

POLITECNICO
MILANO 1863

"Scuola di Architettura, Urbanistica, Ingegneria delle Costruzioni"

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Sistemi Edilizi

Analisi fluidodinamica computazionale degli
effetti del vento su elementi in aggetto da
facciate continue di edifici elevati

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Relatore:
Prof. PAOLO RIGONE

Laureando:
ALESSANDRO CRISTANTIELLI

Correlatore:
Ing. GIAMPIERO MANARA

Matr. 927457

Anno Accademico 2019-20

INDICE

Indice delle figure	4
Indice delle Tabelle.....	8
Abstract.....	9
1 Introduzione.....	10
1.1 Inquadramento normativo.....	11
2 Facciata continua	12
2.1 Sistemi fissi di schermatura esterna.....	14
3 Azioni globali e locali del vento su edifici.....	17
3.1 <i>Valutazione della pressione risultante sull'involucro</i>	17
3.2 Effetti locali del vento.....	19
3.2.1 Resistenza al vento	23
3.2.2 Coefficiente di pressione esterna c_{pe}	23
3.2.3 Coefficiente di pressione interna c_{pi}	26
3.3 Numero di Reynolds	27
3.3.1 Coefficiente di pressione c_p	30
3.4 Edifici ravvicinati e ostacoli.....	32
3.4.1 Fenomenologie aerodinamiche in ambito urbano	33
3.4.2 Ombra di vento.....	33
3.4.3 Effetto barriera.....	35
3.4.4 Effetto scia	35
3.4.5 Effetto canale	36
3.4.6 Effetto Venturi	37
4 Galleria del vento.....	38
4.1 Requisiti per un'accurata modellazione in galleria del vento.....	38
4.2 Gallerie del vento – Caratteristiche del flusso e orografia del terreno	39
4.3 Galleria del vento – Effetto bloccaggio.....	40
4.4 Misurazioni della pressione	42
4.4.1 Risultati provenienti dalle analisi in galleria	44
5 Simulazioni mediante fluidodinamica computazionale (analisi CFD)	45
5.1 Aspetti fondamentali sull'approccio modellistico	46
5.1.1 Dominio di calcolo	46
5.1.2 Modello di turbolenza	47
5.1.3 Discretizzazione spaziale e temporale.....	48
5.1.4 Schemi di approssimazione numerica	49

5.1.5	Risolutore algebrico.....	50
5.1.6	Raccomandazione in fase di analisi CFD	51
5.2	Modelli di turbolenza.....	52
5.2.1	Il flusso turbolento.....	52
5.2.2	Modelli di viscosità turbolenta	54
5.3	Modello di viscosità turbolente: modello $k-\varepsilon$	55
5.4	Modello di viscosità turbolente: modello $k-\omega$	55
5.4.1	Modello di viscosità $k-\omega$ SST	56
6	RWIND Simulation – Simulazione e generazione dei carichi del vento.....	57
6.1	Modellazione geometrica strutturale.....	58
6.2	Validazione dei Software CFD e Normative tecniche	60
6.2.1	Fattori di forza dei Software CDF.....	60
6.2.2	Punti di criticità dei Software CDF.....	61
7	Validazione del modello computazionale.....	62
7.1	CAARC	62
7.1.1	Dominio computazionale e mesh.....	63
7.1.2	Configurazione della simulazione.....	66
7.1.3	Fase di calcolo	67
7.1.4	Comparazione dei dati e risultati.....	70
8	Analisi di validazione	72
8.1	Proprietà del fluido.....	72
8.2	Sezione di ingresso.....	73
8.3	Impostazioni strati limite	73
8.4	Test benchmark con studi in galleria del vento.....	74
8.4.1	Caso studio A	74
8.4.2	Caso studio A – Considerazioni e commenti	83
8.4.3	Caso studio B.....	85
8.4.4	Caso studio B – Considerazioni e commenti.....	94
8.4.5	Caso studio C	95
8.4.6	Caso studio C – Considerazioni e commenti	98
8.5	Fattore di trasformazione K_s	99
8.6	Elaborazioni CFD – Fattore di trasformazione K_s	101
8.6.1	Fattore K_s – Analisi Caso studio A	101
8.6.2	Fattore K_s – Analisi Caso studio B	102
8.6.3	Fattore K_s – Analisi Caso studio C	103

9	Analisi del fattore di trasformazione K_s , valutato su edifici elevati con angolo curvilineo sottovento.....	104
9.1	Modello 1: Edificio circolare con oscuranti a lamelle orizzontali	104
9.2	Modello 2: Edificio circolare con elementi aggettanti verticali adiacenti alla struttura.....	107
10	Analisi dei c_p su edifici di elevate dimensioni a pianta con zona curvilinea.....	109
10.1	Valutazione della variazione del c_p sull'intorno di angolo curvilineo sottovento	121
10.2	'Edificio con angolo curvilineo' – Considerazioni e commenti.....	123
11	Analisi di elementi aggettanti su edificio di elevate dimensioni con angolo curvilineo in zona sottovento	124
11.1	Elementi aggettanti su edificio di elevate dimensioni con angolo curvilineo in zona sottovento – Considerazioni e commenti	127
12	Conclusioni	129
13	Riferimenti bibliografici.....	131

Indice delle figure

Figura 2—1:	Gioia 22, (Milano) – esempio di edificio con facciata continua;.....	12
Figura 2—4:	Sistema a montanti e traversi: telaio, tamponamenti e accessori assemblati in opera;	13
Figura 2—4:	Sistema a moduli indipendenti: i moduli prefabbricati in stabilimento sono installati in opera ad incastro tra moduli contigui;.....	13
Figura 2—4:	Sistema misto: telaio preassemblato in stabilimento e tamponamenti montati in opera;	13
Figura 2—5:	sistemi fissi di schermatura esterna realizzati attraverso aggetti orizzontali o verticali che intercettano i raggi solari a seconda del loro angolo di inclinazione e della disposizione delle aperture lungo l'edificio.....	14
Figura 2—6:	tipologie di sistemi fissi di schermatura esterna secondo la classificazione proposta.	15
Figura 3—1:	– Sovrappressione (a sinistra) e depressione (a destra) sulla faccia di una superficie.	17
Figura 3—2:	Esempio di pressione esterna e interna agente su involucro	18
Figura 3—3:	Mappa delle zone in cui è suddiviso il territorio italiano	20
Figura 3—4:	Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 , k	20
Figura 3—5:	Definizione delle categorie di esposizione	21
Figura 3—6:	Classi di rugosità del terreno	22
Figura 3—7:	Variazione di C_e in funzione dell'altezza "z" dell'edificio.....	22
Figura 3—8:	Suddivisione delle pareti verticali di edifici a pianta rettangolare in zone di uguale pressione (pianta).	24
Figura 3—9:	Suddivisione delle pareti verticali di edifici a pianta rettangolare in zone di uguale pressione (prospetto).	24
Figura 3—10:	Coefficienti di pressione per le pareti verticali di edifici a pianta rettangolare	25
Figura 3—11:	Collasso di elementi di facciata in prossimità degli spigoli, per azione di fenomeni di depressione.	25
Figura 3—12:	Schematizzazione simbolica del C_{pi}	26
Figura 3—13:	Cilindro di lunghezza indefinita e sezione circolare immerso in un campo di flusso.....	28
Figura 3—14:	Separazione del flusso da corpi a spigoli vivi.	29
Figura 3—15:	Flusso di corrente stazionaria agente su un corpo cilindrico;.....	30
Figura 3—16:	Variazione del C_p sul confine dei strutture.	31

Figura 3—17: EN 1991—1—4. Allegato A.4: Influenza di un edificio alto, su due diverse strutture circostanti.	32
Figura 3—18 : Abaco delle situazioni d'ombra di vento e di estensione nella zona sottovento per edifici caratterizzati da differenti rapporti dimensionali tra altezza h , lunghezza L , larghezza W . Casistica desunta da studi sperimentali condotti in galleria del vento	34
Figura 3—19: Effetto barriera, con estensione della scia e dell'ombra di vento che va ad interessare un'ampia zona del contesto urbano sottovento.	35
Figura 3—20: Effetto scia, che in zona di sottovento presenta azioni di turbolenza	36
Figura 3—21 : Effetto canale: incanalamento di flussi ventosi nei canali costituiti dai canyon urbani	36
Figura 3—22: Effetto Venturi, causato da restringimento del canale viario	37
Figura 4—1: Tronco di prova di una galleria del vento a strato limite.....	40
Figura 4—2: Effetto bloccaggio in galleria del vento: a) prototipo in scala "teoricamente infinita"; b) modello in sezione a scala ridotta.....	40
Figura 4—3: Modello manometrico	43
Figura 5—1: Analisi CFD di distribuzione della pressione esterna e della scia ventosa su edifici.....	45
Figura 5—2: a) Griglia in spazio intorno ad un cilindro di sezione rettangolare – sezione nel piano trasversale: nell'intero dominio di calcolo in spazio, b) dettaglio intorno al bordo di attacco, c) dettaglio intorno allo spigolo superiore del bordo di attacco	49
Figura 5—3: Disposizione delle griglie computazionali.....	50
Figura 5—4: Profilo temporale della velocità in un punto.	52
Figura 5—5: Profili delle velocità nello stato limite per elevate tensioni tangenziali o per tensioni tangenziali minori.	54
Figura 6—1: Definizione della mesh.....	57
Figura 6—2: Fasi di semplificazione del modello	58
Figura 6—3: Fase di creazione del modello FEM preliminare all'analisi CFD (sinistra), Traiettoria del vento rappresentata tramite streamlines (centro), Valori delle pressioni dei carichi del vento valutati su RWIND ed esportati sul modello FEM (destra).....	58
Figura 6—4: Inserimento del contesto urbano e relativi risultati tramite streamlines e Surface quantities di pressione agente sull'involucro esterno.....	59
Figura 7—1: Edificio C.A.A.R.C.	63
Figura 7—2: Disposizione delle griglie computazionali	64
Figura 7—3: Dominio computazionale e condizioni al contorno	65
Figura 7—4: Dimensioni del dominio computazionale virtuale impostato	65
Figura 7—5: Parametri generali di simulazione e profilo della velocità del vento in ingresso	66
Figura 7—6: Modello di turbolenza predisposto	66
Figura 7—7: Diagramma di convergenza.....	67
Figura 7—8: Distribuzione delle pressioni (Pa) sulla facciata sopravento e sottovento, ottenute dall'analisi RWIND Simulation	68
Figura 7—10a: Grafico di distribuzione del coefficiente di pressione C_p sulla faccia sopravento	69
Figura 7—10b: Grafico di distribuzione del coefficiente di pressione C_p sulla faccia sottovento tra modello.	69
Figura 7—11: Percorso di valutazione dei coefficienti di pressione ottenuti dall'analisi RWIND.....	70
Figura 7—12: Coefficienti di pressione medi C_p sul perimetro dell'edificio all'altezza $z = 2/3 H$. Confronto con i risultati pubblicati da Dagnew secondo altri metodi numerici.....	71
Figura 8—1: Profilo del vento e proprietà di turbolenza considerate	72
Figura 8—2: Boundary conditions applicate sulla galleria virtuale.....	73
Figura 8—3: Prospetti e vista assonometrica dell'edificio del caso studio A	74
Figura 8—4: Caratteristiche geometriche degli elementi oscuranti appartenenti al caso A.....	75
Figura 8—5: Direzione azione del vento rispetto alle diverse configurazioni	76
Figura 8—6: Caso studio A– andamento dei C_p (MAX e min) proposti a seguito di analisi in galleria del vento sulla facciata sinistra dell'edificio in analisi.	76
Figura 8—7: Caso studio A– andamento dei C_p (MAX e min) proposti a seguito di analisi in galleria del vento sulla facciata destra dell'edificio in analisi.	77
Figura 8—8: Modelli di calcolo nel software RFEM, poi esportato su RWIND Simulation.....	77
Figura 8—9: Galleria del vento virtuale in cui si effettua l'analisi fluidodinamica.....	78
Figura 8—10: Risultati ottenuti a conclusione dell'analisi CFD in una nelle diverse configurazioni esaminate	79
Figura 8—11: Definizione della densità delle mesh	80
Figura 8—12: Caso studio A– andamento dei C_p (MAX e min) proposti a seguito dell'analisi CFD con RWIND Simulation, sulla facciata sinistra dell'edificio in analisi.	80

Figura 8—13: Caso studio A– andamento dei Cp (MAX e min) proposti a seguito dell’analisi CFD con RWIND Simulation, sulla facciata destra dell’edificio in analisi.....	81
Figura 8—14: Confronto “galleria del vento”/”CFD”, dei valori di Cp massimi appartenenti alla zona sinistra;	81
Figura 8—15: Confronto “galleria del vento”/”CFD”, dei valori di Cp massimi appartenenti alla zona destra;	82
Figura 8—16: Confronto “galleria del vento”/”CFD”, dei valori di Cp minimi appartenenti alla zona sinistra;	82
Figura 8—17: Confronto “galleria del vento”/”CFD”, dei valori di Cp minimi appartenenti alla zona destra;	83
Figura 8—18: Valori di Cp agenti sulla facciata destra dell’edificio, esposta con angolo di inclinazione di 15° rispetto al sistema di riferimento impostato.	84
Figura 8—19: Prospetti e vista assometrica dell’edificio del caso studio B.....	85
Figura 8—20: Caratteristiche geometriche degli elementi oscuranti appartenenti al caso B.....	86
Figura 8—21: Direzione del vento rispetto alle diverse configurazioni.....	86
Figura 8—22: Definizione della dimensioni delle zone “di bordo”	87
Figura 8—23: Valori Cp (MAX e min) relativi al caso studio B nella zona centrale, provenienti dalle analisi in galleria del vento.....	88
Figura 8—24: Valori Cp (MAX e min) relativi al caso studio B sulle zone di bordo, provenienti dalle analisi in galleria del vento.....	88
Figura 8—25: Risultati ottenuti a conclusione dell’analisi CFD in una nelle diverse configurazioni esaminate	89
Figura 8—26: Definizione della densità delle mesh	90
Figura 8—27: Dettaglio del modello dell’analisi CFD	90
Figura 8—28: Caso studio B– andamento dei Cp (MAX e min) proposti a seguito dell’analisi CFD con RWIND Simulation, sulle regioni di bordo dell’edificio in analisi.....	91
Figura 8—29: Caso studio B– andamento dei Cp (MAX e min) proposti a seguito dell’analisi CFD con RWIND Simulation, sulla regione centrale dell’edificio in analisi.	91
Figura 8—30: Confronto “galleria del vento”/”RWIND”, dei valori di Cp massimi appartenenti alla zona prossima ai bordi;.....	92
Figura 8—31: Confronto “galleria del vento”/”RWIND”, dei valori di Cp minimi appartenenti alla zona prossima ai bordi;.....	92
Figura 8—32: Confronto “galleria del vento”/”RWIND”, dei valori di Cp massimi appartenenti alla zona centrale;	93
Figura 8—33: Confronto “galleria del vento”/”RWIND”, dei valori di Cp minimi appartenenti alla zona centrale;	93
Figura 8—34: Vista assometrica dell’edificio del caso studio C.....	95
Figura 8—36 a: Modello del caso studio C ₁ (oscuranti adiacenti alla facciata)	95
Figura 8—36 b: Modello del caso studio C ₂ (oscuranti con offset).....	95
Figura 8—37: Caso studio C1: traiettorie notevoli di flusso ventoso agenti su prospetto ortogonale alla direzione del vento (diretta verso x).....	96
Figura 8—38: Caso studio C1: traiettorie notevoli di flusso ventoso nella zona sottovento, con relativo effetto scia.....	97
Figura 8—39: Caso studio C2: traiettorie notevoli di flusso ventoso agenti su prospetto inclinato di 45° rispetto alla direzione del vento (diretta verso x)	97
Figura 8—40: Caso studio C2: traiettorie notevoli di flusso ventoso nella zona sottovento, con relativo effetto scia.....	98
Figura 8—41: Elenco delle tipologie di elementi aggettanti analizzati.....	99
Figura 9—1: Assonometria e dettaglio assometrico di un edificio a pianta circolare, studiato tramite analisi CFD.	104
Figura 9—2: Caratteristiche geometriche degli elementi oscuranti appartenenti al Modello 1.....	105
Figura 9—3: Parametri di simulazione e dettagli adottati	105
Figura 9—4: Rappresentazione delle diverse configurazioni dell’edificio	106
Figura 9—5: Assonometria e dettaglio assometrico di un edificio a pianta circolare, studiato tramite analisi CFD.	107
Figura 9—6: Schema degli aggetti verticali (a) e modellazione su RFEM dei frangisole applicati in facciata sul Modello 2 (b)	108
Figura 10—1: Pianta e vista assometriche dei differenti modelli di edifici studiati	110

Figura 10—2: Modello di analisi inserito nella galleria del vento virtuale. Si noti la posizione in zona sottovento dell'angolo curvilineo	111
Figura 10—3: Distribuzione dei coefficienti C_p agenti sulla facciata sopravvento	112
Figura 10—4: a) pianta dell'edificio contenente le coordinate dei punti su cui sono stati valutati i C_p lungo l'altezza del modello. b) piano di taglio su cui sono stati valutati i coefficienti in funzione della quota	112
Figura 10—5: Diagramma dei coefficienti C_p valutati in funzione dell'altezza.....	113
Figura 10—6: Caso 0: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo	114
Figura 10—7: Caso A: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo	114
Figura 10—8: Caso B: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo	114
Figura 10—9: Caso C: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo	115
Figura 10—10: Caso D: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo	115
Figura 10—11: Caso E: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo	115
Figura 10—12: Caso F: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo	116
Figura 10—13: Caso G: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo	116
Figura 10—14: Caso H: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo	116
Figura 10—15: Indicazione del piano di taglio effettuato (sinistra) e andamento delle coordinate considerate lungo il perimetro (destra).....	117
Figura 10—18: Caso 0: andamento perimetrale dei C_p a quota $z=100\text{m}$	118
Figura 10—18: Caso A: andamento perimetrale dei C_p a quota $z=100\text{m}$	118
Figura 10—18: Caso B: andamento perimetrale dei C_p a quota $z=100\text{m}$	118
Figura 10—21: Caso C: andamento perimetrale dei C_p a quota $z=100\text{m}$	119
Figura 10—21: Caso D: andamento perimetrale dei C_p a quota $z=100\text{m}$	119
Figura 10—21: Caso E: andamento perimetrale dei C_p a quota $z=100\text{m}$	119
Figura 10—24: Caso F: andamento perimetrale dei C_p a quota $z=100\text{m}$	120
Figura 10—24: Caso G: andamento perimetrale dei C_p a quota $z=100\text{m}$	120
Figura 10—24: Caso G: andamento perimetrale dei C_p a quota $z=100\text{m}$	120
Figura 10—25: Disposizione della pianta all'interno della galleria del vento, rispetto all'azione del vento...121	
Figura 10—26: Linee di valutazione, sull'angolo curvilineo, dei coefficienti C_p esaminati dal modello	122
Figura 10—27: Istogramma dei valori di C_p , ricavati nell'intorno dell'angolo curvilineo, alla quota più critica ($z=100\text{ m}$), rispetto ad ogni caso studio affrontato.	122
Figura 11—1: Vista assonometrica dell'edificio e configurazione in pianta, rispetto alla direzione del flusso del vento agente.	124
Figura 11—2: Caratteristiche geometriche degli elementi aggettanti e configurazione degli stessi in facciata.	125
Figura 11—3: Definizione del numero e della dimensione delle mesh di analisi	125
Figura 11—4: Valori di C_p agenti sulla facciata sopravvento dell'edificio, con l'azione del vento agente secondo l'asse x.....	126
Figura 11—5: Confronto tra le distribuzioni di C_p ottenuti da analisi CFD, valutata su due edifici dalle stesse caratteristiche geometriche – caso di facciata in zona sopravvento. A destra: edificio privo di elementi oscuranti, a sinistra edificio con aggetti orizzontali	127
Figura 11—6: Confronto tra le distribuzioni di C_p ottenuti da analisi CFD, valutata su due edifici dalle stesse caratteristiche geometriche – caso di porzione angolare in zona sottovento. A sinistra: edificio privo di elementi oscuranti, a destra edificio con aggetti orizzontali	128

Indice delle Tabelle

Tabella 1: Valori di fattore di trasformazione K_s raccomandati.....	100
Tabella 2: Caso studio C: valori di C_p e K_s , reperiti da analisi in galleria del vento	101
Tabella 3: Caso studio A: valori di C_p e K_s , ricavati da analisi CFD	101
Tabella 4: Caso studio B: valori di C_p e K_s , reperiti da analisi in galleria del vento	102
Tabella 5: Caso studio B: valori di C_p e K_s , ricavati da analisi CFD.....	102
Tabella 6: Caso studio C: valori di C_p e K_s , reperiti da analisi in galleria del vento	103
Tabella 7: Caso studio C: valori di C_p e K_s , ricavati da analisi CFD.....	103
Tabella 8: Valori di C_p e K_s (relativi al Modello 1), ricavati da analisi CFD.....	106
Tabella 9: Valori di C_p e K_s (relativi al Modello 2), ricavati da analisi CFD.....	108
Tabella 10: Valori di C_p e K_s (caso studio A), ricavati da analisi CFD	126

Abstract

Attualmente la normativa non fornisce Linee guida per la progettazione di elementi aggettanti dalle facciate e soggetti all'azione del vento. I test in galleria del vento restano ancora l'unico modo validato per affrontare analisi numeriche dei carichi del vento, ma i rapporti di scala rendono comunque difficile trattare questi elementi anche in galleria del vento.

L'evoluzione dell'ingegneria del vento computazionale (CWE) basata sui principi della fluidodinamica computazionale (CFD) sta rendendo la valutazione numerica dei carichi del vento una proposta potenzialmente interessante.

Il presente lavoro di tesi parte dalla validazione del metodo CFD tramite test benchmark con risultati di studi sperimentali condotti in galleria del vento, su edifici elevati con differenti tipologie di elementi aggettanti.

Dalla bontà di tale confronto si è adottato questo strumento di calcolo per studiare edifici a pianta circolare di elevate dimensioni e analizzare l'incidenza delle pressioni del vento incidente sulla facciata e su elementi in aggetto dalla facciata; tale interazione è stata espressa mediante un fattore denominato K_s .

Analizzando l'edificio a pianta circolare per valutare gli effetti del vento sugli aggetti verticali si è affrontato uno studio ulteriore su edifici con solo una zona d'angolo curva ed il resto composto da pareti piane e ad angolo retto; infatti nonostante questo tipo di geometria "mista" sia molto frequente nell'architettura moderna, in letteratura e nelle normative di settore non ci sono indicazioni in merito. Si è quindi pensato d'indagare queste due tipologie di edifici elevati, come possibile contributo allo sviluppo futuro di regole e linee guida per la progettazione di facciate installate su edifici di tale forma.

1 Introduzione

Con la crescente consapevolezza dell'importanza di una progettazione efficiente dal punto di vista energetico negli edifici, l'uso di elementi di schermatura solare per il controllo dell'energia, in particolare negli edifici per uffici, sta diventando sempre più necessario.

Il progetto strutturale dell'edificio include il calcolo dei carichi di vento applicati come uno degli elementi principali del processo di progettazione. I documenti tecnici, a seguito di test in galleria del vento, aiutano il progettista fornendo valori e coefficienti di pressione attendibili, le cui casistiche però non sono sufficienti a coprire le incognite derivanti da quelle che sono le irregolarità verso cui l'architettura tende sempre più a proiettarsi.

C'è la necessità di fornire al progettista un metodo pratico che fornisca coefficienti di pressione che possano aggiungersi a quelli che sono i parametri presenti in normativa.

Da una serie di analisi fluidodinamiche virtuali sulla base di vari prototipi di edificio di altezza elevata, sono state studiate diverse configurazioni e combinazioni di elementi di schermatura solare per i loro effetti sulla distribuzione della pressione del vento su tutta la facciata dell'edificio.

Nonostante l'importanza di questo argomento per quanto riguarda la progettazione razionale del rivestimento, in particolare del rivestimento in vetro, la quantità di pubblicazioni su questo argomento è molto limitata.

In prima analisi si è partiti con una validazione dell'applicazione della tecnica di analisi CFD tramite confronto con risultati disponibili e pubblicati su documentazioni scientifiche di settore, ottenuti mediante test effettuati in galleria del vento. Su tali strutture si sono eseguiti test benchmark con il software CFD, allo scopo di confrontarne i risultati, validarne l'approccio computazionale ed espandere le performance dell'analisi CFD a nuovi casi progettuali.

Questa ricerca mira a fornire fattori di trasformazione K_s (derivanti dai coefficienti di pressione esterna agenti su vari sistemi di schermatura esterna e relative facciate di supporto) necessari in fase di predimensionamento strutturale e ricavati adottando le tecniche di fluidodinamica computazionale (CFD).

1.1 Inquadramento normativo

I criteri per la valutazione delle azioni dovute al vento sulle strutture sono contenuti in alcune norme di riferimento sia a carattere nazionale che europeo. Tali norme sono le seguenti:

- Eurocodice 1 – EN 1991 – 1.4. Basi di calcolo ed azioni sulle strutture. Parte 2–4: Azioni sulle strutture ed Azioni del vento.
- Documento Tecnico – CNR–DT 207 R1/2018. Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni
- UX28 – Prestazioni ambientali delle facciate continue: le novità introdotte dalle nuove normative europee.
- UNI EN 13830:2003 – Curtain walling – Product Standard
- UNI EN 13116:2002 – Resistenza al carico del vento – Requisiti prestazionali
- UNI EN 12179:2002 – Facciate continue – Resistenza al carico del vento – Metodo di prova.

2 Facciata continua

La facciata continua è una parte dell'involucro edilizio composta da un telaio che generalmente è costituito da profili verticali e orizzontali connessi tra loro e ancorati alla struttura portante dell'edificio.

Tale facciata continua produce esteticamente una continuità di superficie vetrata, ma nel dettaglio è realizzata in modo modulare, attraverso la ripetizione di singoli moduli di facciata.

Come ripreso da (Rigone, 2014), “la definizione di facciata continua come categoria particolare di pareti, composte da elementi modulari ripetuti, eseguiti in officina e montati in opera, a cui vengono affidate tutte e sole le funzioni di separazione tra interno ed esterno”.

Come descritto dalla normativa europea EN 13830 “Curtain walling – product standard”, alla facciata continua è affidato “il compito di garantire tutte le funzioni tipiche di una parete perimetrale esterna comprese la resistenza agli agenti atmosferici, la sicurezza nell'uso, la sicurezza ed il controllo ambientale, ma che comunque non contribuisce alle caratteristiche portanti della struttura dell'edificio”

La facciata continua è composta da elementi di involucro non strutturali, non contribuisce alla capacità portante e alla stabilità dell'edificio ed è progettata come costruzione autoportante, che trasmette i pesi propri e le azioni ambientali (come vento, neve e carichi termici) e le azioni imposte (come quelle prodotte dalla folla) alla struttura principale dell'edificio.



Figura 2—1: Gioia 22, (Milano) – esempio di edificio con facciata continua;

La normativa UNI EN 13119 “Facciate continue – Terminologia” fornisce una classificazione delle diverse tipologie di facciate continue in riferimento ai loro metodi costruttivi.

I principali sistemi di facciate continue esistenti sono classificabili in:

- facciate continue a montanti e traversi
- facciate continue ad elementi (cellule)
- sistema misto

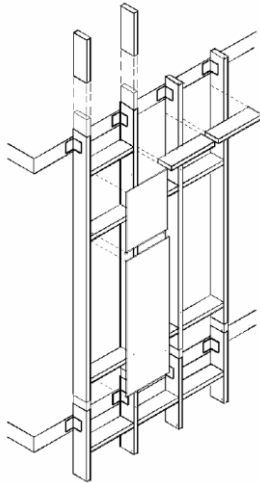


Figura 2—4: Sistema a montanti e traversi: telaio, tamponamenti e accessori assemblati in opera;

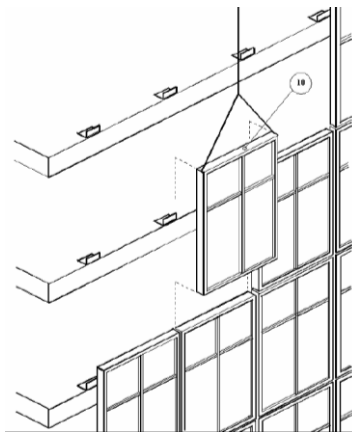


Figura 2—4: Sistema a moduli indipendenti: i moduli prefabbricati in stabilimento sono installati in opera ad incastro tra moduli contigui;

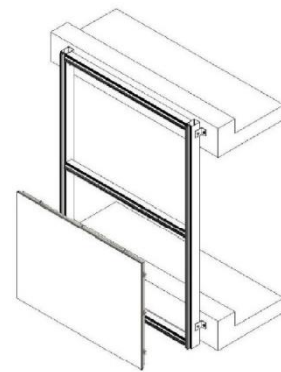


Figura 2—4: Sistema misto: telaio preassemblato in stabilimento e tamponamenti montati in opera;

Una successiva classificazione che distingue i sistemi di facciata continua, riguarda la modalità con cui si procede nel collegare il vetro agli elementi di telaio; tali fissaggi possono essere:

- *a ritegno meccanico*, con la presenza di un elemento di profilo fermavetro che blocca il vetro all'interno della sede del telaio;
- *a sigillatura strutturale*, dove il vetro è collegato al telaio tramite sigillante che sostituisce il ritegno meccanico

I prodotti da costruzione possono essere suddivisi in:

- facciate a pelle singola
- facciate a doppia pelle, costituite da due cortine (una interna, una più esterna e separate da un'intercapedine d'aria)

2.1 Sistemi fissi di schermatura esterna

Nell'ottica del conseguimento degli obiettivi di raffrescamento estivo degli ambienti, la strategia centrale di un sistema d'involucro a curtain wall (e di qualunque altro sistema di involucro) dovrebbe principalmente puntare ad avere un ottimo controllo dei carichi termici estivi negli spazi interni.

Prima ancora di eliminare, dissipare o assorbire i flussi termici negli degli spazi interni tramite altri tipi di strategia (tramite condizionamento termico interno per mezzo di climatizzatori, ventilazione degli ambienti, ecc.) è fondamentale che il carico termico venga minimizzato; ciò può esser reso possibile con adeguati sistemi tecnologici per il controllo termico solare, definiti sistemi di raffrescamento indiretti o passivi. Essi consentono il raffrescamento degli spazi interni senza interferire in maniera diretta con l'aria indoor.

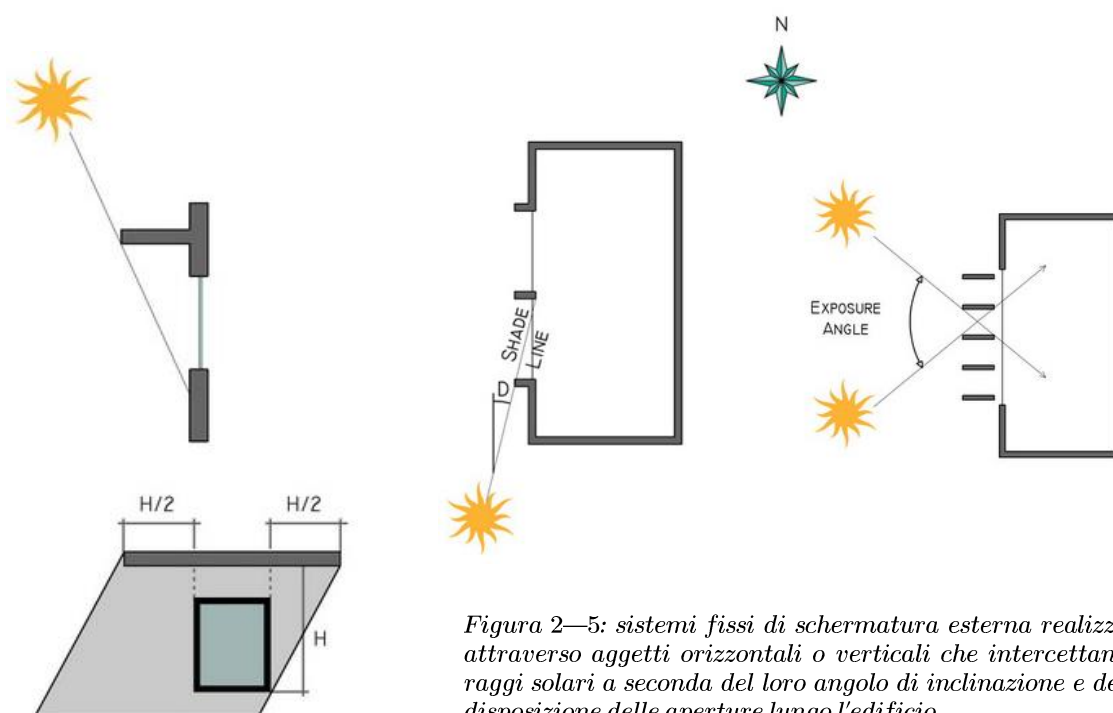


Figura 2—5: sistemi fissi di schermatura esterna realizzati attraverso aggetti orizzontali o verticali che intercettano i raggi solari a seconda del loro angolo di inclinazione e della disposizione delle aperture lungo l'edificio

I sistemi di schermatura esterna consentono la protezione solare delle superfici di involucro trasparenti, impedendo un'inevitabile captazione delle radiazioni da parte delle vetrate, situazione che porterebbe un abbattimento dei livelli di confort con probabilità di effetti serra internamente, determinando un inconveniente aumento di temperatura percepita all'interno.

I sistemi fissi di schermatura consentono l'eliminazione di quelle che sono le problematiche che riguarda movimentazione meccanica o eventuale motorizzazione dei componenti di protezione solare, con vantaggi in termini di durabilità, di momentanei malfunzionamenti dovuti a guasti, di necessità e costi di manutenzione, ecc.

Un particolare svantaggio lo si riscontra in una minore adattabilità nei confronti della variabile di soleggiamento in termini di direzione di provenienza (azimut solari) ed inclinazione dei raggi solari (angolo di incidenza solare), che non consente una completa protezione solare per tutti i periodi stagionali e in ogni or del giorno.

Le dimensioni e la specifica configurazione dei sistemi fissi di schermatura esterna sono progettate, attraverso specifiche metodologie di calcolo, per offrire una schermatura efficace nel periodo maggiormente sfavorevole, cercando di ottimizzare il comportamento schermante per le varie ore e nelle differenti stagioni di riferimento.

Caratteristiche costitutive di schermatura solare

Come elencato in Fig. 2.6, i sistemi fissi di schermatura esterna possono essere classificati, in relazione alle loro specifiche caratteristiche morfologiche e di funzionamento in diverse categorie, come:

- aggetti orizzontali;
- aggetti orizzontali realizzati con schermi costituiti da elementi (lamelle frangisole orizzontali);
- aggetti verticali;
- aggetti verticali costituiti da elementi (lamelle frangisole verticali);
- schermi verticali costituiti da elementi orizzontali;

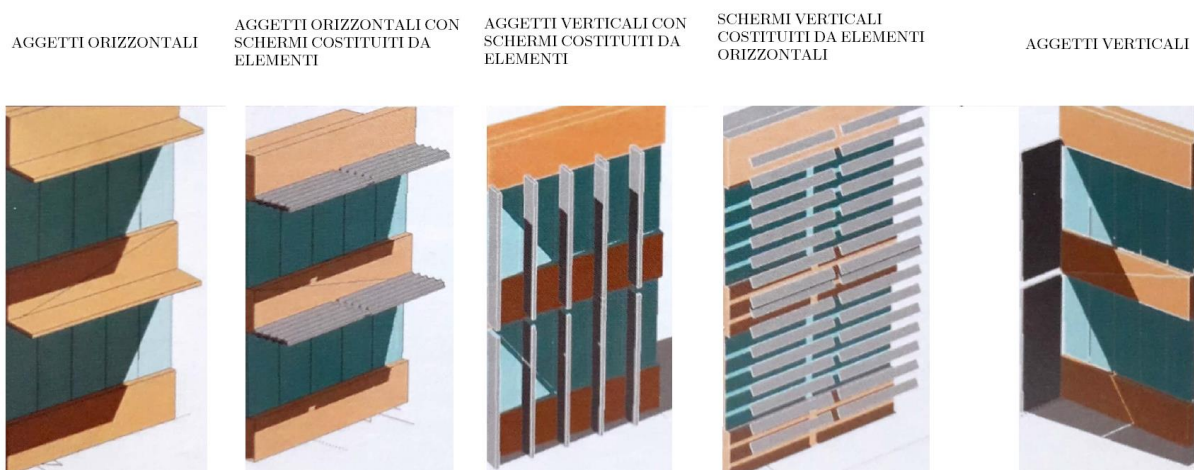


Figura 2—6: tipologie di sistemi fissi di schermatura esterna secondo la classificazione proposta.

nell'ambito di tali tipologie di sistemi e componenti per la schermatura fissa esterna, gli aggetti e gli schermi orizzontali sono utilizzabili per fronteggiare problematiche di insolazione delle facciate e delle aperture esposte a sud, sud-est e sud-ovest, mentre non risultano funzionali alle problematiche di insolazione specifiche per gli orientamenti prevalentemente ad est ed ovest in quanto, essendo questi ultimi correlati con angoli di inclinazione minori dei raggi solari, richiedono una differente strategia schermante, ai fini di evitare aggetti orizzontali di dimensioni eccessive e problematici.

A riguardo delle prestazioni delle schermature in termini di resistenza alle azioni dinamiche del vento, attualmente non c'è nessuna linea guida di progettazione nei riguardi dei carichi da vento.

La norma UNI EN 13659 definisce i requisiti essenziali di sicurezza che devono essere soddisfatti da frangisole e oscuranti esterni installati negli edifici.

In regime di marcatura CE il requisito prestazionale obbligatoriamente richiesto è la determinazione della resistenza al vento ottenuta tramite certificazione. La conformità di una chiusura oscurante ai requisiti normativi deve essere dimostrata mediante:

- prove iniziali di tipo (ITT) sulla resistenza al vento;
- controllo della produzione in fabbrica (FPC)

Sotto l'azione del vento, determinante una pressione positiva o negativa, il frangisole oscurante non deve:

- subire una deformazione o un deterioramento che possa pregiudicare il suo corretto funzionamento (carico nominale F_n);
- provocare un rischio per la sicurezza delle persone (carico di sicurezza F_s)

Entrambe le norme attribuiscono inoltre una classificazione in base alla capacità del prodotto di resistere, in termini di corretto funzionamento e di sicurezza, alle sollecitazioni del vento al quale è sottoposto.

3 Azioni globali e locali del vento su edifici

3.1 Valutazione della pressione risultante sull'involucro

Tra le varie sollecitazioni a cui può essere soggetto un edificio c'è l'azione dinamica del vento. Tali azioni si distinguono in azione di pressione ($p > 0$) quando l'azione del vento è diretta dall'esterno verso l'elemento d'involucro, al contrario invece si parla di depressione ($P < 0$).

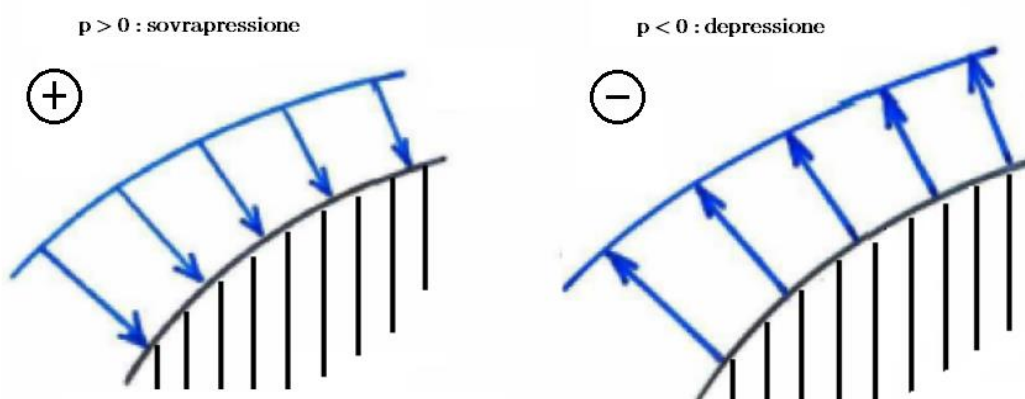


Figura 3—1: – Sovrappressione (a sinistra) e depressione (a destra) sulla faccia di una superficie.

Le azioni di depressione mostrano una sorta di aspirazione verso l'esterno dell'elemento costruttivo presente in facciata, e generalmente rappresentano la minaccia più rilevante a seconda della quale andrà dimensionato il sistema d'involucro.

La pressione di vento p , agente su di un edificio o su di un altro elemento costruttivo, è la combinazione più sfavorevole della pressione del vento p_e agente sulla superficie esterna, e della pressione del vento p_i agente sulla superficie interna dell'edificio. La direzione della pressione interna può essere rivolta nella stessa direzione della pressione esterna o in quella opposta.

La situazione più gravosa è rappresentata dalla concomitanza delle due pressioni del vento, interna ed esterna, entrambe agenti nella stessa direzione e verso sulla superficie. Nello specifico tale situazione è rappresentata dalla pressione netta agente sulla parete vista come differenza: $p = p_e - p_i$.

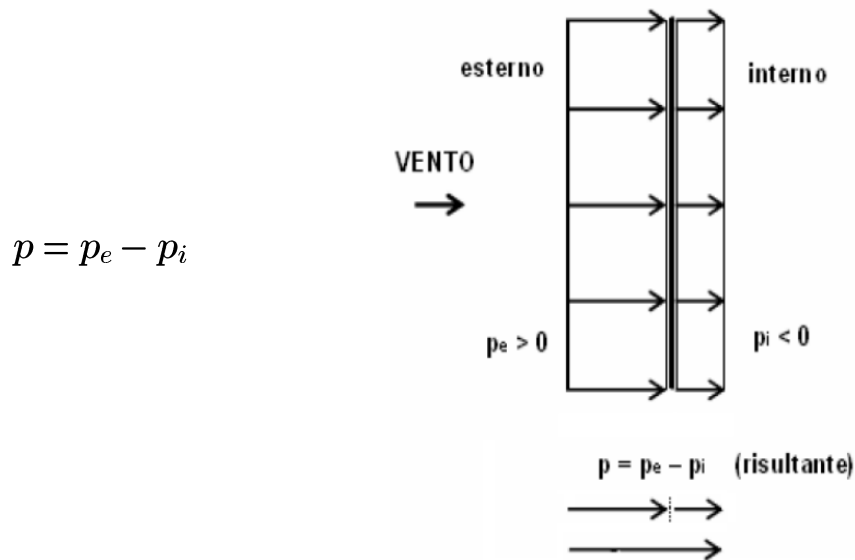


Figura 3—2: Esempio di pressione esterna e interna agente su involucro

Nel caso presente nella Fig. 3.2, in termini di pressione netta, sommando i due vettori entrambi andranno verso la stessa direzione, risultando come situazione di pressione più sfavorevole da valutare.

Tale pressione che si determina sulla facciata data dalla risultante delle pressioni esterne e interne, risulta legata ai coefficienti di pressione, nello specifico:

$$p = p_e - p_i = (c_{pe} - c_{pi}) \cdot c_d \cdot c_e \cdot q_r \quad [\text{N/m}^2]$$

- $p_e = c_{pe} \cdot c_d \cdot c_e \cdot q_r \quad [\text{N/m}^2]$
- $p_i = c_{pi} \cdot c_d \cdot c_e \cdot q_r \quad [\text{N/m}^2]$
- q_r = pressione cinetica di riferimento
- c_e = coefficiente di esposizione
- c_d = coefficiente dinamico
- c_{pe} = coefficiente di pressione interna
- c_{pi} = coefficiente di pressione esterna

La pressione determinata sulla facciata, data dalla differenza tra pressioni esterne ed interne, è legata a coefficienti di pressione esterna ed interna (c_{pe} e c_{pi})

Il c_{pe} tiene conto della forma, locale della superficie investita dal vento.

Allo stesso modo il coefficiente di pressione interna è un coefficiente che tiene conto dell'azione dell'aria all'interno dell'edificio (sia rivolta in direzione positiva a premere verso gli elementi dell'involucro, che in direzione negativa rivolta verso l'interno).

In generale il c_{pe} è molto superiore al c_{pi} , in quanto le pressioni esterne sono maggiori di quelle presenti internamente.

Oltre ai coefficienti di pressione, nella formulazione rientra un coefficiente c_d che tiene conto del comportamento dinamico, se la struttura dell'edificio è più o meno eccitabile dall'azione del vento valutato come fenomeno dinamico.

Si valuta inoltre un coefficiente di esposizione c_e , che tiene conto della posizione in cui sorge l'edificio, cioè se è presente in vicinanza a zone più o meno protette dal contesto in cui si collocano; se cioè la struttura sorge in un contesto esposto a raffiche come un'area marina o se protetto da un contesto urbano o da altri fattori che ne mitigano l'esposizione eolica.

Tale coefficiente di esposizione terrà conto della natura orografica e delle variabili da considerare per caratterizzare il contesto in cui l'edificio sorge, da cui valutare l'azione del vento.

3.2 Effetti locali del vento

La formulazione:

$$p = p_e - p_i = (c_{pe} - c_{pi}) \cdot c_d \cdot c_e \cdot q_r \quad [\text{N/m}^2]$$

presente nelle NTC 2018 verrà utilizzata per valutazioni delle azioni del vento locali. Le norme tecniche delle costruzioni contengono le indicazioni per le azioni tralasciando l'edificio nel suo complesso, non sono tarate per una progettazione locale di un involucro. Nella progettazione dell'involucro e degli elementi caratterizzanti, si preferisce far riferimento a una progettazione locale. Si va cioè a verificare un elemento caratterizzante della facciata, quindi si predilige una condizione di verifica locale anziché globale.

Per un edificio civile la pressione del vento verrà calcolata quindi valutando la localizzazione dell'edificio e in modo particolare si valuterà la velocità base di riferimento per un periodo di ritorno di 50 anni. Si va a tarare il comportamento dell'involucro allo SLU (che valuta la resistenza al collasso), considerando un periodo di ritorno delle azioni di 50 anni.

In base alla località in cui sorge la struttura, si valuta la velocità di base di riferimento $v_{b,0}$, con cui si ottiene il valore della pressione di arresto q_r : la pressione cinetica che il vento esercita su un edificio in funzione di una indicata localizzazione.

velocità di riferimento del vento v_b :

$$v_b = v_{b,0} \cdot c_a$$

$$c_a = 1 \quad \text{per } a_s \leq a_0$$

$$c_a = 1 + k_s \cdot \left(\frac{a_s}{a_0} - 1 \right) \quad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m}$$

a_s : altitudine sul livello del mare del sito su cui sorge la costruzione

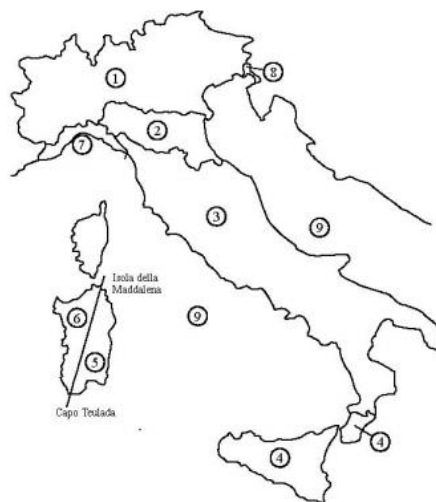


Figura 3—3: Mappa delle zone in cui è suddiviso il territorio italiano

Zona	Descrizione	$v_{b,0}$ [m/s]	a_0 [m]	k_s
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (con l'eccezione della provincia di Trieste)	25	1000	0,40
2	Emilia Romagna	25	750	0,45
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Puglia, Campania, Basilicata, Calabria (esclusa la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,37
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,36
5	Sardegnna (zona a oriente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	750	0,40
6	Sardegnna (zona a occidente della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)	28	500	0,36
7	Liguria	28	1000	0,54
8	Provincia di Trieste	30	1500	0,50
9	Isole (con l'eccezione di Sicilia e Sardegnna) e mare aperto	31	500	0,32

Figura 3—4: Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 , k

Un altro coefficiente da valutare sarà il coefficiente di esposizione c_e , che mostra quanto il contesto territoriale è più o meno esposto all'azione di raffiche ventose.

Ipotizzando l'edificio situato nella zona di Milano, esso sorgerà in una zona di categoria V, cioè in una zona particolarmente protetta dall'azione del vento poiché distante più di 30 km dalla costa, con altitudine inferiore a 500 m e con rugosità del terreno circostante rappresentato dalla classe A, in cui almeno il 15% della superficie è coperta da edifici la cui altezza media supera i 15 m.

ZONE 1,2,3,4,5						
A	--	IV	IV	V	V	V
B	--	III	III	IV	IV	IV
C	--	*	III	III	IV	IV
D	I	II	II	II	III	**
* Categoria II in zona 1,2,3,4 Categoria III in zona 5						
** Categoria III in zona 2,3,4,5 Categoria IV in zona 1						

Figura 3—5: Definizione delle categorie di esposizione

$$c_e(z) = k_r^2 \cdot c_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \left[7 + c_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right] \quad \text{per } z \geq z_{\min}$$

$$c_e(z) = c_e(z_{\min}) \quad \text{per } z < z_{\min}$$

con:

- z = altezza dell'edificio
- $c_t = 1$: coefficiente di topografia
- k_r, z_0, z_{\min} in funzione della categoria di esposizione del sito
- Categoria di esposizione del sito: in funzione della classe di rugosità del terreno, della distanza dal mare e dall'altitudine del sito.
- Edificio in centro città: zona A

Classe di rugosità del terreno	Descrizione
A	Aree urbane in cui almeno il 15% della superficie sia coperto da edifici la cui altezza media superi i 15 m
B	Aree urbane (non di classe A), suburbane, industriali e boschive
C	Aree con ostacoli diffusi (alberi, case, muri, recinzioni,...); aree con rugosità non riconducibile alle classi A, B, D
D	a) Mare e relativa fascia costiera (entro 2 km dalla costa); b) Lago (con larghezza massima pari ad almeno 1 km) e relativa fascia costiera (entro 1 km dalla costa) c) Aree prive di ostacoli o con al più rari ostacoli isolati (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate,)

Figura 3—6: Classi di rugosità del terreno

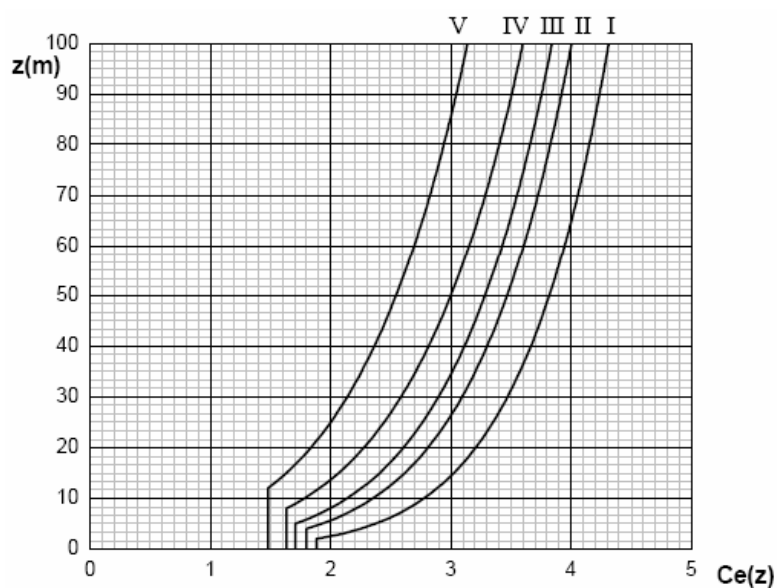


Figura 3—7: Variazione di C_e in funzione dell'altezza "z" dell'edificio

In Fig. 3.7 si noti come il c_e della cat. I vari in modo meno ripido rispetto ad altre classi di esposizione. Tale andamento procede inizialmente in verticale con valore di coefficiente costante (al di sotto di una quota z_{min}). Oltre tale altezza minima la variazione segue un andamento logaritmico, con valore di c_e che aumenta progressivamente salendo di quota. In tale situazione la rugosità del contesto garantito dagli edifici circostanti riduce il proprio effetto protettivo.

3.2.1 Resistenza al vento

A differenza di quanto previsto per la permeabilità all'aria e la tenuta all'acqua, la normativa europea non prevede una vera e propria classificazione delle prestazioni. La conformità alla norma EN 13116 è assicurata nei termini in cui la facciata continua resiste in modo adeguato al carico di vento di progetto (carico di servizio), applicato sia in pressione sia in depressione secondo la procedura di prova indicata dalla UNI EN 12179, senza che si riscontri un'inflexione frontale degli elementi di telaio superiore a 1/200 della luce (e comunque non superiore a 15 mm). Tale inflessione frontale deve essere temporanea ed è ammessa, una volta rimosso il carico, una deformazione residua non superiore al 5%. Inoltre la facciata continua deve resistere anche al 150% del carico di vento di progetto (carico di sicurezza), applicato sia in pressione sia in depressione secondo la procedura di prova indicata dalla UNI EN 12179, senza che si verifichino deformazioni e danneggiamenti permanenti negli elementi di telaio, nelle parti apribili, negli elementi di tamponamento, negli ancoraggi e negli elementi di fissaggio. Inoltre non dovranno verificarsi rotture dei vetri, distacchi di guarnizioni, fermavetri, cornici e/o profili decorativi.

3.2.2 Coefficiente di pressione esterna c_{pe}

Eventuali aumenti o variazioni di pressione generati in corrispondenza di zone soggette a cambi di configurazione dell'involucro (in modo particolare sugli spigoli, alla base o sulla copertura), a variazioni di volumi o ad altre irregolarità geometriche, fanno nascere eventi non rintracciabili in termini di coefficienti direttamente all'interno delle NTC.

Per procedere con tali analisi può essere d'aiuto il documento CNR–DT 207 R1/2018.

Esso offre indicazioni sui coefficienti di azione del vento non solo globali ma che considerano anche gli andamenti specifici dell'azione del vento in corrispondenza degli spigoli dell'edificio.

In questo caso si procede con un'analisi più dettagliata che illustra come l'andamento del coefficiente di pressione esterna c_{pe} , su un involucro in un'area variabile da 1 a 10 m². Se l'elemento di facciata da considerare possiede una dimensione superiore ai 10 m², si rientra nell'analisi dei coefficienti globali delle Norme Tecniche delle Costruzioni. Nello studio delle curtain wall e dei propri elementi modulari, in genere le dimensioni risultano comprese tra 1 m² e 10 m², ragion per cui ci si affida alle prescrizioni del documento tecnico del CNR–DT 207 R1/2018.

Tale DT/2018 va a parzializzare la superficie dell'involucro in zone dove i coefficienti di pressione saranno più alti e in zone in cui i coefficienti di pressioni saranno più bassi. Va quindi a distinguere le zone specifiche in cui si avranno pressioni positive o pressioni negative.

Ipotizzando un edificio rettangolare, esposto all'azione del vento proveniente da una data direzione investendo una determinata facciata sopravento (zona D), quella retrostante (zona E) sarà sottovento e le zone A, B, e C saranno quelle soggette a pressione negativa.

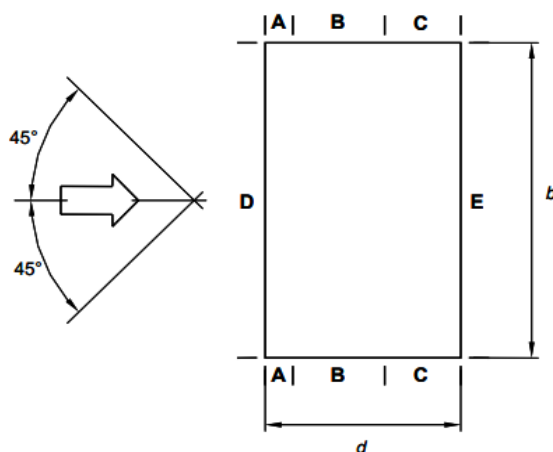


Figura 3—8: Suddivisione delle pareti verticali di edifici a pianta rettangolare in zone di uguale pressione (pianta).

In tal caso, i coefficienti locali vanno a tener conto della posizione dell'elemento di analisi nel contesto globale dell'edificio; la posizione dipende dal rapporto geometrico che ho tra base D , il lato/profondità della struttura d (in funzione della direzione di provenienza dell'azione del vento) e dell'altezza h dell'edificio.

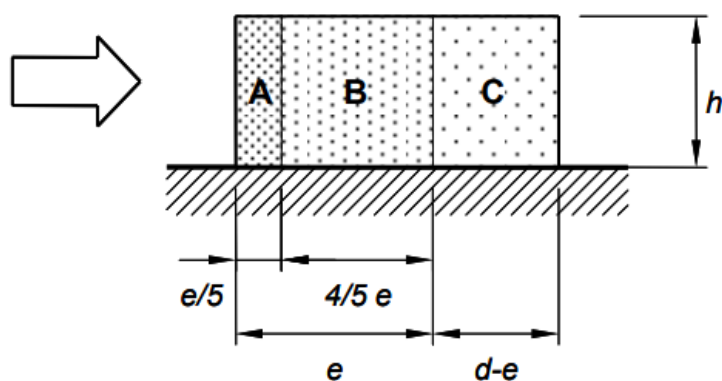


Figura 3—9: Suddivisione delle pareti verticali di edifici a pianta rettangolare in zone di uguale pressione (prospetto).

Ovviamente il rapporto di forma h/d risulta non secondario: il coefficiente di esposizione $c_e = c_e(z_{\min})$ infatti varia in funzione dell'altezza di riferimento, per cui l'azione e i relativi effetti aumenteranno su edifici di quota elevata

Zona	A		B		C		D		E	
h/d	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$	$c_{pe,10}$	$c_{pe,1}$
5	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,7	
1	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,8	+1,0	-0,5	
$\leq 0,25$	-1,2	-1,4	-0,8	-1,1	-0,5		+0,7	+1,0	-0,3	

Figura 3—10: Coefficienti di pressione per le pareti verticali di edifici a pianta rettangolare

Tali schematizzazioni proposte dal DT 207 R1/2018 in Fig. 3—10 provengono da verifiche svolte in galleria del vento su edificio a pianta rettangolare. Si noti come le zone sottovento 'E' e le zone laterali 'A, B, C' verificheranno pressioni esterne negative in funzione della loro disposizione nei confronti della direzione dell'azione del vento. I valori di massimo negativo si avranno in corrispondenza degli spigoli.

Da ciò è chiaro notare come nelle fasi di dimensionamento degli elementi di facciata, saranno di maggiore interesse le verifiche nelle zone di spigolo, dove i valori di coefficiente di pressione esterna sono più elevati. Si andrà a dimensionare il comportamento meccanico degli elementi di facciata andando a posizionare un modulo caratteristico del mio involucro che corrisponde alle fasce più sollecitate.

In funzione della conformazione strutturale e geometrica, si spiegano determinati fenomeni definiti effetti locali, che avvengono quando l'azione del vento va a concentrarsi principalmente a determinate quote in corrispondenza di alcuni spigoli o punti sfavorevoli.



Figura 3—11: Collasso di elementi di facciata in prossimità degli spigoli, per azione di fenomeni di depressione.

Dalla Fig. 3–11 si nota come la facciata sia stata soggetta ad azioni di depressione, che hanno causato un collasso parziale di elementi di involucro, rendendolo inutilizzabile in condizioni di Stati Limite di Esercizio e in termini di Stato Limite Ultimo.

3.2.3 Coefficiente di pressione interna c_{pi}

L'edificio, in base alla provenienza dell'azione del vento e in relazione ad una più o meno corretta distribuzione delle parti apribili lungo l'involucro, può essere più o meno permeabile nel complesso o può esserlo più o meno su una direzione rispetto ad un'altra. In base a ciò il c_{pi} può essere nell'edificio positivo o negativo.

- $c_{pi} > 0$, se il coefficiente di pressione dall'interno spinge verso l'involucro perimetrale
- $c_{pi} < 0$, se la pressione ha vettore che si orienta dall'involucro verso zone più interne degli ambienti

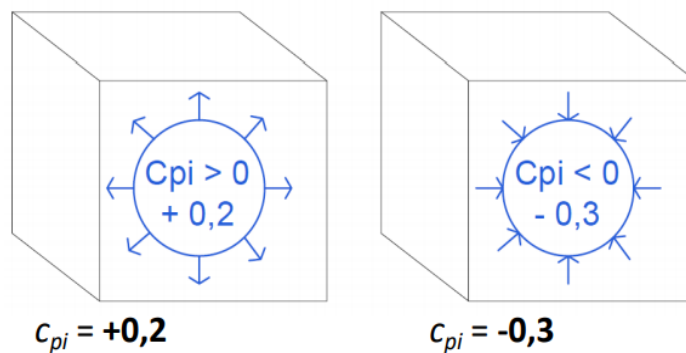


Figura 3–12: Schematizzazione simbolica del C_{pi}

3.3 Numero di Reynolds

Il comportamento del vento entro lo strato limite dipende in modo rilevante dalla presenza di ostacoli e dal numero di Reynolds. La presenza di un ostacolo e la velocità del vento, influenzano in modo rilevante il moto del fluido che può essere più o meno turbolento.

Superata la condizione di “moto laminare”, si forma un sistema di vortici che dissipano l’energia in eccesso non dispersa per deformazione viscosa. L’entità della possibile deformazione viscosa prima dell’insorgere della turbolenza viene regolata dal rapporto tra la forza d’inerzia del vento agente, $\rho V^2 l^2$ dovuto alla massa d’aria che scorre per una certa estensione l di deformazione relativa rispetto allo strato inferiore, e la sua forza di trascinamento viscoso $\mu V l$, cioè dal cosiddetto “Numero di Reynolds”:

$$Re = \frac{\rho V^2 l^2}{\mu V l} = \frac{\rho V l}{\mu}$$

dove:

- ρ è la densità dell’aria (pari a 1.25 kg/m^3 al livello del mare),
- μ è la viscosità dinamica dell’aria,
- l è una misura spaziale caratteristica del fenomeno (la lunghezza di una superficie, il diametro di un oggetto, una misura geometrica indicativa del volume d’aria coinvolto, ecc.).

Sulla superficie del corpo esposta al flusso incidente si realizza un sottile strato limite di natura laminare o turbolenta, in funzione del numero di Reynolds Re e della scabrezza superficiale del corpo.

Quando lo strato limite è sottoposto a un gradiente di pressione negativo nella direzione del vento, cioè quando il flusso tende ad accelerare per il principio di Bernoulli, lo spessore dello strato limite tende a diminuire e la vorticità che si realizza al suo interno è trasportata verso la superficie; in altre parole, lo strato limite tende ulteriormente a schiacciarsi contro la superficie. Il fenomeno opposto si attua quando lo strato limite è sede di un gradiente positivo di pressione, detto gradiente avverso di pressione; in tale circostanza lo spessore dello strato limite cresce, e la vorticità è trasportata dalla superficie del corpo verso l’esterno, dando vita al fenomeno della separazione dello strato limite. A valle di tale separazione, il flusso esterno allo strato limite è allontanato dalla superficie; pertanto, la vorticità non è più confinata in una zona sottile aderente alla superficie, ma occupa un’ampia zona di flusso. Questa zona del flusso prende il nome di scia vorticoso, e ha un ruolo essenziale nel comportamento delle costruzioni sottoposte all’azione del vento.

L’insorgenza di un gradiente avverso di pressione presenta aspetti diversi a seconda che la superficie del corpo sia arrotondata o abbia spigoli vivi.

Nel caso dei corpi con superfici arrotondate, il fenomeno fisico dipende, oltre dalla forma del corpo, dal numero di Reynolds e dalla scabrezza della superficie.

La Fig. 3.13 mostra il caso di un elemento a forma cilindrica liscio di lunghezza infinita e sezione circolare, immerso in un campo di vento laminare, ovvero in assenza di turbolenza.

Per $Re < 1$, lo strato limite è laminare e resta attaccato al cilindro lungo l'intero perimetro (Fig. 3.13a). Per valori $1 < Re < 30$, lo strato limite resta laminare, ma si separa dal cilindro creando due vortici stazionari simmetrici a struttura laminare (Fig. 3.13b). Per valori $30 < Re < 10000$, lo strato limite è ancora laminare ma i vortici, pur avendo ancora una struttura laminare, si staccano in maniera alternata dal cilindro creando una scia di Von Karman, cioè due treni di vortici (Fig. 3.13c), con velocità di traslazione nei riguardi del cilindro. Per $10000 < Re < 200000$, lo strato limite resta laminare, ma i vortici presentano struttura in prevalenza turbolenta con strati vorticosi di difficile individuazione (Fig. 3.13d). Per valori di $Re > 200000$, lo strato limite è turbolento, i punti di separazione si spostano a valle e la scia, tuttora turbolenta, diventa più stretta (Fig. 3.13e). L'incremento della rugosità superficiale fa sì che il regime di transizione si realizzi per numeri di Reynolds minori.

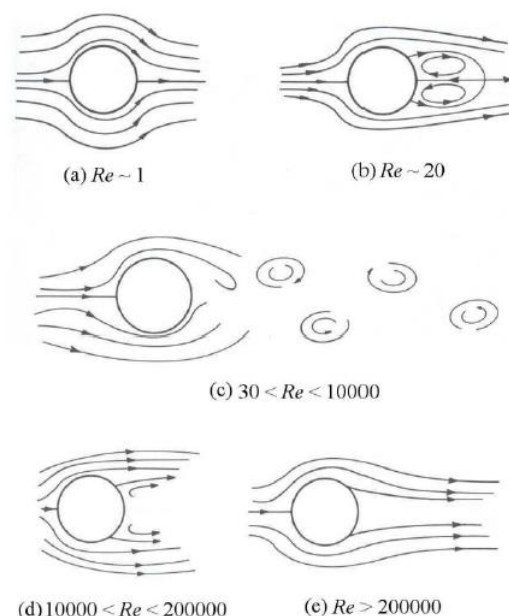


Figura 3—13: Cilindro di lunghezza indefinita e sezione circolare immerso in un campo di flusso.

La situazione cambia profondamente nei corpi con spigoli vivi. Essi danno luogo alla separazione dello strato limite poiché, se il flusso riuscisse a contornare lo spigolo, la velocità esterna allo strato limite sarebbe molto alta e la pressione molto piccola. Subito dopo lo spigolo si avrebbe quindi un gradiente avverso di pressione tanto elevato da essere insostenibile senza separazione. La (Fig. 3.14a). mostra il flusso nell'intorno di un modello a sezione quadrata, dove la separazione di scia si realizza presso gli spigoli della faccia frontale. La configurazione del flusso è quindi indipendente dal numero di Reynolds e dalla scabrezza della superficie. Si noti anche che i corpi allungati nella direzione del flusso spesso danno luogo, dopo la separazione dagli spigoli frontali, alla formazione di bolle di separazione (Fig. 3.14a); a valle di queste il flusso tende a riattaccarsi alle pareti laterali del corpo, poi si separa di nuovo in corrispondenza degli spigoli retrostanti.

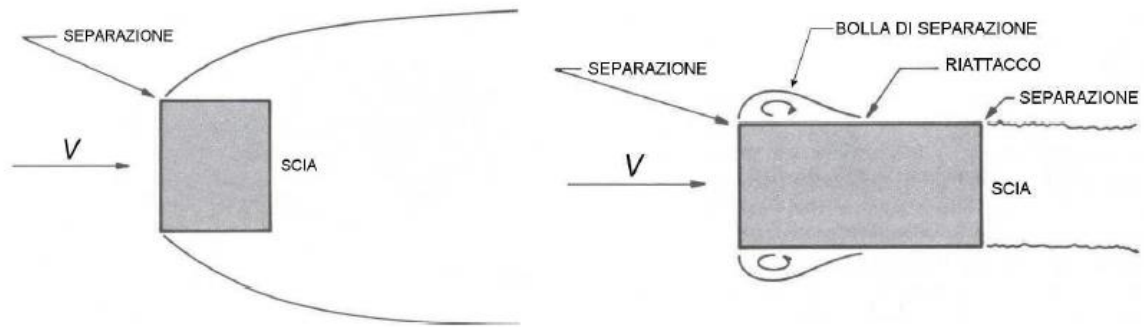


Figura 3—14: Separazione del flusso da corpi a spigoli vivi.

Sulla scorta di questi principi, le azioni aerodinamiche del vento sui corpi fissi e indeformabili dipendono, in maniera diversa, dal flusso incidente e dalla scia vorticoso. Il primo agisce attraverso la velocità media e la sua fluttuazione. La seconda genera azioni legate alla turbolenza prodotta dal corpo. L'ingegneria del vento è solita quantificare tali azioni attraverso parametri adimensionali chiamati, nel loro complesso, coefficienti aerodinamici.

3.3.1 Coefficiente di pressione c_p

Si definisce coefficiente di pressione il parametro c_p . Il **coefficiente di pressione**, in meccanica dei fluidi, è un valore adimensionale che descrive la pressione relativa in un campo di flusso. Ogni punto immerso in un flusso ha un proprio e unico coefficiente di pressione c_p .

In un campo di moto stazionario attorno a un cilindro circolare, si consideri una corrente stazionaria in un fluido senza attrito che investa un ostacolo cilindrico:

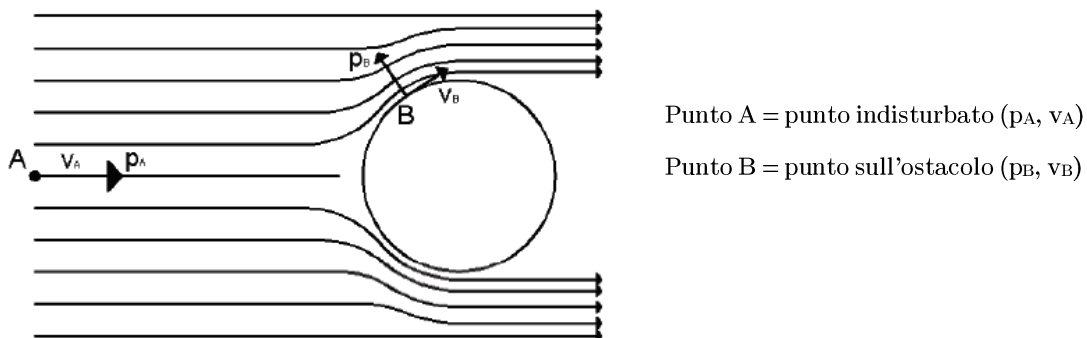


Figura 3—15: Flusso di corrente stazionaria agente su un corpo cilindrico;

dove:

- p_A è la pressione statica in un punto asintotico, infinitamente lontano dalla superficie dell'oggetto misurato;
- p_B è la pressione statica nel punto dove la misura è effettuata;
- v_A è la velocità asintotica, fuori dal flusso nel quale è immerso l'oggetto misurato;
- v_B è la velocità dove viene effettuata la misura;

Per il principio di conservazione dell'energia (teorema di Bernoulli):

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

$$p_A + \rho \frac{v_A^2}{2} = p_B + \rho \frac{v_B^2}{2} ; \quad p_B - p_A = \rho \frac{v_A^2}{2} \left(1 - \frac{v_B^2}{v_A^2} \right)$$

$$= C_P \left(\rho \frac{v_A^2}{2} \right) , \quad con \ C_P = \left(1 - \frac{v_B^2}{v_A^2} \right)$$

Fissate (p_0, v_0) quali caratteristiche di riferimento della zona non disturbata, si ha:

$$p_A = p_0 \quad v_A = v_0 \quad \text{da cui: } p_B - p_0 = \rho C_p \left(\frac{v_0^2}{2} \right)$$

Il coefficiente C_p viene chiamato coefficiente di forma o di pressione, varia nel tempo anche violentemente in presenza di zone vorticosi, assumendo sia valori positivi (minori di 1), sia negativi e dipende dal punto rispetto al quale viene calcolata la pressione p_B .

Le particelle che scorrono lungo la linea di corrente decelerano dal valore v_A della corrente asintotica a un valore nullo nel punto di ristagno anteriore p_{\max} corrispondente allo spessore massimo, denominato picco di aspirazione. Da qui, la particella rallenta fino a raggiungere l'altro punto di ristagno p_{\min} sul bordo di uscita, dopo di che accelera nuovamente, riassumendo la velocità della corrente libera.

Nel moto dei corpi nei fluidi interessa, più che il livello della pressione p la differenza di pressione $p - p_\infty$ provocata in ogni punto dal moto stesso e si definisce **coefficiente di pressione** c_p il valore dato dal rapporto adimensionale

$$C_p(t) = \frac{p_B - p_0}{q_a}$$

con:

- $q_a = 0.5 \cdot \rho V^2$, è la pressione dinamica in un punto asintotico, infinitamente lontano dalla superficie dell'oggetto misurato.

Il valore del coefficiente C_p dipendente dall'aerodinamica della circolazione del vento attorno al corpo, in altre parole in altre parole dipende dalla forma del corpo e dalla posizione del punto considerato sulla superficie del corpo. La stima del C_p non è facile, per farlo è importante eseguire prove sperimentali in galleria del vento. Se consideriamo un corpo "spigoloso" investito dal vento, cioè dal fluido "aria" in movimento, si nota come l'addensamento dei filetti fluidi in corrispondenza di un ostacolo implica necessariamente un aumento della velocità del fluido (equazione di continuità), di conseguenza una depressione sulla parete a contatto.

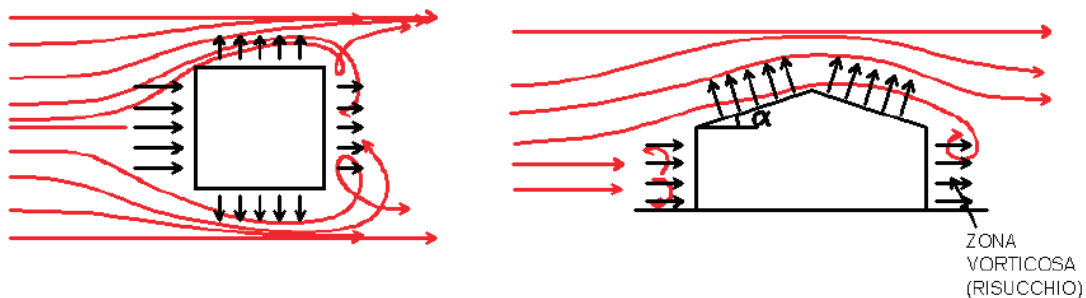


Figura 3—16: Variazione del C_p sul confine dei strutture.

Nella parete sopravvento invece, dove il fluido subisce una diminuzione di velocità, si avrà invece un aumento di pressione. Nelle zone soggette a depressione il coefficiente C_p può assumere valori negativi anche elevati ($-1.7/-1.8$).

3.4 Edifici ravvicinati e ostacoli

È noto che edifici di limitata altezza possono essere soggetti a venti intensi che sono deviati al livello del suolo da edifici alti adiacenti, ma questo effetto non è mai stato precedentemente contemplato in codice di progettazione nazionali o internazionali. La EN 1991-1-4 offre alcune indicazioni all'interno dell'Allegato A.4

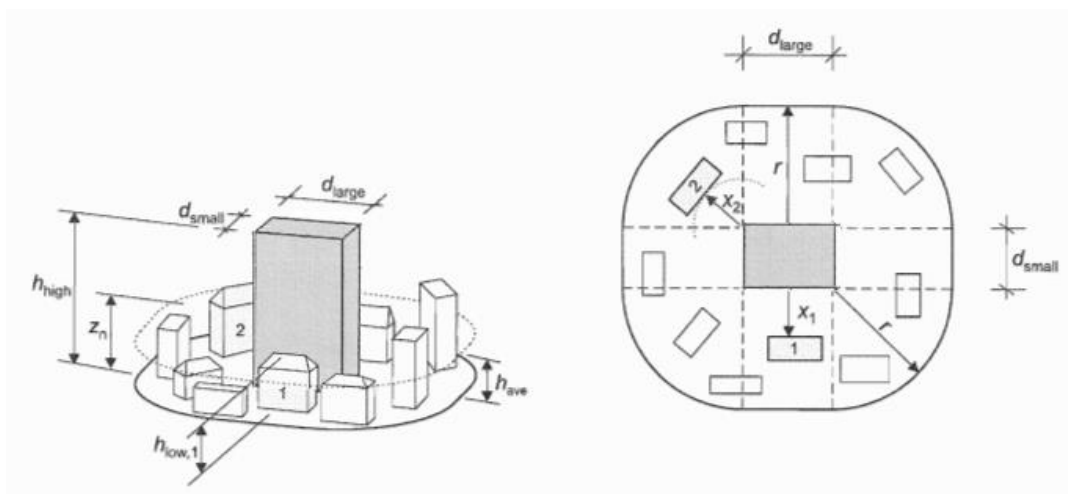


Figura 3—17: EN 1991-1-4. Allegato A.4: Influenza di un edificio alto, su due diverse strutture circostanti.

Quando edifici o altri ostacoli fissi sono vicini tra loro, essi determinano una mutua schermatura in un'area che si estende dal suolo a circa il livello medio delle coperture. Secondo la normativa EN 1991-1-4, la presenza di queste aree schermate fa sì che il profilo del vento trasli verso l'alto, in modo che il livello del suolo efficace si trovi subito al di sotto il livello medio delle coperture, ad un'altezza denominata altezza di traslazione h_{dis} . Tale spostamento riduce la velocità del vento a qualsiasi assegnata altezza dal suolo ad un valore inferiore di quello atteso per la stessa altezza se non ci fossero ostruzioni.

Per valutare gli effetti di pressione che interessano l'involucro della costruzione va quindi anche valutata l'interazione che le specifiche caratteristiche del contesto hanno con l'edificio in esame. A seguito di tale interazione possono determinarsi fenomeni aerodinamici dovuti a particolari configurazioni dell'assetto morfologico del contesto circostante, in grado di determinare ad esempio, un aumento di velocità di circolazione di flussi d'aria, oppure fenomeni di ostruzione che possono instaurare situazioni specifiche di scarsa ventilazione.

L'interazione dei flussi di vento con l'ambiente costruito dà luogo anche ad una serie di fenomeni aerodinamici che variano in funzione della morfologia degli elementi investiti dal flusso eolico e dell'angolo di incidenza con cui la direzione di provenienza del vento impatta gli organismi edilizi. Tali fenomeni di modificazione delle condizioni di regime di flusso del vento danno luogo ad una complessa realtà, nella quale turbolenze, rallentamenti, accelerazioni, zone di ombra del vento, determinano una situazione di difficile previsione e valutazione.

La conoscenza della fenomenologia in gioco consentirà tuttavia di effettuare valutazioni che, con buona approssimazione, presentano una corretta interpretazione della reale dinamica microclimatica che caratterizza l'ambito e l'assetto edilizio di progetto.

3.4.1 Fenomenologie aerodinamiche in ambito urbano

Le fenomenologie aerodinamiche che influenzano maggiormente le condizioni del microclima locale, andando a modificare le condizioni di ventilazione e di pressione esterna globale e locale, sono molteplici e di diversa natura. Ai fini di tener conto di questi aspetti è opportuno andare anche a considerare quelli che sono fenomeni che hanno un'incidenza maggiormente rilevante, tale da suggerire specifici input e indicazioni di sviluppo progettuale e di verifica sugli elementi più significativi che compongono l'involucro edilizio.

Di seguito sono illustrate le più comuni fenomenologie aerodinamiche:

- ombra di vento
- effetto barriera
- effetto scia
- effetto canale
- effetto Venturi

3.4.2 Ombra di vento

Effetto di calma di vento che si verifica nella zona posteriore, rispetto al fronte esposto all'impatto di vento, degli edifici. L'ampiezza di tale zona varia con le dimensioni e la morfologia dell'edificato, tuttavia, per edifici caratterizzati da un rapporto dimensionale circa pari tra altezza e lunghezza del fronte, o caratterizzato dalla prevalenza della dimensione orizzontale, risulta essere di una profondità pari a circa due volte l'altezza dell'edificio stesso. Ciò significa che nella parte del corpo edilizio posteriore a quella di impatto di vento, fino ad una distanza dall'edificio pari a circa due volte la sua altezza, si verifica una calma di vento e la zona interessata risulta essere in depressione (pressione negativa o bassa pressione; al contrario della zona di impatto che sarà caratterizzata da alta pressione). All'aumentare della distanza da tale limite della zona di calma di vento ($L = 2H$) il vento ricomincia gradualmente a riacquistare la sua velocità originaria, fino a

riprendere la velocità di flusso libero ad una distanza pari a circa 7 volte l'altezza dell'edificio. Tale fenomenologia assume tuttavia, come descritto, aspetti differenti in funzione della specifica morfologia edilizia in oggetto. Da sperimentazioni condotte in galleria del vento è stato rilevato l'aumentare della "scia di vento" e quindi della zona di ombra di vento, all'aumentare del rapporto geometrico L/W (dove L sia la lunghezza e W la profondità) e H/W (H altezza). Risulta complesso affrontare la casistica, che risulta molto estesa degli effetti aerodinamici definiti e riportati studi e sperimentazioni condotti in galleria del vento, relativi a molteplici morfologie edilizie e a differenti condizioni di ventilazione a cui possono essere sottoposte.

Nella Fig.3.18 è riportata una casistica di riferimento per edifici di forma parallelepipedica con differenti rapporti H , W , L .

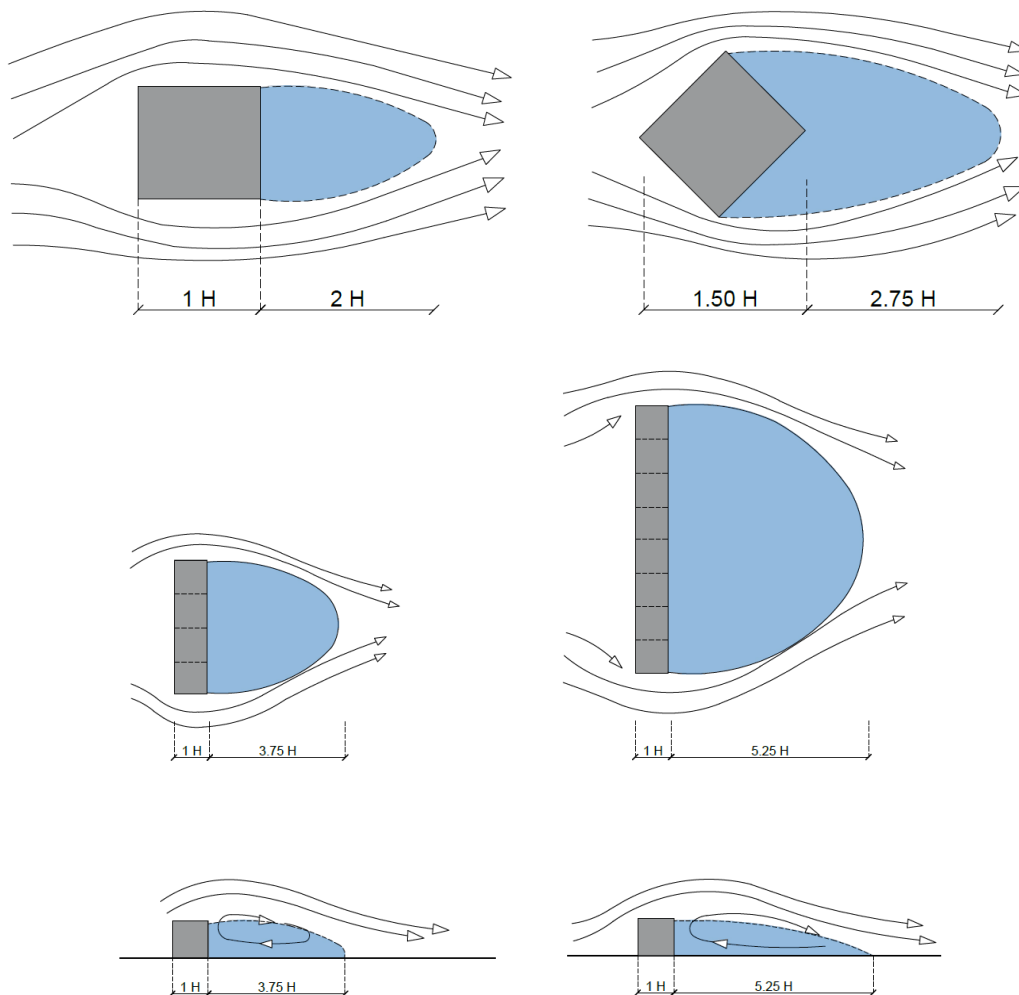


Figura 3—18 : Abaco delle situazioni d'ombra di vento e di estensione nella zona sottovento per edifici caratterizzati da differenti rapporti dimensionali tra altezza H , lunghezza L , larghezza W . Casistica desunta da studi sperimentali condotti in galleria del vento

3.4.3 Effetto barriera

È sostanzialmente un fenomeno di riduzione, talvolta notevole, della velocità del vento ad opera di un edificio o serie di edifici a prevalente sviluppo longitudinale disposti più o meno frontalmente rispetto la direzione di provenienza dei venti. L'effetto barriera è incrementato se gli edifici sono disposti su più file tra loro parallele: negli spazi interstiziali la velocità del vento risulta mediamente essere pari al 30% di quella di flusso libero che impatta la prima fila di edifici direttamente esposti rispetto la direzione di provenienza del vento.

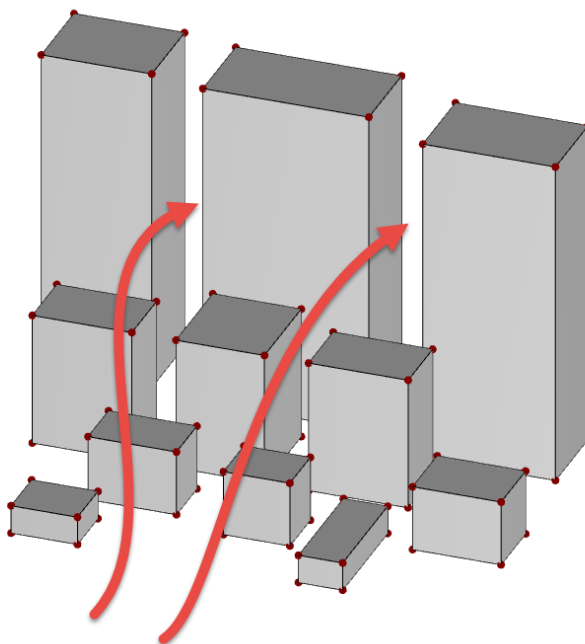


Figura 3—19: Effetto barriera, con estensione della scia e dell'ombra di vento che va ad interessare un'ampia zona del contesto urbano sottovento.

3.4.4 Effetto scia

È un fenomeno legato agli effetti dell'ombra di vento e consiste in una turbolenza che si verifica in tale zona d'ombra. Le condizioni di esistenza del fenomeno prescindono dalla geometria dell'edificio. L'entità del fenomeno è funzione, oltre che della geometria dell'edificio, dell'angolo di incidenza del vento. L'andamento dei flussi d'aria in tale effetto è caratterizzato da un procedere a ritroso verso l'edificio per poi generare una zona di turbolenza

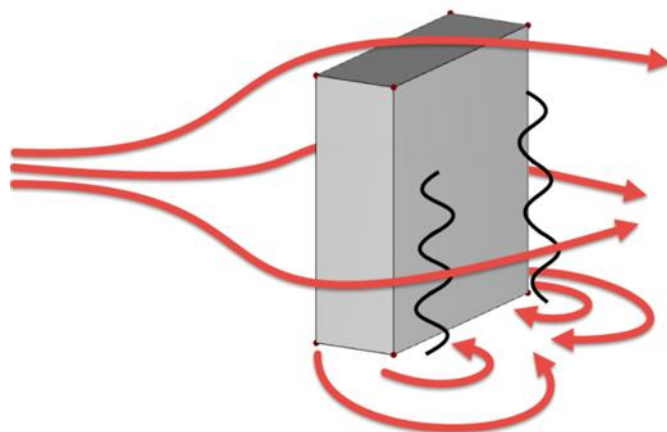


Figura 3—20: Effetto scia, che in zona di sottovento presenta azioni di turbolenza

3.4.5 Effetto canale

È un effetto caratterizzato da un fenomeno di incanalazione dei flussi di vento (Fig. 3.21) che, incontrando morfologie urbane caratterizzate dalla presenza dei cosiddetti canyon urbani (ampi allineamenti viari definiti sui due lati da fronti edilizi più o meno continui) disposti parallelamente alla loro direzione di provenienza, vi si convogliano, determinando condizioni di alta ventilazione in direzione del canale. Gli edifici risultano caratterizzati da un flusso di ventilazione parallelo ai fronti edilizi, con una pressione di vento sui fronti principali non elevata.

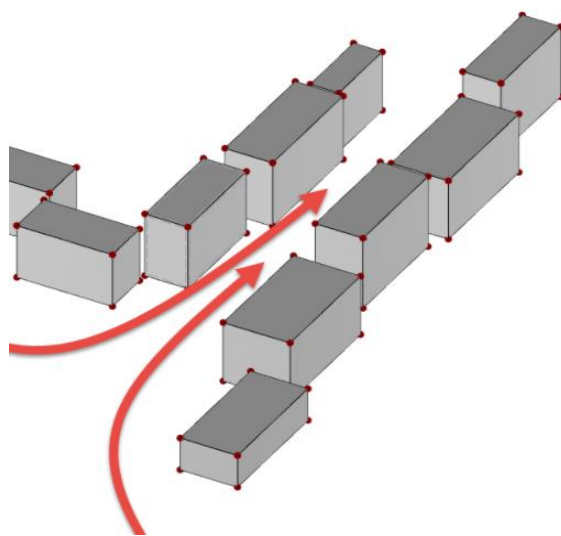


Figura 3—21: Effetto canale: incanalamento di flussi ventosi nei canali costituiti dai canyon urbani

3.4.6 Effetto Venturi

Rappresenta un effetto caratterizzato da un aumento della velocità del vento dovuto ad una diminuzione della sezione del canyon urbano, ovvero ad un restringimento della sezione viaria. Questa situazione, in maniera graduale oppure repentina, in funzione della morfologia dello specifico assetto edilizio, determina un naturale aumento della velocità del vento, che è una conseguenza dell'adattamento del flusso eolico alla minore portata d'aria della sezione viaria in cui si è incanalato.

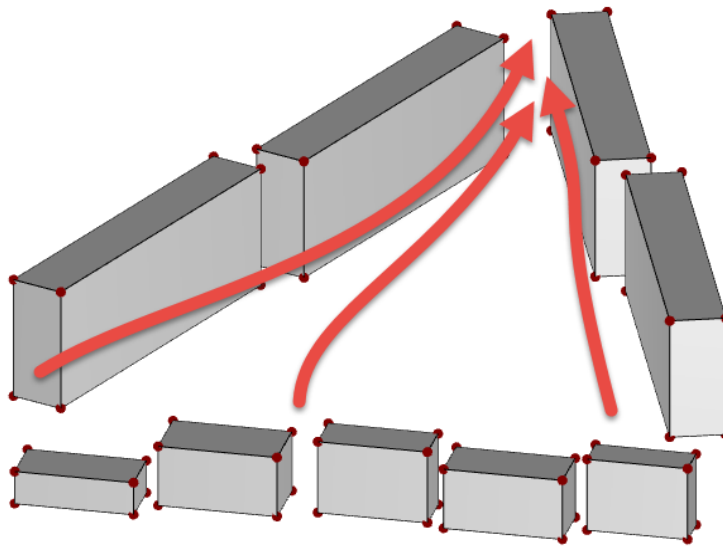


Figura 3—22: Effetto Venturi, causato da restringimento del canale viario

4 Galleria del vento

In fase di progettazione e verifica di edifici particolarmente alti, le valutazioni sono escluse dalle prescrizioni normative. Il documento CR–DT 201 R1/2018, come specifica nel capitolo 1.3, dichiara di essere “applicabile, con le limitazioni e le prescrizioni indicate nel testo, alle costruzioni civili, purché di altezza non superiore a 200 m”.

A ragione di ciò, il documento CNR rimanda all’analisi dell’ “Appendice S, relativa all’uso della galleria del vento, e all’appendice T, relativa all’uso delle simulazioni computazionali del vento” per verifiche trasversali a quelle più ordinarie.

Per i casi meno comuni, o per strutture di rilevante importanza o particolare delicatezza, si raccomanda che le analisi di progetto e di verifica utilizzino dati di comprovata affidabilità, oppure derivati da valutazioni specifiche per il singolo caso in esame. Tali valutazioni possono inoltre rappresentare uno strumento di controllo dei risultati dei calcoli e di ottimizzazione delle prestazioni aerodinamiche e strutturali di un manufatto, generalmente conducendo, in questo caso, ad un vantaggio economico e/o ad un aumento dei margini di sicurezza.

La sperimentazione in galleria del vento è basata sulla riproduzione, in scala ridotta, dei fenomeni fisici che si verificano al vero. La riduzione in scala non deve riguardare solo la geometria, ma tutta la fisica che interviene nel processo di interazione tra il vento e le costruzioni. Pertanto, nella modellazione in galleria occorre scalare opportunamente tutte le grandezze fisiche che intervengono nel problema oggetto di indagine, e ciò viene effettuato con regole diverse a seconda dei casi. In particolare, oltre le proprietà strutturali occorre scalare le caratteristiche del flusso eolico. A tal fine vanno definite le scale delle diverse grandezze fisiche che compaiono nel problema oggetto di indagine, da intendersi come il rapporto tra il valore che ciascuna grandezza assume in galleria ed al vero.

4.1 Requisiti per un’accurata modellazione in galleria del vento

Per una corretta riproduzione dei fenomeni fisici, i parametri del flusso in galleria devono rappresentare, mediante opportuna riduzione in scala, quelli del flusso reale. Ciò comporta il rispetto delle seguenti regole:

- 1) le quantità adimensionali (ad esempio numero di Reynolds, intensità di turbolenza, velocità del vento, etc.) devono avere in galleria lo stesso valore che assumono al vero;
- 2) le quantità dotate delle stesse dimensioni fisiche devono essere scalate nella stessa misura; ciò vuol dire, ad esempio, che le quantità aventi le dimensioni di una lunghezza (dimensioni geometriche del modello, scala integrale della turbolenza, profondità dello strato limite atmosferico, etc.) devono essere scalate tutte della stessa quantità, indicata come scala delle lunghezze, λ_L , intesa come il rapporto tra le lunghezze utilizzate nel corso delle prove e le lunghezze al vero;

- 3) le scale delle differenti grandezze fisiche devono rispettare le equazioni dimensionali; ciò vuol dire che, ad esempio, la scala delle velocità, λ_V (rapporto tra la velocità media del flusso durante la prova in scala e quella reale), deve essere pari alla scala delle lunghezze, λ_L , divisa per la scala dei tempi, λ_T (definita dal rapporto tra le durate temporali delle prove in galleria e le durate equivalenti al vero).

In generale non è possibile soddisfare contemporaneamente tutti i requisiti sopra elencati, e pertanto è prassi fare ricorso ad una modellazione “distorta”, ossia tale da rispettare solo alcuni dei vincoli sulla riduzione in scala. La scelta di quali dei vincoli di scalatura possano, di volta in volta, essere violati è estremamente delicata e determina in larga misura la qualità dei risultati della sperimentazione. Deve essere inoltre garantito che:

- 1) per le strutture a sviluppo verticale, i profili della velocità media e dell'intensità di turbolenza riproducano quelli reali, fino ad un'altezza pari almeno a 1,5 volte la massima quota della struttura;
- 2) per tutte le strutture, la scala integrale della turbolenza longitudinale in galleria sia il più possibile prossima a quella che si ottiene dal valore al vero, trasformandolo secondo la scala geometrica del modello strutturale.

Per una corretta riproduzione del comportamento aerodinamico delle costruzioni occorrerebbe che il valore del numero di Reynolds in galleria coincidesse con quello della realtà. Questo requisito è molto spesso non soddisfatto, il che porta a trascurabili errori per le geometrie a spigoli vivi, e a significativi errori per le geometrie curve, nel cui caso è necessaria particolare attenzione nella progettazione delle prove e nell'interpretazione dei risultati.

4.2 Gallerie del vento – Caratteristiche del flusso e orografia del terreno

Al fine di misurare correttamente le azioni del vento sulle costruzioni, e/o la conseguente risposta strutturale, occorre riprodurre in galleria del vento le caratteristiche che il flusso eolico presenta nello strato limite atmosferico. In particolare, per le strutture a sviluppo verticale occorre che sia riprodotto l'andamento del profilo della velocità media e dell'intensità di turbolenza. Inoltre, per tutte le strutture, occorre che vengano riprodotte le caratteristiche della turbolenza, in termini di contenuto in frequenza e di scale integrali. Le gallerie in grado di soddisfare al meglio questi requisiti vengono appunto indicate come gallerie a strato limite, e sono generalmente finalizzate alla sperimentazione in ambito civile ed ambientale. Solo nei casi, da verificare opportunamente, in cui non sia rilevante la distribuzione verticale delle caratteristiche del flusso eolico, è possibile utilizzare gallerie non a strato limite o finalizzate alla sperimentazione in ambito meccanico o aeronautico. In ogni caso le caratteristiche del flusso riprodotto in galleria devono mantenersi costanti nel tronco di prova. La Fig. 4.1 mostra un'immagine del tronco di

prova di una galleria del vento a strato limite, che permette la simulazione dello strato limite terrestre riproducendo ampie porzioni di orografia ed è quindi particolarmente adatta per modelli in grande scala di strutture civili.

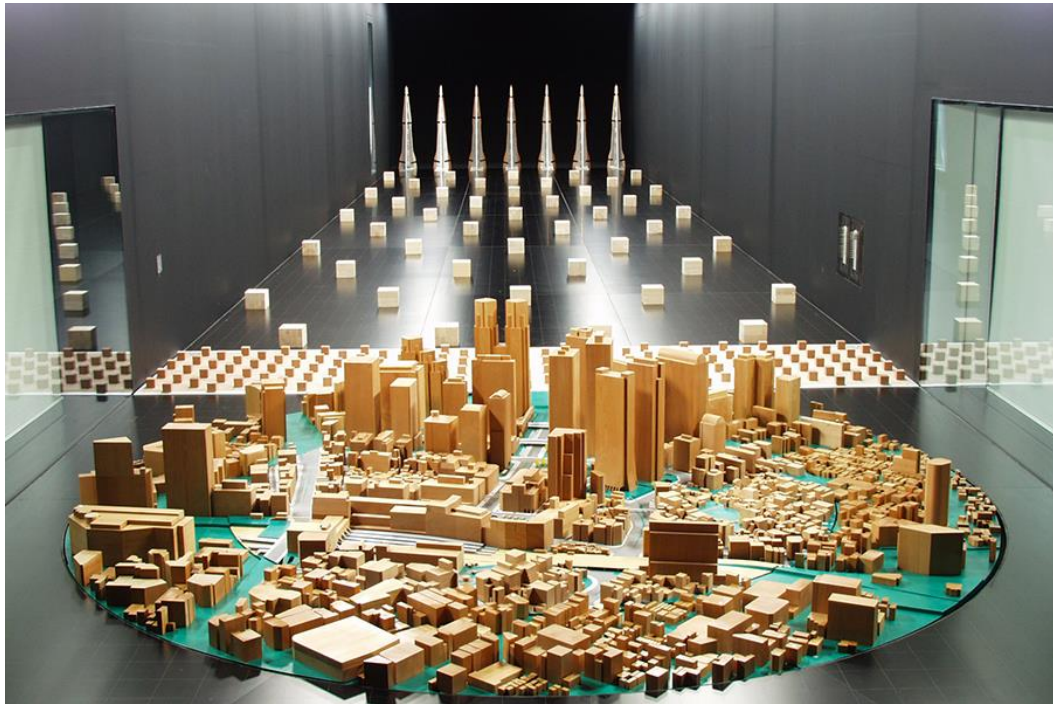


Figura 4—1: Tronco di prova di una galleria del vento a strato limite.

4.3 Galleria del vento – Effetto bloccaggio

Un edificio in galleria del vento è confinato da strati limite superiormente, lateralmente e alla base. Con i metodi appena descritti, il pavimento irruvidito della galleria del vento rappresenta il piano terra del terreno e simula i vari livelli di orografia.

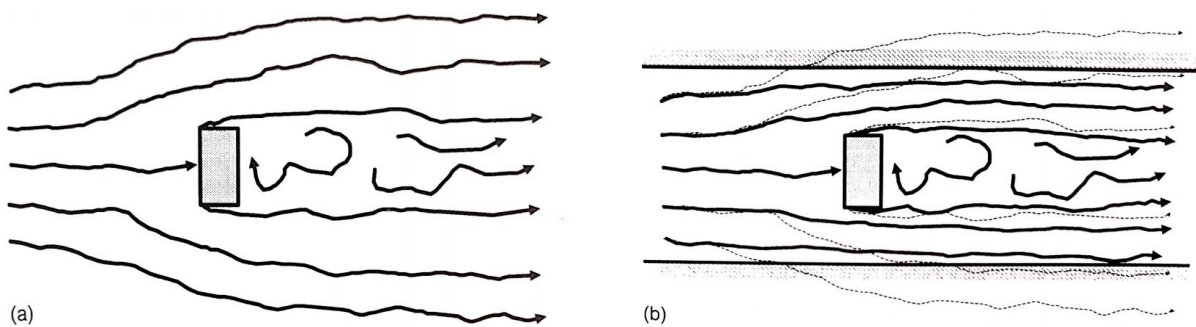


Figura 4—2: Effetto bloccaggio in galleria del vento: a) prototipo in scala "teoricamente infinita"; b) modello in sezione a scala ridotta

Sfortunatamente, le pareti laterali e il tetto della galleria del vento sono confini solidi che non hanno una controparte su larga scala. Il flusso istantaneo attorno ad un edificio parallelepipedo in scala reale è rappresentato in pianta dalle Fig. 4.2. Quando questo è rappresentato in una galleria del vento, le linee di corrente sono delimitate dalle pareti, come mostrato in Fig. 4.2b il flusso accelera nella regione ristretta tra il modello e le pareti, aumentando il carico dell'edificio. Questo effetto, chiamato "bloccaggio" e dipende dalle relative aree della sezione trasversale del modello e del tunnel, $A_{\text{modello}} / A_{\text{galleria}}$, chiamato "rapporto di blocco". L'effetto non può essere rimosso semplicemente rimuovendo le pareti nell'area di prova, cioè in una galleria del vento "a getto aperto", perché poi gli effetti si invertirebbero, portando le linee di corrente a spostarsi troppo lontano, il che provocherebbe una netta riduzione del carico.

Da studi effettuati in galleria del vento (Ranga Raju, 1975), graficamente riproposti nella Fig. 4.2 la maggior parte dell'effetto di vincolo del muro è riscontrabile sulla parete a valle esposta alla pressione della scia ed è uniforme su questa parete. Sulla faccia a monte anche per il 20% di bloccaggio non vi è alcun effetto apparente sulle pressioni al centro della piastra ma una distorsione della distribuzione della pressione su entrambi i lati della piastra avrebbe dovuto essere influenzata dall'ostruzione.

Questa è la prova evidente che le correzioni di intasamento non possono essere viste come un incremento di velocità, poiché, se così fosse, la distribuzione della pressione su entrambi i lati della piastra avrebbe dovuto essere influenzata dall'ostruzione.

Sono stati proposti diversi metodi per correggere la resistenza media per questo effetto. uno dei primi di Maskell (Maskell, 1963) destinato a correggere la resistenza media delle ali bloccate, fu successivamente esteso da Cowdrey (Cowdrey, 1969) per applicarlo a modelli solidi di galleria. Questo tratta l'effetto di blocco come un aumento della velocità del vento nel flusso esterno alla scia del corpo, in compensazione attraverso le equazioni di continuità per l'aria spostata dal modello e per la perdita di quantità di moto nella scia. L'effetto di bloccaggio è modellato come un semplice aumento locale della velocità, con conseguente aumento della pressione dinamica Δq di:

$$\Delta q/q = \epsilon C_D \frac{A_{(MODELLO)}}{A_{(GALLERIA)}}$$

dove ϵ è un coefficiente dipendente dalla forma del modello, determinata sperimentalmente. La misurazione della resistenza media può essere corretta dal fattore $1/(1 + \Delta q/q)$. Le forme più complesse del modello rendono la determinazione di ϵ difficile e approssimativa, ma il metodo ha mostrato un vantaggio per cui essere utilizzato.

4.4 Misurazioni della pressione

La distribuzione della pressione indotta dal vento sulla superficie di una costruzione può essere misurata in galleria mediante un sistema di acquisizione della pressione ad alta frequenza di campionamento. Il sistema di acquisizione è costituito da un certo numero di prese manometriche disposte sulla superficie oggetto di indagine, ciascuna collegata mediante un collegamento pneumatico ad un trasduttore di pressione. Questo converte il segnale di pressione in un analogo elettrico che viene inviato ad un convertitore analogico–digitale, ed infine memorizzato su una memoria di massa. La Fig. 4.3 mostra un modello manometrico, ponendo in evidenza i collegamenti pneumatici presa–trasduttore.

L'accuratezza del dato misurato dipende dalle caratteristiche di tutta la catena di misura, ma risulta determinante il collegamento pneumatico tra la presa di pressione ed il trasduttore. Un collegamento non adeguatamente progettato può introdurre un significativo errore nella pressione misurata. Al fine di garantire un'accettabile precisione delle misurazioni, occorre che il collegamento pneumatico tra la presa manometrica ed il trasduttore di pressione sia in grado di trasmettere, senza distorsioni, fluttuazioni di pressione fino alla maggiore tra le frequenze che interessano il problema in esame.

La scala geometrica del modello (scala delle lunghezze) può assumere valori molto differenti in relazione alle dimensioni della costruzione o della sua porzione presa in esame, e della galleria. Nel caso degli edifici la scala geometrica è solitamente compresa tra 1:400 ed 1:50, dove il primo valore riguarda edifici particolarmente alti, mentre il secondo edifici di modeste dimensioni. La durata di ciascuna prova deve essere tale da consentire un adeguato trattamento statistico dei dati misurati. Le misurazioni devono, salvo i casi in cui sia possibile sfruttare simmetrie della struttura, essere effettuate per tutte le possibili direzioni di incidenza del vento, con un passo compreso tra 10° e 30° .

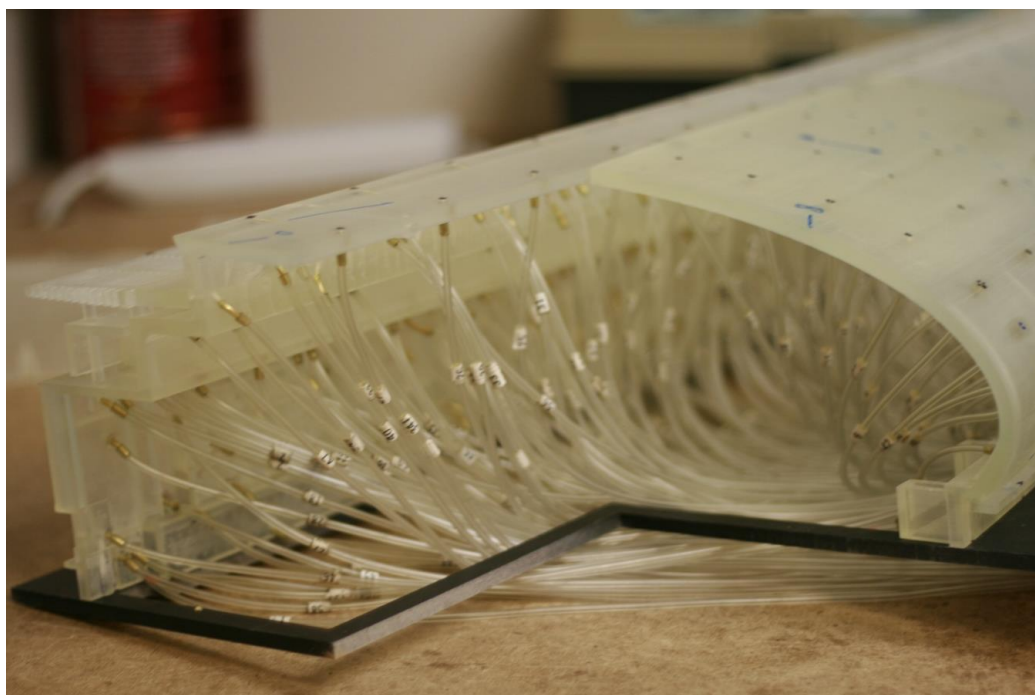


Figura 4—3: Modello manometrico

I modelli utilizzati sono solitamente modelli rigidi, pertanto la pressione che si misura non tiene in conto l'interazione tra fluido e struttura. L'eventuale deformabilità del modello può portare ad errori nella pressione misurata.

Dalla pressione misurata è possibile ottenere i coefficienti di pressione attraverso la relazione:

$$c_p(t) = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2} \quad EQ.1$$

dove t è il tempo, P è la pressione misurata, P_0 è la pressione statica di riferimento e $\frac{1}{2} \rho V^2$ è la pressione cinetica di riferimento, essendo ρ la densità dell'aria e V la velocità di riferimento del flusso. Dall'Eq.1 è possibile ottenere gli spettri di potenza del coefficiente di pressione e le statistiche desiderate. Usualmente si calcolano il valor medio, la deviazione standard ed i valori minimo e massimo. I valori minimo e massimo dipendono dall'intervallo temporale sul quale vengono misurati, e solitamente vengono forniti in funzione della probabilità di superamento.

Ad esempio, per definire i carichi su una superficie più o meno estesa si fa spesso riferimento al valore medio del coefficiente di pressione. Nel caso, invece, in cui occorra definire un carico puntuale (carico su una superficie di piccole dimensioni), si fa generalmente riferimento al valore di picco, massimo o minimo, del coefficiente di pressione.

4.4.1 Risultati provenienti dalle analisi in galleria

Nel caso in cui nella progettazione si utilizzino valori dei coefficienti aerodinamici, delle forze aerodinamiche, o della risposta strutturale ricavati da misure in galleria del vento, tali valori dovranno essere opportunamente documentati.

In particolare, occorrerà documentare chiaramente:

- il tipo della prova effettuata (in termini di caratteristiche della galleria del vento utilizzata, di fattore di scala del modello, di rapporto di bloccaggio);
- le caratteristiche del flusso (in termini di profili della velocità media, dell'intensità di turbolenza longitudinale e della scala di turbolenza longitudinale);
- le modalità di acquisizione dei dati (frequenze ed intervalli di campionamento);
- i fattori di scala utilizzati e le analisi effettuate sui dati acquisiti per la valutazione dei coefficienti aerodinamici e delle forze di progetto, o della risposta strutturale.

5 Simulazioni mediante fluidodinamica computazionale (analisi CFD)

Molti problemi di pratico interesse come la risposta strutturale alle azioni del vento potrebbero trovare via di risoluzione adottando un approccio risolutivo numerico e computazionale, regolato dalle leggi di carattere fluidodinamico; tale metodo è da considerare alternativo a quello offerto dai test in galleria del vento.

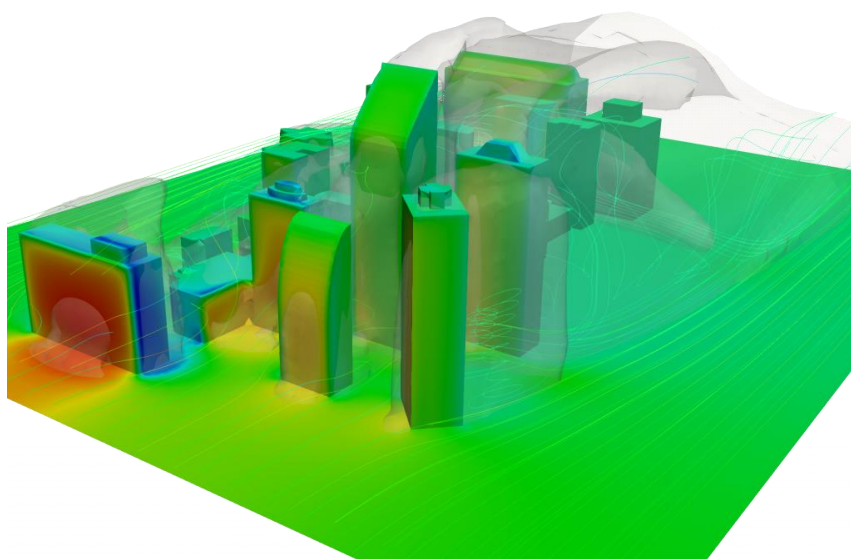


Figura 5—1: Analisi CFD di distribuzione della pressione esterna e della scia ventosa su edifici

La risoluzione con software CFD sta sempre più trovando spazio crescente nella pratica progettuale (in campo civile, automobilistico, aeronautico) al fine di valutare le azioni del vento e la conseguente risposta strutturale per singoli casi meno comuni i cui dati non siano disponibili in letteratura, nei documenti normativi e sintetizzati nelle presenti Istruzioni. Tali valutazioni specifiche possono inoltre rappresentare uno strumento di controllo dei risultati dei calcoli e di ottimizzazione delle prestazioni aerodinamiche e strutturali di un manufatto. La trasposizione dall'ambito scientifico alla pratica progettuale richiede particolare attenzione, al fine di evitare l'uso inconsapevole, deregolamentato e potenzialmente pericoloso di tali tecniche.

La simulazione computazionale mediante CWE (Ingegneria del Vento Computazionale) è parte del processo di valutazione degli effetti del vento sulla struttura e più in generale della progettazione strutturale. La CWE deve essere intesa quale strumento di analisi coerente, concorrente e complementare al progetto.

La simulazione computazionale non può in alcun modo prescindere dall'esame preliminare delle condizioni di vento incidente, dal riconoscimento del tipo di struttura e dalla previsione a priori, ancorché qualitativa, del suo comportamento aerodinamico e della sua

risposta strutturale al vento. Tutti questi elementi di conoscenza concorrono a definire quella che nel seguito è detta classe di problema. L'attribuzione del singolo problema progettuale a una classe di problema consente la progettazione delle simulazioni richieste per studiarlo, e la scelta del modello computazionale più idoneo allo scopo.

La validazione di un modello computazionale in riferimento ad una classe di problema è da ritenersi necessaria. Per validazione si intende il confronto con dati sperimentali o risultati di altre simulazioni computazionali di comprovata validità, ottenute nelle medesime condizioni. La validazione è rivolta a dimostrare la stabilità e la ragionevole accuratezza dell'approccio computazionale seguito. Tale validazione, ancorché possa rendersi necessaria contestualmente a un singolo studio in ragione della sua singolarità, di norma dovrà essere svolta preliminarmente rispetto all'analisi in oggetto.

5.1 Aspetti fondamentali sull'approccio modellistico

Nel seguito si illustrano gli aspetti fondamentali inerenti all'approccio modellistico e si accenna brevemente ad aspetti legati alla sua coerenza con l'approccio numerico scelto.

5.1.1 Dominio di calcolo

Per dominio di calcolo si intende la riproduzione semplificata del dominio reale in cui ha luogo il flusso del vento intorno alla struttura. Il dominio di calcolo è riferito sia allo spazio, che al tempo. La semplificazione è intesa sia in termini di rappresentazione geometrica che di condizioni al bordo imposte. Il dominio di calcolo deve ritenere tutte le caratteristiche significative del dominio reale. Le principali caratteristiche del dominio di calcolo sono la sua dimensionalità e la sua estensione. La dimensionalità e l'estensione del dominio di calcolo in spazio e tempo dipendono dalle caratteristiche della classe di problema, dal modello di turbolenza, dalle condizioni al bordo e iniziali.

Riguardo alla definizione della classe di problema, sono caratteristiche condizionanti la geometria dell'area circostante la struttura oggetto di studio, la geometria della struttura stessa, le caratteristiche spaziali e temporali del flusso del vento incidente e intorno ad essa. In generale, il vento nello strato limite atmosferico è turbolento e quindi sempre caratterizzato da tridimensionalità e fluttuazioni dipendenti dal tempo. Dunque, è necessario che il dominio di calcolo in spazio sia tridimensionale e che le simulazioni computazionali siano non stazionarie.

5.1.2 Modello di turbolenza

Il vento nello strato limite atmosferico è generalmente turbolento: i campi di pressione e velocità presentano grandi variazioni su scale spaziali (dal millimetro alle centinaia di metri) e temporali (dai decimi di secondo alle decine di minuti) molto diverse tra loro. In particolare, le variazioni in spazio possono essere assimilate a vortici di diverse dimensioni caratteristiche: la scala dei vortici più grandi è legata alle dimensioni caratteristiche dello stesso strato limite atmosferico e dei corpi in esso immersi, mentre la grandezza di quelli più piccoli è legata alla dissipazione di energia dovuta alla viscosità del fluido stesso. A tutte le scale intermedie tra la più grande e la più piccola possono essere associate strutture vorticosi e variazioni significative nel tempo dei campi di velocità e pressione.

Le equazioni di Navier–Stokes nella loro forma originale descrivono completamente il vento turbolento nello strato limite atmosferico e sono dunque in grado di cogliere tutte le scale delle variazioni dei campi di velocità e pressione. La completa risoluzione di tutte le scale della turbolenza (*full Scale Resolving, Direct Numerical Simulation, DNS*), però, richiede una discretizzazione in spazio e tempo in grado di garantire la opportuna riproduzione di tutte le suddette scale. Per questo motivo, pur essendo la DNS un eccellente modello per la ricerca di base, i tempi e costi di simulazione risultano essere ad oggi non compatibili con le esigenze tecniche ed economiche del progetto delle strutture civili.

È ben noto che le scale della turbolenza più piccole possono influenzare sensibilmente quelle più grandi che, a loro volta, possono interagire con il flusso medio. Risulta dunque necessario tener conto della presenza delle piccole scale della turbolenza anche quando si sia interessati a cogliere aspetti riguardanti l'organizzazione del flusso a livello d'insieme. Le modalità con cui tale aspetto viene considerato nelle simulazioni computazionali CWE si dice approccio alla modellazione della turbolenza ed il particolare modello matematico adottato a tale scopo prende il nome di modello di turbolenza.

I modelli di turbolenza si dividono principalmente in due categorie:

- 1) quelli della prima categoria si pongono l'obiettivo di simulare esplicitamente tutte le scale della turbolenza che possono essere rappresentate con sufficiente accuratezza dalla griglia di calcolo adottata (*modelli Scale–Resolving*). I modelli di turbolenza più rappresentativi e largamente usati di questa categoria sono quelli di tipo *Large Eddy Simulation (LES)*. La presenza delle scale più piccole è tenuta in conto in modo sintetico con opportuni modelli detti di sottogriglia, generalmente aumentando localmente la viscosità del flusso in funzione della risoluzione della griglia di calcolo, ovvero della dimensione locale delle sue celle.
- 2) quelli della seconda categoria (*modelli non Scale–Resolving*), viceversa, hanno l'obiettivo di simulare in modo esplicito esclusivamente il flusso medio, eventualmente anche non stazionario, mentre gli effetti della turbolenza sul flusso medio sono presi in conto in modo sintetico secondo quanto prescritto dal modello di turbolenza. I modelli di turbolenza più rappresentativi e largamente usati di questa seconda categoria sono quelli di tipo *Reynolds–Averaged Navier–Stokes*

(RANS, flusso medio simulato stazionario) e *Unsteady Reynolds–Averaged Navier–Stokes* (URANS, flusso medio simulato non stazionario). I tipi RANS e URANS comprendono numerosi modelli semi–empirici (a mero titolo di esempio, modello $k–\varepsilon$ RNG, $k–\omega$ SST, modelli RSM), la cui accuratezza non è universale, ma limitata a specifiche classi di problema.

È utile ribadire che un modello *Scale–Resolving* non garantisce di per sé maggiore accuratezza di uno non *Scale–Resolving*, qualora associato a componenti improprie degli approcci modellistico e numerico (ad esempio, se associato a un dominio di calcolo bidimensionale, griglia di calcolo in spazio e tempo non adeguata, schemi numerici eccessivamente dissipativi).

Risulta altresì importante sottolineare che ogni modello riproduce in modo più o meno approssimato l'effetto che le piccole scale hanno su quelle grandi e sul flusso medio.

Ne segue che i risultati di simulazioni svolte con diversi modelli possono essere sensibilmente diversi. A titolo di esempio, il flusso medio valutato da una simulazione con un modello di turbolenza di tipo *Scale–Resolving* generalmente non coinciderà esattamente né con quello ottenuto utilizzando un altro modello di turbolenza del medesimo tipo, né con quello previsto da un modello di tipo non *Scale–Resolving*.

Tali discrepanze sono da considerarsi inevitabili nell'ambito della CFD/CWE. La loro quantificazione e gestione in relazione ai problemi di Ingegneria del Vento rappresenta il corpo di conoscenze proprio della CWE che non è direttamente desumibile né da quello proprio della sola CFD né da quello della sola Ingegneria del Vento tradizionalmente intesa. In particolare, è responsabilità del Simulazionista definire quale intervallo di scale del fenomeno studiare, quale modello utilizzare per la sua riproduzione, quale grado di accuratezza dei risultati garantire in relazione alla specifica classe di problema.

5.1.3 Discretizzazione spaziale e temporale

Il metodo ai Volumi Finiti, come anche molti dei principali metodi ad esso alternativi, prevede una discretizzazione del dominio spaziale mediante un numero finito di partizioni comunemente dette celle, e del dominio del tempo mediante un numero finito di partizioni comunemente dette passi di tempo. L'insieme delle celle definisce la griglia in spazio (mesh), mentre l'unione della griglia in spazio e tempo è denominata griglia di calcolo. Tale griglia contribuisce a determinare la risoluzione spaziale e temporale della simulazione computazionale.

La scelta di tale griglia è dunque un passaggio estremamente delicato nell'ambito delle simulazioni CFD/CWE poiché le principali proprietà della soluzione computazionale di interesse per l'Ingegneria del Vento (stabilità, accuratezza, costo computazionale) ne possono essere fortemente influenzate. In particolare, la griglia di calcolo dovrà essere definita in modo da avere una sufficiente capacità risolutiva spaziale e temporale, ovvero

da rappresentare in modo sufficientemente dettagliato tutte le scale della turbolenza che, in accordo con l'approccio alla modellazione della turbolenza adottato, possono interagire con il fenomeno oggetto di studio.

Particolare attenzione dovrà essere posta alla accurata discretizzazione delle zone del dominio di calcolo in cui il flusso è atteso essere caratterizzato da elevati gradienti delle variabili (velocità, pressione). A titolo di esempio, si segnala la necessità di raffinare in modo particolare la mesh in corrispondenza dello strato limite in prossimità di pareti solide, dei punti di separazione (ad esempio in prossimità di spigoli), o della regione sottovento rispetto alla struttura. La griglia di calcolo dovrà essere altresì costruita in modo da garantire sufficienti livelli di qualità della geometria delle celle, misurata da opportuni indicatori, in modo da non pregiudicare l'accuratezza e la stabilità delle simulazioni. In particolare, è buona regola evitare il più possibile celle di calcolo eccessivamente distorte e/o allungate.

La Fig. 5.2 riporta, a titolo di esempio, una griglia con adeguata discretizzazione delle zone citate e con elevata qualità delle celle.

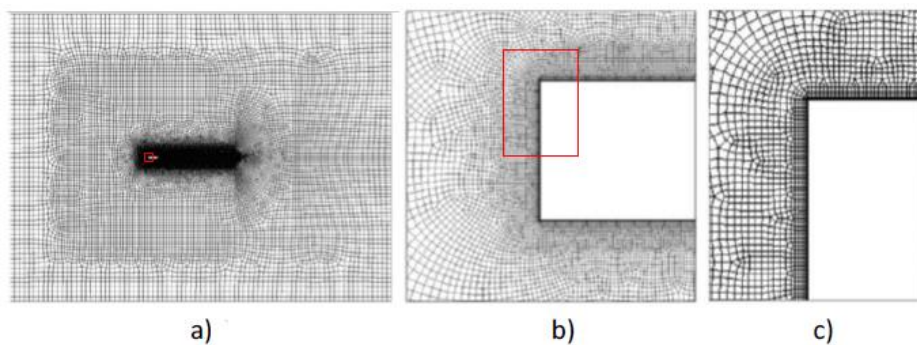


Figura 5—2: a) Griglia in spazio intorno ad un cilindro di sezione rettangolare – sezione nel piano trasversale; nell'intero dominio di calcolo in spazio, b) dettaglio intorno al bordo di attacco, c) dettaglio intorno allo spigolo superiore del bordo di attacco

5.1.4 Schemi di approssimazione numerica

Gli schemi di approssimazione numerica sono necessari per tradurre in forma algebrica gli operatori integrali e/o differenziali presenti nei singoli termini delle equazioni di Navier–Stokes. Tali schemi sono detti di approssimazione in quanto introducono necessariamente un errore di discretizzazione, inteso quale scarto tra la soluzione esatta della forma integrale o differenziale e la soluzione esatta di quella algebrica. I principali software CFD attualmente disponibili offrono numerosi schemi alternativi, la cui accuratezza varia a seconda della geometria delle celle, del tipo di griglia

(strutturata o non strutturata, uniforme o non uniforme), della dimensionalità del dominio in spazio, degli schemi utilizzati per altri termini nelle medesime equazioni, e che devono essere valutati alla luce delle caratteristiche del problema in esame e delle finalità progettuali della simulazione. In linea generale, è consigliabile utilizzare schemi caratterizzati da accuratezza detta “del secondo ordine” o superiore per quanto riguarda sia le derivate spaziali che quelle temporali. Tali schemi risultano necessari al fine di minimizzare la cosiddetta “dissipazione numerica”, ovvero l’alterazione fittizia delle proprietà di dissipazione del fluido indotta dall’approssimazione discreta del problema continuo. Particolare attenzione in questo caso dovrà essere posta nella discretizzazione dei termini convettivi presenti nelle equazioni di bilancio al fine di ottenere, in combinazione con la discretizzazione temporale scelta, un buon compromesso tra bassa dissipazione numerica e stabilità della soluzione.

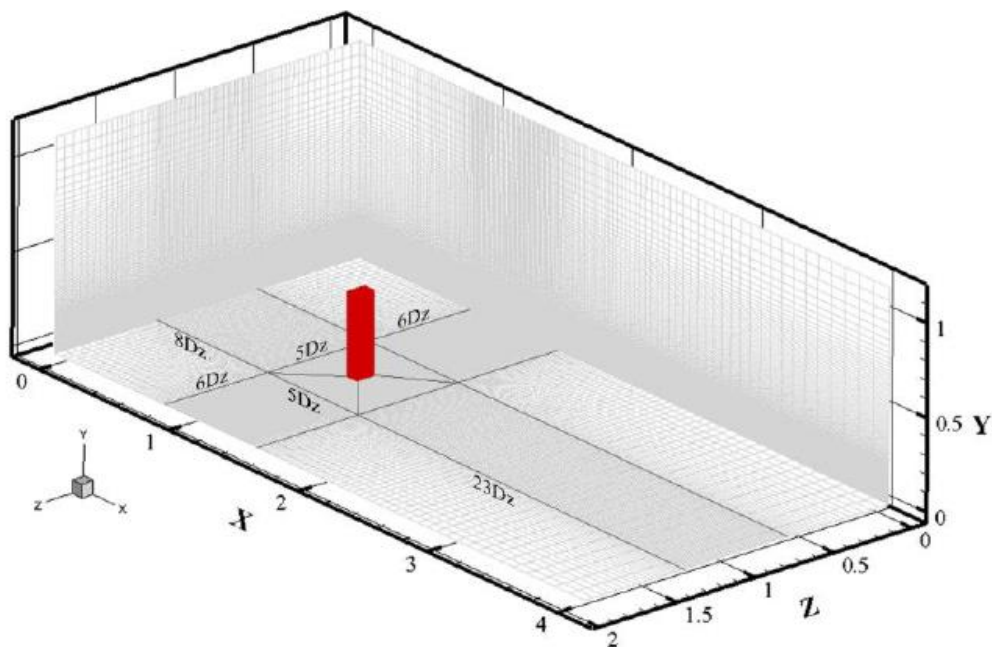


Figura 5—3: Disposizione delle griglie computazionali

5.1.5 Risolutore algebrico

Una volta che il problema differenziale è stato opportunamente discretizzato facendo uso di una griglia di calcolo e di schemi di approssimazione numerica adeguati, esso risulta essere espresso mediante un sistema di equazioni algebriche (lineari o nonlineari a seconda degli schemi di approssimazione adottati). Tale sistema di equazioni deve essere assemblato e risolto ad ogni passo temporale.

Dato l’alto numero di incognite presenti in tali computazioni e le caratteristiche delle matrici associate a questo genere di sistemi, si procede normalmente utilizzando algoritmi di tipo iterativo che consentono di ottenere la soluzione mediante approssimazioni successive. Tali metodi di soluzione richiedono di fissare a priori opportune soglie di

convergenza che, qualora non siano scelte in modo adeguato, possono compromettere l'accuratezza dei risultati ottenuti e la stabilità della soluzione.

Sarà dunque necessario assicurare che l'errore commesso nell'approssimazione della soluzione sia sufficientemente piccolo e commisurato a quello introdotto dalle altre componenti che concorrono alla definizione del modello computazionale.

È necessario svolgere simulazioni sufficientemente estese nel tempo in modo da garantire che:

- gli effetti dovuti alle condizioni iniziali (inizializzazione dell'analisi) non influenzino la valutazione delle quantità di interesse del flusso pienamente sviluppato;
- sia garantita la convergenza statistica delle quantità di interesse;

5.1.6 Raccomandazione in fase di analisi CFD

Eccezion fatta per la diversa natura delle tecniche di prova, le simulazioni CFD devono fare proprie alcune regole di buona pratica derivanti dalla galleria del vento. A tal proposito aspetti rilevanti sono:

- 1) l'estensione del dominio computazionale;
- 2) il livello di confinamento del flusso (effetto di bloccaggio);
- 3) la durata minima in tempo delle simulazioni per la valutazione degli effetti sulle strutture;
- 4) il rispetto dei criteri di similitudine (es. numero di Reynolds);
- 5) la modellazione della morfologia del sito di costruzione e della volumetria degli edifici adiacenti;
- 6) la numerosità degli angoli di incidenza da considerare. È ammesso considerarne un numero ridotto nelle fasi preliminari della progettazione qualora sussista la ragionevole certezza che quelli considerati siano i più gravosi per il dimensionamento della struttura;

I componenti che concorrono alla definizione del modello computazionale devono essere dunque scelti tenendo conto sia dello scopo delle analisi sia della loro interazione con gli altri componenti selezionati.

5.2 Modelli di turbolenza

5.2.1 Il flusso turbolento

Nel flusso turbolento le variabili dipendenti (velocità, pressione e temperatura) non restano costanti nel tempo ma variano in modo caotico. Generalmente, non si è interessati alle variazioni istantanee di tutte le variabili. Per questo, le variabili dipendenti vengono divise in una componente mediata rispetto al tempo (componente media) e in una fluttuante, cioè:

$$u = \bar{u} + u'$$

- u = velocità ad un dato istante (rappresentato in Fig. 5.4 dalla funzione $u(t)$)
- \bar{u} = valore medio della velocità (rappresentato in Fig. 5.4 dalla linea orizzontale)
- u' = differenza tra il valore istantaneo e quello medio della velocità.

u' , ovvero la componente fluttuante della velocità è definita come: $u' = u - \bar{u}$

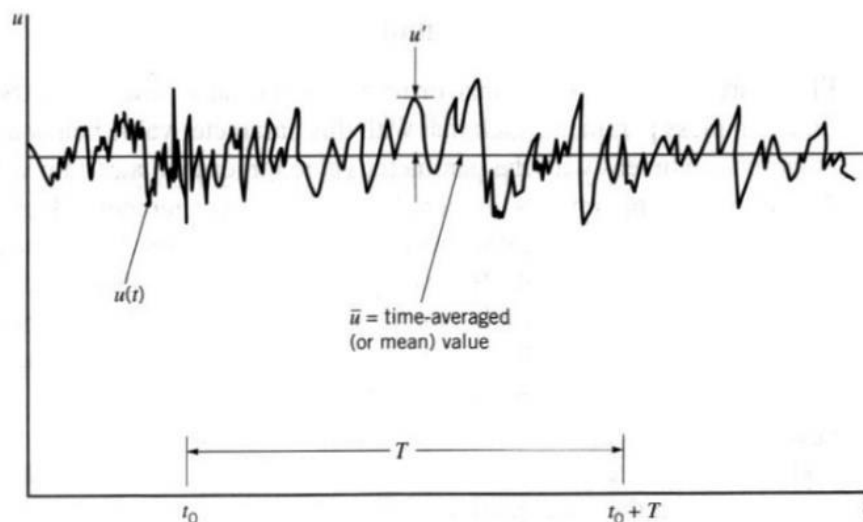


Figura 5—4: Profilo temporale della velocità in un punto.

Sapendo che:

- u = componente di velocità nella direzione x
- v = componente di velocità nella direzione y

Ipotizzando che la tensione di attrito tangenziale τ sia uguale alla viscosità, μ , moltiplicata per la variazione di velocità nello spazio:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

avremo che la variazione di attrito tangenziale:

$$\frac{\tau_2 - \tau_1}{\Delta y} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

L'equazione di conservazione della quantità di moto presente che include i valori di velocità in direzione x e y diventa:

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{dp}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad EQ.2$$

Inserendo nell'EQ.2 le espressioni $u = \bar{u} + u'$ e $v = \bar{v} + v'$, si ottiene:

$$\rho \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \rho \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{d\bar{p}}{dx} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} - \rho \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} \quad EQ.3$$

Le componenti fluttuanti della velocità u' e v' compaiono nel termine a destra del simbolo di uguaglianza e $\overline{\rho u'v'}$ è definito come tensione tangenziale di turbolenza di Reynolds. Il termine $\rho \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y}$ può essere visto come una forza addizionale dovuta alle componenti fluttuanti, cioè alla turbolenza.

La forza totale, f sarà data da:

$$f = -\frac{d\bar{p}}{dx} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} - \rho \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} \quad EQ.3,1$$

Ad eccezione della zona a ridosso della parete, la forza dovuta alla tensione turbolenta tangenziale di Reynolds, $\overline{\rho u'v'}$, è di molti ordini di grandezza superiore a τ .

Uno sforzo tangenziale turbolento elevato risulta in un profilo della velocità più acuto (linea tratteggiata di Fig. 5.5) rispetto a quello determinato da una tensione tangenziale turbolenta minore (linea continua di Fig. 5.5)

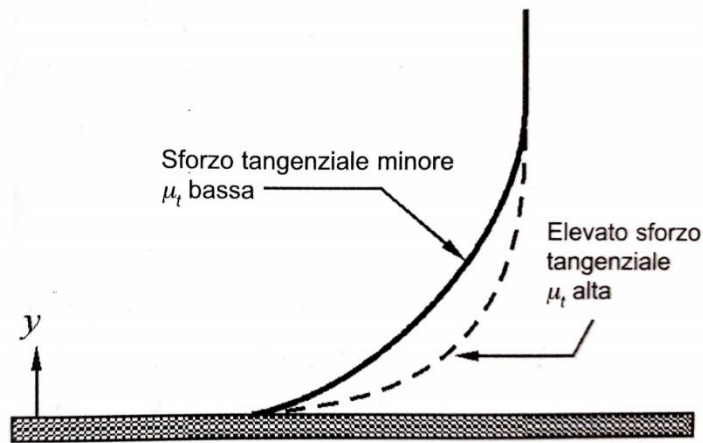


Figura 5—5: Profili delle velocità nello stato limite per elevate tensioni tangenziali o per tensioni tangenziali minori.

5.2.2 Modelli di viscosità turbolenta

La tensione tangenziale dovuta alla turbolenza nell'EQ. 3 non è nota e necessita di essere modellata. Diventa dunque necessario avere un modello di turbolenza.

L'approccio più usuale consiste nell'introduzione di una viscosità turbolenta (spesso chiamata anche viscosità propria delle strutture turbolente), μ_t . Nell'elaborazione di un modello per la tensione tangenziale turbolenta, si fa notare che:

nello stato limite la tensione tangenziale turbolenta $\overline{\rho u'v'}$, e il gradiente della velocità $\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$ hanno quasi sempre segno opposto;

si è fissato che lo sforzo tangenziale dovuto all'attrito sia il prodotto tra la viscosità ed il gradiente di velocità.

Questo porta a ritenere che la tensione tangenziale dovuta alla turbolenza possa essere scritta come:

$$\overline{\rho u'v'} = -\mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$$

Da cui si può ricavare la viscosità turbolenta $\mu_t \left[\frac{kg}{m^3} \right] \left[\frac{m^2}{s} \right]$.

5.3 Modello di viscosità turbolente: modello k-ε

Rappresenta il primo modello di turbolenza, quindi il più comune, nel quale le equazioni del trasporto vengono risolte per l'energia cinetica della turbolenza, k , e la sua dissipazione, ε . Il significato fisico dell'energia cinetica è quello di una velocità al quadrato, quindi la dimensione di k è $[m^2/s^2]$. ε indica la trasformazione per unità di tempo dell'energia cinetica di energia interna (cioè in un aumento di temperatura). La sua unità di misura è quella di una velocità al quadrato divisa per il tempo, cioè $[m^2/s^3]$.

L'unico modo in cui ρ , k e ε possono essere combinate per dare la medesima quantità di viscosità turbolenta μ_t è:

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Dove c_μ è una costante.

Rispetto alle equazioni di Navier–Stokes, le novità delle equazioni del trasporto per k e ε sono i termini di generazione e di dissipazione. Il termine sorgente principale nelle equazioni per k e ε dipende strettamente dai gradienti di velocità maggiore è il gradiente di velocità, più grandi sono i valori di k e ε . Se il gradiente di velocità è elevato, k cresce in modo più marcato rispetto a ε e quindi μ_t è maggiore nelle regioni in cui i gradienti di velocità sono più rilevanti.

La turbolenza diminuisce nelle regioni dove non siano presenti gradienti di velocità.

5.4 Modello di viscosità turbolente: modello k-ω

Oltre al modello k-ε, un altro di comune utilizzo è quello k-ω:

in tale modello l'equazione del trasporto per ε è sostituita da quella per ω . La dimensione di ω è quella dell'inverso di un tempo.

La viscosità turbolenta è calcolata come:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega}$$

5.4.1 Modello di viscosità $k-\omega$ SST

Il modello preferito per le analisi condotte è quello SST (Shear Stress Transport) di Menter (1994), è un modello basato sulla viscosità turbolenta che include due particolarità:

è una combinazione del modello $k-\omega$ (nella parte più interna dello strato limite) e del modello $k-\varepsilon$ (nella parte più esterna ed al di fuori dello strato limite);

introduce una limitazione alla tensione tangenziale nelle regioni con gradiente della pressione contrario.

Il modello $k-\varepsilon$ ha principalmente due punti deboli:

sovrastima la tensione tangenziale in moti con gradiente contrario alla pressione ($\frac{\partial \bar{v}}{\partial x} > 0$) a causa di una scala caratteristica troppo grande (causata da un tasso di dissipazione troppo piccolo) e richiede delle modifiche per la regione vicina alla parete (cioè termini o funzioni che facciano da smorzatori per bassi numeri di Reynolds).

Per migliorare entrambi i modelli $k-\omega$ e $k-\varepsilon$, Menter (1994) propose una loro combinazione. Per la simulazione dei moti con gradiente contrario alla pressione, il modello $k-\omega$ risulta migliore di quello $k-\varepsilon$, nonostante rimanga ancora sovrastimato il valore della tensione tangenziale. Da qui fu necessario riproporre la tensione tangenziale dovuta alla turbolenza, rendendola:

$$-\overline{u'v'} = k \frac{1}{\max(0.31 \omega, \Omega)}$$

Dove $\Omega = \frac{\partial \bar{u}}{\partial y}$ (strato limite)

6 RWIND Simulation – Simulazione e generazione dei carichi del vento

Il programma si basa sull'analisi numerica CFD, in cui si simula il flusso di un fluido attorno ad una struttura, posta all'interno di una galleria del vento virtuale numerica.

Il programma utilizza il risolutore OpenFOAM CFD, il solutore numerico “RWindSimulationSolver” è un solutore steady-state per flusso incompressibile e turbolento e utilizza l'algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linkead Equations).

I risultati dell'analisi includono un campo di velocità e pressioni tridimensionali all'interno della galleria del vento virtuale e i carichi del vento valutati dalle pressioni agenti su aste, superfici e su elementi solidi.

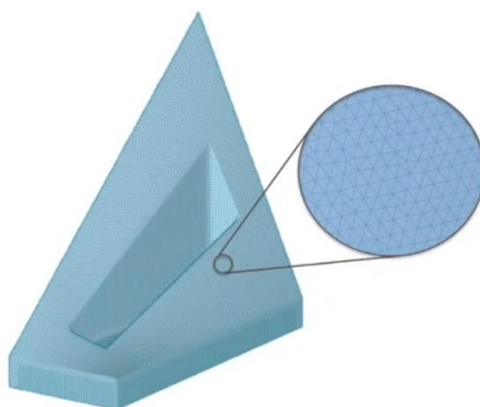


Figura 6—1: Definizione della mesh

Il processo di definizione della mesh secondo il metodo a volumi finiti, usati nella fluidodinamica computazionale può richiedere processi onerosi di calcolo computazionale; per cui il software utilizza una semplificazione del modello che va a correggere automaticamente eventuali problematiche di definizione manuale della mesh tramite la creazione di una mesh speciale: “shrink wrapping”.

Essa “avvolge” la struttura, coprendola come fosse un velo con cui va a correggere eventuali imperfezioni proprie del calcolo manuale. In base al criterio di dettaglio prescelto, il software offre autonomamente la possibilità di ridurre le tempistiche di elaborazione dei risultati, proponendo un modello alternativo che va a semplificare i dettagli meno significativi e più onerosi per la successiva fase di calcolo computazionale.

Ad esempio, per valutare le pressioni agenti sull'involucro della struttura, è nelle possibilità del progettista scegliere di semplificare il modello d'analisi chiudendo le aperture superflue o considerarlo nella sua totale complessità di dettaglio.

Con lo scopo di evitare che il software dilunghi le proprie elaborazioni simulando anche l'ingresso dei flussi fluidodinamici all'interno degli ambienti lasciati inopportuno aperti.

I risultati finali ottenuti dopo l'elaborazione saranno più accurati tanto minore è stato il grado di semplificazione del modello. Il risultato finale è sempre figlio del compromesso tra molteplici fattori, come: l'esperienza del simulatore progettista, i livelli di dettaglio richiesto e i tempi di calcolo necessari alla simulazione.

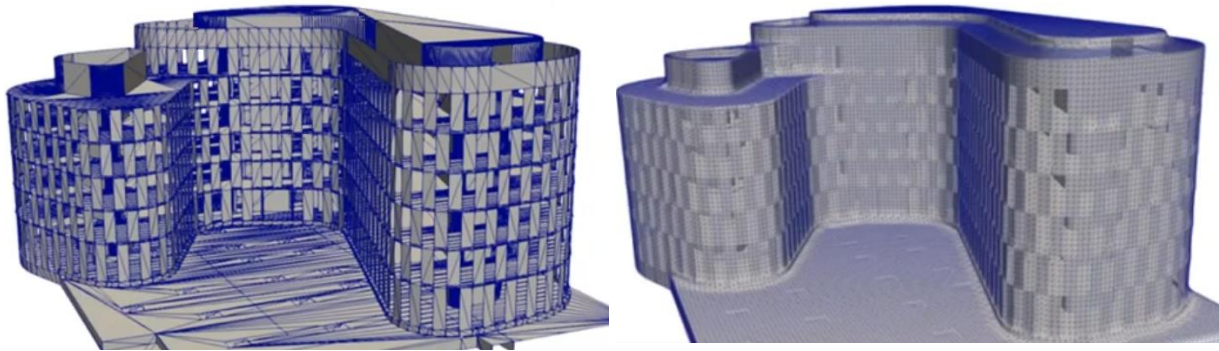


Figura 6—2: Fasi di semplificazione del modello

6.1 Modellazione geometrica strutturale

L'analisi fluidodinamica da condurre con RWIND SIMULATION parte alla base dalla creazione di un modello geometrico a elementi finiti, prodotto tramite il software RFEM. Tale modello geometrico verrà poi esportato all'interno del software RWIND SIMULATION, in cui si esegue un'analisi CFD.

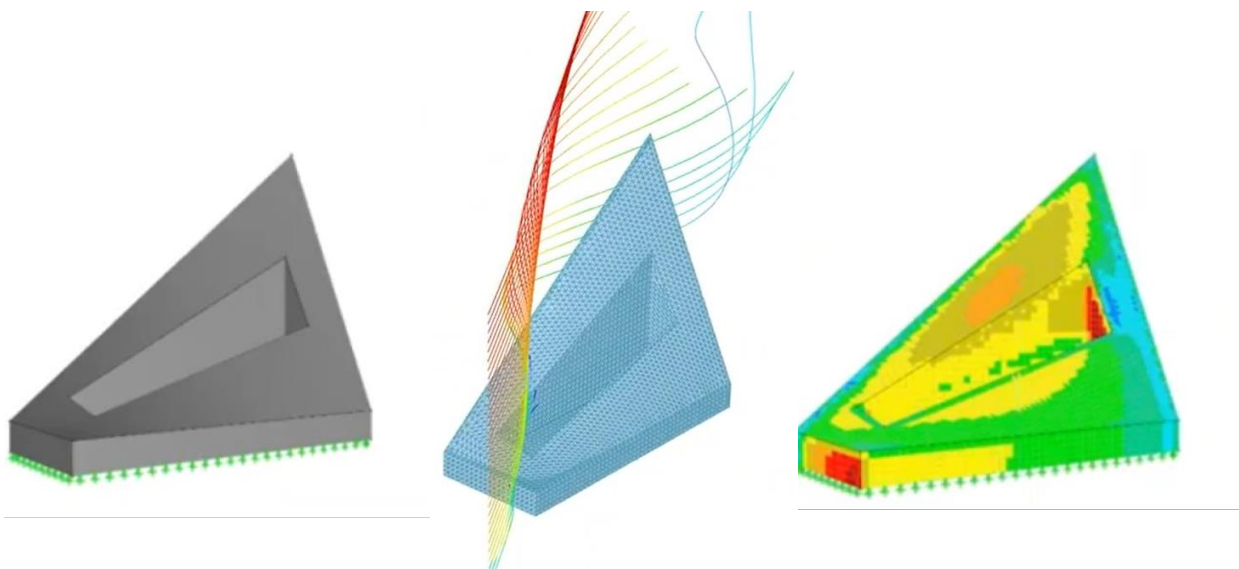


Figura 6—3: Fase di creazione del modello FEM preliminare all'analisi CFD (sinistra), Traiettoria del vento rappresentata tramite streamlines (centro), Valori delle pressioni dei carichi del vento valutati su RWIND ed esportati sul modello FEM (destra).

Tramite il software fluidodinamico è possibile ottenere i valori di pressione ottenuti dalla pressione del vento e i relativi coefficienti c_{pe} ricavati.

In una fase successiva, esportando il modello nel software a elementi finiti RFEM, c'è modo di utilizzare i valori di pressione agente ottenuti dall'analisi CFD per combinarli con altri casi di carico analizzati col modello FEM; tale operazione ha risvolti più dettagliati per una verifica più completa rispetto alle diverse sollecitazioni agenti complessivamente sulla struttura.

All'interno della galleria del vento virtuale, il software riesce ad aggiungere sia particolari conformazioni orografiche, che la presenza di modelli geometrici di edifici adiacenti. Con queste condizioni l'analisi delle pressioni agenti sull'edificio principale va a risentire della compartecipazione di altri elementi vicini, che andranno a far variare l'analisi rendendola più veritiera a quella proveniente dal contesto edilizio reale.

La presenza di edifici adiacenti può quindi ridurre sensibilmente gli effetti del vento e delle relative pressioni agenti su quello retrostante o ricreare effetti barriera o effetti canale (precedentemente elencati), propri di un contesto urbano reale.

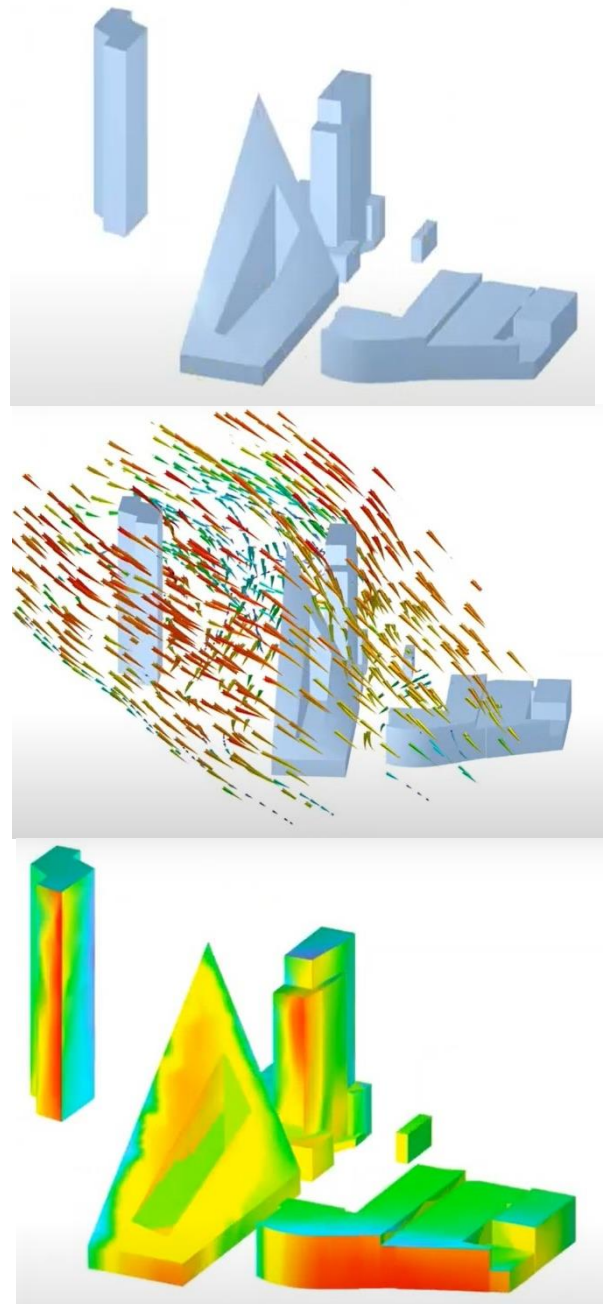


Figura 6—4: Inserimento del contesto urbano e relativi risultati tramite streamlines e Surface quantities di pressione agente sull'involucro esterno.

6.2 Validazione dei Software CFD e Normative tecniche

Le normative tecniche internazionali (Eurocodici, ASCE 7, NBC, ecc) attualmente non includono il metodo di fluidodinamica computazionale come strumento sufficiente ai fini della sicurezza nelle fasi di verifica dei carichi agenti. Tali software infatti non nascono per sostituirsi alle normative tecniche, ma offrono uno strumento da affiancare alle Norme, con lo scopo di prevedere e capire nel dettaglio le modalità e l'intensità dell'impatto del vento sulla struttura di riferimento.

6.2.1 Fattori di forza dei Software CDF

L'utilizzo di uno strumento di calcolo computazionale fluidodinamico porta numerosi vantaggi, poichè:

- 1) Strumento utile nel prevedere l'impatto del vento *in fase di progetto preliminare*: tale approccio consente un enorme risparmio di risorse economiche e di tempo, oltre a rischiare che fenomeni imprevisi legati alla presenza del vento possano danneggiare o comprometterne l'opera o elementi di essa;
- 2) Le normative forniscono carichi del vento minimi, quindi *valutazioni su carichi maggiori* possono essere utili in casi speciali, per strutture più complesse. In tali situazioni la galleria del vento può fungere da valido supporto supplementare;
- 3) La galleria del vento numerica può essere strumento essenziale per *strutture non contemplate dalle normative*, per cui non esistono norme o linee guida indirizzanti;
- 4) *Condizioni al contorno particolarmente complesse* possono immergere l'edificio in un centro abitato fitto di costruzioni adiacenti, oppure potrebbero esserci ostacoli collinari o montuosi, o particolari profilo del terreno che penalizzano una corretta previsione di effetti ventosi. Le normative di settore elencano coefficienti atti a valutare l'orografia del terreno o eventuali conformazioni particolari del contesto, ma l'utilizzo del software fluidodinamico considerando un contesto opportunamente modellato, va ad offrire risultati che entrano maggiormente nello specifico, valutando l'influenza di molteplici fattori, focalizzando eventuali criticità, offrendone quindi risultati più attendibili;
- 5) La possibilità del software di condurre analisi preliminari, precedenti a test da svolgere in galleria del vento, consentirebbe risparmi di tempo, risorse e di focalizzare meglio lo studio su fattori ritenuti rischiosi dagli studi di simulazione fluidodinamica;
- 6) La complessità di strutture specifiche, per cui anche *le normative tecniche non forniscono direttive dettagliate*, necessita analisi condotte mediante galleria del vento. Come riportato nel documento tecnico CNR-DT 207 R1/2018, esso "è applicabile, con le limitazioni e le prescrizioni indicate nel testo, alle costruzioni civili, purché di altezza non superiore a 200 m"

6.2.2 Punti di criticità dei Software CFD

La simulazione computazionale non può in alcun modo prescindere dall'esame preliminare delle condizioni di vento incidente, dal riconoscimento del tipo di struttura e dalla previsione a priori, ancorché qualitativa, del suo comportamento aerodinamico e della sua risposta strutturale al vento. Tutti questi elementi di conoscenza concorrono a definire quella che è detta *classe di problema*. L'attribuzione del singolo problema progettuale a una classe di problema consente la progettazione della simulazione richiesta per studiarlo

La semplicità nell'affrontare le fasi richieste da uno studio di fluidodinamica computazionale non preclude preparazione nel settore da parte del Simulazionista, il quale deve possedere competenze scientifiche e tecniche, esperienza professionale, oltre che capacità operative e di analisi derivanti da entrambe le discipline dell'Ingegneria del Vento e della CFD. Egli dovrà essere in pieno controllo delle condizioni di prova, del modello computazionale e dei risultati ottenuti, analogamente a quanto avviene per le prove svolte in galleria del vento secondo l'approccio sperimentale basato sull'uso di modelli fisici in scala ridotta. La mera disponibilità di un software CFD e la familiarità con la sua interfaccia-utente non qualifica il Simulazionista competente.

È opportuno ribadire che, allo stato scientifico e tecnico attuale, non esiste un modello computazionale universale, ovvero un'unica combinazione di componenti o di 'boundary conditions' tali da ritenersi ottimale per la simulazione di ogni classe di problema. È altresì fondamentale evidenziare che ogni componente introduce necessariamente un errore, generalmente definito quale scarto tra il risultato della simulazione e la realtà. La combinazione di questi errori differenzia dunque i risultati computazionali dal flusso del vento intorno alla struttura reale.

La scelta e la combinazione delle componenti del modello computazionale debbono essere effettuate in modo informato, consapevole, argomentabile e documentabile dal Simulazionista.

La scelta delle componenti deve tenere in considerazione la finalità dell'analisi, la classe del problema e l'efficacia della simulazione (definita come rapporto tra accuratezza dei risultati e costo computazionale, l'interazione e la compatibilità tra le componenti).

7 Validazione del modello computazionale

Il successo dell'applicazione della fluidodinamica computazionale (CFD) nell'ingegneria aeronautica è molto incoraggiante. Riconoscendo la differenza tra flussi corporei aerodinamici e bluff, l'uso della fluidodinamica computazionale per prevedere gli effetti del vento nello strato limite atmosferico sembra molto promettente. Ciò è particolarmente vero considerando i recenti progressi nell'hardware e tecnologia software, sviluppo di modelli affidabili di turbolenza della sottorete e riproduzione numerica della turbolenza in afflusso (Tamura 2008). In questa fase dell'applicazione CWE, tuttavia, una convalida sistematica dei modelli CWE attraverso il confronto con esperimenti in galleria del vento continuerà a migliorare la fiducia e garantirne l'uso per applicazioni pratiche.

La validazione di un modello computazionale in riferimento ad una classe di problema è da ritenersi necessaria. La validazione è stata rivolta a dimostrare la stabilità e la ragionevole accuratezza dell'approccio computazionale seguito.

Tale validazione, ancorché possa rendersi necessaria contestualmente a un singolo studio in ragione della sua singolarità, è stata svolta preliminarmente rispetto all'analisi in oggetto.

Ai fini di validare la bontà delle analisi affrontate, la scelta di tali casi test (benchmark) è stata effettuata avendo cura di identificare i principali fattori che possono concorrere alla definizione del comportamento della struttura e degli elementi che ne caratterizzavano la geometria e valutando la capacità del modello computazionale di cogliere l'influenza di tali fattori e di rispondere con la massima accuratezza ai risultati ricavati dai test benchmark.

7.1 CAARC

Alcuni degli studi computazionali per gli edifici alti includono studi Tominaga et al., (2008), Tamura (2008) e Braun et al. (2009). Huang et al. (2007) e Braun et al. (2009) si sono concentrati sull'aerodinamica del modello di edificio del Commonwealth Advisory Aeronautical Council (CAARC) e hanno studiato il modello di flusso e il coefficiente di pressione medio. L'edificio alto CAARC è considerato uno dei modelli di edifici più studiati e popolare anche nella comunità dei ricercatori della galleria del vento.

Il seguente studio va quindi a confrontare la pressione del vento su un edificio alto ottenuto da RWIND Simulation con i risultati pubblicati da (Dagnew, 2009) all'undicesima conferenza americana sull'ingegneria eolica nel giugno 2009. In questo documento, l'edificio del Commonwealth Advisory Aeronautical Council (CAARC) viene utilizzato come modello e i risultati di diversi metodi numerici vengono confrontati con i dati sperimentali ottenuti dalle gallerie del vento.

Il programma RWIND Simulation è progettato principalmente per calcolare rapidamente i risultati anche per modelli relativamente complessi e di grandi dimensioni.

La struttura esaminata nel presente paragrafo è un grattacielo ideale contraddistinto in letteratura con la sigla C.A.A.R.C. Nel corso degli anni, esso è stato l'oggetto di numerosi

studi analitici, numerici e sperimentali comparativi, condotti da svariati laboratori specializzati di tutto il mondo. Tuttora, esso è usato da varie normative e da progetti finalizzati all'unificazione internazionale delle norme sulle azioni del vento, come termine di confronto e illustrazione dei metodi usati.

Da un punto di vista geometrico, l'edificio è schematizzabile mediante un parallelepipedo retto (Fig. 7.1) di lati $b = 46$ m, $d = 30$ m, $h = 183$ m.

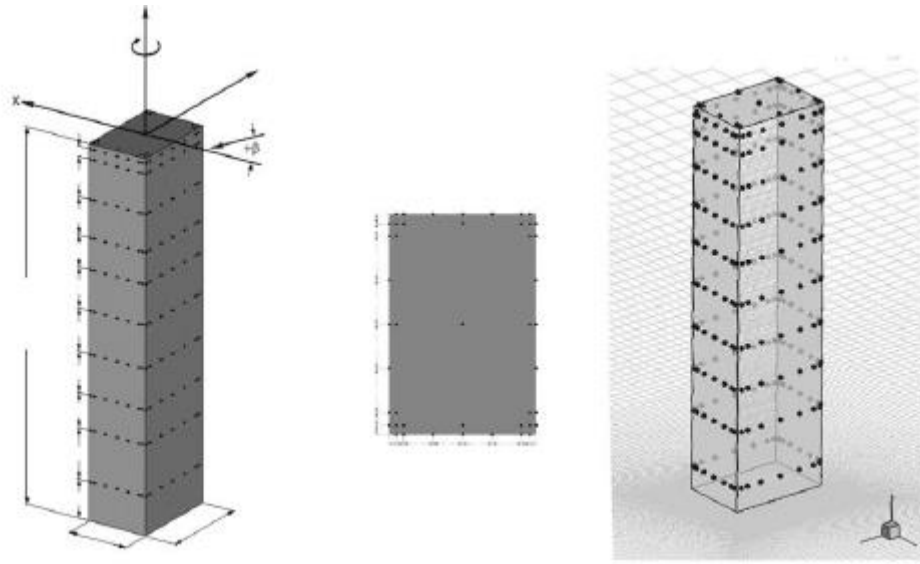


Figura 7—1: Edificio C.A.A.R.C.

Il flusso del vento è descritto in un sistema di coordinate cartesiane (x, y, z), in cui l'asse x è allineato con la direzione del flusso rispetto al flusso, l'asse z è nella direzione laterale e l'asse y è nella direzione del flusso direzione verticale.

7.1.1 Dominio computazionale e mesh

Il dominio computazionale (CD) definisce la regione in cui viene calcolato il campo di flusso. Dovrebbe essere abbastanza grande da accogliere tutte le caratteristiche di flusso rilevanti che potrebbero potenzialmente alterare le caratteristiche del campo di flusso del vento (come ripreso nel Cap. 3.3). Il CD per il è stato esteso a $8 D_z$ (D_z è la larghezza del modello di edificio CAARC) sopravento dell'edificio modello e $25 D_z$ a valle dell'edificio di destinazione. Lateralmente, il CD si estendeva per $8 D_z$ dalle superfici laterali del modello di edificio e il limite superiore era posizionato a $2,5H$ (H è l'altezza dell'edificio del modello). Inoltre, il dominio computazionale è stato suddiviso in più parti per avere un migliore controllo e distribuzione dei punti della griglia computazionale attorno all'edificio del modello e al confine del muro (vedi Fig. 7.2).

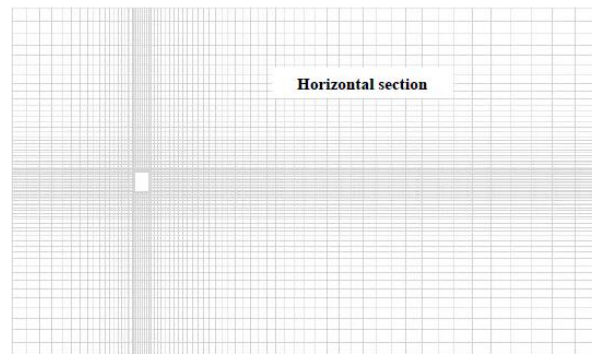
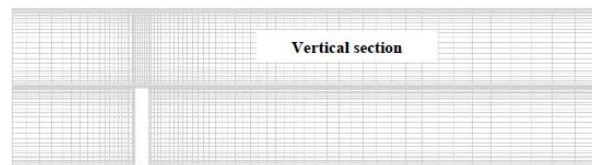
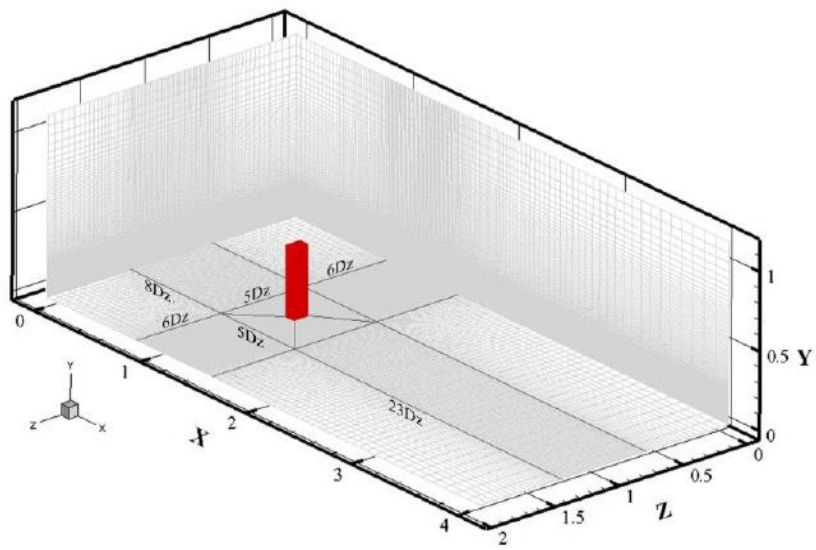


Figura 7—2: Disposizione delle griglie computazionali

La Fig.7.3 illustra il dominio computazionale e le condizioni al contorno usate per il modello.

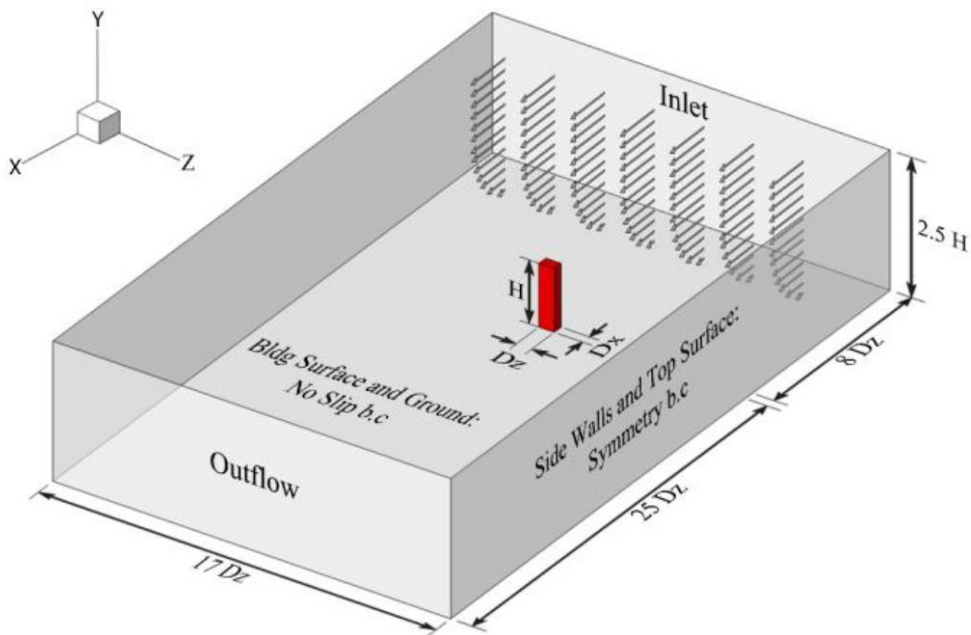


Figura 7—3: Dominio computazionale e condizioni al contorno

L'edificio CAARC è una forma prismatica rettangolare con dimensioni 46 m per 30 m per 183 m di altezza. Le dimensioni della galleria del vento sono 1548 m in lunghezza, 182 m in larghezza e l'altezza totale è pari a 458 m.

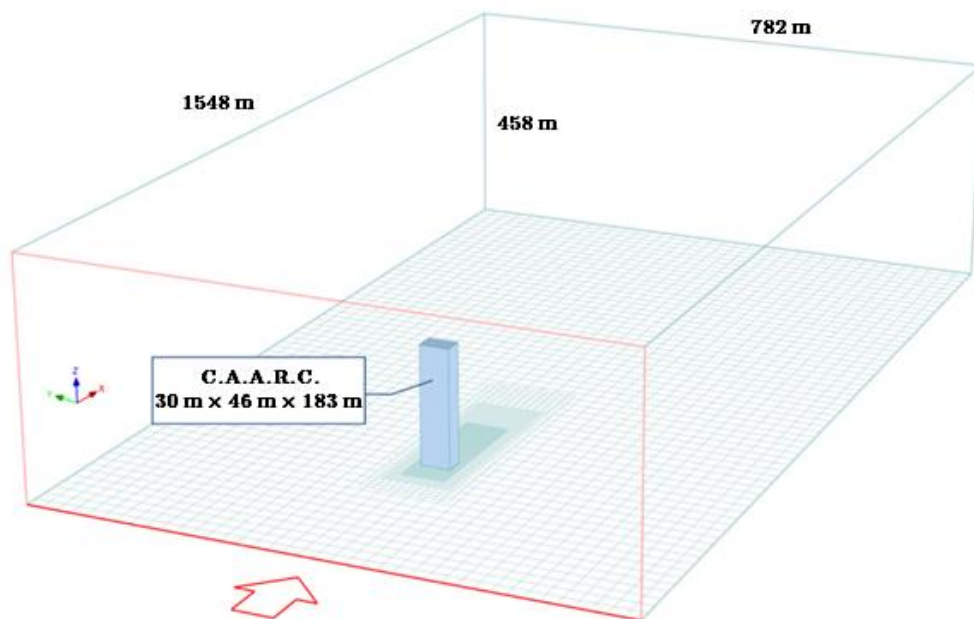


Figura 7—4: Dimensioni del dominio computazionale virtuale impostato

La mesh a volume finito è stata raffinata localmente vicino al modello di edificio con il numero totale di celle di griglia computazionale 3D è pari a 7413000.

7.1.2 Configurazione della simulazione

I parametri di simulazione e il profilo della velocità del vento in ingresso sono definiti secondo (Dagnev, 2009) e sono visualizzati nella Fig. 7.5.

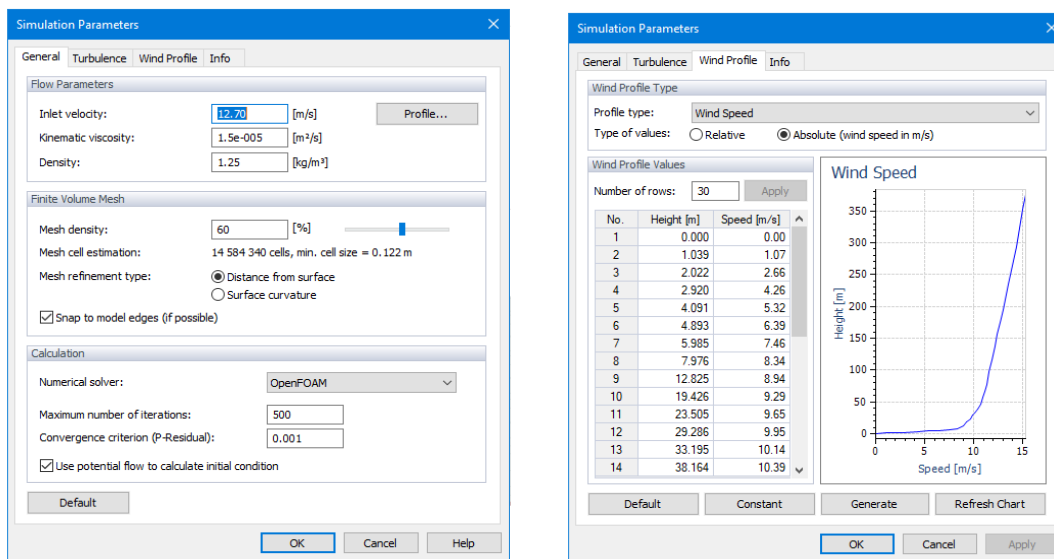


Figura 7—5: Parametri generali di simulazione e profilo della velocità del vento in ingresso

È stato utilizzato il modello di turbolenza $k-\epsilon$ e l'intensità della turbolenza in ingresso è stata impostata allo 0,15% (Fig. 7.6).

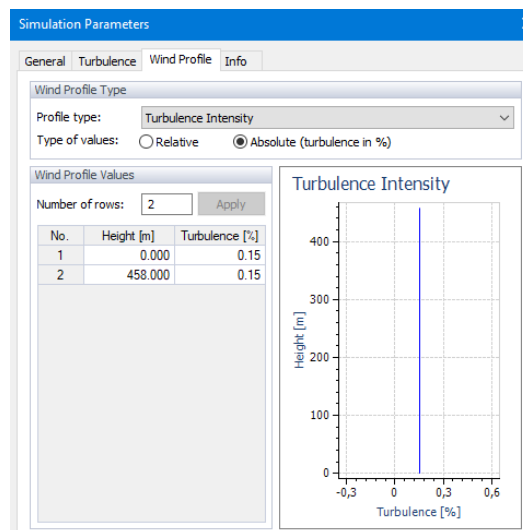


Figura 7—6: Modello di turbolenza predisposto

7.1.3 Fase di calcolo

Il calcolo è stato eseguito con RWIND Simulation Solver, che è relativo alla famiglia di solutori OpenFOAM – SIMPLE. È un risolutore a stato stazionario per flussi turbolenti e incomprimibili. L'intera simulazione, inclusa la generazione della mesh e la preparazione dei risultati, è stata completata in pochi minuti su un PC con 8 core (Intel i9–9900K). Il criterio di convergenza della pressione residua è stato impostato su 0,001, che è il valore standard per il calcolo più rapido, ed è stato ottenuto dopo 350 iterazioni. La pressione residua minima è 0,0001 e potrebbe essere raggiunta dopo 700 iterazioni continuando il calcolo. Tuttavia, i risultati non sono stati influenzati in modo significativo.

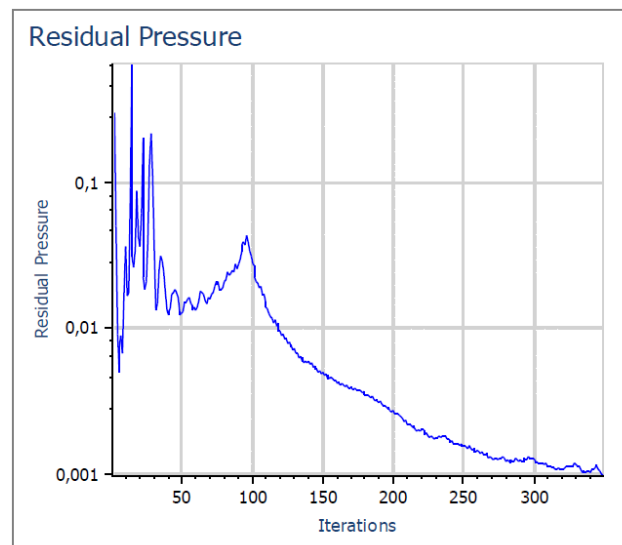


Figura 7—7: Diagramma di convergenza

La Fig. 7.8 mostra la distribuzione della pressione sulla superficie dell'edificio. A scopo di convalida e confronto, il coefficiente di pressione calcolato c_p viene confrontato con i dati ottenuti da (Dagnew, 2009) nelle Fig. 7.10 a–b. Il coefficiente c_p viene calcolato come segue:

$$c_p(t) = \frac{p - p_a}{q_a}$$

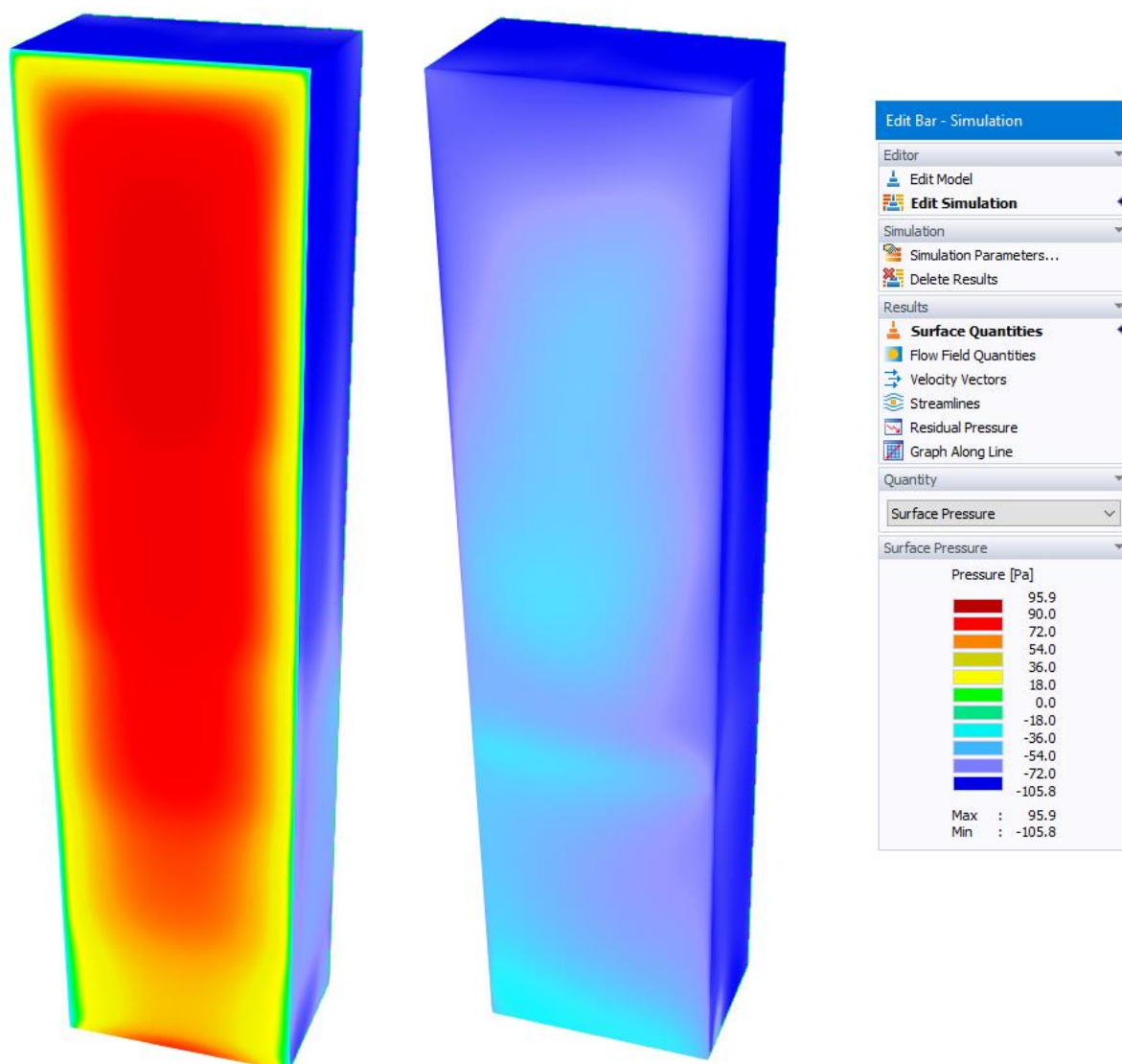


Figura 7—8: Distribuzione delle pressioni (Pa) sulla facciata sopravvento e sottovento, ottenute dall'analisi RWIND Simulation

I risultati della simulazione RWIND e i risultati sperimentali secondo (Dagnev, 2009) sulla parete sopravvento sono in stretto confronto. Sul fianco e sulle facce sottovento, si osservano differenze inferiori al 10% tra i dati misurati e calcolati, il che può essere spiegato dal modello di turbolenza ($k-\epsilon$) utilizzato e dalla mesh computazionale grossolana.

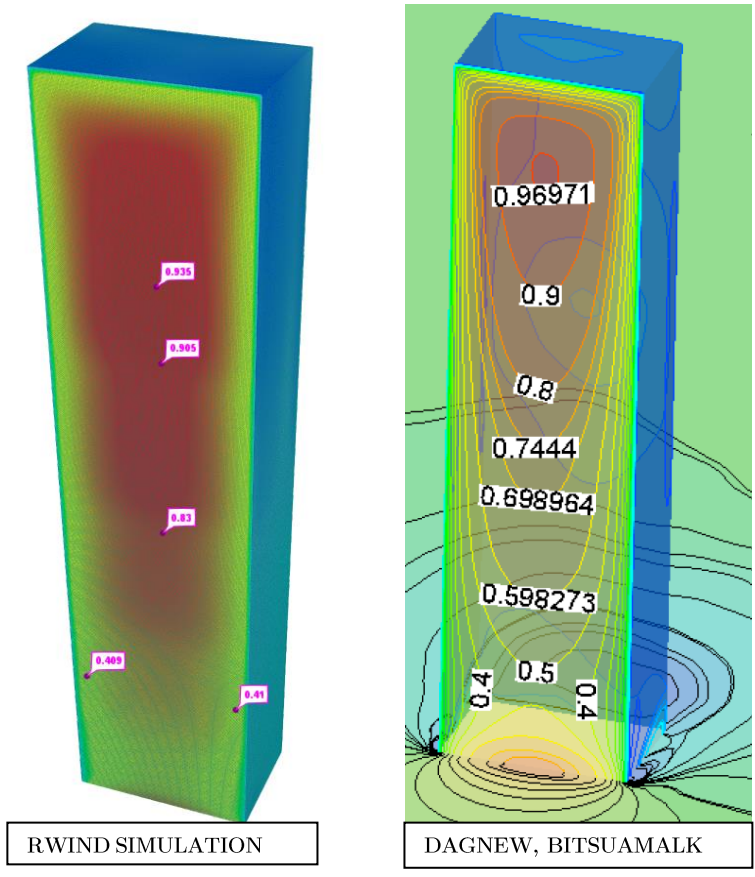


Figura 7—10a: Grafico di distribuzione del coefficiente di pressione C_p sulla faccia sopravento

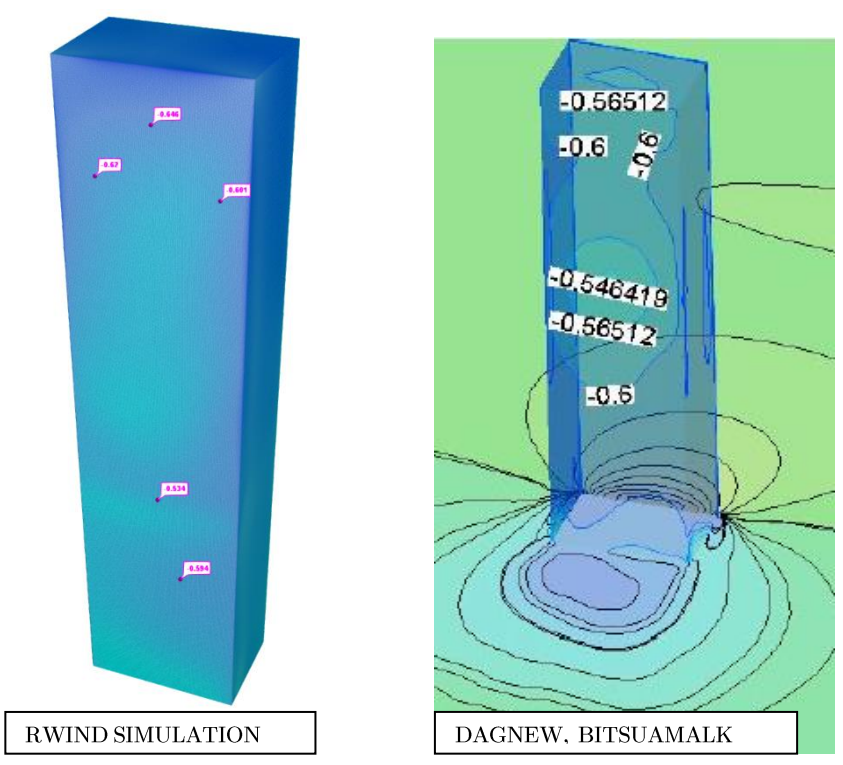


Figura 7—10b: Grafico di distribuzione del coefficiente di pressione C_p sulla faccia sottovento tra modello

7.1.4 Comparazione dei dati e risultati

All'interno dello studio condotto da (Dagneu, 2009), allo scopo di convalida e confronto, sono state utilizzate simulazioni $k-\varepsilon$ e LES standard per il caso 1A e il caso 1B, riprodotto nella Fig. 7.12, a destra.

Nell'analisi condotta col CFD, i coefficienti di pressione media, c_p , sulle facce sopravento, parete laterale e sottovento sono estratti per il caso di edificio isolato a $2/3 H$ del modello, come mostrato in Fig. 7.11 per varie condizioni al contorno di afflusso.

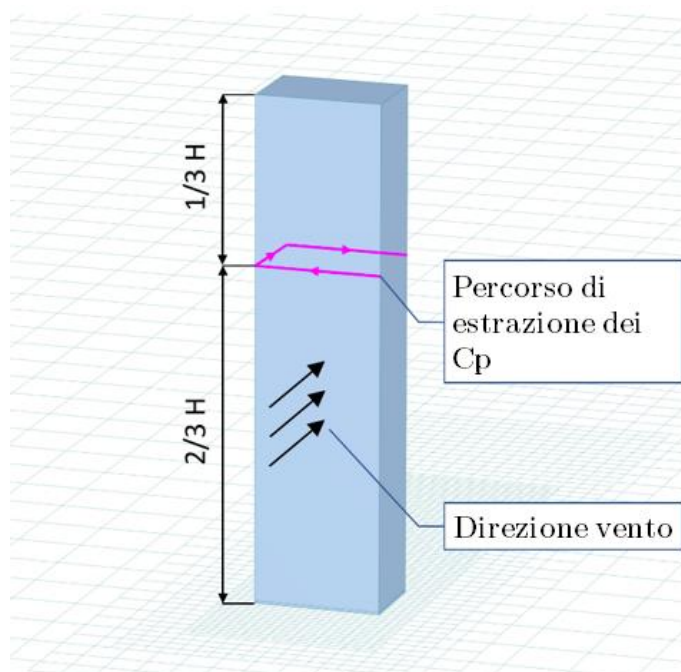


Figura 7—11: Percorso di valutazione dei coefficienti di pressione ottenuti dall'analisi RWIND

Come mostrato in Fig. 7.12, c'è una corrispondenza tra i risultati sul modello prodotto su RWIND e i risultati delle simulazioni numeriche di (Dagneu, 2009). Tale studio riporta una corrispondenza ottimale con i risultati sulla parete sopravento; si riduce leggermente ai fianchi, per poi migliorare al muro sottovento.

La mappa dei c_p di seguito proposta risulta graficamente corrispondente:

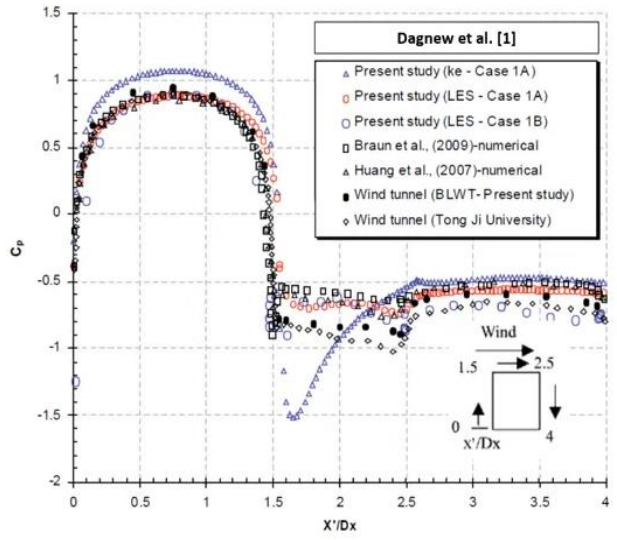
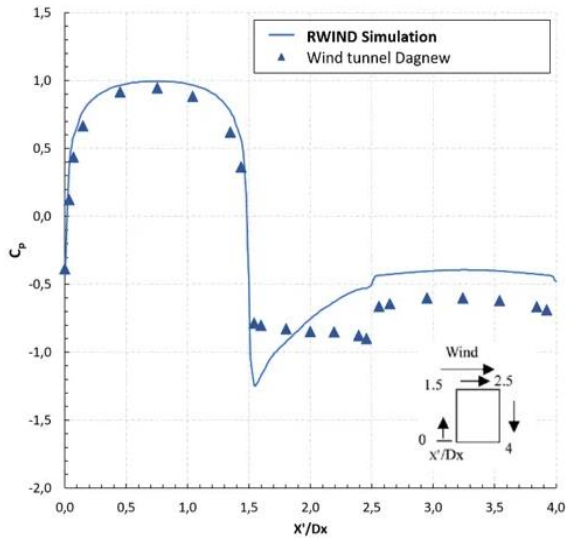


Figura 7—12: Coefficienti di pressione medi C_p sul perimetro dell'edificio all'altezza $z = 2/3 H$. Confronto con i risultati pubblicati da Dagnev secondo altri metodi numerici.

8 Analisi di validazione

Da una serie di test in galleria del vento sulla base di vari prototipi di edifici di altezza elevata, sono state studiate diverse configurazioni e combinazioni di elementi di schermatura solare per i loro effetti sulla distribuzione della pressione del vento su tutta la facciata dell'edificio. Di seguito sono elencate le proprietà e ai parametri del fluido e le boundary conditions adottate nell'analisi CFD.

8.1 Proprietà del fluido

Il fluido considerato è aria a temperatura ambiente (293 °K) ed a pressione ambiente (101350 Pa). In tal caso la sua densità è 1.25 Kg/m^3 e la sua viscosità cinematica $1.5 \text{ E}-05 \text{ m}^2/\text{s}$. Supponendo che gli edifici da analizzare siano posti in un condotto in cui il fluido di lavoro (l'aria) è un fluido reale, particolare influenza rivestono le resistenze viscosi e le forze d'inerzia. Il rapporto tra forze viscosi e forze d'inerzia si esprime mediante la grandezza adimensionale Numero di Reynolds, che risulta mediamente pari a $Re = 5.5 \cdot 10^7$.

L'intensità di turbolenza è stata impostata per un valore standard $I = 0.2\%$, la velocità base di riferimento del vento utilizzata è 27 m/s applicata variando l'angolo di incidenza di 15° per ognuna delle diverse configurazioni prese in analisi. Il criterio di convergenza della pressione residua è stato impostato su $0,001$, che è il valore standard per il calcolo più rapido, ed è stato ricercato impostando un numero massimo di 600 iterazioni.

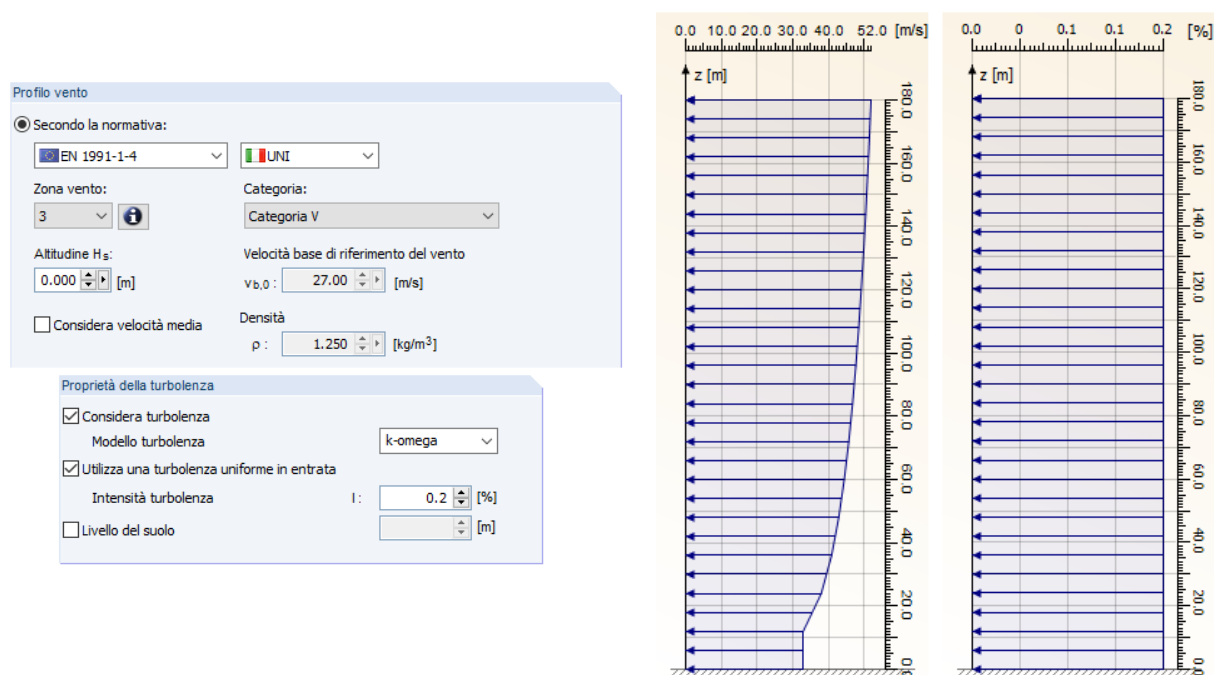


Figura 8—1: Profilo del vento e proprietà di turbolenza considerate

8.2 Sezione di ingresso

Nella sezione di ingresso va imposta la velocità di riferimento del fluido: $V_X = 12.7 \text{ m/s}$, $V_Y = 0$. La velocità orizzontale al dominio è funzione dell'altezza e presenta un andamento logaritmico con V che rappresenta la velocità del vento a 10 m di altezza e z_0 la rugosità del terreno della zona considerata.

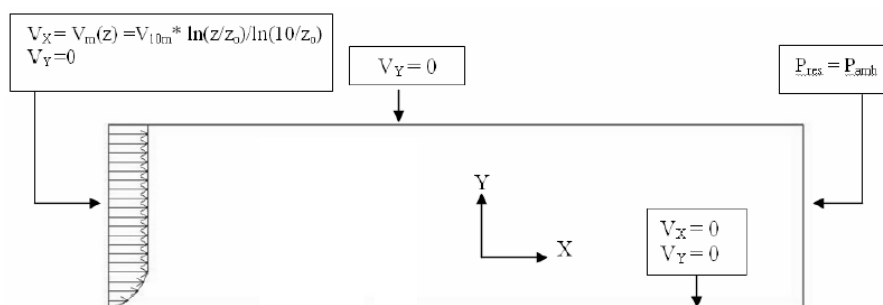


Figura 8—2: Boundary conditions applicate sulla galleria virtuale

8.3 Impostazioni strati limite

Strato limite inferiore

Il terreno si comporta come un wall perfettamente liscio: $V_X = 0$ e $V_Y = 0$. Nella realtà dovrebbe avere una sua caratteristica di rugosità, ma per caratterizzarlo in modo standard se ne sono esclusi gli effetti. Tale proprietà può essere modellata nella galleria virtuale nel rispetto del contesto urbano in cui l'edificio andrà a sorgere, variando rugosità o contesto urbano circostante modellando edifici confinanti aggiuntivi. Per semplicità si è ipotizzato che gli effetti ventosi abbiano agito in modo indisturbato, senza ostacolo alcuno, il che ha permesso di analizzare gli elementi frangisole soggetti a valore di pressione massima sulla facciata sopravvento, nelle varie configurazioni studiate.

Strato limite superiore

Per il cielo si considera una condizione di simmetria: $V_Y = 0$.

8.4 Test benchmark con studi in galleria del vento

Dopo un'iniziale validazione del software RSIND Simulation con l'edificio C.A.A.R.C, si è deciso di procedere con l'analisi di test benchmark utilizzando studi sui carichi del vento su elementi oscuranti applicati su edifici di altezza elevata condotti in galleria del vento. Sulla base degli edifici analizzati e sulla base dei relativi risultati, presenti all'interno di (Code of Practice on Wind Effect in Hong Kong , 2019), si sono riprodotti tali casi studio simulandoli attraverso un'analisi virtuale CFD. Successivamente si è proceduto confrontando i valori dei coefficienti di pressione riportati negli studi sperimentali con quelli ottenuti dal software RWIND, quantificandone gli errori riscontrati.

8.4.1 Caso studio A

Il primo modello di studio ha analizzato l'effetto dato dalla presenza di oscuranti con aggetti orizzontali distribuiti sulle facciate laterali dell'edificio. Le caratteristiche geometriche dell'edificio prevedono:

- Altezza: 150 m,
- Prospetto sud: 35 m,
- Prospetti laterali: 45 m

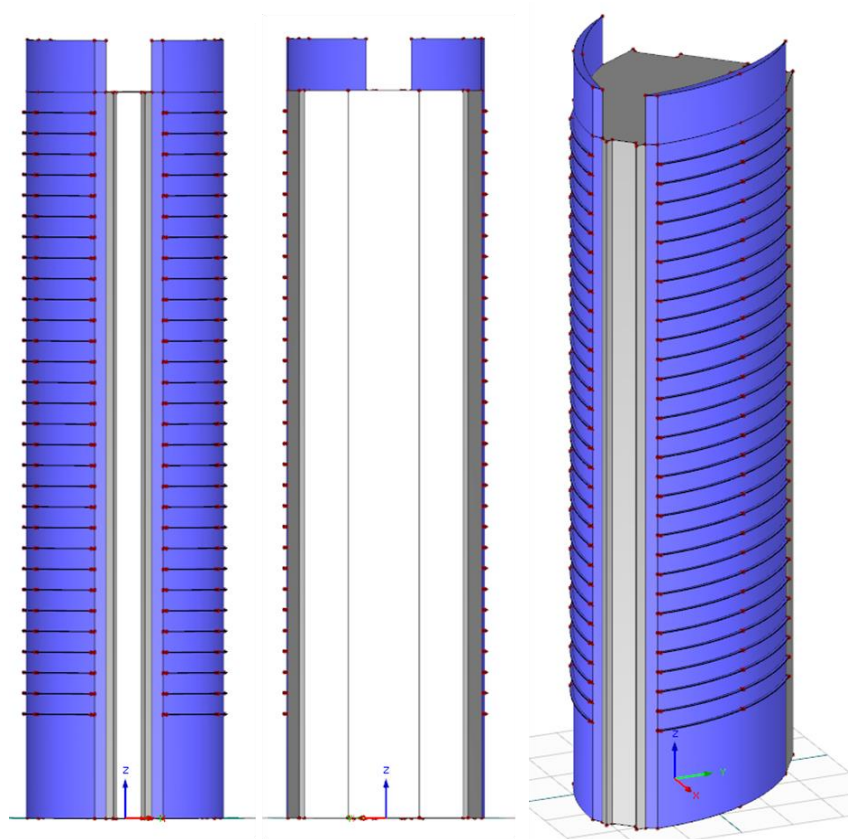


Figura 8—3: Prospetti e vista assonometrica dell'edificio del caso studio A

Le caratteristiche geometriche degli oscuranti sono:

- Larghezza massima: 650 mm
- Spessore: 100 mm
- Distanza aggetti orizzontali: 3.9 m

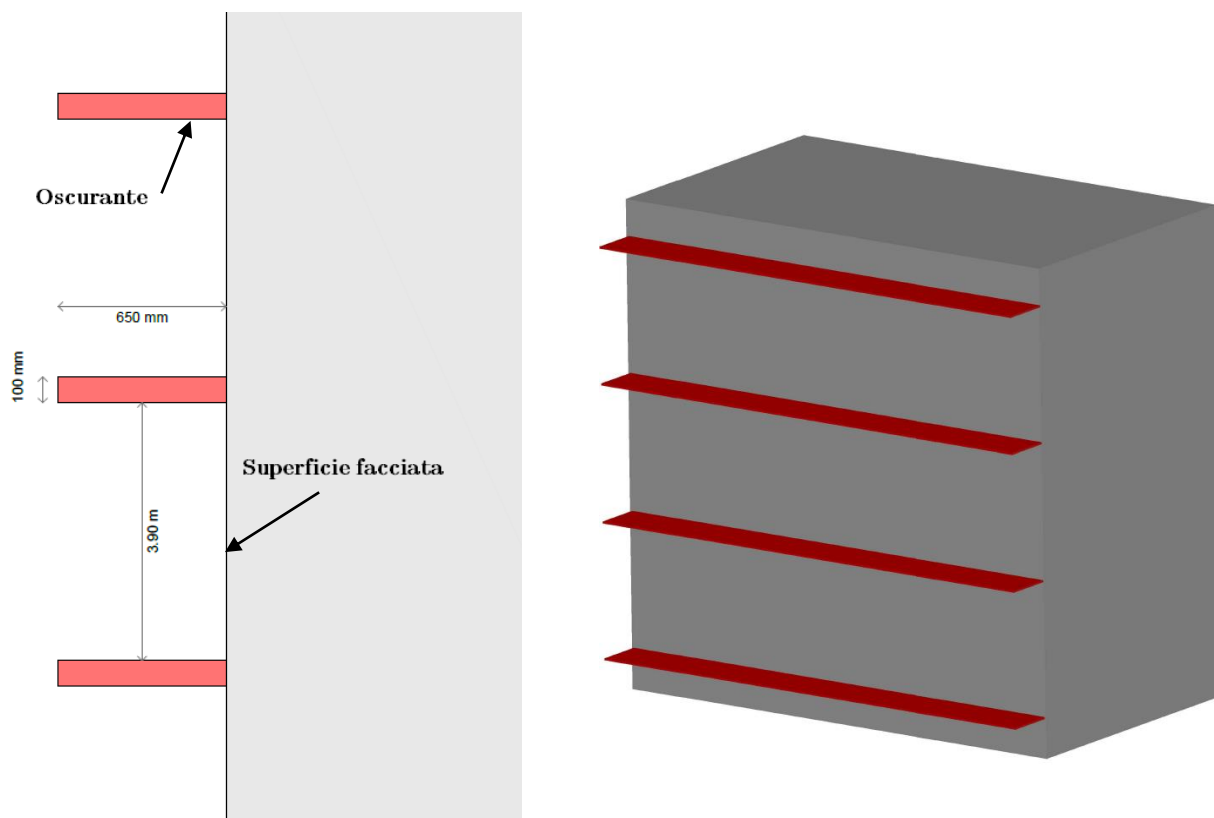


Figura 8—4: Caratteristiche geometriche degli elementi oscuranti appartenenti al caso A

Di seguito sono riportati i diagrammi dei valori di coefficiente di pressione c_p agenti sui due prospetti su cui sono applicati gli elementi oscuranti.

Gli studi effettuati in galleria del vento sono stati svolti disponendo dei sensori di pressione sul modello per registrare i coefficienti c_p agenti sulla superficie della facciata; inoltre sono stati applicati sensori di pressione sulla parte superiore e inferiore di ogni elemento frangisole aggettante, di cui sono stati riportati i coefficienti c_p .

Sono stati diagrammati i coefficienti di pressione massimi e minimi registrati sui vari frangisole appartenenti ad entrambe le facciate laterali; di ognuno si è registrato il valore appartenente alla parte superiore e inferiore della stessa lamella valutata.

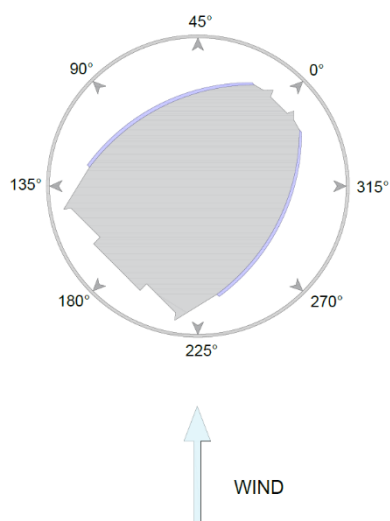


Figura 8—5: Direzione azione del vento rispetto alle diverse configurazioni

La direzione del vento agente e le varie angolazioni di incidenza del vento sulla struttura all'interno della galleria del vento, sulla base dei sono stati riportati i valori dei coefficienti di pressione, hanno seguito lo schema riportato in Fig. 8.5.

Di seguito sono riportati i diagrammi dei c_p registrati nelle analisi in galleria del vento, relativi alla facciata sinistra:

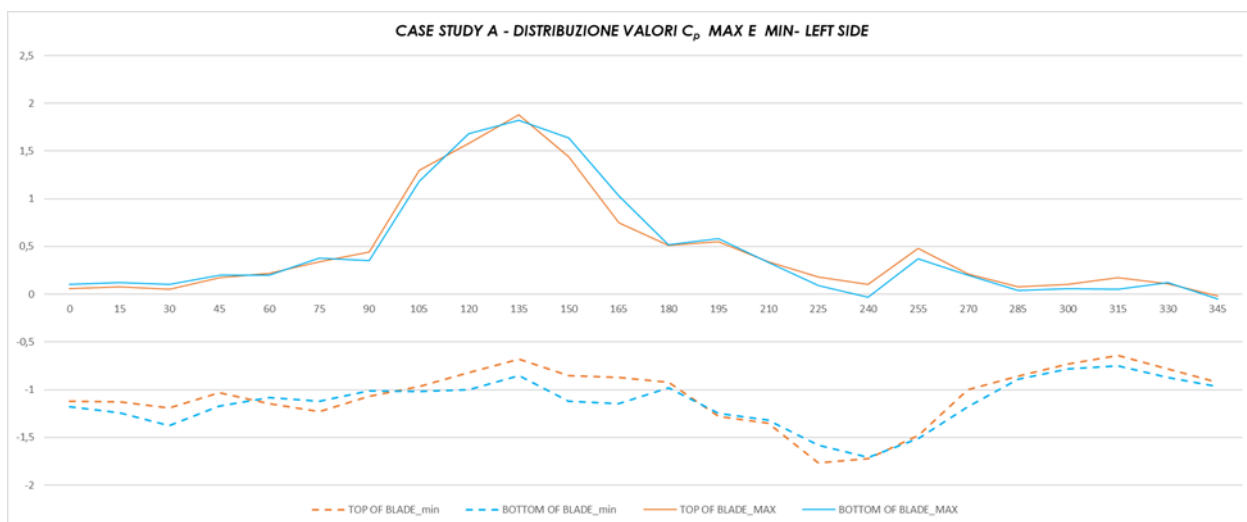


Figura 8—6: Caso studio A— andamento dei C_p (MAX e min) proposti a seguito di analisi in galleria del vento sulla facciata sinistra dell'edificio in analisi.

Di seguito sono riportati i diagrammi dei c_p registrati nelle analisi in galleria del vento, relativi alla facciata destra

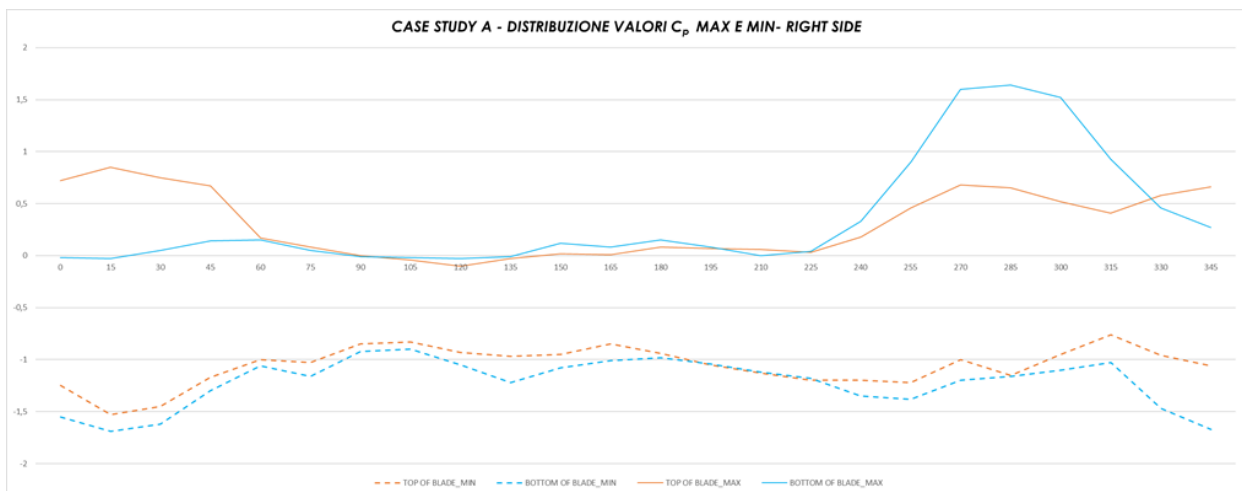


Figura 8—7: Caso studio A— andamento dei C_p (MAX e min) proposti a seguito di analisi in galleria del vento sulla facciata destra dell'edificio in analisi.

Sulla base di questi valori, si sono basati i nostri test benchmark. In prima analisi si è riprodotta attraverso un software di analisi a elementi finiti (RFEM Dlubal) la struttura, la si è poi esportata all'interno del software RWIND Simulation, con cui si è condotta lo studio fluidodinamico.

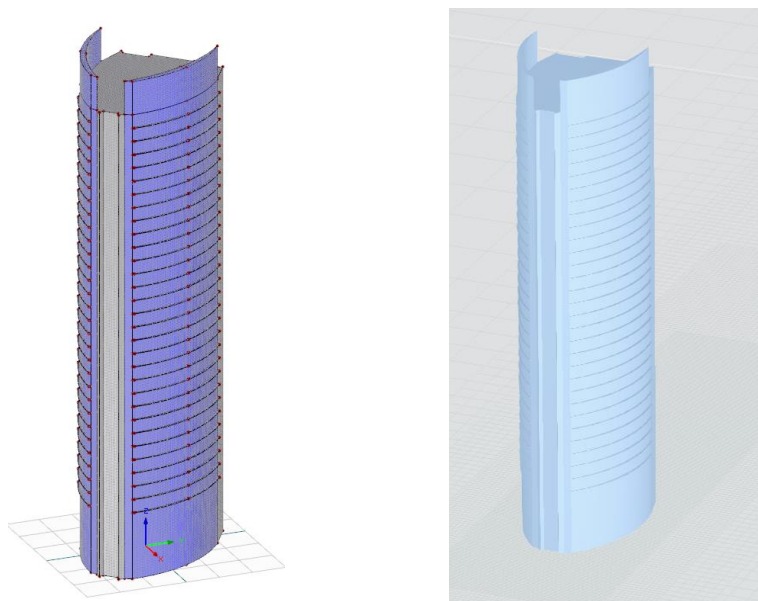


Figura 8—8: Modelli di calcolo nel software RFEM, poi esportato su RWIND Simulation

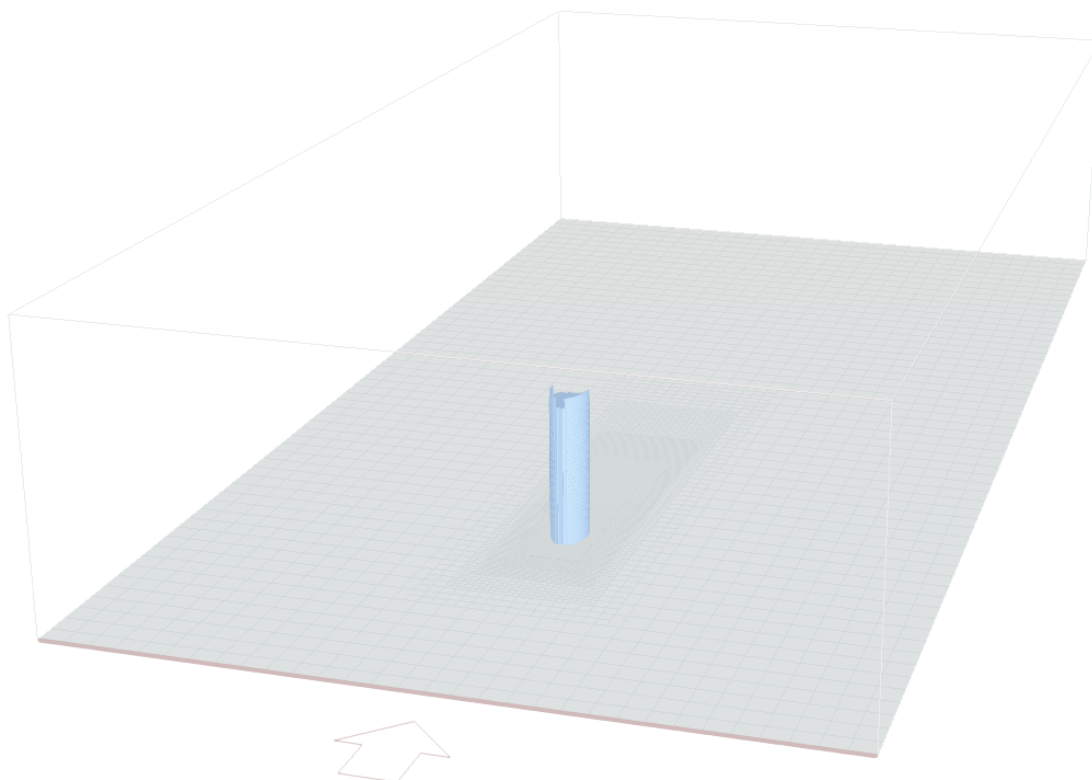


Figura 8—9: Galleria del vento virtuale in cui si effettua l'analisi fluidodinamica

Importato il modello su RWIND, si è partiti con l'impostazione delle boundary conditions e dei parametri di simulazione che vanno a variare le caratteristiche del vento in termini di:

- intensità del vento;
- turbolenza;
- densità del fluido;
- viscosità cinematica del fluido;

e si vanno a impostare i parametri di calcolo, che vanno a variare:

- la densità e il numero delle mesh;
- il valore di convergenza;
- il numero di iterazioni previste per raggiungerlo;
- modello di turbolenza ($k-\omega$ oppure $k-\epsilon$);

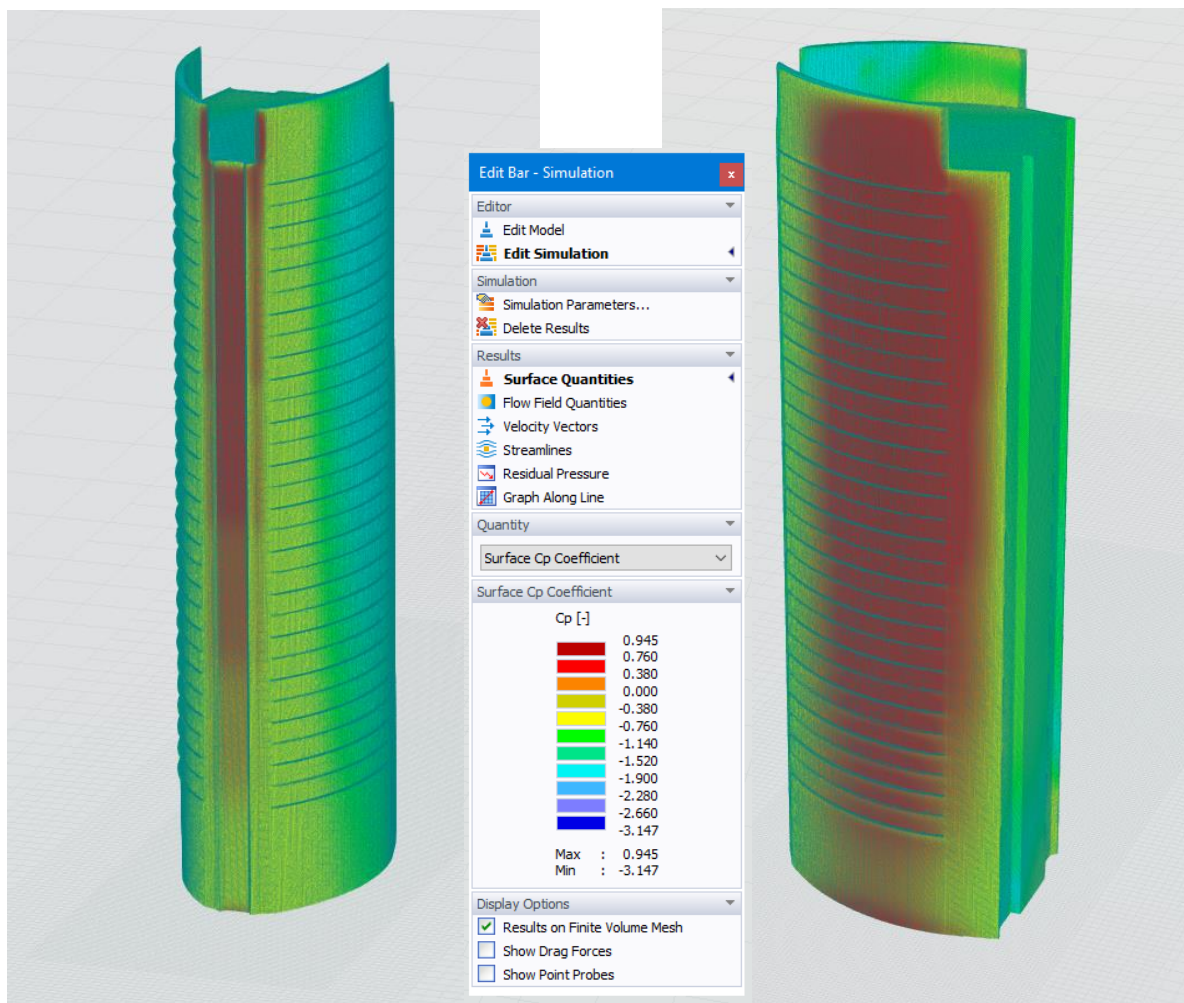


Figura 8—10: Risultati ottenuti a conclusione dell'analisi CFD in una nelle diverse configurazioni esaminate

Nella cura della massima corrispondenza coi dati output attesi dall'analisi, si è cercato di ottimizzarla riducendo al massimo la dimensione delle mesh, fino ad ottenere la dimensione media della cella del modello (riprodotto in scala geometrica 1:1) di 0.16 m, per un totale di oltre 21 mln di celle analizzate.

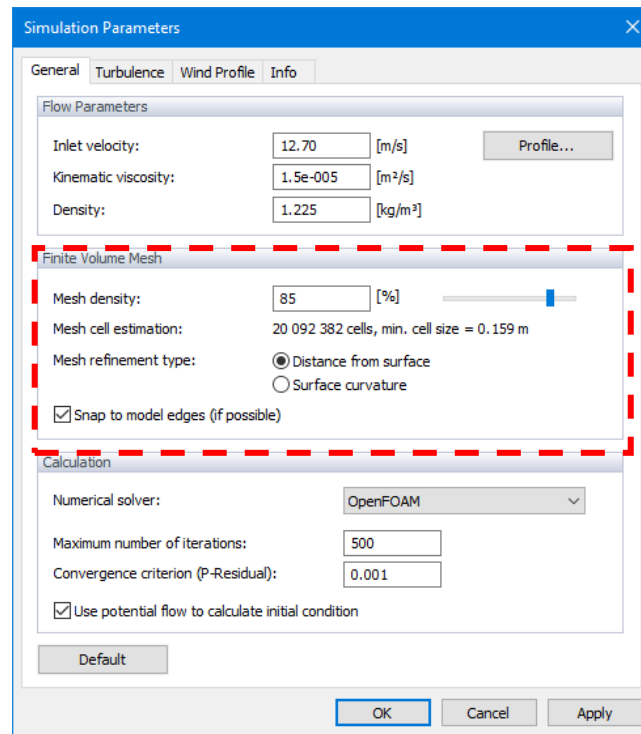


Figura 8—11: Definizione della densità delle mesh

A conclusione delle varie analisi fluidodinamiche, condotte nel rispetto dei criteri adottati negli studi in galleria del vento (allo scopo di ottenere anche massima corrispondenza nel test) si sono diagrammati i coefficienti di pressione c_p forniti in output dal software:

Di seguito sono riportati i diagrammi dei c_p ottenuti sulla facciata sinistra del modello CFD, valutando il modello di turbolenza $k-\omega$:

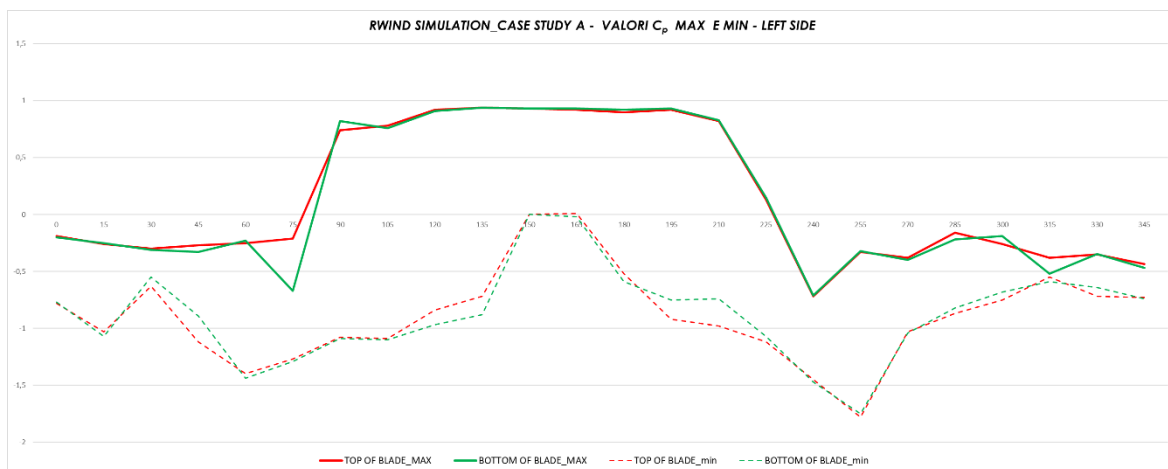


Figura 8—12: Caso studio A— andamento dei C_p (MAX e min) proposti a seguito dell'analisi CFD con RWIND Simulation, sulla facciata sinistra dell'edificio in analisi.

A seguire sono proposti i diagrammi dei c_p contenenti i valori massimi e minimi, ottenuti sulla facciata destra del modello CFD, valutando il modello di turbolenza $k-\omega$:

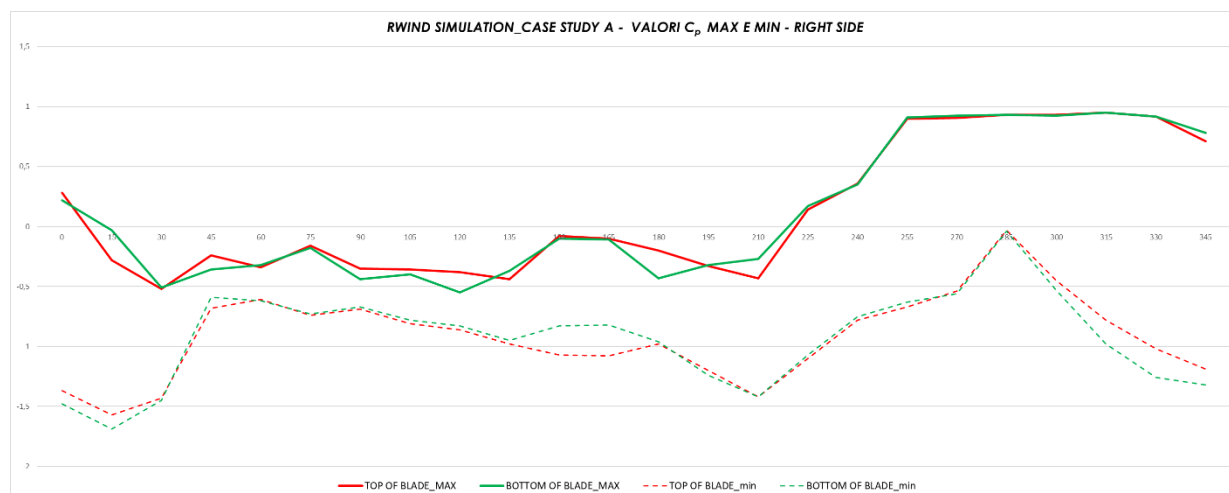


Figura 8—13: Caso studio A— andamento dei C_p (MAX e min) proposti a seguito dell'analisi CFD con RWIND Simulation, sulla facciata destra dell'edificio in analisi.

Allo scopo di favorire un confronto grafico più immediato e diretto, di seguito sono riproposti i grafici raffiguranti l'andamento dei c_p al variare dell'angolo di incidenza dell'azione del vento. Saranno stavolta raffigurati all'interno dello stesso diagramma i valori di c_p massimi appartenenti sia al modello analizzato in galleria del vento che quelli appartenenti al modello analizzato col software RWIND Simulation:

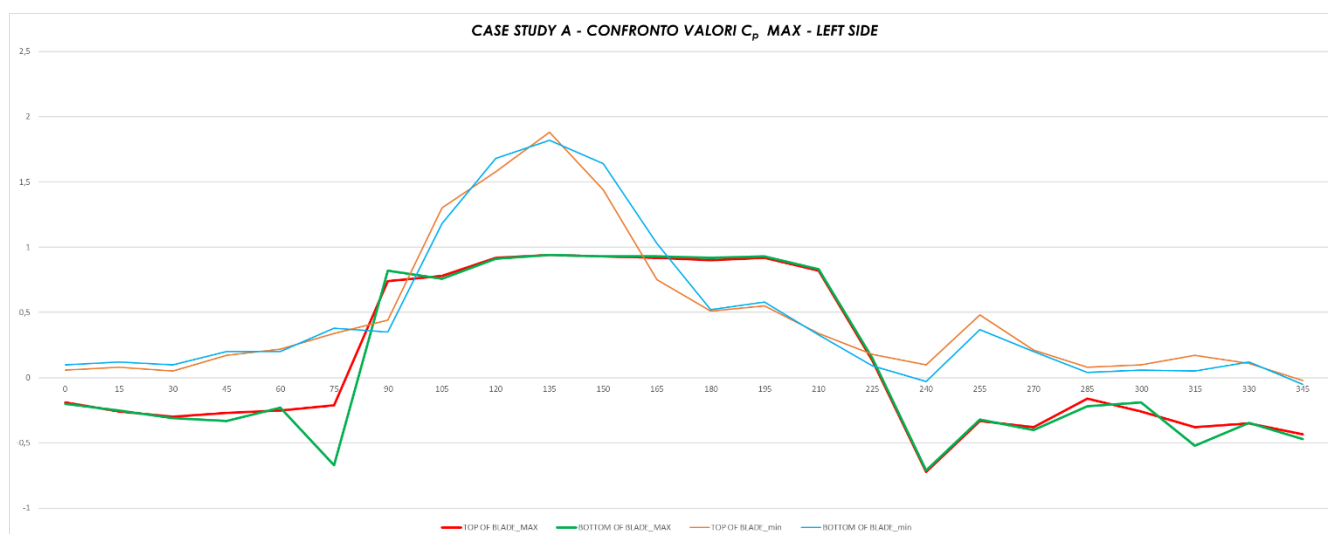


Figura 8—14: Confronto “galleria del vento”/”CFD”, dei valori di C_p massimi appartenenti alla zona sinistra;

(Holmes J. , 2007)

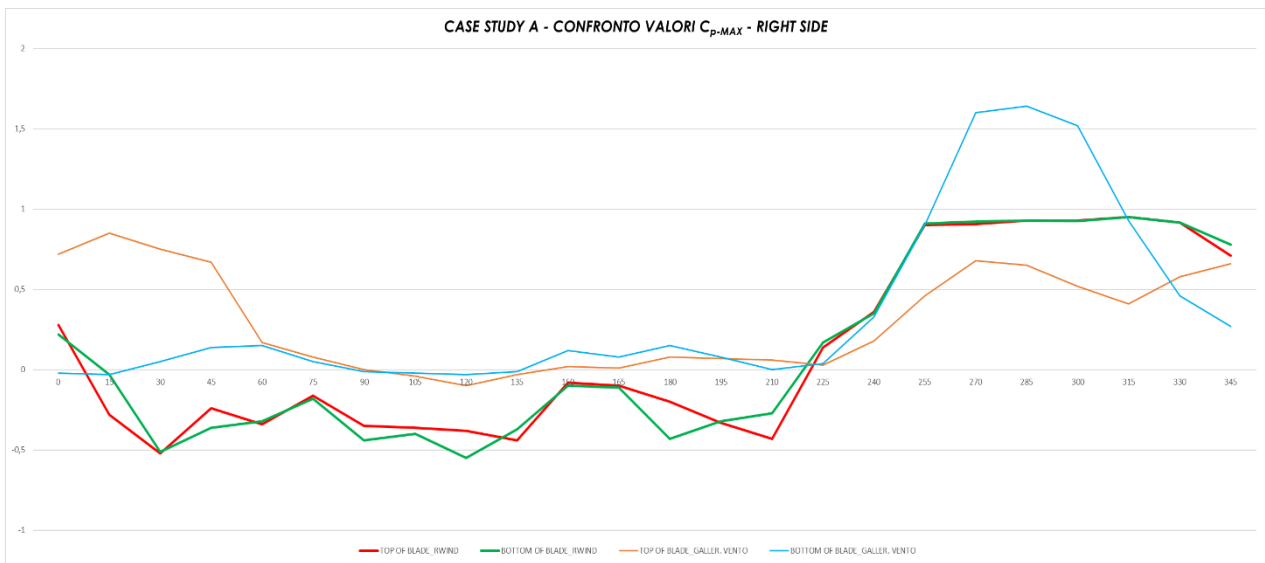


Figura 8—15: Confronto “galleria del vento”/”CFD”, dei valori di C_p massimi appartenenti alla zona destra;

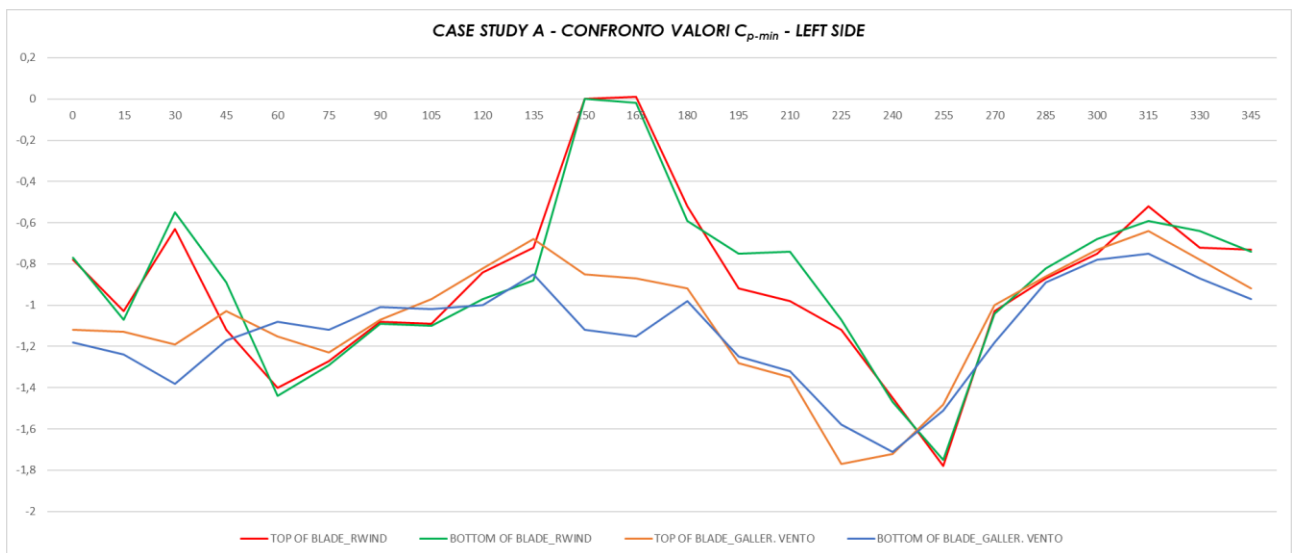


Figura 8—16: Confronto “galleria del vento”/”CFD”, dei valori di C_p minimi appartenenti alla zona sinistra;

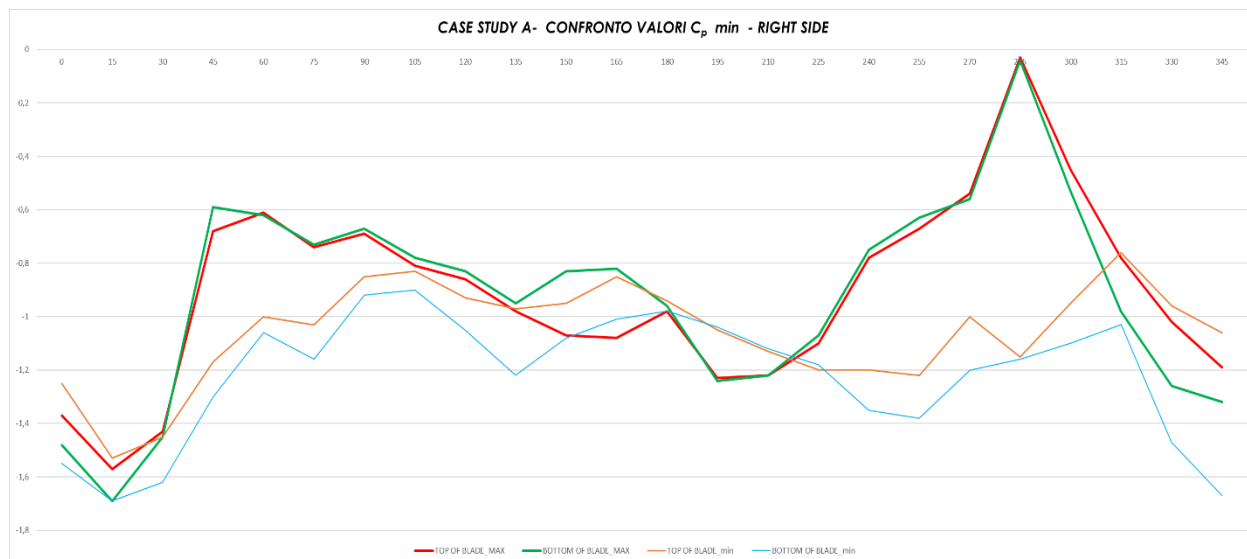


Figura 8—17: Confronto “galleria del vento”/”CFD”, dei valori di C_p minimi appartenenti alla zona destra;

8.4.2 Caso studio A – Considerazioni e commenti

I diagrammi qui riportati mostrano come vi sia buona corrispondenza tra i valori di c_p ricavati dall’analisi CFD rispetto a quelli ottenuti dai test in galleria del vento.

Nel diagramma in Fig. 8.14, le configurazioni con angolo di esposizione compreso tra 90° e 170° mostra valori del modello in galleria del vento, per quanto positivi, di modulo molto al di sopra del valore limite unitario del c_p ;

La medesima incoerenza di valori si individua all’interno del grafico in Fig. 8.15, in cui le configurazioni con angolo di esposizione compreso tra 250° e 310° mostrano valori del c_p ottenuti dai test in galleria del vento, maggiori di uno.

Nel grafico in Fig. 8.15, i valori di c_p corrispondenti al modello studiato in galleria del vento mostrano una brusca discrepanza nelle configurazioni con angolo di esposizione compreso tra 0° e 60° , tra i valori valutati sulla parte superiore della lamella e la parte sottostante. Tale gap riscontrato si quantifica in una differenza anomala di un valore pari a 0.8;

Nell’ipotesi che tale edificio in galleria del vento fosse isolato, quindi privo di contesto urbano, appare fisicamente incoerente un valore di pressione c_p positivo registrato sulla parte superiore della lamella appartenente al prospetto destro (esposto in zona sottovento con tale configurazione). Come riprova grafica di tale apparente incongruenza, la Fig. 8.18 sottostante ripropone tale configurazione nell’analisi CFD: gli oscuranti aggettanti sulla facciata destra risultano tutti in zona di sottovento, con valori di coefficiente di pressione negativo pressoché ovunque.

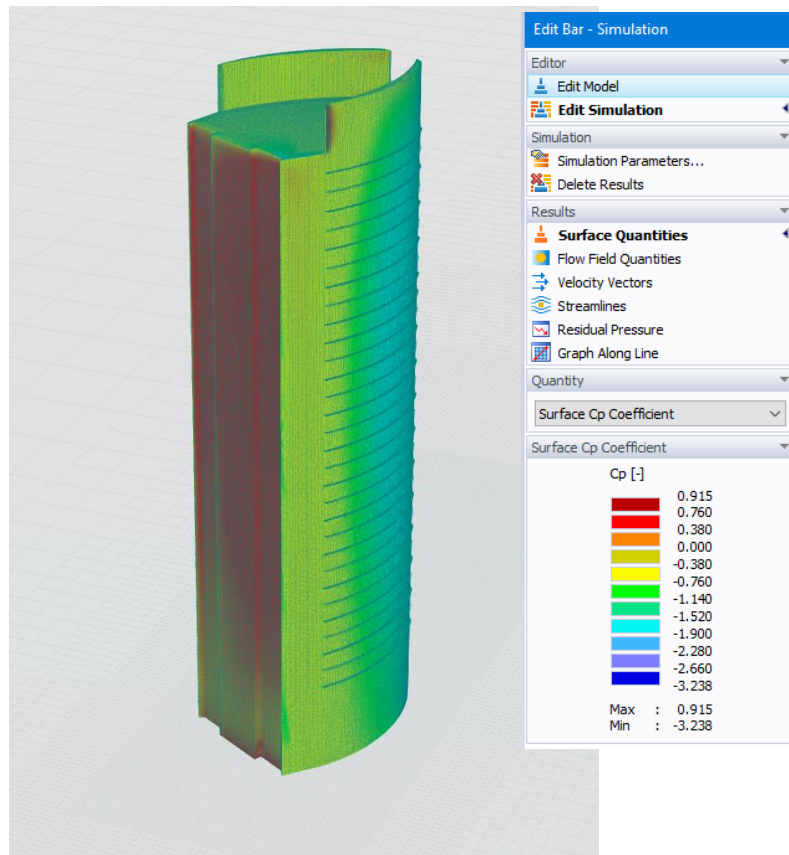


Figura 8—18: Valori di Cp agenti sulla facciata destra dell'edificio, esposta con angolo di inclinazione di 15° rispetto al sistema di riferimento impostato.

8.4.3 Caso studio B

Il secondo modello di studio ha analizzato oscuranti con schermi verticali costituiti da lamelle orizzontali, distribuite attorno all'intero edificio. Le caratteristiche geometriche dell'edificio prevedono:

- Altezza: 110 m,
- Prospetto: 75 m,
- Facciate laterali: 35 m

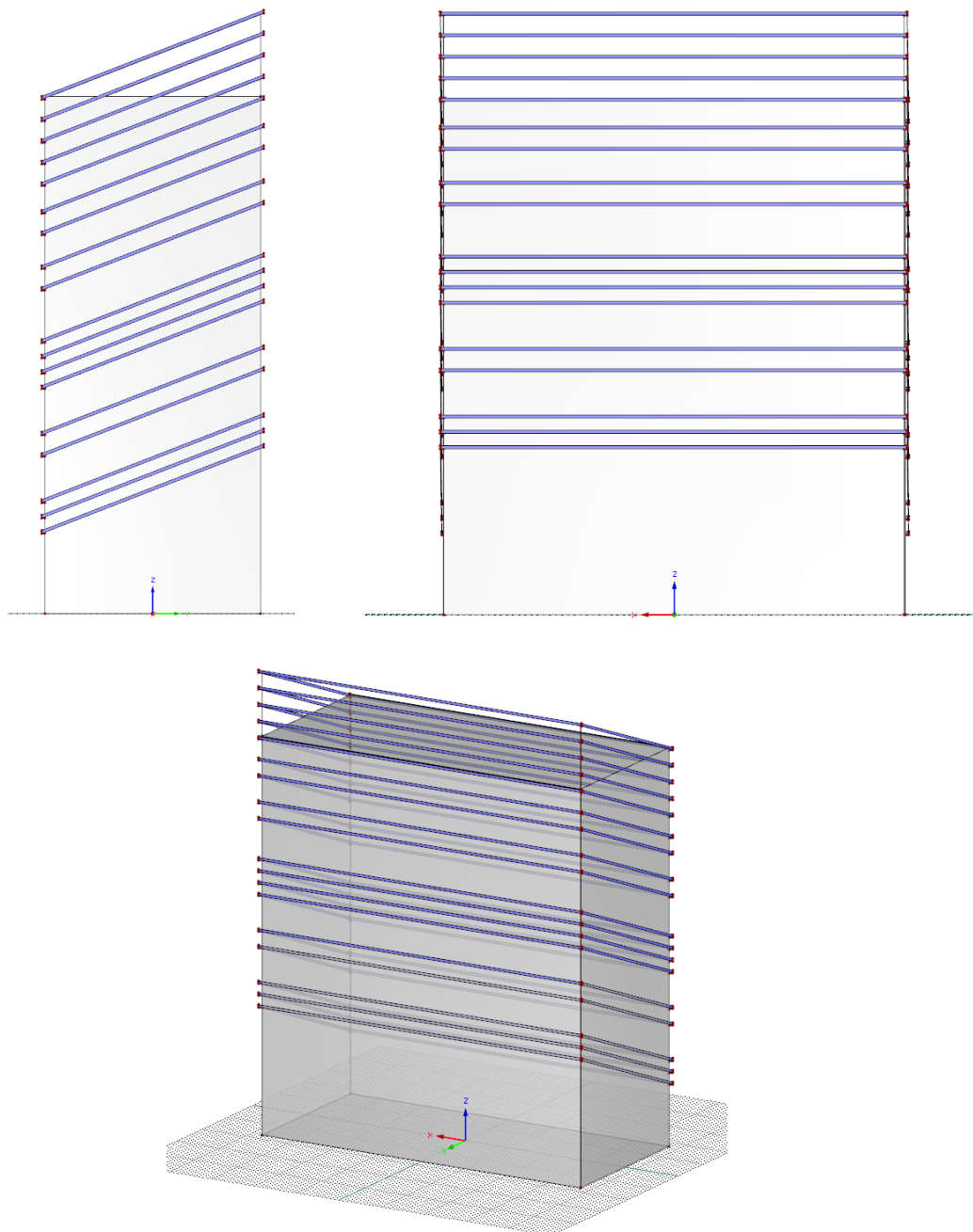


Figura 8—19: Prospetti e vista assonometrica dell'edificio del caso studio B

Le caratteristiche geometriche degli oscuranti sono:

- Altezza lamella: 500 mm
- Spessore lamella: 20 mm
- Distanza dalla superficie: 500 mm

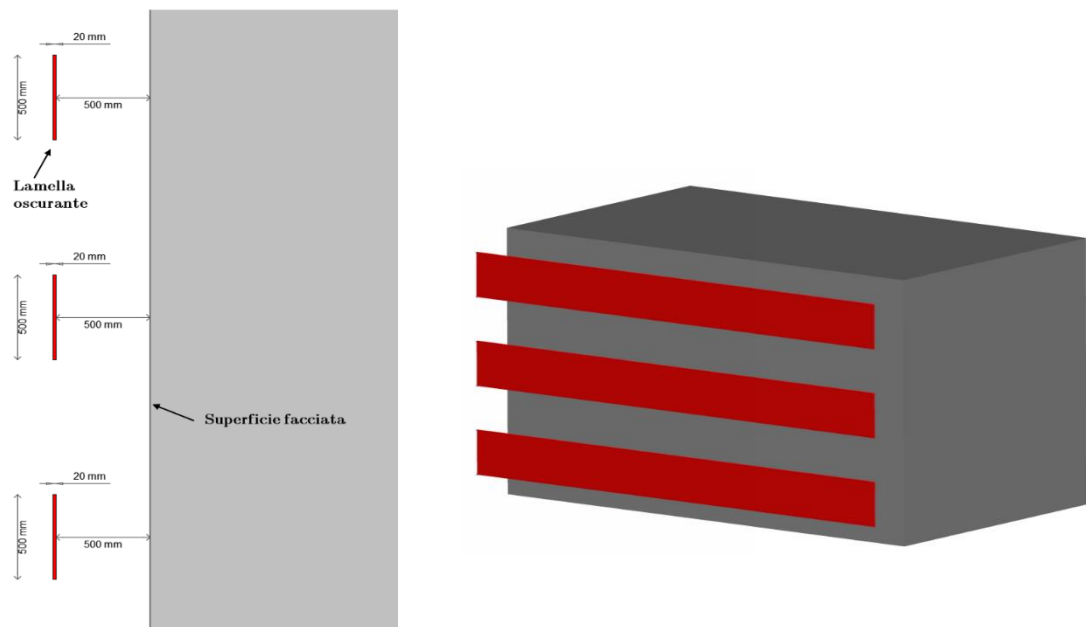


Figura 8—20: Caratteristiche geometriche degli elementi oscuranti appartenenti al caso B

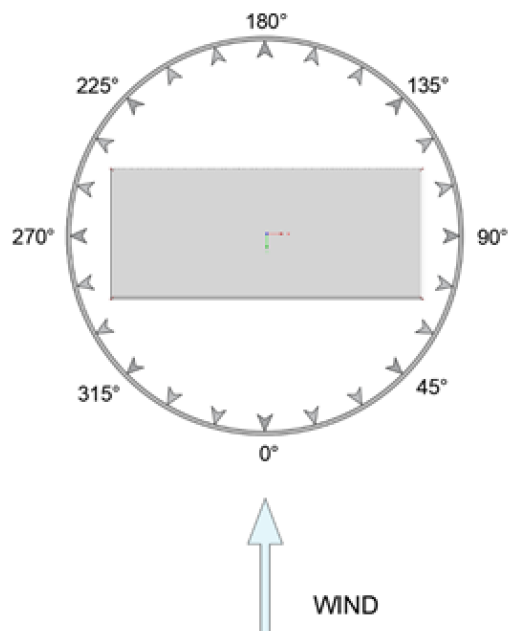


Figura 8—21: Direzione del vento rispetto alle diverse configurazioni

All'interno dell'articolo (Code of Practice on Wind Effect in Hong Kong , 2019), oltre ai valori dei coefficienti di pressione netta per il calcolo dei carichi del vento su oscuranti orizzontali, lamelle verticali (adiacenti e distacco dalla superficie di facciata), fornisce parametri geometrici, alla base del caso studio seguente.

L'articolo infatti distingue gli effetti del c_p , distinguendone la valutazione a seconda che esso sia valutato sulla zona centrale della parete o sulle estremità laterali, più vicine ai bordi, in cui l'azione del vento e delle pressioni subiscono notevoli modifiche.

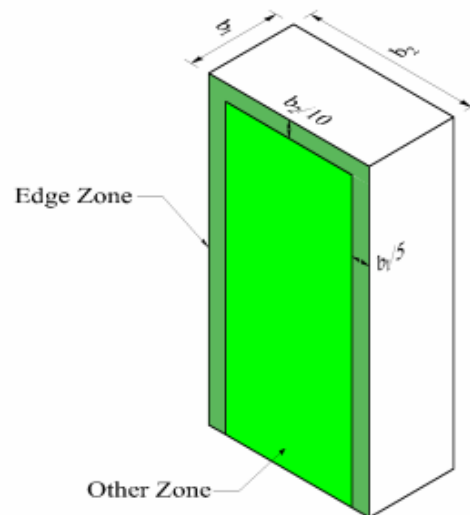


Figura 8—22: Definizione della dimensioni delle zone "di bordo"

Sulla base di tali definizioni, nel nostro caso è stata definita la zona di bordo di larghezza pari a $b_1/5$: dove b_1 individua il lato minore di 35 m; in base a ciò la zona laterale prevede lateralmente e superiormente una larghezza di 7 metri dallo spigolo, riducendo la zona della facciata definita centrale a $b_2 - 2(b_1/5) = 61$ m, dove b_2 indica il lato minore di 75 m.

Di seguito sono riportati i diagrammi dei c_p registrati sulla zona centrale della facciata:

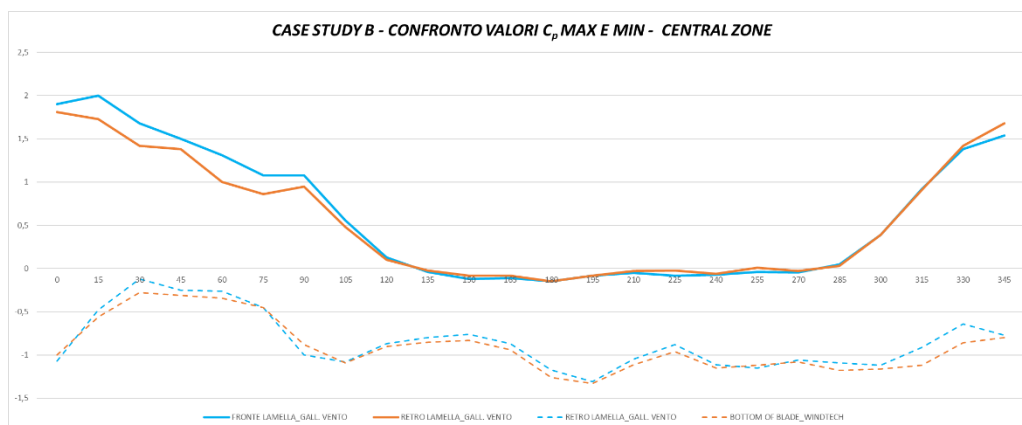


Figura 8—23: Valori C_p (MAX e min) relativi al caso studio B nella zona centrale, provenienti dalle analisi in galleria del vento

Quelli raffigurati i diagrammi dei c_p registrati nelle analisi in galleria del vento, relativi alle zone più prossime ai bordi dell'edificio.

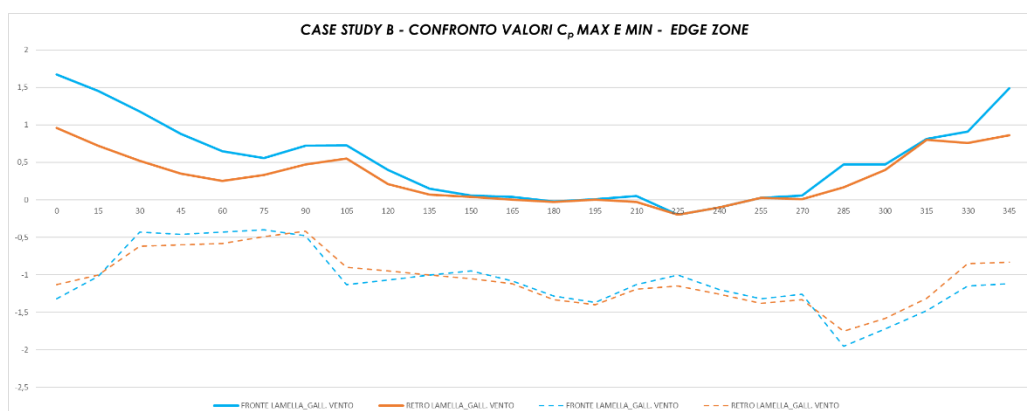


Figura 8—24: Valori C_p (MAX e min) relativi al caso studio B sulle zone di bordo, provenienti dalle analisi in galleria del vento

Sulla base di questi valori, si sono basati i nostri test benchmark. In prima analisi si è riprodotta attraverso un software di analisi a elementi finiti (RFEM Dlubal) la struttura, la si è poi esportata all'interno del software RWIND Simulation, con cui si è condotta lo studio fluidodinamico. Importato il modello su RWIND, si è partiti con l'impostazione delle condizioni al contorno e dei parametri di simulazione che vanno a variare le caratteristiche del vento in termini di:

- intensità del vento;
- turbolenza;
- densità del fluido;
- viscosità cinematica del fluido;

si vanno a impostare i parametri di calcolo, che vanno a variare:

- la densità e il numero delle mesh;
- il valore di convergenza;
- il numero di iterazioni previste per raggiungerlo;
- modello di turbolenza ($k-\omega$);

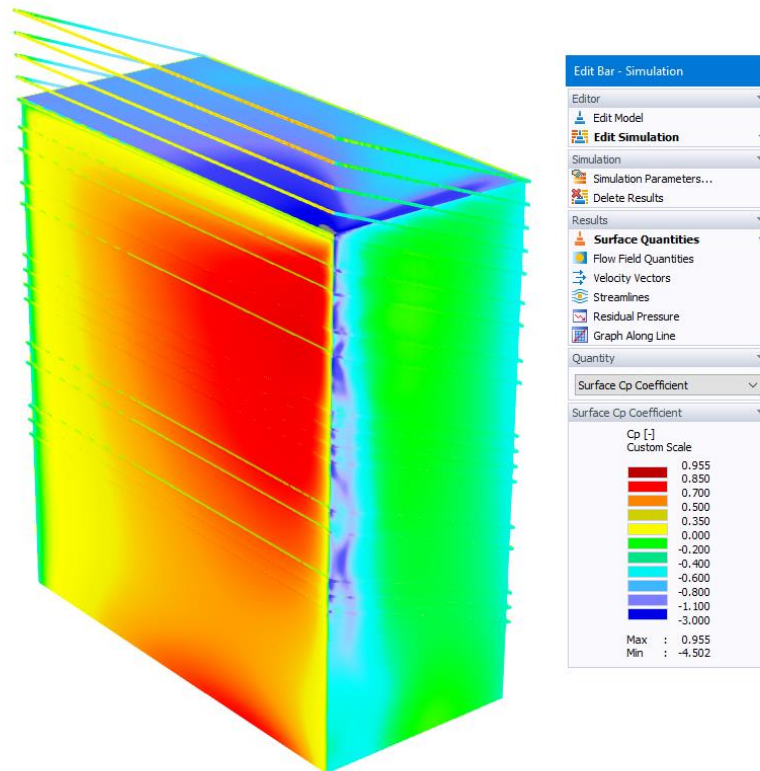


Figura 8—25: Risultati ottenuti a conclusione dell'analisi CFD in una nelle diverse configurazioni esaminate

Nella cura della massima corrispondenza coi dati output attesi dall'analisi, si è cercato di ottimizzarla riducendo al massimo la dimensione delle mesh, fino ad ottenere la dimensione media della cella del modello (riprodotto in scala geometrica 1:1) di 0.08 m, per un totale di oltre 35 mln di celle analizzate.

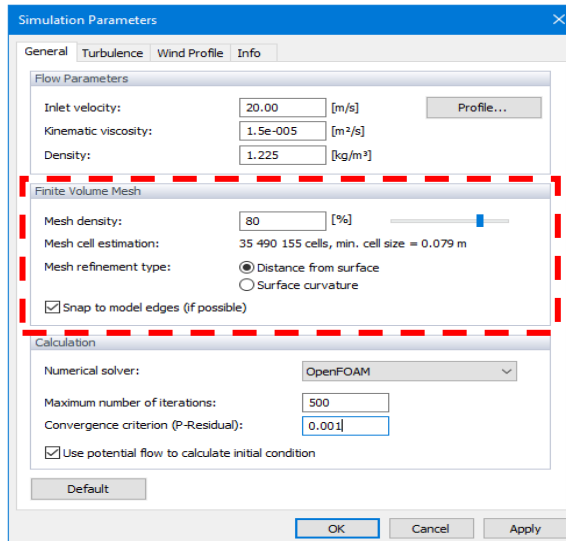


Figura 8—26: Definizione della densità delle mesh

Solo aumentando il livello di dettaglio considerato, è stato possibile ricavare valori di coefficienti di pressione anche all'interno di fessure più ristrette, salvaguardandone la precisione e l'attendibilità nei confronti del modello benchmark.

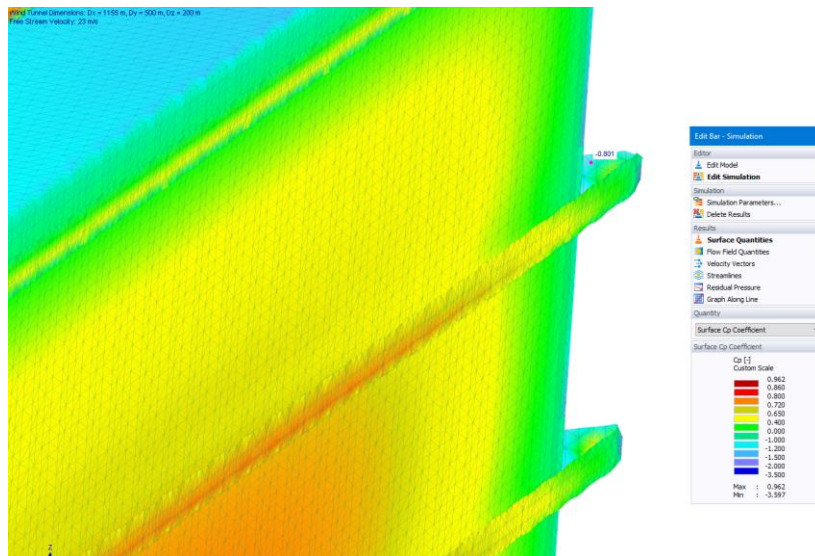


Figura 8—27: Dettaglio del modello dell'analisi CFD

Di seguito sono riportati i diagrammi dei c_p contenenti i valori massimi e minimi, ottenuti sulle zone di bordo del modello CFD, valutando il modello di turbolenza $k-\omega$:

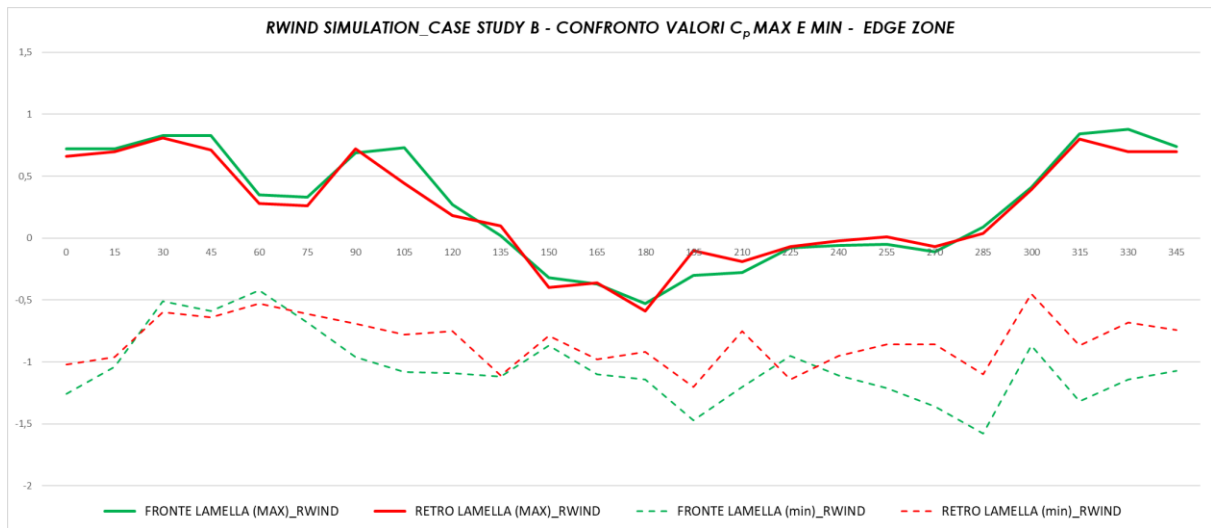


Figura 8—28: Caso studio B— andamento dei C_p (MAX e min) proposti a seguito dell'analisi CFD con RWIND Simulation, sulle regioni di bordo dell'edificio in analisi.

A seguire sono proposti i diagrammi dei c_p contenenti i valori massimi e minimi, ottenuti nella zona centrale del modello CFD, valutando il modello di turbolenza $k-\omega$:

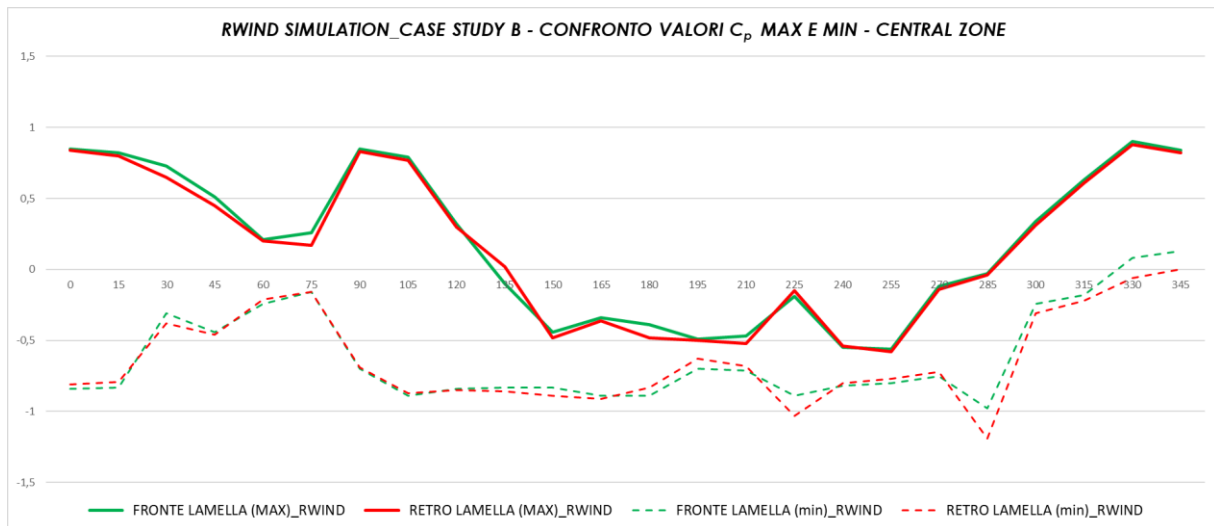


Figura 8—29: Caso studio B— andamento dei C_p (MAX e min) proposti a seguito dell'analisi CFD con RWIND Simulation, sulla regione centrale dell'edificio in analisi.

Allo scopo di favorire un confronto grafico più immediato e diretto, di seguito sono riproposti i grafici raffiguranti l'andamento dei c_p al variare dell'angolo di incidenza dell'azione del vento. Saranno stavolta raffigurati all'interno dello stesso diagramma i

valori di c_p massimi appartenenti sia al modello analizzato in galleria del vento che quelli appartenenti al modello analizzato col software RWIND Simulation:

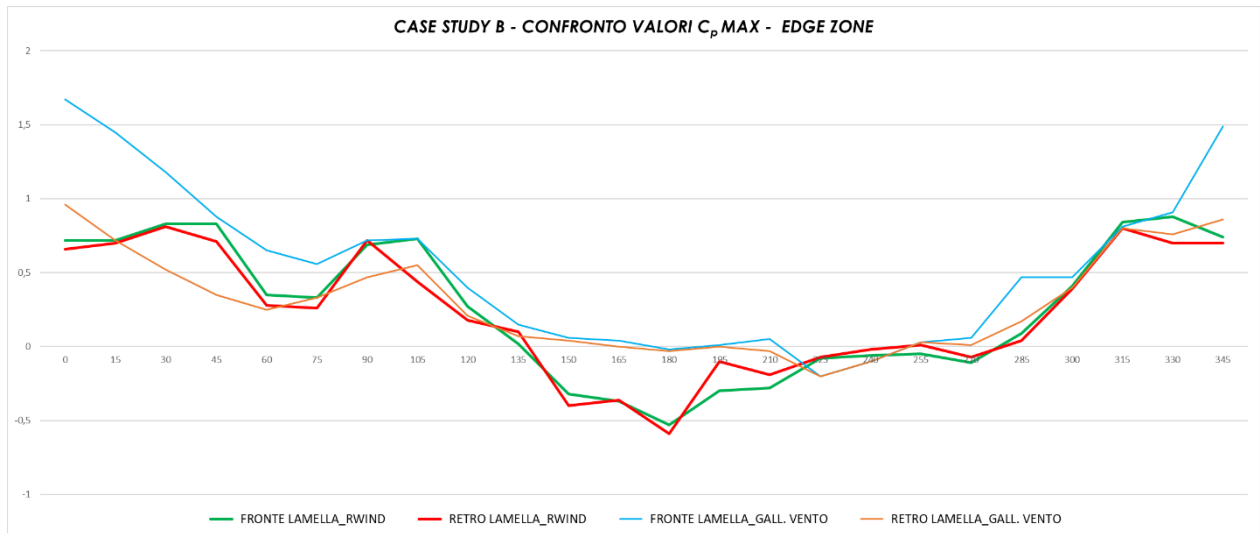


Figura 8—30: Confronto “galleria del vento”/“RWIND”, dei valori di C_p massimi appartenenti alla zona prossima ai bordi;

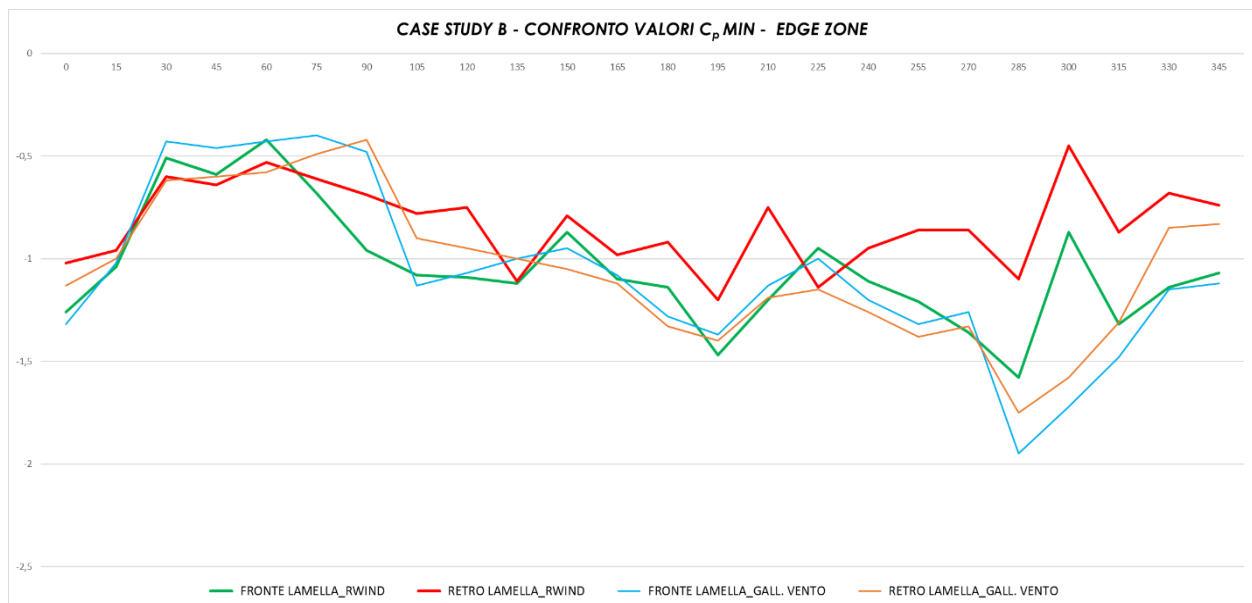


Figura 8—31: Confronto “galleria del vento”/“RWIND”, dei valori di C_p minimi appartenenti alla zona prossima ai bordi;

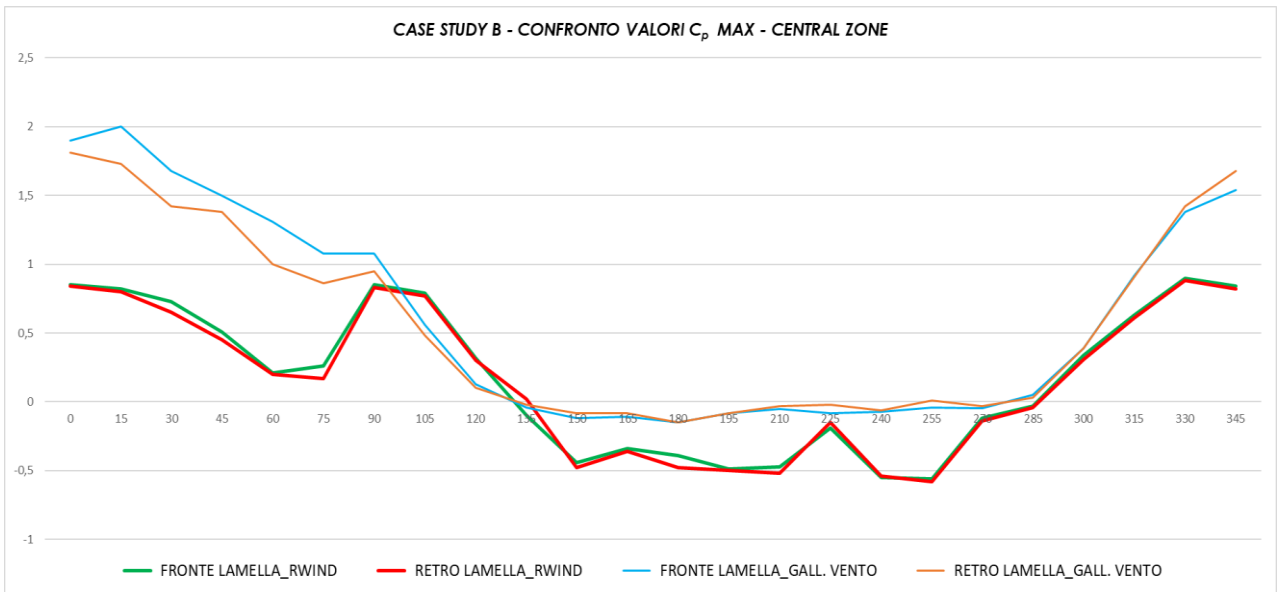


Figura 8—32: Confronto “galleria del vento”/”RWIND”, dei valori di C_p massimi appartenenti alla zona centrale;

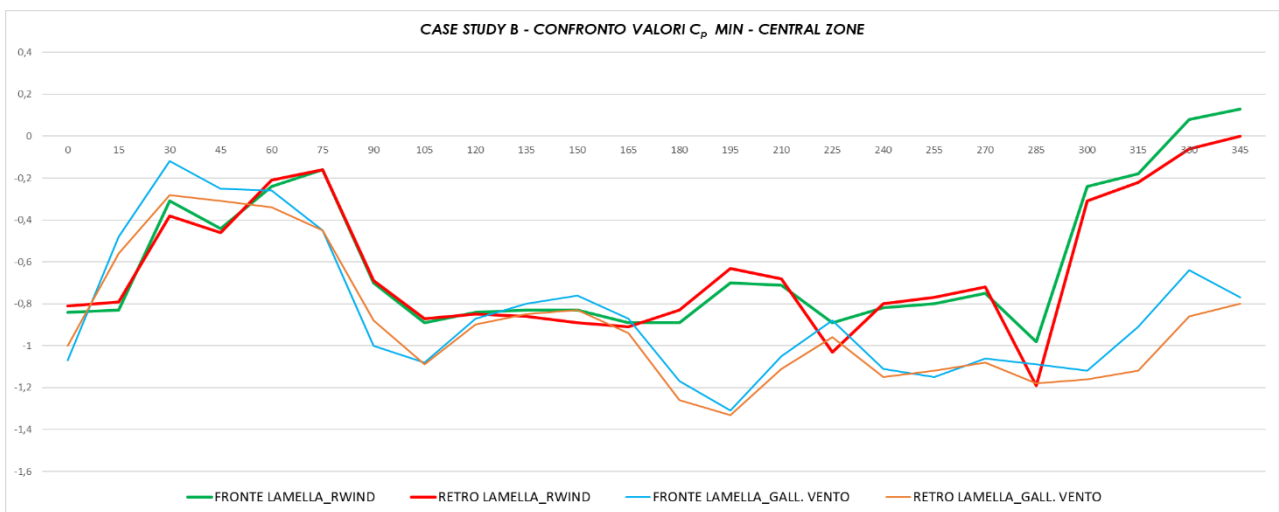


Figura 8—33: Confronto “galleria del vento”/”RWIND”, dei valori di C_p minimi appartenenti alla zona centrale;

8.4.4 Caso studio B – Considerazioni e commenti

I diagrammi qui riportati mostrano come vi sia buona corrispondenza tra i valori di c_p ricavati dall'analisi CFD rispetto a quelli ottenuti dai test in galleria del vento.

Nel diagramma in Fig. 8.30, rappresentante i valori massimi tra i c_p sulle zone laterali, ottenuti dai test in galleria del vento e quelli ottenuti dal software Rwind, si può notare una buonissima corrispondenza tra le curve, ad eccezione di una minima discrepanza nel range degli angoli di esposizione compresi tra gli 0° e i 45° . Seppur ci sia congruenza con la positività dei valori, in tale intervallo i dati della galleria del vento mostrano un c_p di modulo molto superiore a quello unitario, ritenuto un valore limite superiore.

Nel diagramma in Fig.8.32, che riporta il confronto tra i valori massimi tra i c_p (ottenuti dai test in galleria del vento e quelli ottenuti dal software Rwind) ricavati nella zona centrale dell'edificio, pur apprezzando una buona uniformità tra i diagrammi, si nota una differenza di risultati tra gli angoli di esposizione che vanno dai -45° ai $+50^\circ$, ovvero in quell'intervallo di valori che vede la zona centrale di facciata in zona sopravento. Per tali configurazioni entrambi gli studi a confronto riportano un valore positivo massimo, ma quello in galleria del vento arriva a raggiungere un valore di picco compreso tra $1.5 < c_p < 2$, a differenza delle simulazioni CFD che riportano un valore massimo unitario.

All'interno dei diagrammi contenuti in Fig. 8.31 e in Fig. 8.33, che riporta il confronto tra i valori minimi tra i c_p (ottenuti dai test in galleria del vento e quelli ottenuti dal software RWIND) ricavati rispettivamente nelle zone di bordo e nella zona centrale dell'edificio, oltre a confermare la buona corrispondenza tra le traiettorie raffigurate, si sottolinea una discrepanza tra i valori proposti appartenenti all'intervallo che va dai 285° ai 360° , dove quelli di RWIND, non appaiono così bassi come quelli riportati dai test in galleria del vento. Probabilmente in tali configurazioni nei test in galleria potrebbero esserci stati edifici ci contorno che ne hanno fatto aumentare i valori di turbolenza e quindi i valori in depressione registrati.

8.4.5 Caso studio C

Il terzo modello di studio ha analizzato oscuranti con aggetti schermanti verticali costituiti da lamelle verticali, distribuite attorno all'intero edificio. Le caratteristiche geometriche dell'edificio prevedono:

- Altezza: 55 m,
- Lato maggiore: 37 m,
- Lato minore: 35 m;

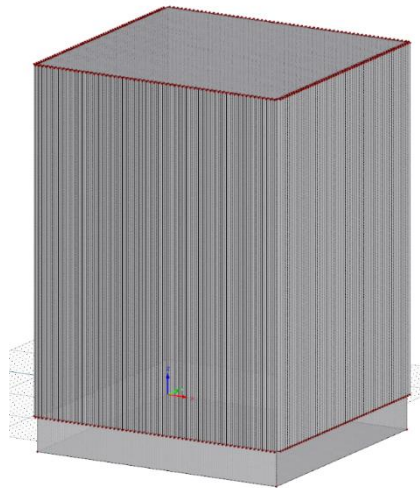


Figura 8—34: Vista assonometrica dell'edificio del caso studio C

Le caratteristiche geometriche degli oscuranti sono:

- Larghezza massima: 500 mm
- Spessore: 40 mm

Il caso analizzato prevede lo studio distinto nel caso in cui le lamelle siano completamente adiacenti alla struttura e nel caso in cui ci sia un offset di 200 mm dall'involucro.

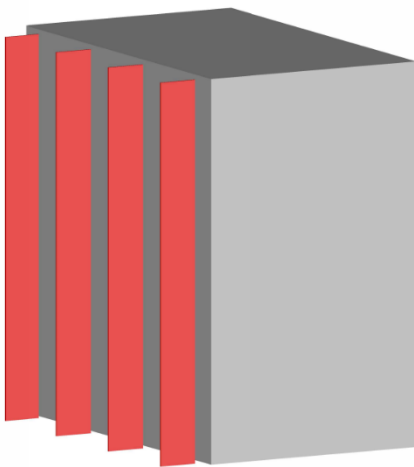


Figura 8—36a: Modello del caso studio C₁ (oscuranti adiacenti alla facciata)

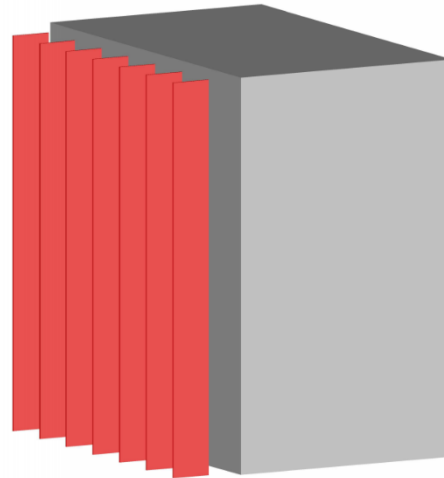


Figura 8—36b: Modello del caso studio C₂ (oscuranti con offset)

Come nei casi precedentemente visti, si è riprodotta attraverso un software di analisi a elementi finiti (RFEM Dlubal) la struttura, la si è poi esportata all'interno del software RWIND Simulation, con cui si è condotta lo studio fluidodinamico. Importato il modello su RWIND, si è partiti con l'impostazione delle condizioni al contorno e dei parametri di simulazione che vanno a variare le caratteristiche del vento in termini di:

- intensità del vento;
- turbolenza;
- densità del fluido;
- viscosità cinematica del fluido;

si vanno a impostare i parametri di calcolo, che vanno a variare:

- la densità e il numero delle mesh;
- il valore di convergenza;
- il numero di iterazioni previste per raggiungerlo;
- modello di turbolenza ($k-\omega$);

A differenza dei casi analizzati in precedenza, l'angolo di incidenza è stato fatto variare di 45° per ognuna delle due configurazioni prese in analisi.

Si sono quindi studiati gli effetti delle pressioni del vento impattanti sull'edificio e sugli oscuranti; nel primo caso con una delle quattro facciate in zona sopravento, in un secondo caso con uno spigolo dell'involucro. Di seguito sono proposte le traiettorie semplificate dei flussi ventosi impattanti. La traiettoria delle azioni del vento seguono l'asse x .

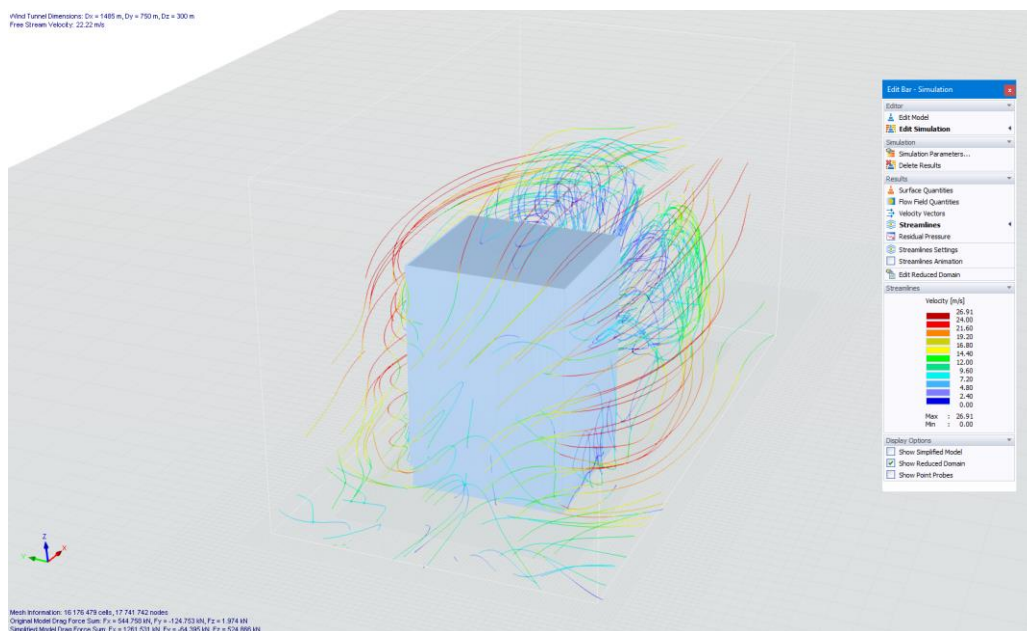


Figura 8—37: Caso studio C1: traiettorie notevoli di flusso ventoso agenti su prospetto ortogonale alla direzione del vento (diretta verso x)

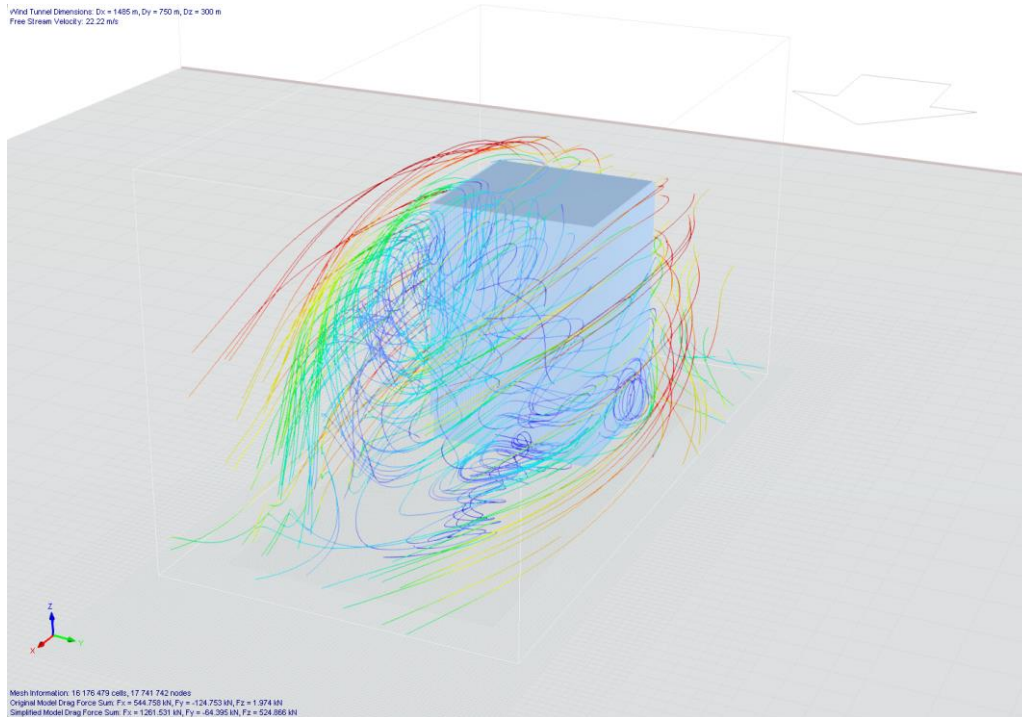


Figura 8—38: Caso studio C₁: traiettorie notevoli di flusso ventoso nella zona sottovento, con relativo effetto scia.

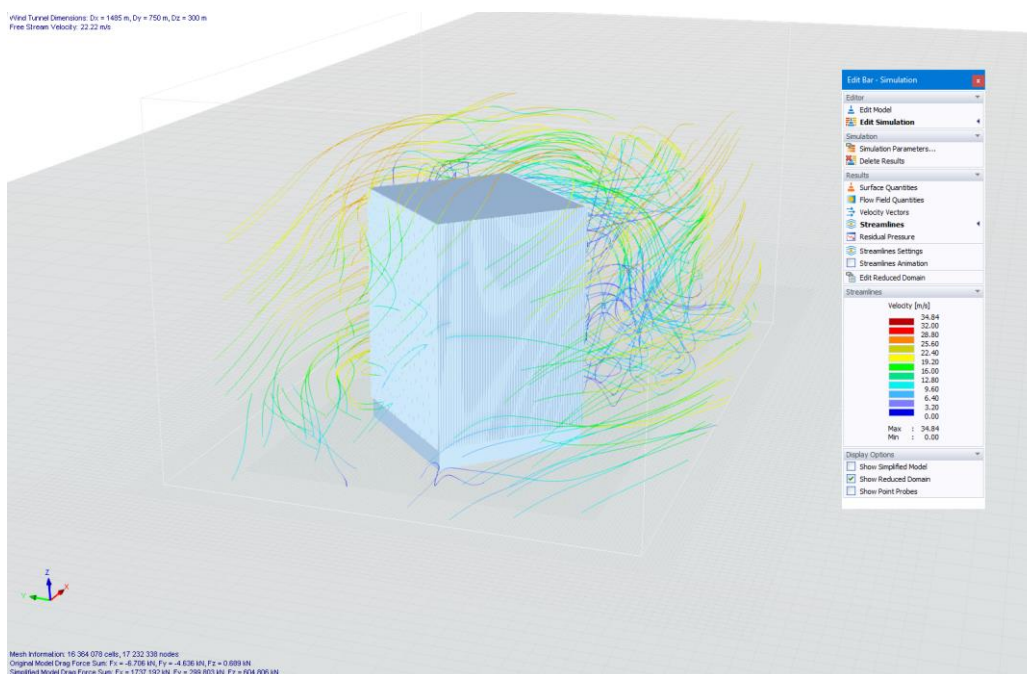


Figura 8—39: Caso studio C₂: traiettorie notevoli di flusso ventoso agenti su prospetto inclinato di 45° rispetto alla direzione del vento (diretta verso x)

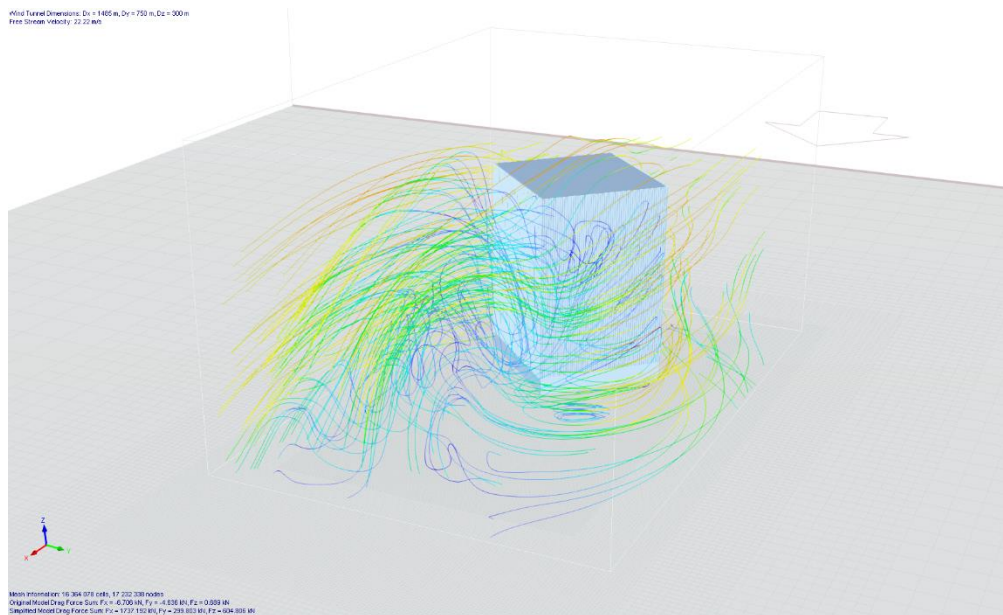


Figura 8—40: Caso studio C2: traiettorie notevoli di flusso ventoso nella zona sottovento, con relativo effetto scia.

8.4.6 Caso studio C – Considerazioni e commenti

In un'analisi iniziale, tale rappresentazione grafica rivendica una sua utilità poiché fornisce una panoramica qualitativa su quelle che saranno le zone (e dunque i relativi elementi oscuranti) che avranno peggiore impatto con il flusso ventoso agente.

A livello grafico, nella Fig. 8.39, si nota come il vento che infrange l'edificio impattando sullo spigolo, in termini di pressione, incida in modo meno rilevante sulle facciate laterali anziché l'involucro la cui facciata sopravento è impattata ortogonalmente dall'azione ventosa.

Con l'utilizzo di RWIND Simulation si è riusciti a quantificare numericamente i coefficienti c_p e a capire quali siano le zone in cui le lamelle soffrano maggiormente le pressioni agenti. Inoltre, tramite il software, è stato possibile valutare e quantificare gli effetti schermanti che gli aggetti frangisole verticali offrono ai frangisole via via retrostanti, in termini di pressione percepita.

A differenza dei precedenti casi studiati, gli articoli di riferimento non hanno fornito valori di coefficienti di pressione al variare dell'angolo di incidenza valutato, ma del *fattore di trasformazione* K_s , meglio descritto nel seguente capitolo.

8.5 Fattore di trasformazione K_s

Sulla base delle categorie di elementi oscuranti definiti e analizzati da (Holmes K. a., 2012), alla luce della corrispondenza dei valori di coefficiente di pressione c_p ricavati dal software CFD, ci è possibile allargare il campo di valutazione affrontando lo studio di valori K_s .

L'articolo descrive le tre tipologie di schermature più diffuse, racchiuse in Fig. 8.41:

- schermature orizzontali paralleli alla facciata (caso A e B);
- aggetti orizzontali (caso C);
- aggetti verticali (caso D e E);

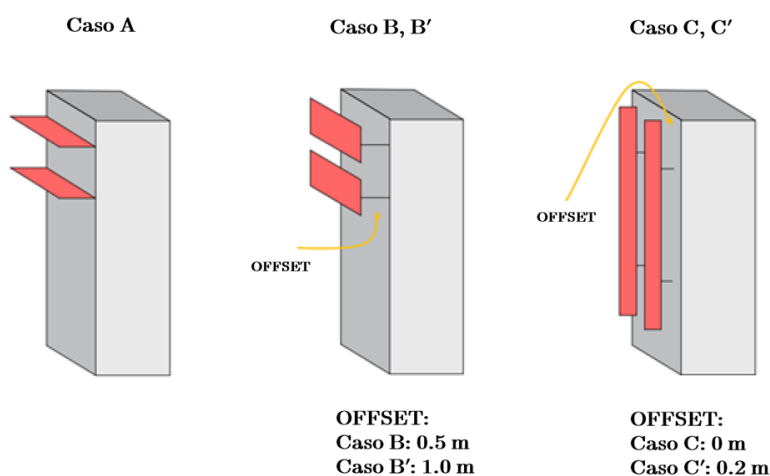


Figura 8—41: Elenco delle tipologie di elementi aggettanti analizzati

Sulla base di test eseguiti in galleria del vento, su edifici di media altezza per l'analisi di elementi aggettanti a superficie continua e senza porosità (generalmente inferiori a 1 metro di profondità) i carichi netti del vento su questi aggetti possono essere stimati dalle pressioni esterne presso la facciata utilizzando i fattori presentati in Tabella 1, in cui il fattore K_s è definito dall'equazione:

$$K_s = \frac{C_{p,n}}{C_{p,est_facade}}$$

In cui, secondo (Holland):

$C_{p,n} = C_{p,A} - C_{p,B}$, dove $C_{p,A}$ è il coefficiente di pressione sopravento (frontale o superiore) della lamella oscurante e $C_{p,B}$ ne è il coefficiente di pressione sottovento (retrostante o inferiore).

Fattore di trasformazione, K_s

Caso	Zone laterali	Zone centrali
A	0.8	0.6
B	1.2	1.1
C	1.3	1.4
D	1.5	0.7
E	1.3	0.7

Tabella 1: Valori di fattore di trasformazione K_s raccomandati

8.6 Elaborazioni CFD – Fattore di trasformazione K_s

Allo scopo di convalida del sistema di calcolo fluidodinamico computazionale adottato, si procede con un'ulteriore fase di confronto valutando i Fattori di trasformazione K_s , proposti da (Code of Practice on Wind Effect in Hong Kong, 2019).

Dopo la valutazione di tali coefficienti si è andati a ricavare nuovi fattori tramite elaborazioni su RWIND, relativi all'analisi dei casi studio A, B e C appena descritti.

8.6.1 Fattore K_s – Analisi Caso studio A

	MAXIMUM ABSOLUTE PEAK COEFFICIENT (C_p)		
	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s
TOP REGION			
Edge	± 1.06	± 0.76	0.72
Centre	± 0.84	± 0.83	0.99
MID REGION			
Edge	± 1.22	± 0.83	0.69
Centre	± 0.81	± 0.57	0.70
LOW REGION			
Edge	± 0.74	± 0.93	1.27
Centre	± 0.57	± 0.80	1.40

Tabella 2: Caso studio A: valori di C_p e K_s , reperiti da analisi in galleria del vento

$$\text{Dove } K_s = \frac{C_{p,n}}{C_{p,est_façade}}$$

	MAXIMUM ABSOLUTE PEAK COEFFICIENT (C_p)		
	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s
TOP REGION			
Edge	± 0.92	± 0.68	0.74
Centre	± 0.82	± 0.79	0.96
MID REGION			
Edge	± 1.05	± 0.77	0.73
Centre	± 0.84	± 0.63	0.75
LOW REGION			
Edge	± 0.77	± 0.89	1.16
Centre	± 0.57	± 0.76	1.33

Tabella 3: Caso studio A: valori di C_p e K_s , ricavati da analisi CFD

8.6.2 Fattore K_s – Analisi Caso studio B

	MAXIMUM PEAK COEFFICIENT (C_p)			MINIMUM PEAK COEFFICIENT (C_p)		
	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s
TOP REGION						
Left edge	+0.73	+ 0.56	0.76	-0.86	-0.33	0.39
Centre	+0.85	+ 0.44	0.51	-0.60	-0.35	0.58
Right edge	+0.9	+ 0.55	0.61	-0.87	-0.49	0.57
MID REGION						
Left edge	+0.82	+0.49	0.59	-0.75	-0.34	0.46
Centre	+0.86	+0.39	0.46	-0.59	-0.35	0.59
Right edge	+0.43	+0.46	1.07	-0.62	-0.31	0.50
LOW REGION						
Left edge	+0.79	+0.49	0.62	-0.71	-0.31	0.44
Centre	+0.76	+0.33	0.43	-0.54	-0.3	0.56
Right edge	+0.4	+0.44	1.10	-0.62	-0.28	0.46

Tabella 4: Caso studio B: valori di C_p e K_s , reperiti da analisi in galleria del vento

	MAXIMUM PEAK COEFFICIENT (C_p)			MINIMUM PEAK COEFFICIENT (C_p)		
	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s
TOP REGION						
Left edge	+0.71	+ 0.51	0.72	-0.9	-0.36	0.39
Centre	+0.79	+ 0.43	0.54	-0.63	-0.35	0.56
Right edge	+0.84	+ 0.55	0.65	-0.71	-0.34	0.48
MID REGION						
Left edge	+0.83	+0.43	0.51	-0.74	-0.36	0.49
Centre	+0.84	+0.34	0.40	-0.57	-0.31	0.54
Right edge	+0.50	+0.47	0.94	-0.66	-0.34	0.52
LOW REGION						
Left edge	+0.81	+0.46	0.56	-0.73	-0.36	0.49
Centre	+0.80	+0.40	0.5	-0.49	-0.23	0.47
Right edge	+0.51	+0.49	0.96	-0.59	-0.26	0.44

Tabella 5: Caso studio B: valori di C_p e K_s , ricavati da analisi CFD

8.6.3 Fattore K_s – Analisi Caso studio C

	ABSOLUTE MAXIMUM PEAK COEFFICIENT	
	CONFIGURATION 1 (without offset)	CONFIGURATION 2 (with offset)
	K_s	K_s
TOP REGION		
Edge	0.45	1.33
Middle	0.64	0.72
MID REGION		
Edge	1.26	1.33
Middle	0.34	0.38
LOW REGION		
Edge	1.51	1.21
Middle	0.64	0.43

Tabella 6: Caso studio C: valori di C_p e K_s , reperiti da analisi in galleria del vento

	ABSOLUTE MAXIMUM PEAK COEFFICIENT					
	CONFIGURATION 1 (without offset)			CONFIGURATION 2 (wit offset)		
	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s
TOP REGION						
Left edge	0.65	0.32	0.49	0.72	0.95	1.32
Centre	0.56	0.36	0.64	0.62	0.46	0.74
MID REGION						
Left edge	0.75	1.4	1.29	0.71	0.95	1.33
Centre	0.67	0.26	0.38	0.61	0.23	0.38
LOW REGION						
Left edge	0.43	0.64	1.49	0.46	0.59	1.28
Centre	0.4	0.25	0.64	0.38	0.18	0.47

Tabella 7: Caso studio C: valori di C_p e K_s , ricavati da analisi CFD

9 Analisi del fattore di trasformazione K_s , valutato su edifici elevati con angolo curvilineo sottovento

Sulla base della congruenza fra i valori di coefficienti di pressione pervenuti dall'analisi benchmark conclusa, si può procedere con lo studio di tali coefficienti su edifici a pianta circolare. Considerando che non esistono linee guida che offrano metodi per la valutazione di situazioni simili, l'adozione della metodologia fluidodinamica computazionale può offrire risposte e coefficienti c_p validi, soprattutto in fase di predimensionamento di elementi aggettanti su facciata.

9.1 Modello 1: Edificio circolare con oscuranti a lamelle orizzontali

Il modello di studio ha analizzato gli effetti in facciata di oscuranti con schermi verticali costituiti da lamelle orizzontali, distribuite attorno all'intero edificio. Le caratteristiche geometriche dell'edificio prevedono:

- Altezza: 100 m,
- Diametro: 40 m,

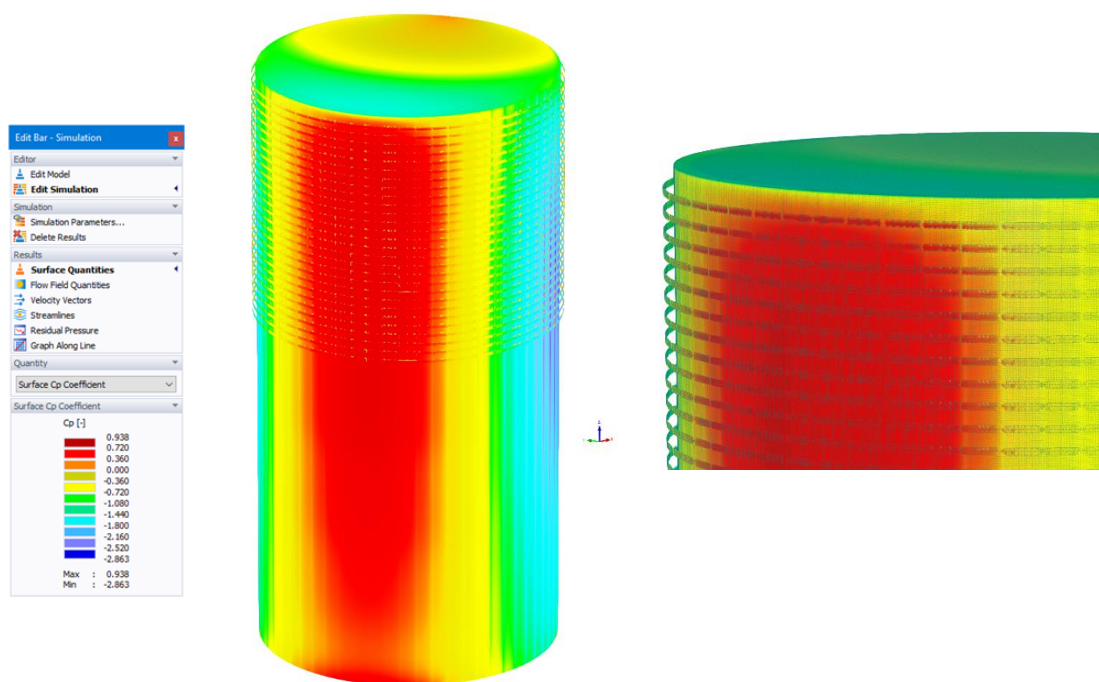


Figura 9—1: Assonometria e dettaglio assonometrico di un edificio a pianta circolare, studiato tramite analisi CFD.

Poiché un'analisi computazionale di elementi aggettanti che avesse interessato l'edificio lungo tutta la sua altezza sarebbe stata molto onerosa, dato dalla presenza di elementi

oscuranti fitti e lungo tutta l'ampia facciata, per non aggravare il calcolo sono stati analizzati i frangisole presenti sulla metà superiore dell'involucro, quella solitamente meno protetta dal contesto urbano circostante e colpita da raffiche ventose che hanno maggiore impatto e velocità.

Le caratteristiche geometriche degli oscuranti sono:

- Altezza lamella: 200 mm
- Spessore lamella: 40 mm
- Offset dalla superficie: 500 mm
- Distanza verticale oscuranti: 1.3 m

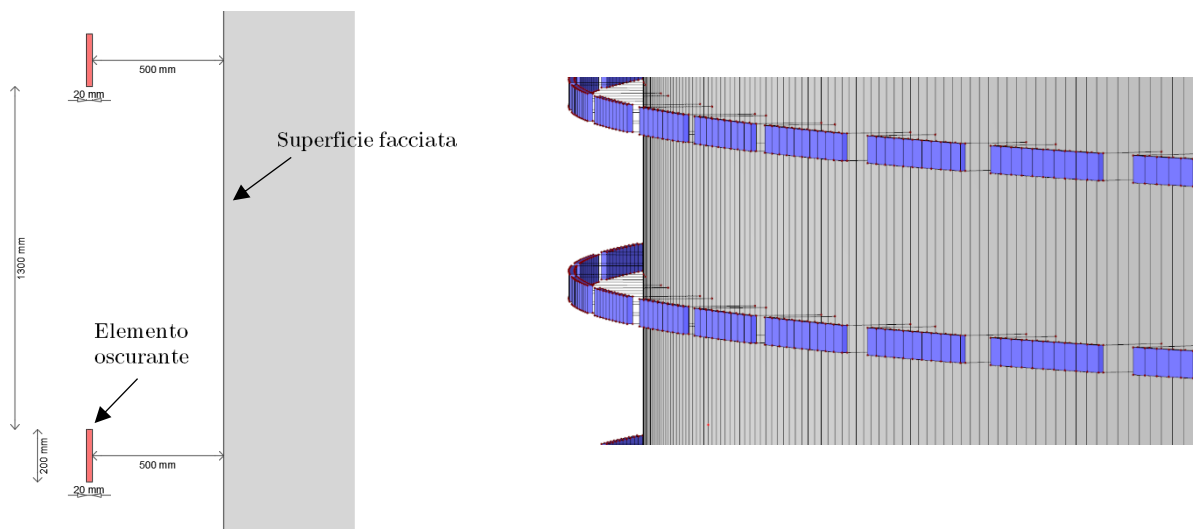


Figura 9—2: Caratteristiche geometriche degli elementi oscuranti appartenenti al Modello 1

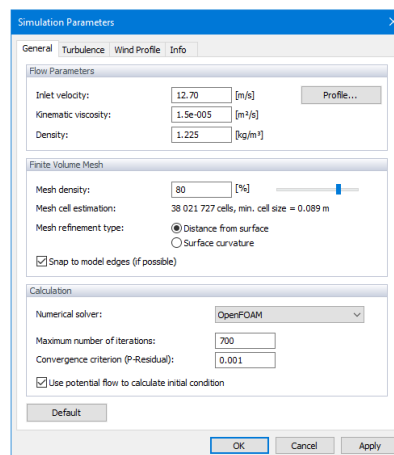


Figura 9—3: Parametri di simulazione e dettagli adottati

In virtù degli spazi fitti con cui è stata svolta l'analisi, non si sarebbero avuti risultati validi senza un dettaglio di mesh create elevato, sia sulla zona wall che nello spazio tridimensionale della galleria del vento virtuale.

Di seguito sono riportati i prospetti in zona sopravvento (Fig.9.4 a), sottovento (Fig. 9.4 b) e su una facciata laterale (Fig. 9.4 c)

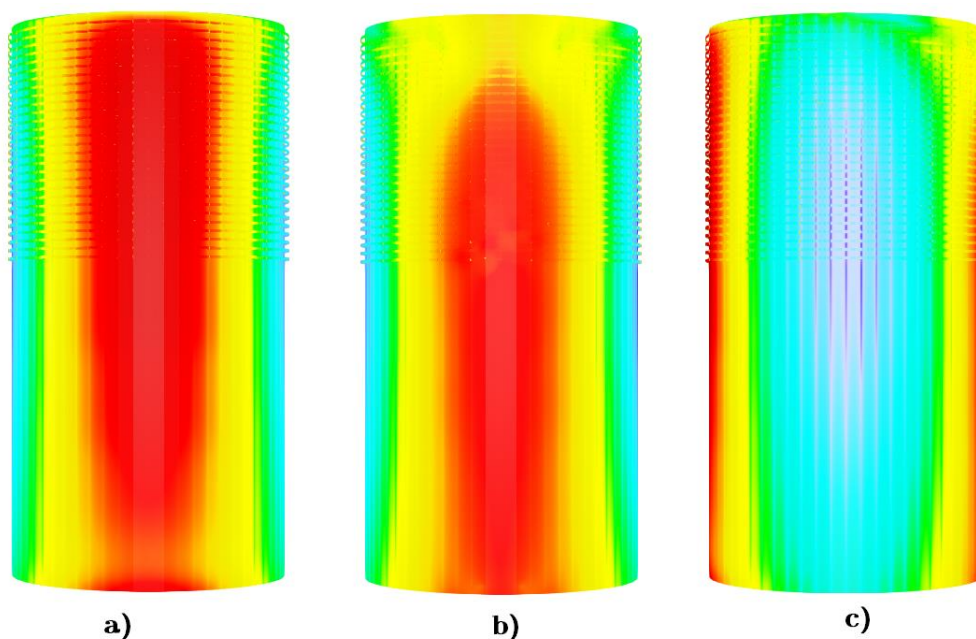


Figura 9—4: Rappresentazione delle diverse configurazioni dell'edificio

A conclusione delle analisi CFD sono stati ricavati i coefficienti di pressione in base ai quali sono stati indicati i fattori di trasformazione K_s

	MAXIMUM PEAK COEFFICIENT (C_p)			MINIMUM PEAK COEFFICIENT (C_p)		
	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s
TOP REGION						
Left edge	-1.33	1.08	-0.81	-1.4	0.32	-0.22
Centre	0.91	0.82	0.90	0.39	0.89	2.28
MID REGION						
Left edge	-1.8	1.13	-0.63	-1.4	1	-0.71
Centre	0.87	0.66	0.86	0.46	0.75	1.63

Tabella 8: Valori di C_p e K_s (relativi al Modello 1), ricavati da analisi CFD

9.2 Modello 2: Edificio circolare con elementi aggettanti verticali adiacenti alla struttura

Il modello di studio ha analizzato gli effetti in facciata di elementi aggettanti verticali, distribuiti attorno all'intero edificio. Le caratteristiche geometriche dell'edificio prevedono:

- Altezza: 100 m,
- Diametro: 40 m

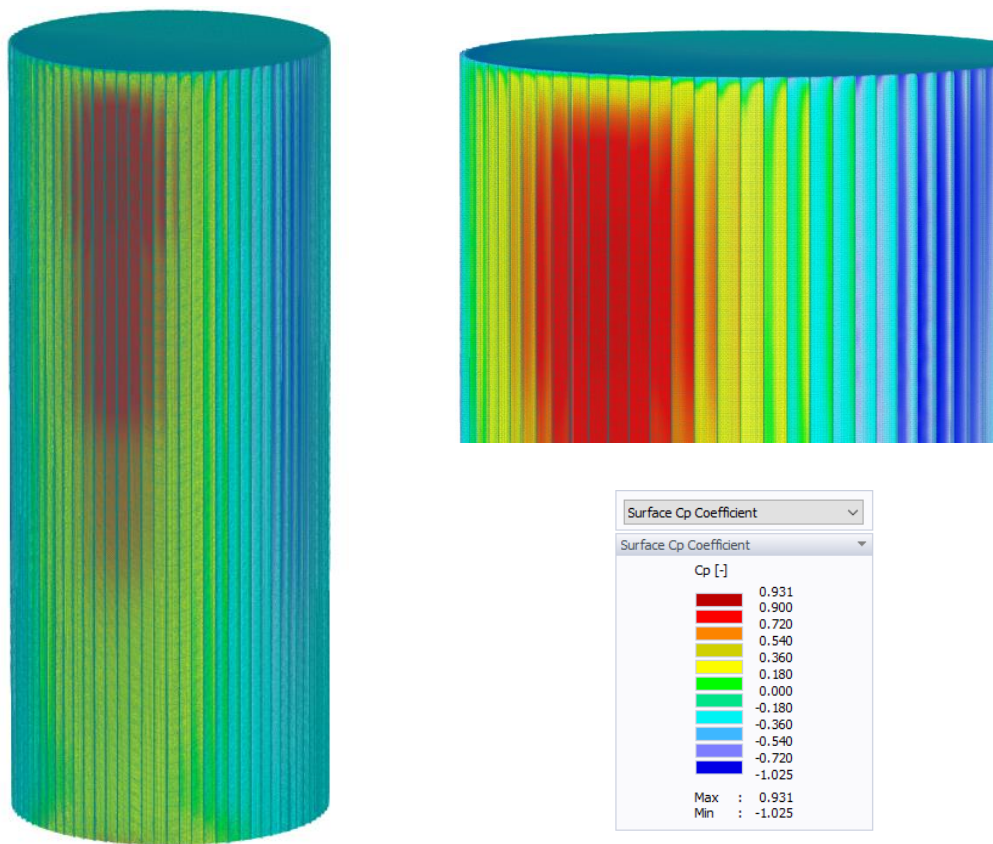


Figura 9—5: Assonometria e dettaglio assometrico di un edificio a pianta circolare, studiato tramite analisi CFD.

Le caratteristiche geometriche degli oscuranti verticali sono:

- Larghezza elemento aggettante lamella: 500 mm
- Spessore lamella: 40 mm
- Distanza tra gli aggetti: 1500 mm

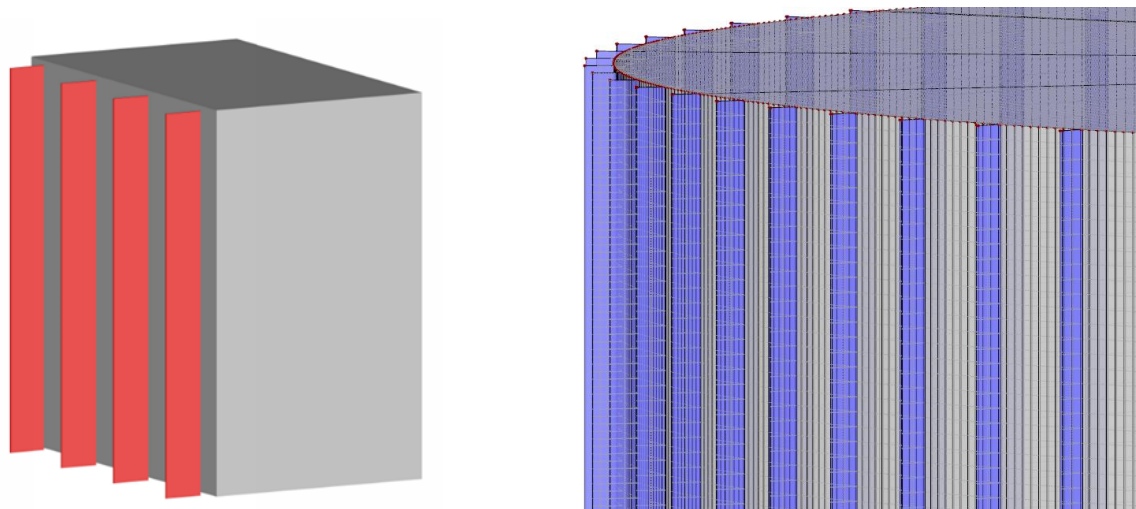


Figura 9—6: Schema degli aggetti verticali (a) e modellazione su RFEM dei frangisole applicati in facciata sul Modello 2 (b)

Sulla base di tali parametri geometrici strutturali e degli aggetti di modellazione, è stata condotta l'analisi fluidodinamica computazionale. Durante lo studio si è arrivati a valutare qualitativamente e a quantificare l'andamento delle pressioni lungo le superfici di facciata e gli elementi in aggetto. Tramite i coefficienti di pressione ricavati, si è riusciti a capire quanto gli elementi aggettanti più vicini alla facciata sopravvento riescano a fungere da schermo dalle azioni del vento, nei confronti sia delle schermature che delle porzioni di facciata retrostanti. L'andamento dei relativi coefficienti c_p è stato utile per ricreare una tabella di fattori moltiplicatori di elementi aggettanti, come nei casi studio affrontati finora.

	MAXIMUM PEAK COEFFICIENT (C_p)			MINIMUM PEAK COEFFICIENT (C_p)		
	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s
TOP REGION						
Left edge	-0.82	1.16	-1.41	-0.4	0.12	-0.3
Centre	0.89	0.99	1.11	-0.36	-0.08	0.22
MID REGION						
Left edge	-0.84	1.3	-1.54	-0.56	0.18	-0.32
Centre	0.84	0.96	1.14	-0.45	0.17	-0.38
LOW REGION						
Left edge	-0.91	1.11	-1.22	-0.19	0.49	-0.73
Centre	0.54	0.71	1.31	-0.27	0.31	-1.19

Tabella 9: Valori di C_p e K_s (relativi al Modello 2), ricavati da analisi CFD

10 Analisi dei c_p su edifici di elevate dimensioni a pianta con zona curvilinea

Analizzando l'edificio a pianta circolare per valutare gli effetti del vento sulle pinne esterne in un caso di tale geometria, ci si è resi conto che, elementi oscuranti a parte, l'interazione del vento con edifici o corpi di forma cilindrica è molto sviluppata in letteratura e nelle normative di settore. Al contrario, nulla è disponibile per edifici che abbiano solo una parte curva ed il resto con pareti piane e ad angolo retto, nonostante questo tipo di geometria "mista" sia molto frequente nell'architettura moderna.

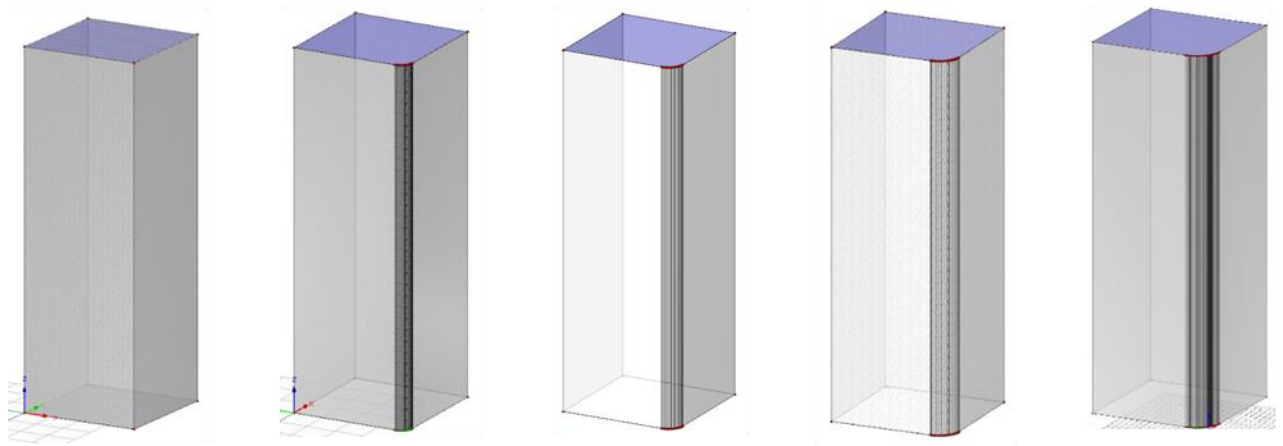
Si è quindi pensato d'indagare questo tipo di situazione, come possibile contributo allo sviluppo futuro di regole e linee guida per la progettazione di facciate installate su edifici di tale forma.

L'edificio oggetto di analisi prevede una pianta inizialmente a base quadrata, con $L = 40$ m e di altezza $H = 120$ m.

Sulla base di queste caratteristiche geometriche, si è pensato di variare la conformazione in pianta creando, in zona sottovento, un angolo smussato, che prevedesse una traiettoria curvilinea con raggio di curvatura via via crescente. Si è seguito lo schema seguente, procedendo per incrementi successivi col rapporto tra raggio di curvatura R e lato della parete piana L dell'edificio:

- Caso 0: Struttura a spigoli vivi;
- Caso A: Rapporto tra Lato e Raggio di curvatura: $R = 1/10 L$
- Caso B: Rapporto tra Lato e Raggio di curvatura: $R = 1/8 L$
- Caso C: Rapporto tra Lato e Raggio di curvatura: $R = 1/6 L$
- Caso D: Rapporto tra Lato e Raggio di curvatura: $R = 1/5 L$
- Caso E: Rapporto tra Lato e Raggio di curvatura: $R = 1/4 L$
- Caso F: Rapporto tra Lato e Raggio di curvatura: $R = 1/3 L$
- Caso G: Rapporto tra Lato e Raggio di curvatura: $R = 1/2 L$
- Caso H: Rapporto tra Lato e Raggio di curvatura: $R = L$

La Fig. 10.1 seguente propone una più accurata spiegazione sulla geometria delle configurazioni analizzate.



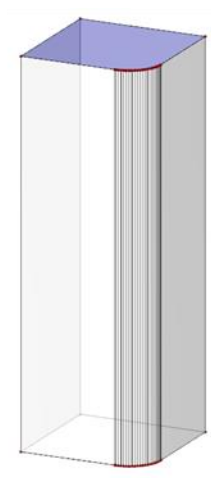
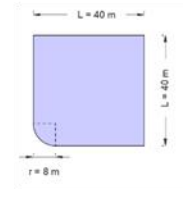
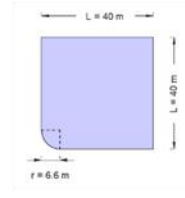
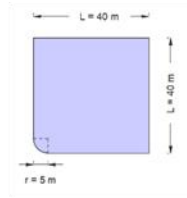
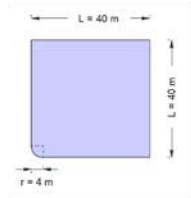
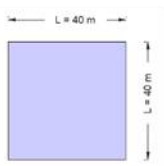
Caso 0

Caso A

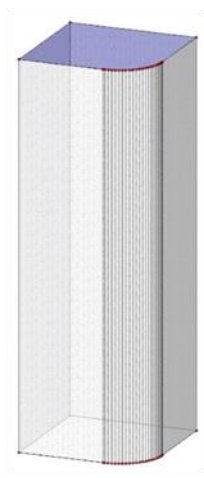
Caso B

Caso C

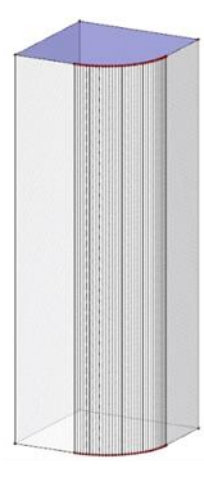
Caso D



Caso E



Caso F



Caso G



Caso H

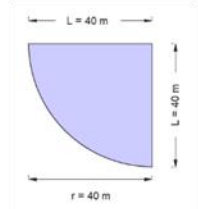
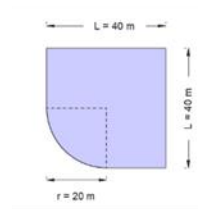
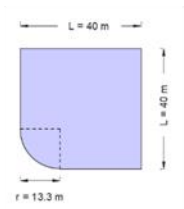
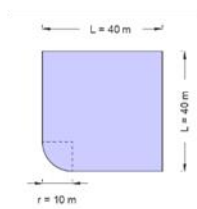


Figura 10—1: Piante e vista assometriche dei differenti modelli di edifici studiati

L'analisi fluidodinamica e lo studio dell'interazione delle azioni del vento a ridosso di questi edifici, aventi tra loro una diversa configurazione geometrica in pianta, è partita da una modellazione della struttura tramite software a elementi finiti RFEM, e successivamente è stato esportato sul software CFD. Il modello base ha una forma prismatica rettangolare con dimensioni 40 m (x) per 40 m (y) per 120 m (z) di altezza. I successivi modelli analizzati hanno variato le dimensioni di due facciate laterali, che si ridurranno all'aumentare del raggio di curvatura dello spigolo modificato.

Il flusso è descritto in un sistema di coordinate cartesiane (x, y, z), in cui l'asse x è allineato con la direzione del flusso.

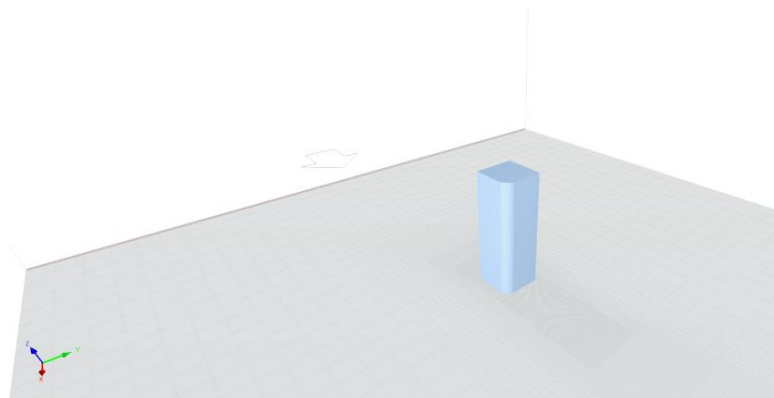


Figura 10—2: Modello di analisi inserito nella galleria del vento virtuale. Si noti la posizione in zona sottovento dell'angolo curvilineo

L'azione del flusso ventoso ha impattato la struttura seguendo la configurazione proposta nella Fig. 10.2, ovvero sulla facciata opposta all'angolo reso curvilineo, in modo da valutare su quest'ultimo gli effetti in depressione dei coefficienti c_p .

Le dimensioni del dominio computazionale, le condizioni al contorno e le configurazioni della galleria del vento sono state riprodotte analogamente a quanto descritto nel capitolo 9.1 e 9.2. Si presume che i limiti superiori e laterali abbiano un gradiente di velocità zero e si applicano condizioni al contorno simmetriche.

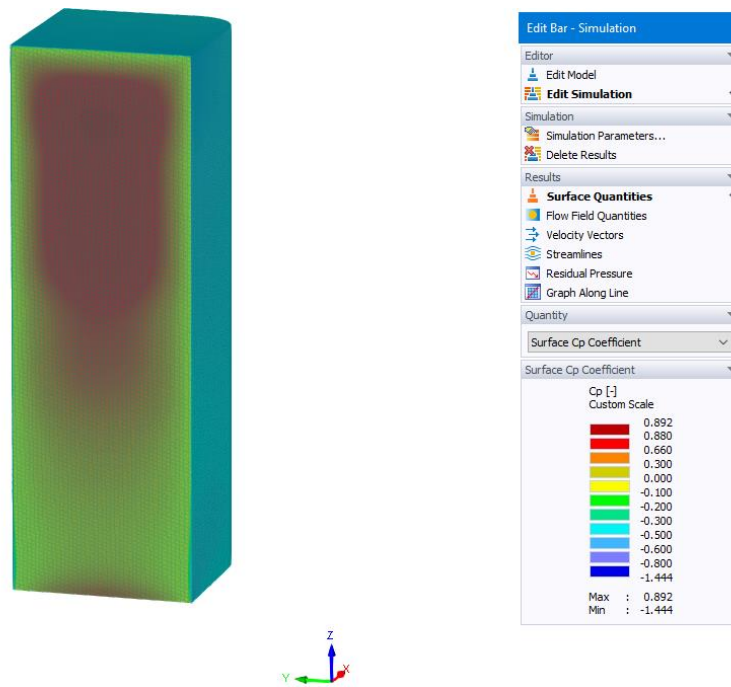


Figura 10—3: Distribuzione dei coefficienti C_p agenti sulla facciata sopravento.

A conclusione dell'analisi fluidodinamica tramite RWIND Simulation, condotta su ognuno dei nove modelli previsti, si è andati a valutare la variazione del coefficiente di pressione c_p lungo il perimetro dell'intero edificio e nell'intorno dello spigolo reso curvilineo: oggetto principale delle osservazioni condotte.

In prima analisi si sono ricavati e tabellati i valori di c_p appartenenti al segmento AB in Figura 10.4c, che va a intersecare la zona curvilinea nel suo punto medio (Fig.10.4 b). I valori di coefficiente di pressione, sono stati valutati lungo l'intera altezza della facciata, dal punto A ($z = 0$ m) al punto B ($z=120$), come raffigurato in Fig. 10.4 c.

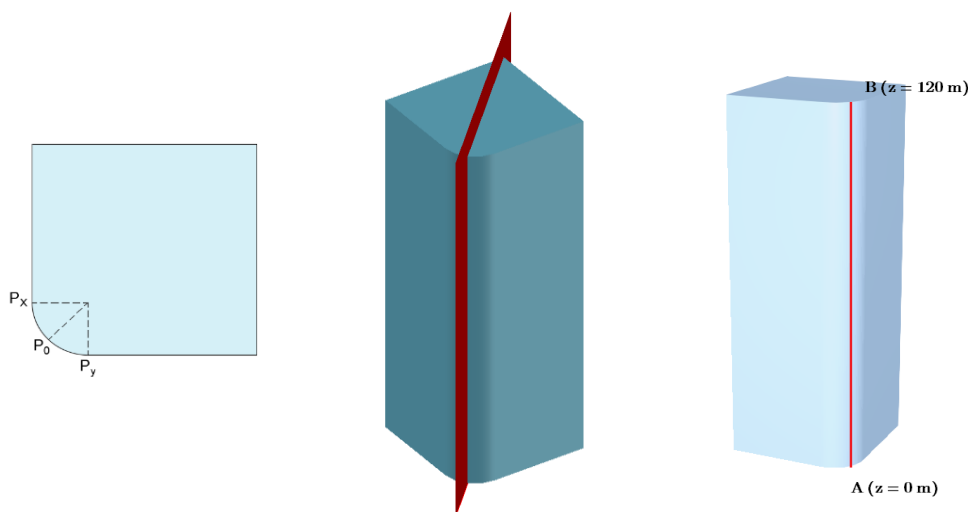


Figura 10—4: a) pianta dell'edificio contenente le coordinate dei punti su cui sono stati valutati i C_p lungo l'altezza del modello. b) piano di taglio su cui sono stati valutati i coefficienti in funzione della quota

I diversi coefficienti sono stati diagrammati seguendo una valutazione con step di quota $\Delta z=1$ m. All'interno del grafico in Fig.10.5, lungo le ordinate sono indicati i valori di c_p , variabili a seconda della quota z , definita lungo l'asse delle ascisse.

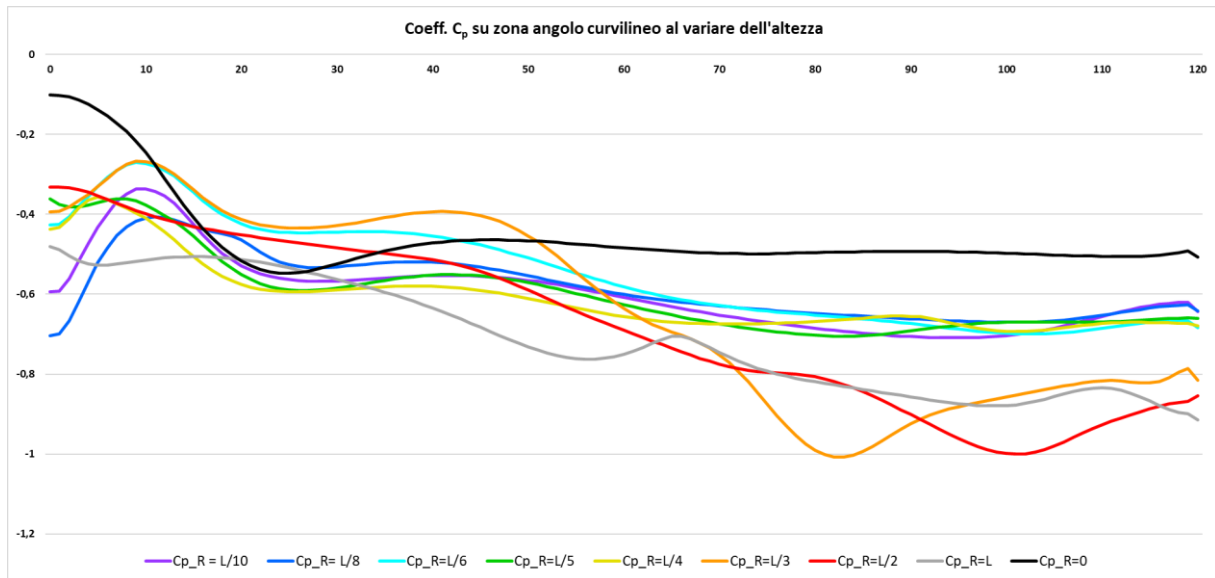


Figura 10—5: Diagramma dei coefficienti C_p valutati in funzione dell'altezza

Si è analizzata singolarmente ogni curva di variazione di coefficienti, appartenente ad ognuno dei nove modelli oggetti di studio. Per ognuna delle curve di variazione di pressione rispetto a z , è stata aggiunta la curva di regressione, da cui di è ricavata una linea di tendenza polinomiale che meglio ne approssimasse l'andamento rispetto a z .

Una volta calcolati i parametri della curva di regressione è stato utile verificare quanto la retta (quindi i valori teorici ottenuti da essa) si accostasse ai valori ottenuti, quindi quanto il modello teorico si accosti ai valori ottenuti dal software CFD.

Un indice, tra i vari, di accostamento esistenti è l'indice di determinazione R^2 , che è dato da:

$$R^2 = 1 - \frac{DevE}{DevT}$$

R^2 indica quanta parte della devianza totale è spiegata dalla deviazione di regressione.

L'indice varia da $0 \leq R^2 \leq 1$.

- $R^2 = 0$, $DevE = DevT$: indica che vi è indipendenza lineare e un cattivo accostamento tra i valori teorici e quelli sperimentali
- $R^2 = 1$, $DevE = 0$: conferma una massima dipendenza tra la curva teorica e quella di riferimento, ovvero tutte le osservazioni effettuate giacciono sulla retta di regressione: vi è una relazione funzionale tra le curve.

Dove:

- $DevE$: devianza dell'errore, devianza degli scarti tra valori empirici e valori teorici;
- $DevT$: devianza totale, variabilità totale dei valori empirici intorno alla media;

Di seguito sono proposte singolarmente le curve dei coefficienti di pressione per ogni modello studiato (presenti nel loro insieme in Fig.10.5), a cui è affiancata la curva di tendenza polinomiale, la cui affidabilità e dipendenza sono quantificabili tramite valore di determinazione R^2 , riportato su ogni grafico.

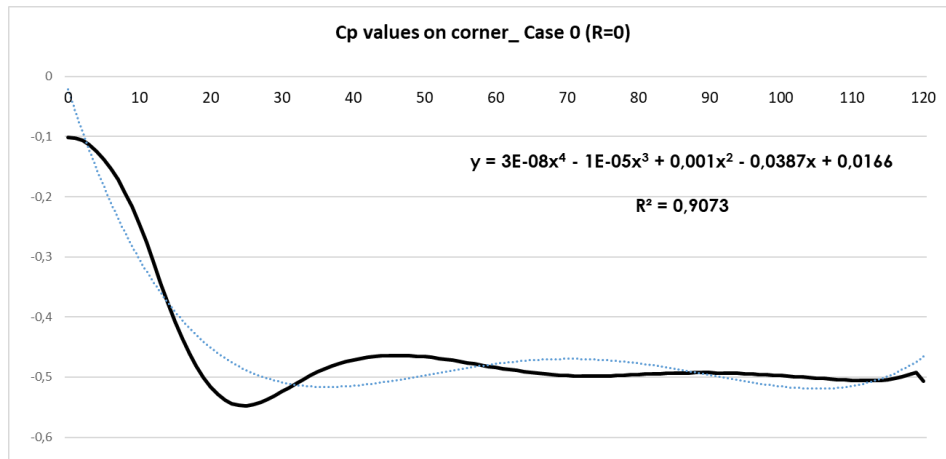


Figura 10—6: Caso 0: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo

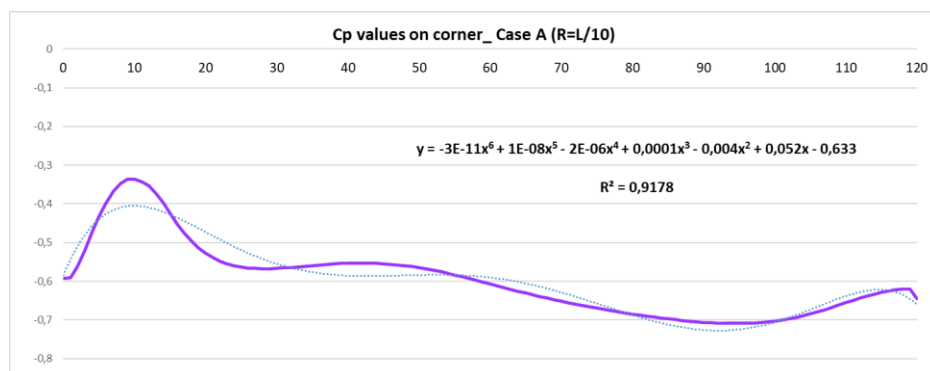


Figura 10—7: Caso A: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo

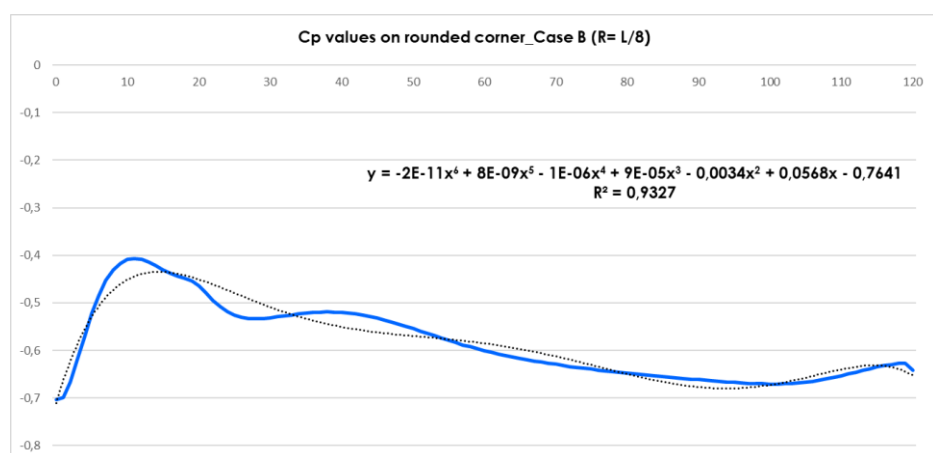


Figura 10—8: Caso B: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo

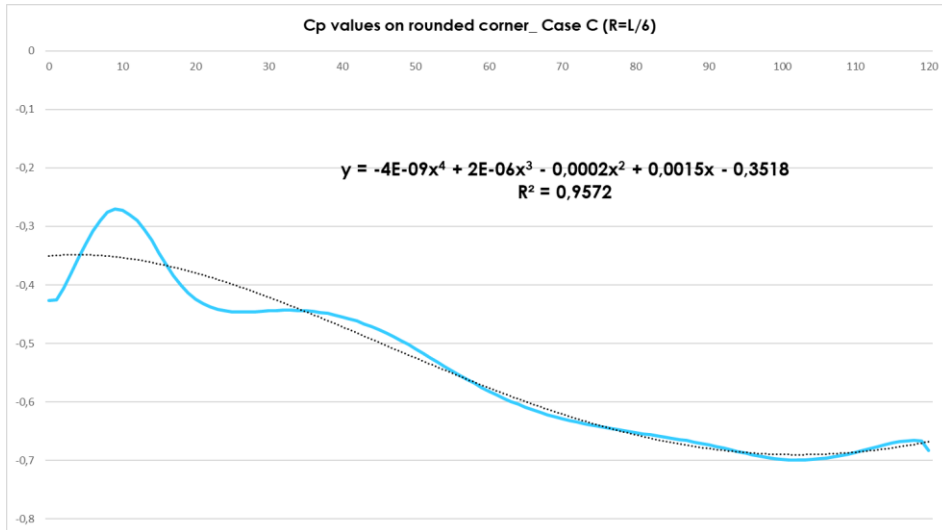


Figura 10—9: Caso C: diagramma dei coefficienti Cp valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo

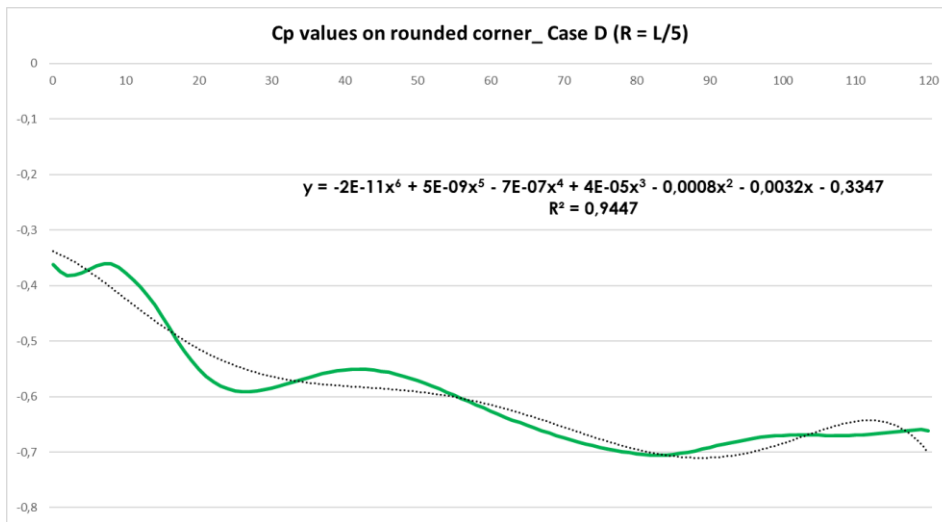


Figura 10—10: Caso D: diagramma dei coefficienti Cp valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo

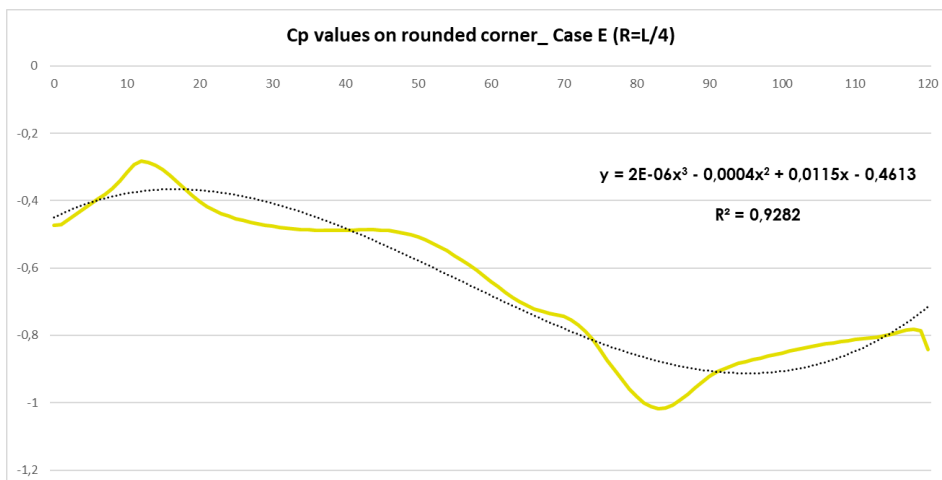


Figura 10—11: Caso E: diagramma dei coefficienti Cp valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo

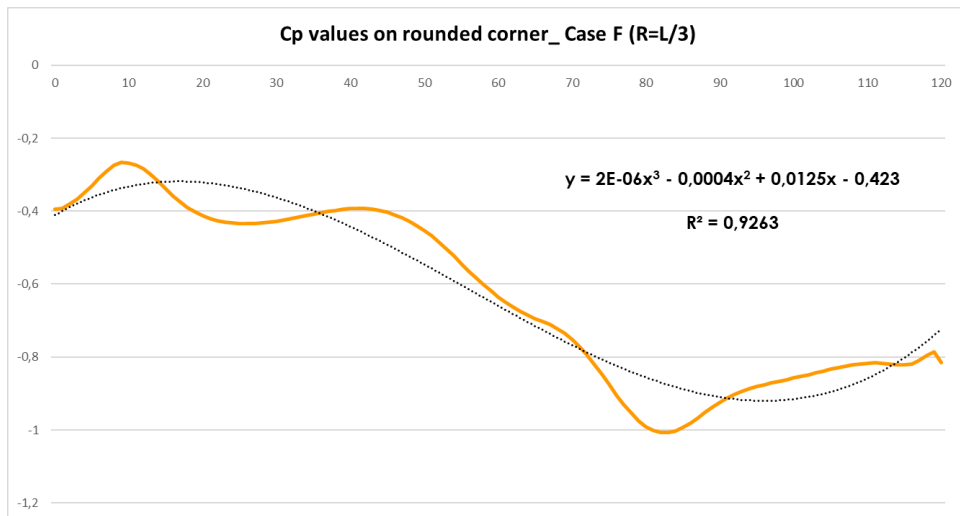


Figura 10—12: Caso F: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo

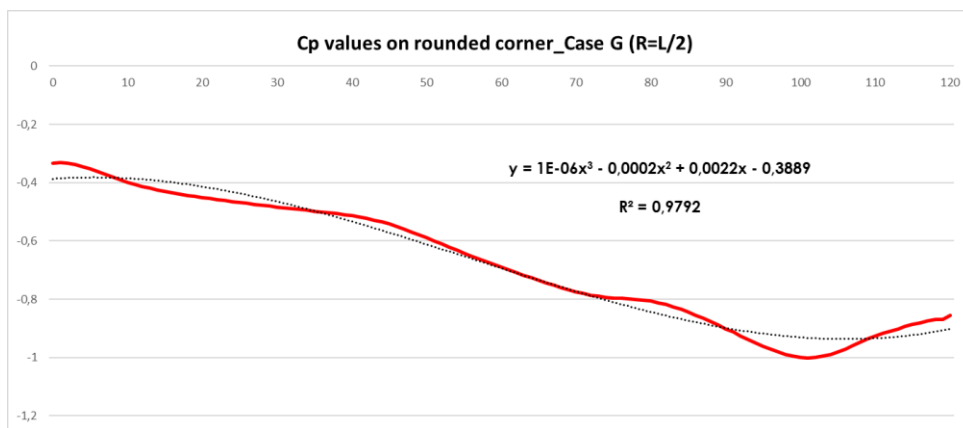


Figura 10—13: Caso G: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo

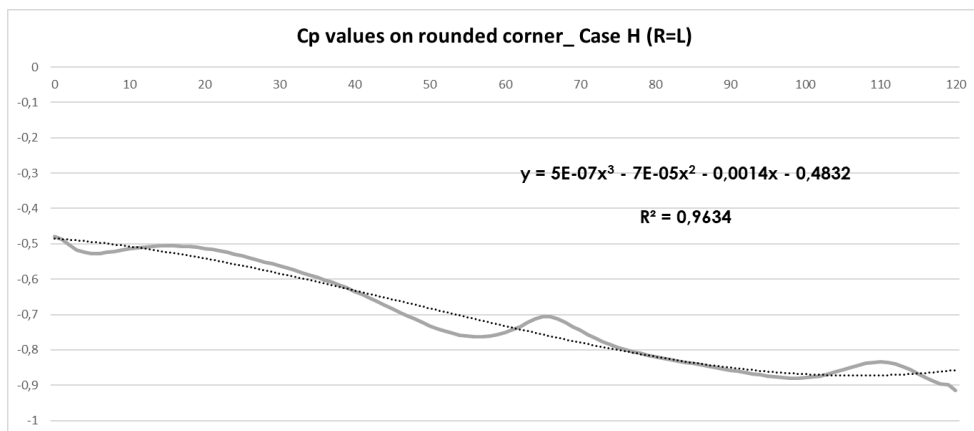


Figura 10—14: Caso H: diagramma dei coefficienti C_p valutati lungo l'altezza in corrispondenza dell'angolo curvilineo

Tali equazioni polinomiali, associate ad ogni differente edificio, possono essere utilizzate per prevedere o stimare l'andamento dei coefficienti di pressione c_p lungo il perimetro sul punto appartenente all'angolo curvilineo.

Avendo valutato gli andamenti dei coefficienti di pressione al variare della quota per ogni diverso modello d'analisi, si è riusciti a capire quale sia, tra i vari, l'edificio che facesse registrare un valore di depressione più significativo. Dall'andamento dei diagrammi contenuti nella Fig.10.5 si nota come i valori minimi di c_p si siano registrati nei casi G ed F (quelli con un raggio di curvatura compreso tra $L/3 < R < L/4$), ad una quota che compresa tra gli 80 e i 100 m, ovvero a circa 2/3 dell'altezza della struttura.

Da questi presupposti si è approfondita l'analisi valutando la variazione dei coefficienti di pressione lungo l'intero perimetro corrispondente alla quota critica, in cui si sono fatti registrare picchi negativi di valori.

Si è prodotto quindi un piano di taglio a quota $z = 100$ m, come mostrato in Fig.10.15.

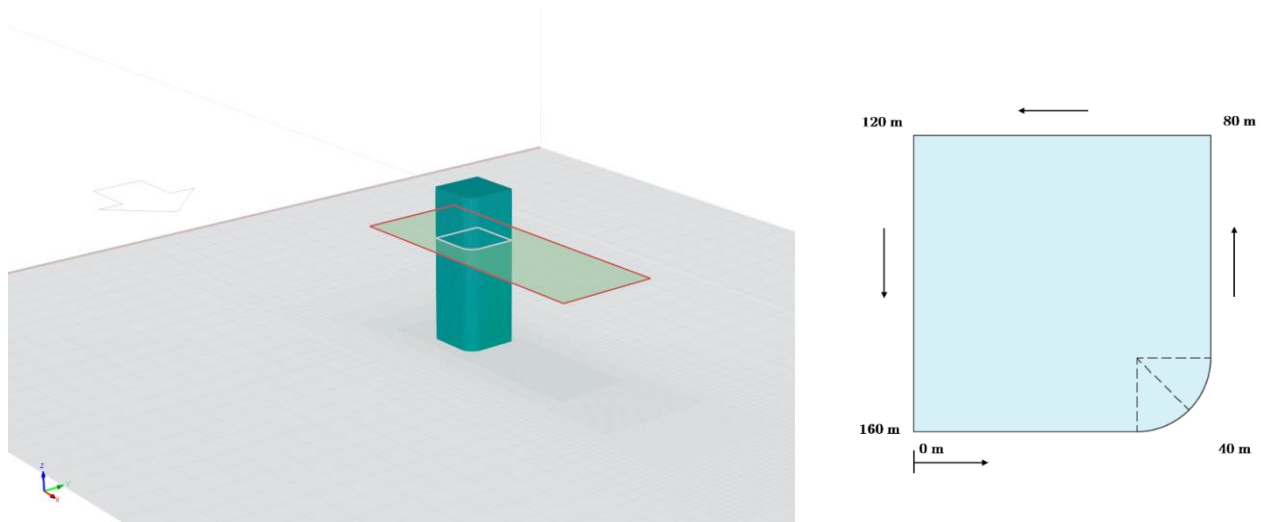


Figura 10—15: Indicazione del piano di taglio effettuato (sinistra) e andamento delle coordinate considerate lungo il perimetro (destra).

All'interno dei diagrammi di seguito riportati, sono proposti gli andamenti dei c_p registrati attorno al perimetro relativo alla $z_{crit} = 100$ m.

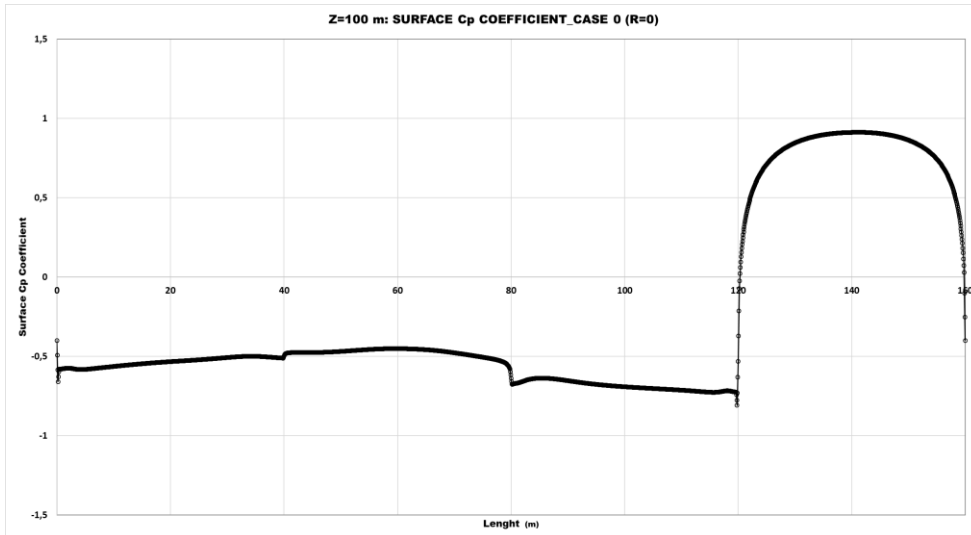


Figura 10—18: Caso 0: andamento perimetrale dei Cp a quota z=100m

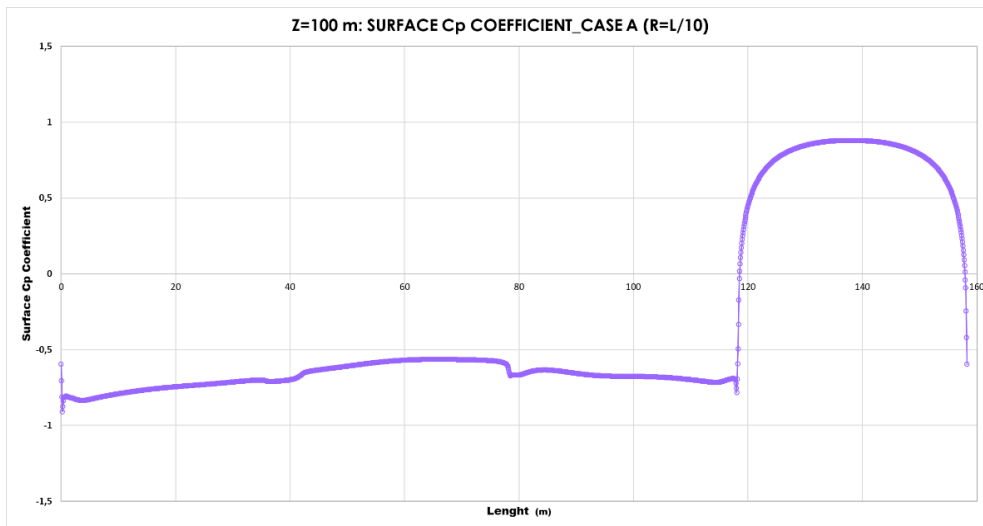


Figura 10—18: Caso A: andamento perimetrale dei Cp a quota z=100m

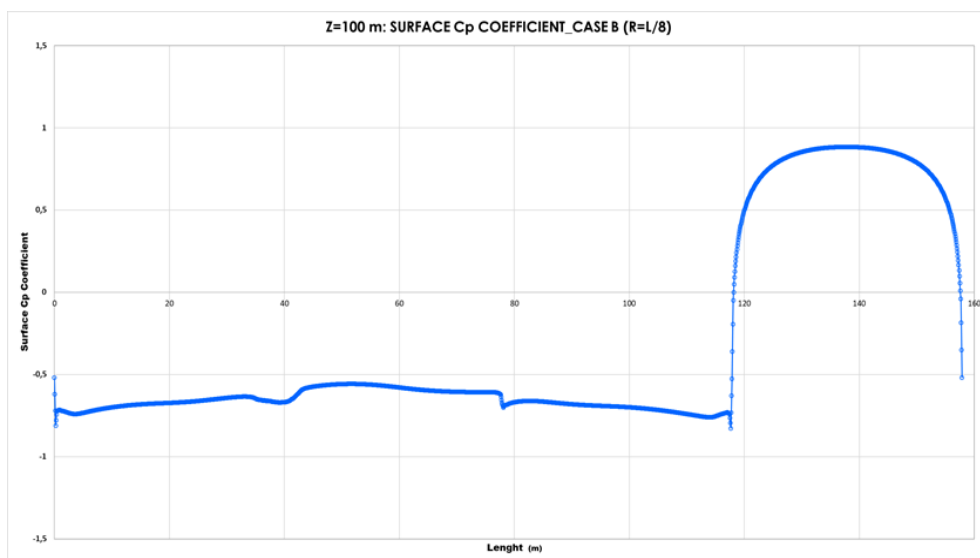


Figura 10—18: Caso B: andamento perimetrale dei Cp a quota z=100m

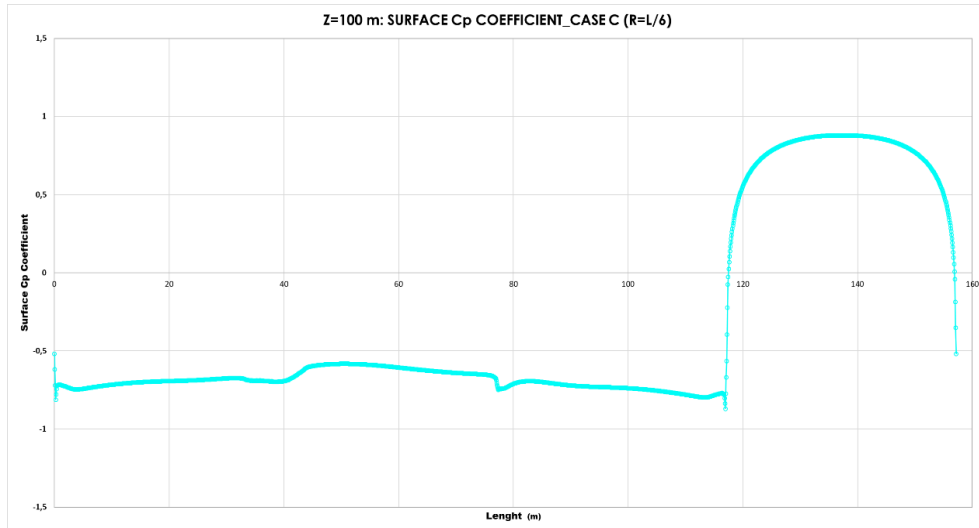


Figura 10—21: Caso C: andamento perimetrale dei Cp a quota z=100m

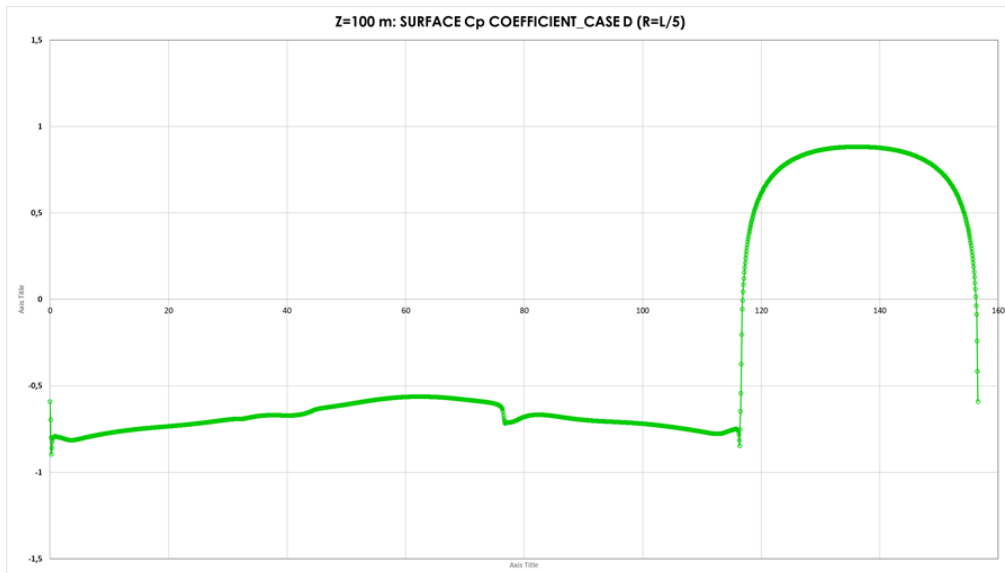


Figura 10—21: Caso D: andamento perimetrale dei Cp a quota z=100m

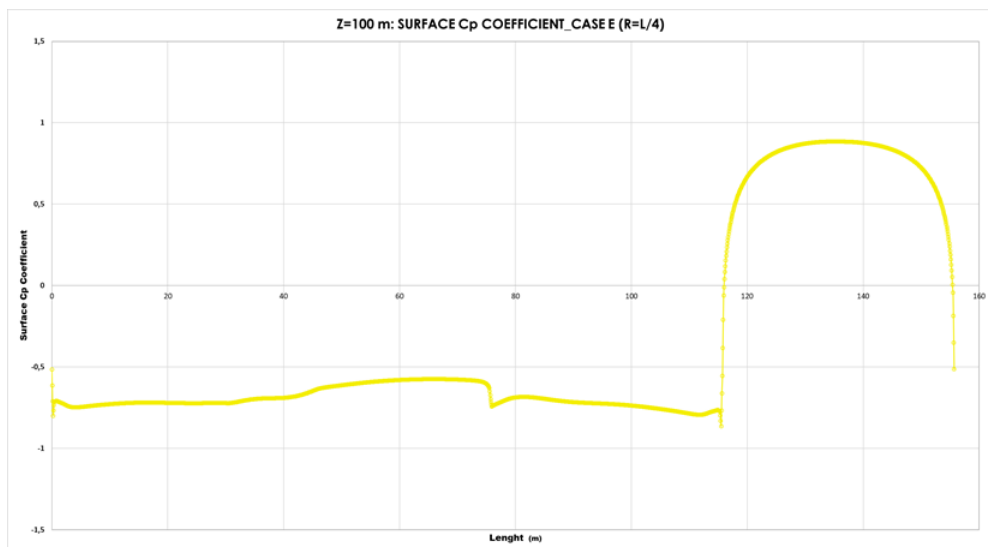


Figura 10—21: Caso E: andamento perimetrale dei Cp a quota z=100m

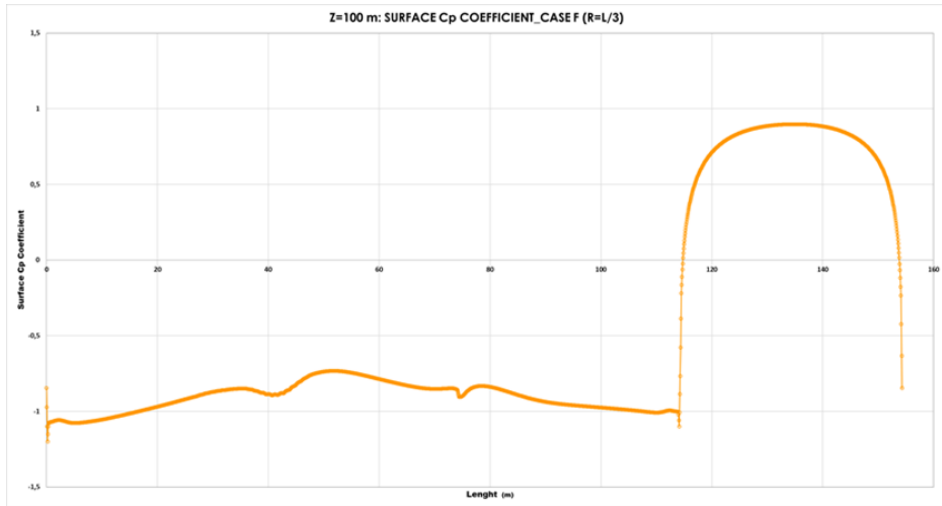


Figura 10—24: Caso F: andamento perimetrale dei Cp a quota z=100m

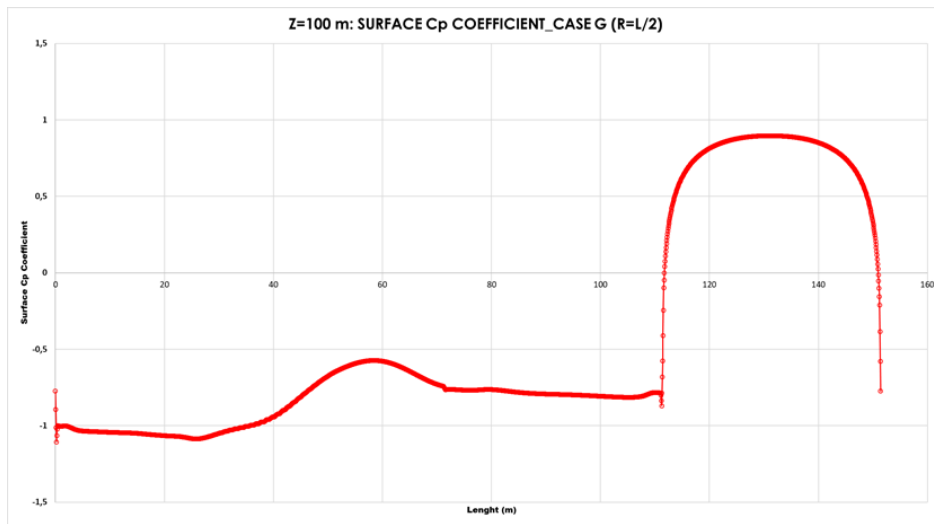


Figura 10—24: Caso G: andamento perimetrale dei Cp a quota z=100m

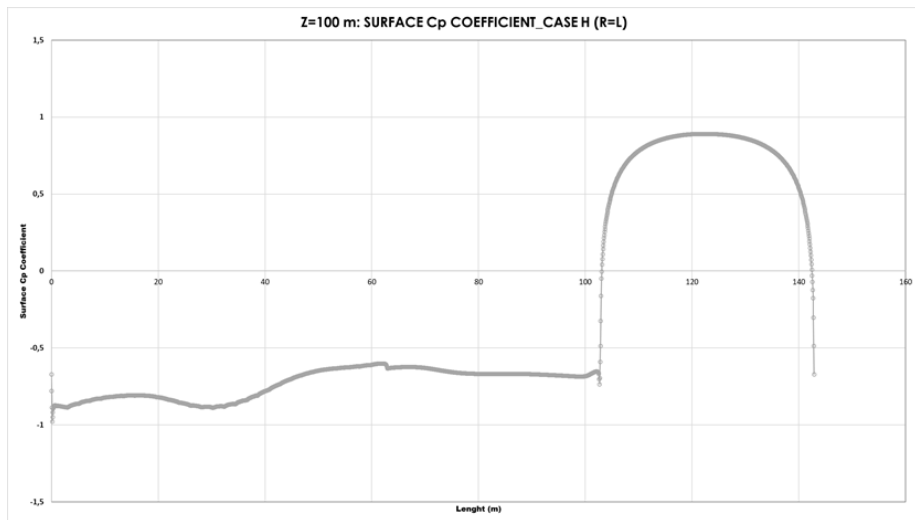


Figura 10—24: Caso G: andamento perimetrale dei Cp a quota z=100m

10.1 Valutazione della variazione del c_p sull'intorno di angolo curvilineo sottovento

Nei diagrammi precedenti sono stati raffigurati i grafici indicanti la variazione dei coefficienti di pressione media, C_p : lungo la parete laterale, sulla faccia sottovento e sopravvento, ricavati per il caso di edificio isolato e valutato su quota pari a $2/3 H$ dell'edificio, in quanto quota più assoggettata da maggiori effetti di depressione.

Il grafico di andamento perimetrale dei coefficienti di pressione relativo al "CASO 0": modello a pianta rettangolare a spigoli vivi (Fig.10.18), presenta un profilo a forma di vortice a ferro di cavallo generato sulla parete frontale, ovvero quella compresa tra la coordinata 120 m e 160m sul grafico; tale andamento concorda bene con i diagrammi di edifici a pianta rettangolare CAARC condotti da (Dagnew, 2009), da cui si intuisce che le modifiche in pianta (purché non modifichino la linearità della faccia sopravvento), non fanno variare i valori di c_p o il loro andamento lungo la lunghezza del prospetto frontale ortogonale all'azione del vento.

Si è entrati nel dettaglio della variazione dei coefficienti di pressione strettamente lungo la traiettoria curvilinea dei diversi spigoli, per ogni modello analizzato. Si è valutata la variazione dei c_p nell'intorno dello spigolo rettilineo, per capire come il valore del c_p variasse dal punto di inizio tangenza con la curva sopravvento P_X (immediatamente precedente al cambio di curvatura), nel punto P_0 , fino al punto immediatamente successivo alla fine della zona curvilinea P_Y ; tali analisi sono state fatte per ogni edificio, al variare del rapporto R/L .

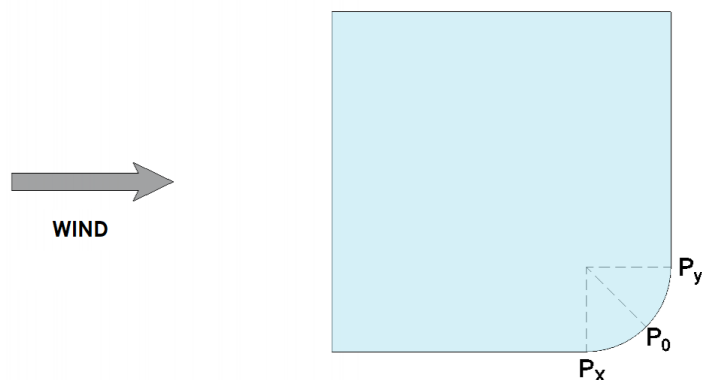


Figura 10—25: Disposizione della pianta all'interno della galleria del vento, rispetto all'azione del vento

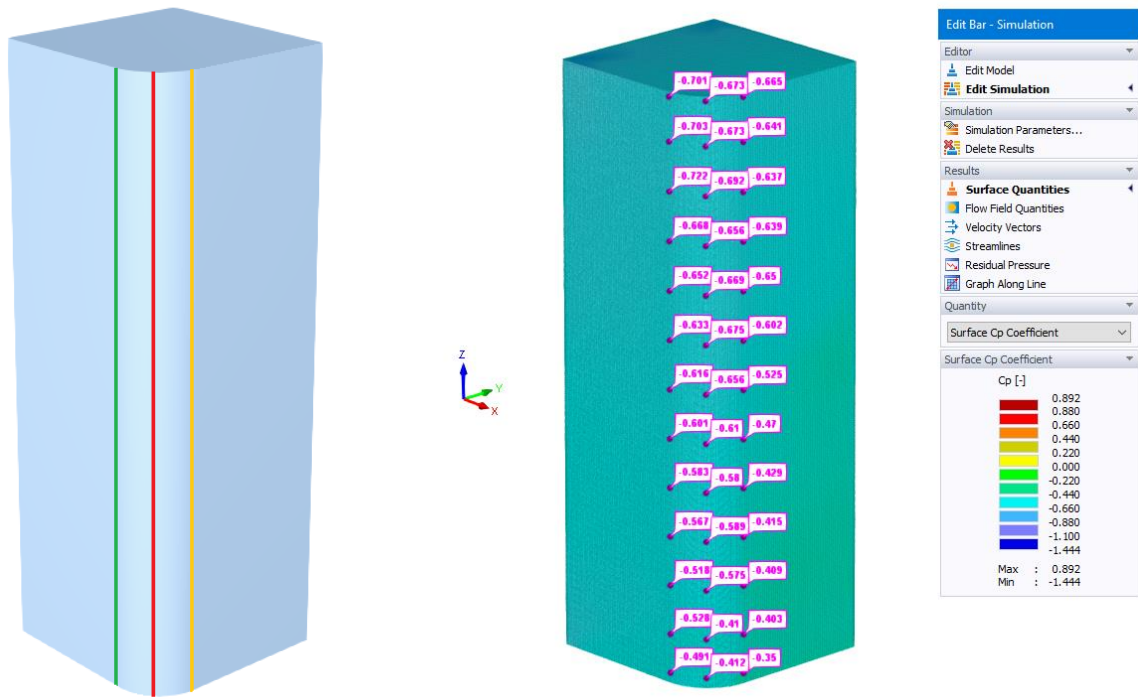


Figura 10—26: Linee di valutazione, sull'angolo curvilineo, dei coefficienti C_p esaminati dal modello

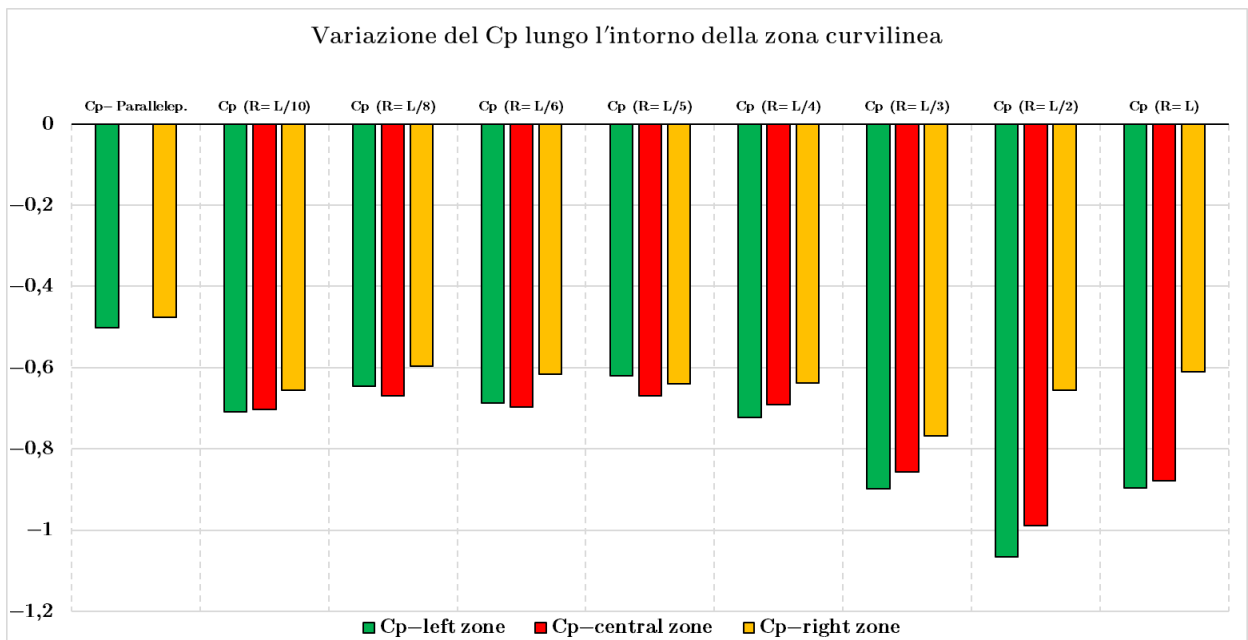


Figura 10—27: Istogramma dei valori di C_p , ricavati nell'intorno dell'angolo curvilineo, alla quota più critica ($z=100$ m), rispetto ad ogni caso studio affrontato.

10.2 'Edificio con angolo curvilineo' – Considerazioni e commenti

Dalle analisi condotte, si è visto come un edificio di elevate dimensioni che presenta un angolo con un determinato fattore di curvatura, rivela variazioni di pressione notevoli nell'intorno della zona curvilinea. Tale variazione, in termini di coefficiente c_p mostra come, in zona d'angolo sottovento:

- un edificio a base quadrata presenta un valore minimo: $c_p = -0.50$
- edifici con un angolo smussato, hanno mediamente un valore minimo: $\bar{c}_p = -0.78$

Entrando nello specifico, si nota come il modello del caso G, che presenta un raggio di curvatura pari a metà del lato lineare presenti:

- con raggio di curvatura ($R = L/2$): $c_p = -1.07$

Sulla base dell'istogramma illustrato in Fig.10.27, si delinea una panoramica generale dei differenti coefficienti di pressione per ogni caso studio affrontato. Tale grafico va a confrontare i coefficienti di pressione in zona sottovento all'altezza z_{crit} , ritenuta quella più sfavorevole, con valori di picco di depressione (come riscontrato dalla tabella di Fig.10.5).

Con tale istogramma si nota la variazione di c_p che un edificio con un angolo curvilineo avrebbe, rispetto a quello che uno più convenzionale a pianta quadrata potrebbe presentare.

Tale analisi mostra inoltre la differenza del coefficiente c_p nell'intorno dell'angolo sottovento; tale valore infatti, seppur variando, mostra come esso sia più basso nell'intorno tra la zona laterale e l'inizio della zona d'angolo e cresca a conclusione del tratto angolare, accedendo nella zona sottovento.

È interessante notare come il rapporto tra il c_p nell'intorno immediatamente a sinistra della zona d'angolo e quello immediatamente dopo (che rientra nella zona sottovento), cambi col variare del rapporto R/L , diventando più elevato quando tale rapporto aumenta, quando cioè la forma della base dell'edificio si allontana da quella quadrata.

11 Analisi di elementi aggettanti su edificio di elevate dimensioni con angolo curvilineo in zona sottovento

A conclusione delle analisi svolte, si sono voluti analizzare gli effetti e le interazioni che alcune tipologie di oscuranti producono su facciate continue appartenenti a edifici con un angolo curvilineo, analizzati nel capitolo precedente. Si è appena visto come tra i vari modelli visti, quello che registrava effetti di depressioni più sfavorevoli è quello coi valori di raggio di curvatura compresi tra $L/3 < R < L/2$, per cui si è deciso di proporre su tale edificio degli elementi aggettanti orizzontali, simili a quelli analizzati nel Caso studio A all'interno del Cap. 8.4.1.

Il modello di studio prevede una pianta inizialmente a base quadrata, con:

- altezza $H = 120\text{m}$;
- due lati di lunghezza $L = 40\text{ m}$;
- due lati di ampiezza $D = 27\text{ m}$, che si congiungono tramite un angolo curvilineo posto in zona sottovento, avente raggio di curvatura $R = L/3 = 13\text{ m}$.

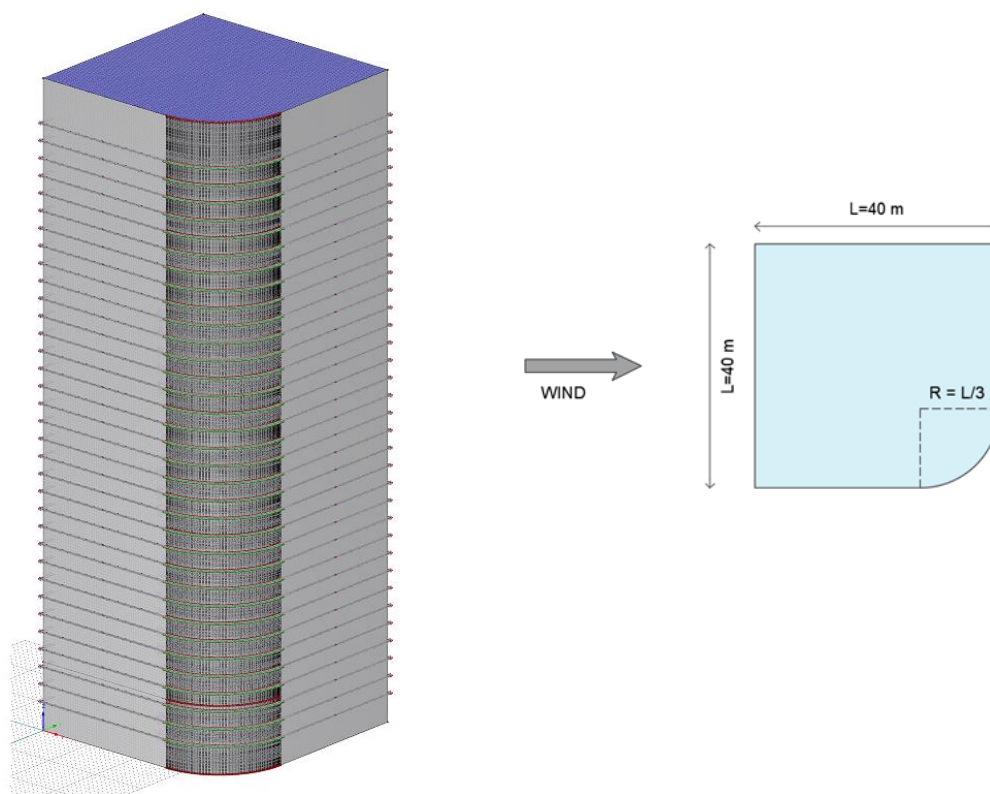


Figura 11—1: Vista assonometrica dell'edificio e configurazione in pianta, rispetto alla direzione del flusso del vento agente.

Le caratteristiche geometriche degli oscuranti sono:

- Larghezza elementi aggettanti: 650 mm
- Spessore: 50 mm
- Distanza aggetti orizzontali: 3.2 m

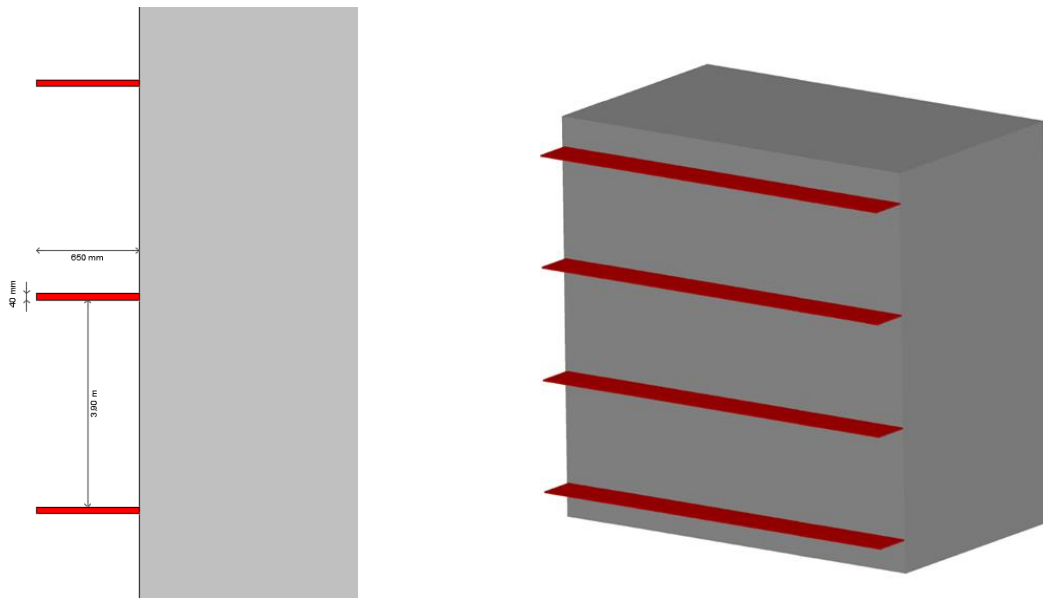


Figura 11—2: Caratteristiche geometriche degli elementi aggettanti e configurazione degli stessi in facciata.

Allo scopo di ottimizzare il livello di dettaglio si è cercato di massimizzare il numero di mesh sul wall del modello e nella galleria del vento virtuale, ottenendo un'analisi fluidodinamica con circa 25 mln di celle di calcolo, dalla dimensione media di 8 cm; a garanzia di un'affidabile precisione in fase di elaborazione.

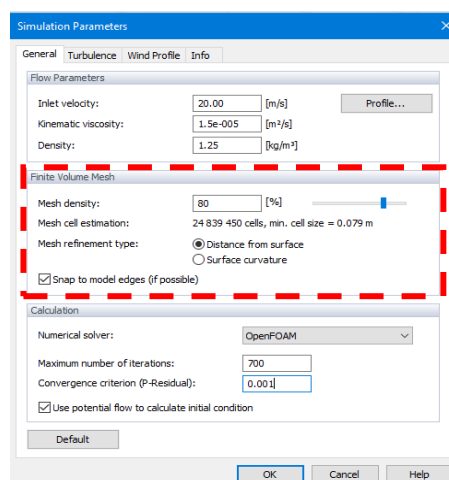


Figura 11—3: Definizione del numero e della dimensione delle mesh di analisi

iWind Tunnel Dimensions: Dx = 1485 m, Dy = 750 m, Dz = 300 m
Free Stream Velocity: 23.92 m/s

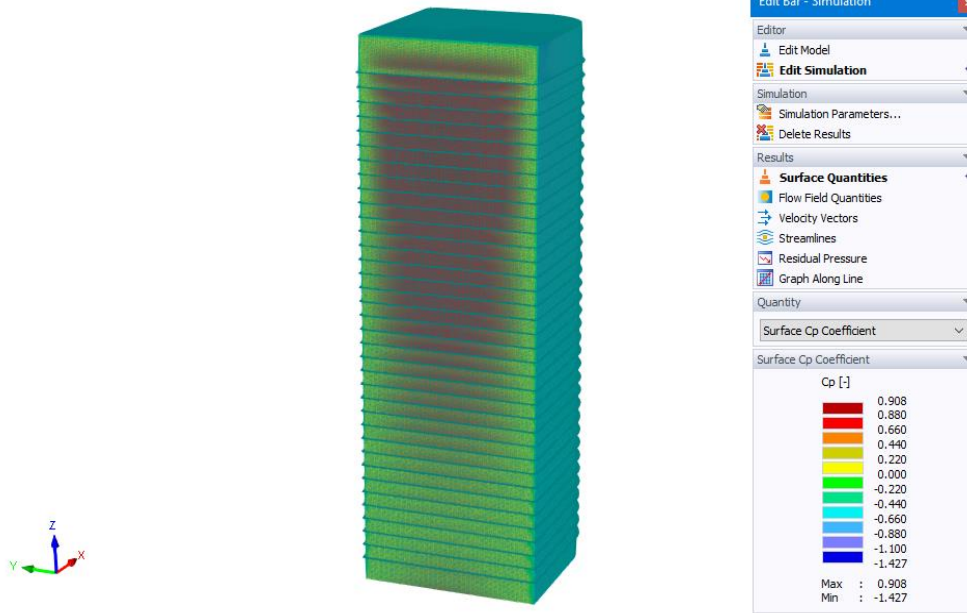


Figura 11—4: Valori di C_p agenti sulla facciata sopravento dell'edificio, con l'azione del vento agente secondo l'asse x .

Dalle analisi fluidodinamiche computazionali svolte con il software RWIND Simulation, sono stati ricavati anche per questo caso studio dei coefficienti di pressione c_p agenti sia sulla superficie della facciata continua, che sulla parte superiore e inferiore degli aggetti orizzontali. Con o c_p ricavati è stata definita una tabella contenente fattori di trasformazione K_s , che vanno ad indicare il rapporto schermante dalle pressioni del vento, che tali aggetti hanno nei confronti della facciata su cui tali pressioni agiscono.

	MAXIMUM PEAK COEFFICIENT (C_p)			MINIMUM PEAK COEFFICIENT (C_p)		
	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s	Façade (external)	Sunscreen (differential)	K_s
TOP REGION						
Curved corner				-0.76	0.06	-0.08
Centre	+0.93	+ 0.19	0.2	-0.62	0.34	-0.44
Right edge	+0.81	+ 0.66	0.81	-0.59	0.21	-0.36
MID REGION						
Curved corner				-0.56	0.44	-0.79
Centre	+0.85	+0.11	0.13	-0.78	0.4	-0.51
Right edge	+0.77	+0.33	0.80	-0.4	0.21	-0.53
LOW REGION						
Curved corner				-0.36	0.24.	-0.67
Centre	+0.67	+0.24	0.36	-0.23	0.15	-0.65
Right edge	+0.77	+0.33	0.80	-0.22	0.18	-0.81

Tabella 10: Valori di C_p e K_s (caso studio A), ricavati da analisi CFD

11.1 Elementi aggettanti su edificio di elevate dimensioni con angolo curvilineo in zona sottovento – Considerazioni e commenti

In aggiunta alle valutazioni sul fattore di trasformazione K_s valutato sul modello 3, riportate precedentemente, tramite analisi fluidodinamica computazionale è anche possibile quantificare graficamente l'incidenza che aggetti orizzontali (come nel caso specifico) riscontrano su un edificio. Nella Fig.11.5, si noti come gli aggetti orizzontali in zona sopravento riducano gli effetti di pressione percepiti dalla facciata più direttamente esposta.

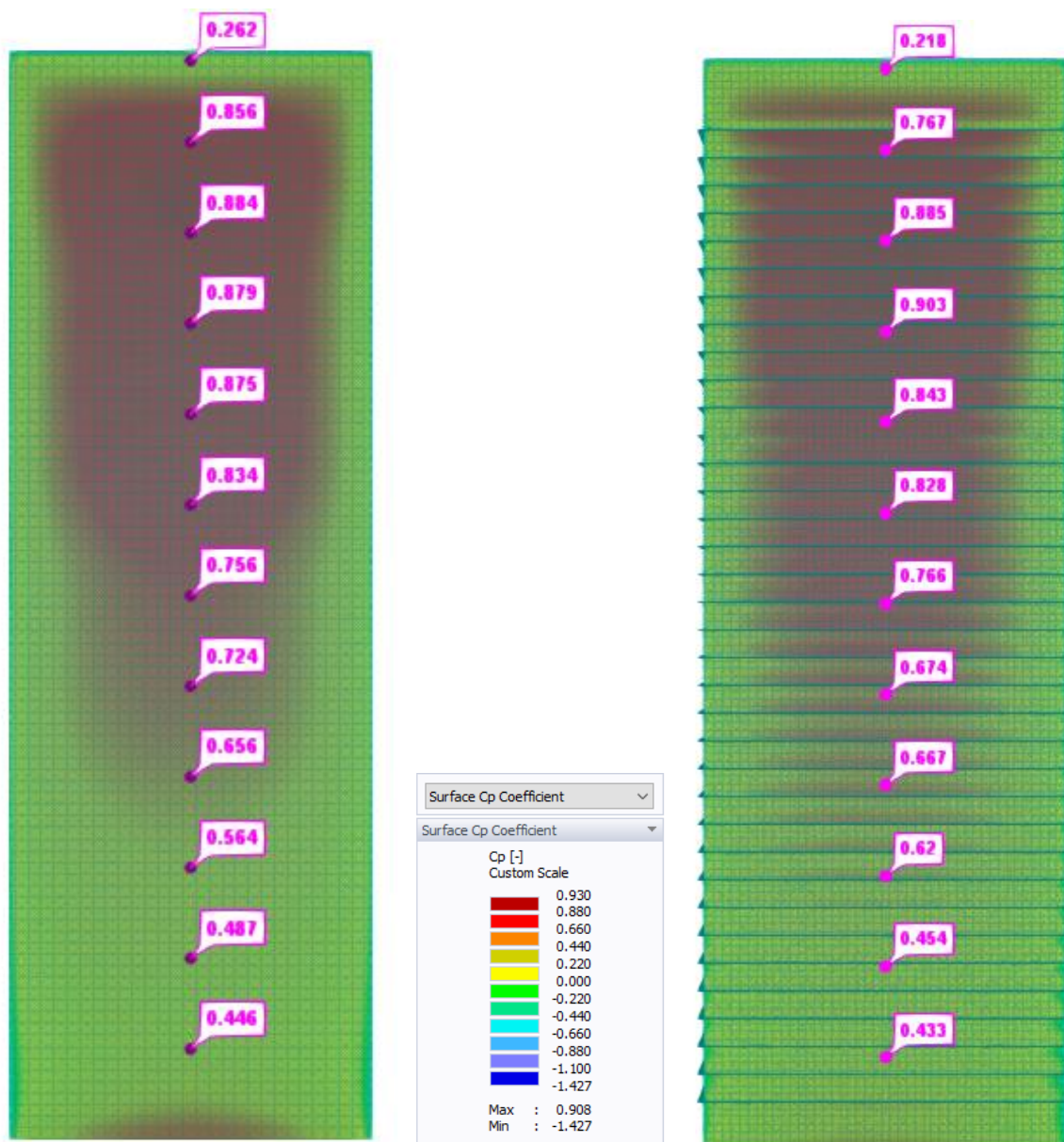


Figura 11—5: Confronto tra le distribuzioni di C_p ottenuti da analisi CFD, valutata su due edifici dalle stesse caratteristiche geometriche – caso di facciata in zona sopravento. A destra: edificio privo di elementi oscuranti, a sinistra edificio con aggetti orizzontali

In Fig. 11.6 è presentato un confronto grafico e numerico sugli effetti che la presenza di aggetti orizzontali comporta, in termini di coefficienti di pressione, sulla facciata in zona angolare sottovento.

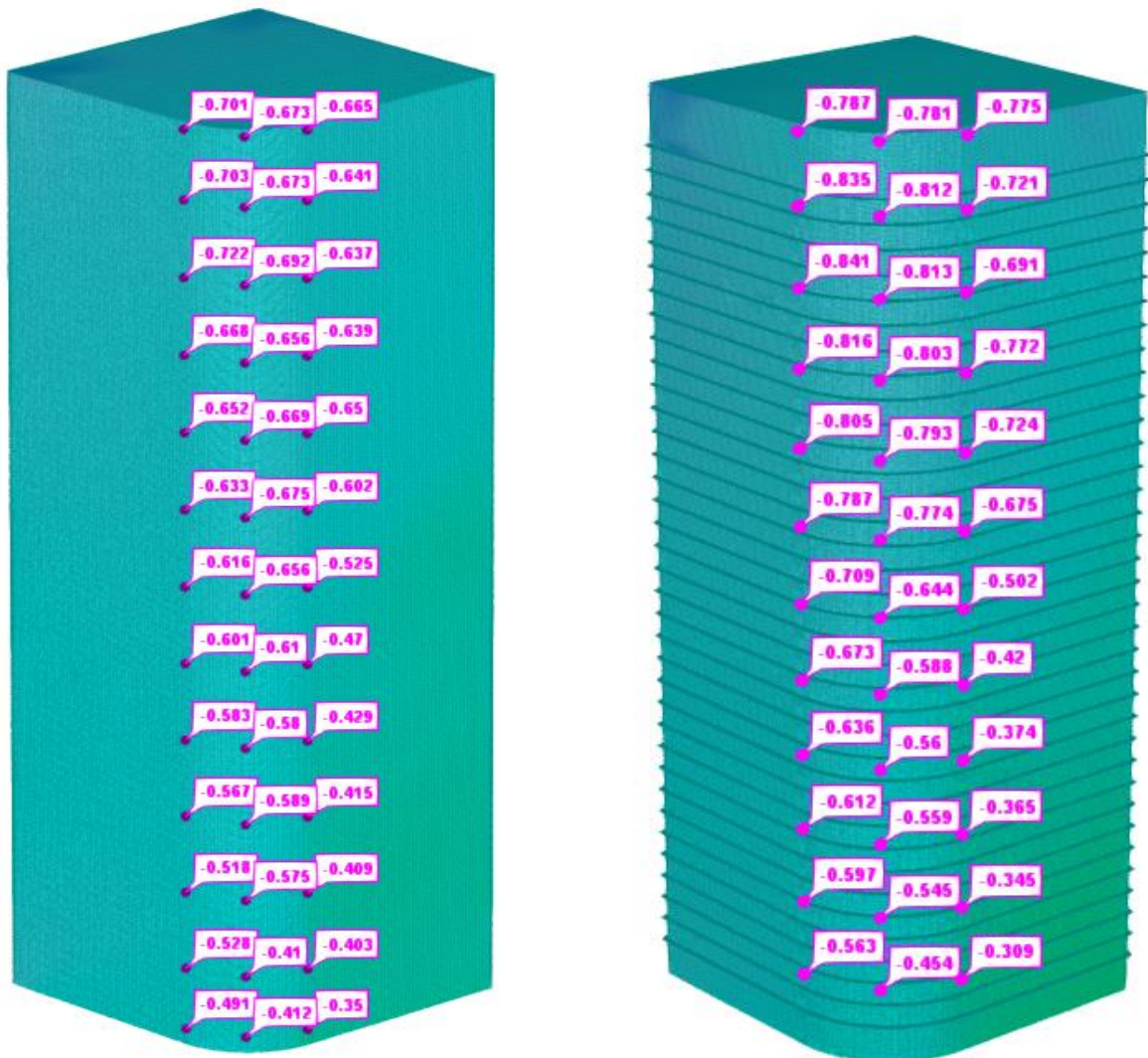


Figura 11—6: Confronto tra le distribuzioni di C_p ottenuti da analisi CFD, valutata su due edifici dalle stesse caratteristiche geometriche – caso di porzione angolare in zona sottovento. A sinistra: edificio privo di elementi oscuranti, a destra edificio con aggetti orizzontali

12 Conclusioni

Nel presente lavoro di tesi sono stati studiati gli effetti dei carichi del vento agenti su edifici di elevate dimensioni mediante analisi di simulazione fluidodinamica computazionale (CFD). Lo studio è entrato nello specifico analizzando gli effetti dei carichi del vento sulle facciate, valutando quantitativamente le interazioni presenti tra l'involucro di un edificio e gli elementi aggettanti ad essi adiacenti.

Si è poi comprovata l'affidabilità del metodo CFD a seguito di una fase di test benchmark condotti con risultati ottenuti da studi sperimentali svolti in galleria del vento su edifici di elevate dimensioni, con differenti tipologie di elementi aggettanti.

Con i risultati ottenuti tramite sperimentazioni in galleria del vento, oltre a comparare i coefficienti di pressione c_p ottenuti, si sono confrontati anche i fattori di trasformazione K_s , con cui si rapporta la differenza dei coefficienti di pressione calibrati sulle due facce degli oggetti, rispetto ai c_p misurati in facciata.

Le normative e le linee guida non esprimono indicazioni in merito a valutazioni di carattere locale sulle azioni del vento agenti su elementi oscuranti o elementi aggettanti presenti in facciata, affidando tali previsioni agli studi in galleria del vento.

Questa soluzione, nonostante sia dispendiosa in termini di risorse e di tempistiche, contiene numerosi livelli di incertezza, dovuti alle condizioni al contorno approssimate, ad errori di strumentazioni inevitabili e ai fattori di scala adottati.

Nel lavoro eseguito, si sono simulate all'interno di gallerie del vento virtuali, le azioni dinamiche del vento agenti su edifici elevati a forma cilindrica e valutati gli effetti che tali azioni provocassero sulle schermature aggettanti, in termini di c_p e K_s .

Tali analisi sono state svolte per differenti tipologie e geometrie di elementi in aggetto, adiacenti e con un determinato offset dall'involucro.

Vista la forte congruenza dei valori del coefficiente di pressione ricavati dalle simulazioni e dei fattori K_s ottenuti, con un range di errore molto basso, si può arrivare a confermare la validità del metodo CFD per l'analisi dei carichi del vento agenti e proporsi di indagare nuove tipologie di casi studio, dalle diverse peculiarità strutturali e architettoniche.

Per coprire i margini di errore rilevati, si propone di affiancare ai fattori K_s ricavati da ogni caso studio, un coefficiente di sicurezza $\Psi=1.15$.

Nella seconda parte della tesi si è scelto di utilizzare la bontà di tale metodologia per valutare l'interazione del vento su strutture diverse da quelle più classiche presenti nella manualistica di settore.

Gli studi sugli effetti del vento su edifici o su corpi di forma cilindrica sono molto sviluppati in letteratura e nelle normative di settore. Al contrario, nulla è disponibile per edifici che abbiano solo una parte curva ed il resto con pareti piane e ad angolo retto, nonostante questo tipo di geometria "mista" sia molto frequente nell'architettura moderna. Si è scelto dunque di sottoporre tali edifici ad analisi CFD per valutare le interazioni del vento lungo la parete in zone sopravento e soprattutto per capire quali fossero i coefficienti di pressione sulla zona d'angolo curvilinea, in zona sottovento.

Tale studio ha portato a valutare come variassero i coefficienti c_p in tale regione curvilinea, al variare del raggio di curvatura esaminato, per ognuno dei casi presi in esame.

Si è visto come, raggiunto un determinato rapporto tra raggio di curvatura R e superficie laterale lineare L , il valore del coefficiente di pressione di picco negativo di c_p , in prossimità dell'angolo curvilineo in zona sottovento, raggiungesse valori minimi. Si è arrivati a ottenere tramite relazione polinomiale, un modo con cui ottenere la variazione del c_p rispetto a tale rapporto R/L . Con tale equazione, è possibile prevedere senza l'ausilio di modelli in galleria del vento, l'andamento del c_p lungo il perimetro di tale edificio, assegnata la geometria e il rapporto R/L .

A conclusione del lavoro si è pensato che, seppur la complessità del vento supera le capacità computazionali, tramite i risultati di questo studio sia possibile fornire un contributo allo sviluppo futuro di regole per la progettazione di facciate installate su edifici di tale forma.

13 Riferimenti bibliografici

- Abu–Zidan, Y. Optimising the computational domain size in CFD simulations of tall buildings.
- Code of Practice on Wind Effect in Hong Kong . (2019).
- Cook, N. J. (1985). *The designer's guide to wind loading of building structures – Part. 2 (Static structures)*. Building Research Establishment.
- Cowdrey. (1969). The application of Maskell's theory of wind tunnel blockage to very large scale models. *Aero Report*.
- Dagneu, B. (2009). Computational evaluation of wind pressures on tall buildings.
- D'Olimpo, D. (2017). *Il retrofitting energetico e bioclimatico nella riqualificazione edilizia*. Legislazione Tecnica.
- Gulvanessen, G. (2007). *Guida all'Eurocodice 1 – Azioni del vento: EN 1991–1.4*. EPC Libri.
- Holland, G. Wind Loads on Sun–Shade Attachments and Parent Building.
- Holmes, J. (2007). *Wind loading structures*.
- Holmes, K. a. (2012). *Wind loading handbook for Australia & New Zealand*.
- Mary, F. (s.d.). *Analisi dei dati per il Data mining*.
- Maskell. (1963). A theory for the blockage effects on bluff bodies and stalled wings in a closed wind tunnel. *Aeronautical Research Council*.
- Paganoni. (2007). *Laboratorio di statistica con Excel*.
- Ranga Raju, V. S. (1975). "Blockage effects on Drag of Sharp–edges Bodies". *Journal of Industrial Aerodynamics*.
- Rigone, P. (2014). *La posa in opera delle facciate continue*. Maggioli Editore.
- V.Nielsen, P. (2008). *Fluidodinamica computazionale*. Dario Flaccovio Editore.
- Yuan, K. (n.d.). Effects of facade appurtenances on the local pressure of high–rise building.
- Zhao, D.–X. (n.d.). Effects of architectural shapes on surface wind pressure distribution: Case studies of oval–shaped tall buildings.

