Van der Hoven	. 40
Figura 21. Composizione della velocità del vento	. 41
Figura 22. Separazione del flusso in funzione della tipologia di superficie	. 42
Figura 23. Mappa velocità media del vento sulle coste italiane	. 43
Figura 24. in alto a sinistra Ravenna Punta Marina, in alto a destra Rimini Marecchia, in basso	0
Pineto	. 44
Figura 25. Pianta laboratorio prima e dopo l'abbattimento delle pareti divisorie	. 45
Figura 26. Galleria del vento	.45
Figura 27. Similitudine geometrica	. 48
Figura 28. Modello piattaforma sperimentale	.50
Figura 29. Deck 1 contenente il living quarter	.51
Figura 30. Deck 2 piano di trasformazione	.52
Figura 31. Deck 3 piano di estrazione	.53
Figura 32. Lastra piana	.54
Figura 33. Doppia lastra piana	54
Figura 34. Sezione frontale condotto con niattaforma	55
Figura 35. Condotto d'ingresso dell'aria	56
Figura 36. Parete divisoria necessaria alla realizzazione della camera di ristagno	57
Figura 37 Geometria del condotto convergente per l'immissione dell'aria	58
Figura 38. Donnia senarazione del volume totale del laboratorio	50
Figura 39 Rannesentazione modello ventilatore assiale Coral sin a	62
Figura 40 Caratteristiche tecniche e geometriche ventilatore	62
Figura 41 Geometria semplificata 2D validazione condizione di similitudine	62
ingente Har Scottering Schipfindete ZD vendezione condizione di Similitadine	. 05

Figura 42. Risultati simulazioni con dimensioni reali (Alto a sinistra: k-e, altro a destra	: k-w, in
basso: SA)	65
Figura 43. Confronto tra le due geometrie all'imbocco (in alto: REALE, in basso: SCALA	ATA) 66
Figura 44. Confronto tra le due geometrie al centro (in alto: REALE, in basso: SCALATA	4)67
Figura 45. Confronto tra le due geometrie allo sbocco (in alto: REALE, in basso: SCALA	TA) 68
Figura 46. Streamline simulazione 1*	69
Figura 47. Canale immissione aria Simulazione 2	70
Figura 48. Canale immissione aria Simulazione 6	70
Figura 49. Streamline Simulazione 3	71
Figura 50. Geometria Simulazione 7	71
Figura 51. Streamline Simulazione 9	72
Figura 52. Geometria Simulazione 10*	72
Figura 53. Particolare pareti divisore Simulazione 12	73
Figura 54. Geometria Simulazione 13	74
Figura 55. Geometria Simulazione "ideale"	74
Figura 56. Modello base simulazioni flusso fluido	75
Figura 57. Vista mesh lungo piano longitudinale del laboratorio (ideale)	75
Figura 58. Dettagli mesh di base Simulazione "Ideale"	76
Figura 59. Personalizzazione parametri di mesh	77
Figura 60. Elementi interessati dal Body Sizing (ideale)	77
Figura 61. Particolare contact region tra il flusso e la camera di ristagno	78
Figura 62. inflation layer canale immissione aria	78
Figura 63. Inflation layer Piattaforma	79
Figura 64. inflation Layer bocchette d'estrazione dell'aria	79
Figura 65. Andamento WallY+ lungo le pareti della piattaforma (Ideale)	80
Figura 66. Tool Setup e Solution di ANSYS Fluent	
Figura 67. Schermata Impostazioni base Fluent	82
Figura 68. Schermata impostazioni General.	
Figura 69. Schermata impostazione modello di turbolenza	
Figura 70. Superfici di inlet e outlet simulazione "ideale"	
Figura 71. Wall interni ed esterni simulazione Ideale	
Figura 72. Schermata impostazione schema di discretizzazione spaziale	
Figura 73. Andamento dei Residui simulazione ideale 7 m/s	
Figura 74. Geometria simulazione "reale"	
Figura 75. Vista mesh lungo piano longitudinale del laboratorio (reale)	
Figura 76. Elementi interessati dal Body Sizing (reale)	86
Figura 77. Inflatio Layer Ventilatori	87
Figura 78. Andamento WallY+ lungo le pareti della piattaforma (reale)	87
Figura 79. Superfici di inlet geometria reale	
Figura 80. Superfici di Wall geometria reale	
Figura 81. Andamento dei Residui simulazione reale 7 m/s	89
Figura 82. Foglio di lavoro ANSYS 18.2	90
Figura 83. Piani di costruzione per la visualizzazione dei Contour	91
Figura 84. Contour relativi al Piano 1, raffigurate rispettivamente le velocità di 5, 6 e	7 m/s 92
Figura 85. Contour relativi al Piano 2, raffigurate rispettivamente le velocità di 5, 6 e 7	7 m/s 93
Figura 86. Contour relativi al Piano 3, raffigurate rispettivamente le velocità di 5, 6 e 7	7 m/s 94

Figura 87. Cont	our relativi al Piano 4, raffigurate rispettivamente le velocità di 5, 6 e 7 m/s	95
Figura 88. Cont	our Piano 5 per velocità di input pari a 5 m/s	97
Figura 89. Line	e di costruzione per la visualizzazione dei profili di velocità	98
Figura 90. Prof	ilo delle velocità all'imbocco della piattaforma lungo la linea A	99
Figura 91. Profi	ilo delle velocità del deck 1 della piattaforma lungo la linea B	.00
Figura 92. Prof	ilo delle velocità del deck 2 della piattaforma lungo la linea C	.00
Figura 93. Prof	ilo delle velocità del deck 3 della piattaforma lungo la linea D	.01

## Indice delle Tabelle

Tabella 1. Caratteristiche dimensionali VEGA A	21
Tabella 2. Rischio di mortalità nelle operazioni Off-shore	22
Tabella 3. Confronto tempo computazionale	28
Tabella 4. Classificazione dei venti	38
Tabella 5. Categorie di terreno	39
Tabella 6. Dimensioni laboratorio	44
Tabella 7. Tipologie costruttive di galleria del vento subsonica	47
Tabella 8. Riepilogo azione di scala del modello di piattaforma	50
Tabella 9. Ostacoli deck 1	51
Tabella 10. Ostacoli deck 2	52
Tabella 11. Ostacoli deck 3	53
Tabella 12. Definizione dei nomi dei deck	53
Tabella 13. Range di Portate elaborabili dal ventilatore	61
Tabella 14. Range di portate elaborabili dal singolo ventilatore	61
Tabella 15. Condizioni al contorno per validazione modello di similitudine	64
Tabella 16. Dimensione reali (primo set di simulazioni)	64
Tabella 17. Dimensione scalate (secondo set di simulazioni)	65
Tabella 18. parametri di qualità mesh ideale	80
Tabella 19. Riepilogo Condizioni al contorno simulazione ideale	84
Tabella 20. parametri di qualità mesh reale	88
Tabella 21. Riepilogo Condizioni al contorno simulazione reale	89
Tabella 22. Disposizione nello spazio dei piani di costruzione	92
Tabella 23. Disposizione nello spazio delle linee di costruzione	98

## ABSTRACT

The ability to manage accidental events, that can lead to leaks of flammable and/or harmful, for both human health and environment, gases or liquids, is a very important skill. In particular, this is a crucial aspect in the off-shore oil and gas context, where the work is in close contact with such materials, and the consequences of an accident can be shattering both for the environment and the workers' safety. The final aim of this work is to use computational fluid-dynamics for the planning of a laboratory in which we want to recreate, as faithfully as possible, the fluid-dynamic conditions to which an off-shore oil platform is subject to.

Firstly, since we can consider the size and the position of the location identified as laboratory the planning constraint, we made many assumptions in order to optimize the intake and extraction of air from it, with the goal of obtaining an airflow as homogeneous as possible, that simulates the behaviour of wind in the open sea. The real difficulties regarded the planning conditions, because it was not possible to extract air and expel it axially to the direction of the flow that we wanted to create. In fact, the only wall in which openings could be made, allowed the entry and extraction of the air perpendicularly to the flow. These hypotheses have been validated through the use of the ANSYS Fluent software.

Finally, the ideal materials and components were chosen in order to transform the CFD simulations into reality. In particular, we chose an axial fan, capable of managing a high flow, and the plasterboard for the construction of an easily workable wall, necessary to trap the turbulence generated by the walls of the laboratory, and not to allow it to create interferences.

It is so possible to state that the CFD simulation, as planning support, is a considerably powerful instrument and can be valuable to prevent possible unwanted scenarios.

La capacità di gestire eventi accidentali, che possono portare a perdite di gas o liquidi infiammabili e / o dannosi, sia per la salute umana che per l'ambiente, è un'abilità molto importante. In particolare, questo è un aspetto cruciale nel contesto off-shore di petrolio e gas, dove si lavora a stretto contatto con tali materiali e le conseguenze di un incidente possono essere sconvolgenti sia per l'ambiente che per la sicurezza dei lavoratori. L'obiettivo finale di questo lavoro è quello di utilizzare la fluidodinamica computazionale per la progettazione di un laboratorio in cui si vuole ricreare, nel modo più fedele possibile, le condizioni fluidodinamiche a cui è soggetta una piattaforma petrolifera off-shore.

Inizialmente, poiché possiamo considerare le dimensioni e la posizione del luogo identificato come laboratorio un vincolo progettuale, sono state fatte numerose ipotesi per riuscire ad ottimizzare l'aspirazione e l'estrazione di aria da esso, con l'obiettivo di ottenere un flusso d'aria il più omogeneo possibile, che simuli il comportamento del vento in mare aperto. Non è possibile estrarre aria ed espellerla assialmente alla direzione del flusso che si vuole creare. Infatti, l'unica parete in cui possono essere realizzate delle aperture, permette l'entrata e l'estrazione dell'aria perpendicolarmente al flusso. Queste ipotesi sono state convalidate attraverso l'uso del software ANSYS Fluent.

Infine, sono stati scelti materiali e componenti ideali per trasformare le simulazioni CFD in realtà. In particolare, abbiamo scelto un ventilatore assiale, in grado di gestire un flusso elevato, e il cartongesso per la costruzione di un muro facilmente lavorabile, necessario per intrappolare la turbolenza generata dalle pareti del laboratorio, e per non consentirgli di creare interferenze.

È quindi possibile affermare che la simulazione CFD, come supporto alla pianificazione, è uno strumento considerevolmente potente e può essere prezioso per prevenire possibili scenari indesiderati.

### 1. Introduzione

Il contesto in cui si colloca la stesura della seguente tesi è l'ambito delle valutazioni di rischio, in particolare applicato alla sicurezza sulle piattaforme petrolifere off-shore. L'obiettivo di questo elaborato è la progettazione di un laboratorio per la simulazione di eventi incidentali in ambiente off-shore, al fine di studiare l'evoluzione di eventuali nubi di materiale potenzialmente nocivo, tossico o infiammabile che minerebbe la sicurezza, oltre che della struttura stessa, anche dell'ambiente e del personale che opera a bordo. L'ente per il quale ho avviato il seguente studio è il SEADOG (Safety & Enviromental Analysis Division for Oil & Gas), polo di ricerca del Politecnico di Torino, finanziato dal MISE (Ministero dello Sviluppo Economico), che opera nell'ambito della sicurezza, anche ambientale, degli impianti di ricerca e coltivazione degli idrocarburi in mare.

La necessità di simulare eventi incidentali in ambito off-shore nasce dall'evidente situazione di rischio a cui è assoggettata la struttura e che si ripercuote sugli operatori e sull'ambiente. L'elevata congestione degli spazi e la grande densità di fluidi potenzialmente nocivi, come gli idrocarburi, sono dei fattori che combinati tra loro aumentano esponenzialmente le conseguenze derivanti da eventi incidentali. È evidente che in fase progettuale avere conoscenze su quali siano le zone più pericolose in relazione ai possibili scenari critici, riduce drasticamente le conseguenze di tali eventi e permetterebbe un'ottimizzazione delle buone norme costruttive. Le simulazioni numeriche possono fornire non solo qualitativamente ma anche quantitativamente informazioni utili sulle conseguenze di un rilascio. La conoscenza di quanto materiale fuoriesce e come si sviluppa la nube in determinate condizione ambientali possono essere parametri fondamentali per avallare o scartare scelte costruttive e progettuali. Questo approccio innovativo, sviluppato parallelamente alla progettazione standard delle piattaforme, può incrementare notevolmente la sicurezza di tali strutture ed evitare di approssimare, sovrastimando o sottostimando, eventuali barriere o protezioni necessarie.

Su queste considerazioni è basata la necessità di realizzare il suddetto laboratorio sperimentale, in particolar modo il fine ultimo è quello di realizzare una struttura nella quale sia possibile simulare eventi incidentali in modo tale da validare un nuovo approccio di modellazione di rilasci supersonici messo a punto dai miei colleghi Carrozza Emanuela e Rupolo Carlo con i guali ho svolto uno studio parallelo. Tale approccio proposto è un ibrido, ovvero a metà strada tra un "full CFD" e uno semi-empirico. L'idea alla base del modello consiste nella sostituzione del dominio del getto supersonico con una "Source Box" che avrà come condizioni al contorno le variabili principali che influenzano l'espansione come: la pressione di rilascio, la presenza di ostacoli, la geometria e la dimensione della rottura. Anche se la definizione e la modellazione della Source Box non è parte della seguente tesi, è alla base del modello che dovrà essere validato. Una volta ottenuta la validazione del modello tramite confronto con le prove sperimentali, si potrà usare la fluidodinamica computazionale per ottenere, in tempi ragionevoli, dei dati quantitativi affidabili da utilizzare nelle analisi di rischio. L'obiettivo di ottenere prove sperimentali confrontabili con gli esiti delle simulazioni può essere raggiunto solo se l'ambiente di prova riproduce fedelmente le condizioni ambientali e fluidodinamiche nelle quali una piattaforma off-shore tipo lavora.

Dopo un'attenta analisi bibliografica sul panorama off-shore e sulle condizioni meteomarine del Mar Adriatico, sito scelto come riferimento considerando il posizionamento della

stragrande maggioranza delle installazioni italiane, sono state determinate le geometrie da utilizzare per schematizzare la piattaforma prova e definite le condizioni al contorno, ovvero le velocità del vento, da utilizzare per il dimensionamento del sistema di aereazione del laboratorio.

Altra costrizione progettuale è stata la dimensione e la conformazione del potenziale laboratorio scelto per essere allestito. Una volta acquisiti tutte i parametri di contorno necessari per contestualizzare le simulazioni, queste ultime sono state effettuate sfruttano la fluidodinamica computazionale (CFD). In particolar modo vi era la necessita di realizzare un flusso d'aria stazionario che investisse pienamente la piattaforma prova e che non venisse perturbato dalle possibili turbolenze derivanti dall'ambiente chiuso nel quale si lavora.

Particolare attenzione dunque è stata rivolta a:

- Sistema di estrazione dell'aria.
- Sistema di immissione dell'aria.
- Controllo della turbolenza all' interno del laboratorio.

Oltre alla collaborazione con il sopracitato polo di ricerca SEADOG, la realizzazione di tale elaborato è stato possibile anche grazie alla società RAMS&E S.R.L, la quale mi ha fornito supporto e mi ha permesso di affinare le competenze nell'ambito della valutazione del rischio e della comprensione dei principali eventi incidentali in ambiente off-shore.

Nel seguente capitolo verrà analizzato il settore dell'off-shore approfondendo il panorama italiano. Vengono fornite inoltre delle informazioni introduttive su cosa si intende per analisi di rischio e quali sono i parametri necessari per un suo corretto utilizzo.

#### 1.1. Cos'è l'off-shore

L'operazione di estrazione di idrocarburi dal sottosuolo è una pratica che ha origini nella seconda metà del 1800, comunemente ci si riferisce alla perforazione da parte del colonnello Edwin Drake del primo pozzo petrolifero ad Oil Creek, in Pennsylvania [1]. L'obiettivo era quello di rendere disponibili le riserve di combustibile che durante la formazione del nostro pianeta si sono immagazzinate nella crosta terrestre.

A quell'epoca il petrolio era utilizzato soprattutto per l'illuminazione, mentre dal 1900 ad oggi ha giocato un ruolo predominante come fonte energetica in particolar modo dall'avvento dei motori a combustione interna.

La ricerca degli idrocarburi inizialmente era focalizzata sulla terraferma, ma a causa della crescente domanda di combustibile dovuta all'aumento vertiginoso della richiesta energetica, la ricerca off-shore ha visto uno sviluppo esponenziale con obiettivi sempre più ardui da soddisfare.

Con il termine off-shore s'intende dunque l'estrazione degli idrocarburi contenuti nei fondali marini, infatti rispetto alla terraferma, il sottosuolo marino e soprattutto la zona denominata "acque profonde" (i fondali che superano i 1000 m di profondità), offre tutt'oggi aree ancora poco esplorate.

Ad oggi, circa il 30% della produzione totale di idrocarburi proviene da aree off-shore, dunque diventa sempre più indispensabile ottimizzare e studiare questa tecnologia per riuscire a soddisfare la continua crescita di domanda [2].

È possibile fare una prima distinzione fra strutture off-shore:

- Impianti di perforazione: sostanzialmente servono per la perforazione di pozzi esplorativi e sono dei natanti progettati e realizzati con l'unico obiettivo di realizzare un pozzo, nel caso in cui l'esplorazione faccia emergere la presenza di riserve tali da giustificare l'avvio dell'estrazione, occorrerà progettare ed installare le strutture permanenti di produzione.
- Strutture di produzione: sono capaci di contenere al loro interno gli impianti tecnologici e di sicurezza necessari alla corretta estrazione e trattamento degli idrocarburi. La dimensione può essere variabile e dipende dalla grandezza del giacimento e dalla distanza dalla costa<sup>1</sup>.

#### 1.1.1. Sistemi di produzione off-shore

Sono installazioni permanenti realizzati secondo architetture variabili, dipendenti dalla profondità dell'acqua alla quale è situato il giacimento selezionato. Fondamentalmente possono essere suddivisi in due macro-categorie, sistemi di produzione a struttura fissa (poggiati sul fondale marino), e sistemi di produzione a struttura galleggiante.

Entrambe le categorie condividono alcune strutture prioritarie:

• Elideck: Piattaforma per il decollo e l'atterraggio di elicotteri necessari sia per il trasporto del personale a bordo sia per eventuali emergenze. Essendo una struttura

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Si va da piccoli impianti che possono ospitare 10 persone fino a impianti molto più grandi sui quali lavorano fino a 200 persone, nel Mare Mediterraneo però impianti di tale taglia non sono presenti.

cruciale (causa la possibilità di incidenti dovuti agli elicotteri in movimento), spesso viene posizionata in modo da essere distaccata dal corpo principale dell'impianto e, così facendo, è minore la possibilità che in caso di incidente le nubi rilasciate o gli incendi possano colpire tale zona e dunque impedire l'evacuazione della piattaforma stessa.

- Battelli di evacuazione.
- Gru: necessarie per il carico o lo scarico a bordo delle merci o rifornimenti proveniente dai cargo.
- Gruppi elettrogeni.
- Alloggi per il personale.
- Torre di perforazione: sempre presente nelle piattaforme di perforazione, potrebbe invece non essere presente nelle piattaforme di produzione nel caso in cui i pozzi siano già stati realizzati precedentemente.
- Sistemi di sicurezza.

#### 1.1.2. Sistemi di produzione a struttura fissa

La caratteristica fondamentale che differenzia la tipologia di installazione è la profondità del fondale marino.

Fino ad una profondità di circa 400 metri di battente d'acqua, si possono utilizzare le "fixed platform". Sono sostanzialmente degli edifici di metallo ancorati sul fondo del mare, e grazie al loro fissaggio, sono in grado di resistere a qualsiasi condizione meteomarina si presenti. Generalmente sono costituite da una struttura metallica detta "jacket" fissata sul fondale tramite travature d'acciaio, sormontata da uno o più "deck" sui quali sono alloggiate tutte le apparecchiature per la produzione e la trasformazione degli idrocarburi estratti.

Solitamente le piattaforme fisse non sono dotate di stoccaggio, e dunque gli idrocarburi prodotti devono essere trasportati al suolo; nel caso di idrocarburi gassosi si utilizzando dei condotti per inviare il gas estratto alla terraferma, se gli idrocarburi sono liquidi (petrolio e derivati) vengono stoccati su navi FSO o FPSO, nel primo caso se sulla nave è presente solo lo stoccaggio, nel secondo sé è presente anche l'equipaggiamento per il trattamento del petrolio.

Un esempio esplicativo è visibile in Figura 1.



Figura 1. Schema piattaforma fissa

Per profondità comprese tra i 300 e i 350 metri si possono utilizzare anche piattaforme a gravità [2]. Queste strutture sfruttano la loro enorme mole per rimanere stabili sul fondale marino, sono state impiegate prevalentemente per i grandi giacimenti del Mare del Nord, la più famosa è la piattaforma di Statfjord<sup>2</sup> [3], è possibile vederne uno schema in Figura 2.



Figura 2. Piattaforma Statfjord

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Situata in Norvegia e messa in funzione nel 1979

Per profondità comprese tra i 300 e i 900 metri vengono utilizzate prevalentemente le cosiddette "compilant tower".

Queste strutture sono ancorate al fondale marino tramite una struttura tubolare e sono dotate di complessi sistemi di stabilizzazione per contrastare le forze generate su di esse dal moto ondoso. Uno schema rappresentativo è visibile in Figura 3.



Figura 3. Compilant tower

Per profondità superiori che vanno fino ai 1500 metri si possono utilizzare strutture ibride chiamate TLP (Tension Leg Platform).

Sono costituite da una struttura galleggiante messa in tensione tramite cavi d'acciaio e cassoni di zavorra posti sul fondale marino. La tensione è necessaria per permettere alla struttura di non cedere sotto le pressioni delle correnti marine e del moto ondoso. Uno schema è visibile in Figura 4.



Figura 4. Piattaforma TLP

#### 1.1.3. Sistemi di produzione a struttura galleggiante

Un'altra tipologia di piattaforma è quella a struttura galleggiante, necessaria se si vogliono raggiungere dei giacimenti su fondali che superano i 1000 metri di profondità fino ad un massimo di circa 3000 metri.

I sistemi di produzione a struttura galleggiante sono sostanzialmente tre:

- SPAR: sono tra i più grandi ad oggi in esercizio, costituiti da un cilindro galleggiante al cui interno è sito lo stoccaggio degli idrocarburi prodotti. Sopra questa struttura sono presenti tutte le apparecchiature necessarie per l'estrazione ed il trattamento, una vera e proprio piattaforma.
- FPS (Floating production system): sono sostanzialmente simili ad un impianto di perforazione o a una nave di perforazione ma viene mantenuta in posizione tramite catene ancorate sul fondale. Solitamente le teste pozzo associate a tale struttura sono di tipo "a completamento sottomarino", cioè collocate sul fondale marino.
- FPSO (Floating Production Storage and Off-loading System): sono navi con un'immensa capacità di immagazzinamento e dunque stoccaggio, vengono ancorate ad una boa e collegate alle teste pozzo anche in questo caso a completamento sottomarino.



Figura 5. Confronto tra tipologia di piattaforme

In Figura 5 vengono riassunte le principali categorie di piattaforma e si evidenza come la loro struttura sia molto variabile e dipenda in maniera vincolante dalla profondità alla quale si vuole effettuare l'estrazione.

Ai fini della seguente tesi la tipologia di piattaforma presa in esame sarà "fixed platform" essendo lo studio incentrato sul panorama italiano e dunque nel Mar Mediterraneo, caratterizzato generalmente da un fondale basso con una profondità media di circa 250 metri [4].

#### 1.1.4. La sicurezza

Nel contesto off-shore, venire a contatto con gas detti pericolosi (infiammabili e/o tossici) è la normalità poiché sono sempre presenti sulla piattaforma e dunque un loro rilascio accidentale contribuisce in maniera preponderante sull'analisi di rischio. Uno dei punti fondamentali per la sicurezza a bordo delle piattaforme è l'adozione di opportuni sistemi di rilevamento e monitoraggio gas infiammabili e tossici.

L'ambiente off-shore è caratterizzato da un ambiente ampiamente congestionato dove aree aperte e chiuse si alternano dando luogo ad una geometria tale per cui in seguito ad un rilascio di gas pericoloso vi è la possibilità di avere zone sature con l'insorgenza di sacche. Tale varietà di condizioni operative ed ambientali possono influenzare negativamente la capacità di tali sistemi di rilevare efficacemente la minaccia e quindi dar luogo ad incidenti.

Le principali specie chimiche gassose che possono essere contenute e dunque rilasciate a bordo di una piattaforma sono sostanzialmente quattro soprattutto se si fa riferimento a piattaforme d'estrazione di gas naturale [5].

- Idrocarburi (CH<sub>4</sub>): è una tipologia di rilascio di gas infiammabili che può verificarsi in seguito a rotture di serbatoi o di pipeline sia a pressione atmosferica che ad elevata pressione.
- Solfuro di idrogeno (*H*<sub>2</sub>*S*): è un gas che è naturalmente contenuto nei gas naturali dei pozzi. È causa di un rilascio estremamente tossico.
- Monossido di Carbonio (*CO*): è originato dai processi di combustione per generare elettricità e dalla combustione del gas in eccesso.
- Biossido di Carbonio (CO<sub>2</sub>): ha la stessa origine del Monossido di Carbonio. È potenzialmente pericoloso solo in concentrazione relativamente alte e in spazi ristretti.

Oltre ai sistemi di rilevamento di rilasci gassosi i sistemi di produzione off-shore sono caratterizzati da complessi sistemi di sicurezza che ne aumentano significativamente la difficolta realizzativa [6].

- Sistemi di generazione di emergenza.
- Sistema UPS (Uninterruptible Power Supply): Sistema che alimenta le apparecchiature vitali dell'intero sistema di produzione, entra in funzione in caso di avaria dei sistemi primari e secondari.
- PSD (Production Shut Down): se la situazione di pericolo coinvolge un sensore, la piattaforma entra in blocco cessando la produzione e chiudendo l'arrivo degli idrocarburi dai pozzi e cessando l'invio degli stessi a terra.
- ESD (Emergency Shut Down): se il pericolo coinvolge due o più sensore oltre al blocco della produzione si attivano le BDV (Blow Down Valve) e la piattaforma si depressurizza liberando in atmosfera.
- Sistema di protezione antincendio attivo e passivo.

#### 1.2. L'off-shore in Italia

Oggi circa il 90% del greggio e più del 60% del gas naturale prodotti nell'Unione Europea e in Norvegia provengono da piattaforme off-shore, con un parco installazioni che conta più di 1000 impianti marini. Nonostante la produzione sia concentrata nei mari del Nord, anche altri stati membri mostrano un sempre più crescente interesse, uno di questi è l'Italia [2].

Il nostro paese pur non rientrando tra i grandi produttori è stato sempre in prima linea nello sviluppo delle tecnologie per la corsa all'estrazione degli idrocarburi dal sottosuolo prima sulla terraferma e poi anche nel contesto off-shore. Il risultato oggi è il poter disporre di un notevole patrimonio energetico che consta di oltre 450 giacimenti finora rinvenuti (considerando sia quelli in terra che quelli in mare) [7].

#### 1.2.1. Cenni storici

La storia dell'esplorazione petrolifera italiana ebbe origine nella seconda metà del diciannovesimo secolo con qualche iniziativa isolata nell'Appennino Emiliano. Nei primi anni del 1900 la società SPI (Società Petrolifera Italiana), temporaneamente associata alla ESSO si rese promotrice dello sviluppo petrolifero italiano. Nel 1926 lo Stato decise di entrare a far parte dello sviluppo petrolifero italiano e costituì l'Agip la quale avviò numerose campagne di ricerca sul suolo italiano e non solo. Il vero passo avanti fu fatto durante la seconda metà del ventesimo secolo con l'apertura delle esplorazioni in mare, e l'Italia anche in questo settore fu subito una pioniera. Il primo pozzo off-shore Europeo fu eseguito a largo delle coste siciliane, con lo scopo di controllare l'estensione in mare del giacimento di Gela (1959) in seguito seguiranno le installazioni di "Perla" e "Vega".

Si susseguirono nel corso del tempo numerose installazioni soprattutto con la ricerca e le perforazioni esplorative portate avanti nel Mar Adriatico che ad oggi è il bacino che contiene il maggior numero di piattaforme attive.

Nei primi anni del 1990 fu eseguito sempre dall'Agip il primo pozzo in acque profonde (oltre 800 metri di profondità), il quale scoprì il giacimento a olio di Aquila, a largo delle coste pugliesi. Alla fine del ventesimo secolo, la produzione nazionale di olio e gas raggiunse i 20 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio, dato che è secondo solamente ai risultati raggiunti da Olanda e Regno Unito.

#### 1.2.2. Caratteristiche installazioni off-shore italiane

Come precedentemente affermato il bacino maggiormente sfruttato per l'estrazione di idrocarburi sul suolo italiano è il Mar Adriatico. Come si evince dai rapporti del MISE [8], ad oggi sono operative 120 piattaforme di produzione e 10 piattaforme di supporto, mentre sono 9 le piattaforme non più operative, per un totale di 139 installazioni. Circa il 90% delle piattaforme è situato nell'alto Mar Adriatico e sono adibite quasi per la totalità all'estrazione di gas naturale; il rimanente 10% è installato lungo le coste pugliesi o siciliane e hanno la prerogativa di essere impianti di estrazioni di olio.



Figura 6. Carta delle concessioni di coltivazione delle piattaforme marine in alto Mar Adriatico



Figura 7. Carta delle concessioni di coltivazione delle piattaforme marine basso Mar Adriatico e Sicilia

Una prima grande distinzione va effettuata riguardo la distanza dalla costa. Come si vede dalle Figura 6 e Figura 7, 95 installazioni rientrano entro il limite delle 12 miglia. Tale limite è d'interesse poiché il 9 agosto 2013 è stato emanato un Decreto Ministeriale che ha ridefinito le aree marine di competenza italiana in cui è consentito svolgere attività di prospezione e ricerca di idrocarburi off-shore, vietando ogni nuova iniziativa entro le 12 miglia dalla costa [9].

Tutte le piattaforme sono della tipologia fissa e dunque sono ancorate al fondale marino, la maggior parte tramite una travatura reticolare a 8 o a 4 gambe, ma è utilizzata anche la soluzione mono-tubolare. Sono solamente 3 le strutture galleggianti di supporto per lo stoccaggio FSO e FPSO, le quali servono le piattaforme più a largo ovvero: ROSPO MARE A, ROSPO MARE B, ROSPO MARE C, AQUILA 2, AQUILA 3 e VEGA A.

Tale coerenza nella struttura delle piattaforme è dovuta sia alla bassa profondità media del Mar Adriatico che al numero ridotto di operatori ai quali sono affidate le concessioni per la coltivazione: ENI, che detiene la maggioranza delle concessioni, ed EDISON. Di conseguenza ogni operatore in fase di progettazione e di realizzazione si attiene a degli standard propri.

A titolo di curiosità la piattaforma più grande installata è la piattaforma VEGA A (Figura 8) di seguito le sue caratteristiche dimensionali.

ALTEZZA SLM	69 m	
PROFONDITA' FONDALE	124 m	
DIMENSIONI	80 x 60 m	
NUMERO POZZI ALLACCIATI	20	

Tabella 1. Caratteristiche dimensionali VEGA A



Figura 8. VEGA A

#### 1.3. Analisi di rischio

A partire dal 1960 la necessità di far conciliare la crescita esponenziale del settore industriale con la conservazione del patrimonio naturale e ambientale nonché con le aree urbane sempre più popolate ha dato origine ad un nuovo campo di scienza applicata ovvero lo studio del rischio. Il tessuto industriale genera necessariamente delle ripercussioni socio-economiche non trascurabili che possono essere positive, come per esempio dal punto di vista economico, ma anche negative considerando l'inquinamento ambientale, acustico e visivo. La valutazione di rischio tecnologico si pone come obiettivo quello di identificare e quantificare tutte quelle possibili cause di rischio che hanno come origine un malfunzionamento o un comportamento inaspettato di un sistema o una struttura, in particolar modo ponendo l'attenzione su impianti di storage, trasporto, e rilasci non desiderati e incontrollati di energia come per esempio esplosioni o incendi. Il rischio tecnologico può dipendere oltre che dal componente stesso, anche da fattori umani, avaria dei software di controllo o eventi esterni.

La valutazione di rischio consiste in [10]:

- Individuare tutte le possibili cause di malfunzionamento del sistema.
- Identificare le loro conseguenze.
- Valutare il loro impatto sull'area dove è situato il sistema.
- Valutare il danno causato a persone, apparecchiature, ambiente, e reputazione della compagnia.
- Stimare il rischio associato e definire la sua tollerabilità.
- Implementare misure preventive o di mitigazione al fine di ridurre il rischio.

L'analisi di rischio è uno strumento che può essere applicato in maniera trasversale su molteplici campi. Nel campo dell'ingegneria altri punti vengono valutati, come la valutazione della sicurezza e la salute dei lavoratori, la sicurezza in prossimità di installazioni pericolose di grande entità.

Un esempio concreto è riportato nella Tabella 2 dove vengono mostrati i dati relativi al rischio di mortalità in relazione ad operazioni effettuate su piattaforme off-shore [11].

Area/Country	Fixed Installation only	Mobile drilling units only	All off-shore activities
North Sea	0.53/10000	6.50/10000	9.9/10000
Norway	Fatalities/year	Fatalities/year	Fatalities/year
North Soo UK			8.75/10000
North Sea OK			Fatalities/year
US Golfo of		6.4/10000	
Messico		Fatalities/year	
Worldwide		12.4/10000	
operations		Fatalities/year	

Tabella 2. Rischio di mortalità nelle operazioni Off-shore

#### 1.3.1. Definizioni utili per l'analisi di rischio

Per entrare nel merito delle analisi di rischio è necessario prima fornire alcune definizioni [10]:

- <u>Sicurezza</u>: situazione caratterizzata dall'assenza di danno, è un parametro irrealistico e immisurabile, a livello tecnico è usato il concetto di distanza dalla condizione di sicurezza in un determinato contesto.
- <u>Evento iniziatore</u>: un evento capace di rendere un pericolo potenziale concreto e dare inizio all'incidente; può avere origine tecnica, può essere un errore umano o un evento esterno.
- <u>Conseguenze</u>: è l'effetto di un particolare incidente. Nell'analisi di rischio può essere valutata tramite simulazioni del fenomeno incidentale.
- <u>Danno</u>: riguarda l'ultimo impatto dell'incidente sulla popolazione, sull'ambiente, sulle strutture o equipaggiamenti e sulla reputazione della compagnia. Può essere calcolato come numero di morti, numero di feriti, perdite economiche.
- <u>Probabilità</u>: è la misura che un determinato evento può accadere durante uno specifico periodo. Ha le stesse unità di misura della frequenza ma fisicamente non ha lo stesso significato.
- <u>Rischio</u>: è la combinazione tra la probabilità di una circostanza di recare un danno e il danno stesso. La valutazione non è deterministica ma probabilistica, dunque a volte può non essere accurata.



Figura 9. Classificazione del Rischio

Dunque ,come spiegato precedentemente e come si vede in Figura 9, il rischio è funzione di probabilità e danno e può essere classificato da rischio convenzionale (elevata frequenza e danno trascurabile) a rischio principale (elevato danno e frequenza trascurabile).

L'analisi di rischio suddivide lo stesso in quattro grandi categorie:

- Rischio per gli individui.
- Rischio per l'ambiente.
- Rischio per gli equipaggiamenti o le strutture.
- Rischio per la reputazione.

Da un semplice punto di vista matematico dunque il rischio può essere valutato come una funzione dipendente da una probabilità P di un evento e il danno D relativo all'evento stesso [10].

$$R = f(scenario, P, D)$$

In particolare:

$$R\left[\frac{danno}{anno}\right] = P\left[\frac{eventi}{anno}\right] * D\left[\frac{danno}{evento}\right]$$

Le unità di misura del rischio come precedentemente accennato possono essere diverse e dipendono da come è valutato il danno. Nel caso di più scenari il rischio totale è espresso come sommatoria di tutti i possibili eventi incidentali [12]:

$$R_{tot} = \sum_{i=1}^{n} R_i = \sum_{i=1}^{n} P_i * D_i$$

Dove n è il numero di sequenze incidentali e  $P_i$  è la probabilità associata all'i-esimo evento che causerà il danno  $D_i$ . Questa interpretazione porta alla comprensione del perché la possibilità che il rischio sia nullo non è realmente accettabile, tutte le attività umane sono correlate ad una probabilità di un evento incidentale inaspettato che a sua volta genererà delle conseguenze.

Un'altra considerazione necessaria è che la valutazione del rischio non può essere completamente estrapolata dal contesto sociale in cui viene effettuata, ma ansi è fortemente influenzata da esso. In altre parole è necessario tenere in considerazione la percezione del rischio che gli individui hanno in relazione a potenziali eventi incidentali. La definizione matematica precedentemente fornita pesa la probabilità e il danno correlato in maniera paritaria, conseguentemente eventi con elevata frequenza e danni trascurabili ed eventi con bassa frequenza e danni ingenti posso avere lo stesso rischio. Solitamente questa uguaglianza non è accettata dalla percezione pubblica che tende ad associare un rischio maggiore ad eventi le cui conseguenze provocano danni maggiori. Per questa ragione per rendere la valutazione del rischio più accettabile da un punto di vista della percezione collettiva si tende a modificare la precedente equazione come segue:

$$R = P * D^k$$

Dove k > 1 è un parametro definito a livello normativo e varia di stato in stato<sup>3</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> In olanda k assume un valore pari a 2, mentre nella maggior parte dei paesi è comunemente accettata la formula con k=1.

#### 1.3.2. Approcci all'analisi di rischio

La metodologia applicata per eseguire un'analisi di rischio deve essere efficiente e sufficientemente dettagliata in funzione dell'ordine di grandezza del rischio oggetto dell'analisi. Il rigore con cui viene portato avanti lo studio deve essere proporzionato alla complessità del problema e all'entità degli eventi incidentali possibili. I principali steps attraverso i quali una corretta valutazione deve essere eseguita sono i seguenti [13]:

- Qualitative (Q): nella quale i parametri di danno e probabilità vengono determinati con procedure puramente qualitative.
- Semi-Quantitativa (SQ): nella quale i parametri di danno e probabilità vengono approssimati, quantificandoli all'interno di un range di validità.
- Quantified Risk Assessment (QRA): nella quale tutti i parametri vengono quantificati e dunque calcolati.

La scelta dell'approccio riflette il grado di dettaglio che si vuole raggiungere e dovrebbe tenere in considerazione: la stima del livello di rischio, la sua vicinanza al livello di tollerabilità e la complessità del problema, tendendo presente la difficoltà nel rispondere in maniera efficace alle possibili criticità nel ridurre i livelli di rischio.



#### complexity

Figura 10. Campo d'applicazione metodologie per la valutazione di rischio

Come evidente dalla descrizione e come rappresentato nella Figura 10 il campo d'applicazione si muove da sistemi poco complessi e con livelli di rischio bassi che possono essere affrontati tramite un'analisi qualitativa verso sistemi complessi e con elevati livello di rischio stimati i quali richiedono un'analisi QRA. È proprio quest'ultima metodologia quella interessata dal seguente studio poiché è fondamentale la necessità di stimare quantitativamente le conseguenze relative ad un incidente grave. Per questo motivo verrà tralasciato l'approfondimento riguardante i metodi qualitativi, mentre si entrerà nel merito di quelli quantitativi.

#### a) Approccio quantitativo

Come precedentemente spiegato nel paragrafo 1.3.2 l'analisi quantitativa o QRA è utilizzata per eventi che hanno come conseguenza ingenti danni, chiamati "incidenti gravi". Secondo la direttiva 2013/30UE del parlamento europeo e del consiglio del 12 Giugno 2013 [14] (norma ad oggi vigente che si propone di stabilire i requisiti minimi per la prevenzione di incidenti gravi durante le operazioni off-shore oil&gas e limitare le conseguenze dei suddetti eventi), fornisce la definizione di incidente grave come segue:

"1) «incidente grave»: in relazione a un impianto o a infrastrutture connesse:

a) un incidente che comporta un'esplosione, un incendio, la perdita di controllo di un pozzo o la fuoriuscita di idrocarburi o di sostanze pericolose che comportano, o hanno un forte potenziale per provocare decessi o lesioni personali gravi;

b) un incidente che reca all'impianto o alle infrastrutture connesse un danno grave che comporta, o ha un forte potenziale per provocare, incidenti mortali o lesioni personali gravi;

c) qualsiasi altro incidente che provoca la morte o lesioni gravi a cinque o più persone che si trovano sull'impianto in mare in cui ha origine il pericolo o sono impegnate in un'operazione sull'impianto in mare nel settore degli idrocarburi o sulle infrastrutture connesse o in collegamento con tale impianto e tali infrastrutture;

d) qualsiasi incidente ambientale grave risultante dagli incidenti di cui alle lettere a), b) e c).

Al fine di stabilire se un incidente costituisce un incidente grave a norma delle lettere a), b) o d), un impianto che è di norma non presidiato è considerato come se fosse presidiato;"

Normalmente partendo da una precedente analisi qualitativa, gli incidenti critici vengono raggruppati e per ognuno di essi viene definito un evento iniziatore. Per ogni evento iniziatore dunque vengono identificati i conseguenti scenari incidentali e calcolate (solitamente tramite l'utilizzo di un albero degli eventi e di un albero dei fallimenti) la frequenza (la probabilità) e il danno. La Figura 11 mostra un esempio di albero degli eventi riguardante la rottura di una tubazione [10].



Figura 11. albero degli eventi

Ad ogni sequenza visibile al termine dell'albero verrà associata una probabilità proveniente da un'analisi probabilistica e un danno proveniente da simulazione dell'evento tramite software CFD o modelli parametrici.

## 2. Criticità della modellazione CFD

Il seguente capitolo tratta del significato di fluidodinamica computazionale dandone una visione d'insieme e sottolineando i punti critici che devono essere risolti al fine di effettuare delle simulazioni coerenti, senza entrare nel merito della definizione matematica dei modelli numerici necessari ad approssimare le equazioni di Navier-Stokes.

La fluidodinamica computazionale, in maniera abbreviata CFD (Computational fluid dynamics), rappresenta una vasta area di analisi numerica che investiga il comportamento dei fluidi e i fenomeni che li governano. Le leggi fondamentali della meccanica dei fluidi quali la conservazione della massa, la conservazione dell'energia e la conservazione della quantità di moto, formano, combinate tra di loro, un sistema di equazioni differenziali non lineari alle differenze finite (equazioni di Navier-Stokes); tale sistema per numerosi problemi ingegneristici non è ancora risolvibile con un approccio analitico. La CFD ha dunque il ruolo di modellare i suddetti fenomeni non risolvendo direttamente le equazioni, ma attraverso un approccio approssimato di analisi numerica. Lo sviluppo di questa metodologia è evidentemente collegato allo sviluppo di processori di calcolo sempre più potenti, capaci di ridurre drasticamente il tempo computazionale, parametro critico per qualsiasi simulazione CFD, pur essendo nettamente inferiore al tempo necessario per risolvere analiticamente le equazioni di Navier-Stokes. Da uno studio effettuato è stato calcolato che il tempo di computazione di un modello LES (modello numerico più complesso per la CFD) è circa il 10% rispetto a quello necessario per la risoluzione analitica [15].

ReL	Re⊤	CPU[h] <sub>DNS</sub>	CPU[h]LES
12300	360	28	2.5
30800	800	42	3.15
61600	1450	56	3.73
230000	4650	101	4.87

<b>T</b> I II	2	c c .		
Tabella	3.	Confronto	tempo	computazionale

Come si evince dalla Tabella 3, a parità di fisica e dunque di numero di Reynolds<sup>4</sup>, sfruttare la CFD rende la soluzione del problema fruibile in un tempo accettabile. È dunque evidente come in fase di progettazione la fluidodinamica computazionale sia uno strumento potente e necessario se si vuole ottenere una simulazione qualitativa e/o quantitativa delle principali variabili di interesse, come nel caso del laboratorio sperimentale sarà il profilo di velocità del flusso d'aria generato.

Risolvere dunque un problema affidandosi alla fluidodinamica computazionale significa effettuare un certo numero di approssimazioni in modo tale da modellare un fenomeno molto complesso sfruttando il modello più semplice possibile, ovvero introdurre la minima quantità di complessità necessaria per catturare l'essenza della fisica di fondo.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Per la definizione analitica del numero di Reynold rimando al paragrafo 2.1.



Figura 12. Equilibrio tra teoria-sperimentazione-CFD

I principali step per affrontare un problema tramite simulazione CFD sono essenzialmente quattro:

- Geometria e creazione della Mesh.
- Impostazione delle condizioni al contorno e del modello numerico.
- Risoluzione delle equazioni.
- Analisi dei risultati.

Ogni step precedentemente elencato porta con sé determinate criticità che possono minare la corretta esecuzione della simulazione, portando a risultati non accettabili. La corretta modellazione CFD, dunque, deve tenere conto di molteplici fattori che sono in forte correlazione, per tale motivo è un campo ancora oggi molto studiato e nel quale l'esperienza dell'operatore che esegue la simulazione può essere determinante per l'esito della stessa.

#### 2.1. Modello numerico

Generalmente in fluidodinamica quando ci si riferisce al flusso di un fluido esso può essere di due tipologie: laminare o turbolento. Per flusso laminare si intende un moto in cui le particelle scorrono le une sulle altre senza alcun tipo di mescolamento, tale fenomeno è governato dalle forze viscose mentre le forze di inerzia sono trascurabili ed è stazionario. Nel caso in cui invece le forze d'inerzia riescano a sovrastare quelle viscose, si ha il passaggio da flusso laminare a flusso turbolento, l'aumento della velocità e le fluttuazioni delle pressioni rendono il moto tridimensionale e non stazionario. Il parametro che determina che tipologia di moto è presente all'interno di un flusso è il numero di Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Dove:

 $\rho$ : densità del fluido  $[kg/m^3]$ .

v: velocità del fluido [m/s].

D: lunghezza caratteristica del fenomeno considerato [m].

 $\mu$ : viscosità dinamica [kg/(m \* s)].

Fisicamente il numero di Reynolds rappresenta il rapporto tra le forze di inerzia e le forze viscose, dunque per numeri di Reynold elevati si hanno flussi turbolenti, mentre per numeri di Reynold bassi si hanno flussi laminari. Nel caso di un flusso che impatta contro un ostacolo possiamo considerare il valore del numero di Reynold corrispondente alla transizione da flusso laminare a turbolento pari a:  $Re = 2 * 10^5$  [16].

Entrando nell'ambito della fluidodinamica computazionale, modellare un flusso laminare è piuttosto agevole essendo un problema stazionario e bidimensionale. È chiaro dunque che le difficoltà maggiori derivano dall'introduzione della turbolenza che trasforma il problema in tridimensionale e non stazionario. Nella realtà qualsiasi fluido di interesse pratico ingegneristico ha un comportamento turbolento, l'interazione tra l'aria ed un aeroplano, l'avanzamento di un'automobile o di una nave sono tutti esempi di interazioni che generano turbolenze [17]. Hinze nel 1975 offrì la seguente definizione di turbolenza:

"la turbolenza è un movimento irregolare che in generale fa la sua apparizione in fluidi, gassosi o liquidi, quando fluiscono oltre una superficie solida o anche quando flussi vicini dello stesso fluido fluiscono l'uno sull'altro."

Per completare la definizione Bradshaw nel 1974 aggiunse:

"La turbolenza ha un ampio range di scale."

Modellare in maniera semplice ed universale la turbolenza è l'obiettivo ultimo della CFD, momentaneamente però esistono differenti modelli di turbolenza e si differiscono per come approssimano un determinato tipo di flusso e soprattutto per il grado di dettaglio che si vuole osservare. In particolare possiamo distinguere tre grandi famiglie di metodi numerici [18]:

- RANS turbolence models (Reynolds Average Navier-Stokes): offre l'approccio più economico per calcolare flussi turbolenti complessi, i tipici modelli che appartengono a questa categoria sono il "K-ε", il "K-ω" e lo "Spalart-Allmaras". Sono costruiti decomponendo temporalmente le equazioni di Navier-Stokes fino alla definizione di un parametro detto "Reynolds stress tensor". Tali modelli permettono una buona approssimazione del fenomeno anche se non riescono a cogliere tutte le caratteristiche dello stesso.
- LES turbolence models (Large Eddy Simulation): Si basa sull'approccio della risoluzione di grandi strutture turbolente nello spazio e nel tempo fino al limite della griglia in ogni punto del flusso. Tuttavia, sebbene ampiamente utilizzato nella comunità accademica, i modelli LES hanno avuto un impatto molto limitato sulle simulazioni industriali. Il motivo risiede nei requisiti di risoluzione eccessivamente elevati per gli strati limite. Vicino alla parete, le scale più grandi nello spettro turbolento sono tuttavia geometricamente molto piccole e richiedono una griglia di ricerca e un passo temporale ridotto, con un aumento esponenziale del tempo computazionale.

• **DES turbolence models (Detached Eddy Simulation):** É un approccio ibrido che ha come obiettivo quello di mettere insieme gli aspetti positivi dei modelli RANS e dei modelli LES.



Figura 13. Confronto tra scala della turbolenza e modelli numerici

La Figura 13 [15] rappresenta visivamente le differenze fra i modelli LES e RANS in relazione ad un approccio diretto DNS. Come è evidente il DNS risolve analiticamente tutte le equazioni a qualsiasi livello di scala della turbolenza, in tale modo si ottiene un risultato certo a discapito di un tempo computazionale enorme. I modelli LES risolvono analiticamente le scale più grandi di turbolenza e modellizzano solo la parte dissipativa, ovvero le scale più piccole, in questo modo si introduce un'approssimazione ma il risultato è fedele a quello ottenuto in un DNS, con un tempo computazionale nettamente inferiore. Infine i modelli RANS modellano tutto lo sviluppo della turbolenza fatta eccezione delle scale più grandi, l'approssimazione introdotta è elevata e si perdono delle informazioni, sono però i più performanti dal punto di vista computazionale.

#### 2.2. Mesh e Wall y+

Il secondo punto critico per una corretta simulazione CFD è la definizione della mesh. Per mesh si intende l'insieme di vertici, spigoli e facce che definiscono la forma di un oggetto tridimensionale. Sostanzialmente è la griglia che suddivide il volume di calcolo in elementi infinitesimi dove, in funzione del modello e dello schema risolutivo utilizzato, il software risolverà le equazioni che governano il fenomeno. È possibile distinguere tre categorie di mesh:

• **Strutturata:** I nodi della griglia vengono generati dall'intersezione di due famiglie di linee appartenenti a determinati sistemi di coordinate cartesiane o curvilinee. In griglie di questo tipo è facile procedere a una numerazione razionale dei nodi.



Figura 14. Mesh strutturata

• Non-Strutturata: Nelle mesh non strutturate non è facile procedere a una numerazione razionale dei nodi ma si procede alla numerazione seguendo un ordine prestabilito. Nonostante la necessità di memorizzare i nodi, queste mesh consentono di riprodurre geometrie complesse e sono molto flessibili. Per questa ragione sono attualmente le mesh più utilizzate.



Figura 15. Mesh non strutturata

• **Ibrida:** se composta da elementi finiti di tipo differente (triangolari e quadrangolari ad esempio). Generalmente le mesh strutturate non sono ibride mentre le non-strutturate possono esserlo.



Figura 16. Mesh ibrida

La definizione corretta della tipologia di mesh da utilizzare e del modello numerico risolutivo non sono affatto indipendenti, ogni modello rappresentato dalle famiglie descritte nel paragrafo 2.1 è ideato per essere prestazionale con un determinato grado di finitura di griglia. Questa dipendenza viene accentuata soprattutto nelle zone del dominio chiamate near-wall regions. Tali zone sono di particolare interesse, poiché la vicinanza con le pareti influenza il comportamento turbolento del flusso, infatti, a stretto contatto con i "muri", la viscosità riduce le fluttuazioni della velocità tangenziale rendendo il flusso laminare. Allontanandosi in direzione perpendicolare dalle pareti, si raggiunge rapidamente la turbolenza grazie alla produzione di energia cinetica dovuta all'elevato gradiente di velocità.

Un parametro fondamentale per comprendere la corretta definizione della mesh e la corretta selezione del modello numerico ottimale è chiamato Wall y+:

$$y^+ = \frac{u_{\tau_{air}} * y}{v_{air}}$$

Dove:

 $u_{\tau_{gir}}$ : Velocità d'attrito [m/s].

y : Distanza verticale lungo la normale alla direzione delle pareti della prima cella della griglia [m].

 $v_{air}$  : Viscosità cinematica dell'aria  $[m^2/s]$ .

Il Wall y+ è un numero adimensionale simile al Reynolds che determina se le influenze dovute alle celle adiacenti alle pareti sono di tipo laminare o turbolento e dunque indica la parte dello strato limite<sup>5</sup> che viene risolta.



Figura 17. Suddivisione della near-wall region in funzione dello Wall y+

La Figura 17 rappresenta l'andamento dello strato limite in funzione del Wall y+. È possibile distinguere 3 zone differenti [19]:

- $(y^+ < 5)$ : Substrato viscoso.
- $(5 < y^+ < 60)$ : Zona di transizione o Buffer Layer.
- $(y^+ > 60)$ : Zona completamente turbolenta o regione logaritmica.

Dunque in funzione dell'accuratezza che necessita l'analisi, posso scegliere il valore di  $y^+$  e quindi, tramite l'equazione precedente, determinare quanto devono essere alte le celle adiacenti alle pareti che comporranno la mesh. È evidente che riducendo il valore di  $y^+$ aumenta la finitura della griglia e dunque il tempo di computazione, ma migliora anche l'affidabilità dei risultati finali. La stretta correlazione tra finitura della mesh e modello numerico è stata studiata da M. Salim e S.C. Cheah [19]. I due studiosi effettuando delle prove, variando la mesh e utilizzando diversi modelli RANS, verificarono quanto i risultati si discostavano da quelli sperimentali. Le conclusioni sono state che modelli come il "K- $\omega$ " o lo "Spalar-Allmaras", i quali sono progettati per essere applicati all'interno dello strato limite laminare, vengono ottimizzati fornendo una mesh con  $y^+ < 5$ . Invece modelli come il "K- $\varepsilon$ " e tutte le sue varianti che sono stati studiati per descrivere al meglio la parte centrale del flusso

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Per strato limite si intende lo strato di fluido nelle immediate vicinanze di una parete solida, in cui la velocità varia da zero (a contatto con la parete) fino alla velocità di flusso indisturbato (lontano dalla parete).

(il core), migliorano la loro prestazione per  $y^+ > 30$ . È comunemente sconsigliato avere una finitura di mesh che risolve lo strato limite nella regione di transizione poiché nessun modello è ottimizzato per fare ciò. Un altro studio effettuato sempre da M. Salim e S.C. Cheah [20] si è posto come obiettivo quello di dare delle raccomandazioni per ottimizzare la mesh in funzione del modello numerico sfruttando il *Wall*  $y^+$  come parametro decisionale nel caso in cui non ci siano affidabili dati sperimentali per effettuare la validazione del modello. I risultati del suddetto studio riportano che per elevati numeri di Reynolds risolvere il problema con un *Wall*  $y^+$  di circa 33, quindi nella zona completamente turbolenta, accoppiato con un modello "K- $\varepsilon$ " fornisce delle soluzioni di un'accuratezza accettabile con un basso impatto computazionale.

#### 2.3. Condizioni al contorno

In matematica, una condizione al contorno è l'assegnazione del valore della soluzione di un'equazione differenziale ai margini dell'insieme di definizione. Un'equazione differenziale ammette spesso infinite soluzioni e l'imposizione di condizioni aggiuntive è necessaria per individuarne una in particolare. Le tipologie di condizioni al contorno che possono essere impostate sono principalmente tre:

- **Dirichelet:** Imposto ai margini del domino la variabile di interesse pari ad una costante, è l'esempio di un tubo nel quale fluisce acqua a velocità costante oppure un componente raffreddato in un bagno termostatico.
- **Neumann:** Imposto ai margini del dominio una condizione sulla derivata prima della variabile di interesse, esempio più caratteristico è la condizione di omogeneità ovvero per una superficie adiabatica, il flusso diretto lungo la normale è pari a zero e dunque la variazione della temperatura (velocità) in tale direzione è nulla.
- **Cauchy:** si verifica quando il problema è definito assegnando entrambe le condizioni precedentemente trattate.

La corretta definizione delle condizioni al contorno in una simulazione CFD non è banale, soprattutto se si considera la necessaria coerenza con il modello numerico e con la fisica del problema. Prendendo come software di riferimento per la simulazione fluidodinamica ANSYS Fluent, è possibili impostare svariate combinazioni di boundaries. Generalmente le più utilizzate riguardano l'immissione o l'estrazione del fluido dal dominio e dunque corrispondo a condizioni di velocity (pressure) inlet e velocity (pressure) outlet. Indifferentemente dalla tipologia di imposizione che si effettua per la corretta modellazione della turbolenza, è necessaria la determinazione di alcuni parametri che sono fondamentali per l'ottenimento di una soluzione accettabile dal punto di vista fisico, i quali verranno approfonditi nei seguenti paragrafi (2.3.1 e 2.3.2).

#### 2.3.1. Intensità della turbolenza

L'intensità della turbolenza è definita come il rapporto tra il quadrato della radice delle fluttuazioni della velocità e la velocità media del flusso. Un'intensità di turbolenza dell'1% o inferiore è generalmente considerata bassa e le intensità di turbolenza superiori al 10% sono considerate elevate [18]. Ad esempio, se si sta simulando un esperimento in galleria del vento, l'intensità della turbolenza nel flusso libero è solitamente disponibile dalle caratteristiche del tunnel. Nelle moderne gallerie del vento a bassa turbolenza, l'intensità della turbolenza a flusso libero può essere inferiore allo 0,05%. Per i flussi interni, l'intensità della turbolenza agli ingressi dipende totalmente dalla cronologia a monte del flusso. Se il flusso a monte è sottosviluppato e indisturbato, è possibile utilizzare una bassa intensità di turbolenza. Se il flusso è completamente sviluppato, l'intensità della turbolenza può arrivare fino a qualche punto percentuale.

#### 2.3.2. Scala di lunghezza della turbolenza

La scala di lunghezza della turbolenza è una quantità fisica correlata alle dimensioni dei grandi vortici che contengono l'energia dei flussi turbolenti. Nei condotti, per flussi completamente sviluppati, essa è limitata dalle dimensioni del condotto, poiché i vortici turbolenti non possono fisicamente superare tale limite. Una relazione approssimativa tra la scala della turbolenza e la dimensione fisica del condotto è:

$$l = \frac{0.07L}{C_{\mu}^{\frac{3}{4}}}$$

Dove:

L: Rappresenta la dimensione caratteristica del problema.

 $C_{\mu}^{\vec{4}}$ : È un parametro necessario ad assicurare la coerenza con la definizione della scala della turbolenza nei modelli numerici ad una e due equazioni.

Se la turbolenza deriva da un ostacolo nel flusso, come una piastra perforata, è più appropriato basare la scala della lunghezza della turbolenza sulla lunghezza caratteristica dell'ostacolo piuttosto che sulla dimensione del condotto. Il manuale di ANSYS [18] fornisce alcune linee guida per la corretta selezione di tale parametro.
# 3. Progettazione del laboratorio

Il seguente capitolo ha come scopo quello di elencare e definire tutti i parametri e criteri decisionali applicati al fine di portare avanti le simulazioni fluidodinamiche a supporto della progettazione del laboratorio sperimentale. Partendo dalle condizioni fisiche che si vogliono riprodurre e tenendo conto dei vincoli esterni di progetto, verranno analizzate le possibili configurazioni per la corretta modellazione dello scenario.

In particolare verrà analizzato il vento, fenomeno fondamentale che, per essere riprodotto fedelmente, deve prima essere compreso. Procedendo nel capitolo verranno analizzate le caratteristiche prima geometriche e poi tecniche proprie del laboratorio selezionato. Prima di entrare nella descrizione dettagliata delle simulazioni effettuate verranno brevemente trattate le teorie delle gallerie del vento e le teorie per la scalabilità dei modelli, entrambe necessarie alla definizione delle geometrie finali utilizzate per le simulazioni.

# 3.1. Il vento: descrizioni delle principali variabili d'interesse

I fenomeni metereologici che avvengono nell'atmosfera terrestre sono prodotti dalla radiazione solare, la quale è responsabile della generazione di gradienti termici e di pressione che a loro volta sono causa dello spostamento delle grandi masse d'aria. Tali spostamenti possono essere classificati sia in funzione della scala spaziale che della scala temporale. La Terra e l'atmosfera restituiscono l'energia ricevuta sotto forma di radiazione solare riemettendola a loro volta; la differenza fra l'energia assorbita e quella ricevuta varia in funzione dell'inclinazione dei raggi solari andando da zone di massima incidenza, quali i tropici, a quelle di minima, come i poli. Nelle prime zone la temperatura media è maggiore della temperatura media terrestre e si creano zone di bassa pressione, mentre nelle seconde la temperatura media è minore della media terrestre e dunque si creano zone di alta pressione. Se la temperatura non risentisse di nessun altro fattore si avrebbe un flusso unico che andrebbe dalle zone di altra pressione a quelle di bassa pressione, in realtà a causa delle disomogeneità dovuta alle grandi masse d'acqua, alle zone continentali e alle nuvole, si crea in ciascun emisfero un sistema di circolazione tri-cellulare come visibile in Figura 18.



Figura 18. Circolazione del vento nell'emisfero

La circolazione del vento può suddividersi in:

• **Circolazione primaria:** è composta dai venti superficiali detti "alisei", si sviluppano in funzione della latitudine, sono venti che hanno una durata mensile o stagionale su

aree a scala planetaria. Essi hanno mediamente velocità moderate comprese tra i 4 - 5 [m/s], e sono quelli che determinano il clima terrestre.

- **Circolazione secondaria:** è l'insieme dei venti che si forma nelle zone di alta e bassa pressione, includono i cicloni, gli anti-cicloni e i monsoni. A differenza della circolazione primaria, quella secondaria determina il tempo locale.
- Venti locali: sono movimenti di massa d'aria che si inseriscono nella circolazione secondaria senza modificarne le caratteristiche. Hanno limitata estensione e durata breve ma possono raggiungere velocità elevatissime. Generalmente possono essere le brezze, i fohn, i venti catabatici<sup>6</sup>, i venti temporaleschi e i tornado.

Circolazione primaria	Alisei	
	Venti occidentali	
	Venti orientali	
Circolazione secondaria	Cicloni	Extra-tropicali
		Tropicali
	Anti-cicloni	
	Monsoni	
Venti locali	Legati a particolari condizioni geografiche	Brezze
		Föhn
		Venti catabatici (bora,)
	Venti legati a particolari	Venti frontali
	condizioni atmosferiche	Downburst
		Tornado o tromba d'aria

#### Tabella 4. Classificazione dei venti

La Tabella 4 riporta schematicamente tutti i maggiori fenomeni eolici che possono manifestarsi.

## 3.1.1. Rappresentazione del vento

La superficie terrestre esercita sull'aria in movimento prossima ad essa una forza d'attrito che ne ritarda il flusso. Un ulteriore frizione si genera tra i profili fluidi che scorrono gli uni sugli altri a velocità differenti. L'unione di questi due fenomeni rende il flusso turbolento, questo accade in una regione determinata dell'atmosfera che prende il nome di "strato limite atmosferico". Può essere definita una quota  $z_g$  al di sopra della quale la velocità del vento non risente più dell'attrito dovuto dalla terra, essa varia tra 1000 e 3000 m ed è funzione della velocità del vento e della scabrezza del suolo, espressa dal parametro  $z_0$  detto lunghezza di rugosità; esso può essere inteso come la dimensione caratteristica dei vortici che vengono a crearsi a causa dell'interazione tra l'aria in movimento ed il suolo.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Un esempio di vento catabatico è "la bora" che può raggiungere velocità di 150-200 km/h.

#### Tabella 5. Categorie di terreno

	Categoria del terreno	$k_T$	$z_0$ (m)	$z_{min}(\mathbf{m})$
I	Mare aperto, laghi con minimo 5 km di estensione sopravento e campagna senza ostacoli	0.17	0.01	2
II	Terreno agricolo con recinzioni, piccole fattorie isolate, case o alberi	0.19	0.05	4
III	Aree suburbane o industriali o foreste permanenti	0.22	0.3	8
IV	Area urbana in cui almeno il 15% della superficie sia coperta da edifici la cui altezza media superi i 15m	0.24	1	16

La Tabella 5 in accordo con L'Eurocodice 1 [21], indica quattro categorie di terreno per le quali è definito un fattore di terreno  $k_t$  proporzionale alla velocità d'attrito che aumenta con la rugosità del terreno. Lo strato limite atmosferico si estende dalla superficie terrestre fino a  $z_g$ , come mostrato in Figura 19.



Figura 19. Profilo di velocità media del vento e atmosfera turbolenta

Per caratterizzare completamente le proprietà del vento è necessario introdurre due ulteriori concetti ovvero l'equilibrio atmosferico e il significato di velocità media e fluttuazione.

Per equilibrio atmosferico si intende una situazione di equilibrio stabile, instabile o neutrale di una massa d'aria in funzione del gradiente di temperatura verticale che la investe. Nel caso in cui il gradiente sia minore del gradiente adiabatico, o addirittura invertito, si tende alla condizione di equilibrio stabile che non consente la turbolenza (è il caso del fluire di aria calda su un terreno freddo). Al contrario se il gradiente di temperatura è maggiore di quello adiabatico (condizione in cui una massa d'aria fredda fluisce su un terreno caldo), il riscaldamento dal basso provoca un'atmosfera instabile ed esalta la turbolenza. Al crescere della velocità del vento il gradiente termico tende al gradiente adiabatico causa l'elevato rimescolamento dell'aria, si raggiunge la stabilità neutrale e la velocità del vento risulta indipendente dalla temperatura.

Il secondo concetto è l'analisi della velocità del vento scomponendola in velocità media e fluttuazione turbolenta. Per fare ciò si prende in esame un arco temporale lungo e si misura lo spettro della potenza del vento in funzione della frequenza, tale rappresentazione è conosciuta come lo spettro di Van der Hoven rappresentato in Figura 20.



Figura 20. Spettro di Van der Hoven

Si evidenziano due contenuti armonici distinti, il primo è legato ad eventi con frequenza mensile o annuale ed è detto picco macro-meteorologico e corrispondente agli eventi eolici. Il secondo è legato a eventi molto più frequenti che vanno dai pochi secondi a qualche minuto, è chiamato picco micro-meteorologico e corrisponde alle fluttuazioni turbolente. Il gap spettrale presente tra le due armoniche descritte corrisponde a periodi compresi fra dieci minuti ed un'ora e, data l'assenza di picchi, fornisce informazioni utili riguardo la velocità di riferimento del sito di interesse. Essendo la velocità media stazionaria all'interno del gap spettrale, è possibile considerare la componente fluttuante longitudinale del vento come somma del valor medio ottenuto su un periodo di 10-60 minuti e della componente fluttuante di origine turbolenta.



Figura 21. Composizione della velocità del vento.

### 3.1.2. Interazione fluido-struttura

Considerando un corpo fisso e indeformabile immerso in un flusso ventoso, esso genererà due effetti principali: il primo modificherà il flusso alterandone la configurazione, il secondo farà sì che la pressione sulle facce del corpo sarà differente della pressione statica del flusso indisturbato. La superficie del corpo è pertanto sottoposta ad un'azione dipendente dalla differenza di pressione.

$$p = P - P_0$$

Dove:

p: pressione sulla parete posta nella corrente fluida [Pa].

P: pressione del flusso [Pa].

 $P_0$ : Pressione atmosferica [Pa].

Inoltre, sia che la rappresentazione del flusso sia tridimensionale (turbolento) o bidimensionale (laminare), sulla superficie del corpo esposta al flusso incidente si realizza uno strato limite che è dipendente dal numero di Reynolds (precedentemente discusso nel paragrafo 2.1) e che può essere sottoposto ad un gradiente di pressione negativo o positivo (avverso). Nel primo caso il flusso in prossimità della superficie tende ad accelerare, dunque lo spessore dello strato limite si riduce e la turbolenza è spinta contro la superficie, in tale modo si impedisce il distacco dello strato limite. Nel secondo caso, quando lo strato limite è esposto ad un gradiente positivo o avverso, la turbolenza si muove dalla superficie verso il core del flusso dando vita al fenomeno della separazione della vena fluida. Questo fenomeno presenta aspetti diversi in funzione della superficie su cui il vento fluisce, se è arrotondata oppure presenta spigoli vivi come visibile in Figura 22. Nel primo caso il fenomeno del distacco della vena fluida dipende essenzialmente dal Reynolds; nel secondo invece il distacco è inevitabile ed è dunque un fenomeno indipendente dal Reynolds.



Figura 22. Separazione del flusso in funzione della tipologia di superficie

Si definisce coefficiente di pressione il seguente parametro:

$$c_p = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

Dove:

p: è la differenza di pressione sulla superficie [Pa].

V: è un valore medio della velocità riguardante il flusso indisturbato [m/s].

 $\rho$ : è la densità del fluido [kg/m<sup>3</sup>].

Dunque quando  $c_p > 0$  la pressione è detta sovrapressione, situazione tipica delle superfici frontali al flusso dove la vena fluida rimane aderente alla superficie stessa, al contrario se  $c_p < 0$ , la pressione è detta depressione o suzione, tale situazione è tipica delle superfici laterali e sottovento le quali sono caratterizzate dalla separazione di scia. Quando due o più corpi fissi e indeformabili ravvicinati tra loro danno luogo a variazioni rilevanti del campo di flusso locale e delle azioni aerodinamiche che competono ai corpi singoli, si parla del fenomeno dell'interferenza.

## 3.1.3. Caratteristiche del vento nel Mar Adriatico

Avendo selezionato come sito di interesse il Mar Adriatico, essendo, come detto, il luogo con maggiore densità di installazioni off-shore, sono stati analizzati i principali parametri precedentemente definiti riguardo le caratteristiche del vento, ovvero direzione e velocità media. In Figura 23, ottenuta dall'atlante eolico online [22], è possibile vedere la velocità media annua sulla costa italiana ad un'altezza di 50 metri sul livello del mare.



Figura 23. Mappa velocità media del vento sulle coste italiane

È evidente dall'immagine, che la colorazione del sito d'interesse va dal verde all'arancione, con qualche zona in rosa. In termini di velocità, seguendo la legenda riportata, mediamente essa va dai 4 m/s ai 7-8 m/s, mentre, per quanto riguarda la direzione del vento, sono state selezionate tre stazioni metereologiche distribuite lungo la costa adriatica, in particolare Ravenna Punta Marina, Rimini Marecchia e Pineto [23].



Distribuzione della direzione del vento in (%%)







Figura 24. in alto a sinistra Ravenna Punta Marina, in alto a destra Rimini Marecchia, in basso Pineto

La Figura 24 riporta che in funzione della latitudine le direzioni medie del vento variano consistentemente anche se si può affermare che le direzioni principali vanno da est a nord est.

### 3.2. Descrizione caso studio

Procedendo come definito all'inizio del capitolo, verranno ora descritte le caratteristiche proprie del laboratorio sperimentale e tutto ciò che è necessario conoscere per poter effettuare le simulazioni su un modello in scala.

### 3.2.1. Geometria del laboratorio

Lo stabile che potenzialmente può essere messo a disposizione del SEADOG per essere trasformato nel laboratorio sperimentale ha una superfice pari a 128 m<sup>2</sup> ed un volume complessivo di 1280 m<sup>3</sup>. Le dimensioni caratteristiche sono riportate nella Tabella 6.

Dimensioni laboratorio			
Lunghezza	16	m	
Larghezza	8	m	
Altezza	10	m	
Intercapedine	1.5	m	

	apella	imensioni iabo	ratorio
--	--------	----------------	---------

Inizialmente questo spazio era adibito ad uso ufficio, dunque sono presenti due pareti separatorie che non hanno utilità per i nostri scopi e possono essere smantellate. Vista la necessità di introdurre ed estrarre un'ingente portata d'aria dal laboratorio, era necessario che quest'ultimo avesse un accesso diretto con l'ambiente esterno. Considerando la sua posizione, l'area selezionata è adiacente per tre lati con altri uffici mente per una delle due pareti laterali confina con un'intercapedine la quale a sua volta rappresenta la parete esterna del complesso. Inoltre l'unica parte nella quale è possibile praticare delle aperture è ancora una volta quella in comune con l'intercapedine, dunque un vincolo progettuale è quello di poter immettere ed estrarre aria solo in maniera perpendicolare al flusso che si vorrebbe instaurare all'interno.



Figura 25. Pianta laboratorio prima e dopo l'abbattimento delle pareti divisorie

La Figura 25 mostra partendo dall'immagine di sinistra la pianta dello stabile prima dei lavori di abbattimento delle pareti divisorie, dove, cerchiato in rosso, sono visibili i tre uffici che verranno uniti per ottenere la planimetria finale del laboratorio. L'immagine di destra invece rappresenta lo stato finale dei lavori: l'area in rosso rappresenta il laboratorio mentre le frecce stanno ad indicare le possibilità di realizzazioni di aperture per introdurre ed estrarre aria. L'immagine centrale rappresenta un piano elevato che sarà adibito a sala controllo per la conduzione delle prove sperimentali e, tramite una parete finestra, avrà visibilità diretta sull'ambiente di prova.





Figura 26. Galleria del vento

Le gallerie del vento sono uno strumento indispensabile nel settore aerospaziale, poiché permettono di effettuare misurazioni su modelli in scala delle principali caratteristiche aerodinamiche necessarie per la corretta progettazione dei profili alari e non solo. Il loro sviluppo ha avuto origine fin dalla seconda metà del 1400, ma la nascita delle moderne gallerie del vento può essere collocata nei primissimi anni del '900, grazie allo studio fatto dai fratelli Wright che portarono nel 1903 alla realizzazione del primo volo motorizzato della storia. L'aumento delle conoscenze e il perfezionamento di questo tipo di tecnologia si ebbe durante le due guerre mondiali. La necessità di sperimentare modelli in scala ridotta ha fatto nascere il problema della similitudine che declinato nel nostro caso sarà trattato nel paragrafo 3.2.3, comunque è necessario anticipare che i parametri che solitamente vengono utilizzati per simulazioni in similitudine sono tre:

- **Numero di Reynolds:** viene applicato per fluidi viscosi e incomprimibili, quindi in campi di moto nettamente subsonici.
- **Numero di Mach:** ha applicazioni per capi di velocità transonici, supersonici o ipersonici dove la comprimibilità del fluido non risulta più trascurabile.
- **Numero di Froude:** riguarda lo studio di fluidi pesanti e dunque più utilizzato in idrodinamica.

Coerentemente al differente criterio scelto per lavorare in similitudine, esistono diverse tipologie costruttive di gallerie del vento, dipendenti appunto dal campo di moto che si vuole ricreare e dal tipo di funzionamento. Sostanzialmente le macro categorie sono quattro e sono corrispondenti alla tipologia di flusso che è possibile rappresentare: gallerie subsoniche, gallerie transoniche, gallerie supersoniche e gallerie ipersoniche. Per la seguente trattazione verranno approfondite le tipologie costruttive delle gallerie subsoniche.

Per galleria del vento subsonica si intende una galleria in cui i flussi simulati sono inferiori o molto inferiori di 0.75 Mach<sup>7</sup> che è considerata la soglia di passaggio a flusso transonico; la comprimibilità del gas, come precedentemente accennato, può essere trascurata ed è dunque valido il principio di conservazione di Bernoulli:

$$p + \frac{\rho v^2}{2} + \rho gz = cost$$

Dove.

p: è la pressione de fluido [Pa].

 $\rho$ : è la densità del fluido [kg/m<sup>3</sup>].

- v: è la velocità del fluido [m/s].
- g: è l'accelerazione di gravità  $[m/s^2]$ .
- z: è l'altezza a cui si trova il fluido [m].

Gli elementi costitutivi di una galleria classica sono i seguenti:

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Il numero di Mach è un numero adimensionale definito come il rapporto tra velocità di un oggetto in moto in un fluido e la velocità del suono nel fluido considerato  $Ma = \frac{v}{\sqrt{vRT}}$ 

- Condotto convergente: Primo elemento della galleria del vento poiché in esso l'aria accelera ed inoltre viene limitata la turbolenza grazie al gradiente di pressione negativo. Inoltre considerando il principio di conservazione precedentemente descritto, si ha un notevole risparmio energetico in termini di potenza necessaria al ventilatore per raggiungere le velocità di regime.
- **Camera di prova:** è il segmento a sezione costante della galleria, in essa l'aria raggiunge la velocità massima ed è la zona in cui è posizionato il modello e in cui vengono effettuate le misurazioni sperimentali. Un parametro importante è che il modello deve avere una sezione frontale piccola rispetto alla sezione della camera di prova per evitare fenomeni di bloccaggio o interferenza di parete.
- **Diffusore:** è la parte terminale della galleria del vento, ha una sezione divergente ed in esso l'aria viene decelerata. A causa del gradiente di pressione positivo che si instaura, l'angolo di divergenza ammissibile per evitare le turbolenze a valle è dell'ordine di 2 o 3 gradi [24].
- **Ventilatore:** ha il compito di trasferire l'energia cinetica del motore che lo alimenta al fluido sotto forma di energia di pressione.
- Altro: Altri elementi necessari alla realizzazione della galleria, quali sagomature per le possibili curve, reti anti-turbolenza etc.

Esistono quattro tipologie costruttive di galleria del vento subsonica [25] e si caratterizzano dalla tipologia di circuito (se aperto o chiuso) e dalla tipologia di camera di prova (se aperta o chiusa). Le suddette tipologie sono state raggruppate nella Tabella 7.

TIPOLOGIE GALLERIA DEL VENTO SUBSONICA				
	CIRCUITO CAMERA PROVA			A PROVA
	Aperto	Chiuso	Aperta	Chiusa
Eiffel	Х		Х	
NPL	Х			Х
Prandtl		X	Х	
Moderna		Х		Х

Tabella 7. Tipologie costruttive di galleria del vento subsonica

Generalmente la cabina di prova aperta è utilizzata per testare modelli a pressione atmosferica o dove non sia necessario controllare tale parametro. Per quanto riguarda il circuito aperto, l'aria vene direttamente prelevata dall'esterno, tale soluzione viene utilizzata solo per gallerie di piccole dimensioni poiché la qualità della corrente potrebbe essere influenzata dalla turbolenza atmosferica (trattata nel paragrafo 3.1.1). Ai fini della progettazione, considerando gli spazi a disposizione e la possibilità di immissione dell'aria direttamente dall'ambiente esterno, si è scelto di rifarsi al modello Eiffel.

# 3.2.3. Scalabilità del modello

Considerate le dimensioni geometriche del laboratorio selezionato, e considerate le dimensioni medie di un'installazione off-shore del mar Adriatico discusse nel paragrafo 1.2.2, è chiaro che sorge la necessità di realizzare un modello in scala della piattaforma prova che verrà immersa nel flusso d'aria. Per effettuare dunque la scalabilità del modello, è necessario determinare dei parametri rispetto ai quali scalare il prototipo con l'obiettivo di far rimanere

invariata il comportamento aerodinamico dell'oggetto, in altre parole, bisogna essere certi che, modificando le dimensioni della piattaforma, lo sviluppo dei profili di velocità che la coinvolgono non vengano alterati o modificati, ma rimangano simili.

Per effettuare questo studio verrà usata l'analisi dimensionale, tecnica che servirà a stabilire le condizioni affinché i campi di moto siano simili, requisito necessario per poter estendere i risultati ottenuti sul prototipo anche sulle piattaforme reali. Tale tecnica si basa esclusivamente sul teorema del Pi-greco o teorema di Buckingham [26] il quale afferma: Dato un processo fisico descritto da una equazione anche indefinita nella sua forma analitica, nella quale compaiano n variabili fisiche, se le grandezze fondamentali (cioè indipendenti tra loro e in numero sufficiente a descrivere compiutamente lo spazio dimensionale di interesse) di queste n variabili sono k (ad esempio, massa, lunghezza, tempo in un problema puramente meccanico), allora il problema può essere espresso in funzione di n-k gruppi adimensionali. Al fine di determinare i parametri che assicurano la similitudine dei campi di moto bisogna effettuare degli steps.

#### • Similitudine geometrica

Due regioni 1 e 2 dello spazio, sono dette in similitudine geometrica se il rapporto fra le distanze di due punti generici A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub> nella configurazione 1 e A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub> nella configurazione 2 è costante.

$$\frac{A_1B_1}{A_2B_2} = k_g$$



Figura 27. Similitudine geometrica

#### • Similitudine cinematica

Si ha similitudine cinematica se i regimi di velocità nel modello in scala e nel sistema reale, ovvero le loro linee di flusso, sono simili. Considerando oltre alle variabili spaziali anche quella temporale, se A<sub>1</sub> dopo un certo tempo T<sub>1</sub> va a finire in un punto A'<sub>1</sub>, e il punto A<sub>2</sub> (che è il corrispondente del punto A<sub>1</sub> in similitudine geometrica) dopo un certo tempo T<sub>2</sub> va a finire in A'<sub>2</sub>, i punti percorrono linee di corrente simili. Nell'ipotesi che A<sub>1</sub> e A'<sub>1</sub> siano infinitamente vicini avremo che:

$$c_1 = \frac{A_1 A_1'}{T_1}$$
  $c_2 = \frac{A_2 A_2'}{T_2}$ 

Essendo vera la relazione:

$$\frac{T_2}{T_1} = k_t$$

Si ottiene che i moduli delle velocità di due configurazioni in similitudine cinematica sono in un rapporto costante:

$$\frac{c_2}{c_1} = k_v = k_g k_t^{-1}$$

#### • Similitudine dinamica

Si dice che un campo di moto 1 sia in similitudine dinamica con un campo di moto 2 se si ottiene da quest'ultimo moltiplicando: le lunghezze per un rapporto costante  $k_g$ , i tempi per un rapporto costante  $k_t$  e le masse per un rapporto costante  $k_m$ .

$$\frac{M_2}{M_1} = k_m$$

La similitudine dinamica dunque presuppone quella geometrica e quella cinematica. Come conseguenza dell'analisi dimensionale, in fluidodinamica, il parametro di similitudine caratteristico nel caso di fluidi viscosi incomprimibili (come nel caso dell'aria per velocità inferiori a 0.3 Mach) è il numero di Reynolds. Per mantenere la similitudine dinamica e dunque fluidodinamica è sufficiente mantenere costante il numero di Reynolds e assicurare la similitudine geometrica del prototipo. È stato dimostrato però che per Reynolds maggiori di 10<sup>4</sup>-10<sup>5</sup>, ovvero in condizioni di moto completamente turbolento, cioè turbolenza completamente sviluppata, il comportamento fluido diventa costante ed indipendente dal rapporto tra forze viscose e d'inerzia. Da uno studio effettuato da ENEA in collaborazione con il MISE [27], un criterio per conservare il comportamento fluidodinamico in condizioni di flusso completamente turbolento, avendo scalato il modello, è quello di mantenere costante le velocità dei flussi in ingresso. La dimostrazione dell'efficacia di questo approccio sarà trattata nel paragrafo 3.4 relativo alla descrizione delle simulazioni effettuate.

#### 3.2.4. Modello piattaforma

Le dimensioni caratteristiche della piattaforma oggetto dello studio sono state scelte considerando l'ottimo tra le reali dimensioni medie delle installazioni off-shore del Mar Adriatico, e la necessità di un modello semplice da realizzare con software di disegno 3D. Si è deciso di ispirare il modello ad una piattaforma mono-tubolare 30x30 m. La scelta di realizzare il prototipo mono-tubolare è stata supportata dalla necessita di poter simulare la direzione del vento variabile durante le prove e dunque, associando all'asse del tubo centrale un motore, è possibile ruotare la piattaforma; nel caso in cui avessimo realizzato una classica piattaforma sostenuta da una travatura reticolare, in sede di variazione del vento si sarebbero dovuti spostare i ventilatori all'interno dell'area di prova, o comunque, la difficoltà nel ruotare la piattaforma sarebbe stata decisamente superiore. Il prototipo ideato è composto da tre deck di spessore 60 cm e altezza inter-deck di 5 m. Tenendo conto delle considerazioni fatte nei paragrafi 3.2.2 e 3.2.3 è stata scelta una scala di rappresentazione 1:10 e dunque sono state scalate tutte le dimensioni precedentemente riportate. La Tabella 8 riepiloga l'operazione di riduzione della scala del modello.

SCALA 1:10				
	REALE	SCALATO		
lunghezza	30 m	3 m		
Larghezza	30 m	3 m		
Spessore deck	0.6 m	0.06 m		
Distanza inter-deck	5 m	0.5 m		
Diametro pilone centrale	3 m	0.3 m		
Altezza complessiva <sup>8</sup>	31.8 m	3.18 m		

#### Tabella 8. Riepilogo azione di scala del modello di piattaforma

La scala è stata scelta tenendo conto di due fattori contrastanti: il primo è quello fluidodinamico, ovvero ponendo attenzione alle dimensioni complessive del laboratorio, onde evitare fenomeni di interferenza con le pareti laterali, con il pavimento e il soffitto. Seguendo questa linea progettuale, la scala avrebbe dovuto essere ridotta ancora per favorire l'evoluzione dei profili di velocità attorno alla struttura. Il secondo è di natura tecnica, il modello non essendo realizzato al fine di verificare la sua risposta aerodinamica, bensì come area di studio di fenomeni di dispersione, ridurre eccessivamente la scala avrebbe reso molto difficile l'allestimento del muck-up della piattaforma necessario per condurre le prove sperimentali. Il modello realizzato utilizzando il software SOLIDWORKS è riportato in Figura 28.



Figura 28. Modello piattaforma sperimentale

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> Per altezza si intende la sommatoria degli spessori dei tre deck e le due distanze inter-deck, trascurando dunque il living quarter. La lunghezza complessiva del pilone di sostegno è pari a 2 m e va sommata a quella complessiva della piattaforma.

All'interno di ogni deck sono stati posizionati degli ostacoli arbitrariamente, poiché lo scopo della simulazione è validare l'omogeneità e la stabilità del flusso d'aria e non effettuare le vere e proprie simulazioni di dispersione. Riguardo alla dimensione e alla forma degli ostacoli si è fatto riferimento alla possibilità di approssimare la maggioranza dei reali ingombri presenti su una piattaforma, quali serbatori, teste pozzo, tubazioni, locale motori etc. a due forme geometriche semplici come il cilindro e il parallelepipedo. Il numero di ostacoli è stato definito tenendo conto dell'utilizzo usuale di ogni deck. Generalmente, partendo dall'alto verso il basso, si incontrano:

• il deck contenente il living quarter: ovvero quello più in alto per ragioni di sicurezza

Tabella 9. Ostacoli deck 1		
N° OSTACOLI 1		
PARALLELEPIPEDI	1	
CILINDRI	0	



Figura 29. Deck 1 contenente il living quarter

• **il deck di trasformazione:** dove ci sono gli stoccaggi e le macchine per eseguire la conversione del greggio.

Tabella 10. Ostacoli deck 2		
N° OSTACOLI 5		
PARALLELEPIPEDI	4	
CILINDRI	1	



Figura 30. Deck 2 piano di trasformazione

• **il deck di estrazione:** in cui sono presenti tutti i macchinari di estrazione ed eventuali serbatoi.

N° OSTACOLI	7
PARALLELEPIPEDI	3
CILINDRI	4

Tabella 11. Ostacoli deck 3



Figura 31. Deck 3 piano di estrazione

In Tabella 12 è riportata la nomenclatura utilizzata per la definizione dei deck.

Tabella 12. Definizione dei nomi dei deck

DECK 1	Living quarter
DECK 2	Piano di trasformazione
DECK 3	Piano di estrazione

# 3.3. Giustificazione e scelta dei criteri utilizzati

Il seguente paragrafo ha come obiettivo quello di definire i parametri che hanno portato alla definizione dei modelli sui quali sono state basate le simulazioni necessarie ad ottenere i risultati che saranno descritti nel capitolo 4. Per arrivare ai modelli finali sono state effettuate numerose prove. Partendo da geometrie semplici, necessarie alla comprensione degli schemi numerici più appropriati alla risoluzione del problema come visibile in Figura 32 e Figura 33, sono state effettuate simulazioni elementari con flusso su lastra piana singola e doppia. Sono state scelte queste geometrie base: in primo luogo perché in letteratura sono presenti degli studi con cui confrontare i risultati ottenuti al fine di tarare il modello numerico, e in secondo luogo perché la fluidodinamica di una lastra piana è molto simile a quella del un deck di una piattaforma.



Figura 32. Lastra piana



Figura 33. Doppia lastra piana

Progredendo con la conoscenza del software di simulazione e con le competenze necessarie, sono state sviluppate geometrie sempre più complesse e fedeli alla struttura reale del laboratorio. La discussione dei criteri geometrici, tecnici e di modellazione CFD verrà portata avanti solamente per le due simulazioni finali: la simulazione 10\* che verrà definita "ideale" e la simulazione 17 che verrà definita "reale". Oltre alle due simulazioni di interesse, il dettaglio delle restanti prove verrà discusso nel paragrafo 3.4.

# 3.3.1. Criteri geometrici

Per criteri geometrici si intendono tutte quelle soluzioni adottate a livello di geometria del dominio di calcolo necessarie per ottenere un flusso d'aria il più possibile omogeneo, considerando i vincoli esistenti generati dall'area del laboratorio. Come precedentemente affermato si tratteranno in questo spazio solamente la simulazione "ideale" e quella "reale".

# • Prova Ideale

La prova ideale è la prova a cui verrà fatto riferimento, ovvero la prova modello sulla quale verranno poi effettuati tutti i confronti necessari per validare e, dunque, accettare o rifiutare la prova reale. La definizione di ideale è stata data non perché non sia realmente possibile realizzare tale configurazione, ma perché esula dai vincoli progettuali del laboratorio e dalla possibilità concreta di trovare sul mercato, basandosi su dati di catalogo reperiti, un ventilatore che riesca ad avere determinate dimensioni.

La prima scelta geometrica effettuata è stata quella della determinazione della sezione di input dell'aria, sia dal punto di vista dimensionale sia da quello della posizione. È stato scelto di creare un condotto circolare di 3 m di diametro; tale grandezza è necessaria poiché, essendo la superficie frontale della piattaforma pari a 3 x 3 m, permette al flusso di investirla completamente (Figura 34).



Figura 34. Sezione frontale condotto con piattaforma

La lunghezza del condotto è stata scelta pari a 2 metri (Figura 35), in modo tale da indirizzare l'aria contro la piattaforma ed evitare che l'immissione diretta nel volume libero del laboratorio impedisse la generazione di un fronte omogeneo.



Figura 35. Condotto d'ingresso dell'aria

Per quanto riguarda la posizione del condotto d'ingresso, contrariamente ai vincoli strutturali del laboratorio definiti nel paragrafo 3.2.1, è stato scelto di posizionarlo parallelo al moto fluido da generare, in modo tale da limitare al minimo la possibilità di creazione di turbolenze e semplificare l'implementazione della geometria sui software dedicati.

Il secondo intervento effettuato è stato quello di realizzare un divisorio posizionato a circa 3 metri dalla parete di fondo del laboratorio. Tale divisorio presenta un foro della stessa grandezza del condotto d'ingresso ed è posizionato all'altezza dell'asse del condotto stesso. Questa soluzione ha permesso la realizzazione di una camera di ristagno della turbolenza che, dalle simulazioni precedenti, risultava generata dall'interazione tra il flusso d'aria e la parete finale del laboratorio. Tale camera permette al flusso d'aria di entrare ma non consente alla turbolenza generata a valle della stessa di tornare indietro ed interessare nuovamente il volume di laboratorio nel quale è presente la piattaforma Figura 36.



Figura 36. Parete divisoria necessaria alla realizzazione della camera di ristagno

Infine sono state realizzate sulla parete laterale della camera di ristagno tre aperture quadrate di superficie pari a 1 m<sup>2</sup>. Queste aperture rappresentano le bocchette di estrazione tramite cui la turbolenza intrappolata può uscire e venire sfogata attraverso l'intercapedine all'esterno. La somma della superficie delle tre bocchette d'estrazioni è leggermente inferiore alla superficie del condotto d'immissione, questo causerà un aumento di velocità localizzato ma un ulteriore ingrandimento di tali aperture avrebbe rischiato di compromettere l'integrità strutturale della parete di contatto tra laboratorio e intercapedine.

### • Prova reale

La prova reale è quella che cerca di riprodurre nella maniera più fedele possibile la struttura finale del laboratorio. Per gli scopi della progettazione è stato utilizzato come riferimento costruttivo l'esempio della galleria del vento trattato nel paragrafo 3.2.2, in particolare la tipologia "Eiffel" ovvero quella che presenta sia il circuito che la camera di prova aperti. Questa configurazione aderisce bene al problema analizzato poiché le simulazioni e le prove sperimentali che dovranno essere attutate saranno a pressione atmosferica ed inoltre l'immissione e l'estrazione dell'aria sarà effettuata direttamente dall'ambiente esterno.

La differenza sostanziale che permette di definire questa simulazione "reale" è il modo in cui viene simulato il flusso in ingresso al laboratorio. Mentre nella simulazione ideale era presente un condotto singolo circolare ed era supposto che il fronte d'aria fosse omogeneo lungo tutta la sezione (come se ci fosse un grande ventilatore unico capace di spingere in maniera ideale

aria parallelamente al suo asse), in questo caso sono stati modellati 5 ventilatori con diametro pari a 1,00 m e posizionati in modo tale da essere inscritti in un'area maggiore rispetto a quella del condotto ideale. La scelta tecnica che ha portato alla selezione dei ventilatori verrà discussa nel paragrafo 3.3.2. Per similitudine con la prova ideale, l'area di immissione dell'aria è rimasta invariata e pari a un cilindro di raggio uguale a 3 m, in tale configurazione però la lunghezza del condotto è stata aumentata da 1 m a 2 m, poiché il flusso creato dall'interazione dei 5 ventilatori necessita di più spazio per ridurre la sua turbolenza e tendere al flusso omogeneo. Il valore di 2 m di lunghezza del condotto è stata scelta come ottimo tra omogeneità parziale del flusso ottenuta e spazio libero necessario tra l'uscita del condotto e la parete forata della camera di ristagno.

Altra caratteristica che contraddistingue la prova reale è la geometria iniziale del condotto di immissione dell'aria, la quale ha un diametro maggiore rispetto alla parte circolare del condotto e pari a 4.9 m. Tale dimensione è necessaria a contenere la somma delle superfici dei 5 ventilatori in modo tale da generare un condotto convergente (Figura 37) che, come descritto nel paragrafo 3.2.2, è alla base della struttura delle gallerie del vento. L'angolo di convergenza del condotto è di 43°.



Figura 37. Geometria del condotto convergente per l'immissione dell'aria

In tale configurazione essendo l'aria immessa nel dominio non più in maniera ideale bensì attraverso dei ventilatori contenuti all'interno del laboratorio, è stato necessario adottare alcuni escamotage per la modellazione del problema. Essendo le superfici rappresentati i ventilatori interni al dominio, per evitare criticità di convergenza delle simulazioni è stato deciso di ridurre il volume di controllo inserendo una seconda parete divisoria che, questa volta, separa la zona di aspirazione dei ventilatori da quella di mandata (Figura 38).



Figura 38. Doppia separazione del volume totale del laboratorio

In questo modo è stato possibile semplificare la geometria trascurando ciò che accade nella zona a monte dei ventilatori poiché non è inerente all'esito delle simulazioni. Questa soluzione geometrica risolve le problematiche relative alla convergenza del modello, ma riduce lo spazio a disposizione della camera di prova, l'area dove è situata la piattaforma e dove il flusso d'aria interagisce con essa. Per quanto riguarda la camera di ristagno e le 3 apertura per l'estrazione dell'aria, la geometria è rimasta invariata rispetto alla prova ideale.

# 3.3.2. Criteri tecnici

Come appena visto nel paragrafo precedente (3.3.1) la sostanziale differenza tra prova ideale e prova reale è l'approccio con cui è stata modellata l'immissione d'aria, in particolare facendo riferimento alla prova reale, è stato necessario consultare i cataloghi di ventilatori industriali, ed è stata selezionata una tipologia di ventilatore che meglio aderisce alle richieste progettuali. Per la corretta scelta di un ventilatore è necessario tenere sotto controllo due parametri fondamentali ovvero: la portata che deve essere gestita, e le perdite di carico che devono essere vinte dal salto di pressione imposto dalla girante al fluido.

Per portata volumetrica si intende il volume di fluido che passa attraverso il ventilatore nell'unità di tempo. Di uso meno frequente è la portata massica, definita come la massa di fluido che passa attraverso il ventilatore nell'unità di tempo. La portata è un parametro strettamente legato alla sezione di efflusso e alla velocità del fluido:

$$Q_{v} = A * v_{fluido}$$

Dove:

 $Q_v$ : è la portata volumetrica  $[m^3/s]$ .

A: è la sezione utile del ventilatore o della condotta  $[m^2]$ .

 $v_{fluido}$ : è la velocità del fluido [m/s].

Quando un fluido è in movimento si possono distinguere tre tipi di pressione [28]:

- La pressione statica: Viene definita come la pressione esercitata dal fluido sulle pareti della condotta o del recipiente in cui è contenuto. Essa agisce ugualmente in tutte le direzioni ed è indipendente dalla velocità del fluido bensì dipende dalla geometria del condotto in cui il fluido è costretto a muoversi. Prendendo come riferimento la pressione ambiente, la pressione statica è positiva quando è maggiore della pressione ambiente, negativa quando è minore.
- La pressione dinamica: Viene definita come la pressione corrispondente alla parte di energia posseduta dall'unità di massa del fluido a causa della sua velocità (energia cinetica). Essa agisce nella stessa direzione del moto del fluido e viene sempre considerata di segno positivo. La pressione dinamica è funzione della velocità e della densità del fluido ed è espressa dalla seguente formula:

$$p_d = \frac{1}{2} * \rho * v^2$$

Dove:

 $p_d$ : è la pressione dinamica [Pa].

 $\rho$ : è la densità del fluido [ $kg/m^3$ ]. Considerando l'aria come fluido il valore medio di densità alle condizioni tecniche è pari a 1,225.

v: è la velocità del fluido [m/s].

• La pressione totale: definita come somma algebrica di pressione dinamica e pressione statica.

$$p_t = p_d + p_s$$

Il parametro di pressione interessante per la progettazione di un ventilatore è la pressione statica poiché è dipendente dalle perdite di carico del circuito, le stesse che devono essere vinte dal ventilatore. La pressione dinamica essendo funzione della velocità del fluido, non interessa la scelta del ventilatore poiché esso non conferisce al fluido un aumento di energia cinetica bensì un aumento di energia di pressione. Per quanto riguarda il problema preso in esame, essendo l'attenzione concentrata sulla modellazione del flusso d'aria e non sulla progettazione tecnica delle macchine, si è scelto di dare importanza primaria alla portata d'aria che deve essere elaborata, e di scegliere il ventilatore in funzione del range di portata che può soddisfare; la particolare geometria del circuito dell'aria, congiuntamente al fatto che il circuito è di tipo aperto, introduce un numero elevato di incognite sul calcolo delle perdite di carico e si è ritenuto opportuno trascurare in prima approssimazione di questo secondo parametro per la scelta del papabile ventilatore. In particolare facendo riferimento alle velocità medie prese in esame nel paragrafo 3.1.3. il range di funzionamento ricercato è rappresentato nella Tabella 13.

RANGE DI FUNZIONAMENTO DEL VENTILATORE		
VELOCITÀ [m/s]	PORTATA $[m^3/s]$	
5	35.5	
6	42.5	
7	50	

Tabella 13. Range di Portate elaborabili dal ventilatore

Il valore di portata è stato calcolando sfruttando l'equazione precedentemente mostrata considerando come sezione di efflusso quella d'immissione del condotto circolare con diametro pari a 3 m ovvero pari a 7.07  $m^2$ . Effettuando una ricerca fra i vari fornitori di ventilatori industriali, non sono stati trovati modelli a catalogo con diametro maggiore di 3 m e capaci di elaborare tali portate. Da qui la necessità di posizionare più ventilatori in parallelo. Il numero di ventilatori da utilizzare è stato scelto pari a 5, tale valore è stato ottenuto tramite simulazioni CFD iterative che oltre a validare la possibilità di generare un flusso il più omogeneo possibile, ha permesso di determinare anche il posizionamento ideale nello spazio. Nella seguente tabella vengono mostrate le portate relative non più al condotto d'uscita dell'aria ma al singolo ventilatore.

Tabella 14. Range di portate elaborabili dal singolo ventilatore

RANGE DI FUNZIONAMENTO DEL SINGOLO VENTILATORE		
VELOCITÀ [m/s]	PORTATA $[m^3/s]$	
5	7.1	
6	8.5	
7	10	

I valori di portata ottenuti in Tabella 14 sono stati trovati dividendo la portata che complessivamente si aspetta di trovare allo sbocco dal condotto circolare per il numero scelto di ventilatori. Utilizzando i valori indicati di portata per singolo ventilatore e velocità è possibile calcolare il diametro di design dei ventilatori pari a 1.34 *m*.

$$d = \sqrt{\frac{Q_v * 4}{v * \pi}}$$

Dove:

 $Q_{v}$ : portata del singolo ventilatore  $[m^{3}/s]$ .

v: velocità d'uscita del flusso dal singolo ventilatore [m/s].

La scelta è ricaduta su un ventilatore assiale fornito da CORAL S.P.A<sup>9</sup>. È stato preferito un ventilatore assiale rispetto ad uno centrifugo a causa dell'elevata portata volumetrica che era necessario gestire e della relativa bassa pressione che doveva essere applicata al fluido. Inoltre considerando il bisogno di posizionare più ventilatori in parallelo l'ingombro medio di un ventilatore assiale è inferiore rispetto ad uno centrifugo e dunque anche questo è stato un criterio di selezione.



Figura 39. Rappresentazione modello ventilatore assiale Coral s.p.a.

La Figura 39 è rappresentativa del modello scelto ovvero l'EF/D-EA1000/6. Di seguito le immagini relative alle caratteristiche tecniche e dimensionali.

Ventilatore • Ventilateur • Fan	Motore • Moteur • Motor	kW	kW ass.	n	LWA [dB]	Tolleranza sulla portata +5%           • Tolérance sur le débit + 5%         • Load tolerance +5%         • Durchsatztoleranz +5%         • Tolerancia respecto caudal +5%           Q [ m³/s]         Ps/Pt [Pa]																	
Ventilator     Ventilador     Moto	<ul> <li>Motor</li> </ul>	inst.				Q		Q		0		0			0		0		)	Q		Q	
	Motor					P <sub>s</sub>	Pt	P <sub>s</sub>	Pt	P <sub>s</sub>	Pt	P <sub>s</sub>	Pt	P <sub>s</sub>	Pt	P <sub>s</sub>	Pt	Ps	Pt	P <sub>s</sub>	Pt	P <sub>s</sub>	Pt
						8,58 8,61		9,25		9,86 10,44		),44	10	10,92		,31	11,72		12,14				
EF/D-EA1000/6	132	3	2.9	950	91	137	216	128	206	118	206	98	196	78	186	59	177	39	167	20	157	0	147
Tipo • Type • Type • Typ Tipo					Peso				Ventilatore • Ventilateur • Fan • Ventilator Ventilador														
Ventilat • Ventilateur • Ventilator Ventilator	ore • Fan entilador	Motore • Mateur • Mator • Mator Mator				Gewicht Peso     kg			d		d1 d2		D	E		F	(	G N			ø		
EF/D 100 EF/D 100 EF/D 100	00/4 00/6 00/8	160 M4 132 S6 112 M8				165 112 100			100	0	1067	11	07	630	3	15	945	13	45	24		14	

Figura 40. Caratteristiche tecniche e geometriche ventilatore

Il valore calcolato di diametro risulta essere maggiore rispetto a quello visibile in Figura 40, mentre il range di portate calcolate rientra in quelle caratteristiche del ventilatore selezionato a meno di quella minore. Tenendo in considerazione però che i calcoli precedentemente effettuati non considerano le perdite di carico nel circuito è dunque plausibile scegliere un ventilatore che possa elaborare una portata leggermente maggiore con un diametro di poco inferiore a quello di design, in modo tale da poter avere un flusso d'aria che in mandata abbia

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> azienda nata nel 1958 e che attualmente gestisce numerose società specializzate nella aspirazione e filtrazione dell'aria, nella depurazione dell'acqua e nel trattamento del rumore [30].

una componente di velocità superiore, la quale andrà man mano a ridursi a causa delle perdite di carico sul circuito, così da ottenere un valore allo sbocco prossimo a quello richiesto.

### 3.3.3. Parametri CFD

Si rimanda alla descrizione dei parametri che governano le simulazioni effettuate ai paragrafi 3.4.2 e 3.4.3 che corrispondono rispettivamente alla prova ideale e reale.

### 3.4. Descrizione delle simulazioni effettuate

Il seguente paragrafo sarà destinato alla descrizione dettagliata delle simulazioni effettuate. Partendo da un breve riassunto delle prove preliminari, si passerà all'analisi delle simulazioni chiave che hanno portato alla definizione delle due simulazioni a cui già precedentemente è stato fatto riferimento. Come affermato nel paragrafo 3.2.3, la prima preoccupazione è stata quella di verificare la possibilità di scalare il modello mantenendo costate la velocità d'ingresso del flusso. Tale principio si basa sulla seguente relazione:

$$Q_0 = \rho_0 v_0 D_0^2$$

Dove:

 $Q_0$ : è la portata in ingresso  $[m^3/s]$ .

 $\rho_0$ : è la densità del materiale componente il flusso  $[kg/m^3]$ .

 $v_0$ : è la velocità di immissione del flusso [m/s].

 $D_0$ : è la dimensione caratteristica del problema [m].

Sono state effettuate due set di simulazioni, utilizzando una geometria semplificata in 2D nella quale sono state riportate due lastre piane ravvicinate. Tale configurazione rappresenta lo spazio inter-deck della piattaforma di prova, area critica di simulazione sulla quale è stata posta la massima attenzione.



Figura 41. Geometria semplificata 2D validazione condizione di similitudine

Facendo riferimento alla Figura 41, il lato sinistro del dominio rappresenta l'Input, ovvero l'ingresso dell'aria che investirà le due lastre piane. Il lato destro, di conseguenza, rappresenta l'Output. Le pareti superiori e inferiori sono state modellate come Wall.

Le condizioni di Input e Output sono le stesse per entrambi i set di simulazione in modo tale da rispettare il principio di similitudine adottato (Tabella 15).

CONDIZIONI AL CONTORNO						
V_inlet	10 m/s					
P_outlet	0 Pa					
No slip condition	0 m/s					

#### Tabella 15. Condizioni al contorno per validazione modello di similitudine

Le caratteristiche del primo set di simulazione sono riportate in Tabella 16. Esse rappresentano le dimensioni reali alle quali si è fatto riferimento.

DIMENSIONI REALI						
Altezza (y)	35 m					
Lunghezza (x)	105 m					
Spessore Deck	1 m					
Lunghezza Deck	5 m					
Distanza inter-deck	5 m					
Re	1.15*10 <sup>6</sup>					

La geometria descritta è stata sfruttata per tre simulazioni che mettono a confronto, a parità di condizioni al contorno, i tre principali modelli numerici utilizzati per questo genere di problemi fluidodinamici: il "k- $\epsilon$ ", il "k- $\omega$ ", e lo "Spalart-Allmaras". I risultati sono visibili in Figura 42.



Figura 42. Risultati simulazioni con dimensioni reali (Alto a sinistra: k-e, altro a destra: k-w, in basso: SA)

Lo stesso approccio è stato utilizzato per il secondo set di simulazione nelle quali è stata scalata la geometria con scala 1:10. Anche in questo caso sono state effettuate 3 simulazioni sfruttando gli stessi modelli numerici. La Tabella 17 riporta le caratteristiche geometriche del secondo set di simulazioni.

DIMENSIONI SCALATE						
Altezza (y)	3,5 m					
Lunghezza (x)	10,5 m					
Spessore Deck	0,1 m					
Lunghezza Deck	0,5 m					
Distanza inter-deck	0,5 m					
Re	1.15*10 <sup>5</sup>					

Tabella 17. Dimensione scalate (secondo set di simulazioni)

Al fine di confrontare i risultati del primo e del secondo set di simulazioni in termini di profili di velocità, sono stati tracciati dei grafici rappresentati l'andamento delle velocità lungo l'asse delle Y. In particolare si è posta attenzione: all'imbocco delle due lastre, alla parte centrale e allo sbocco delle stesse.



Figura 43. Confronto tra le due geometrie all'imbocco (in alto: REALE, in basso: SCALATA)



Figura 44. Confronto tra le due geometrie al centro (in alto: REALE, in basso: SCALATA)



Figura 45. Confronto tra le due geometrie allo sbocco (in alto: REALE, in basso: SCALATA)

Dall'analisi delle Figura 43, Figura 44 e Figura 45, è possibile vedere come i profili di velocità, in tutte e tre le posizioni in cui sono stati rilevati, sono pressoché sovrapponibili. Le uniche differenze sono dovute ai diversi modelli numerici adottati. In particolar modo la linea in rosso rappresenta il modello "Spalart Allmaras", la linea in verde il modello "k- $\omega$ " mentre quella in blu il modello "k- $\epsilon$ ". È possibile dunque affermare che indifferentemente dal modello numerico che si adotti il problema che si vuole studiare può essere scalato sfruttando il principio della costanza della velocità in ingresso. Partendo da questo risultato sono state portate avanti numerose prove con geometrie in scala 1:10.

# 3.4.1. Storico delle simulazioni

Prima di descrivere l'evoluzione delle prove effettuate è necessario premettere che non è stato ritenuto utile l'analisi dettagliata di ogni simulazione. Al fine di rendere più fruibile l'analisi è stato deciso di raggruppare le simulazioni in 5 grandi gruppi. Il passaggio da un gruppo al successivo rappresenta la risoluzione di una criticità e uno step verso le simulazioni finali. I riferimenti di tutte le simulazioni portate avanti sono consultabili nell'APPENDICE A.

 Gruppo 1: Fanno parte di questo gruppo le simulazioni 1 e 1\*, sono le prime simulazione in 3D in cui è stato generato il flusso, cercando fin dal principio di essere fedeli alle caratteristiche geometriche del laboratorio. In entrambe le prove il laboratorio è stato modellato utilizzando le dimensioni in Tabella 6. Il volume è completamente sgombro e le aperture per l'immissione e l'estrazione del flusso sono laterali rispetto alla direzione dello stesso. Utilizzando tale configurazione sono state riscontrate numerose criticità come: la difficoltà di generare un flusso costante anche variando le condizioni al contorno in aspirazione, l'elevata turbolenza dovuta all'interazione non controllata tra il flusso e le pareti del laboratorio, e una notevole difficoltà nell'estrarre l'aria. Un esempio delle streamline generate in queste simulazioni è raffigurato in Figura 46.



Figura 46. Streamline simulazione 1\*

• **Gruppo 2:** Fanno parte di questo gruppo le simulazioni dalla 2 alla 6. Considerata la notevole difficoltà nel gestire la turbolenza generata dall'interazione tra il flusso e la parete di fondo del laboratorio e, tenendo conto che solo parzialmente il flusso viene estratto attraverso l'apposita apertura, in questo slot di simulazione è stata introdotta una camera di ristagno, soluzione geometrica della quale si è trattato nel paragrafo 3.3.1. Questa modifica ha permesso di migliorare notevolmente la capacità

d'estrazione dell'aria e ha ridotto drasticamente l'aria che, impattando con la parete di fondo, ricircolava nella zona destinata alla prova sperimentale. Altra modifica è stata realizzata circa il canale di immissione dell'aria. Il condotto laterale è stato modificato ed è stato posizionato sull'asse del flusso. A causa di questa semplificazione tale raggruppamento fa parte delle prove "ideali". La differenza fra le varie simulazioni risiede proprio nella geometria del condotto d'immissione dell'aria, le Figure Figura 47 e Figura 48 sono due esempi.



Figura 47. Canale immissione aria Simulazione 2



Figura 48. Canale immissione aria Simulazione 6

In questo gruppo ancora non è presente l'intercapedine e il volume del laboratorio è pressoché sgombro, a meno della parete della camera di ristagno e del condotto cilindrico d'immissione dell'aria.

I risultati sono incoraggianti dal punto di vista della gestione della turbolenza, molto meno per quanto riguarda la capacità di realizzare un flusso omogeneo. Un esempio di streamline generate è raffigurato in Figura 49.



Figura 49. Streamline Simulazione 3

• **Gruppo 3:** Fanno parte di questo gruppo le simulazioni dalla 7 alla 9. In questo slot di prove è stata mantenuta la camera di ristagno ed è stato deciso di semplificare ulteriormente la geometria del canale d'immissione dell'aria. In particolare è stato sostituito il canale conico divergente con un condotto cilindrico a sezione costante come visibile in Figura 50.



Figura 50. Geometria Simulazione 7

Questo ha permesso di modellare semplicemente il flusso d'aria e renderlo omogeno. È da sottolineare che questo set di simulazioni rappresenta la base di partenza su cui è basata la simulazione di riferimento "ideale". La simulazione più rappresentativa di questo gruppo è la Simulazione 9 poiché in quest'ultima è stato modellato anche l'intercapedine di immissione ed estrazione dell'aria. Inoltre l'unica bocchetta d'estrazione cilindrica è stata sostituita con tre aperture quadrate con superficie pari a 1 m<sup>2</sup> ciascuna. In Figura 51 sono rappresentate le streamline ottenute.



Figura 51. Streamline Simulazione 9

• **Gruppo 4:** Fanno parte di questo gruppo le simulazioni dalla 10 alla 12. Questo è il set di prove che definisce la simulazione "ideale". In particolare la geometria è stata mantenuta uguale all'ultima simulazione appartenente al gruppo 3 ma con l'inserimento della piattaforma nel volume di prova.



Figura 52. Geometria Simulazione 10\*

La Figura 52 mostra la geometria di una delle prove effettuate. Oltre alla piattaforma è da notare un accorgimento, ovvero quello di spostare verso il basso sia il condotto di
immissione dell'aria che il foro della camera di ristagno. Questo ha consentito di posizionare correttamente la piattaforma e di effettuare delle prove coerenti con la realtà. In questo gruppo è stato fatto un ulteriore passo in avanti con l'inserimento di una seconda parete divisoria per separare la zona di aspirazione dell'aria da quella della prova sperimentale. Tale soluzione geometrica è stata ritenuta necessaria considerando che nella reale configurazione del laboratorio l'aria non potrà essere immessa assialmente e dunque, essendo l'aspirazione laterale, si genereranno condizioni simili alla camera di ristagno.



Figura 53. Particolare pareti divisore Simulazione 12

La Figura 53 mostra chiaramente come il volume del laboratorio sia stato diviso in 3 zone, partendo da sinistra verso destra troviamo: la camera di aspirazione, la zona di prova ed infine la camera di ristagno. Altro particolare da sottolineare è l'apertura laterale quadrata di 2 m<sup>2</sup> di superficie che rappresenta il foro d'immissione dell'aria aspirata dai ventilatori.

Gruppo 5: Fanno parte di questo gruppo le simulazioni dalla 13 alla 17. Tale
raggruppamento rappresenta il passaggio da simulazioni ideali a simulazioni reali. La
netta distinzione rispetto ai gruppi di prove precedenti è l'inserimento di più
ventilatori in parallelo necessari a generare un flusso simile a quello ideale come
visibile in Figura 54. La doppia separazione del volume del laboratorio è stata
mantenuta, ma si è deciso di non simulare l'area della camera d'aspirazione come già
precedentemente spiegato nel paragrafo 3.3.1.



Figura 54. Geometria Simulazione 13

### 3.4.2. Soluzione ideale di riferimento

Come già evidenziato precedentemente, con soluzione ideale di riferimento s'intende quella simulazione che descrive il problema senza tener conto delle soluzioni tecniche necessarie all'immissione dell'aria nel laboratorio. In questo paragrafo verrà trattato in particolare l'iter di setup della simulazione tralasciando gli aspetti geometrici già trattati nel paragrafo 3.3.1. Verrà posta particolare attenzione alla generazione della mesh e alle impostazioni del risolutore (Fluent).

#### a) Geometria

In questo spazio ci si limita a descrivere visivamente la geometria tramite la Figura 55. L'unico accorgimento introdotto è stato quello di modificare la lunghezza del condotto d'immissione dell'aria, passando da 3 a 5 m. Tale soluzione è stata necessaria per rendere uguali le dimensioni della camera di prova tra simulazione reale ed ideale, altrimenti, il posizionamento della piattaforma nel volume libero del laboratorio non sarebbe stato corrispondente e qualsiasi confronto avrebbe perso di significato.



Figura 55. Geometria Simulazione "ideale"

b) Mesh

La generazione della mesh è stata effettuata attraverso un tool installato nel pacchetto di ANSYS, in particolare c'è la possibilità di modellare un flusso fluido attraverso un apposito set di applicativi preimpostati come visibile in Figura 56.



Figura 56. Modello base simulazioni flusso fluido

Sfruttando il "meshing", ovvero l'applicativo nel riquadro rosso, è possibile impostare qualsiasi parametro di mesh al fine di ottenere la personalizzazione desiderata. Nel caso della simulazione ideale è stata ottenuta la seguente mesh (Figura 57).



Figura 57. Vista mesh lungo piano longitudinale del laboratorio (ideale)

Tale risultato è stato possibile modificando i parametri di default che il "meshing" utilizza. In particolare la Figura 58 mostra il dettaglio dei valori utilizzati per la mesh di base.

De	Details of "Mesh" 4					
	Display					
	Display Style	Body Color				
Ξ	Defaults	·				
	Physics Preference	CFD				
	Solver Preference	Fluent				
	Relevance	0				
	Export Format	Standard				
	Element Order	Linear				
Ξ	Sizing					
	Size Function	Proximity and Curvature				
	Relevance Center	Fine				
	Max Face Size	0.250 m				
	Mesh Defeaturing	Yes				
	Defeature Size	Default (1.25e-003 m)				
	Transition	Slow				
	Growth Rate	Default (1.20)				
	Span Angle Center	Fine				
	Min Size	Default (2.5e-003 m)				
	Max Tet Size	Default (0.50 m)				
	Curvature Nor.	5.0 °				
	Proximity Min	Default (2.5e-003 m)				
	Num Cells Acr	Default (3)				
	Proximity Size Fu	Faces and Edges				
	Bounding Box Di	21.3080 m				
	Minimum Edge L	1.2005e-003 m				
Ŧ	Quality					
+	Inflation					
+	Assembly Meshing	1				
+	Advanced					
÷	Statistics					

Figura 58. Dettagli mesh di base Simulazione "Ideale"

I parametri cerchiati in rosso sono quelli modificati ai fini della simulazione. Il primo parametro definito "Size Function" è stato impostato su Proximity and Curvature, ciò consente di infittire la mesh nel caso in cui si è in prossimità di un ostacolo, quale potrebbe essere un Wall o una contact region<sup>10</sup>, oppure in prossimità di una curva o uno spigolo. Questo ha consentito la generazione di una mesh più rada nelle zone lontane dalla piattaforma e più densa nei pressi della stessa. Il secondo parametro "Max Face Size" è stato impostato pari a 0.25 m, l'obiettivo è quello di ottenere una qualità della mesh mediamente superiore. Terzo parametro modificato è definito "Curvature Normal Angle" ovvero l'angolo massimo ammissibile che può essere applicato su un bordo di un elemento ed è stato impostato pari a 5°.

Tale modifica dei parametri di base non è sufficiente ad ottenere una mesh che riesca a descrivere adeguatamente i fenomeni di interazione tra il flusso e la piattaforma. La regione di spazio che si vuole indagare deve essere ulteriormente rifinita, questo è possibile tramite degli appositi strumenti del "meshing" e tramite degli escamotage geometrici introdotti.

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Per contact region si intende una superficie che si genera dall'intersezione di due solidi.



Figura 59. Personalizzazione parametri di mesh

Come si vede dalla Figura 59, sono state aggiunti alla mesh di base quattro opzioni:

- **Path Conforming Method:** Definisce il metodo geometrico per realizzare la mesh, è stato applicato a tutta la geometria ed impostato su tetraedrico. Questo permette una elevata adattabilità della mesh alle geometrie complesse realizzate.
- Body Sizing: Consente la riduzione della superficie massima degli elementi della mesh sovrascrivendo i parametri di base precedentemente impostati. Con l'obiettivo di aumentare la densità di elementi lungo tutto il percorso del flusso d'aria, è stato realizzato un condotto fittizio che collega il foro di immissione dell'aria con quello della parete di ristagno. Sono stati dunque selezionati il solido cilindrico, insieme al canale d'immissione e ai fori di estrazione dell'aria ed è stata modificata la grandezza massima delle celle impostandola pari a 0.1 m.



Figura 60. Elementi interessati dal Body Sizing (ideale)

• **Contact Sizing:** Mettendo due solidi a contatto si creano delle superfici di intersezione o contact region. Nell'eventualità che la mesh dei due corpi segua dei criteri dimensionali differenti, agire sul contact sizing mitiga le differenze creando una zona di transizione. Nella geometria che si sta descrivendo sono presenti 8 contact region e, avendo i corpi a contatto dimensioni di mesh pari a 0.25 e 0.1 m, è stato deciso di impostare la dimensione della zona di transizione pari a 0.15 m



Figura 61. Particolare contact region tra il flusso e la camera di ristagno

Inflation: è uno strumento che consente di realizzare dei layer, ovvero una regione di spazio con mesh a geometria rettangolare, come a creare una sorta di contorno della figura. Vengono utilizzati quando il flusso interagisce con una parete o con una struttura e sono necessari a catturare gli effetti dello strato limite. Nel nostro caso ne sono stati generati 3: il primo in Figura 62 inserito lungo le pareti del canale di immissione, il secondo visibile in Figura 63 posizionato lungo le pareti della piattaforma ed infine l'ultimo visibile in Figura 64 inserito lungo le pareti delle bocchette d'estrazione.



Figura 62. inflation layer canale immissione aria



Figura 63. Inflation layer Piattaforma



Figura 64. inflation Layer bocchette d'estrazione dell'aria

La mesh così generata riesce a descrivere adeguatamente tutti i fenomeni presenti nel flusso, sia lo strato limite generato dall'avanzamento del flusso sopra una superficie ferma, sia gli effetti vorticosi generati dall'interazione con gli ostacoli. Per ottimizzare il modello numerico da scegliere, è stato estrapolato l'andamento del Wall y+ lungo le pareti della piattaforma (area critica per lo studio desiderato). I risultati sono visibili in Figura 65.



Figura 65. Andamento WallY+ lungo le pareti della piattaforma (Ideale)

Dall'analisi dei risultati ottenuti si evince che circa l'80% dei valori di Wall Y+ è inferiore a 60, questo ci permette di affermare che la qualità della mesh a contatto con la piattaforma è particolarmente fine e dunque si ha bisogno di un modello numerico studiato per bassi valori di Wall Y+.

Altri parametri di qualità della mesh sono estraibili da statistiche effettuate direttamente nel "meshing". I dati riguardanti la mesh della soluzione ideale sono riportati in Tabella 18.

MESH IDEALE					
Effective Value Ideal Value					
N° Elements	1957K				
Elements quality	0.8	1			
Aspect ratio	4	1			
Skewness	0.24	0			

Tabella 18. parametri di qualità mesh ideale

#### c) Setup and Solution (Fluent)

Aggiornando il blocco di lavoro con la geometria e la mesh precedentemente descritte, è possibile proseguire impostando i parametri che saranno necessari ad avviare la simulazione fluidodinamica in ANSYS Fluent. In particolar modo verranno analizzati i blocchi Setup e Solution visibili nel riquadro rosso in Figura 66.



Figura 66. Tool Setup e Solution di ANSYS Fluent

Partendo dal Setup, visibile in Figura 67, è possibile agire su un grande numero di variabili che possono influire sul risultato finale della simulazione. Verranno analizzati solamente i parametri che sono stati modificati rispetto ai valori di default. Per tutti gli altri è stato ritenuto opportuno non agire.



Figura 67. Schermata Impostazioni base Fluent

• **General:** Consente di impostare i parametri generali del solver, come per esempio se si tratta di una simulazione "Steady" o "Transient", oppure se il fluido è comprimibile o meno.

Scale	Check	Report Quality
Display		
Solver		
Гуре	Velo	city Formulation
	rod 🔘	Abcoluto
Pressure-Ba	seu 🔍	Absolute
<ul> <li>Density-Base</li> </ul>	ed O	Relative
Density-Base	ed O	Relative
<ul> <li>Pressure-Bas</li> <li>Density-Bas</li> <li>Time</li> </ul>	ed O	Relative
<ul> <li>Pressure-Base</li> <li>Density-Base</li> <li>Time</li> <li>Steady</li> </ul>	ed O	Relative

Figura 68. Schermata impostazioni General.

Come visibile in Figura 68, è stato scelto di procedere con simulazioni in condizioni Steady state. Il modello risolutivo scelto è pressure-based, ovvero l'aria è stata considerata come fluido incomprimibile (l'aria alle velocità considerate può essere ritenuta tale).

 Models: In questa finestra è possibile modificare il modello numerico o l'insieme di equazioni differenziali che andranno a comporre la soluzione finale. Nel caso preso in esame, essendo lo studio puramente fluidodinamico e la specie in gioco solamente aria, l'unica modifica ai parametri di default è stato inserire un modello che tenesse conto della turbolenza. Consapevoli delle considerazioni fatte nel paragrafo 2.2 e nella sezione relativa alla mesh e ponendo attenzione soprattutto a ciò che succede nello spazio fra i piani della piattaforma, area maggiormente colpita in caso di rilascio incidentale da serbatoio, è necessario l'utilizzo di un modello ottimizzato per cogliere gli effetti di interazione tra fluido e struttura. Il modello scelto è il "k- $\omega$  SST" poiché capace di combinare la forza del modello "k- $\omega$ " nell'analizzare gli effetti di bordo (senza l'utilizzo delle wall function) e la forza del modello "k- $\epsilon$ " per gli effetti di core lontani dalle strutture o dalle pareti. L'impostazione dei vari parametri è visibile in Figura 69.

🔽 Visseus Mastel

Model O Inviscid O Laminar	Model Constants Alpha*_inf 1
<ul> <li>Spalart-Allmaras (1 eqn)</li> <li>k-epsilon (2 eqn)</li> <li>k-omega (2 eqn)</li> <li>Transition k-kl-omega (3 eqn)</li> </ul>	Alpha_inf 0.52 Beta*_inf
<ul> <li>Transition SST (4 eqn)</li> <li>Reynolds Stress (7 eqn)</li> </ul>	0.09 a1
<ul> <li>Scale-Adaptive Simulation (SAS)</li> <li>Detached Eddy Simulation (DES)</li> </ul>	0.31
O Large Eddy Simulation (LES)	0.075
k-omega Model O Standard	Beta_i (Outer) 0.0828
SST	TKE (Inner) Prandtl #
k-omega Options	TKE (Outer) Prandtl #
Options	SDR (Inner) Prandtl #
Curvature Correction  Production Kato-Launder  Production Limiter	User-Defined Functions
Intermittency Transition Model	none

Figura 69. Schermata impostazione modello di turbolenza

 Boundaries Conditions: Con la medesima geometria e mesh sono state eseguiti tre set di simulazioni che differiscono solo per le condizioni al contorno utilizzate. In particolare è stata variata la velocità d'immissione nel dominio al fine di simulare il range di velocità alla quale la struttura può essere soggetta nella realtà. Nella Figura 70 sono rappresentate le superfici di inlet e di outlet.



Figura 70. Superfici di inlet e outlet simulazione "ideale"

Altra condizione imposta è quella di no slip condition ovvero di Wall. Le pareti sono state divise tra pareti esterne ed interne. Le prime costituiscono la struttura del laboratorio e delle divisioni realizzate, le seconde invece costituiscono le pareti dei condotti di immissione e di estrazione dell'aria.



Figura 71. Wall interni ed esterni simulazione Ideale

La Tabella 19 riporta tutti i valori con cui sono state portate avanti le tre simulazioni:

CONDIZIONI AL CONTORNO						
N Prova	Inlet	Outlet				
1	$v_{in} = 5 m/s$	$P_{out} = 0 \Delta P$				
2	$v_{in} = 6 m/s$	$P_{out} = 0 \Delta P$				
3	$v_{in} = 7 m/s$	$P_{out} = 0 \Delta P$				

Passando ora alla definizione della Solution, sarà necessario impostare lo schema di discretizzazione spaziale desiderato, inizializzare il problema ed infine avviare la simulazione fino a quando non si raggiunga la convergenza o una situazione di stazionarietà dei residui.

Solution Methods	
Pressure-Velocity Coupling	
Scheme	
SIMPLE	•
Spatial Discretization	
Gradient	^
Least Squares Cell Based 🔹	
Pressure	
Second Order 🔹	
Momentum	
Second Order Upwind 🔻	
Turbulent Kinetic Energy	
Second Order Upwind 🔻	
Specific Dissipation Rate	
Second Order Upwind 🔻	
	×

Figura 72. Schermata impostazione schema di discretizzazione spaziale

In Figura 72 possiamo vedere lo schema di discretizzazione utilizzato. Unica modifica rispetto alle impostazioni di default è stato l'utilizzo del Second Order Upwind method sia nell'energia cinetica della turbolenza che nell'indice di dissipazione poiché ritenuto più affidabile. È stata

utilizzata un'inizializzazione hybrid ed è stato fatto girare il programma per 2000 iterazione anche se la stabilità era raggiunta già verso i 1400 steps come visibile in Figura 73.



Figura 73. Andamento dei Residui simulazione ideale 7 m/s

#### 3.4.3. Soluzione reale

In relazione alla simulazione reale, l'approccio seguito per la definizione dei parametri funzionali alla prova è similare a quello effettuato precedentemente. Questo è dovuto alla necessità di realizzare delle prove che fossero confrontabili. In questo paragrafo si seguirà lo stesso iter della simulazione ideale tralasciando però i parametri simili e ponendo attenzione solamente alle differenze.

#### a) Geometria

In questo spazio ci si limita a descrivere visivamente la geometria tramite la Figura 74. Particolari interessanti da notare sono il condotto convergente che racchiude i cinque ventilatori, la doppia parete che separa il laboratorio in tre volumi, e la riduzione del dominio di calcolo.



Figura 74. Geometria simulazione "reale"

#### b) Mesh

In relazione alla generazione della mesh sono stato utilizzate le stesse modifiche rispetto alle condizioni di default della simulazione ideale, infatti, per questo motivo, il risultato finale è confrontabile (Figura 75).



Figura 75. Vista mesh lungo piano longitudinale del laboratorio (reale)

Le differenze tra le due prove risiedono in:

- Numero di contact region, che in questo caso passano da 8 a 13 (tale aumento è dovuto all'introduzioni dei cinque solidi che modellano i ventilatori). Coerentemente a quanto affermato all'inizio del paragrafo, la scelta dimensionale nel modellare il contact sizing è il medesimo della simulazione ideale.
- Numero di corpi interessati dal Body Sizing che questa volta comprende anche i 5 ventilatori come visibile in Figura 76.



Figura 76. Elementi interessati dal Body Sizing (reale)

• Nell'incremento del numero di inflation, infatti, oltre ai precedenti, vanno aggiunti i layer dei condotti dei singoli ventilatori visibili in Figura 77.



Figura 77. Inflatio Layer Ventilatori

Anche in questo caso è stato analizzato l'andamento del Wall Y+ lungo le pareti della piattaforma per verificare la corretta esecuzione della mesh.



Figura 78. Andamento WallY+ lungo le pareti della piattaforma (reale)

Dall'analisi della Figura 78 e dal confronto con la Figura 73, si può notare come anche in questo caso la maggior parte dei valori di Wall Y+ sia minore di 60. Anche se, rispetto alla precedente configurazione tale numero si attesta intorno al 70%, è comunque stato ritenuto sufficiente per applicare lo stesso metodo numerico di risoluzione. Altri parametri di qualità della mesh sono estraibili da statistiche effettuate direttamente nel "meshing". I dati riguardanti la mesh della soluzione reale sono riportati in Tabella 20.

#### Tabella 20. parametri di qualità mesh reale

MESH REALE						
Effective Value Ideal Value						
N° Elements	1757K					
Elements quality	0.79	1				
Aspect ratio	4.2	1				
Skewness	0.24	0				

#### c) Setup and Solution (Fluent)

Per quanto riguarda le impostazioni di Setup e Solution valgono le stesse considerazioni effettuate durante la trattazione della simulazione ideale, ad eccezione delle boundaries conditions. In questo caso è stato effettuato un bilancio di portata che ha permesso di calcolare quale fosse la portata massica necessaria in ingresso ad ogni ventilatore. Tale parametro è stato dunque usato come condizione al contorno di input per le tre simulazioni effettuate.

In Figura 79 sono visibili le nuove superfici di input, mentre la superficie di output è rimasta invariata. Per quanto riguarda le pareti la Figura 80 riporta le nuove superfici modellate con no slip condition (v=0).



Figura 79. Superfici di inlet geometria reale



Figura 80. Superfici di Wall geometria reale

#### La Tabella 21 riassume il set di prove effettuate.

Tabella 21. Riepilogo Condizioni al contorno simulazione reale	Tabella 2	21.	Riepilogo	Condizioni	al	contorno	simul	lazione	reale
--	-----------	-----	-----------	------------	----	----------	-------	---------	-------

CONDIZIONI AL CONTORNO						
N Prova	Inlet	Outlet				
1	$\dot{M} = 12 \ kg/s$	$P_{out} = 0 \Delta P$				
2	$\dot{M} = 10 \ kg/s$	$P_{out} = 0 \Delta P$				
3	$\dot{M} = 8.5 \ kg/s$	$P_{out} = 0 \Delta P$				

Anche in questo caso si riporta l'andamento dei residui per verificare che si sia raggiunto il medesimo grado di convergenza (Figura 81).



Figura 81. Andamento dei Residui simulazione reale 7 m/s

## 4. Risultati

I risultati delle simulazioni trattate nei paragrafi 3.4.2 e 3.4.3 verranno mostrati ed analizzati nel seguente capitolo. L'obiettivo delle prove effettuate era quello di riuscire a realizzare un flusso d'aria omogeneo che investisse la piattaforma in maniera simile alla realtà. La discussione sarà dunque incentrata sul confronto dei profili di velocità all'interno dei deck della piattaforma nelle due configurazioni, al fine di constatare il conseguimento degli obiettivi prefissati.

### 4.1. Analisi dei Contour.

Al fine di ottenere dei risultati confrontabili, le due simulazioni sono state eseguite sullo stesso foglio di calcolo in modo da poter effettuare un post-processing comune, senza possibilità di introdurre delle imprecisioni nella scelta delle aree di confronto. Sono stati realizzati tre post-processing ciascuno dei quali coinvolge una simulazione reale ed una ideale a parità di velocità di input, come visibile in Figura 82.



Figura 82. Foglio di lavoro ANSYS 18.2

Attraverso il tool Results implementato in ANSYS, è possibile rendere evidenti le soluzioni calcolate tramite il risolutore. Nel dettaglio si vogliono evidenziare gli andamenti delle velocità. È possibile effettuare una prima verifica in maniera globale tramite dei "Contour" ovvero delle mappe che fanno corrispondere alla variazione di colore il gradiente di velocità presente. Per fare ciò è necessario costruire dei piani immaginari sui quali disegnare tali mappe.



Figura 83. Piani di costruzione per la visualizzazione dei Contour

La Figura 83 mostra i 4 piani necessari al confronto, in particolare:

- **Piano 1 (xy):** è il piano longitudinale, divide in due parti l'area del laboratorio lungo la direzione del flusso. Tale piano è necessario per evidenziare il comportamento del flusso dall'inlet alla camera di ristagno e riscontrare possibili differenze critiche.
- **Piano 2 (zx):** è il piano che caratterizza l'andamento della velocità sul primo deck della piattaforma.
- **Piano 3 (zx):** è il piano che caratterizza l'andamento della velocità sul secondo deck della piattaforma.
- **Piano 4 (zx):** è il piano che caratterizza l'andamento della velocità sul terzo deck della piattaforma.

La Tabella 22 riporta le coordinate geometriche dei piani precedentemente definiti (è necessario tenere in considerazione che il sistema di riferimento è centrato rispetto alla faccia sinistra del laboratorio, quella della camera di aspirazione).

DISPOSIZIONE PIANI							
Piano	XY	XZ	YZ	x	У	z	
Piano 1	Х			/	/	0	
Piano 2		Х		/	-1.5	/	
Piano 3		Х		/	-2.15	/	
Piano 4		x		/	-2.75	/	

Tabella 22. Disposizione nello spazio dei piani di costruzione

Vengono riportate di seguito le figure rappresentati i contour appena descritti.



Figura 84. Contour relativi al Piano 1, raffigurate rispettivamente le velocità di 5, 6 e 7 m/s



Figura 85. Contour relativi al Piano 2, raffigurate rispettivamente le velocità di 5, 6 e 7 m/s



Figura 86. Contour relativi al Piano 3, raffigurate rispettivamente le velocità di 5, 6 e 7 m/s



Figura 87. Contour relativi al Piano 4, raffigurate rispettivamente le velocità di 5, 6 e 7 m/s

Dalla Figura 84 si evince il diverso impatto che il flusso generato nelle due configurazioni ha con la piattaforma. Mentre nell'immagine di sinistra, raffigurante la soluzione ideale, il flusso è omogeneo ed investe completamente la piattaforma, nell'immagine di destra relativa alla configurazione reale, si vede solamente il flusso del ventilatore centrale. Sono praticamente quasi trascurabili gli effetti degli altri ventilatori. Questo è giustificabile considerato il posizionamento nello spazio dei 5 ventilatore rispetto al piano scelto per la rappresentazione. Quella rappresentata è la condizione peggiore che si verifica nel volume interessato dalla piattaforma. Una caratteristica che può essere evidenziata è la tendenza del flusso generato dal ventilatore centrale di abbassarsi leggermente durante il suo cammino. Tale fenomeno è dovuto probabilmente agli effetti di contropressione dovuti agli ostacoli presenti all'imbocco del deck 1 e del deck 2 e assenti invece nel deck 3. Sia per la simulazione reale che per quella ideale è possibile affermare inoltre che il Contour della velocità rimane pressoché invariato al variare della stessa, le differenze si possono cogliere solamente negli effetti di bordo i quali risultano più marcati per velocità maggiori.

Passando alla Figura 85, essa rappresenta il deck 1 ovvero il piano più esterno della piattaforma nel quale è presente il solo living quarter. Dalle mappe si evince che ci sono alcune differenze tra la simulazione reale e quella ideale, in particolare, riferendosi alla simulazione ideale, il flusso tende ad aprirsi a contatto con l'ostacolo e a richiudersi una volta superato lo stesso. Tale fenomeno è meno evidente nelle simulazioni reali dove il flusso sembrerebbe non richiudersi alle spalle dell'ostacolo ma procedere separato. Questo effetto è accentuato per velocità ridotte. Tenendo in considerazione che, il fine ultimo di questo laboratorio saranno prove di dispersione di inquinante, il rilascio della sostanza di prova avverrà nei deck 2 e 3 poiché interessati da potenziali eventi incidentali. La fluidodinamica del deck 1, non essendo interessato dal fenomeno sperimentale, può essere considerata accettabile a questo livello di progettazione.

L'andamento del flusso attraverso il deck 2 è raffigurato nella Figura 86. Anche in questo caso è chiara la differente omogeneità del flusso in ingresso alla piattaforma anche se, una volta entrato, è presente una quasi perfetta sovrapponibilità della mappa. Il flusso interagisce con gli ostacoli presenti in maniera similare. Questo è il risultato desiderato poiché questo deck sarà quello oggetto delle prove di rilascio, e la coerenza della fluidodinamica è necessaria per validare il modello creato. In questo caso si sottolinea che per velocità intermedie il flusso ideale e quello reale sono sovrapponibili, mentre per le velocità inferiori e superiori sono presenti dei picchi differenti tra le due prove.

L'ultima rappresentazione (Figura 87) è riferita al deck 3. Anche in questo caso sono state ottenute delle mappe molto simili, il flusso attraversa gli ostacoli ugualmente sia nella prova ideale che in quella reale. La differenza principale in questo piano è il valore della velocità che nelle prove reali risulta maggiore. Questo è dovuto al fenomeno precedentemente descritto, ovvero che il flusso del ventilatore centrale insiste prevalentemente su questo deck e, non essendoci ostacoli all'imbocco che possano schermarlo, questo si sviluppa con maggiore intensità rispetto al flusso omogeneo della simulazione ideale. L'effetto di tale fenomeno è meno marcato per velocità minori.

Per completezza viene riportato anche un ulteriore piano. Si tratta di un piano ZY ed è stato posizionato allo sbocco del canale d'immissione dell'aria per comprendere visivamente la diversa omogeneità dei flussi.



Figura 88. Contour Piano 5 per velocità di input pari a 5 m/s

La Figura 88 mostra i risultati dei Contour. È chiaramente visibile come nell'immagine di sinistra, relativa alla configurazione ideale, l'intero flusso uscente dal condotto cilindrico sia alla stessa velocità. Contrariamente nell'immagine di destra, relativa alla configurazione reale, sono facilmente riconoscibili i 5 flussi relativi ai rispettivi ventilatori assiali. L'omogeneità del flusso non è raggiunta.

### 4.2. Analisi dei profili di velocità

Con l'obiettivo di approfondire l'analisi appena introdotta, sono stati identificati i profili di velocità sia all'interno dei piani della piattaforma sia all'imbocco della stessa, in modo da poter effettuare un confronto puntuale della grandezza d'interesse. Per effettuare questo studio è stato necessario tracciare delle linee di costruzione all'interno del dominio e plottare lungo di esse l'andamento della velocità. La Figura 89 mostra in quali aree sono state tracciate le linee.



Figura 89. Linee di costruzione per la visualizzazione dei profili di velocità

In particolare sono state definite 4 linee: una per l'imbocco ed una per ogni deck. La prima (A) è parallela all'asse delle y, mentre le rimanenti (B, C, D) sono parallele all'asse delle z. La scelta del posizionamento di questi strumenti geometrici è stata fatta cercando di cogliere i fenomeni di interazione con gli ostacoli, per verificare che essi siano coerenti nelle due configurazioni studiate. La Tabella 23 riassume le coordinate spaziali delle linee.

DISPOSIZIONE LINEE							
LINEA	Z						
۸	6	-1	0				
A	6	-4	0				
D	6.75	-1.5	-1.5				
D	6.75	-1.5	1.5				
C	6.75	-2.15	-1.5				
Ľ	6.75	-2.15	1.5				
	7.5	-2.75	-1.5				
	7.5	-2.75	1.5				

Tabella 23. Disposizione nello spazio delle linee di costruzione

Vengono riportate di seguito le figure rappresentati i profili di velocità a confronto. In particolare, in rosso è visibile l'andamento della velocità nella simulazione ideale mentre in blu quello nella simulazione reale. Considerando che il paragone tra le diverse velocità è stato già effettuato nell'analisi dei contour, al fine di non appesantire la lettura dei risultati si è deciso di concentrare l'attenzione sulla simulazione intermedia a velocità di 6 m/s. I profili di velocità relativi alle altre due prove saranno consultabili nell'APPENDICE B.



Figura 90. Profilo delle velocità all'imbocco della piattaforma lungo la linea A

La Figura 90 rappresenta il profilo delle velocità relativo all'imbocco della piattaforma. Come atteso, i profili differiscono sia per forma che per valori di velocità. Tale comportamento è imputabile alla diversa omogeneità dei flussi che impattano sulla piattaforma. Analizzando il grafico è possibile vedere la suddivisione in deck, in particolare ogni volta che le curve vanno a zero è sintomo che esse intersecano un ostacolo. Il primo zero delle curve è più marcato poiché all'imbocco del deck 1 è presente il living quarter. Facendo uno zoom sui deck 2 e 3 è possibile vedere come in realtà la forma è simile ma ci sono differenze sulla magnitudo della velocità. Questo è in accordo con le mappe mostrate nel paragrafo precedente. Per quanto riguarda invece il deck 1 e la parte terminale della piattaforma le differenze tra simulazione ideale e reale sono accentuate.



Figura 91. Profilo delle velocità del deck 1 della piattaforma lungo la linea B

Come precedentemente accennato e come mostra chiaramente la Figura 91, il profilo di velocità nel primo piano della piattaforma è distante dalla sovrapponibilità. L'interazione con l'unico ostacolo, il living quarter, è differente. Questo è facilmente spiegabile se messa in relazione con la Figura 85. Nella simulazione reale i due flussi fluidi generati dai due ventilatori superiori impattano l'ostacolo senza omogeneizzarsi nel canale cilindrico, la conseguenza è la differente interazione con il corpo solido. Inoltre essendo la velocità leggermente superiore, anche i picchi più pronunciati del profilo reale rispetto a quello ideale sono comprensibili.



Figura 92. Profilo delle velocità del deck 2 della piattaforma lungo la linea C

La Figura 92 è la più rappresentativa, ed è quella che mostra i profili di velocità nel deck 2. In questo piano è possibile affermare che la sovrapponibilità è pressoché totale, sia la forma che il valore numerico della velocità sono confrontabili a meno dei due picchi centrali che si discostano dal valore ideale di circa il 10%.



Figura 93. Profilo delle velocità del deck 3 della piattaforma lungo la linea D

L'ultimo confronto relativo al deck 3 è rappresentato in Figura 93. In questo caso la situazione è ibrida, il profilo ideale sembra tendere al profilo reale come se ancora non fosse completamente sviluppato. In realtà questo fenomeno è dovuto al flusso del ventilatore centrale che, nella simulazione reale, investe completamente il piano in esame. Questo fa sì che puntualmente la velocità sia maggiore e che dunque i picchi di velocità tra un ostacolo e il successivo siano più pronunciati. Altra differenza da notare è la forma del profilo nella parte bassa del grafico, essendo il flusso reale più vigoroso, non permette lo sviluppo della classica forma dello strato limite, cosa che invece è chiaramente visibile nel profilo ideale corrispondente.

Una scelta fatta nella stesura di questa tesi è stata quella di utilizzare ventilatori assiali commerciali che possano essere facilmente reperibili e dei quali si conoscono le caratteristiche di targa. È stata condotta anche un'ulteriore simulazione nella quale è stato implementato un ventilatore unico di dimensioni ottimali e capace di elaborare le portate richieste. Questa può sembrare una soluzione ideale ma, in realtà, esistono dei produttori che progettano soluzioni customizzate per i clienti. I risultati di questa ultima simulazione sono consultabili nell'APPENDICE C.

## 5. Conclusioni e sviluppi futuri

Prima di procedere con le conclusioni è necessario ribadire quale sia lo scopo di questo lavoro di tesi. Il fine è quello di progettare la geometria di un laboratorio nel qualche sarà riprodotto un flusso fluido il più possibile simile a quello che investirebbe una piattaforma off-shore posizionata nel Mar Adriatico. Tale laboratorio, successivamente, sarà oggetto di prove sperimentali per il rilascio di sostanze potenzialmente nocive in seguito ad eventi incidentali. Il supporto offerto dalle simulazioni fluidodinamiche ha dato un contributo determinante per l'analisi delle scelte tecniche che permettono la generazione della corrente d'aria.

Alla luce dei risultati mostrati nel Capitolo 4, è possibile affermare che gli obiettivi sono stati raggiunti. La configurazione con i 5 ventilatori posizionati a stella, anche se genera un flusso non omogeneo, produce dei regimi fluidodinamici nelle zone inter-deck simili alla simulazione ideale.

L'utilizzo della teoria delle gallerie del vento è stato fondamentale per procedere alla realizzazione della geometria necessaria a garantire una immissione ed una facile estrazione del flusso d'aria generato. In particolare, la suddivisone del laboratorio in tre volumi e l'utilizzo di un condotto convergente d'immissione hanno risolto tutte le criticità iniziali.

Un altro aspetto chiave che ha permesso la corretta modellazione del flusso d'aria è stato il criterio di scalabilità adottato. Per mantenere costante il numero di Reynolds, parametro che assicura la similitudine fluidodinamica secondo il teorema di Buckingham, era necessario raggiungere valori di velocità in ingresso elevati, dell'ordine di 60 m/s. Basandosi su queste considerazioni e tenendo presente i limiti tecnici del laboratorio è stato scelto come approccio quello di mantenere costante la velocità d'ingresso del flusso; ciò assicura la similitudine fluidodinamica poiché il regime di moto rimane in entrambe le configurazioni completamente turbolento.

L'attenta scelta dei parametri necessari ad impostare le simulazioni fluidodinamiche nel software ANSYS Fluent è stato un altro elemento di fondamentale importanza per la riuscita delle prove. L'utilizzo della CFD per la progettazione si è confermata un importante sostegno al fine di effettuare delle scelte ponderate sia di carattere geometrico che di carattere tecnologico.

Considerando inoltre come zona di interesse quella racchiusa tra due piani della piattaforma, ovvero quell'area che sarà realmente interessata dalle simulazioni di rilascio sperimentali, sia nel deck 2 che nel deck 3, il confronto puntuale dei profili di velocità ha mostrato risultati confortanti.

Anche se il flusso in ingresso nella simulazione reale è lontano dalle caratteristiche di quello ideale, i risultati mostrano che la fluidodinamica nei piani chiusi è rispettata. Stessa cosa non può essere affermata per quanto riguarda il piano superiore della piattaforma e per il core del laboratorio. Infatti le due simulazioni, nelle zone aperte e dunque più esposte, differiscono in maniera non accettabile.

Un possibile proseguimento del presente lavoro potrebbe riguardare uno studio approfondito per la geometria e la fisica propria del problema analizzato, al fine di confermare la correlazione tra parametri della mesh, come il Wall y+, e il modello numerico di modellazione della turbolenza utilizzato. Ulteriore investigazione potrebbe riguardare l'area di dominio trascurata ovvero la camera d'aspirazione. In questo studio non è stata trattata poiché l'attenzione principale è stata focalizzata sull'effettiva possibilità di realizzare un flusso omogeneo nella camera di prova. Al fine però di passare al progetto esecutivo, la necessità di modellare e simulare l'intero circuito è evidente.

Altro step potrebbe essere introdurre delle zone nei piani della piattaforma che presentano un grigliato, soluzione usata in molte delle reali installazioni. Questo permetterebbe una più fedele riproduzione della realtà e verificare un'eventuale interazione tra piani adiacenti.

In conclusione il presente lavoro può ritenersi la base per la futura realizzazione del laboratorio sperimentale. Si può dunque affermare che la riproduzione dell'ambiente atmosferico a cui sono soggette le piattaforme off-shore può essere raggiunta.

### Bibliografia

- [1] R. Mazzei, «Sintesi delle attività di esplorazione, sviluppo e produzione dei giacimenti petroliferi».
- [2] G. Giacchetta, P. Mancini e E. Mesini, «La sicurezza delle operazioni in mare nel settore idrocarburi e la nuova direttiva europea 2013/30 UE».
- [3] o. technology. [Online]. Available: http://www.offshoretechnology.com/projects/statfjord-field-a-timeline/.
- [4] F. M. C. M. L. D. M., «Treccani,» [Online]. Available: http://www.treccani.it/enciclopedia/mare-adriatico\_%28Enciclopedia-Italiana%29/.
- [5] M. L. F. S. M. S. T. A. P. D. P. C. Cocuzza, «Stato dell'arte e prospettive di innovazione nel monitoraggio ambientale, fire & gas per impianti offshore».
- [6] F. Pallavicini, Sviluppo dei giacimenti in mare, Treccani, Enciclopedia degli idrocarburi.
- [7] P. F. Barnaba, «Cenni storici sull'esplorazione petrolifera in Italia».
- [8] M. d. s. e. -. DGS-UNMIG, «Elenco delle piattafomre marine e strutture assimilabili».
- [9] M. Z. -. MISE, «Decreto Ministeriale 9 agosto 2013».
- [10] C. Andrea, «Risk Analysis\_Booklet».
- [11] Vinnem J.E., «Quantified Risk Assessment for Offshore Petroleum Installations».
- [12] C. Tommaso, «CFD modelling of accidental events in oil&gas environment: definition of a source box».
- [13] HSE, «Guidance on Risk Assessment for Offshore Installations-Offshore information sheet No.3/2006».
- [14] P. Europeo, «Direttiva 2013/30/EU 12 Giugno 2013».
- [15] j. Sodja, «Turbolence model in CFD,» 2007.
- [16] D. Polimi. [Online]. Available: http://www.diiar.polimi.it/franz/MdF/dispense/MdF\_partel.pdf.
- [17] David.C.Wlicox, «Turbolence modelling for CFD».
- [18] ANSYS, «ANSYS helper viewer».
- [19] S. Salim.M., «Wall y+ strategy for Dealing with Wall-bounded turbolent Flows».

- [20] Salim.M.Salim e S.C.Cheah, «Wall y+ approach for dealing with turbolent flow over a surface mounted cube part2 2-high reynolds number».
- [21] «Guida all'Eurocodice1-azioni del vento,» 1991.
- [22] p. RSE s, «Atlante eolico,» [Online]. Available: http://atlanteeolico.rse-web.it/.
- [23] «windfinfer,» [Online]. Available: https://it.windfinder.com/windstatistics.
- [24] Wikipedia, «Galleria del vento,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Galleria\_del\_vento.
- [25] G. Savorgnani, «Gallerie del vento».
- [26] E. Mattioli, «Aerodinamica».
- [27] G. C. C. M. A. Di Nardo, «Approfondimenti sul bruciatore trapped-vortex. Analisi di sensibilità e scalatura del prototipo,» 2012.
- [28] «Principali nozioni tecniche per il funzionamento dei ventilatori».
- [29] P. d. Torino, «bando collaborazione MISE-DSG».
- [30] «CORAL S.P.A,» [Online]. Available: http://www.coral.eu/default1.html#.

## Ringraziamenti

Ringrazio le persone che mi hanno aiutato in questo percorso di tesi.

In primo luogo il mio relatore, il Prof. Andrea Carpignano che è sempre stato disponibile e pronto a fornirmi supporto, la sua esperienza e la sua capacità di gestione mi è stata di enorme aiuto e ha semplificato notevolmente la preparazione di questo elaborato.

Un ringraziamento va anche al mio co-relatore l'Ing. Francesco Ganci che è sempre stato presente e con i suoi consigli è stato in grado di orientarmi verso la corretta programmazione e realizzazione di questo lavoro.

Ringrazio anche la Professoressa Raffaella Gerboni che ha messo a disposizione a me e ai miei colleghi le attrezzature necessarie per condurre le simulazioni fluidodinamiche adeguatamente.

Infine ringrazio la società RAMS&E e il SEADOG poiché senza il loro supporto, da un lato conoscitivo e dall'altro tecnico, questo lavoro non avrebbe avuto esito positivo.

# APPENDICE A

Tabella riassuntiva delle simulazioni

	N°	Boundary	Model	Mesh	Note Geometria
Simulazione 1	1	P_in=20 Pa P_out=0 Pa	k-ε SWF	Elem=1870K Quality= 0.849	Laboratorio non diviso, con un'apertura per immissione e una per sbocco laterali. NO INTERCAPEDINE
Simulazione 1*	2	P_in=30 Pa P_out=-20 Pa In fan=30 ΔP	k-ε SWF	Elem=446K Quality= 0.809	Come Sim 1 ma con aggiunta di un condotto a "L" per incanalare il
		P_out=0 Pa			flusso assialmente.
Simulazione 2	2	In_fan=30 ∆P outlet_vent=0 Pa	k-ε SWF	Elem=9667K Quality= 0.851 Elem=1259K	Laboratorio con parete forata finale. Sbocco cilindrico laterale e condotto conico divergente per
				Quality= 0.842	immissione assiale.
Simulazione 2	2	In_fan=20 ∆P outlet_vent=0 Pa	k-ε SWF	Elem=1613K Quality= 0.838	Come Sim 2 con aggiunta di condotto cilindrico per
Simulazione S		v_in=20 m/s P_out=0 Pa			migliorare la qualità della mesh
Simulazione 4	1	v_in=20 m/s P_out=-50 Pa	k-ε SWF	Elem=467K Quality= 0.833	Come Sim 3 con aumento lunghezza condotto conico d'ingresso
Simulazione 5	1			FAIL	

TUDEIIU A- 1. TUDEIIU HUSSUITUVU SIITUUUZIOTII AINSYS	Tabella A- 1.	Tabella	riassuntiva	simulazioni	ANSYS
---	---------------	---------	-------------	-------------	-------

	N°	Boundary	Model	Mesh	Note Geometria
Simulazione 6	1	v_in=20 m/s P_out=-150 Pa	k-ε SWF	Elem=2215K Quality= 0.850	Come Sim 2 ma con aggiunta di un deflettore dopo la camera di ristagno per indirizzare il flusso verso lo sbocco.
Simulazione 7	1	v_in=10 m/s P_out=-150 Pa	k-ε SWF	Elem=2167K Quality= 0.833	Imbocco cilindrico e non più conico (sempre assiale). Sbocco cilindrico laterale con condotto per qualità della mesh e camera di ristagno. NO DEFLETTORE.
Simulazione 8	2	v_in=10 m/s P_out=-20 Pa v_in=10 m/s P_out=0 Pa	k-ε SWF	Elem=2370K Quality= 0.836	Come Sim 7 ma aggiunta dello sbocco esterno al volume del laboratorio per migliorare la convergenza.
Simulazione 9	1	v_in=10 m/s P_out=0 Pa	k-ε SWF	Elem=2260K Quality= 0.834	Stessa geometria con aggiunta dell'intercapedine e 3 aperture di sbocco quadrate con superficie di 1 m <sup>2</sup> ciascuna.
Simulazione 10	1	v_in=10 m/s P_out=0 Pa	k-ε SWF	Elem=2208K Quality= 0.829	Come Sim 9 con aggiunta del modello di piattaforma a 2m dallo sbocco circolare
	N19	Deurederer	Madal	Maak	Noto Coorectric
-----------------	-----	--------------------------------	------------	------------------------------	---------------------
	IN	Boundary	Iviodei	Iviesn	Note Geometria
		V_IN=10 m/s			Come Sim 10 ma
		P_OUT=0 Pa			li sistema
	5	v_in=4m/s			condotto-
		P_out=0 Pa		Elem=2075K Quality= 0.830	plattaforma é
Simulazione 10*		v_in=5 m/s	k-ε SWF		stato spostato
		P_out=0 Pa			verso il basso per
		v_in=6 m/s			poggiare il
		P_out=0 Pa			modello di
		v_in=7 m/s			plattaforma al
		P_out=0 Pa			pavimento
	1	In_fan=275 ∆P P_out= 0 Pa	k-ε	Elem=4591K Quality= 0.843	Come Sim 10*
					con modifica
					imbocco da
					circolare a conico
Simulazione 11					divergente ed
	_		SWF		aggiunta di
					aspirazione
					laterale quadrata
					di 2 m² di
					superficie.
	1	In_fan=275 ∆P P_out= 0 Pa	k-ε SWF	Elem=1852K Quality= 0.830	Come Sim 11 con
Simulazione 12					aggiunta di una
					seconda parete
					divisoria per
					separare
					l'aspirazione dalla
					camera di prova.
	1	4xIn_fan=275 ΔP P_out= 0 Pa	k-ε SWF	Elem=1862K Quality= 0.827	PASSAGGIO DA
					IDEALE A REALE.
					Inserimento 4
Simulazione 13					ventilatori e
					condotto
					convergente
					senza canale
					cilindrico per
					imbocco dell'aria.
Simulazione 14	1	5xIn_fan=275 ΔP P_out= 0 Pa	k-ω SST	Elem=2000K Quality= 0.820	Come Sim 13 con
					aggiunta di un
					ventilatore e
					canale cilindrico
					di imbocco aria di
					lunghezza pari a 1
					m e diametro pari
					a 3 m.

	N°	Boundary	Model	Mesh	Note Geometria
					Come Sim 14 ma
					con riduzione del
					dominio di
	1				calcolo e
					conseguente
Simulazione 15		5xIn_fan=275 ∆P	k-ω	Elem=1750K	eliminazione della
Simulazione 15		P_out= 0 Pa	SST	Quality= 0.818	camera
					d'aspirazione.
					ATTENZIONE
					POSTA SOLO A
					VALLE DEI
					VENTILATORI.
	1	5xIn_fan=275 ΔP P_out= 0 Pa	k-ω SST	Elem=2234K Quality= 0.822	Come Sim 15 ma
					allungamento del
Simulazione 15*					canale cilindrico
					per imbocco aria
					da 1 m a 2 m
	2	6xP_out=-275 Pa P_in= 0 Pa	k-ω	Elem=715K	Approccio
Simulazione 16					inverso. Si cerca
					di simulare l'area
					precedentemente
					trascurata ovvero
					la camera di
			SST	Quality= 0.757	aspirazione.
		5xP out=-275 Pa			
		P out=0 Pa			
		P in= 0 Pa			
Simulazione 17	6	5xIn_fan=150 ΔP		51 240014	Come Sim 15*
		P_out= 0 Pa			con aggiunta del
		5xIn_fan=275 ΔP	k-ω SST		modello
		P_out= 0 Pa			plattaforma a 1m
		$5xIn_{fan=3/3}\Delta P$			dal canale di
		P_out= 0 Pa		Elem=2188K	impocco aria.
		5xIn_fan=150 ΔP	k-ε SWF	Quality= 0.825	
		P_out= 0 Pa			
		$5xin_tan=2/5 \Delta P$			
		P_out= 0 Pa			
		5xIn_tan=373 ΔP			
		P_out= 0 Pa			

## APPENDICE B

Risultati dell'analisi dei profili di velocità per le prove a 5 m/s e a 7 m/s

In questo spazio vengono riportate le immagini relative ai profili di velocità delle prove condotte a 5 m/s e a 7 m/s. Ci si limita all'inserimento delle immagini poiché i commenti sono già stati effettuati nel paragrafo 4.2.



• Risultati simulazione a 5 m/s

Figura B- 1. Profilo delle velocità lungo la linea A 5 m/s



Figura B- 2. Profilo delle velocità lungo la linea B 5 m/s



Figura B- 3.Profilo delle velocità lungo la linea C 5 m/s



Figura B- 4. Profilo delle velocità lungo la linea D 5 m/s



## • Risultati simulazione a 7 m/s

Figura B- 5. Profilo delle velocità lungo la linea A 7 m/s



Figura B- 6. Profilo delle velocità lungo la linea B 7 m/s







Figura B- 8. Profilo delle velocità lungo la linea D 7 m/s

## APPENDICE C

Simulazione condotta con ventilatore unico

Come affermato precedentemente, la possibilità di richiedere la personalizzazione di un ventilatore capace di soddisfare sia le richieste tecniche che dimensionali, risolve numerose criticità introdotte dall'utilizzo di più ventilatori in parallelo. Anche se l'azienda capace di realizzare questa tipologia di soluzioni non ha fornito per tempo un'adeguata risposta alle richieste avanzate, una simulazione preliminare con un singolo ventilatore è stata eseguita.

Senza entrare nel merito della geometria del ventilatore e delle caratteristiche tecniche, poiché valori sono stati assunti arbitrariamente non avendo alcun tipo di data sheet, vengono mostrate di seguito le immagini corrispondenti a quelle mostrate nel capitolo 4, in modo tale da poter cogliere la bontà della soluzione appena descritta.



Figura C- 1. Contour vista laterale



Figura C- 2. Contour deck 1

Velocity Contour 1
2.155e+001 2.036e+001 1.916e+001 1.796e+001 1.676e+001 1.557e+001 1.437e+001 1.197e+001 1.078e+001 9.580e+000 8.382e+000 7.185e+000 3.592e+000 2.395e+000 1.197e+000 0.197e+000
[m s^-1]

Figura C- 3. Contour deck2



Figura C- 4. Contour deck 3

Tutte le figure precedenti mostrano una sostanziale uguaglianza se confrontate con le relative immagini della simulazione ideale. Come boundary condition per il flusso entrante è stata usata una portata massica di 52 kg/s derivante dalla conservazione della portata per un flusso con velocità pari a 6 m/s.