

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**  
**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA**  
**CIVILE**  
**DICAM**

**Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica,  
Ambientale e dei Materiali**

TESI DI LAUREA

in

PROGETTI DI STRUTTURE M

**Azione del vento su facciate continue di edifici a torre:  
approccio normativo, analisi in galleria del vento e  
modellazione CFD**

**Candidato:**

Nicolas Foschi

**Relatore:**

Chiar.mo Prof. Ing. Luca Pozza

**Correlatore:**

Dott. Ing. Stefano Pagliarani

ANNO ACCADEMICO 2020/2021

SESSIONE III



# INDICE

---

<b>PREMESSA .....</b>	<b>5</b>
<b>INQUADRAMENTO NORMATIVO.....</b>	<b>7</b>
<b>1 FENOMENO DEL VENTO .....</b>	<b>9</b>
1.1 FENOMENO FISICO DELL'AZIONE DEL VENTO .....	9
1.2 AZIONE DEL FLUSSO EOLICO AGENTE SULLE COSTRUZIONI .....	13
1.2.1 FENOMENI DI INTERAZIONE VENTO-STRUTTURA IN AMBITO URBANO .....	18
<b>2 ANALISI DELL'AZIONE DEL VENTO AGENTE SU EDIFICI A TORRE.....</b>	<b>27</b>
2.1 IL CASO DI STUDIO: STONECUTTER COURT BUILDING .....	27
2.2 ANALISI ANALITICA DA NORMATIVA .....	37
2.2.1 VELOCITÀ DEL VENTO .....	38
2.2.2 PRESSIONE DEL VENTO .....	42
2.2.3 PRESSIONE DEL VENTO SULLE SUPERFICI.....	46
2.3 CONFRONTO AZIONE DEL VENTO E AZIONE SISMICA.....	59
<b>3 ANALISI SPERIMENTALE IN GALLERIA DEL VENTO .....</b>	<b>63</b>
3.1 INTRODUZIONE ALL'ANALISI IN GALLERIA DEL VENTO.....	63
3.1.1 EFFETTO BLOCCAGGIO.....	66
3.1.2 MISURAZIONI DELLE PRESSIONI.....	67
3.2 MODELLO: CARATTERISTICHE E DATI DI INPUT .....	68
3.3 RISULTATI ANALISI IN GALLERIA DEL VENTO .....	75
<b>4 ANALISI COMPUTAZIONALE CFD – VENTO AEC .....</b>	<b>83</b>
4.1 MODELLO: CARATTERISTICHE E DATI DI INPUT .....	86
4.2 ANALISI COMPUTAZIONALE .....	102
4.3 RISULTATI ANALISI CFD.....	105
<b>5 CONFRONTO APPROCCI ED EFFETTI DEL VENTO NELLA PROGETTAZIONE DI UNA CELLULA UNIT.....</b>	<b>117</b>
5.1 CONFRONTO TRIPLICE APPROCCIO.....	117
5.2 PROGETTAZIONE DELLA CELLULA UNIT SOGGETTA ALL'AZIONE DEL VENTO .....	127
5.2.1 ELEMENTI STRUTTURALI IN ALLUMINIO .....	129
5.2.1.1 APPROCCIO NORMATIVO .....	130
5.2.1.2 APPROCCIO ALTERNATIVO .....	142

5.2.1.3 INFLUENZA DELLA VARIAZIONE DEL CARICO DA VENTO SUL DIMENSIONAMENTO DELLA STRUTTURA RESISTENTE .....	149
5.2.2 VETRI-CAMERA.....	153
5.2.2.1 APPROCCIO NORMATIVO .....	153
5.2.2.2 APPROCCIO ALTERNATIVO .....	164
5.2.2.3 INFLUENZA DELLA VARIAZIONE DEL CARICO DA VENTO SUL DIMENSIONAMENTO DEI VETRI-CAMERA .....	167
<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>171</b>
<b>ALLEGATI.....</b>	<b>175</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>177</b>
<b>SITOGRAFIA.....</b>	<b>179</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE .....</b>	<b>181</b>
<b>RINGRAZIAMENTI .....</b>	<b>187</b>

## PREMESSA

---

Oggi giorno gli edifici a torre di elevate dimensioni sono parte fondamentale del tessuto urbano delle grandi città europee. Allo scopo di consentire la progettazione strutturale dell'edificio in sé, ed in particolare delle sue facciate continue, sono necessari studi approfonditi in grado di appurare tutte le reali azioni a cui questi sono soggetti. Al crescere dell'altezza, il carico a cui attribuire maggiore attenzione in fase di progettazione è sicuramente l'azione del vento.

I documenti normativi vigenti aiutano il progettista fornendo valori di pressione attendibili per casi standard, ma non sono altrettanto affidabili per geometrie particolari o per strutture di grandi dimensioni, sempre più richieste dall'architettura moderna. Nasce, dunque, la necessità di affiancare all'analisi tradizionale anche metodi innovativi che permettano di rilevare valori dei carichi da adottare qualora non sia possibile seguire le normative o quando non lo si ritiene economicamente conveniente. Nonostante l'importanza di tali analisi, e nonostante l'influenza che esse hanno nell'intero iter-progettuale, la quantità di pubblicazioni sull'argomento è molto limitata.

Nel corso del presente elaborato si è partiti dall'analisi del fenomeno eolico e alla valutazione dei flussi agenti sulle costruzioni, con particolare attenzione ai fenomeni di interazione vento struttura. In particolare, avendo a che fare con strutture rigide ed indeformabili, sono stati trascurati i fenomeni aeroelastici (fenomeni di sincronizzazione, *galloping* e *flutter*) e ci si è concentrati, invece, sullo studio dei fenomeni di interferenza legati alle variazioni della velocità del vento.

Difatti, analizzando un edificio inserito nel suo reale contesto urbano, si osserverà come la pressione esterna considerata in fase di progettazione venga influenzata da diversi fenomeni di interferenza, quali effetto ombra, effetto barriera, effetto scia, effetto canale e/o effetto venturi.

Completata l'analisi teorica del fenomeno eolico, si è passati alla valutazione del carico da vento da normativa a cui sono soggette le facciate continue dell'edificio *Stonecutter Court Building*. Essendo localizzato in Inghilterra, più precisamente a Londra, lo studio dell'azione del vento è stato eseguito in accordo all' Eurocodice all' Eurocodice 1 “*EN 1991-1-4:2005 Eurocode 1: Actions on structures – part 1-4: General actions – wind actions*” ed al relativo annesso nazionale “*National annex for building structures to BS EN 1991-1-4:2005*”.

Inoltre, al fine di appurare l'effettiva rilevanza del carico da vento nella progettazione di facciate continue di edifici a torre, è stato effettuato un confronto tra azione del vento ed azione sismica agente sull'elemento cellula costituente la facciata stessa.

In secondo luogo si è passati allo studio approfondito per mezzo dei due principali metodi innovativi: analisi sperimentale in galleria del vento e analisi computazionale CFD. In entrambi i casi si è proceduto alla realizzazione di un modello dell'edificio inserito nel suo reale contesto urbano, al fine di ottenere i reali valori di carico ed al tempo stesso di visualizzare eventuali flussi dannosi che potrebbero generarsi tra i diversi edifici.

Per entrambi i metodi di analisi si è proceduto all'analisi delle diverse possibili direzioni del vento. Al termine delle prove, sono poi state rilevate le pressioni esterne agenti sui quattro prospetti dell'edificio in esame. Successivamente, combinando adeguatamente pressioni esterne ed interne sono stati ottenuti involucri di pressione grazie ai quali è stato possibile procedere alla progettazione della facciata stessa.

Infine, è stato eseguito un confronto tra i tre possibili metodi di calcolo, sia in termini di entità dell'azione del vento che in termini di impatto economico sull'approvvigionamento dei differenti materiali costituenti una cellula tipica della facciata continua.

## INQUADRAMENTO NORMATIVO

---

I criteri adottati nella valutazione dell'azione del vento agente sulle facciate continue di edifici a torre nelle tre modalità di analisi, così come per la loro progettazione, fanno riferimento alle norme di seguito esposte:

- *BS EN 1990:2002 – “Basis of structural design” {1}*
- *BS EN 1991-1-1:2002 – “Action on structures – Part 1-1: General actions” {2}*
- *BS EN 1991-1-4:2005 “Eurocode 1: Actions on structures – part 1-4: General actions – wind actions” {3}*
- *“National annex for building structures to BS EN 1991-1-4:2005” {4}*
- *PD 6688-1-4:2015 – “Background information to the National Annex to BS EN 1991-1-4:2005 and additional guidance” {5}*
- *BS 6399-2:1997 – “Loading for building – part 2: Code of practice for wind loads” {6}*
- *CWCT – “Standard for systemized building envelopes – part 3 – Air, water and wind” {7}*
- *CWCT – “Standard for systemised building envelopes – part 2 – Loads, fixing and movement, resistance” {8}*
- *CWCT – “Guidance on the action on non-loadbearing building envelopes” {9}*
- *CNR-DT 207 R1/2018 – “Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni” {10}*
- *BS EN 1999-1-1:2007 – “Eurocode 9: Design of aluminium structures” {11}*
- *BS EN 16612:2019 – “Glass in building – Determination of the lateral load resistance of glass panes by calculation” {12}*
- *BS EN 1991-1-5:2003 – “Eurocode 1 part 5: actions on structures – thermalactions” {13}*
- *“National annex for actions on structures – thermalactions to BS EN 1991-1-5:2003” {14}*



# 1 FENOMENO DEL VENTO

---

## 1.1 FENOMENO FISICO DELL'AZIONE DEL VENTO

Per gli edifici a torre, in accordo all'esperienza e a quanto verrà dimostrato in seguito, il vento costituisce sicuramente il carico più gravoso e, per tale ragione, necessita di adeguata attenzione in fase di progettazione. I metodi di calcolo presenti in normativa rappresentano l'azione del vento come un carico statico equivalente e, sebbene ad oggi costituiscano una buona base di partenza per il calcolo delle sollecitazioni sulle strutture tradizionali, di fatto risultano inadeguati nel caso di strutture di grandi dimensioni (grattacieli e ponti) in quanto non tengono conto, o lo fanno in maniera approssimativa, della fluttuazione delle correnti ventose turbolente e della loro dipendenza statistica.

Il vento è un fenomeno naturale originato dalla rotazione terrestre, dal riscaldamento differenziale delle masse d'aria (differente gradiente termico) e dalla differente pressione atmosferica. Pertanto, il moto dell'aria è governato da complesse leggi della meccanica dei fluidi e della termodinamica. Tale moto dell'aria può essere differenziato in due componenti:

- al di sopra dell'altezza del gradiente  $Z_g$  si ha l'atmosfera indisturbata ove la velocità del vento prende il nome di velocità geostrofica  $V_g$  ed è costante;
- al di sotto invece, si ha lo strato limite atmosferico ove al moto precedentemente descritto si sovrappongono moti turbolenti legati a vortici generati dal contatto dell'aria con l'asperità del terreno. Tale comportamento genera forze di attrito contrarie a quelle del vento, causando dunque andamento crescente della velocità del vento da terra (ove è teoricamente nulla) fino alla quota  $Z_g$ , ove il campo della velocità torna ad essere uniforme e costante nel tempo, come osservabile nella figura 1.2.

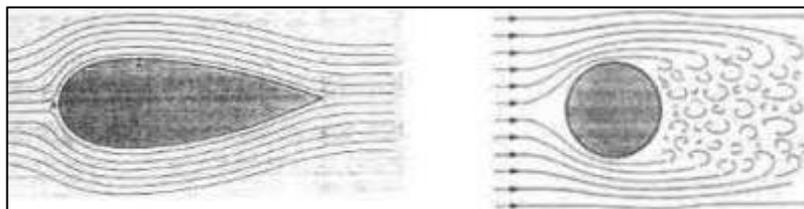


figura 1.1- Moto laminare (sx) - Moto Turbolento (dx) – Università di Parma

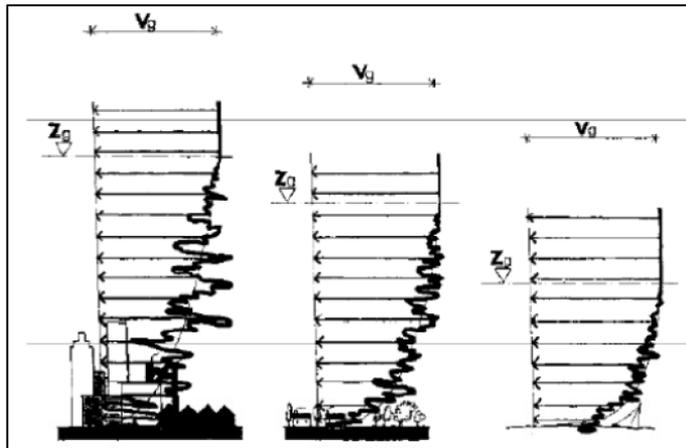


figura 1.2 - Profilo della velocità del vento al variare della rugosità del terreno – CNR DT207

Tale altezza del gradiente varia tra i 1000 ed i 3000 metri in funzione della velocità del vento e della scabrezza del terreno espressa dal parametro  $z_0$  = lunghezza di rugosità<sup>1</sup>. L'impiego del profilo logaritmico della velocità è corretto al di sopra dello strato limite superficiale<sup>2</sup>, mentre al suo interno il campo di velocità dipende dalla disposizione e dalle caratteristiche degli ostacoli e, dunque, può essere valutato correttamente solo per mezzo di prove sperimentali o simulazioni numeriche.

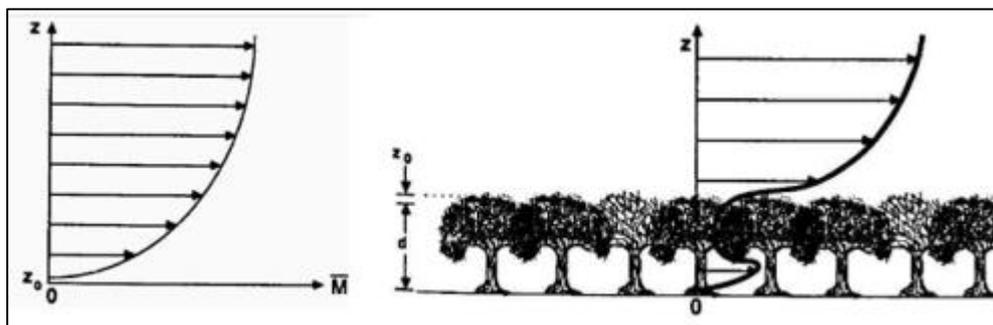


figura 1.3 - Profilo logaritmico della velocità in campo aperto ed in presenza di un bosco

<sup>1</sup> Lunghezza di rugosità: parametro che permette di tener in considerazione di come un ambiente artificiale, il quale presenta ostacoli di forma e dimensione differenti, modifica il microclima di un ambiente naturale in assenza di costruzioni (rugosità pressoché nulla).

<sup>2</sup> Strato limite superficiale: fascia atmosferica a contatto con il terreno di altezza  $z_s = 1,5 \cdot z_h$  ove  $z_h$  è l'altezza media degli elementi di rugosità.

La turbolenza generata dal contatto del flusso d'aria con la rugosità superficiale genera un moto vorticoso che interagisce significativamente con la struttura, dando luogo ad una risposta dinamica differente in funzione della rigidezza della struttura analizzata:

- strutture rigide → periodi alti, risposta quasi statica;
- strutture deformabili → periodi bassi, risposta dinamica con attenzione al fenomeno della risonanza<sup>3</sup>.

I vortici che si vengono a creare possono essere molto diversi. Tale diversità riguarda sia la scala temporale in relazione al periodo medio dei vortici, che la scala spaziale in riferimento alle dimensioni medie. Si differenzia, a tal fine, la macrometeorologia (con vortici dell'ordine di chilometri e periodi di giorni e mesi) dalla micrometeorologia (con vortici dell'ordine di metri e centimetri e periodi di secondi). In figura 1.4 è riportato il grafico dimensione – frequenza vortice dal quale è possibile osservare la differenza tra i due casi.

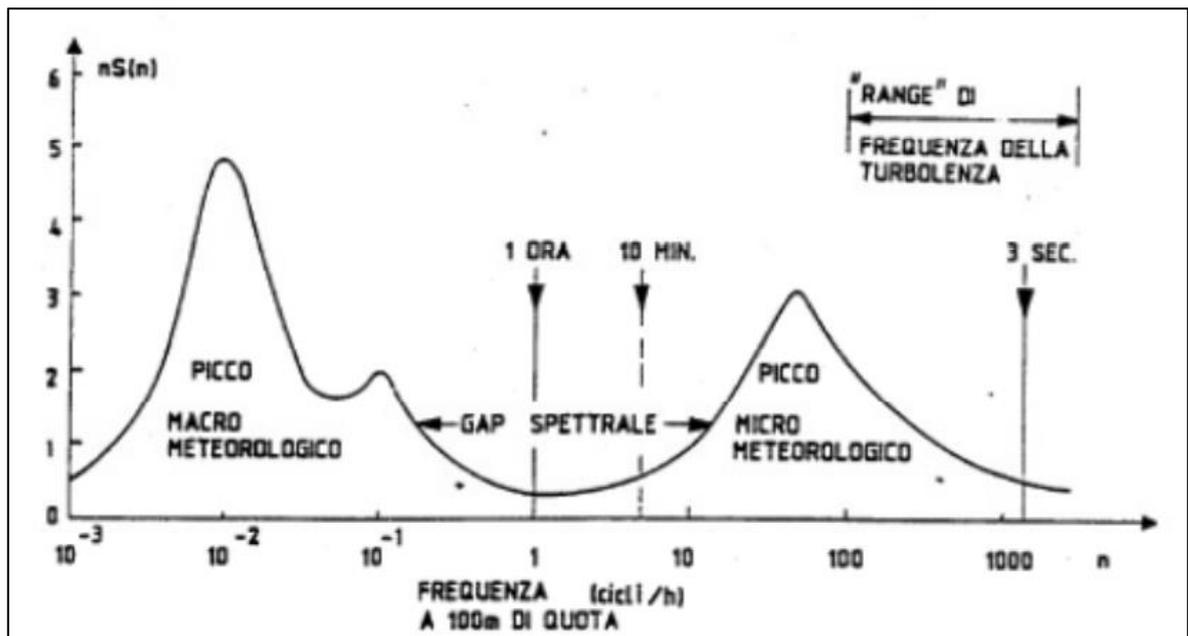


figura 1.4 - Macro e micrometeorologia

A seconda della tipologia e della geolocalizzazione dell'edificio analizzato si può aver a che fare con vortici più o meno grandi. Nel corso del presente elaborato ci si concentrerà sulla

<sup>3</sup> Risonanza: fenomeno fisico che si verifica quando un sistema oscillante viene sottoposto a sollecitazione periodica di frequenza pari alla frequenza naturale di oscillazione del sistema stesso, con conseguente amplificazione progressiva dell'oscillazione stessa. [1]

micrometeorologia e, a tal fine, è necessario introdurre lo Strato Limite Urbano<sup>4</sup> composto a sua volta da tre strati osservabili in figura 1.5:

- Strato di copertura urbana (*Urban Canopy Layer*): strato compreso tra la superficie e l'altezza media degli edifici  $z_h$  caratterizzato dalla presenza di *canyon* urbani all'interno dei quali si sviluppano vortici trasversali rispetto alla direzione del vento stesso;
- Substrato di rugosità (*Roughness SubLayer*): strato compreso tra la superficie e la quota  $z_0$  caratterizzato da turbolenze direttamente interessate dalla presenza degli edifici con caratteristiche variabili nelle tre direzioni;
- Substrato inerziale (*Inertial SubLayer*): strato compreso tra la quota  $z_0$  e un decimo dello strato di rimescolamento<sup>5</sup> caratterizzato da turbolenze che non risentono dell'effetto locale dei singoli edifici e prevede dunque flussi omogenei.

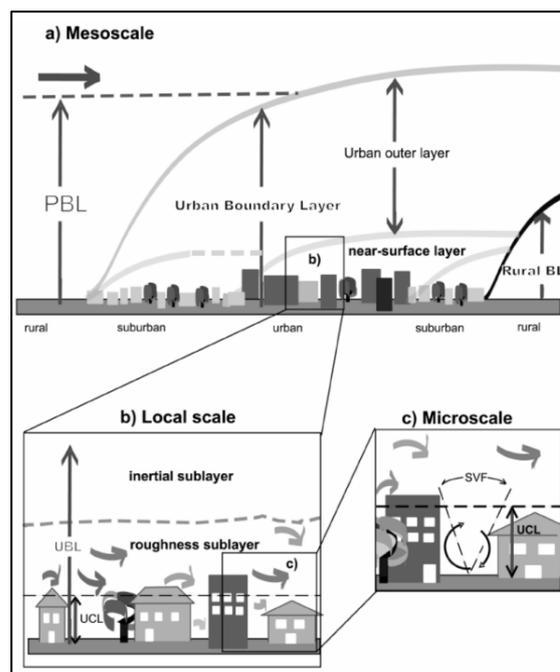


figura 1.5 - Struttura dello Strato Limite Urbano

<sup>4</sup> Strato Limite urbano (in inglese “Urban boundary layer UBL”): è la parte dell’atmosfera in cui vive la maggior parte della popolazione e prevede uno dei microclimi più complessi e meno compresi. [2]

<sup>5</sup> Strato di rimescolamento: strato in cui avvengono in genere le turbolenze, compreso tra lo strato superficiale e lo strato delle nubi.

Un edificio è quindi posto nei primi due strati dello Strato limite urbano ove sono presenti turbolenze di direzione ed entità differenti in funzione del sito ma soprattutto in funzione degli ostacoli circostanti.

## 1.2 AZIONE DEL FLUSSO EOLICO AGENTE SULLE COSTRUZIONI

In accordo alla norma “*CNR-DT 207 R1/2018*”, un corpo fisso e indeformabile immerso nel vento genera due effetti distinti:

- il corpo modifica il flusso, alterandone la sua configurazione su base locale;
- sulla superficie del corpo nasce una pressione  $P$  differente dalla pressione statica  $P_0$  del flusso indisturbato, di conseguenza il corpo è soggetto ad un’azione aerodinamica legata alla variazione di pressione sulla superficie:

$$p = P - P_0$$

Sulla superficie del corpo esposta al flusso si genera un sottile strato laminare o turbolento (figura 1.6) a seconda del numero di Reynolds<sup>6</sup> e della scabrezza superficiale del corpo.

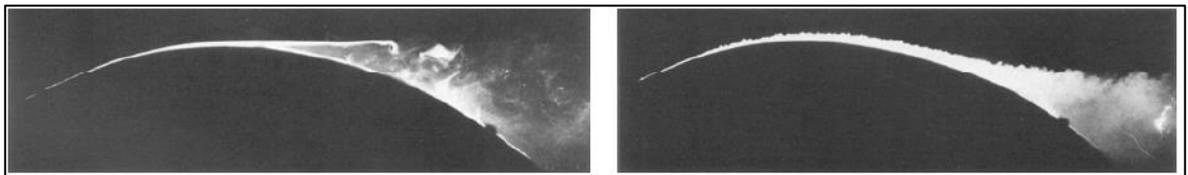


figura 1.6 - Figura2.19 CNR DT 207 - Strato limite laminare (sx) e turbolento (dx)

Tale strato limite ha comportamento differente a seconda del gradiente di pressione:

- nel caso di gradiente di pressione negativo il flusso tende ad accelerare per il principio di Bernoulli e, dunque, lo strato limite si riduce, causando lo spostamento della vorticità verso la superficie;

---

<sup>6</sup> Numero di Reynolds: numero adimensionale proporzionale al rapporto tra forze d’inerzia e forze viscosse definito come:  $R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot l}{\mu}$  ove:

- $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$  : densità dell’aria;
- $V$  : velocità media del vento;
- $l$  : misura spaziale caratteristica del fenomeno (lunghezza di una superficie, diametro di un oggetto);
- $\mu$  : viscosità dinamica dell’aria.

- nel caso, invece, di gradiente di pressione positivo il flusso tende a rallentare e, dunque, lo strato limite aumenta causando lo spostamento della vorticità verso l'esterno. Tale comportamento dà luogo al fenomeno di separazione dello strato limite: a valle di essa i vortici non sono più confinati in una zona sottile aderente alla superficie ma riguardano un'ampia zona di flusso che prende il nome di scia vorticosa, la cui determinazione è essenziale per la progettazione di edifici sottoposti all'azione del vento.

Come anticipato in precedenza, il comportamento del flusso varia a seconda della forma del corpo, alla scabrezza della superficie ed al numero di Reynolds; in relazione all'esempio di cilindro di infinita lunghezza con flusso laminare presente nella "CNR-DT 207 R1/2018" si osserva che:

- per  $Re < 1$  si ha strato limite laminare adiacente a tutto il perimetro del cilindro;
- per  $1 < Re < 30$  si ha ancora strato limite laminare, ma avviene la separazione del flusso dal cilindro che comporta la generazione di due vortici simmetrici;
- per  $30 < Re < 10000$  si ha ancora strato limite laminare, ma avviene la separazione del flusso dal cilindro che comporta la generazione di vortici che dipartono alternativamente e da cui deriva una scia che prende il nome di Von Karman;
- per  $10000 < Re < 20000$  si ha ancora strato limite laminare ma avviene la separazione del flusso dal cilindro che comporta la generazione di vortici di difficile individuazione;
- per  $Re > 20000$  si ha strato limite turbolento con punti di separazione a valle.

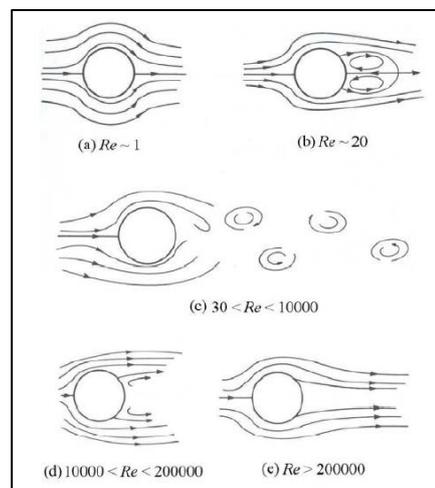


figura 1.7 - figura 2.20 CNR DT 207 - Flusso cilindro di infinita lunghezza

La scabrezza superficiale non modifica i flussi ma interviene sugli intervalli del numero di Reynolds per i quali si verificano: all'aumentare della rugosità i vari regimi si verificano per numeri  $Re$  inferiori.

Passando al caso di corpo a spigoli vivi si ha un comportamento completamente differente con separazione dello stato limite in quanto il flusso non può fisicamente contornare lo spigolo. In relazione all'esempio di prisma a sezione quadrata presente nella norma "CNR-DT 207 R1/2018" si osserva la presenza di una zona di sovrappressione nel prospetto frontale con separazione del flusso in corrispondenza degli spigoli. Sulle facciate laterali avviene invece la formazione di bolle (depressioni), a valle di esse il flusso tende a convergere verso le pareti per separarsi nuovamente in corrispondenza dello spigolo con il prospetto posteriore. Tale comportamento osservabile in figura 1.8 non dipende né dalla scabrezza né dal numero di Reynolds.

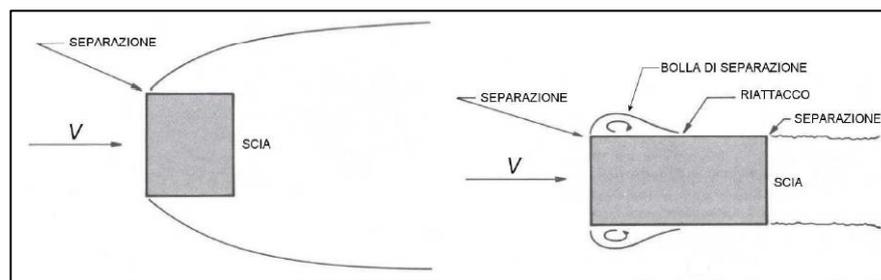


figura 1.8 - figura 2.21 CNR DT 207 - Separazione del flusso da corpi a spigoli vivi

Di conseguenza, nell'analisi di un corpo fisso soggetto all'azione del vento è necessario considerare entrambe le perturbazioni: sia il flusso incidente che la scia vorticoso. L'ingegneria del vento quantifica tali azioni attraverso parametri adimensionali chiamati Coefficienti aerodinamici. Si definisce a tale scopo il coefficiente di pressione  $C_p$  che descrive la pressione relativa di un corpo immerso in un fluido.

Si analizzano a tal fine due punti di un cilindro investito da una corrente di fluido stazionaria come riportato in figura 1.9:

- Punto A: punto indisturbato ( $p_A$ ;  $v_A$ ) posto a distanza infinitamente lontana dalla superficie dell'oggetto;
- Punto B: punto sull'ostacolo ( $p_B$ ;  $v_B$ ) ove avviene la misura.

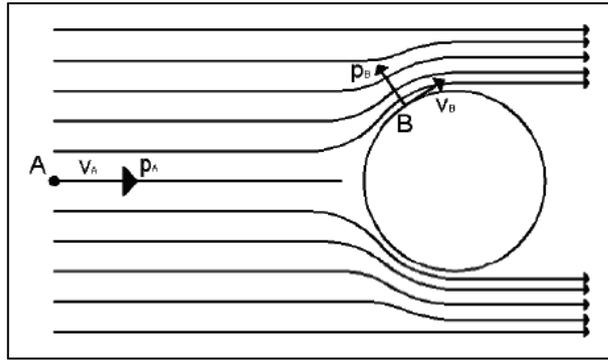


figura 1.9 - Cilindro investito da un flusso di corrente stazionaria

Per il principio di conservazione dell'energia relativo al Teorema di Bernoulli è possibile scrivere:

$$p + \rho \cdot \frac{v^2}{2} = cost \quad \rightarrow \quad p_A + \rho \cdot \frac{v_A^2}{2} = p_B + \rho \cdot \frac{v_B^2}{2}$$

$$p_B - p_A = \rho \cdot \frac{v_A^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{v_B^2}{v_A^2}\right) = \rho \cdot \frac{v_A^2}{2} \cdot C_p \quad \text{ove } C_p = \left(1 - \frac{v_B^2}{v_A^2}\right)$$

Fissate  $(p_0; v_0)$  caratteristiche di riferimento della zona indisturbata, si ha:

$$p_B - p_0 = \rho \cdot \frac{v_0^2}{2} \cdot C_p \quad \rightarrow \quad C_p = \frac{p}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_0^2}$$

ove:

- $\rho$ : densità dell'aria;
- $v_0$ : velocità media o di picco comunque indipendente dal tempo;
- $p$ : pressione:
  - $p = p_B - p_0 > 0 \rightarrow C_p > 0 \rightarrow p_B > p_0$  : sovrappressione, situazione tipica delle superfici frontali esposte al vento incidente, ossia le zone ove lo strato limite è aderente alla superficie del corpo;
  - $p = p_B - p_0 < 0 \rightarrow C_p < 0 \rightarrow p_B < p_0$  : depressione, situazione tipica delle superfici laterali e sottovento (non esposte direttamente al vento), ossia le zone ove avviene la separazione del flusso.

Il coefficiente di pressione  $C_p$  varia nel tempo, nelle zone vorticose anche in maniera repentina, assumendo sia valori positivi che negativi. Inoltre, si differenzia a seconda della faccia su cui agisce il vento: nel caso di faccia esterna si avrà a che fare con pressione  $p_e$  e coefficiente di pressione esterna  $C_{pe}$ , nel caso invece di faccia interna si avranno rispettivamente  $p_i$  e  $C_{pi}$ .

Infine, è necessario osservare che il coefficiente di pressione dipende dall'aerodinamica di circolazione del vento nei dintorni del corpo stesso. In altre parole dipende dalla forma del corpo e dalla posizione del punto considerato rispetto alla superficie stessa.

La stima di tale coefficiente non è definibile con precisione a causa delle molteplici dipendenze, in figura 1.10 si osserva, ad esempio, come un singolo edificio spigoloso investito da un fluido generi addensamento del flusso, a cui corrisponde un aumento della velocità del fluido stesso e di conseguenza variazione di pressione sulle pareti a contatto.

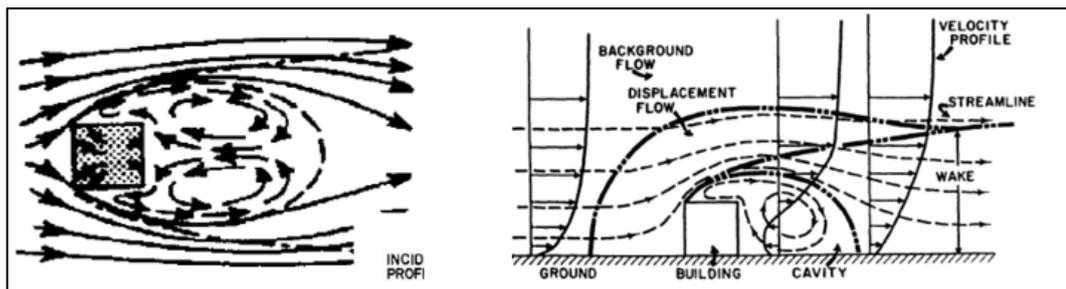


figura 1.10 - Variazioni del flusso d'aria in vicinanza di un edificio singolo

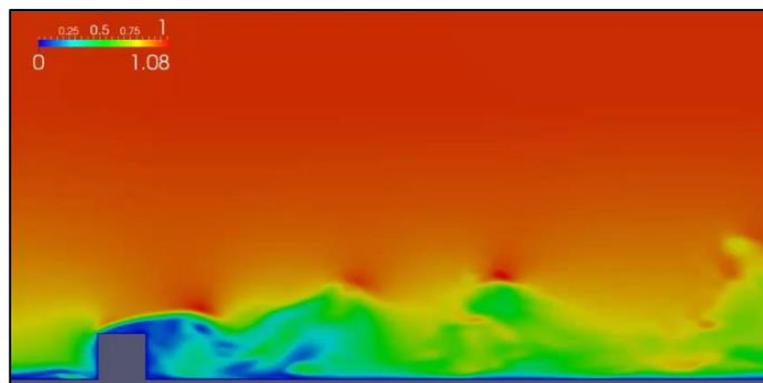


figura 1.11 - Variazioni di velocità in vicinanza di un edificio singolo

Inoltre, ipotizzando di inserire tale edificio in un contesto urbano aumenta notevolmente la difficoltà di determinazione del flusso e, di conseguenza, del coefficiente di pressione. Per tale motivo, oltre all'analisi semplificata da normativa, spesso si ricorre ad analisi sperimentali in galleria del vento o analisi computazionali per mezzo di software CFD.

### **1.2.1 FENOMENI DI INTERAZIONE VENTO-STRUTTURA IN AMBITO URBANO**

In ambito urbano gli edifici non sono localizzati in spazi aperti ma sono bensì circondati da edifici, infrastrutture o altre costruzioni che possono modificare il flusso d'aria con conseguente incremento o riduzione della velocità a seconda del caso analizzato. A tal fine la norma “*CNR-DT 207 R1/2018*” fornisce la seguente definizione di interferenza:

*“si definiscono di interferenza, i fenomeni tali da modificare il comportamento alle azioni del vento che una costruzione o un suo elemento avrebbe se fosse isolato”.*

A seconda delle proprietà delle forze del vento e della tipologia di struttura oggetto di studio, si distinguono tre categorie di fenomeni: variazione della velocità del vento, fenomeni aerodinamici e fenomeni aeroelastici. La sostanziale differenza tra le tre tipologie è legata all'alterazione del flusso d'aria ad opera della struttura. Nella prima il flusso d'aria non risente della risposta strutturale mentre nelle rimanenti la struttura gioca un ruolo fondamentale.

In queste ultime, in accordo agli appunti dell'Ing. Alessandro Biscarini [3], rientrano i fenomeni di sincronizzazione, *galloping*, *flutter*; si tratta di problemi complessi e potenzialmente catastrofici che si verificano perlopiù in presenza di elementi leggeri e deformabili, i quali si scambiano forze dovute ai moti del fluido nel quale sono immersi.

Per fenomeni di sincronizzazione (o interferenza dinamica) si intende l'insieme dei fenomeni che prevedono un'alterazione della risposta dinamica della struttura causata da variazioni delle azioni aerodinamiche subite a causa di un ostacolo nelle vicinanze. Esistono diversi fenomeni, quello più noto e potenzialmente pericoloso riguarda in genere coppie di edifici alti emergenti dal tessuto urbano ove l'edificio sopravento produce un treno di vortici che investe l'edificio sottovento in scia rispetto al primo. Nel caso in cui la frequenza di distacco dei vortici dall'edificio investito direttamente dal vento è uguale alla frequenza propria di

vibrazione del secondo edificio, quest'ultimo subisce un'azione risonante che incide sull'aumento delle accelerazioni di piano e sulla riduzione del comfort degli occupanti.

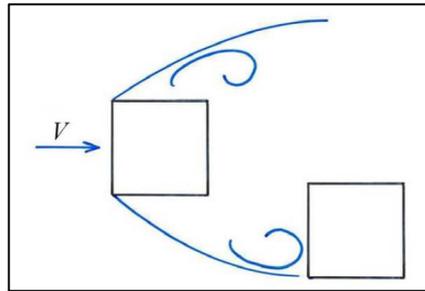


figura 1.12 - figura 2.35 CNR DT 207 - Interferenza dinamica edifici contigui

Il *galloping* è un fenomeno di instabilità aerodinamica che riguarda soprattutto strutture di sezione trasversale non circolare, snelle, leggere e caratterizzate da rapporti di smorzamento limitati, le quali, sotto determinate condizioni, generano oscillazioni trasversali di grande ampiezza.

Infine, il *flutter* è un fenomeno d'instabilità aeroelastica associato a variazioni sia della rigidità che dello smorzamento della struttura. Tale problematica è legata alle variazioni delle forze aerodinamiche conseguenti al diverso orientamento che le diverse parti della struttura assumono a causa delle proprie oscillazioni rispetto alla direzione del vento.

Nel corso del presente elaborato, dal momento che si ha a che fare con strutture rigide, non è possibile incorrere né nei fenomeni aeroelastici, né nei fenomeni aerodinamici. Ci si concentrerà dunque nello studio dei fenomeni di interferenza legati alle variazioni della velocità del vento.

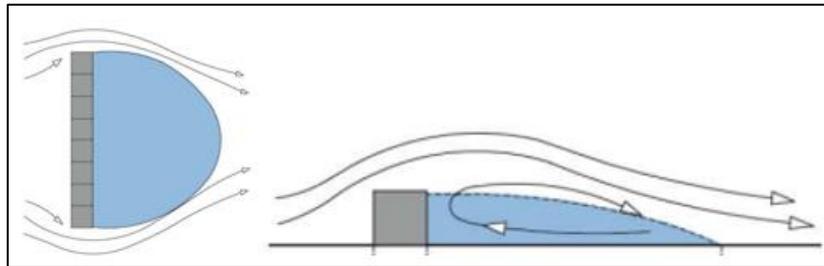
Per quest'ultimi si hanno problematiche di interferenza quando due o più corpi fisici, indeformabili e ravvicinati, generano variazioni del flusso d'aria e delle azioni che competerebbero agli stessi se fossero isolati. Tale fenomeno assume notevole rilevanza in presenza di edifici di forma e caratteristiche analoghe come, ad esempio, edifici alti che fuoriescono dal tessuto urbano.

In relazione all'ambito urbano ove è localizzato l'edificio esistono diversi fenomeni che possono influenzare la pressione esterna, globale e locale, e sono dunque da considerare nella progettazione dell'involucro edilizio. Di seguito sono elencati i più comuni:

- effetto ombra;
- effetto barriera;
- effetto scia;
- effetto canale;
- effetto venturi.

Tali effetti variano con le dimensioni, la forma e l'orientamento dell'edificio e con il suo posizionamento in relazione al contesto circostante. Questi, inoltre, si influenzano vicendevolmente, motivo per cui, al fine di determinare con precisione la distribuzione del flusso d'aria nelle vicinanze della struttura, è necessario effettuare analisi più approfondite.

Seguendo l'elenco precedente, l'effetto ombra si verifica nella zona sottovento, posteriore al fronte esposto all'impatto di vento, e consiste in una zona con pressione negativa o bassa pressione (depressione). In figura 1.13 vengono riportati andamenti qualitativi di tali zone in pianta, ed in prospettiva, al variare della forma e dell'orientamento della struttura.



*figura 1.13 – Rappresentazione qualitative dell'effetto ombra in pianta ed in prospettiva*

L'ampiezza di tale zona varia a seconda delle dimensioni e della forma dell'edificio. All'aumentare della distanza dal fronte posteriore dell'edificio il vento ricomincia a riacquistare gradualmente la sua velocità originaria sino a riprendere la velocità di flusso

libero. In presenza di *canyon* urbani<sup>7</sup> il vento non riesce a riacquistare la condizione di flusso stazionario e si vengono dunque a creare dei vortici differenti a seconda del rapporto:

$$\text{Aspect ratio} = \frac{H}{d}$$

ove:

- $H$ : altezza degli edifici o ostacoli;
- $d$ : distanza tra due fronti paralleli ed opposti del *canyon*.

A seconda di studi sperimentali condotti dall' Università di Cagliari [4] si possono verificare tre condizioni differenti:

- se  $\frac{H}{d} < 1.5$  si è nella condizione cosiddetta “*skimming flow*” tale per cui si genera un singolo vortice stabile all'interno del *canyon* caratterizzato da una velocità inferiore rispetto al flusso soprastante impedendogli dunque di entrare nel *canyon* (figura 1.14);
- se  $1.5 < \frac{H}{d} < 2.5$  si è nella condizione cosiddetta “*wake interference flow*” tale per cui si generano due vortici interagenti tra di loro: uno più grande ed uno più piccolo il cui centro risulta spostato sulla parete dell'edificio investito direttamente dal vento. Condizione caratterizzata da scambio d'aria limitato con il flusso soprastante (figura 1.15);
- se  $\frac{H}{d} > 2.5$  si è nella condizione cosiddetta “*isolated roughness flow*” ove il flusso è analogo a quello che investe un edificio isolato con formazione di due vortici caratterizzati da comportamento variabile a seconda della rugosità. Casistica caratterizzata da completo scambio d'aria con il flusso soprastante (figura 1.16).

---

<sup>7</sup> *Canyon* urbano (noto anche come strada a *canyon*): luogo in cui la strada è fiancheggiata da edifici su entrambi i lati i quali creano un *canyon*. Tale conformazione, definita dall'uomo, viene generata in presenza di strade, le quali separano densi blocchi di strutture. I *canyon* urbani influenzano varie condizioni locali, tra cui temperatura, vento, luce, qualità dell'aria e ricezione radio, inclusi segnali di navigazione satellitare. [5]

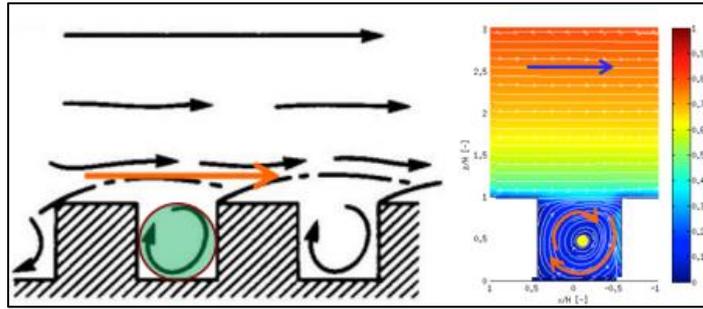


figura 1.14 - skimming flow  $\frac{H}{d} < 1.5$

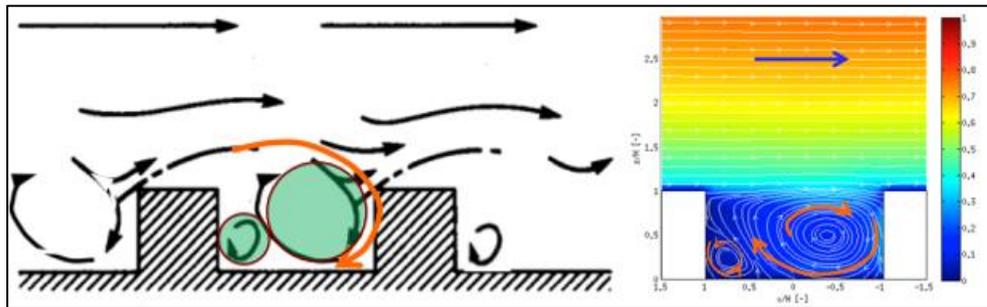


figura 1.15 - wake interference flow  $1.5 < \frac{H}{d} < 2.5$

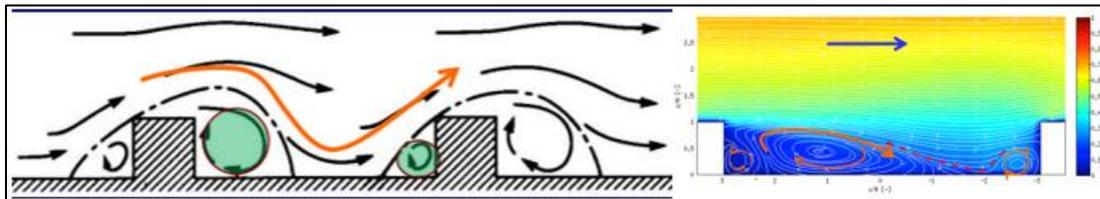
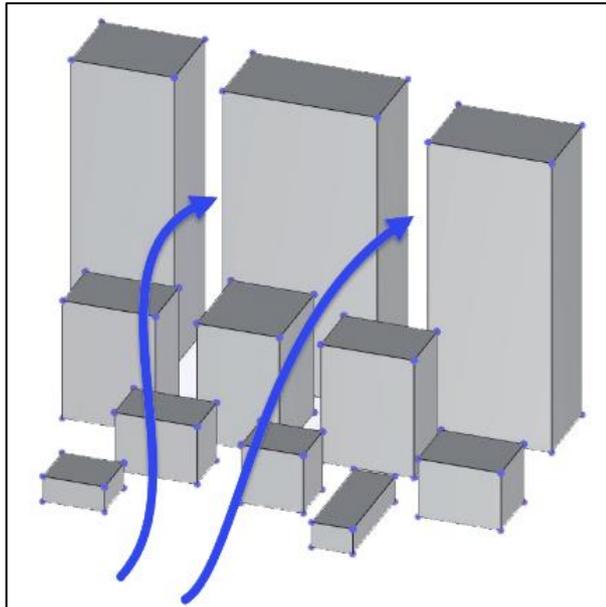


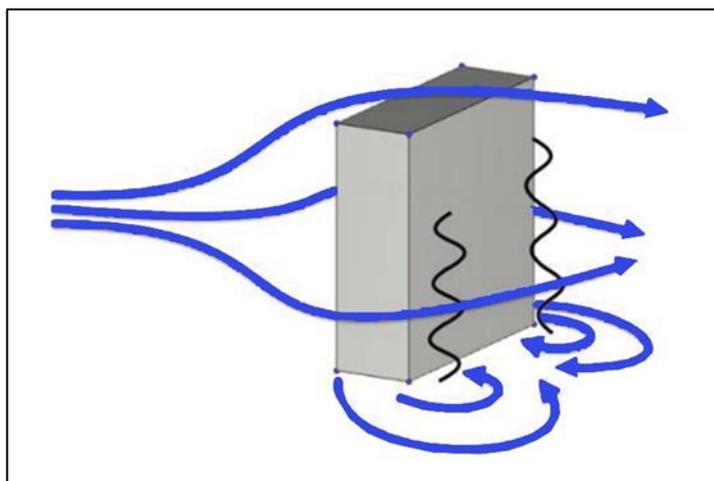
figura 1.16 - isolated roughness flow  $\frac{H}{d} > 2.5$

Il secondo fenomeno dell'elenco di cui sopra è il cosiddetto effetto barriera, che prevede la riduzione della velocità del vento ad opera di un edificio o di una serie di edifici anteposti all'edificio di interesse, rispetto alla direzione di provenienza dei venti. Tale effetto risulta incrementato nel caso in cui tali edifici siano posti su più file tra loro parallele. In figura 1.17 viene riportato un esempio qualitativo di tale effetto.



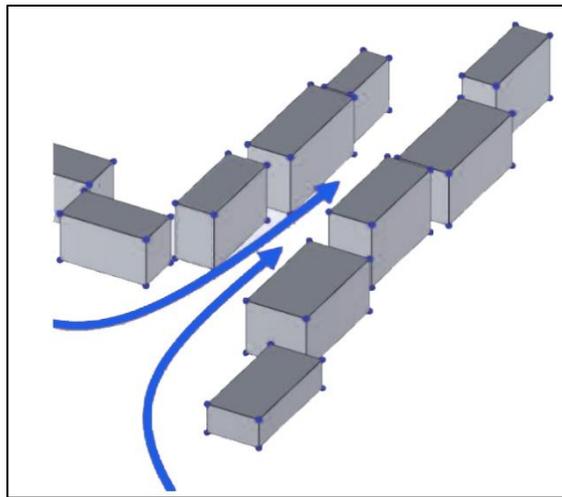
*figura 1.17 - Andamento qualitativo dell'effetto barriera*

L'effetto scia (punto 3 dell'elenco di cui sopra) è un fenomeno presente nella zona d'ombra del vento, e consta in moti turbolenti i quali dipendono, oltre che dalla geometria e dalle dimensioni dell'edificio, anche dall'angolo di incidenza del vento rispetto alla struttura. Quest'ultimo aspetto complica maggiormente le analisi in quanto, oltre alla modellazione dell'edificio con la forma e la geometria esatta, è necessaria l'individuazione della direzione prevalente del vento nel sito in esame. In figura 1.18 viene riportato l'andamento qualitativo di tale fenomeno.



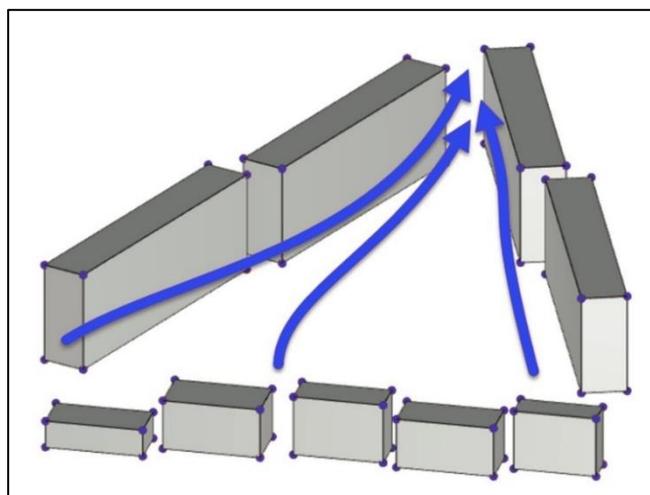
*figura 1.18 - Andamento qualitativo dell'effetto scia*

L'effetto canale è, invece, un fenomeno che prevede l'incanalamento del flusso d'aria favorito dalla morfologia urbana attraverso i cosiddetti *canyon* urbani. In presenza di fronti edilizi allineati, più o meno continui, disposti parallelamente alla direzione di provenienza del vento, si ha il convogliamento del vento nel canale con conseguente riduzione della pressione del vento sulle facciate degli edifici esposti sul canale.



*figura 1.19 – Andamento qualitative dell'effetto canale*

Infine, l'ultimo caso è l'effetto venturi. Si tratta di un fenomeno che prevede l'aumento della velocità del vento e la riduzione di pressione, dovuti alla diminuzione della sezione del *canyon* urbano, ovvero ad un restringimento della sezione del flusso d'aria. La conformazione, graduale o repentina, del sito ove è localizzato l'edificio influisce sulla variazione di velocità del vento e sulla conseguente pressione sugli edifici.



*figura 1.20 – Andamento qualitativo dell'effetto venturi generato da canyon urbano*

Si tratta di effetti interagenti che generano comportamenti differenti a seconda della conformazione del tessuto urbano, della direzione e della velocità del vento. Tali molteplici dipendenze non permettono di definire univoche relazioni in grado di rappresentare in maniera precisa i possibili effetti negativi che ne potrebbero derivare. È per tale ragione che la normativa prevede l'analisi di un singolo edificio, restituendo così risultati sovradimensionati rispetto a quelli reali che tengono conto di tutti questi possibili effetti negativi.



## 2 ANALISI DELL'AZIONE DEL VENTO AGENTE SU EDIFICI A TORRE

---

### 2.1 IL CASO DI STUDIO: STONECUTTER COURT BUILDING

Prima di procedere all'analisi dell'azione del vento è necessario introdurre l'edificio analizzato nel corso del presente elaborato ossia *Stonecutter Court Building*. L'immobile è sito all'angolo tra *Stonecutter Court* e *Farringdon Street*, nel quartiere di *Farringdon*, poco al di fuori del centro cittadino di Londra (figura 2.1, figura 2.2).



figura 2.1 - Geolocalizzazione Stonecutter Court Building

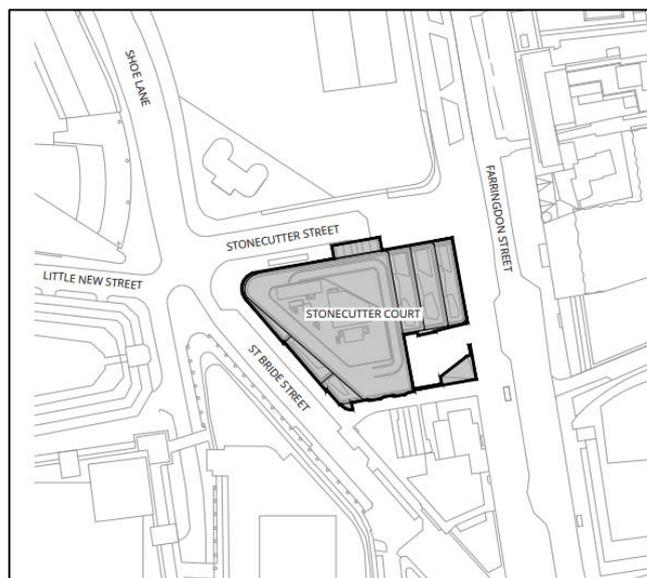
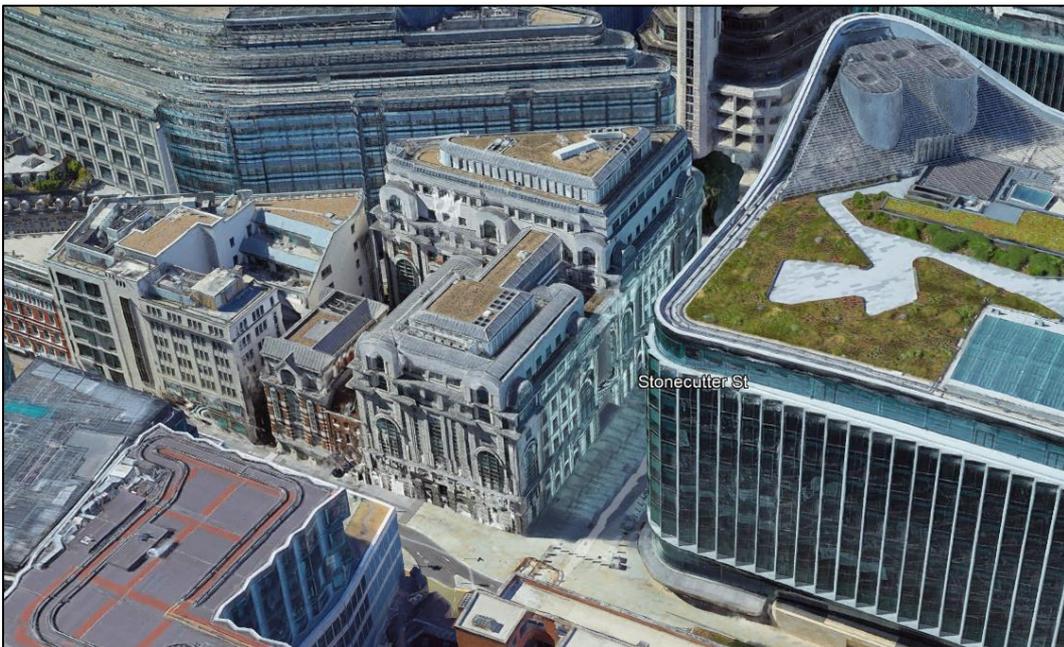


figura 2.2 - Vista in pianta - Google maps

Il progetto prevede una riqualificazione dell'intero edificio: viene demolita la struttura esistente osservabile nelle figure seguenti mantenendo solo l'involucro edilizio esistente al di sotto del livello del suolo.



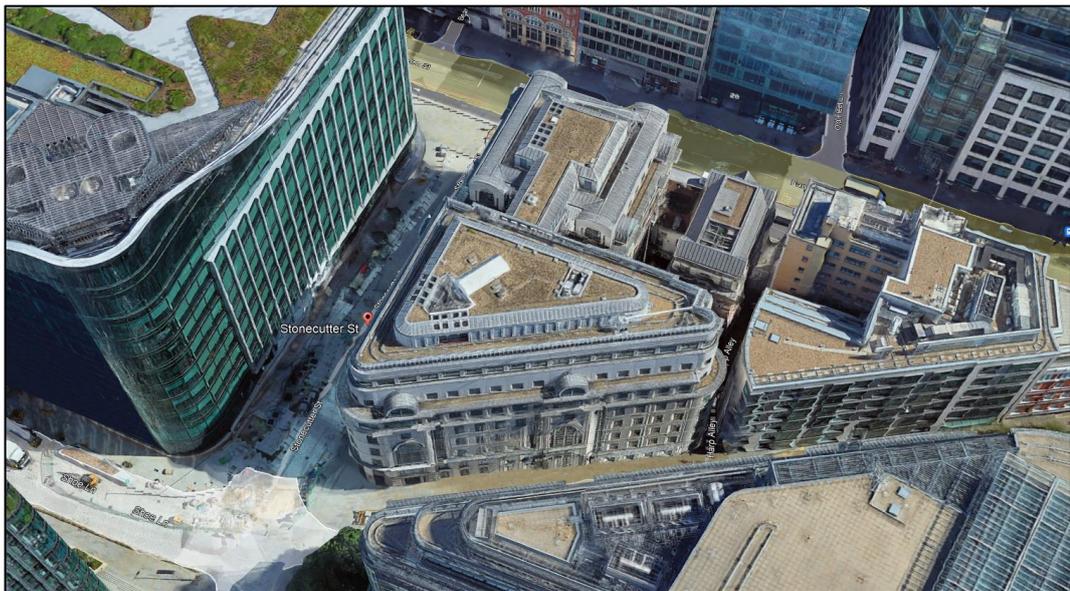
*figura 2.3 - Stato di fatto - 1° vista*



*figura 2.4 - Stato di fatto - 2° vista*



*figura 2.5 - Stato di fatto - 3° vista*



*figura 2.6 - Stato di fatto - 4° vista*



figura 2.7 - Stato di fatto - 5° vista

In superficie, al di sopra del livello del suolo, è invece previsto un edificio di nuova costruzione, progettato in sintonia alle richieste del quartiere circostante con grandi spazi interni (*open space*) e spazi esterni, tra cui 6 terrazze e un cortile interno. Quest'ultimo è stato profondamente riadattato per consentire una migliore accessibilità da parte del pubblico, creando un giardino, una caffetteria ed al tempo stesso inglobando *l'Hoop & Grapes*, pub di interesse storico e culturale del 18° secolo.

A tal fine, Ajay Phull, capo investimenti UK di *Ivanhoé Cambridge*<sup>8</sup>, società che finanzia il 50% del progetto, ha dichiarato:

*“l’area nei dintorni a Stonecutter Court Building ha visto una completa trasformazione negli ultimi dieci anni e, una volta riqualificato, Stonecutter Court fornirà uno spazio all’avanguardia, flessibile e verde per tutti gli stakeholder locali”.*

---

<sup>8</sup> Ivanhoé Cambridge: società immobiliare canadese che sviluppa ed investe in proprietà immobiliari di alta qualità in tutto il mondo [6].



*figura 2.8 - Render stato di progetto - 1° vista*



*figura 2.9 - Render stato di progetto - 2° vista*



*figura 2.10 - Render stato di progetto - 3° vista*



*figura 2.11 - Render stato di progetto - 4° vista*



figura 2.12 - Render stato di progetto - 5° vista

La nuova costruzione prevede 13 piani e 250000 m<sup>2</sup> di spazi adibiti ad uffici con l'obiettivo di garantire benessere e flessibilità agli utenti sul luogo di lavoro. Si tratta di un edificio ad alta innovazione, sono infatti previsti metodi di risparmio energetico, tra cui isolamento termico, riscaldamento ad alta efficienza e 2700 m<sup>2</sup> di pannelli solari che mirano ad ottenere importanti certificazioni di qualità dell'edificio stesso, quali *BREEAM New Construction 2018 Excellent*<sup>9</sup> e *Well Core & Shell Gold*<sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup> New Construction 2018 Excellent: certificazione attribuita agli edifici di nuova costruzione che rispettano requisiti stringenti al fine di garantire un impatto economico, sociale ed ambientale sostenibile.

<sup>10</sup> Well Core & Shell Gold: certificazione che mira a garantire produttività, salute e benessere umano di tutte le persone che visitano l'edificio certificato.

Kari Pitkin, capo sviluppo Europa di *Allianz Real Estate*<sup>11</sup>, società che ha finanziato il restante 50% dell'edificio, ha commentato:

*“Ci aspettiamo che gli edifici situati in posizione centrale di città chiave, gestiti in modo sostenibile e che si concentrano fortemente sul benessere e sull'esperienza degli utenti, saranno i luoghi di lavoro più ricercati dopo la pandemia.”*

E ancora, Edmund Reed, manager di *Travers Smith*<sup>12</sup>, studio legale che ha commissionato l'opera per insediare la nuova sede, ha affermato:

*“Siamo felici di aver assicurato Stonecutter Court come nostro nuovo spazio per uffici. Con il suo design moderno, sostenibile e inclusivo, questo edificio riflette la nostra visione e fornirà un ambiente di lavoro eccitante e vibrante che piacerà sia ai nostri collaboratori che ai nostri clienti.”*

Il focus del presente elaborato riguarda la progettazione delle facciate dell'edificio, di cui se ne occupa la *Focchi SPA*<sup>13</sup> su commessa dello studio *tp bennett*<sup>14</sup>. Nel caso in esame l'edificio prevede sette tipologie di facciate differenti la cui disposizione è osservabile nelle figure seguenti:

- Facciata tipo 1: facciata di tipo “unit”<sup>15</sup>, presente dal piano 2 al piano 12 evidenziata in verde;
- Facciata tipo 2: facciata di tipo “unit”, presente dal piano 8 al piano 14 evidenziata in azzurro;
- Facciata tipo 3: facciata di tipo “unit” di forma triangolare e trapezoidale, presente dal piano 2 al piano 14 evidenziata in giallo;

---

<sup>11</sup> Allianz Real Estate: Società di gestori di investimenti immobiliari che sviluppa ed esegue strategie di investimento per conto di investitori a livello globale.

<sup>12</sup> Travers Smith: studio legale leader in investimenti, cause e controversie legate al settore industriale. [8]

<sup>13</sup> Focchi SPA: azienda con sedi a Rimini, Londra e New York leader in Europa e nel mondo per la realizzazione di facciate continue. [9]

<sup>14</sup> tp bennett: studio di architettura con sedi a Londra, Manchester e Leeds. [9]

<sup>15</sup> facciata di tipo “unit”: facciata anche chiamata a cellule, è costituita da cellule prefabbricate contenenti sia il reticolo strutturale che il tamponamento (opaco o trasparente). Le cellule vengono assemblate in fabbrica e quindi trasportate in cantiere ove vengono montate sull'edificio.

- Facciata tipo 4: facciata di tipo “stick”<sup>16</sup>, presente dal piano terra al piano 2 evidenziata in rosa;
- Facciata tipo 5: facciata di tipo “stick” di forma triangolare e trapezoidale, presente dal piano terra al piano 2 evidenziata in arancione;
- Facciata tipo 6: facciata di tipo “stick”, presente dal piano terra al piano 2 evidenziata in viola;
- Facciata tipo 7: facciata composta da pannelli di alluminio, presente dal piano terra al piano 2 evidenziata in azzurro ciano.

Tutte le tipologie sopra esposte vengono progettate come strutture auto-portanti le quali trasmettono i diversi carichi a cui sono soggette (pesi propri, carichi imposti, azione del vento, neve e azione sismica) alla struttura principale dell’edificio.

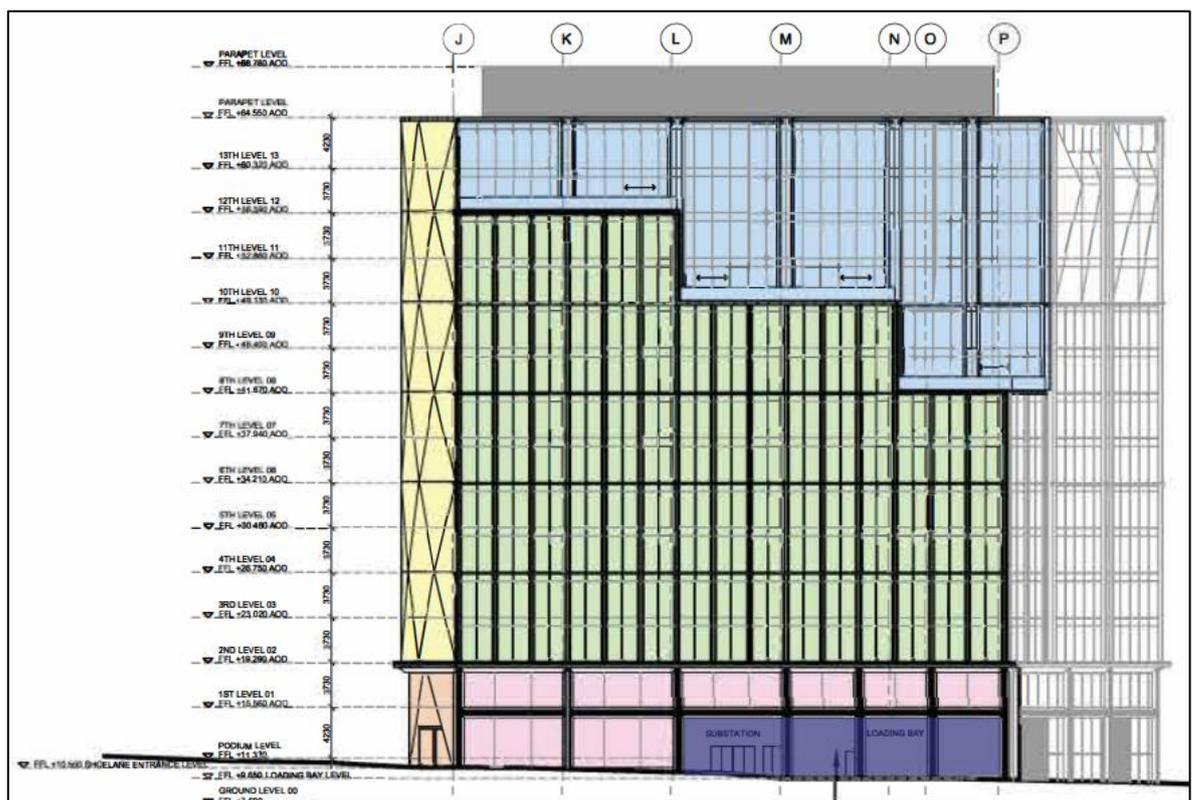


figura 2.13 - Tipologie facciate - Prospetto Ovest

<sup>16</sup> facciata di tipo “stick”: facciata anche chiamata a montanti e traversi, si basa su un reticolo strutturale formato appunto da elementi verticali ed orizzontali a cui vengono poi applicati i tamponamenti opachi o trasparenti.

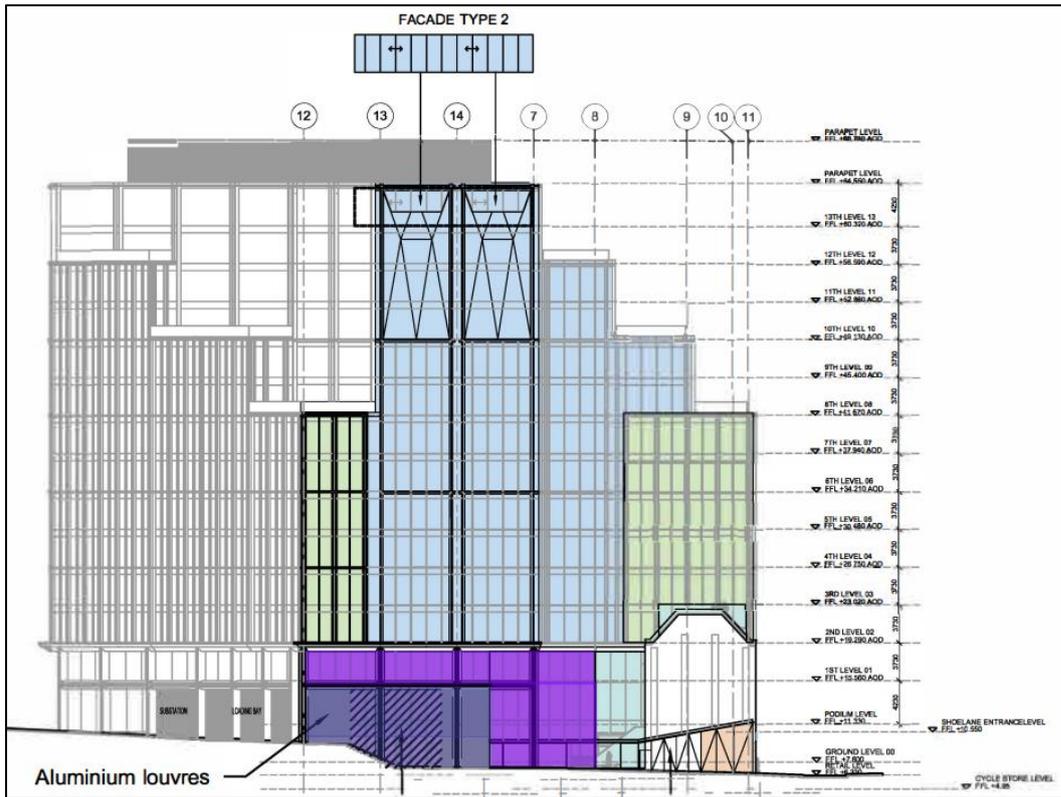


figura 2.14 – Tipologie facciate – prospetto Sud



figura 2.15 - Tipologie facciate - Prospetto Est

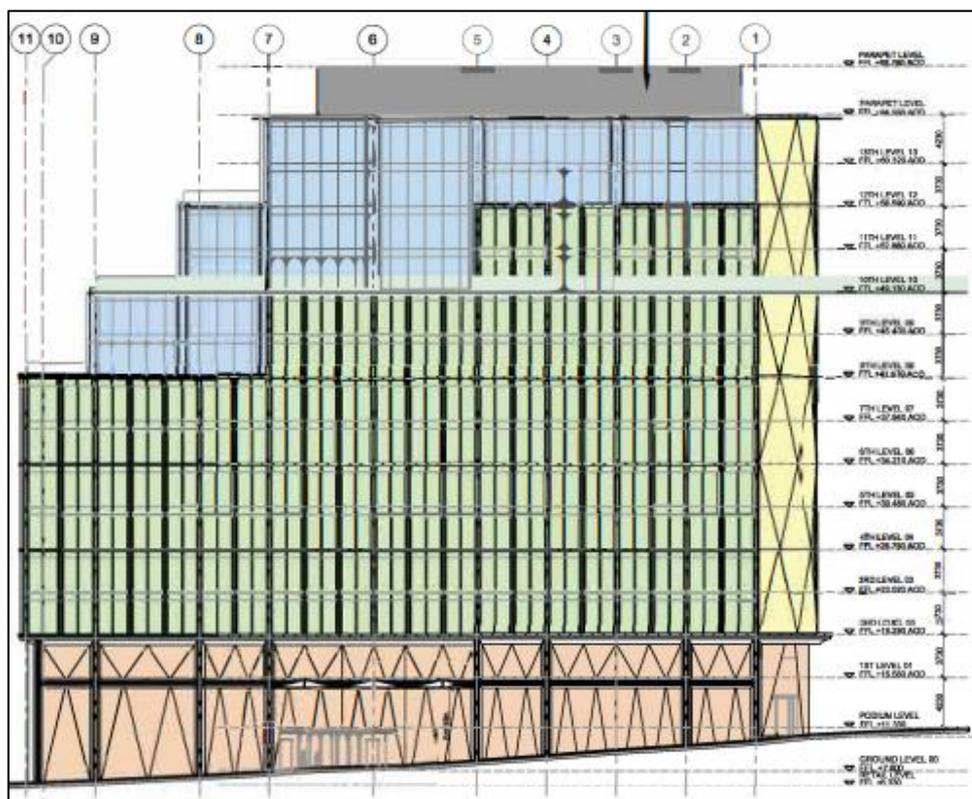


figura 2.16 - Tipologie facciate - Prospetto Nord

## 2.2 ANALISI ANALITICA DA NORMATIVA

In presenza di edifici a torre, il carico da vento è l'azione con importanza prevalente, per tale motivo sarà l'azione su cui si porrà maggiormente l'attenzione nel corso della progettazione nonché nel corso del presente elaborato. In particolare, si procederà ad esaminare varie tipologie di analisi, in primis quella da normativa.

Essendo localizzato in Inghilterra, più precisamente a Londra, si procede all'analisi dell'azione del vento da normativa in accordo all' Eurocodice 1 "EN 1991-1-4:2005 Eurocode 1: Actions on structures – part 1-4: General actions – wind actions" ed al relativo annesso nazionale "National annex for building structures to BS EN 1991-1-4:2005".

Il vento ha direzione prevalentemente orizzontale ed esercita sulle costruzioni azioni variabili nel tempo e nello spazio. Nel caso di edifici di forma standard, i carichi del vento vengono ricondotti ad azioni statiche equivalenti. Se si tratta, invece, di edifici di forma

complessa (elevata altezza, elevata snellezza...) è necessario effettuare osservazioni più approfondite.

### 2.2.1 VELOCITÀ DEL VENTO

Come già rilevato nel corso del primo capitolo, il vento è composto da due componenti: andamento medio e fluttuazione attorno a tale andamento medio.

In primo luogo, si procede al calcolo della velocità fondamentale media  $V_{b,0}$ , definita come il valor medio della velocità a 10 metri di altezza su terreno pianeggiante di categoria di esposizione II<sup>17</sup>, riferito ad un periodo di ritorno  $T_R = 50$  anni per 10 minuti:

$$V_{b,0} = V_{b,map} \cdot C_{alt} \cdot C_{dir} \cdot C_{season} = 21,5 \text{ m/s} \cdot 1.008 \cdot 1 \cdot 1 = 21,7 \text{ m/s}$$

Ove:

- $V_{b,map}$ : velocità base di riferimento al livello del mare definita dall'annesso nazionale in funzione del sito in cui sorge la costruzione, dalla figura 2.17 tale valore è pari a  $V_{b,map} = 21,5 \text{ m/s}$ ;
- $C_{alt}$ : Coefficiente di altitudine, nel caso in esame Londra è localizzata a 11 m sul livello del mare e dunque il coefficiente è fornito dalla seguente espressione:

$$C_{alt} = 1 + 0.001 \cdot Alt \cdot \left(\frac{10}{Z_s^{18}}\right)^{0.2} = 1 + 0.001 \cdot 11 \cdot \left(\frac{10}{68}\right)^{0.2} = 1.008$$

- $C_{dir}$ : Coefficiente di direzionalità, può essere ricavato dall'annesso nazionale ma è lecito assumere il valore convenzionale pari a 1;
- $C_{season}$ : Coefficiente di stagionalità, può anch'esso essere ricavato dall'annesso nazionale ma è lecito assumere il valore convenzionale pari a 1.

---

<sup>17</sup> Terreno di categoria di esposizione II: Terreno che prevede ostacoli radi e lontani dall'edificio analizzato

<sup>18</sup>  $Z_s = 68$  m: quota dell'edificio sul livello del mare

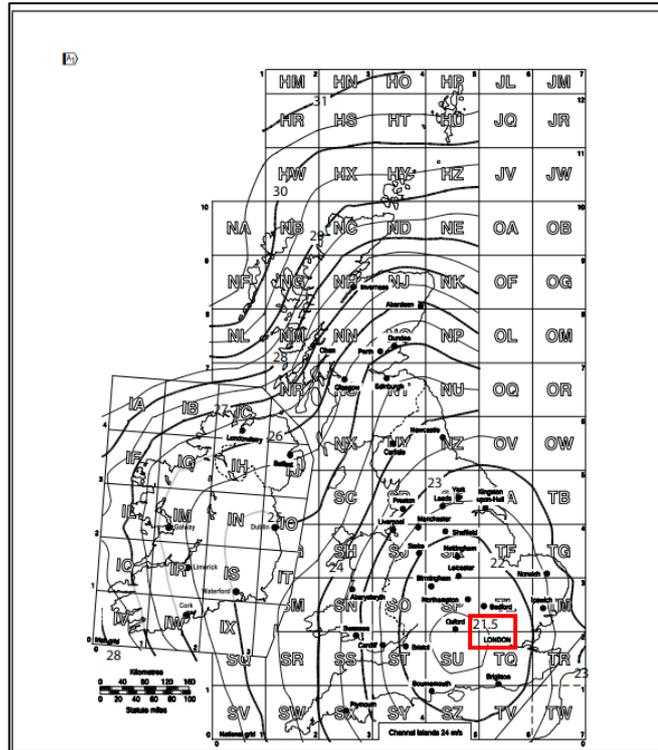


figura 2.17 - Valore della velocità base del vento - Figure NA.1 (UK NA)

Successivamente alla velocità di base si dovrà determinare la velocità di riferimento  $V_b$ , definita come il valor medio della velocità a 10 metri di altezza su terreno pianeggiante di categoria di esposizione II, riferito ad un periodo di ritorno  $T_R$  per 10 minuti. Tale definizione si discosta dalla precedente grazie all'introduzione del coefficiente di probabilità  $C_{prob}$ , il quale permette di tener in considerazione del periodo di ritorno dell'azione del vento definito come:

$$V_b = V_{b,0} \cdot C_{prob}$$

$$C_{prob} = \left( \frac{1 - K^{19} \cdot \ln(-\ln(1 - \rho^{20}))}{1 - K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^{n^{21}} = \left( \frac{1 - 0,2 \cdot \ln(-\ln(1 - 1,226))}{1 - K \cdot \ln(-\ln(0,98))} \right)^{0,5} = 1$$

<sup>19</sup>  $K = 0.2$ : parametro di forma

<sup>20</sup>  $\rho = 1,226 \text{ Kg/m}^3$ : densità dell'aria

<sup>21</sup>  $n = 0.3$ : esponente

Nel caso in esame, avendo assunto  $T_R = 50$  anni, si è ottenuto  $C_{prob} = 1$  e di conseguenza si ha:

$$V_b = V_{b,0} = 21,7 \text{ m/s}$$

Oltre alla velocità di riferimento è interessante analizzare anche la velocità media del vento che sarà ovviamente inferiore a quella calcolata in precedenza in quanto trascura il fenomeno delle turbolenze. Tale velocità varia in relazione all'altezza di riferimento e dipende dalla rugosità e dall'orografia del terreno secondo la seguente espressione:

$$V_m(z) = C_r(z) \cdot C_o(z) \cdot V_b$$

Ove:

- $C_r(z)$ : coefficiente di rugosità, necessario per considerare l'influenza delle asperità del terreno circostante all'edificio;
- $C_o(z)$ : coefficiente di orografia, necessario per considerare l'influenza dell'orografia (rilievi montuosi, colline, spazi aperti...) sulla pressione del terreno in adiacenza alla struttura.

Per quanto riguarda il coefficiente di rugosità  $C_r$  l'eurocodice prevede due formule differenti in relazione all'altezza dell'edificio:

$$\begin{cases} C_r(z) = K_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) & \text{se } z \leq z_{min} \\ C_r(z) = C_r(z_{min}) & \text{se } z_{min} \leq z \leq z_{max} \end{cases}$$

Ove:

- $z_{min}$ : altezza minima, definita dalla tabella 4.1 dell'Eurocodice riportata in figura 2.18;
- $z_{max}$ : altezza massima, pari a 200m;
- $z_0$ : lunghezza di rugosità, funzione della categoria del terreno e ricavabile anch'essa dalla tabella 4.1;
- $K_r$ : fattore del terreno funzione della lunghezza di rugosità, calcolato grazie alla seguente espressione:

$$K_r = 0,19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}$$

Terrain category	$z_0$ m	$z_{min}$ m
0 Sea or coastal area exposed to the open sea	0,003	1
I Lakes or flat and horizontal area with negligible vegetation and without obstacles	0,01	1
II Area with low vegetation such as grass and isolated obstacles (trees, buildings) with separations of at least 20 obstacle heights	0,05	2
III Area with regular cover of vegetation or buildings or with isolated obstacles with separations of maximum 20 obstacle heights (such as villages, suburban terrain, permanent forest)	0,3	5
IV Area in which at least 15 % of the surface is covered with buildings and their average height exceeds 15 m	1,0	10

NOTE: The terrain categories are illustrated in A.1.

figura 2.18 – categorie di terreno – Table 4.1 UNI EN 1991-1-4:2005

*Stonecutter Court Building* è situato nel centro di Londra, si ricade dunque in un terreno di categoria IV tale per cui:

$$K_r = 0,19 \cdot \left( \frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left( \frac{1}{0,05} \right)^{0,07} = 0,234$$

Il secondo coefficiente presente nella precedente relazione è il coefficiente di orografia, il quale dipende dalla presenza di eventuali rilievi montuosi o colline presenti nei dintorni della struttura analizzata. Nel caso in esame, avendo l'edificio sede a Londra ed essendo il terreno pianeggiante, la normativa permette di adottare un coefficiente unitario  $C_o = 1$ .

Dalla tabella in figura 2.19 si osserva come, al crescere di quota del punto analizzato, si ha un incremento del coefficiente di rugosità. Ciò comporta, a sua volta, un aumento della velocità media, che si mantiene comunque inferiore a quella di riferimento.

VELOCITÀ MEDIA			
z [m]	C <sub>r</sub> (z)	C <sub>0</sub>	V <sub>m</sub> (z)
0	0.54	1	11.69
5	0.54	1	11.69
10	0.54	1	11.69
15	0.63	1	13.75
20	0.70	1	15.21
25	0.75	1	16.34
30	0.80	1	17.26
35	0.83	1	18.05
40	0.86	1	18.72
45	0.89	1	19.32
50	0.92	1	19.86
55	0.94	1	20.34
57	0.95	1	20.52

figura 2.19 - Velocità media del vento al variare di quota

### 2.2.2 PRESSIONE DEL VENTO

Definita la velocità del vento, il parametro più importante per la progettazione di costruzioni civili soggette all'azione del vento è senza ombra di dubbio la pressione del vento. In accordo al paragrafo 4.5 dell'Eurocodice, la pressione base del vento è definita dalla seguente espressione:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,226 \cdot 21,7^2 = 288,6 \text{ N/m}^2 = 0,289 \text{ kN/m}^2$$

A partire dalla pressione base è poi possibile ricavare la pressione di picco. Tale pressione varia con l'altezza e include sia l'andamento medio che le turbolenze, in quanto rappresenta l'azione che effettivamente sollecita l'edificio, ed è rappresentata dalla seguente relazione:

$$q_p(z) = q_b \cdot C_e \cdot C_{e,T} \cdot C_o = 0,289 \cdot 3,6 \cdot 1 \cdot 1 = 1,04 \text{ kN/m}^2$$

Ove:

- $C_e(z)$ : coefficiente di esposizione, necessario per considerare la variabilità della pressione del vento a seconda dell'altezza del punto analizzato ed alla distanza dell'edificio dalla costa;
- $C_{e,T}$ : coefficiente correttivo di esposizione, necessario per correggere il coefficiente di esposizione nel caso di edifici realizzati in città;
- $C_o$ : coefficiente dell'orografia, dalla trattazione precedente è noto  $C_o = 1$ .

I tre coefficienti hanno lo scopo di adattare le formule della normativa all'edificio oggetto di studio, in modo tale da rappresentare il reale comportamento della struttura sotto l'azione del vento. Ovviamente l'utilizzo di tali coefficienti comporta delle approssimazioni a favor di sicurezza (entità maggiori rispetto a quelle reali), in quanto vengono calibrati per edifici di forma standard.

L'eurocodice rimanda la valutazione di tali coefficienti agli annessi nazionali, in quanto dipendono appunto da diverse variabili tali per cui non è possibile unificare i valori a livello Europeo. In accordo al paragrafo NA.2.17 del "National Annex to BS EN 1991-1-4:2005", è possibile definire il coefficiente di esposizione  $C_e$  grazie al grafico in figura 2.20. Conoscendo la distanza dalla costa pari a 35 km e l'altezza dell'edificio pari a  $z = 57 m$  si ottiene:

$$C_e = 3,6$$

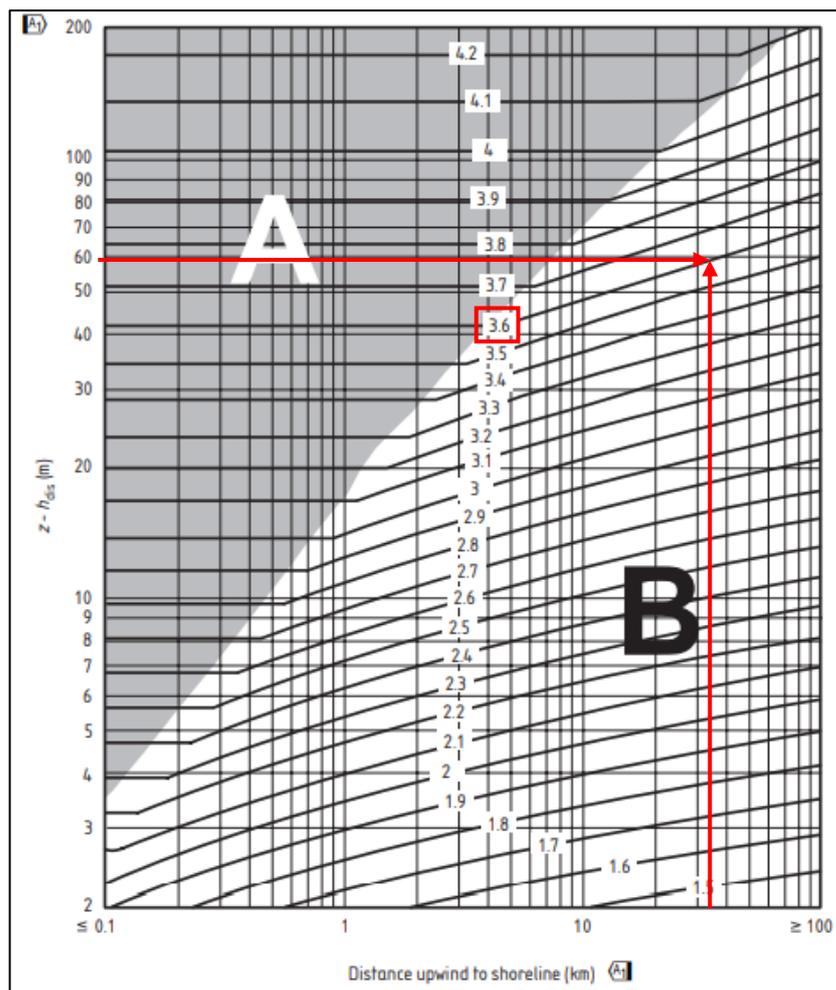


figura 2.20 - Coefficiente di esposizione  $C_e$  - Figure NA.7 National Annex to BS EN 1991-1-4

Il passo successivo consiste nel definire il coefficiente correttivo  $C_{e,T}$ . Anche in questo caso l'annesso nazionale fornisce il valore numerico da adottare grazie al grafico osservabile in figura 2.21. Conoscendo la distanza dell'edificio dal centro della città, pari a 0.78 km, si ottiene:

$$C_{e,T} = 1$$

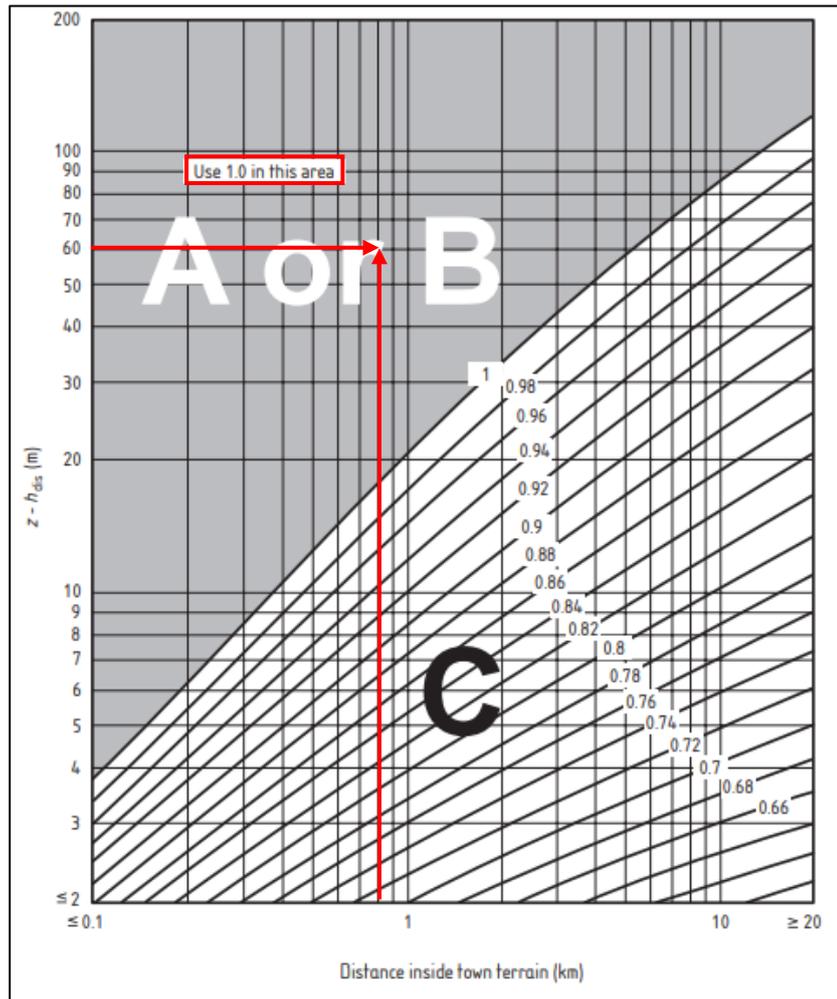


figura 2.21 – Coefficiente correttivo di esposizione  $C_{e,T}$  - Figure NA.8 National Annex to BS EN 1991-1-4

Essendo il coefficiente di esposizione un parametro di fondamentale importanza per la valutazione dell'azione del vento sugli elementi strutturali, sono state sviluppate nel corso degli anni differenti formulazioni. Un esempio è la trattazione riportata nell'Eurocodice che permette di ottenere il comportamento al variare della quota:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2(z) = C_e(z) \cdot q_b$$

ove:

- $I_v(z) = \frac{K_L}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}$  : intensità di turbolenza, descrive il comportamento turbolento del flusso eolico ( $K_L = 1$  è il fattore di turbolenza);
- $V_m(z)$  : velocità media del vento al variare di quota;
- $q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2$  : pressione base del vento.

Introducendo tali relazioni si ottiene:

$$[1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2(z) = C_e(z) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_b^2$$

$$C_e(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{V_m^2(z)}{V_b^2}$$

In figura 2.22 si osserva l'andamento del coefficiente di esposizione al variare di quota. Tale andamento ricalca perfettamente il grafico proposto dall'Eurocodice per un terreno di categoria IV (figura 2.23). In sommità all'edificio si rileva un valore del coefficiente inferiore a quello definito grazie ai grafici dell'annesso nazionale e, tale differenza, è attribuibile al diverso processo di calcolo. Per la progettazione si adatterà, tuttavia, il valore definito dalla normativa a livello nazionale poiché più accurata per il caso di studio.

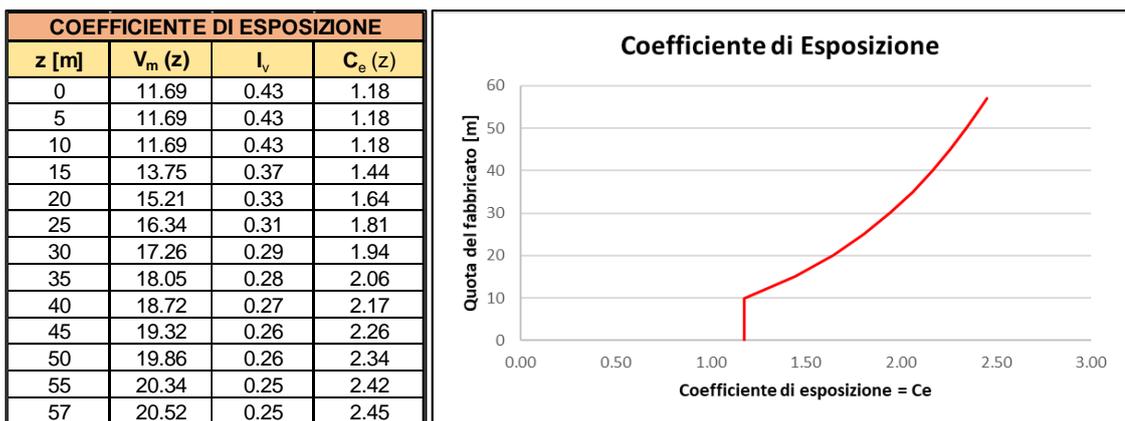


figura 2.22 - Andamento del coefficiente di esposizione al variare di quota

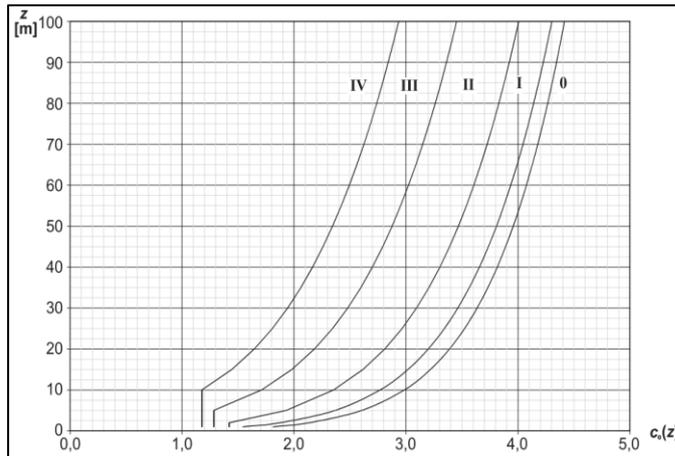


figura 2.23 – Andamento del coefficiente di esposizione – Figure 4.2 UNI EN 1991-1-4:2005

### 2.2.3 PRESSIONE DEL VENTO SULLE SUPERFICI

Il vento determina sulle superfici dell'edificio pressioni e depressioni, sia esterne che interne. L'azione d'insieme è ricavata dalla combinazione delle varie pressioni e depressioni agenti su entrambe le facce di ogni elemento. Nel caso in esame, avendo a che fare con un edificio di pianta irregolare, si è deciso, in prima battuta, di eseguire un'analisi semplificata assumendo la pianta rettangolare, in seguito si procederà alla modellazione della forma reale. In primo luogo, si procede all'analisi delle superfici esterne grazie alla seguente relazione:

$$W_e = q_p(z) \cdot C_{pe}$$

ove:

- $q_p(z)$ : pressione del vento di picco al variare della quota  $z$ ;
- $C_{pe}$ : coefficiente di pressione esterna.

Con formula del tutto analoga la pressione interna vale invece:

$$W_i = q_p(z) \cdot C_{pi}$$

ove:

- $q_p(z)$ : pressione del vento di picco al variare della quota  $z$ ;
- $C_{pi}$ : coefficiente di pressione interna.

I coefficienti pressione  $C_{pe}$  e  $C_{pi}$  hanno, dunque, lo scopo di trasformare la pressione del vento in una pressione del vento agente sulle superfici. Esistono diverse formulazioni analitiche di tali coefficienti, le quali variano in base alla forma dell'edificio, alla sua copertura e alle sue dimensioni.

Osservando infatti il grafico in figura 2.24 riportato nell'Eurocodice si osserva come all'aumentare dell'area investita dal flusso eolico si riduce il valore del coefficiente. La normativa riporta valori tabellati per elementi di area inferiore a  $1 \text{ m}^2$  ( $C_{pe,1}$ ) e per elementi di area superiore a  $10 \text{ m}^2$  ( $C_{pe,10}$ ), nel caso intermedio si interpolerà linearmente.

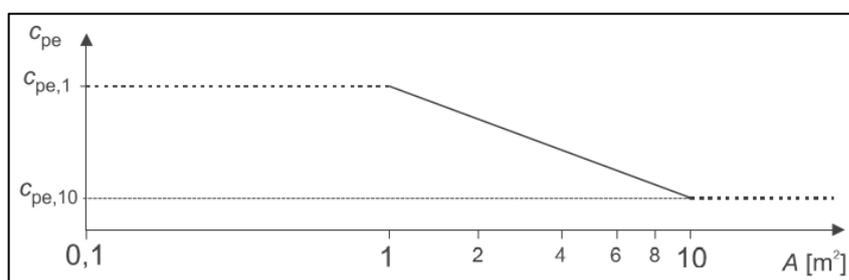


figura 2.24 – Andamento del Coefficiente  $C_{pe}$  – Figure 7.2 UNI EN 1991-1-4:2005

In relazione invece alla forma dell'edificio e alla sua copertura si farà riferimento alle indicazioni relative a edifici di forma rettangolare con pareti verticali e copertura piana riportate nel paragrafo 7.2.2 dell'Eurocodice. Al fine di riprodurre l'effettivo comportamento di un edificio investito dal flusso d'aria analizzato nel corso del precedente capitolo, la normativa divide l'edificio in 5 zone (A, B, C, D, E) in cui si verificheranno pressioni differenti per entità e per direzione (figura 2.25). Per ciascuna zona vengono poi riportati i due valori di  $C_{pe}$  in formato tabellare (figura 2.26).

Nel caso in esame si adotteranno i coefficienti relativi a elementi con area maggiore di  $10 \text{ m}^2$ . Tali coefficienti sono confermati, nel caso di edifici di forma rettangolare con pareti verticali, anche dal relativo annesso nazionale “National annex to BS EN 1991-1-4:2005” (figura 2.27).

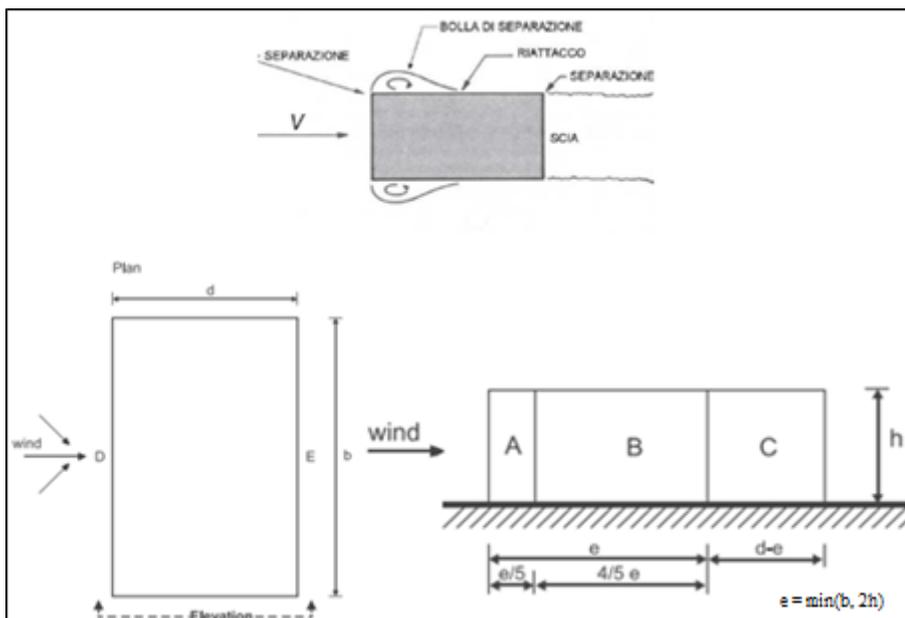


figura 2.25 - Relazione tra comportamento di un edificio soggetto all'azione del vento e divisione in zone

Zone	A		B		C		D		E	
	$C_{pe,10}$	$C_{pe,1}$								
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 2.26 – Coefficienti di pressione  $C_{pe}$  – Table 7.1 BS EN 1991-1-4:2005

Values of external pressure coefficients for vertical walls of rectangular-plan buildings ( $C_{pe,10}$ and $C_{pe,1}$ )					
$h/d$	Zone				
	A	B	C	D	E
5	-1,2	-0,8	-0,5	+0,8	-0,7
1,0	-1,2	-0,8	-0,5	+0,8	-0,5
$\leq 0,25$	-1,2	-0,8	-0,5	+0,7	-0,3

figura 2.27 – Coefficienti di pressione  $C_{pe}$  – Table NA.4 “National annex to BS EN 1991-1-4:2005”

Inserendo poi le dimensioni di *Stonecutter Court Building* si ottengono solamente quattro zone in presenza di vento proveniente da Nord e da Sud. Difatti, a causa della ridotta dimensione dell'edificio  $d$ , inferiore a  $e = \min(b; 2h)$ , la zona C viene a mancare. Per le varie direzioni del vento, la distribuzione di tali zone è osservabile nelle figure di seguito esposte.

Si entra poi nella tabella, si ricavano i valori dei coefficienti relativi a elementi con area maggiore di  $10 \text{ m}^2$  e si ottengono le seguenti pressioni esterne di picco:

$$W_{e,A} = q_p \cdot C_{pe,A} = 1,04 \cdot (-1,2) = -1,248 \text{ kN/m}^2$$

$$W_{e,B} = q_p \cdot C_{pe,B} = 1,04 \cdot (-0,8) = -0,832 \text{ kN/m}^2$$

$$W_{e,C} = q_p \cdot C_{pe,C} = 1,04 \cdot (-0,5) = -0,52 \text{ kN/m}^2$$

$$W_{e,D} = q_p \cdot C_{pe,D} = 1,04 \cdot (0,8) = 0,832 \text{ kN/m}^2$$

$$W_{e,E} = q_p \cdot C_{pe,D} = 1,04 \cdot (-0,7) = -0,728 \text{ kN/m}^2$$

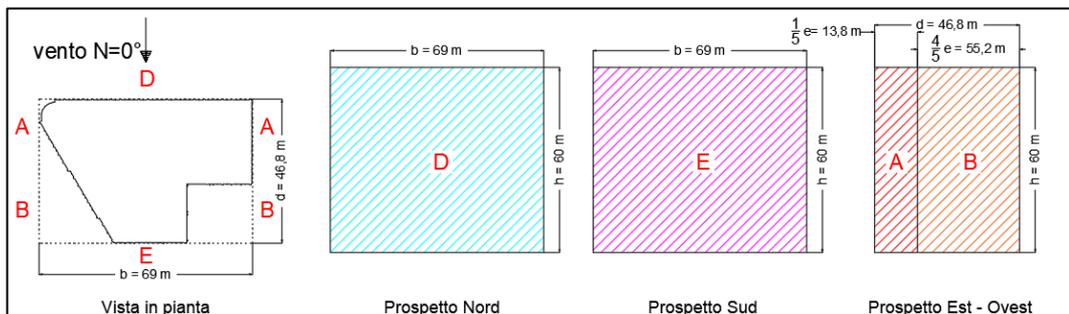


figura 2.28 – Zone di pressione edificio schematizzato di forma rettangolare – direzione del vento  $0^\circ$

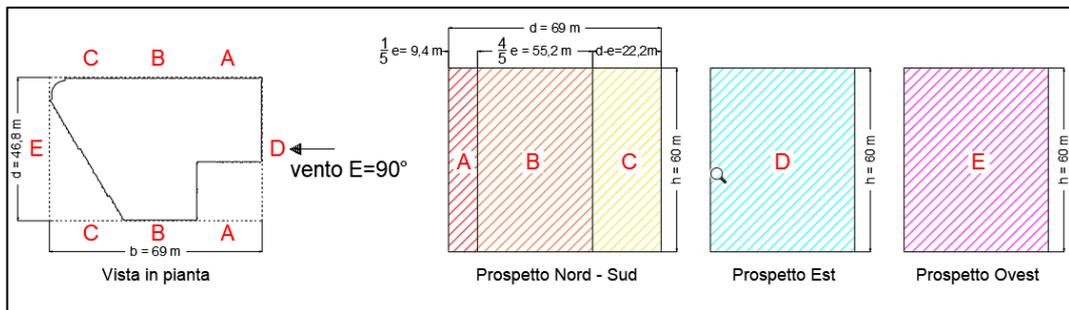


figura 2.29 – Zone di pressione edificio schematizzato di forma rettangolare – direzione del vento  $90^\circ$

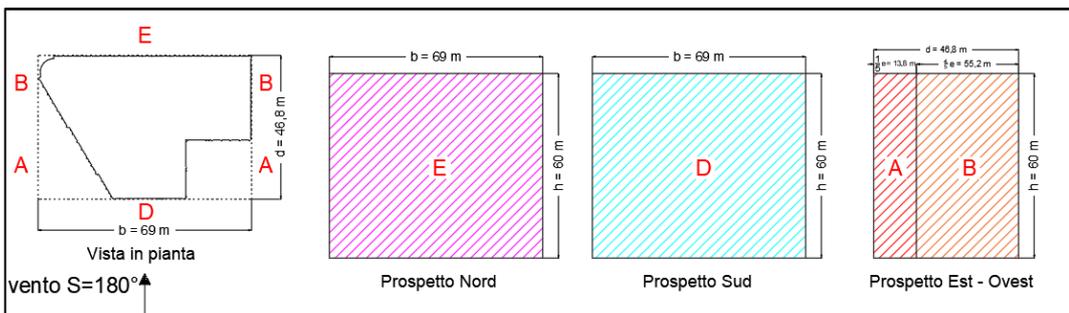


figura 2.30 – Zone di pressione edificio schematizzato di forma rettangolare – direzione del vento  $180^\circ$

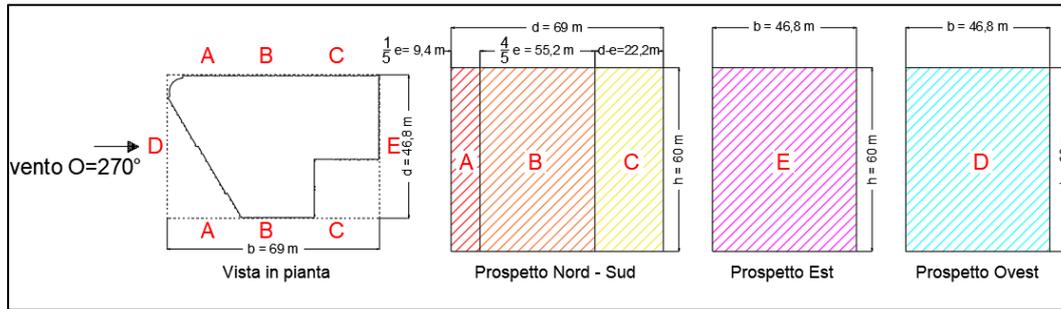
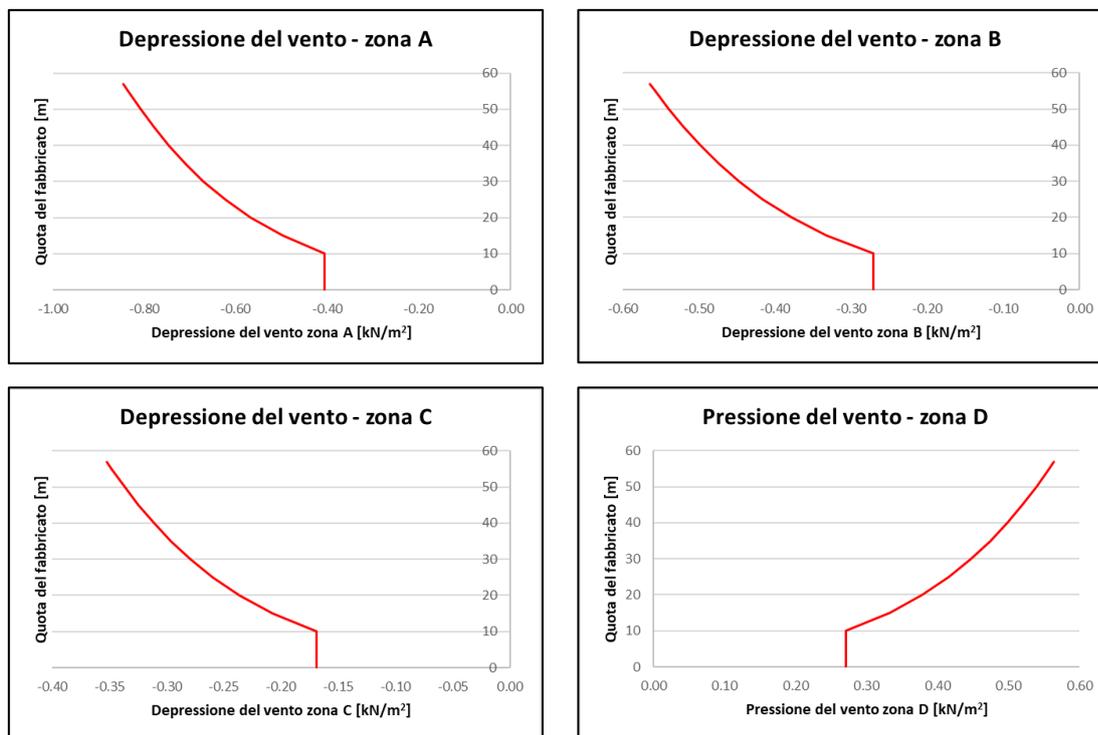


figura 2.31 – Zone di pressione edificio schematizzato di forma rettangolare – direzione del vento 270°

Anche in questo caso, adottando la formulazione dell'Eurocodice, è possibile ottenere l'andamento della pressione sulle pareti al variare della quota del punto analizzato. Come già osservato in precedenza la formulazione di cui sopra fornisce valori che si discostano da quelli ottenuti grazie all'annesso nazionale, ma permette di osservare l'andamento della pressione lungo lo sviluppo della facciata.



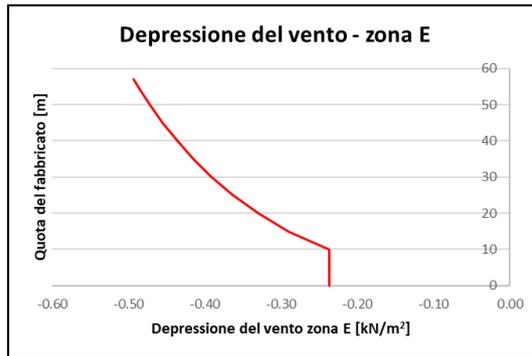


figura 2.32 - Andamento della pressione del vento nelle 5 zone dell'edificio - Eurocodice

Il coefficiente di pressione interna  $C_{pi}$  dipende invece dalle dimensioni e dalla distribuzione delle aperture (finestre, porte, canali di aerazione) presenti nell'intero edificio. In presenza di fenomeni ventosi rilevanti è però lecito considerare tali elementi chiusi ed impermeabili all'aria, eccetto nel caso di rottura e/o apertura involontaria.

Data la difficile stima di tale parametro a causa della notevole variabilità delle dimensioni e della distribuzione delle aperture nell'istante di applicazione del fenomeno ventoso, la normativa definisce i seguenti valori:

- pressione:  $C_{pi} = 0,2$ ;
- depressione:  $C_{pi} = -0,3$ .

Ne conseguono le seguenti pressioni:

- pressione:  $W_{i,p} = q_p \cdot C_{pi} = 1,04 \cdot 0,2 = 0,208 \text{ kN/m}^2$ ;
- depressione:  $W_{i,d} = q_p \cdot C_{pi} = 1,04 \cdot (-0,3) = -0,312 \text{ kN/m}^2$ .

Infine, è necessario considerare la combinazione di pressioni esterne ed interne agenti allo stesso istante. Adottando lo schema riportato nell'Eurocodice (figura 2.33) si procederà considerando la combinazione delle pressioni più gravosa al fine di ottenere le pressioni nette da utilizzare in fase di progettazione:

- pressione:  $W_{tot,D} = W_{e,D} + W_{i,d} = 0,832 + (-0,312) = 1,144 \text{ kN/m}^2$
- depressione:
  - $W_{tot,A} = W_{e,A} + W_{i,p} = -1,248 - (+0,208) = -1,456 \text{ kN/m}^2$

- $W_{tot,B} = W_{e,B} + W_{i,p} = -0,832 - (+0,208) = -1,04 \text{ kN/m}^2$
- $W_{tot,C} = W_{e,C} + W_{i,p} = -0,52 - (+0,208) = -0,728 \text{ kN/m}^2$
- $W_{tot,E} = W_{e,E} + W_{i,p} = -0,728 - (+0,208) = -0,936 \text{ kN/m}^2$

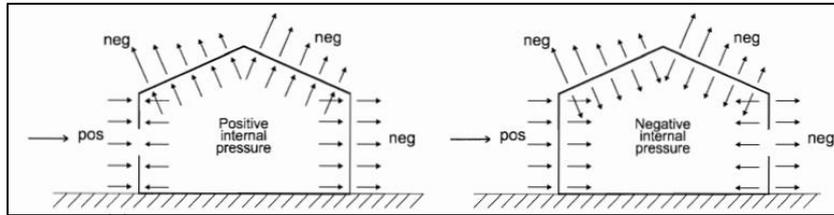


figura 2.33 – Combinazione pressioni interne e pressioni esterne – Figure 5.1 BS EN 1991-1-4:2005

Sino ad ora è stato considerato l'edificio di forma rettangolare, in realtà però *Stonecutter Court Building* prevede: forma in pianta irregolare, una parete di forma semicilindrica e diversi terrazzamenti osservabili nelle figure 2.8, 2.9 e 2.10. Per quanto riguarda la pianta e la parete, essendo forme non standard, non vengono trattate in normativa e rientrano nei casi particolari analizzabili per mezzo di analisi sperimentali in galleria del vento o computazionali per mezzo di modellazione CFD. Invece, relativamente ai terrazzamenti, la normativa inglese “*BS 6399-2:1997 – Loading for building – Part2: Code of practice for wind loads*” al paragrafo 2.4.4.2 riporta i seguenti casi:

- a) se il bordo sopravento della facciata prevede una rientranza, rispetto al piano sottostante, superiore a 0,2 volte la larghezza della facciata stessa ( $b_1$ ), allora le zone di carico sono definite in analogia a quanto già effettuato in precedenza considerando il piano inferiore come se fosse il piano terra. Comunque, l'altezza di riferimento  $H_r$  è da intendersi in riferimento alla quota reale del terreno.
- b) Se invece, il bordo sopravento della facciata prevede una rientranza, rispetto al piano sottostante, inferiore a 0,2 volte la larghezza della facciata stessa ( $b_1$ ), allora deve essere eseguita la stessa procedura del punto precedente introducendo però la zona E caratterizzata da un coefficiente di pressione esterna  $C_{pe} = -2$ .

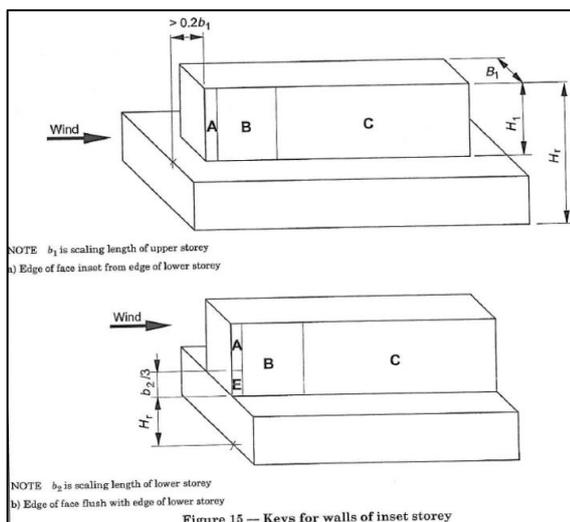


figura 2.34 – definizione delle zone per edificio con terrazzamenti – Figure 15 BS 6399-2:1997

In accordo alle indicazioni da normativa, si procede in prima battuta alla determinazione delle varie dimensioni dei sei terrazzamenti previsti in fase di progettazione, così da individuare la eventuale presenza o meno della zona E. Per quanto riguarda i terrazzamenti presenti nel prospetto ovest, la zona E è sicuramente presente in quanto l'arretramento della facciata è ridotto in riferimento alla dimensione dell'edificio stesso (figura 2.35).

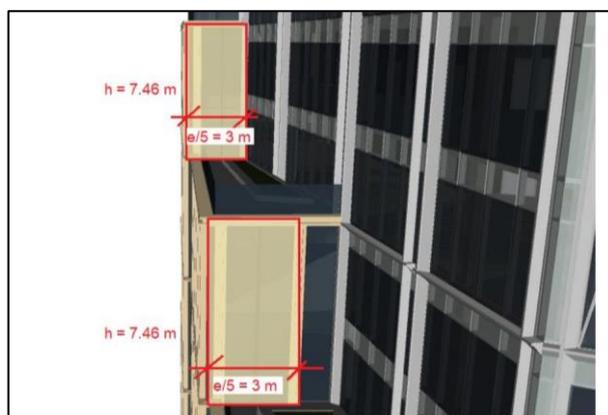


figura 2.35 – Prospetto Ovest – dimensioni della zona E

Anche per i terrazzi presenti nel prospetto est, come osservabile dalle figure 2.36 e 2.37, è presente la zona E la quale prevede dimensioni variabili ad ogni terrazzamento osservabili in figura 2.38.

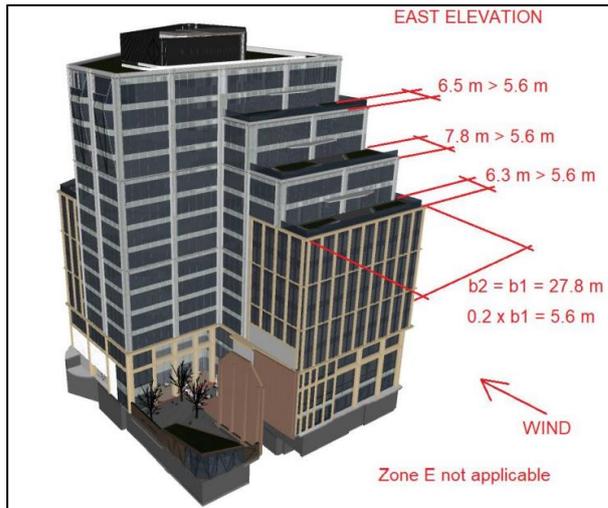


figura 2.36 - Prospetto Est - direzione del vento Est-Ovest

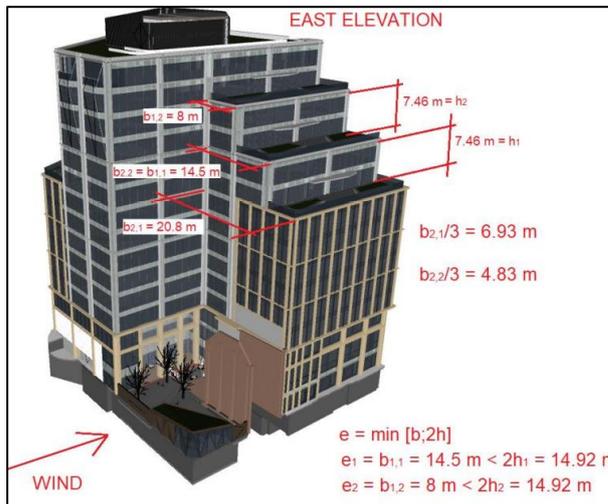


figura 2.37 - Prospetto Est - direzione del vento Sud Nord

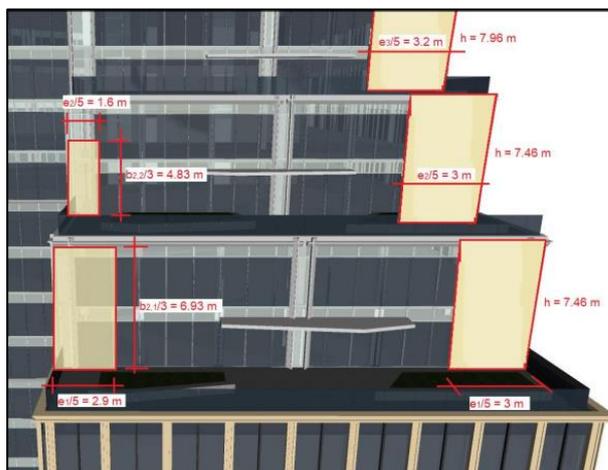


figura 2.38 - Prospetto Est - dimensioni della zona E

Definite le dimensioni di tali zone, è possibile procedere alla determinazione della pressione esterna da applicare in fase di progettazione adottando il coefficiente di pressione esterna previsto dalla normativa:

$$W_{e,E} = q_p \cdot C_{pe,E} = 1,04 \cdot (-2) = -2,08 \text{ kN/m}^2$$

$$W_{tot,E} = W_{e,E} + W_{i,p} = -2,08 + (-0,208) = -2,288 \text{ kN/m}^2$$

Ottenute i diversi valori di pressione si è poi proceduto alla realizzazione dei prospetti di involucro considerando il valore minimo negativo (depressione) ed il valore massimo positivo (sovrappressione) sommati alle rispettive pressioni interne. Per quanto riguarda la sovrappressione, prevedendo la normativa la sola zona A, tutta la struttura sarà soggetta al medesimo carico.

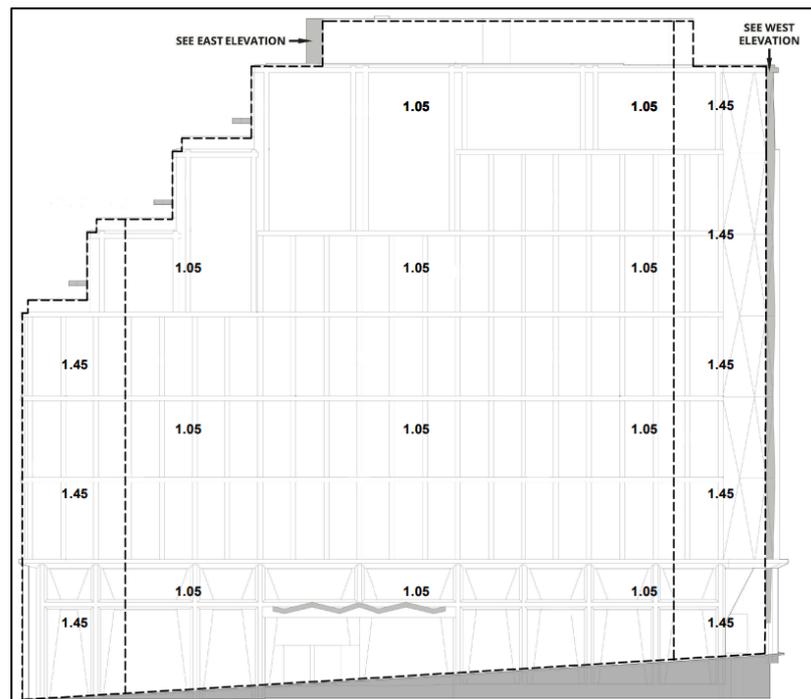


figura 2.39 - Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Nord

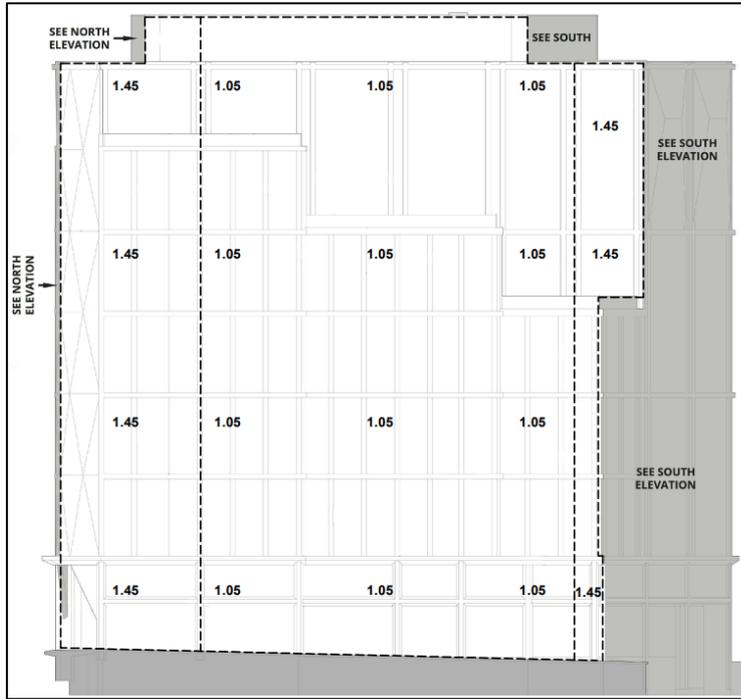


figura 2.40 - Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Ovest

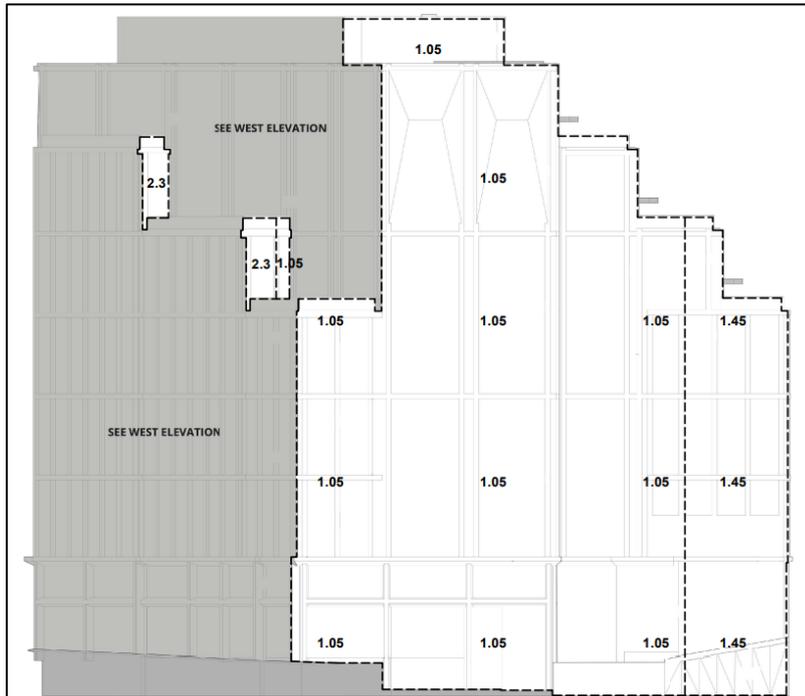


figura 2.41 - Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Sud

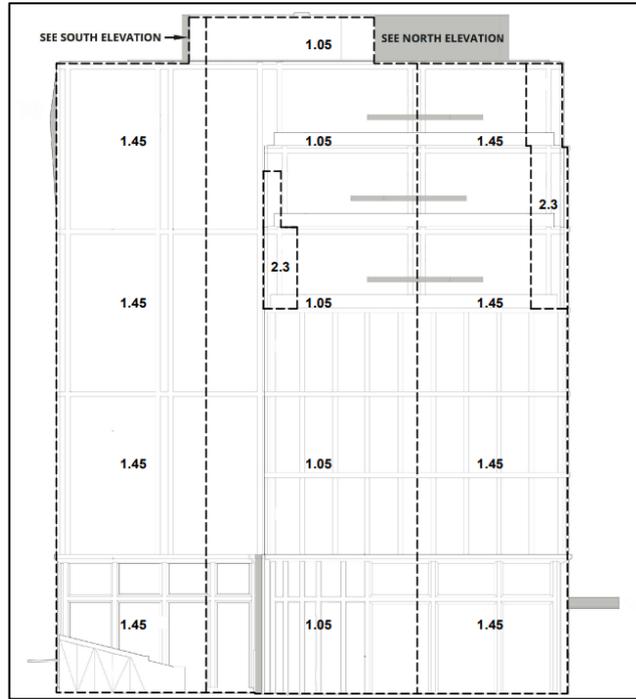


figura 2.42 - Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Est

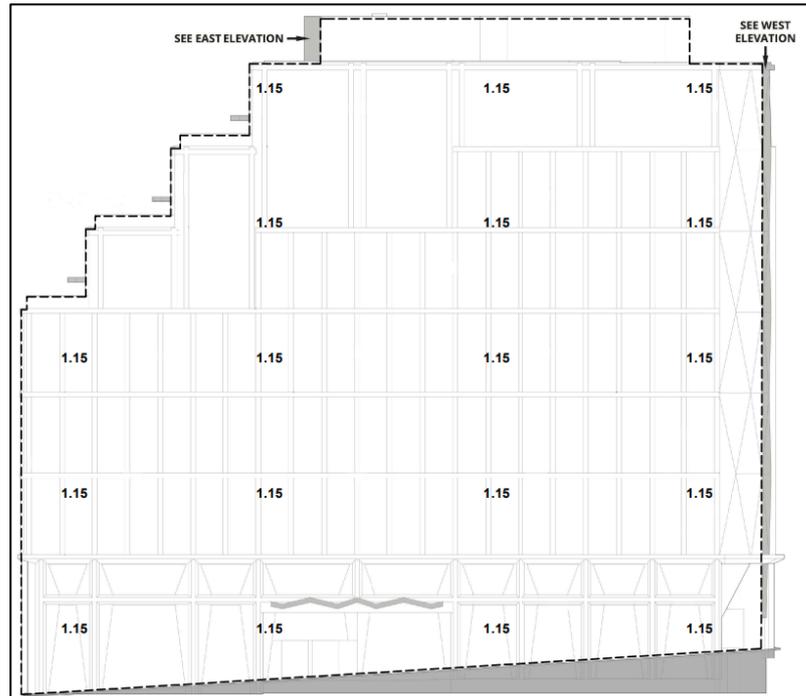


figura 2.43 - Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Nord

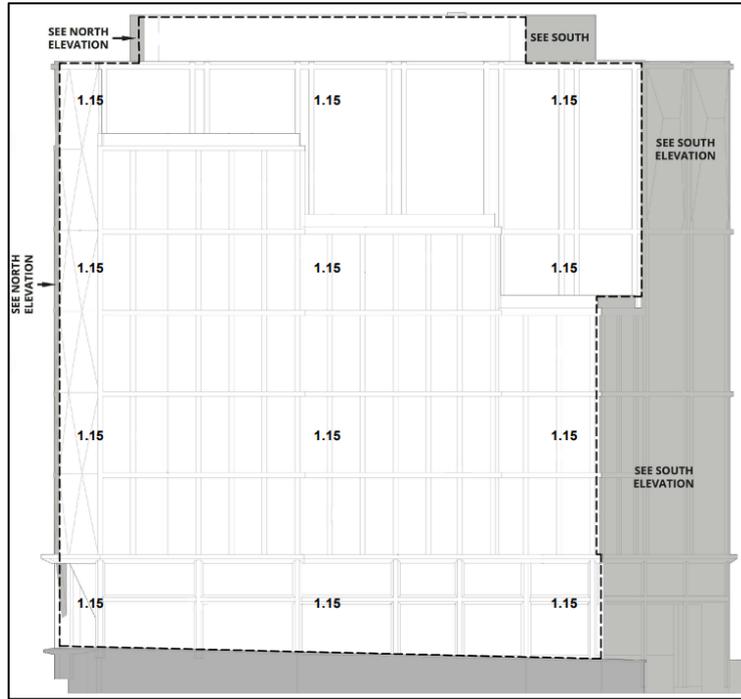


figura 2.44 - Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Ovest

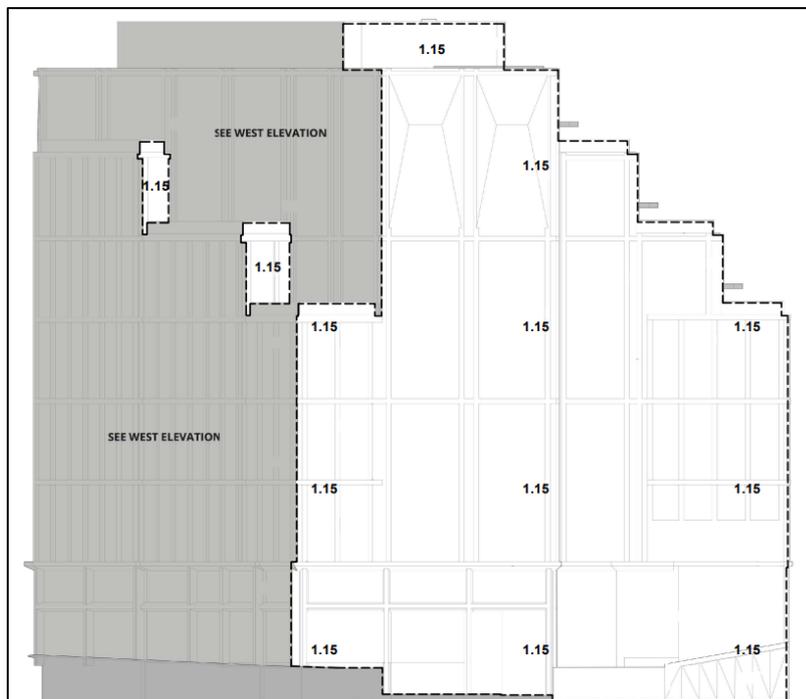


figura 2.45 - Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Sud

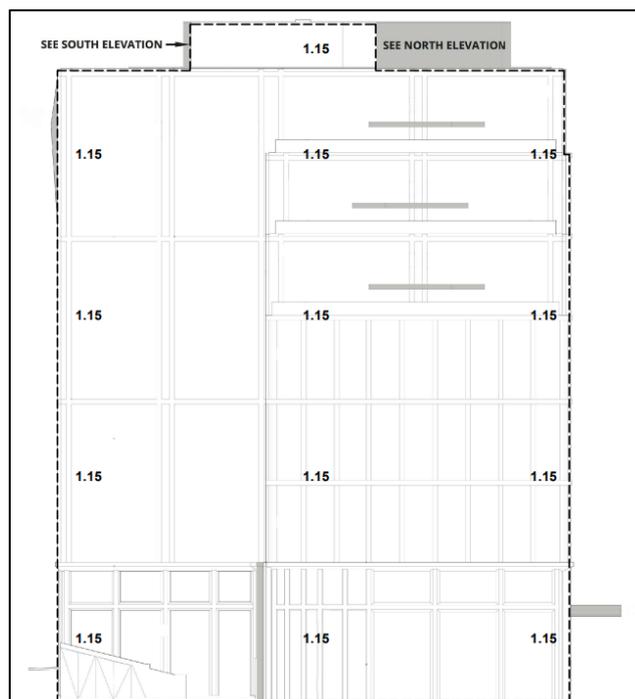


figura 2.46 - Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Est

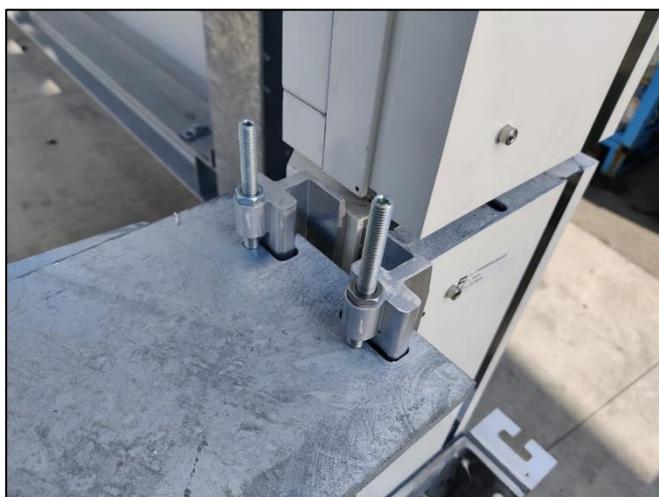
### 2.3 CONFRONTO AZIONE DEL VENTO E AZIONE SISMICA

Il presente elaborato ha come scopo la progettazione di facciate continue all'azione del vento. È importante, tuttavia, osservare che nell'analisi strutturale di un edificio e di ogni sua componente è necessario considerare tutte le possibili azioni e tutte le combinazioni a cui l'edificio stesso è sottoposto nel corso della sua vita utile. In accordo a quanto introdotto, l'altra azione che assume rilevanza nel corso della progettazione è l'azione sismica, la quale verrà analizzata nel corso del presente paragrafo. Ovviamente nelle verifiche degli elementi strutturali saranno considerati anche le altre azioni agenti: i pesi propri, il carico da neve e il carico da manutenzione adeguatamente combinati.

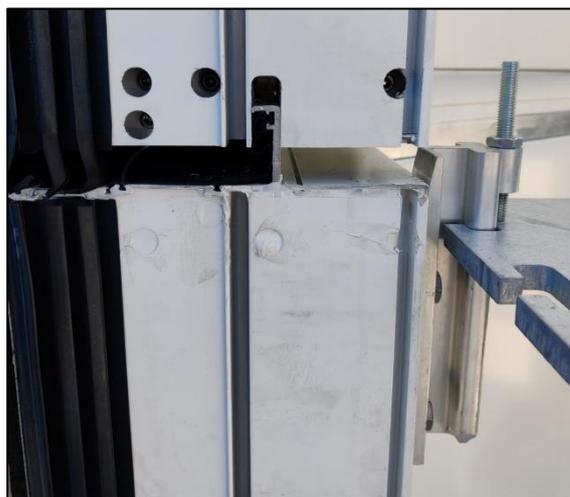
In realtà l'Inghilterra, zona ove sorge l'edificio, è una zona non sismica. Tale ulteriore analisi sarebbe, dunque, non necessaria, ma verrà comunque eseguita allo scopo di evidenziare il fatto che, in presenza di facciate continue di edifici a torre di elevate dimensioni, il vento diventa l'azione prevalente rispetto all'azione sismica stessa.

Gli elementi a cellula che costituiscono la facciata oggetto di studio, possono essere classificati come elementi costruttivi non strutturali. Si tratta di elementi caratterizzati da

resistenza, rigidezza e massa tali da influenzare la risposta strutturale oppure elementi che, pur non influenzando la risposta strutturale, sono significativi per la sicurezza e l'incolumità delle persone. Nel caso in esame, avendo a che fare con cellule "units" che prevedono un collegamento alla struttura principale per mezzo di "blocchetti<sup>22</sup>" e staffe solamente all'estremità superiore della cellula stessa (figura 2.47), si genera un sistema resistente che non influenza la risposta strutturale, con deformazione osservabile nella figura 2.49. Tale deformata è resa possibile anche dal giunto maschio – femmina presente tra due cellule contigue osservabile in figura 2.48.



*figura 2.47 – Blocchetti e staffe di collegamento cellule "units" – struttura*



*figura 2.48 – Giunto maschio – femmina e vista laterale del blocchetto*

---

<sup>22</sup> Blocchetto: elemento di connessione della cellula alla staffa della struttura principale

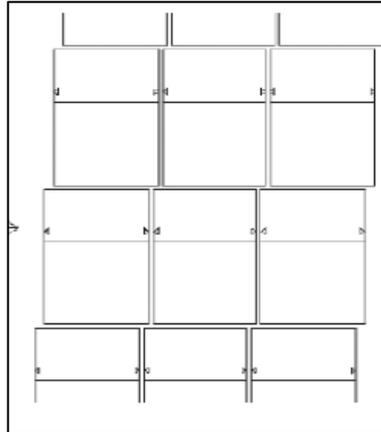


figura 2.49 - Deformazione del sistema a cellule unitarie sottoposto a sisma

Appurato tale comportamento sotto azione sismica, è comunque necessario verificare che l'elemento non strutturale oggetto di studio sia dotato di capacità resistente maggiore alla domanda, in modo tale da evitare danni a persone e/o cose. In accordo al paragrafo 7.2.3 della vigente normativa italiana NTC 2018, si procede alla definizione della forza sismica orizzontale agente nel centro di massa dell'elemento non strutturale:

$$F_a = \frac{S_a \cdot W_a}{q_a} = \frac{1,2 \cdot 0,92 \text{ kN/m}^2}{2} = 0,55 \text{ kN/m}^2$$

ove:

- $S_a$ : accelerazione massima adimensionalizzata rispetto a quella di gravità che l'elemento non strutturale subisce durante il sisma. In assenza di specifiche indicazioni, la normativa consente di far riferimento a documenti di comprovata validità, per tale motivo si fa riferimento ad analisi svolte su cellule analoghe a quelle in esame adottate nel progetto Torri EUR site a Roma per le quali si è adottato  $S_a = 1,2$ .
- $W_a = \frac{435 \text{ kg}}{1263 \text{ mm} \cdot 3730 \text{ mm}} = \frac{4,35 \text{ kN}}{1,263 \text{ m} \cdot 3,730 \text{ m}} = 0,92 \text{ kN/m}^2$  : peso dell'elemento non strutturale per area unitaria, definito grazie alla massa della cellula  $435 \text{ kg}$  e alle sue dimensioni  $1263 \text{ mm} \times 3730 \text{ mm}$ ;
- $q_a$ : fattore di comportamento dell'elemento. Varia a seconda della tipologia di elemento analizzato, nel caso di parete esterna è lecito assumere  $q_a = 2$ .

Si osservi che tale azione sismica ( $0,55 \text{ kN/m}^2$ ) è abbondantemente inferiore al carico del vento precedentemente calcolato ( $2,3 \text{ kN/m}^2$ ), pertanto è possibile omettere la relativa combinazione di carico ed è lecito concentrarsi nel corso della progettazione e, del presente elaborato, nell'analisi dell'azione del vento.

Quanto sino ad ora esposto, in realtà, non potrebbe trovare applicazione nel caso di studio, in quanto l'edificio in questione è sito a Londra (Inghilterra). Per tale ragione, in via teorica, sarebbe necessario seguire ed applicare le disposizioni dettate dall'Eurocodice. In ogni caso si è, tuttavia, deciso di adottare la NTC in quanto questa, a differenza delle normative europee, attribuisce particolare attenzione agli elementi non strutturali, categoria all'interno della quale sono comprese le facciate continue.

## **3 ANALISI SPERIMENTALE IN GALLERIA DEL VENTO**

---

### **3.1 INTRODUZIONE ALL'ANALISI IN GALLERIA DEL VENTO**

In fase di progettazione di edifici di forma complessa o di altezza elevata, quali gli edifici a torre, le valutazioni dell'azione del vento riportate in normativa non sono affidabili, a titolo di esempio l'eurocodice “*BS EN 1991-1-4:2005 Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions -Wind actions*” prevede che:

*“La norma fornisce una guida per la determinazione delle azioni del vento per la progettazione strutturale di edifici ed opere di ingegneria civile per ciascuna delle zone di carico considerate. La norma si applica a edifici ed opere con altezze fino a 200 m e a ponti con campate non maggiori a 200 m.”*

In tutti i casi in cui tali relazioni non sono ritenute affidabili o comunque in tutti i casi ove si vuole effettuare un ulteriore controllo dei risultati o si vuole ottimizzare le prestazioni dell'edificio stesso con un guadagno economico e/o incremento dei margini di sicurezza, è lecito far riferimento ad analisi sperimentali in galleria del vento oppure analisi computazioni attraverso software CFD. A tal proposito la normativa “*BS EN 1991-1-4:2005*” nel paragrafo 1.5 prevede:

*“In aggiunta ai calcoli, prove in galleria del vento e metodi numerici collaudati e/o opportunatamente validati possono essere utilizzati per ottenere informazioni sul carico e sulla risposta utilizzando modelli appropriati della struttura e del vento naturale.”*

È importante precisare che, per tutti i casi di rilevante importanza o di particolare delicatezza, è necessario far riferimento a valutazioni specifiche e di comprovata validità per il singolo caso in esame.

L'analisi in galleria del vento<sup>23</sup> è basata sulla riproduzione in scala ridotta del caso di studio reale. Al fine di ottenere risultati accurati è necessario ridurre in scala non solo la geometria, ma anche tutte le grandezze fisiche che intervengono nel processo di interazione tra il vento

---

<sup>23</sup> Galleria del vento: apparecchiatura necessaria per studiare l'andamento di un flusso di un fluido (in genere aria) attorno ad un corpo simulandone l'interazione con buona approssimazione alla realtà. Le misure che si effettuano, in genere, sono misure di: velocità, pressione, temperature e forze esercitate dal fluido sul corpo. [11]

e l'edificio. In particolare, essendo un'analisi atta a determinare coefficienti di pressione da applicare in fase di progettazione, è necessario porre particolare attenzione alle caratteristiche del flusso eolico. Si riportano di seguito alcune regole fondamentali per il conseguimento di risultati accurati:

- le quantità adimensionali (numero di Reynolds, Indice di turbolenza...) devono avere lo stesso valore reale;
- le quantità dotate di dimensioni fisiche analoghe tra il vero e la galleria (ad esempio le dimensioni geometriche) devono essere scalate dello stesso fattore di scala  $\lambda^{24}$ ;
- le quantità dotate di molteplici dimensioni fisiche, come ad esempio la velocità, devono rispettare i fattori di scala di tutte le dimensioni.

In generale non è possibile rispettare contemporaneamente le tre regole precedentemente descritte, motivo per il quale in genere si utilizza una modellazione distorta che rispetta solo alcune delle indicazioni. La decisione sul criterio da adottare dipende dal caso in esame ed è fondamentale per garantire la qualità dei risultati.

Oltre a queste indicazioni di carattere generale, per il flusso eolico sono necessarie ulteriori accortezze, e precisamente:

- in caso di strutture a sviluppo verticale è consigliabile che i profili della velocità media e di turbolenza riproducano quelli reali fino ad un'altezza pari almeno a una volta e mezzo l'altezza della struttura analizzata;
- per tutte le strutture, l'andamento delle turbolenze longitudinale in galleria deve essere il più possibile prossimo a quello reale;
- tutte le caratteristiche del flusso eolico si devono mantenere costanti per tutto il tronco di prova.

Tra le diverse tipologie di gallerie quelle che meglio soddisfano tali requisiti sono le cosiddette gallerie a strato limite (figura 3.1), le quali vengono pertanto utilizzate per la sperimentazione in campo civile ed ambientale. Tali gallerie si differenziano da quelle genericamente adottate per analisi aeronautiche o automobilistiche per la possibilità di

---

<sup>24</sup> Fattore di scala: rapporto tra la grandezza in galleria del vento e grandezza reale.

riprodurre al loro interno lo strato limite atmosferico nel quale gli edifici si trovano immersi. Lo strato limite viene riprodotto adottando tronchi di galleria di dimensioni maggiori rispetto a quelli standard, ma soprattutto la riproduzione avviene grazie alle guglie<sup>25</sup>, ossia elementi di forma prismatica che si oppongono al flusso d'aria, la cui dimensione varia a seconda della rugosità del caso reale.



*figura 3.1 - Galleria a strato limite di Prato – Analisi cattedrale di Notre-Dame*

Oltre ai “cubi” necessari per riprodurre lo strato limite, in genere i modelli di costruzioni civili prevedono anche la realizzazione in scala del contesto posto nelle immediate vicinanze all’edificio stesso. La cura nel rilevamento delle corrette geometrie e successivamente nella riproduzione in scala è fondamentale per riprodurre gli effetti di interferenza che nascono tra edifici contigui e per definire, dunque, il corretto andamento del flusso d’aria e le conseguenti pressioni sul campione di prova.

---

<sup>25</sup> Guglie: elementi di forma prismatica fissati sul pavimento del tronco di prova che hanno lo scopo di ricreare il flusso eolico reale (valor medio + turbolenze).

### 3.1.1 EFFETTO BLOCCAGGIO

In accordo a quanto descritto da K.G. Ranga Raju e Vijava Singh in “*Journal of wind engineering and industrial aerodynamics – 1975*” {19} , in galleria del vento si genera il cosiddetto effetto bloccaggio. Un qualunque edificio reale si trova ad operare in un ambiente teoricamente infinito. In galleria del vento, invece, vengono utilizzati tronchi di dimensioni ridotte, confinati lateralmente e superiormente da elementi rigidi quali pareti e soffitti.

Nella realtà tali confini solidi non sono presenti e ciò genera una distorsione del reale comportamento: nelle zone comprese tra il modello e le pareti si ha una variazione del percorso dei flussi con aumento della velocità (figura 3.2 e figura 3.3). Tale fenomeno prende il nome di effetto bloccaggio e dipende perlopiù dal rapporto di blocco dato dal rapporto tra sezione trasversale del modello e del tronco di prova:

$$\text{rapporto di blocco} = \frac{A_{\text{modello}}}{A_{\text{galleria}}}$$

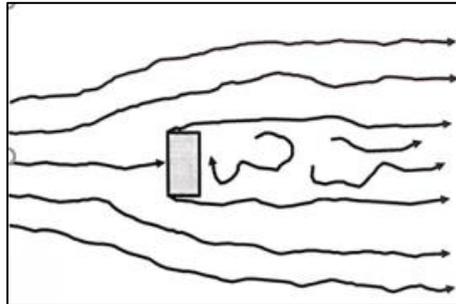


figura 3.2 - Andamento del flusso eolico in ambiente teoricamente infinito (caso reale)

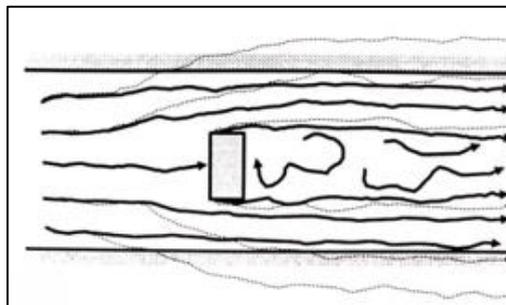


figura 3.3 - Andamento del flusso eolico in ambiente circoscritto (galleria del vento)

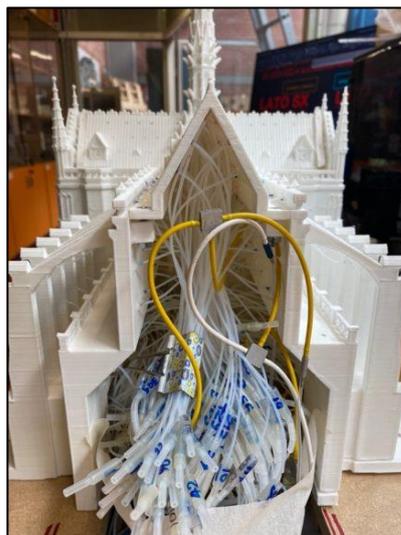
La variazione del percorso dei flussi e l'aumento di velocità si ripercuote sull'edificio con un aumento di pressione nella parete retrostante e con pressioni distorte sulle pareti laterali.

La soluzione a tale effetto non può essere la rimozione delle pareti della galleria (in quanto si otterrebbe il risultato opposto, con flussi che tenderebbero ad allontanarsi troppo dalle pareti con conseguente riduzione del carico), ma è rappresentata bensì da modelli matematici che hanno lo scopo di fornire valori di pressione corretti, analoghi a quelli reali. Tali modelli vengono tarati in base sia all'edificio/oggetto analizzato, sia alla galleria utilizzata. Detta taratura è possibile grazie a dati rilevati da opportuni sensori presenti nel tronco stesso. Si tratta, dunque, di un processo complesso, eseguito direttamente dal laboratorio stesso.

### 3.1.2 MISURAZIONI DELLE PRESSIONI

Come già accennato, in galleria del vento si possono rilevare diversi dati. In ambito civile il dato più interessante è sicuramente l'entità e la variazione di pressione sui diversi elementi strutturali. La distribuzione di pressione sulle varie superfici può essere rilevata grazie ad un sistema di acquisizione ad alta frequenza di campionamento, composto da:

- numero elevato di prese manometriche disposte sulla superficie oggetto di studio;
- un trasduttore di pressione per ogni presa di cui sopra che converte il segnale precedentemente rilevato in segnale elettrico;
- un convertitore analogico-digitale che memorizza i segnali elettrici.



*figura 3.4 - Prese di pressione e trasduttori cattedrale di Notre-Dame – Analisi in galleria del vento di Prato [12]*

L'accuratezza dei risultati della prova dipende, oltre che dalle caratteristiche della galleria del vento precedentemente elencate, anche da un sistema di acquisizione dei dati performante: particolare attenzione è da attribuirsi al collegamento tra presa manometrica e trasduttore di pressione, che è fondamentale per evitare distorsioni e fluttuazioni del segnale rilevato.

Ciascuna analisi deve essere effettuata per tutte le possibili direzioni di incidenza del vento. Ciò anche in considerazione del fatto che, in ambito civile, l'edificio può essere investito dal vento in tutte le direzioni, eccetto casi in cui dovessero esserci eventuali simmetrie. È necessario, dunque, testare tutte le direzioni del vento possibili variando l'orientamento dell'edificio. Ovviamente, i casi particolari nei quali i venti spirano in direzioni prefissate, oppure ove si hanno conformazioni della superficie terrestre particolari (es. edifici protetti da montagne nelle vicinanze), il numero di prove viene limitato ai casi effettivamente possibili.

Tale sistema permette di rilevare contemporaneamente la pressione media, il quadrato medio delle fluttuazioni di pressione e i picchi di pressione negativi e positivi. Definita la pressione è possibile anche definire i coefficienti di pressione attraverso la relazione:

$$C_p(t) = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2}$$

Ove:

- $P$ : pressione rilevata;
- $P_0$ : pressione statica di riferimento;
- $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$ : pressione cinetica di riferimento.

### 3.2 MODELLO: CARATTERISTICHE E DATI DI INPUT

L'analisi sperimentale in galleria del vento ha lo scopo di determinare le pressioni del vento sulle diverse superfici dell'involucro edilizio. *In primis*, questa analisi è fondamentale qualora non sia possibile adottare le formulazioni da normativa a causa di particolari geometrie (forme geometriche irregolari, altezze elevate...), oppure a causa di particolari fenomeni di interazione con gli edifici circostanti, o ancora per studiare con maggior

accuratezza il caso in esame, al fine di ridurre il carico del vento. *Stonecutter Court Building*, nonostante la sua particolare geometria, rientra in quest'ultimo caso: si è deciso infatti di eseguire analisi più approfondite in modo tale da andar a determinare l'effettivo valore di pressione del vento con l'obiettivo di ottimizzare la progettazione delle facciate dell'edificio stesso.

L'analisi sviluppata nel corso del presente capitolo è stata eseguita presso la galleria del vento a strato limite di 2,7 m x 2,1 m della *RWDI*<sup>26</sup> sita a Milton Keynes (Inghilterra). Le procedure di prova adottate sono tali da soddisfare i requisiti stabiliti al paragrafo 1.5 dell'Eurocodice "BS EN 1991-1-4:2005" e al paragrafo NA.2.2.1 dell'annesso nazionale "UK NA".

A partire dalla geometria dell'edificio oggetto di studio è stato realizzato un modello in scala 1:300 (edificio in rosso) centrato nel suo reale contesto urbano per un raggio di 450 m osservabile nelle figure 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9. Al di fuori di tale area, l'influenza del terreno di categoria IV e degli edifici esterni al perimetro, è stata riprodotta grazie a guglie e rugosità del terreno. Tali elementi permettono di ottenere un'accurata simulazione del vento medio e della turbolenza che si ripercuotono poi sulla qualità dei picchi di pressione superficiali rilevati.

Il modello completo viene posizionato al di sopra di un disco rotante, il quale consente di simulare la configurazione per ogni direzione del vento. Nel caso in esame la prova è stata effettuata per 36 direzioni del vento con intervalli di 10°.

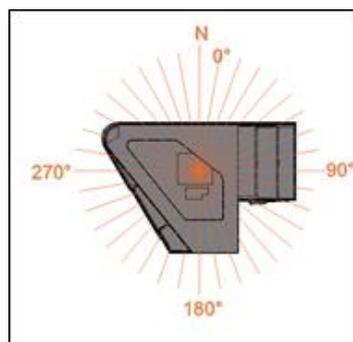


figura 3.5 - Direzioni del vento analizzate

---

<sup>26</sup> *RWDI*: società di consulenza specializzata in varie branche dell'ingegneria tra cui l'analisi di edifici in galleria del vento. Ha uffici in Canada, USA, Regno Unito, India, Cina, Singapore, Hong Kong, Malesia, Australia e Italia.



*figura 3.6 – Modello analisi in galleria del vento in scala 1:300 – vista Nord*



*figura 3.7 – Modello analisi in galleria del vento in scala 1:300 – vista Est*



*figura 3.8 – Modello analisi in galleria del vento in scala 1:300 – vista Sud*



*figura 3.9 – Modello analisi in galleria del vento in scala 1:300 – vista Ovest*

Definito il modello, lo step successivo nel corso di un'analisi in galleria del vento prevede la determinazione della velocità e della direzione del vento reali. Tali previsioni sono possibili grazie a modelli climatici che vengono definiti sulla base di analisi statistiche di dati meteorologici storici forniti da stazioni meteorologiche poste nelle vicinanze, nel caso in esame situate negli aeroporti di *Gatwick*, *Heathrow* e *Stansted* (figura 3.10). In figura 3.11 è possibile osservare la direzionalità dei venti rilevati dalle tre stazioni con periodo di ritorno di 1 mese (sinistra), e dei venti di progetto con periodo di ritorno di 50 anni (destra).

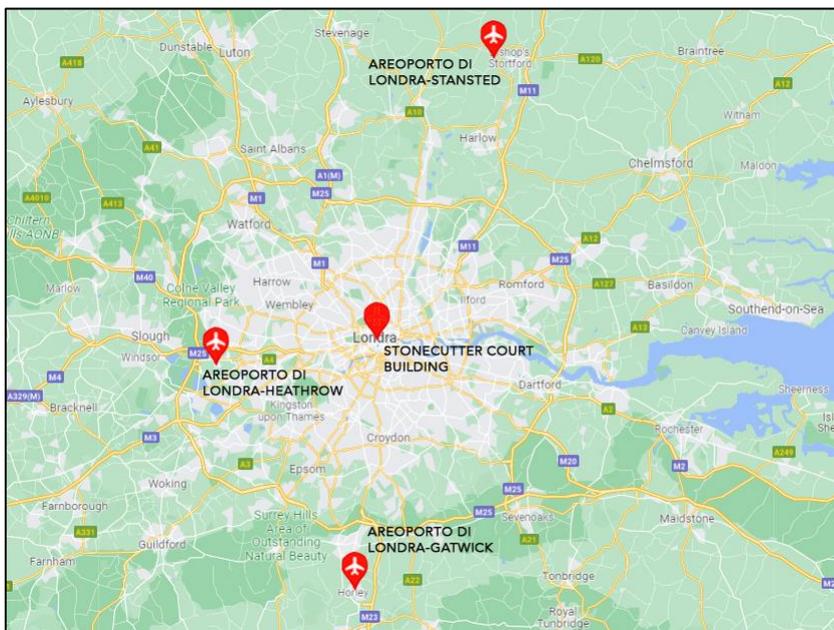


figura 3.10 - Mappa delle stazioni meteorologiche utilizzate per la realizzazione del modello climatico

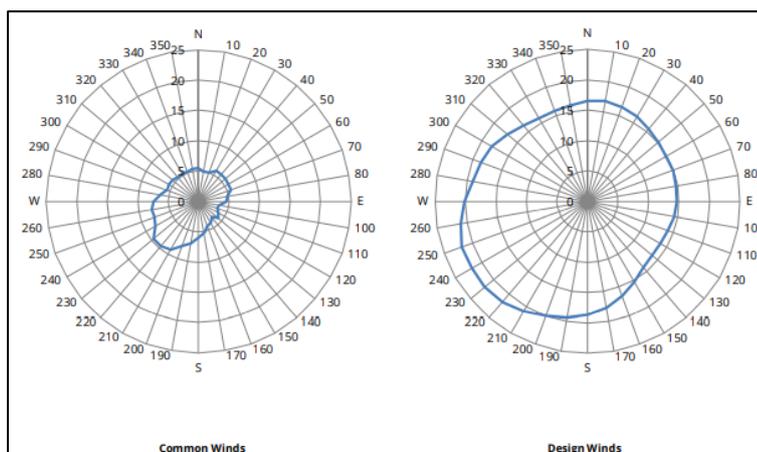


figura 3.11 - Velocità del vento comuni (sx) e di Progetto (dx) al variare della direzione

In figura 3.12 è invece possibile analizzare l'andamento della velocità del vento prevista dal modello climatico al variare del periodo di ritorno. Per il periodo di ritorno previsto per l'edificio oggetto di studio (50 anni) si ha una buona corrispondenza con il valore di velocità di base del vento<sup>27</sup> previsto dall'Eurocodice (21,5 m/s). In accordo a tali previsioni si è, dunque, deciso di adottare tale velocità di 21,5 m/s per le analisi in galleria. Si osserva, inoltre, che i venti più forti provengono da sud-ovest. In ogni caso, verranno eseguite 36 analisi (una ogni 10° per un'analisi completa a 360°) per verificare la presenza di eventuali fenomeni di interazione vento-struttura negativi.

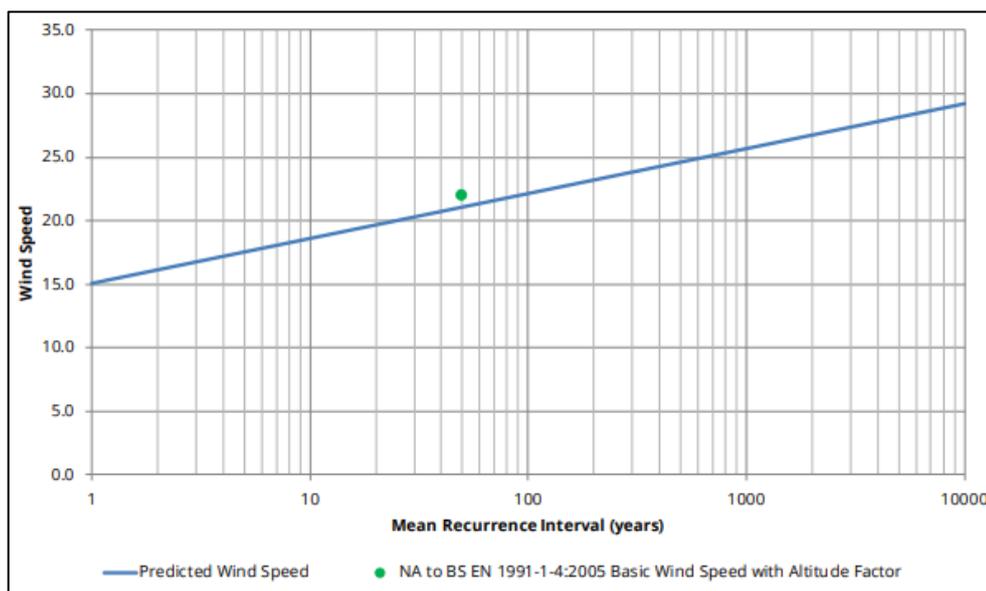
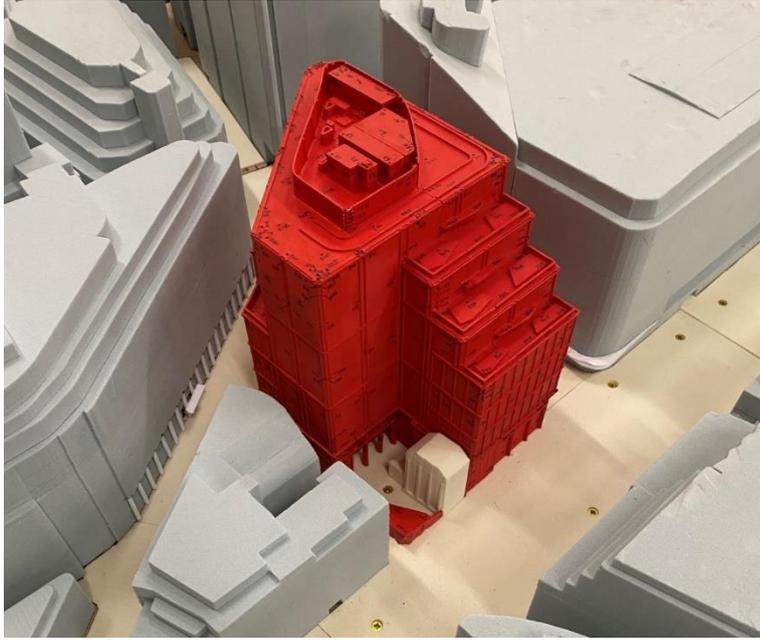


figura 3.12 – Velocità del vento al variare del tempo di ritorno

Lo scopo di tale analisi è rilevare le pressioni del vento che agiscono sull'involucro esterno dell'edificio, al fine di progettare il sistema di rivestimento esterno nei confronti dell'azione del flusso eolico. La base dell'approccio consiste nello strumentare il modello dell'edificio con prese di pressione disposte adeguatamente nelle aree esposte al vento: nel caso in esame sono stati adottati circa 600 sensori collocati sulle facciate, terrazzamenti e sul tetto (figure 3.13, 3.14 e 3.15).

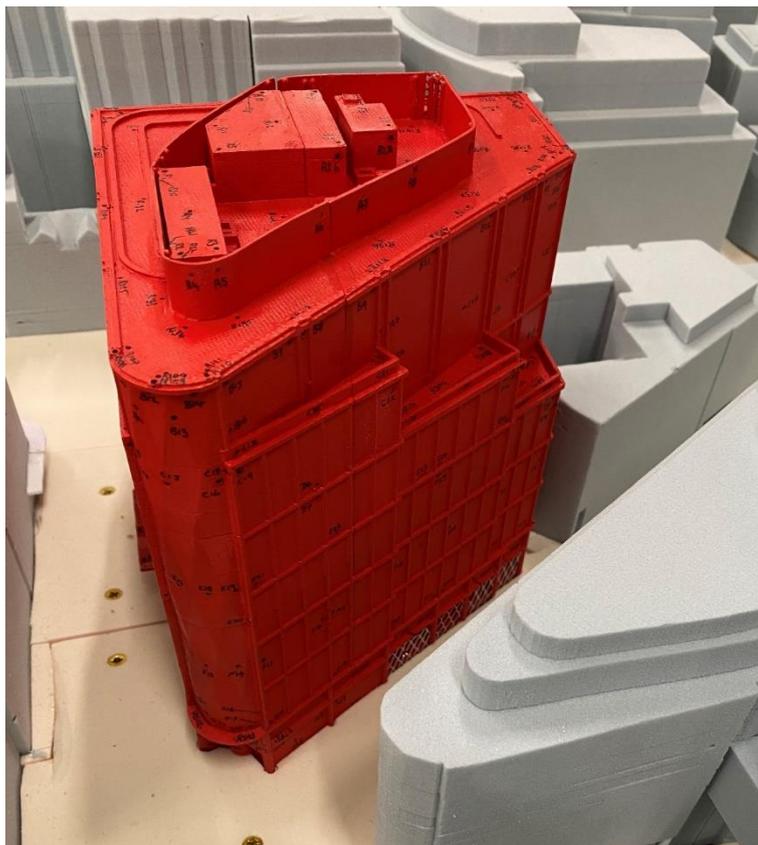
<sup>27</sup> Velocità base del vento: velocità media a 10 metri di altezza per 10 minuti in caso di terreno di categoria II.



*figura 3.13 - Modello di Stonecutter Court Building in scala 1:300 – Vista Sud Est*



*figura 3.14 - Modello di Stonecutter Court Building in scala 1:300 – Vista Nord Est*



*figura 3.15 - Modello di Stonecutter Court Building in scala 1:300 – Prospetto Ovest*

Come già accennato, tale sistema permette di rilevare contemporaneamente la pressione media, il quadrato medio delle fluttuazioni di pressione, i picchi di pressione negativi e positivi ed i coefficienti di pressione. A seconda della tipologia di analisi che si intende effettuare è poi possibile concentrarsi su una certa categoria di dati. Nel caso in esame, in considerazione del fatto che lo scopo dell'analisi rimane comunque la progettazione delle facciate continue su edifici a torre, ci si è concentrati sul rilevamento dei picchi di pressione positivi e negativi.

### **3.3 RISULTATI ANALISI IN GALLERIA DEL VENTO**

Definito il modello e tutte le sue caratteristiche è possibile procedere al test: grazie a grandi ventilatori viene generato il flusso eolico che investe direttamente il modello di edificio e contesto. Al contempo vengono rilevati i dati precedentemente descritti, grazie alle prese di pressione variamente distribuite.

Per la progettazione delle facciate continue costituenti l'involucro edilizio dovrà essere considerato il carico differenziale che agisce su ogni elemento: per ottenere le depressioni di picco le pressioni esterne negative rilevate dovranno essere aumentate di una quantità pari alla pressione interna positiva. Al tempo stesso, per ottenere le sovrappressioni di picco, le pressioni esterne positive rilevate dovranno essere aumentate di una quantità pari alla pressione interna negativa.

In presenza di vento forte, le pressioni interne sono dominate sia da effetti di perdita d'aria causate da piccoli percorsi distribuiti, sia da percorsi di perdita più grandi (apertura e/o rottura di porte e finestre, condotti di aerazione...). Gli effetti che ne conseguono possono essere differenti a seconda della dimensione e ubicazione degli elementi danneggiati, della compartimentazione interna e dei volumi interni.

Per valutare le pressioni interne conseguenti a tali aperture vengono effettuate misurazioni simultanee tra coppie di prese di pressione poste su pareti di edifici che condividono lo stesso volume interno. Viene in genere considerato un unico scenario di apertura (il più gravoso) poiché in presenza di molteplici fonti di perdita, il valore di pressione interna tende a ridursi.

Inoltre, è importante osservare che la probabilità di aperture/rotture di elementi varia a seconda della geolocalizzazione degli edifici stessi: si hanno probabilità maggiori nelle aree soggette a fenomeni ventosi importanti (es. aree soggette a uragani/tifoni), mentre si hanno probabilità minori nelle aree ove tali fenomeni non sono comuni. Comunque, in accordo alla normativa, è necessario considerarli e, nel caso in esame, i valori di pressione interna ottenuti dall'analisi e da adottare nella determinazione del carico da vento valgono:

- pressione:  $W_{i,p} = 0,17 \text{ kN/m}^2$
- depressione:  $W_{i,d} = -0,26 \text{ kN/m}^2$

Nelle figure seguenti è possibile osservare i valori di pressione di picco in kPa relativi agli involucri delle 36 analisi in galleria del vento effettuate ruotando il quartiere modellato con variazioni di angoli pari a  $10^\circ$ . Per ogni direzione sono stati rilevati i valori di pressione in ogni presa di pressione, dopodiché per ognuna di esse sono stati considerati il valore minimo negativo (depressione) ed il valore massimo positivo (sovrappressione) e, una volta sommati alle relative pressioni interne, sono stati riportati nei quattro prospetti dell'edificio *Stonecutter Court Building*. Tali figure prevedono zone differenti realizzate adottando

incrementi di 0,1 kPa in modo tale che, la pressione indicata, sia la massima per l'area analizzata.

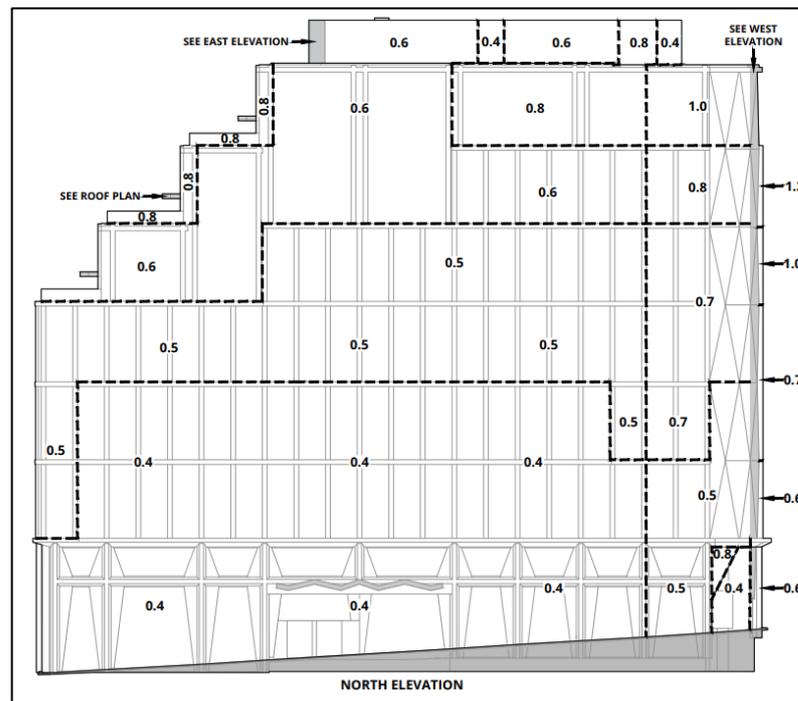


figura 3.16 – Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Nord

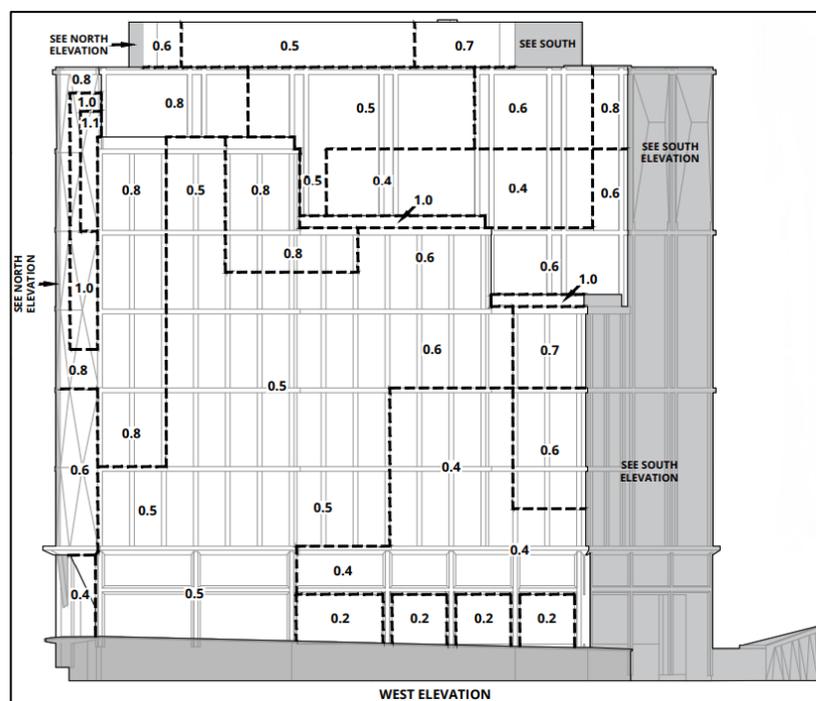


figura 3.17 – Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto ovest

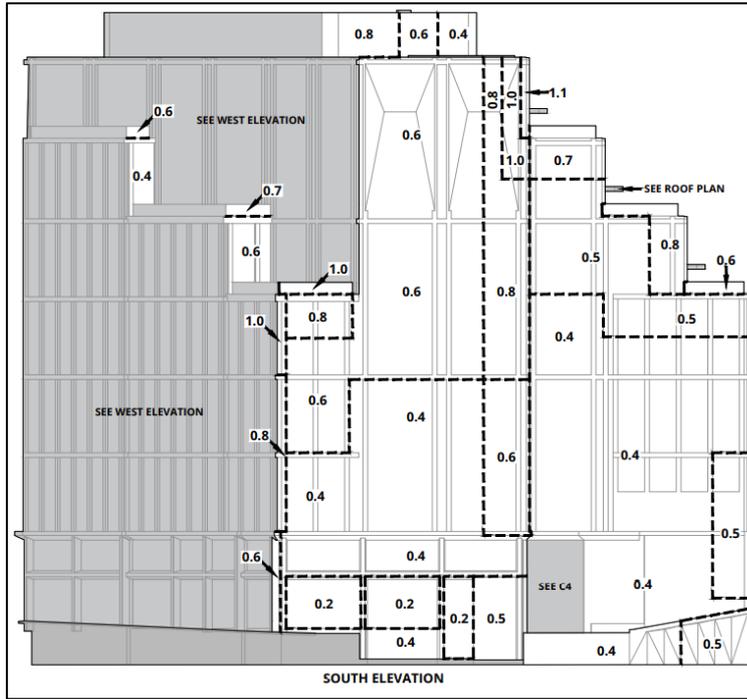


figura 3.18 – Pressioni negative di picco – Prospetto Sud

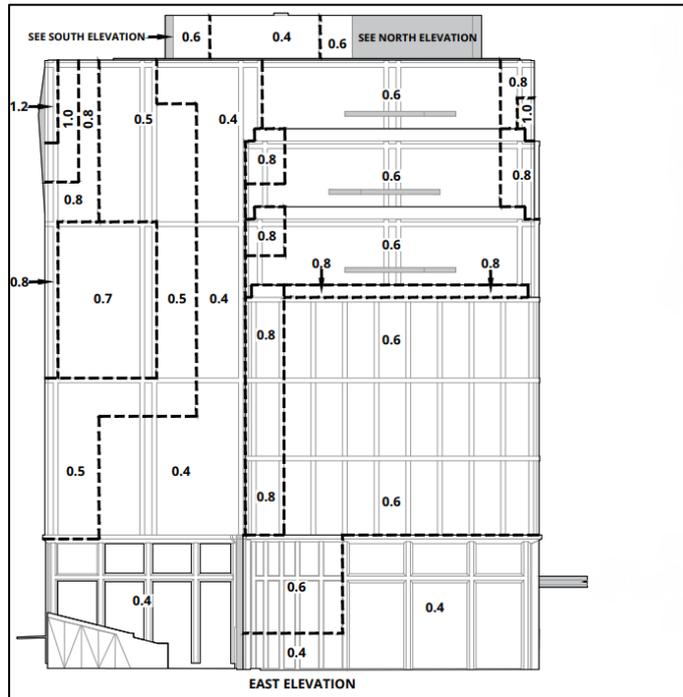


figura 3.19 – Pressioni negative di picco – Prospetto Est

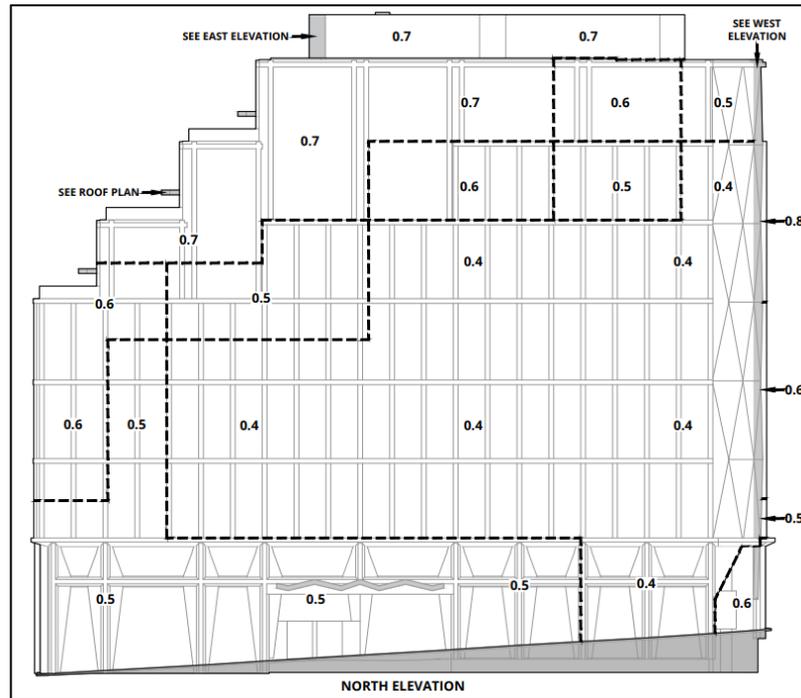


figura 3.20 – Pressioni positive di picco – Prospetto Nord

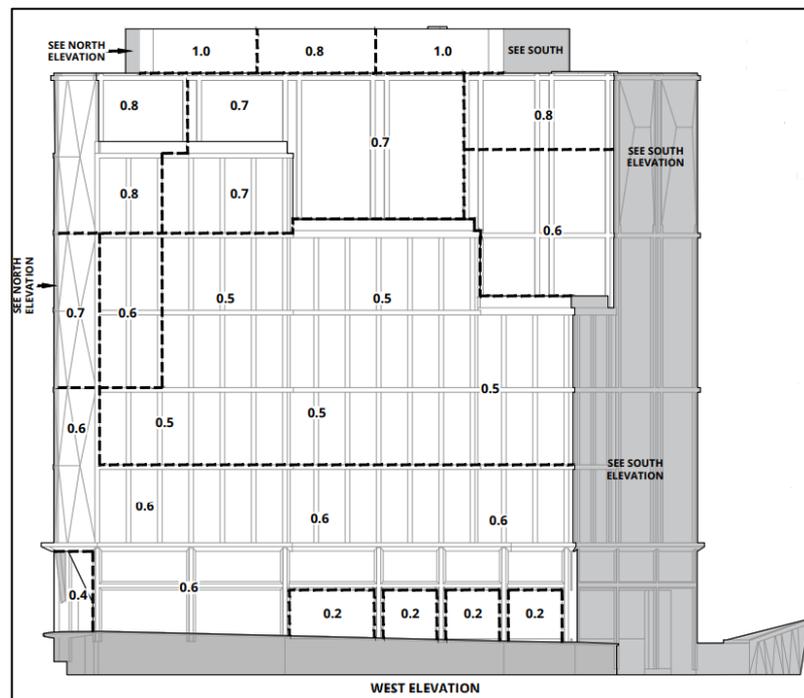


figura 3.21 – Pressioni positive di picco – Prospetto Ovest

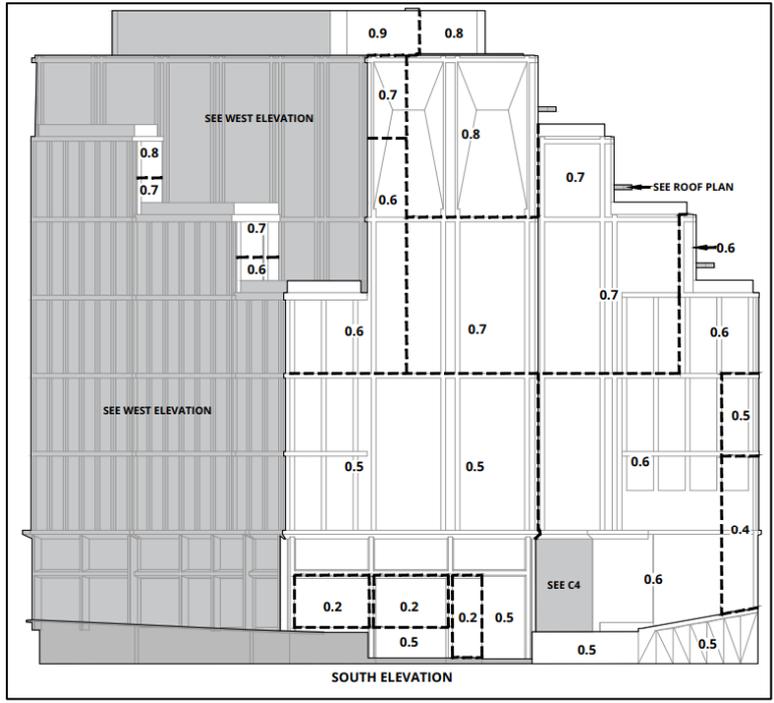


figura 3.22 – Pressioni positive di picco – Prospetto Sud

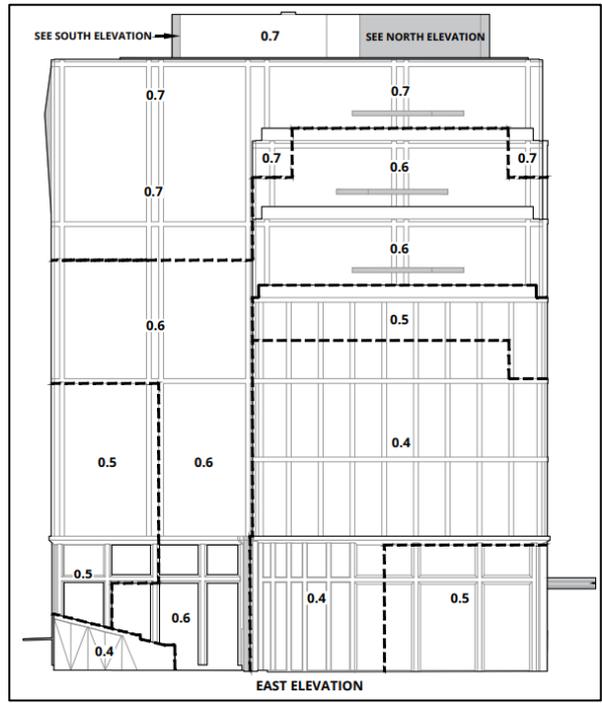


figura 3.23 – Pressioni positive di picco – Prospetto Est

Le pressioni del vento fornite da tale analisi e rappresentate nelle figure di cui sopra non contengono fattori di sicurezza e devono essere applicate in modo analogo ai carichi da vento definiti dai metodi analitici da normativa. Si osserva inoltre che le pressioni del vento di picco rilevate grazie alla galleria del vento sono inferiori rispetto ai valori ottenuti dall'approccio normativo. Tale risultato è in linea con le aspettative. La spiegazione di tale fenomeno è legata principalmente a due aspetti: *in primis* la normativa fornisce dei risultati a favor di sicurezza validi per un'ampia classe di edifici, mentre nell'analisi in galleria viene studiato l'edificio reale. In secondo luogo, tutti i fenomeni di interazione vento-struttura, con riferimento ad un edificio posizionato all'interno di un contesto urbano, vengono rilevati dall'analisi in galleria ma non vengono contemplati da un approccio normativo, che sconta il limite di considerare il singolo edificio soggetto all'azione del vento.

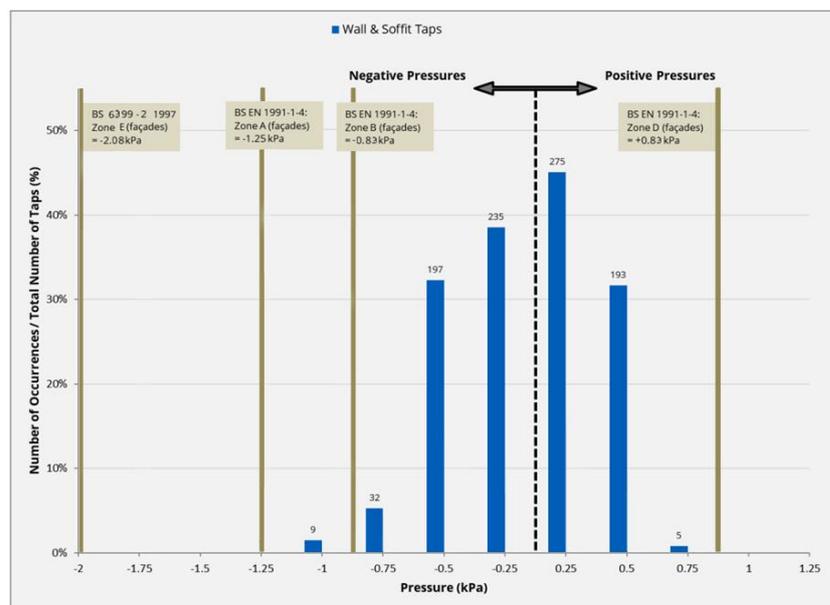


figura 3.24 – Confronto tra pressioni esterne di picco galleria del vento e pressioni da normativa



## 4 ANALISI COMPUTAZIONALE CFD – VENTO AEC

---

Al fine di progettare ed analizzare strutture, ed in generale elementi ingegnerizzati, che coinvolgono il moto dei fluidi, esistono due approcci:

- sperimentazione: realizzazione di modelli in scala testati in galleria del vento;
- calcolo: soluzione analitica o computazionale delle equazioni differenziali che governano il moto del fluido.

I due metodi sono in genere equivalenti tra di loro. Esistono diversi documenti convalidati a livello internazionale, come ad esempio il “*Computational evaluation of wind pressures on tall buildings*” redatto da *Dagnew, Bitsuamalk e Merrick* {21} , ove la struttura viene analizzata con entrambi gli approcci, ottenendo risultati analoghi. Tali confronti con metodi normativi e sperimentali, il cui uso e la cui efficacia sono stati confermati nel corso degli anni, sono fondamentali al fine di validare l’accuratezza di metodi computazionali innovativi.

Nell’ambito del presente elaborato sono già stati esposti il metodo analitico (approccio normativo) ed il metodo sperimentale (galleria del vento). Nel corso del presente capitolo verrà esposto il metodo computazionale.

In ogni caso, è opportuno precisare come l’obiettivo non sia focalizzarsi sul metodo o sulla realizzazione e sviluppo dell’analisi CFD, ma è invece l’apprendimento del funzionamento, così da poterlo applicare alla struttura oggetto di studio. In particolare, è importante definire analogie e differenze nell’analisi della struttura soggetta all’azione del vento con i metodi sopra descritti.

Il flusso eolico, e in generale qualsiasi flusso reale, è descritto dalle equazioni della fluidodinamica di Navier Stokes di seguito riproposte:

*Eq. di continuità:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

*Eq. di conservazione della quantità di moto:*

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w u)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{R_e} \cdot \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w v)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{R_e} \cdot \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v w)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{R_e} \cdot \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

*Eq. di conservazione dell'energia:*

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial(u E)}{\partial x} + \frac{\partial(v E)}{\partial y} + \frac{\partial(w E)}{\partial z} \\ = -\frac{\partial(u p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} - \frac{1}{R_e \cdot P_r} \cdot \left[ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] + \frac{1}{R_e} \\ \cdot \left[ \frac{\partial}{\partial x} (u \cdot \tau_{xx} + v \cdot \tau_{xy} + w \cdot \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \cdot \tau_{xy} + v \cdot \tau_{yy} + w \cdot \tau_{yz}) \right. \\ \left. + \frac{\partial}{\partial z} (u \cdot \tau_{xz} + v \cdot \tau_{yz} + w \cdot \tau_{zz}) \right] \end{aligned}$$

ove:

- $x, y, z$ : coordinate;
- $t$ : tempo;
- $u, v, w$ : componenti di velocità, rispettivamente nelle coordinate  $x, y$  e  $z$ ;
- $\rho$ : densità;
- $p$ : pressione;
- $R_e$ : numero di Reynolds;
- $P_r$ : numero di Prandtl
- $\tau_{xx}; \tau_{xy}; \tau_{xz}; \tau_{yy}; \tau_{yz}; \tau_{zz}$ : componenti della matrice degli sforzi;
- $q_x; q_y; q_z$ : componenti del flusso di calore
- $E$ : energia totale.

Si tratta di equazioni complesse tipicamente alle derivate parziali e pertanto non risolvibili analiticamente. A tal fine sono stati sviluppati i metodi CFD (*Computational Fluid*

*Dynamics*), ossia l'insieme dei metodi di risoluzione che integrano le equazioni del caso in esame, basandosi su griglie di calcolo che riproducono la geometria da analizzare.

Si tratta di *software* tipicamente utilizzati come strumenti di ricerca, sia a livello accademico che industriale, per l'ingegneria aeronautica e meccanica. Oggigiorno vengono sempre più utilizzati anche nella progettazione di strutture civili grazie allo sviluppo di computer più prestazionali ed alla realizzazione di *software* accessibili anche a ingegneri non specializzati nell'analisi fluidodinamica. I risultati conseguibili sono funzionali sia alla progettazione, che alla ricerca, e ciò anche grazie a tabelle ed immagini grafiche di grande impatto visivo.

Il principale punto debole di tali programmi, invece, è legato al notevole sforzo computazionale richiesto dall'enorme quantità di celle che compongono la *mesh*<sup>28</sup>, il quale determina un tempo di calcolo molto elevato. Inoltre, dovendo integrare numericamente equazioni complesse per un certo numero di celle, sono possibili anche problemi di convergenza e stabilità della soluzione, che possono essere ridotti e/o eliminati utilizzando specifiche accortezze nella realizzazione della *mesh* e nella definizione delle condizioni al contorno.

Al fine di eseguire le analisi esposte in seguito è stato utilizzato il *software* VENTO AEC<sup>29</sup> prodotto da Vento CFD srl<sup>30</sup>.



figura 4.1 - Software VENTO AEC

Dal punto di vista operativo ogni simulazione è costituita da tre fasi:

- *pre-processing*: prevede la definizione della geometria, del dominio di calcolo e delle sue condizioni al contorno, dei dati di input e della *mesh*;

---

<sup>28</sup> *Mesh*: insieme di vertici, spigoli e facce che definiscono la forma di un oggetto.

<sup>29</sup> VENTO AEC: *software* sviluppato per l'architettura, l'urbanistica e le costruzioni al fine di eseguire analisi del vento. [13]

<sup>30</sup> Vento CFD srl: società con sede a Cagliari (CA) che sviluppa e fornisce software per l'analisi di strutture al vento, tra cui VENTO AEC. [14]

- *solving*: prevede l'elaborazione dei molteplici dei dati di input e la risoluzione dell'equazioni con metodi iterativi;
- *post-processing*: prevede la determinazione ed il riepilogo dei risultati in forma grafica e/o tabellare.

#### 4.1 MODELLO: CARATTERISTICHE E DATI DI INPUT

Il *pre-processing* è la prima fase dell'analisi e prevede la realizzazione del modello comprensivo di tutti i dati di input necessari per la successiva analisi CFD.

*In primis* è necessario definire la geometria dell'edificio e del contesto urbano nel quale l'edificio stesso è inserito. Nel caso in esame si è proceduto modellando nel dettaglio *Stonecutter Court Building* a partire da dati forniti dallo studio di progettazione (*tp bennett*) grazie al *software Revit*<sup>31</sup> fornito da *Autodesk*<sup>32</sup> (figure 4.3 e 4.4).

Per quanto riguarda invece il contesto urbano è stato disegnato grazie al *software Autocad 3D*<sup>33</sup> a partire da rilievi plano-altimetrici (figure 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8). Tali edifici sono stati definiti per un cerchio di raggio di 450 m con centro *Stonecutter Court Building* e sono stati modellati con un livello di accuratezza inferiore alla struttura oggetto dell'analisi. Tale decisione è legata all'eccessivo costo computazionale che deriverebbe da una riproduzione puntuale. Il quartiere, infatti, non è l'oggetto principale dell'analisi, ma la sua modellazione è comunque imprescindibile per la riproduzione delle reali interazioni vento – edificio e permette l'ottenimento di risultati analoghi a quelli definiti dalla galleria del vento.

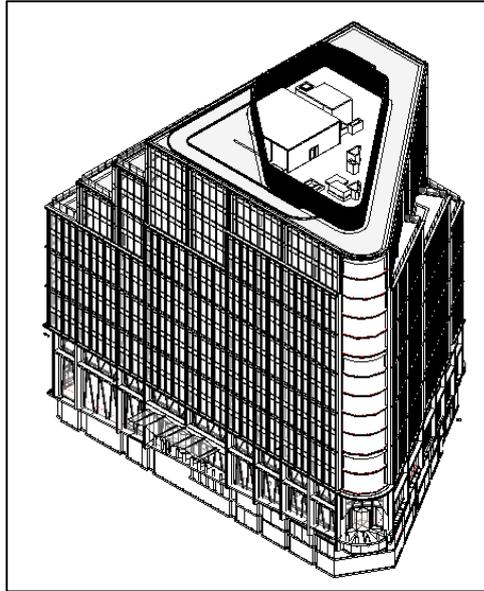


figura 4.2 - Software Revit

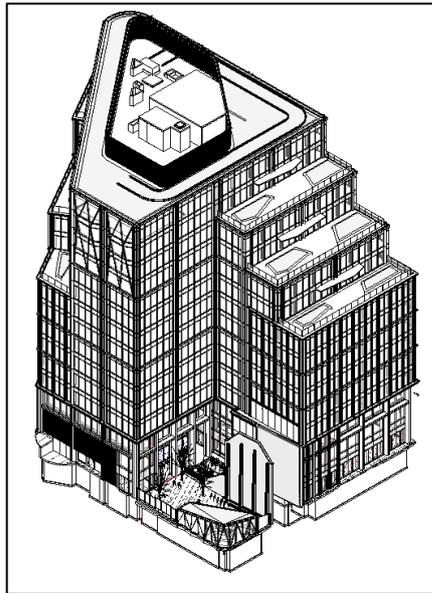
<sup>31</sup> *Revit*: programma BIM – *Building Information Modelling* fornito da *Autodesk*.

<sup>32</sup> *Autodesk*: azienda di *software* e servizi rivolti alla progettazione di infrastrutture, costruzioni civili e industriali.

<sup>33</sup> *Autocad*: programma di disegno 2D e 3D fornito da *Autodesk*.



*figura 4.3 – Vista 3D Nord Ovest Stonecutter Court Building – Revit*



*figura 4.4 – Vista 3D Sud Est Stonecutter Court Building – Revit*



*figura 4.5 - Vista 3D Nord complesso urbano di Farrington – Autocad 3D*



*figura 4.6 – Vista 3D Est complesso urbano di Farrington – Autocad 3D*



figura 4.7 – Vista 3D Sud complesso urbano di Farringdon – Autocad 3D

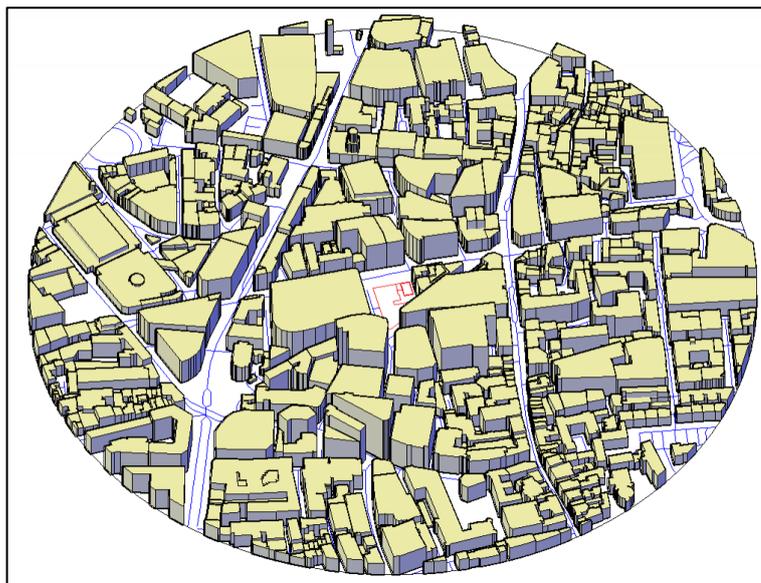
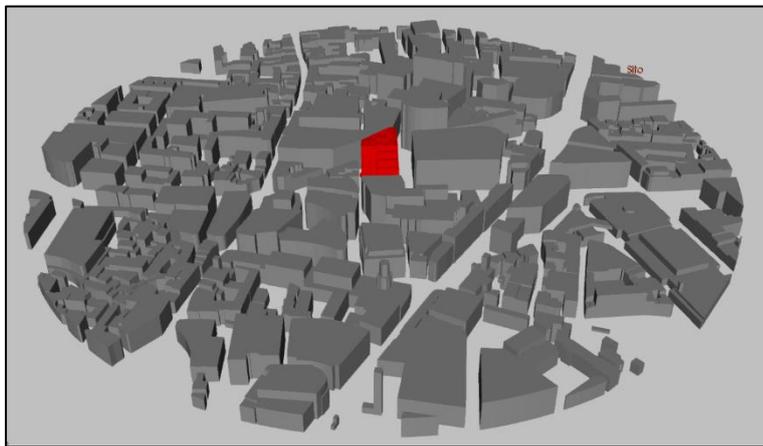


figura 4.8 – Vista 3D Ovest complesso urbano di Farringdon – Autocad 3D

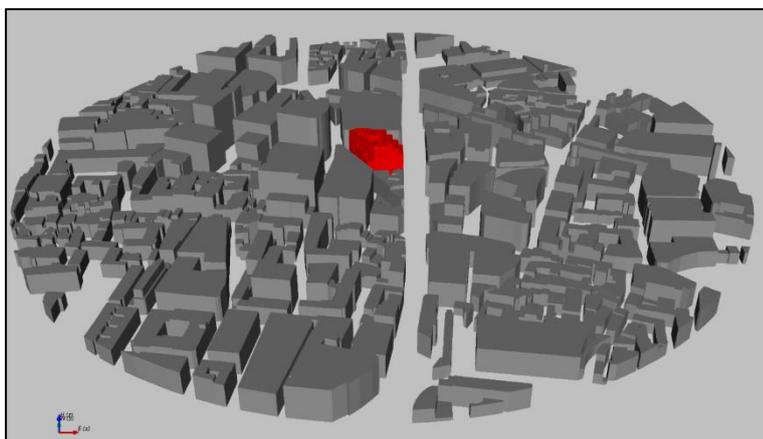
Una volta definita la geometria, lo step successivo consiste nell'importazione del modello all'interno del *software VENTO AEC*. Si ottiene così la rappresentazione osservabile nelle figure seguenti, ove *Stonecutter Court Building* è evidenziato in rosso. È importante precisare come, a differenza dell'analisi in galleria del vento ove per ovvi motivi di spazi il modello viene realizzato in scala, nel caso di analisi CFD il modello è in scala reale 1 : 1 .



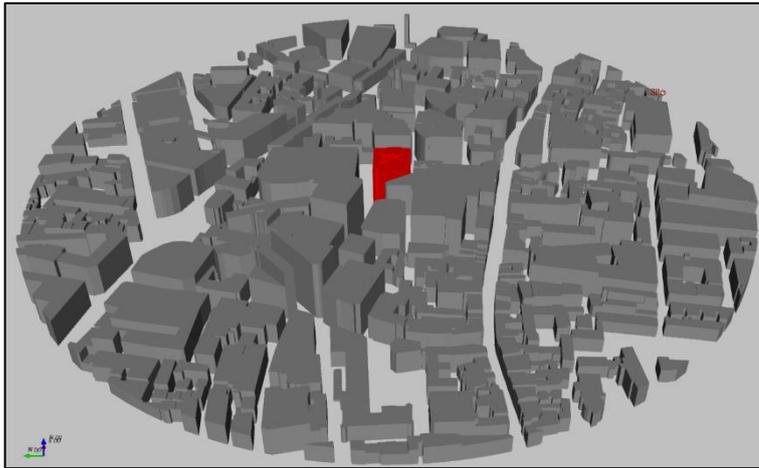
*figura 4.9 - Vista 3D Nord modello CFD – VENTO AEC*



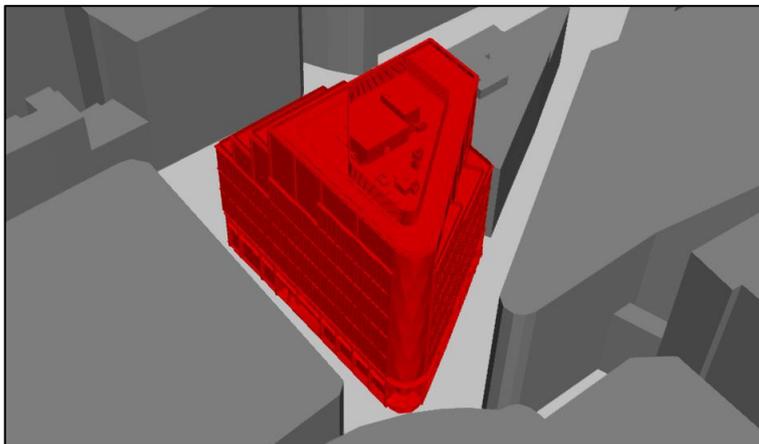
*figura 4.10 - Vista 3D Est modello CFD – VENTO AEC*



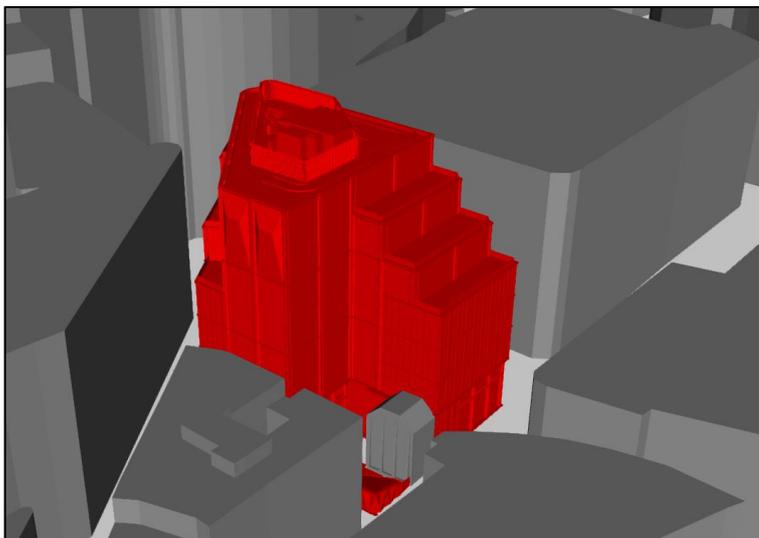
*figura 4.11 - Vista 3D Sud modello CFD – VENTO AEC*



*figura 4.12 - Vista 3D Ovest modello CFD – VENTO AEC*



*figura 4.13 - Vista 3D Nord - Ovest modello CFD – VENTO AEC*



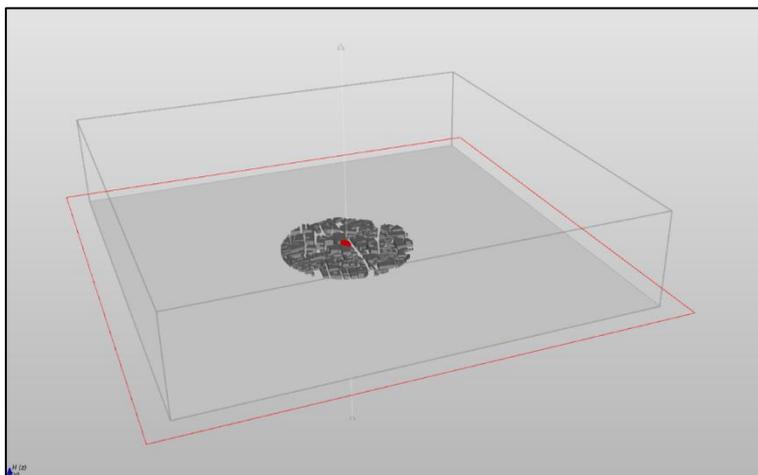
*figura 4.14 - Vista 3D Sud - Est modello CFD – VENTO AEC*

Il passaggio seguente riguarda poi la definizione del dominio di calcolo, ossia un volume all'interno del quale verrà posizionato il modello. Tale dominio è lo spazio ove avviene l'interazione tra flusso eolico e struttura e, per tale ragione, deve essere il più fedele possibile all'ambiente reale.

Il dominio è dunque il luogo ove vengono applicate le condizioni al contorno. Eventuali errori nella sua definizione si ripercuotono direttamente sulla soluzione del modello stesso. Le principali caratteristiche di tale dominio sono le sue dimensioni, le quali dipendono dalla geometria e dall'estensione del modello analizzato. A tal proposito Marco Mulas, ingegnere di *Vento CFD srl*, ricorda sempre:

*“Un dominio più grande del necessario è sempre meglio di uno più piccolo del necessario, poiché il prezzo che si paga nel prevedere celle aggiuntive (poche e grandi) è quasi trascurabile e si è certi di ri-ottenere condizioni imperturbate in prossimità del dominio.”*

Nel caso in esame, a causa delle notevoli dimensioni del modello in questione (edificio e quartiere), le dimensioni del dominio saranno di conseguenza elevate, pari a 3000 metri in direzione X e Y e pari a 650 metri in direzione Z.



*figura 4.15 - Rappresentazione dominio di calcolo*

	Min	Max	Length
X	-1500 m	1500 m	3000 m
Y	-1500 m	1500 m	3000 m
Z	0 m	650 m	650 m

figura 4.16 – Dimensioni dominio di calcolo

Definito il dominio di calcolo è poi possibile imporre le condizioni al contorno sulle superfici del dominio stesso. Tali dati di input sono di fondamentale importanza nella risoluzione delle equazioni differenziali, al fine di determinare una delle infinite possibili soluzioni.

Nel caso di analisi di un edificio al vento le principali condizioni al contorno da considerare sono: profilo del vento, modello di turbolenza, rugosità del terreno, intensità e direzione del vento, pressione e temperatura atmosferica. In generale, la maggior parte dei flussi di interesse ingegneristico sono flussi turbolenti. Nel corso del primo capitolo abbiamo analizzato come anche le costruzioni civili poste nello strato limite atmosferico siano soggette a flussi turbolenti. Nell'analisi eseguita si è deciso di adottare il modello di turbolenza *Spalart-Allmaras (1994)* [16][16], il quale aggiunge alle equazioni RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)<sup>34</sup> l'equazione di bilancio per la viscosità turbolenta:

$$\rho \cdot \frac{\partial \mu_t}{\partial t} + \rho \bar{V} \cdot \nabla \mu_t = \nabla \cdot (\mu_t \cdot \nabla \mu_t) + S$$

ove:

- $\rho$ : densità dell'aria;
- $\mu_t$ : viscosità turbolenta;
- $S$ : termine sorgente, dipende dalla viscosità molecolare, dalla viscosità turbolenta e dalla velocità media.

In accordo a quanto osservato nel corso del primo capitolo del presente elaborato, nello strato limite atmosferico è previsto un profilo del vento logaritmico, la cui velocità media alla quota  $z$  è rappresentata dalla seguente equazione:

<sup>34</sup> RANS = *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*: equazioni ottenute mediando le equazioni di Navier-Stokes (equazioni fondamentali della fluidodinamica).

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \cdot \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)$$

ove:

- $u^*$ : velocità di attrito [m/s];
- $k = 0,41$ : costante di Von Karman;
- $d$ : lunghezza di spostamento, altezza in metri dal suolo alla quale si raggiunge una velocità del vento ininfluenza da ostacoli quali alberi o altri edifici, approssimato in genere a  $2/3$  dell'altezza di tali ostacoli;
- $z_0$ : rugosità aerodinamica, misura correttiva in metri necessaria per considerare l'effetto della rugosità di una superficie sul flusso eolico. Nel caso in esame, trattandosi di un quartiere densamente costruito, si è optato per un valore pari a 1,75 m compreso nel range di valori 0,5 – 3 da adottare in questi casi.

Per quanto riguarda l'intensità del vento, in analogia a quanto definito nell'analisi in galleria del vento, è stata adottata una velocità di 21,5 m/s. Invece per la direzione, si è deciso di optare sempre per un'analisi a 360° ma, in questo caso, con variazioni di angoli di incidenza pari a 45° invece dei 10° utilizzati in galleria del vento. Tale decisione deriva dalla notevole durata di ciascuna analisi (circa 17 ore ciascuna) ed ha quindi lo scopo di ridurre le casistiche dalle 36 precedentemente analizzate, a soli 8 casi.

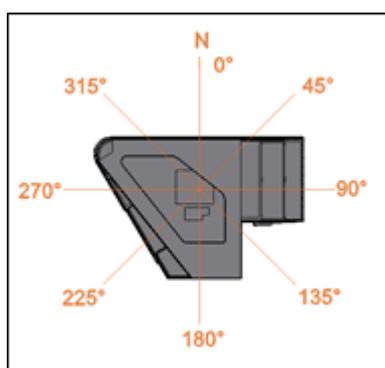


figura 4.17 - Direzioni del vento analizzate

Passando poi alle condizioni atmosferiche sono stati adottati valori standard di 25°C e 101325 Pa.

Wind velocity	<input type="text" value="21.5 m/s"/>
Wind direction	<input type="text" value="0 °"/> N
Temperature	<input type="text" value="25 °C"/>
Pressure	<input type="text" value="101325 Pa"/>

figura 4.18 - Condizioni al contorno del vento

Oltre a tali input è necessario introdurre anche tutte le proprietà fisiche dell'aria. Trattandosi di un'analisi di un edificio in condizioni standard si è optato per condizioni naturali osservabili in figura 4.19.

Fluid	<input type="text" value="air at standard condition"/>
<input checked="" type="checkbox"/> Physical properties	
Specific heat ratio	<input type="text" value="1.4"/>
Specific heat	<input type="text" value="1004.5 J/(kg·K)"/>
Viscosity	<input type="text" value="1.8e-05 kg/(m·s)"/>
Prandtl number	<input type="text" value="0.73"/>
Schmidt number	<input type="text" value="0.73"/>
Density	<input type="text" value="1.225 kg/m³"/>

figura 4.19 - Condizioni al contorno dell'aria

Infine, l'ultimo passo del *pre-processing* riguarda la creazione della *mesh*. L'analisi CFD prevede la discretizzazione del dominio di calcolo in un numero finito di elementi che prendono il nome di celle, l'insieme delle celle costituisce la griglia di calcolo comunemente chiamata *mesh*. La scelta di tale discretizzazione è di fondamentale importanza nell'ottenere risultati accurati, in quanto influisce sulle principali proprietà della soluzione del metodo iterativo (accuratezza, stabilità e costo computazionale).

Nel caso di analisi CFD con il *software VENTO AEC*, la *mesh* differisce da quelle a cui siamo abituati nel campo dell'ingegneria civile in quanto non prevede una discretizzazione dell'oggetto analizzato ma, bensì, una discretizzazione del dominio di calcolo precedentemente descritto. Tale metodo prende il nome di *immersed boundary* (IB).

In realtà, come si evince dal testo “*Immersed Boundary Methods*” redatto da Mittal e Iaccarino {22} tale processo di discretizzazione fu utilizzato la prima volta per la descrizione del comportamento del cuore e del relativo flusso sanguigno, grazie al metodo sviluppato da Peskin (1972). La peculiarità di tale metodo risiedeva nell’utilizzo di una griglia cartesiana non conforme alla geometria dell’organo stesso.

Oggi giorno il termine *immersed boundary* viene attribuito a tutti quei metodi numerici che consentono di studiare la presenza di un oggetto investito da un flusso viscoso grazie all’utilizzo di una griglia non conforme ai contorni dello stesso oggetto di studio. Tali metodi di calcolo differiscono dall’approccio convenzionale di *body conformal* ove viene invece utilizzata una *mesh* regolare definita discretizzando il corpo stesso.

La differenza tra i due metodi è osservabile in figura 4.20, ove nel primo caso si osserva una griglia di calcolo cartesiana, mentre nel secondo si procede alla discretizzazione del corpo.

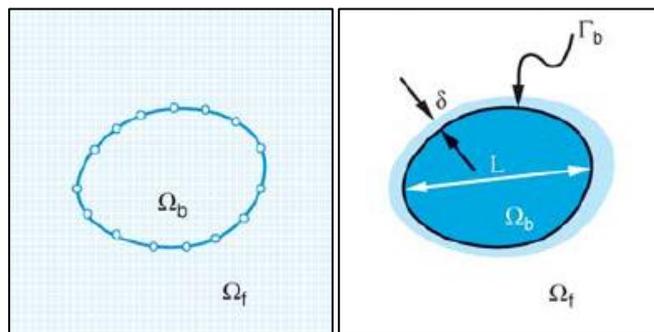


figura 4.20- Confronto tra immersed boundary IB (sx) e body conformal (dx)

I principali vantaggi dell’uso di un metodo *immersed boundary* sono:

- generazione di una griglia svincolata dal corpo analizzato la quale consente di ridurre la complessità della *mesh*, in quanto la geometria non influenza né la conformazione né la qualità. Così facendo non si avranno celle deformate, le quali avrebbero influito negativamente sull’accuratezza di soluzione dei metodi tradizionali;
- semplicità dell’analisi dei corpi in movimento grazie alla stazionarietà ed alla indeformabilità di una griglia cartesiana. Qualora si avessero, invece, metodi *body conformal* sarebbe necessario aggiornare le celle ad ogni passo temporale in modo da proiettarvi la nuova soluzione, con incidenza negativa sul costo computazionale.

Al tempo stesso il metodo *immersed boundary* prevede anche aspetti ai quali porre particolare attenzione così riassumibili:

- necessità di cicli iterativi per giungere alla soluzione. Tutti i risolutori delle equazioni di Navier Stokes discretizzate necessitano di iterazioni per giungere alla soluzione;
- difficoltà nel rilevare la presenza di dettagli di piccole dimensioni in presenza di modelli caratterizzati da grandi estensioni come quello sopra esposto.

Al crescere del numero di celle si ottiene una soluzione più accurata ed aderente alla realtà ma, al tempo stesso, aumenta il costo computazionale. Risulta, dunque, fondamentale trovare un buon compromesso in fase di *meshing*<sup>35</sup>. A tal fine è necessario seguire poche ma fondamentali regole per ottenere una soluzione accurata:

- in tutti i problemi di fluidodinamica un flusso che investe un oggetto solido viene perturbato e la massima perturbazione avviene in corrispondenza delle superfici stesse degli oggetti. In tali zone, per qualsiasi velocità di input, la velocità del vento tende ad annullarsi e dunque si verificheranno gradienti di velocità più elevati. In correlazione a tale fenomeno è di fondamentale importanza prevedere molte celle di piccole dimensioni in adiacenza all'edificio oggetto di studio;
- allontanandosi dalle superfici è possibile aumentare le dimensioni delle celle con una transizione graduale in quanto, nelle zone distanti dall'edificio stesso, il flusso non viene perturbato. Nel caso in cui tale transizione lenta e graduale non venisse rispettata, come nel caso di edifici isolati, è possibile prevedere “*refinement windows*”, ossia domini 3D di dimensioni ridotte in cui la *mesh* viene raffittita al fine di ottenere una soluzione accurata;
- dimensioni delle celle tali da cogliere tutte le scale di turbolenza previste dal modello di turbolenza adottato.

Dalle regole teoriche è possibile desumere consigli pratici necessari alla realizzazione di corretta *mesh*, validi per il *software VENTO AEC*. *In primis*, nel caso di analisi al vento *outdoor* è necessario impostare le dimensioni delle celle ai confini del dominio di calcolo. È stato appurato che in tali zone gli effetti della presenza del modello sono difficilmente

---

<sup>35</sup> *Meshing*: procedura di creazione della *mesh*.

percepiti, per tale ragione sono state previste dimensioni delle celle elevate, nel caso in esame pari a: 187,5 metri in direzione xy e 81,25 metri in direzione z.

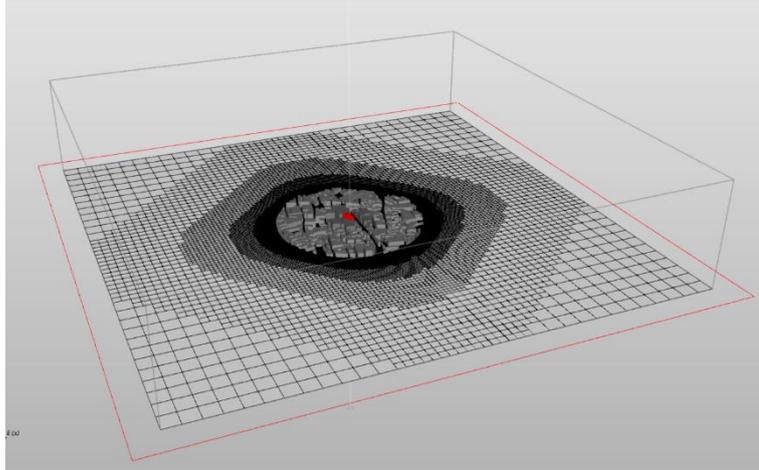
In prossimità delle superfici del modello è necessario, invece, prevedere celle di dimensioni inferiori così da raffittire la *mesh*. A ciascuna superficie del modello vengono assegnate due dimensioni della cella: dimensione normale e tangenziale. Nel caso in esame si è optato per differenziare le dimensioni a seconda del ruolo nell'analisi stessa:

- essendo *Stonecutter Court Building* il focus dell'analisi è stata adottata una *mesh* molto fitta con dimensioni delle celle pari a circa 0,18 metri in direzione xy e 0,16 metri in direzione z;
- in relazione al contesto urbano, la cui funzione è quella di alterare il flusso eolico in modo tale da ottenere gli stessi fenomeni di interazione vento-struttura rilevati dall'analisi in galleria, si è deciso di adottare una *mesh* più rada. Per di più, al fine di contenere il numero delle celle totali, si è deciso di prevedere celle di dimensioni variabili a seconda della distanza degli edifici stessi dal centro del modello:
  - per gli edifici previsti in un raggio di 200 metri sono previste celle di dimensioni 1,45 metri in direzione xy e 1,25 metri in direzione z;
  - per i restanti edifici, invece, sono previste celle più grandi di dimensione pari a circa 2,90 metri in direzione xy e 2,50 metri in direzione z.

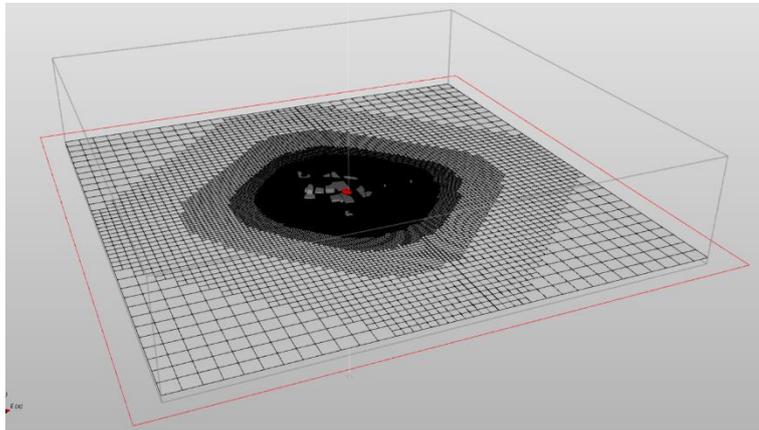
Inoltre, grazie al parametro di densità di griglia, è possibile gestire la modalità di riduzione delle celle spostandosi dal modello stesso verso le estremità del dominio di calcolo. Nel caso in esame si è deciso di adottare una riduzione di celle che fosse il più lenta e graduale possibile, così da ottenere una soluzione con alto grado di fedeltà.

Infine, nel caso in esame, non si è reso necessario l'utilizzo di una finestra di raffittimento (*bounding box*) in quanto, essendo *Stonecutter Court Building* progettato nel quartiere di *Farringdon*, il quale risulta densamente costruito, la presenza delle cellule degli edifici adiacenti permettono di catturare il flusso eolico senza necessità di un ulteriore raffittimento.

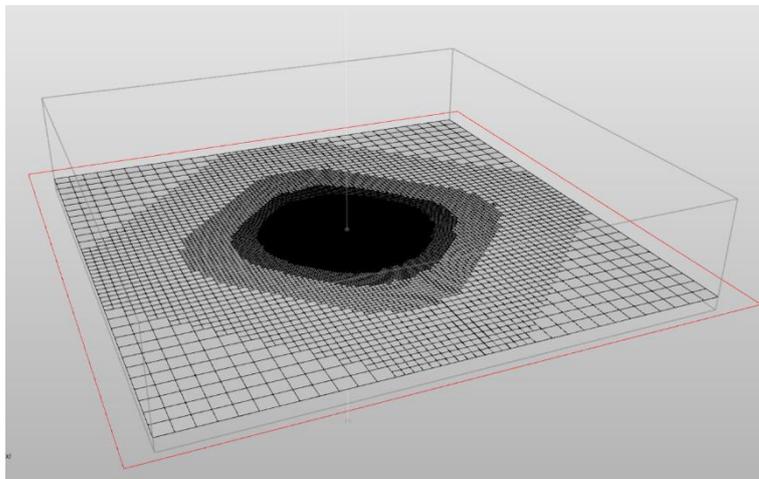
In definitiva, grazie a tali operazioni è stato possibile ottenere la griglia di calcolo 3D che prevede un totale di circa 13 milioni di celle osservabile nelle figure seguenti.



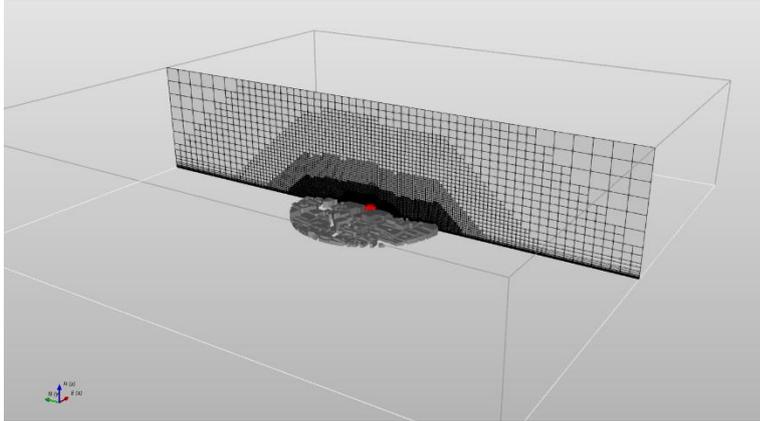
*figura 4.21 – mesh xy a quota  $z = 0$  m*



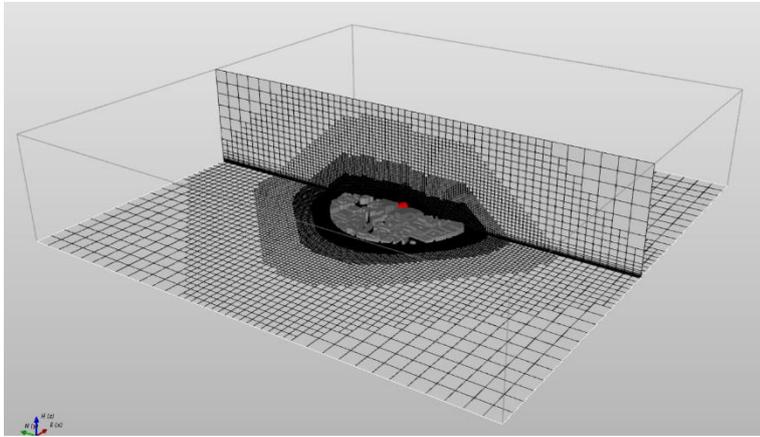
*figura 4.22 – mesh xy a quota  $z = 40$  m*



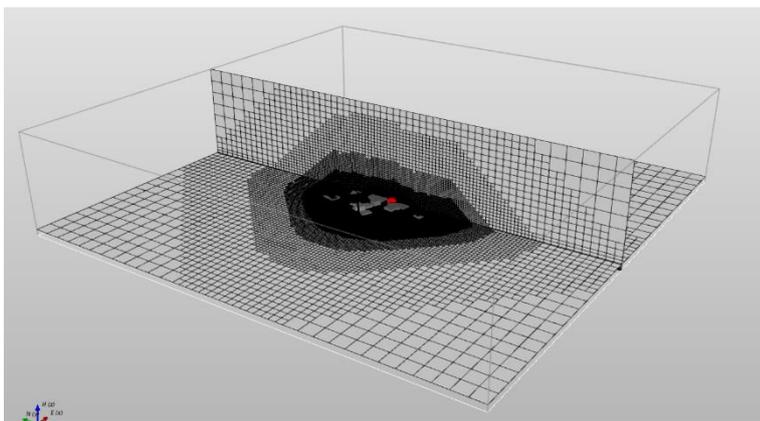
*figura 4.23 – mesh xy a quota  $z = 80$  m*



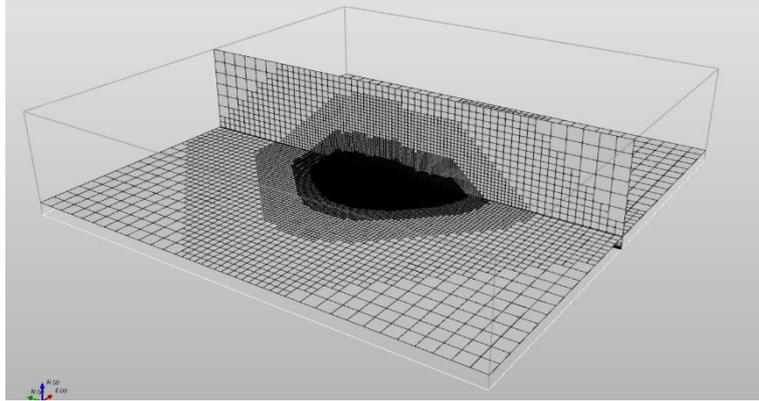
*figura 4.24 – mesh zy (direzione del flusso eolico) a  $x = 0$*



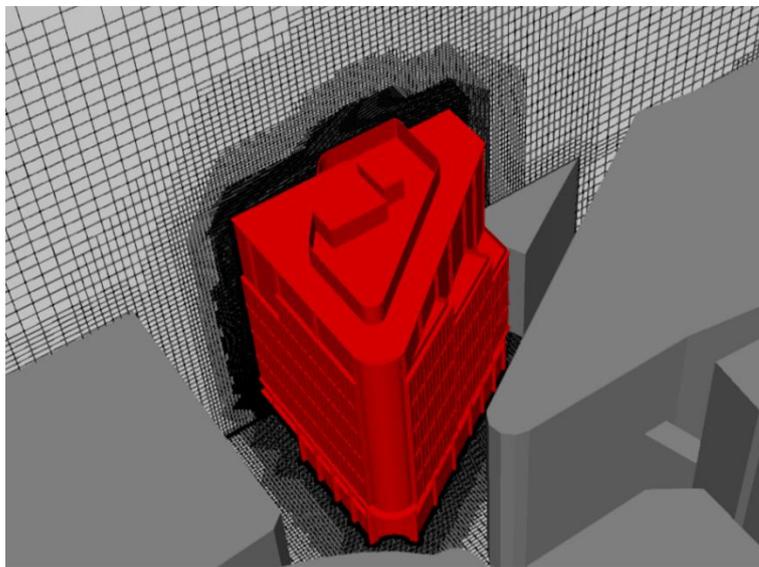
*figura 4.25 – mesh xyz a quota  $z = 0$  m*



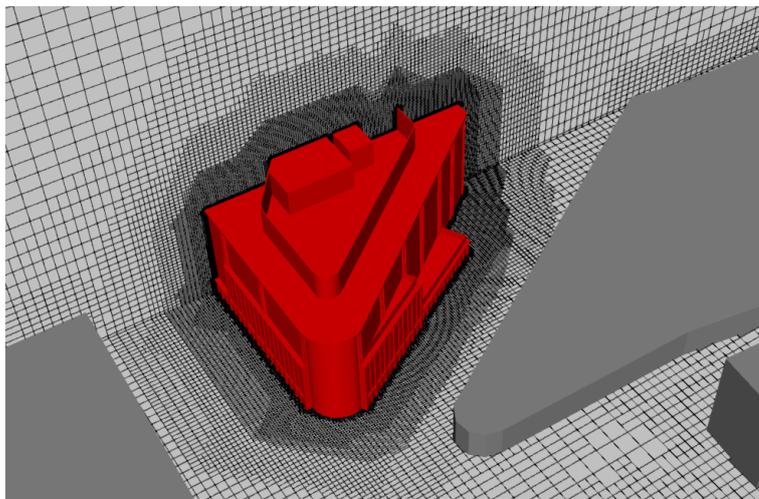
*figura 4.26 – mesh xyz a quota  $z = 40$  m*



*figura 4.27 – mesh xyz a quota  $z = 80\text{ m}$*



*figura 4.28 - Dettaglio mesh xyz a quota  $z = 0\text{ m}$*



*figura 4.29 - Dettaglio mesh xyz a quota  $z = 0\text{ m}$*

## 4.2 ANALISI COMPUTAZIONALE

Con la realizzazione della *mesh* si conclude la fase di *pre-processing*: il modello risulta completo e pronto alla risoluzione vera e propria delle equazioni differenziali.

Le equazioni differenziali del caso analizzato possono essere così ri-definite:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = - \frac{\partial F(Q)}{\partial x_j} + S = RES(Q)$$

ove:

- $Q$ : insieme delle variabili, componenti  $x$ ,  $y$  e  $z$  della velocità, pressione, temperatura e turbolenza;
- $S$ : insieme del possibile termine sorgente delle precedenti variabili;
- $RES$ : residuo.

Risolvere il sistema di equazioni significa trovare la soluzione  $Q(x,y,z)$  che annulli il residuo soddisfacendo la seguente condizione  $RES(Q) = 0$ . Tale processo viene eseguito grazie all'uso di un algoritmo iterativo con metodo di *Gauss-Seidel red-black* variante del metodo di *Gauss-Seidel* {26} .

Per metodo iterativo si intende l'insieme dei metodi che risolvono un sistema lineare scritto nella forma matriciale  $\tilde{A} \bar{x} = \bar{b}$  partendo da un vettore iniziale  $\bar{x}^0$  e generando una successione infinita di vettori ( $\bar{x}^0 \rightarrow \bar{x}^1 \rightarrow \bar{x}^2 \dots$ ) che converge alla soluzione cercata, la quale esiste ed è unica. In particolare, l'algoritmo di *Gauss-Seidel* suddivide la matrice  $\tilde{A}$  in tre matrici:

- $\tilde{U}$ : matrice triangolare superiore;
- $\tilde{L}$ : matrice triangolare inferiore;
- $\tilde{D}$ : matrice diagonale.

$$\tilde{A} = \tilde{D} - \tilde{L} - \tilde{U} \rightarrow \tilde{A} \bar{x} = \bar{b} \rightarrow (\tilde{D} - \tilde{L} - \tilde{U}) \bar{x} = \bar{b}$$

Il diagramma mostra la scomposizione della matrice A in tre matrici: D (diagonale), L (triangolare inferiore) e U (triangolare superiore). La matrice A è rappresentata come una matrice quadrata con una diagonale scesa. La matrice D è la diagonale stessa, L è la parte inferiore della matrice (sotto la diagonale) e U è la parte superiore (sopra la diagonale). Le matrici D, L e U sono indicate in rosso all'interno della matrice A.

$$A = \begin{pmatrix} & & -U \\ & D & \\ -L & & \end{pmatrix}$$

figura 4.30 - Scomposizione matrice A - slides metodi numerici per l'ingegneria civile - Fiorella Sgallari

Preso il vettore  $\overline{x^0}$  si costruisce la successione di vettori:

$$(\tilde{D} - \tilde{L}) \overline{x^{k+1}} = \tilde{U} \overline{x^k} + \bar{b}$$

$$\overline{x^{k+1}} = (\tilde{D} - \tilde{L})^{-1} \tilde{U} \overline{x^k} + (\tilde{D} - \tilde{L})^{-1} \bar{b}$$

$$\overline{x^{k+1}} = \widetilde{R}_{GS} \overline{x^k} + (\tilde{D} - \tilde{L})^{-1} \bar{b}$$

ove  $\widetilde{R}_{GS} = (\tilde{D} - \tilde{L})^{-1} \tilde{U} = \text{Matrice di iterazione di Gauss Seidel}$

La variante *red-black* adotta uno schema di analisi a scacchiera composto da incognite rosse e nere riportato per il caso 2D in figura 4.31, ciò lo differenzia dall'algoritmo standard sopra riportato, il quale utilizza invece una sola direzione di analisi. Ad ogni passo l'algoritmo richiede la sola conoscenza delle rispettive variabili: per il calcolo delle incognite rosse (nere) richiede solo i punti rossi (neri). Nel caso 1D, le componenti rosse possono essere così definite:

$$\overline{x_i^{k+1}} = \frac{1}{2} (\overline{x_{i+1}^k} + \overline{x_{i-1}^k} + h^2 \bar{b}_i)$$

mentre le componenti nere:

$$\overline{x_{i+1}^{k+1}} = \frac{1}{2} (\overline{x_{i+1}^{k+1}} + \overline{x_i^{k+1}} + h^2 \bar{b}_{i+1})$$

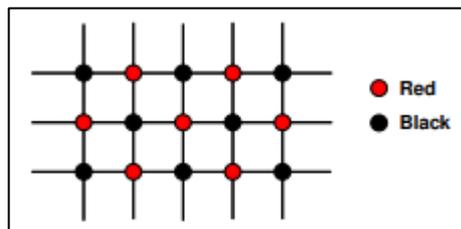


figura 4.31 – Pattern a scacchiera

Ad ogni iterazione l'algoritmo ricerca la soluzione più vicina a quella reale. È compito dell'utente concludere l'analisi quando ritiene che la soluzione ricercata sia accettabile tenendo in considerazione che:

- effettuando un numero ridotto di iterazioni si ottiene una soluzione distante da quella reale affetta da notevoli errori;
- effettuando un numero elevato di iterazioni si ottiene una soluzione prossima a quella reale affetta da errori ridotti, al contempo però si avranno tempi di analisi più lunghi.

All'aumentare del numero di passi aumenta anche il costo computazionale di analisi e, di conseguenza, il tempo necessario per svolgerla. La scelta deve, quindi, essere ponderata al fine di equilibrare accuratezza della soluzione e costo computazionale.

Al fine di concludere l'analisi, il *software VENTO AEC* prevede due processi paralleli comuni a tutti i metodi iterativi: il primo consiste nel definire il numero massimo di iterazioni svolte dall'algoritmo, il secondo prevede l'utilizzo della convergenza. Quest'ultima rappresenta la misura con la quale i residui si avvicinano allo zero, definita come:

$$conv = \log_{10} \frac{RES_{1^{\circ}iterazione}}{RES_{iterazione\ corrente}}$$

Un'analisi computazionale di tipo iterativo come quella adottata è ritenuta soddisfacente quando il residuo raggiunge valori dell'ordine di -4 / -5. Per il caso di studio si è optato per un massimo di 3000 iterazioni e una convergenza pari a -4.5.

Oltre alla convergenza matematica è possibile anche far riferimento alla convergenza cosiddetta "ingegneristica" rappresentata dalle forze agenti nelle due direzioni: quando queste raggiungono andamenti costanti al crescere delle iterazioni significa che la soluzione ottenuta è stabile ed è dunque lecito procedere all'analisi dei risultati. Nel caso in cui, invece, le due convergenze dovessero prevedere rapide variazioni di pendenza verso l'alto o oscillazioni, i risultati ottenuti non possono essere ritenuti validi per la progettazione. Le cause di tali problematiche possono essere molteplici: errori nei dati di input, errori nella geometria inserita o errori di simulazione. Individuato il problema è necessario correggerlo prima di procedere nuovamente alle analisi.

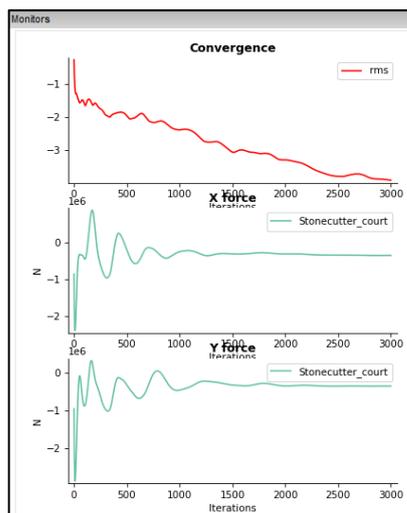


figura 4.32 - Esempio di convergenza matematica e ingegneristica

Dall'immagine in figura 4.32 si può osservare come, nelle fasi iniziali, l'algoritmo ricerchi la soluzione, essendo, però, ancora affetta da residui grossolani, la convergenza ingegneristica tende ad oscillare. All'aumentare delle iterazioni la soluzione dell'*i*-esimo passo è prossima a quella reale e, di conseguenza, la convergenza tende ad assestarsi.

Tale fase è dunque di fondamentale importanza per individuare risultati validi e utili alla progettazione e scartare, invece, le analisi affette da errori.

### 4.3 RISULTATI ANALISI CFD

Il *post-processing* è l'ultima fase di analisi CFD.

Ottenuta la risoluzione delle equazioni differenziali è possibile visualizzare, analizzare ed interpretare i risultati ottenuti. Nel caso in esame, come già rilevato, si è optato per un'analisi a 360° con variazioni di angoli di incidenza pari a 45°. In questo modo sono state analizzate 8 diverse casistiche.

Per ogni caso è stato fatto in primo luogo un controllo della convergenza della soluzione. Appurata la validità dei risultati si è poi proceduto alla loro visualizzazione. Il *software VENTO AEC* permette la visualizzazione di diversi risultati del singolo caso sulle superfici dell'oggetto modellato: velocità del flusso eolico, coefficiente di pressione  $C_p$ , pressione e temperatura.

In analogia ai risultati disponibili dall'analisi in galleria del vento si è optato per l'estrapolazione dei risultati in termini di pressioni agenti sulle diverse superfici del modello.

Per ogni direzione del vento sono stati ricavati 8 prospetti raffiguranti la variazione della pressione sulle relative facciate: 4 per le pressioni positive e 4 per le pressioni negative. Nelle figure seguenti sono rappresentati i valori di pressione relative al caso con vento di direzione Nord ( $0^\circ$ ). I risultati delle rimanenti 7 analisi vengono omesse nel presente elaborato per brevità di rappresentazione ma sono comunque osservabili nell'allegato A.

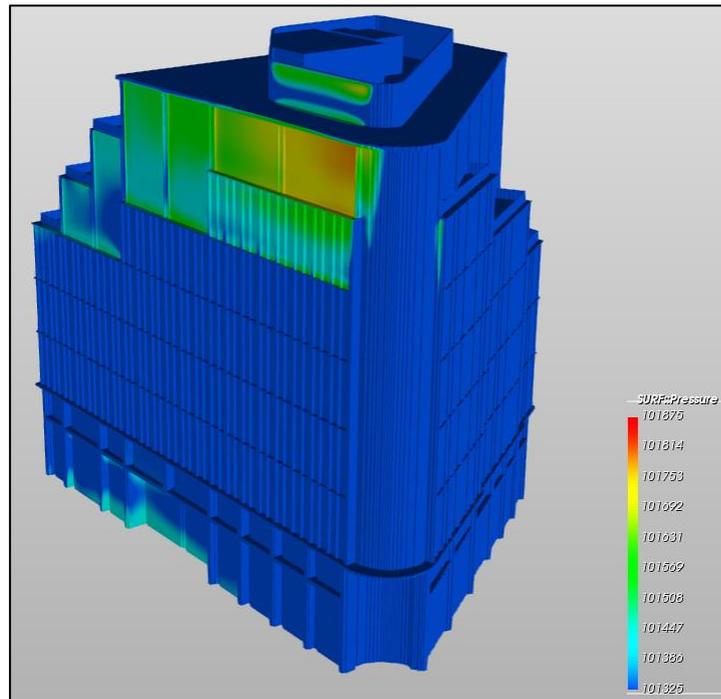


figura 4.33 - Andamento delle pressioni vista 3D Nord Ovest - caso 1 vento  $0^\circ$  (Nord)

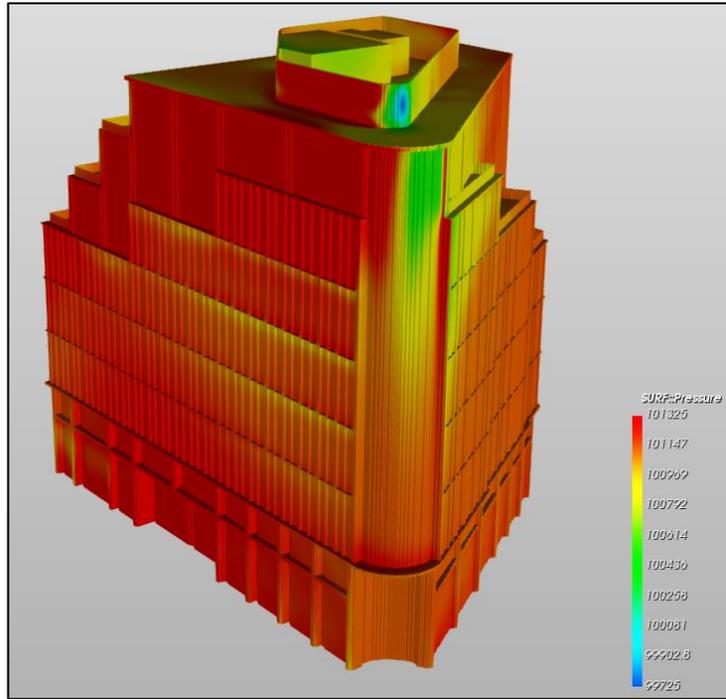


figura 4.34 - Andamento delle pressioni vista 3D Nord Ovest - caso 1 vento 0° (Nord)

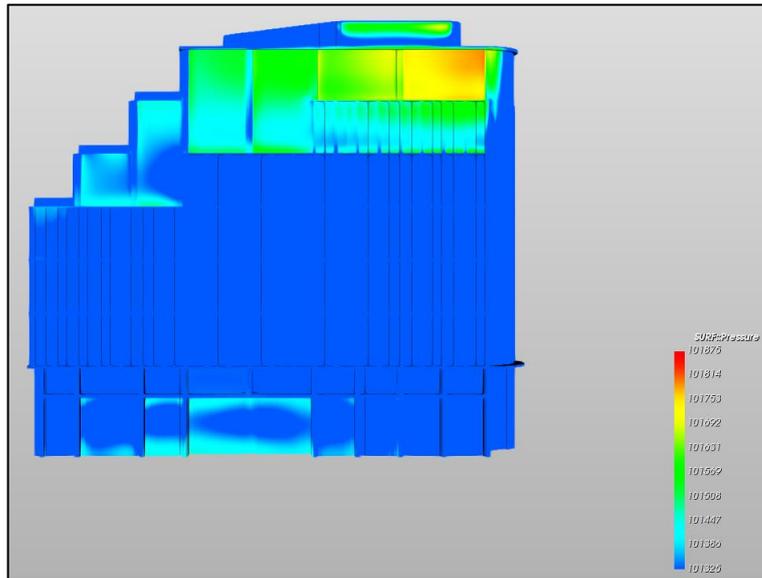


figura 4.35 - Andamento delle pressioni prospetto Nord - caso 1 vento 0° (Nord)

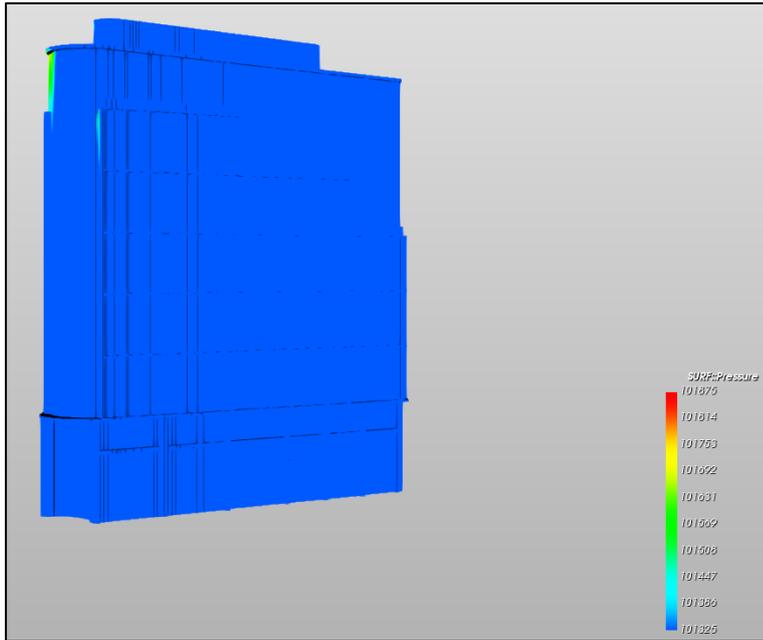


figura 4.36 - Andamento delle pressioni prospetto Ovest - caso 1 vento 0° (Nord)

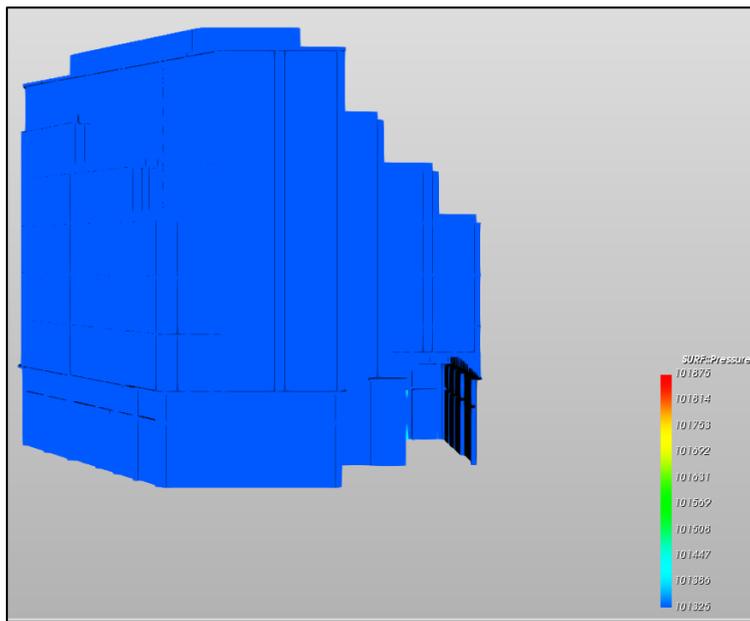


figura 4.37 - Andamento delle pressioni prospetto Est - caso 1 vento 0° (Nord)

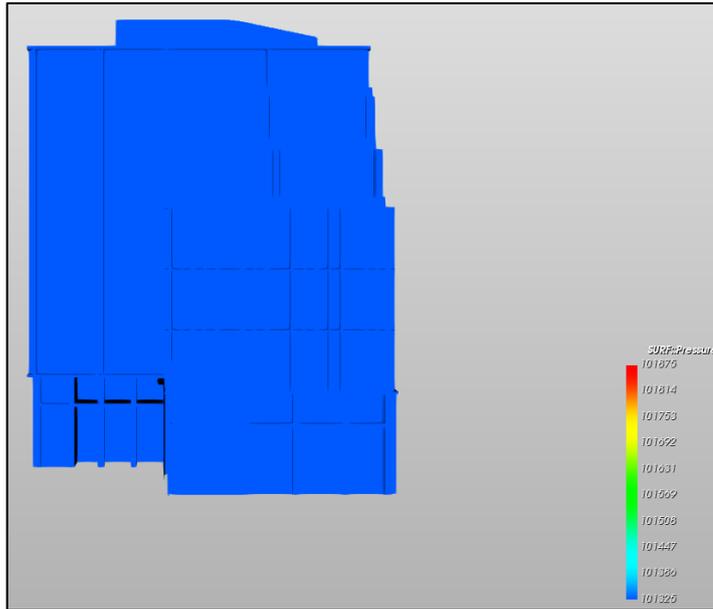


figura 4.38 -Andamento delle pressioni prospetto Est - caso 1 vento 0° (Nord)

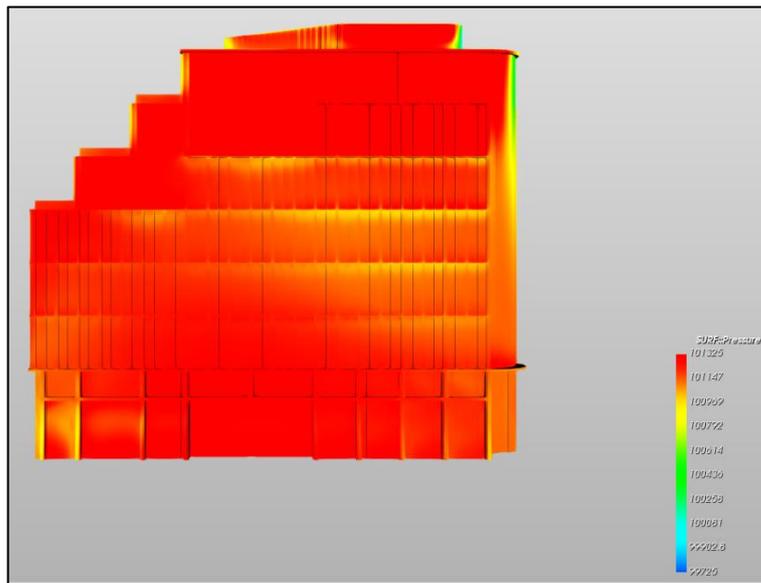


figura 4.39 - Andamento delle depressioni prospetto Nord - caso 1 vento 0° (Nord)

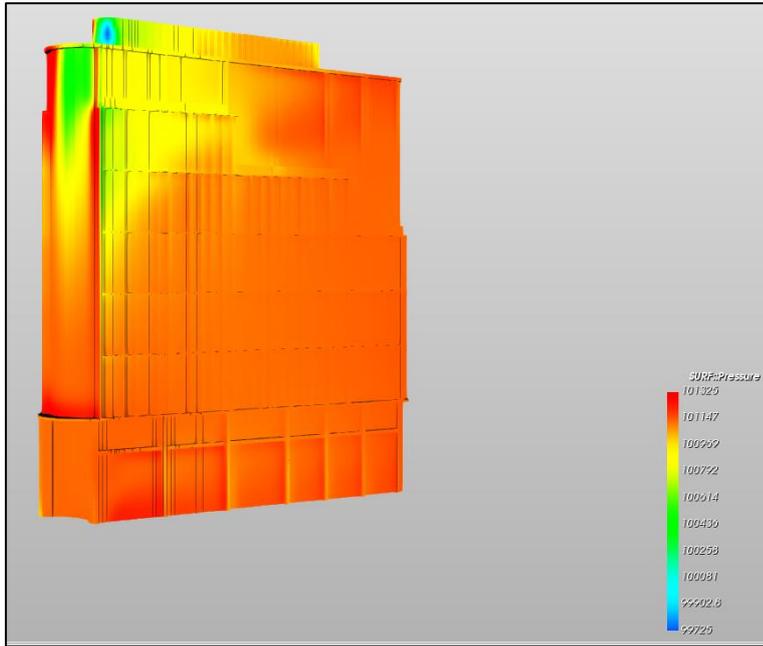


figura 4.40 - Andamento delle depressioni prospetto Ovest - caso 1 vento 0° (Nord)

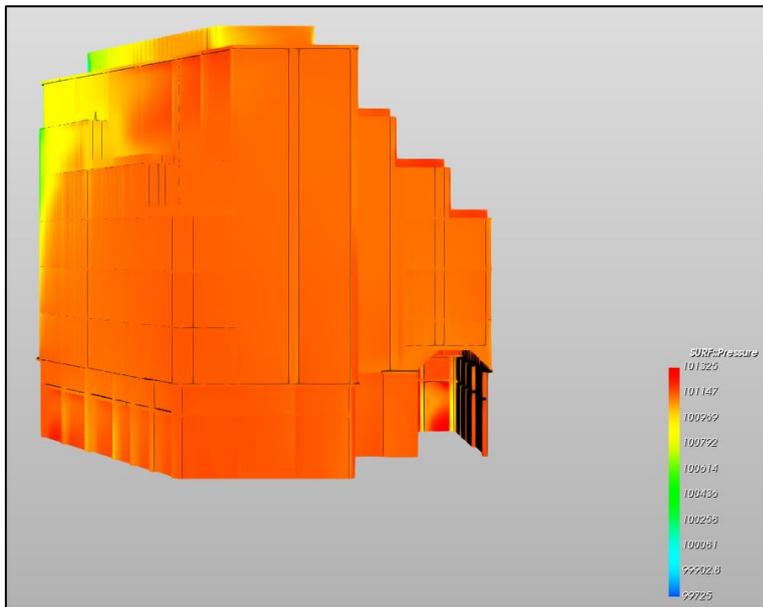


figura 4.41 - Andamento delle depressioni prospetto Sud - caso 1 vento 0° (Nord)

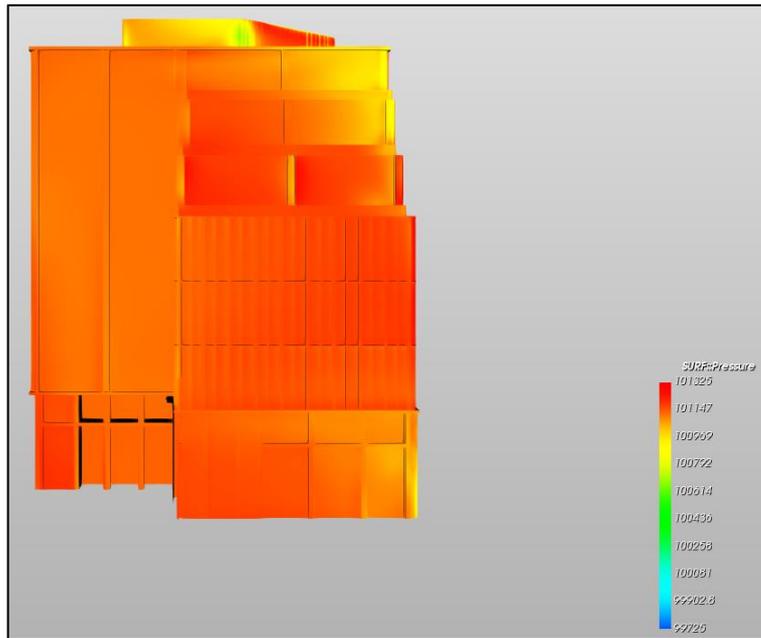


figura 4.42 - Andamento delle depressioni prospetto Est - caso 1 vento 0° (Nord)

Dalle figure sopra riportate è possibile confermare l'andamento delle pressioni schematizzato dalla normativa: nel prospetto con vento direttamente incidente si hanno pressioni corrispondenti alla zona D dell'approccio normativo (figura 4.35), invece nei restanti tre prospetti si hanno depressioni corrispondenti alle zone A, B, C e E (figure 4.40, 4.41 e 4.42).

Ottenuti i dati relativi ad ogni caso in esame si è proceduto alla realizzazione degli 8 prospetti di involucro, considerando il valore minimo negativo (depressione) ed il valore massimo positivo (sovrappressione) sommati alle relative pressioni interne da normativa pari a  $0,208 \text{ kN/m}^2$  e  $-0,312 \text{ kN/m}^2$ .

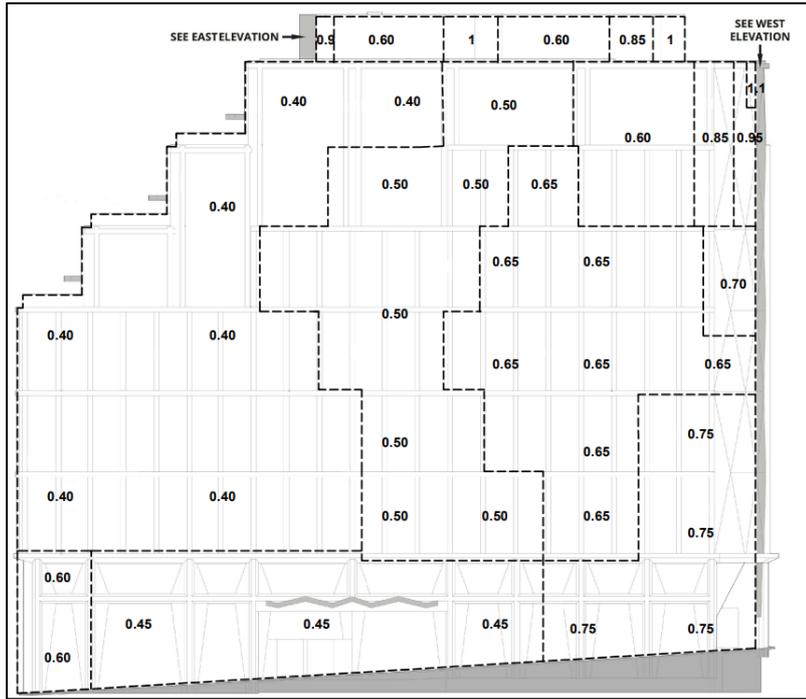


figura 4.43 – Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Nord

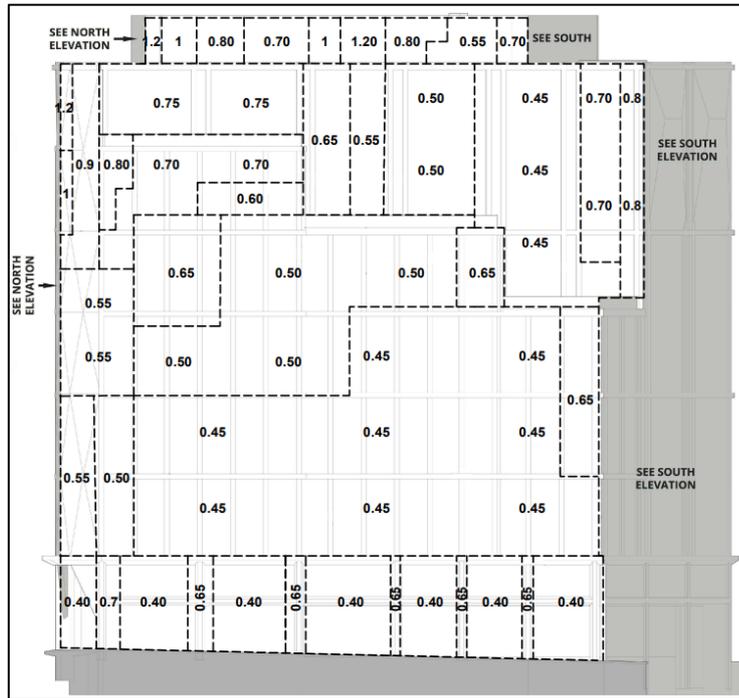


figura 4.44 – Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Ovest

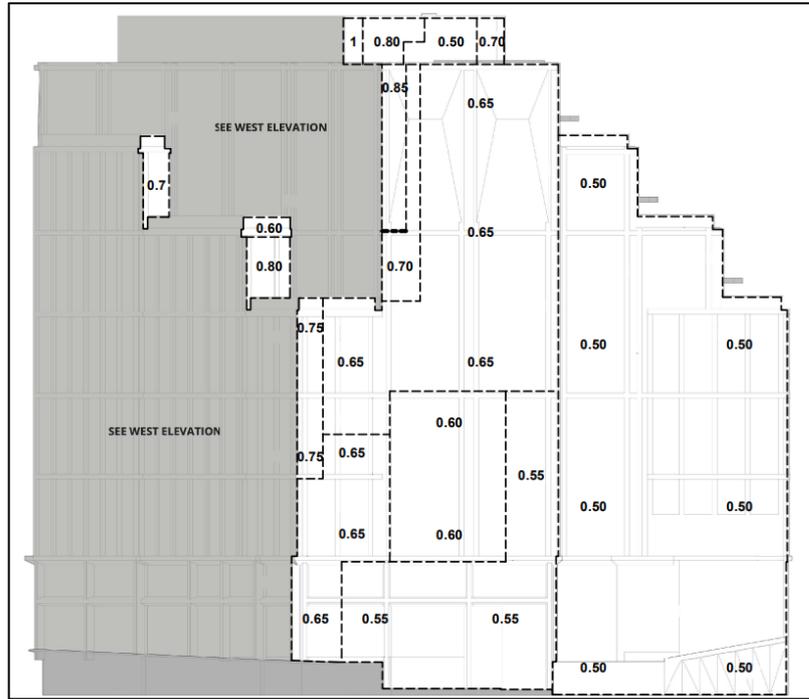


figura 4.45 – Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Sud

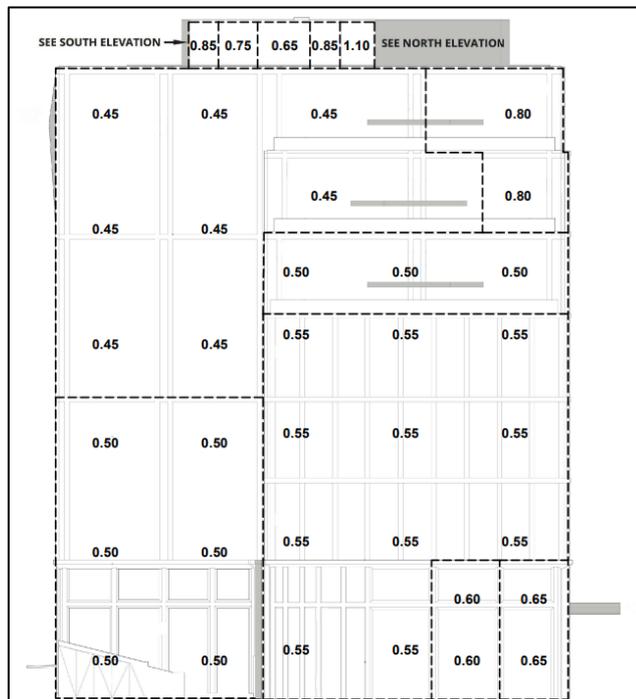


figura 4.46 – Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Est

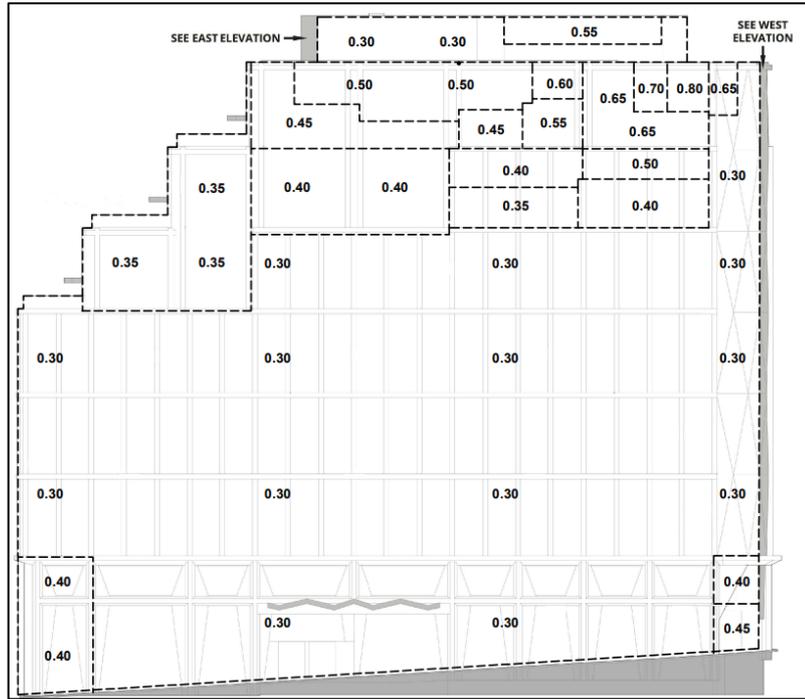


figura 4.47 – Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Nord

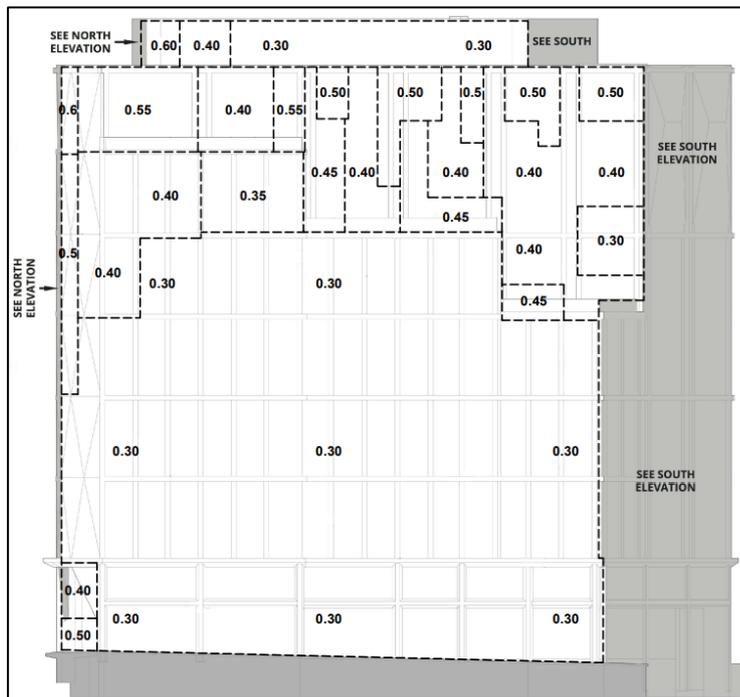


figura 4.48 – Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Ovest

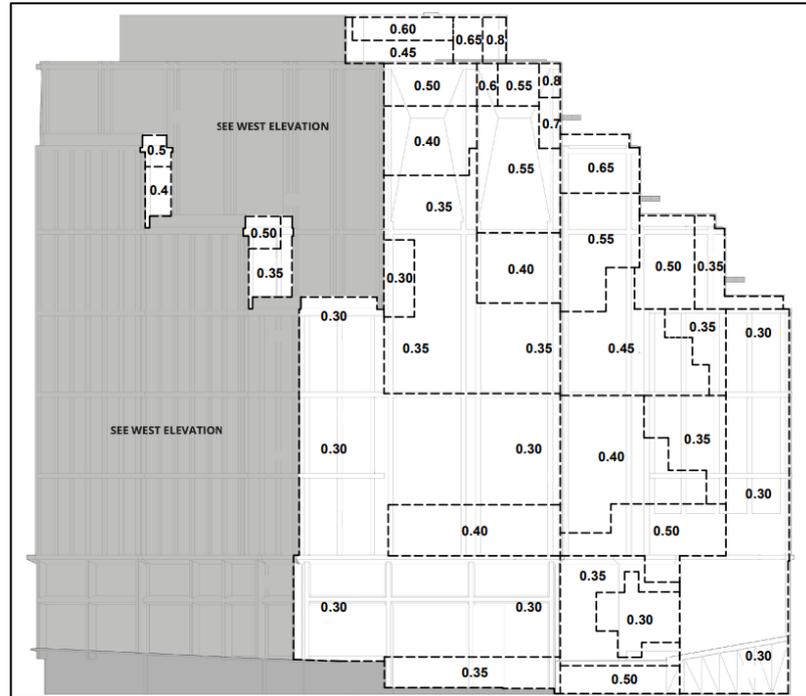


figura 4.49 – Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Sud

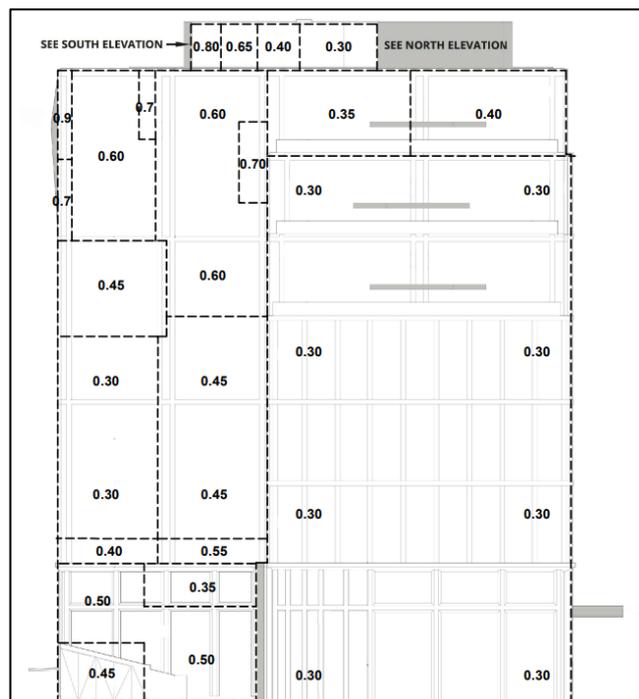


figura 4.50 – Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Est

Analogamente alle analisi precedenti, le pressioni del vento fornite da tale analisi e rappresentate nelle figure di cui sopra non contengono fattori di sicurezza e devono essere

applicate in modo analogo ai carichi da vento definiti dai metodi analitici da normativa. Si osserva inoltre che le pressioni del vento di picco ricalcano i risultati relativi alla galleria del vento e sono inferiori rispetto ai valori ottenuti dall'approccio normativo.

## **5 CONFRONTO APPROCCI ED EFFETTI DEL VENTO NELLA PROGETTAZIONE DI UNA CELLULA UNIT**

---

### **5.1 CONFRONTO TRIPLICE APPROCCIO**

Nel corso del presente capitolo si procederà ad analizzare analogie e discrepanze dei valori delle pressioni del vento agenti sui quattro prospetti dell'edificio *Stonecutter Court Building* ottenute dall'approccio normativo, analisi in galleria del vento e metodo computazionale CFD.

In primo luogo, si procede con l'analisi di pregi e difetti dei tre metodi. Partendo dall'approccio di calcolo previsto in normativa, nel caso in esame la "EN 1991-1-4:2005 Eurocode 1: Actions on structures – part 1-4: General actions – wind actions" e relativo annesso nazionale inglese, si rilevano i seguenti vantaggi:

- processo di calcolo semplice e veloce, definiti i dati della struttura oggetto di studio si arriva facilmente alla definizione dei valori di pressione;
- a differenza degli altri approcci non prevede spese (eccetto l'acquisto della normativa, comunque irrisorio);
- approccio accettato universalmente dalle varie parti facenti parte dell'iter-progettuale (studio di progettazione, impresa realizzatrice, enti di controllo, committente...).

D'altro canto, prevede anche svantaggi, così riassumibili:

- si tratta di un approccio adeguato a strutture di geometrie standard, non sono infatti previste tutte le possibili geometrie di facciate e coperture;
- permette di analizzare la sola direzione del vento ortogonale alla facciata di un edificio, non permette di modellare direzioni del vento incidenti con angoli qualsiasi;
- l'eurocodice indica esplicitamente che i valori ottenuti dal processo di calcolo non sono utilizzabili per edifici di altezza superiore ai 200 metri o ponti con campate superiori ai 200 metri;
- l'approccio di calcolo è limitato all'analisi del singolo edificio isolato mentre non considera l'influenza del tessuto urbano limitrofo (a meno del coefficiente correttivo di esposizione  $C_{e,T}$ ). Tale aspetto, oltre a ridurre l'accuratezza dell'analisi, non

permette di rilevare i fenomeni di interferenza analizzati nel corso del primo capitolo del presente elaborato;

- i carichi forniti da tale approccio sono in genere sovrastimati rispetto a quelli reali, ciò per tenere conto di eventuali aspetti di interazione vento struttura negativi trascurati in fase di calcolo. Tali carichi generano a loro volta un sovradimensionamento degli elementi strutturali con un conseguente incremento dei costi.

Passando all'analisi sperimentale in galleria del vento si hanno i seguenti vantaggi:

- la modellazione fisica dell'edificio con i suoi principali dettagli consente di ottenere una corretta rappresentazione dell'interazione tra vento e involucro edilizio;
- modellando l'edificio all'interno del suo reale contesto urbano è possibile rilevare i fenomeni di interferenza con gli edifici circostanti. Testare il modello completo di edificio e quartiere consente, inoltre, di rilevare eventuali riduzioni di carico/pressione dovute al riparo fornito da un edificio interposto rispetto al flusso, oppure incrementi di carico legati all'effetto venturi dovuti alla disposizione degli edifici circostanti;
- permette di ottenere valori di carico da vento variabili a seconda della zona analizzata e ciò, in presenza di edifici di grandi dimensioni, permette di suddividere l'edificio in varie porzioni a cui attribuire caratteristiche degli elementi strutturali differenti, andando ad ottimizzare il costo della loro realizzazione.
- è l'approccio alternativo al calcolo da normativa più datato e maggiormente utilizzato, ne consegue una maggiore accettazione durante l'iter progettuale.

Al tempo stesso, nonostante i diversi vantaggi, tale approccio presenta anche alcuni svantaggi:

- i carichi del vento determinati dalle prove in galleria del vento sono applicabili in relazione alle particolari configurazioni dell'ambiente modellato. Il modello dell'ambiente circostante utilizzato in fase di prova riflette le geometrie del contesto urbano al momento stesso della prova. Se in un secondo momento è prevista la costruzione di nuovi edifici o la demolizione di edifici esistenti che modificano la configurazione testata, potrebbero ovviamente variare i risultati della prova. Comunque, nel caso in cui il carico da vento dovesse essere fortemente influenzato

dalla presenza di eventuali edifici circostanti, i quali renderebbero i risultati di prova non sicuri per la progettazione, le norme consentono di ri-effettuare le analisi, rimuovendo ad esempio gli edifici che forniscono “riparo” alla struttura modellata;

- le analisi in galleria del vento come quella realizzata per l’edificio in esame necessitano di ingenti somme di denaro, sia per la realizzazione del modellino da testare, che per la realizzazione della prova in sé. Peraltro, in genere, per l’esecuzione di tali prove, gli studi di progettazione e/o società costruttrici si devono affidare a studi esterni specializzati;
- è importante sottolineare che detta tipologia di analisi comporta lunghi tempi, ciò a causa della costruzione del modello in scala, alla calibrazione dei vari dati di input della galleria ed alla esecuzione delle diverse prove. Inoltre, si tratta di analisi che permettono di osservare i risultati solo al termine della prova stessa. Ne consegue che, in caso di errori legati al modello o alla prova stessa, il rifacimento comporta un ulteriore aumento dei tempi di analisi.

Infine, l’analisi computazionale CFD, prevede invece i seguenti vantaggi:

- come per l’approccio sperimentale in galleria del vento, la modellazione fisica dell’edificio inserito nel suo reale contesto urbano permette di rilevare i fenomeni di interferenza ed eventuali riduzioni e/o incrementi di carico. Inoltre permette di ottenere valori di carico da vento variabili a seconda della posizione analizzata, con conseguente ottimizzazione delle caratteristiche dei diversi elementi strutturali;
- possibilità di effettuare analisi locali su elementi secondari di piccole dimensioni;
- permette di visualizzare in modo diretto il flusso eolico e le sue diverse componenti, così da avere una maggior conoscenza del fenomeno ventoso nelle vicinanze all’edificio oggetto di studio con possibilità di apportare modifiche alla geometria in presenza di eventuali fenomeni negativi. Nel caso in esame, il *software VENTO AEC* permette di analizzare l’andamento del flusso eolico nelle vicinanze a *Stonecutter Court Building* grazie alla visualizzazione della velocità del vento su piani definibili dall’utente e grazie alle *streamlines*<sup>36</sup>.

---

<sup>36</sup> *Streamlines* (o linee di flusso): famiglie di curve che rappresentano la direzione del flusso eolico

Nelle figure seguenti viene riportato l'andamento della velocità del flusso eolico nel caso 1 – vento  $0^\circ$ , dalle quali è possibile osservare la riproduzione del profilo del vento logaritmico. Si osservano infatti velocità ridotte in prossimità del terreno mentre si registra un aumento di velocità al crescere di quota.

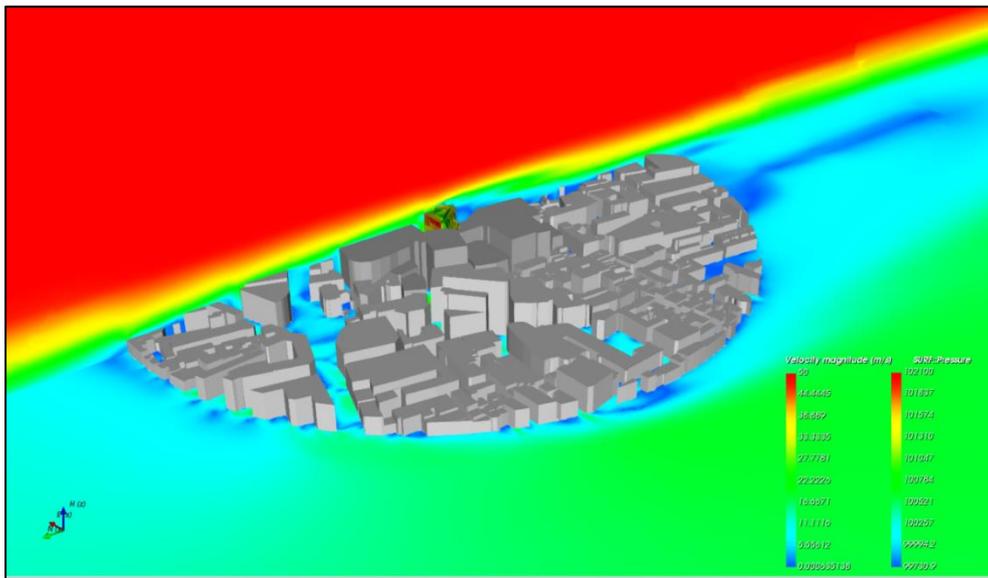


figura 5.1 – Velocità del flusso eolico sul piano  $xy$  ( $z=0m$ ) e sul piano  $yz$  ( $x=0m$ ) – caso 1 vento  $0^\circ$

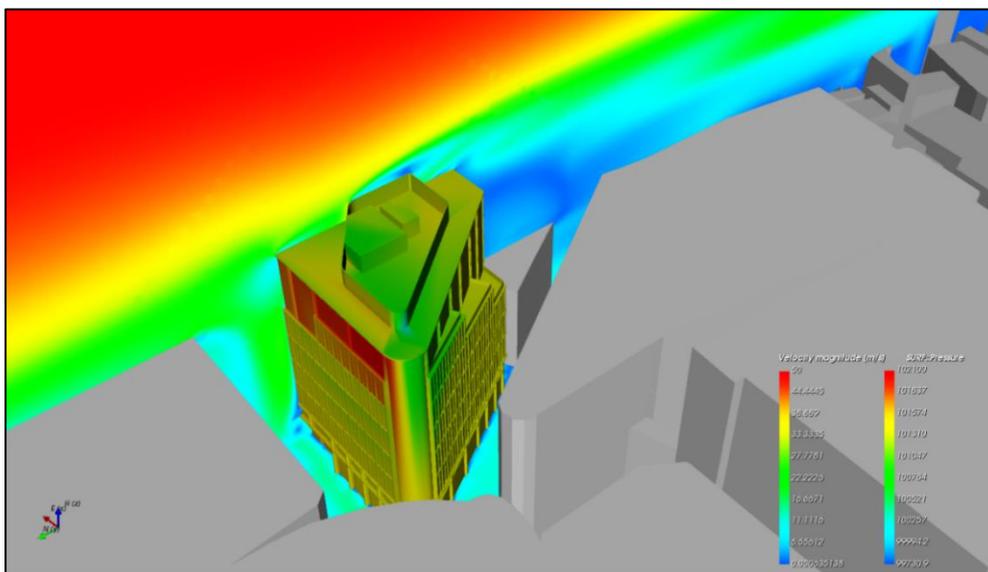


figura 5.2 – Dettaglio velocità del flusso eolico sul piano  $xy$  ( $z=0m$ ) e sul piano  $yz$  ( $x=0m$ ) – caso 1 vento  $0^\circ$

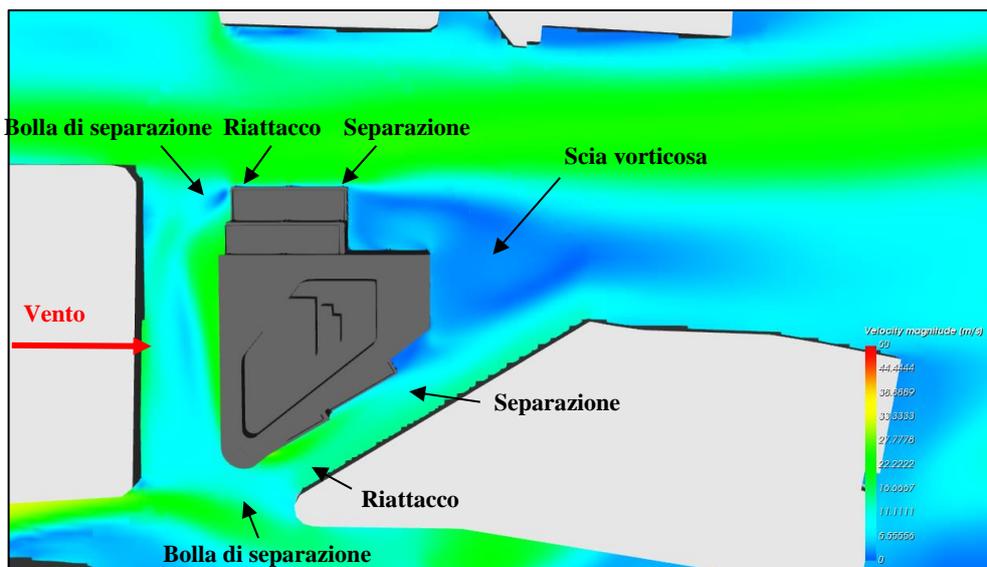


figura 5.3 – Dettaglio velocità del flusso eolico sul piano  $xy$  ( $z=30m$ ) – caso 1 vento  $0^\circ$

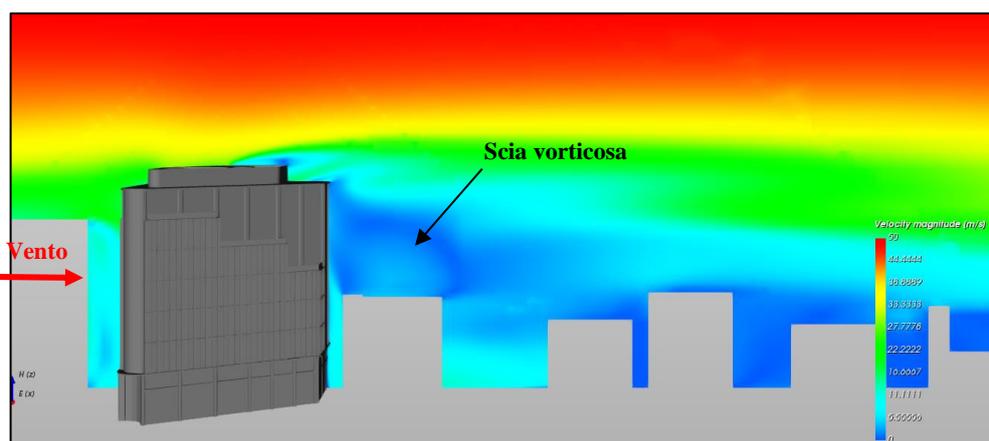


figura 5.4 – Dettaglio velocità del flusso eolico sul piano sul piano  $yz$  ( $x=0m$ ) – caso 1 vento  $0^\circ$

Dalle immagini sopra riportate si può osservare come il flusso eolico venga modificato dalla presenza dell'edificio. In particolare, nel prospetto Nord si osserva come il vento, investendo direttamente l'edificio, generi su di esso pressioni positive. Al tempo stesso nei prospetti laterali (Est e Ovest) si osserva una prima zona di distacco dei vortici in prossimità dell'angolo con il prospetto Nord ed una successiva zona di riavvicinamento dei flussi alla facciata stessa. Entrambi i casi generano, quindi, delle depressioni. Infine, nella zona retrostante l'edificio (prospetto Sud), si verifica la separazione del flusso e la formazione di una scia la quale comporta depressioni sulla parete esterna dell'edificio stesso. Tale comportamento riproduce

alla perfezione quanto analizzato nel corso del secondo capitolo del presente elaborato, permettendo di cogliere visivamente la presenza delle 5 differenti zone di carico previste dall'Eurocodice (figura 2.25).

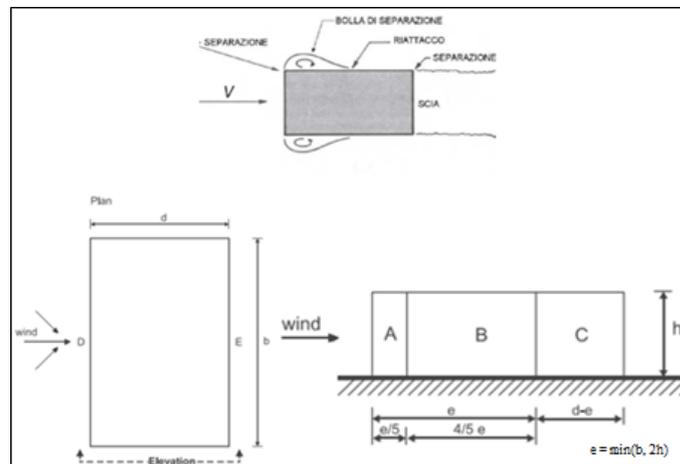


Figura 2.25 - Relazione tra comportamento di un edificio soggetto all'azione del vento e divisione in zone

Oltre alle velocità costituisce oggetto di esame anche l'andamento dei flussi all'interno dei *canyon* urbani, e ciò grazie alle *streamlines* osservabili nelle figure sotto riportate. Tali rappresentazioni permettono di osservare nuovamente come l'azione del vento si trasformi in pressioni e depressioni agenti sull'edificio. Permettono inoltre di cogliere l'eventuale presenza dei fenomeni di interazione vento-struttura, come descritti nel corso del primo capitolo.

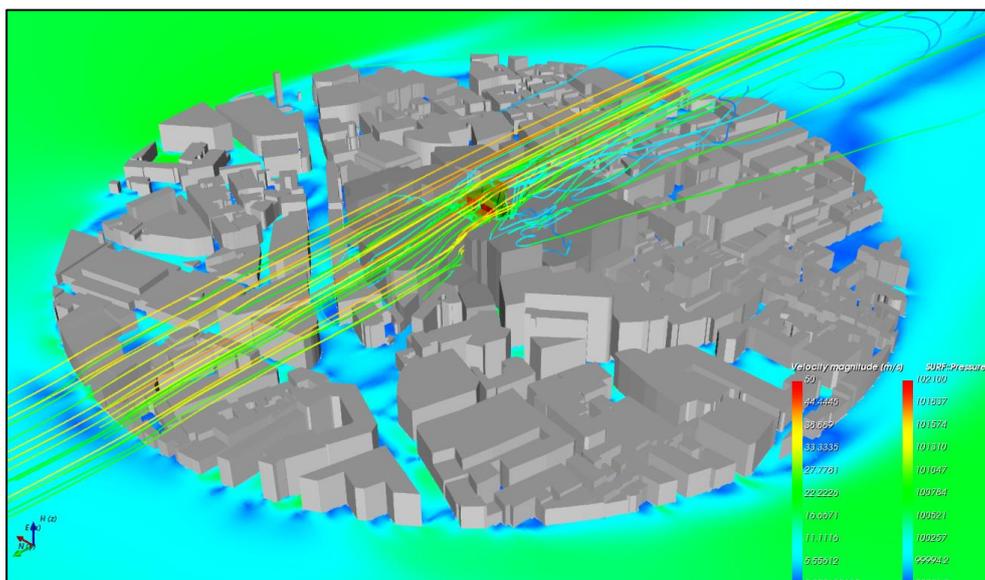
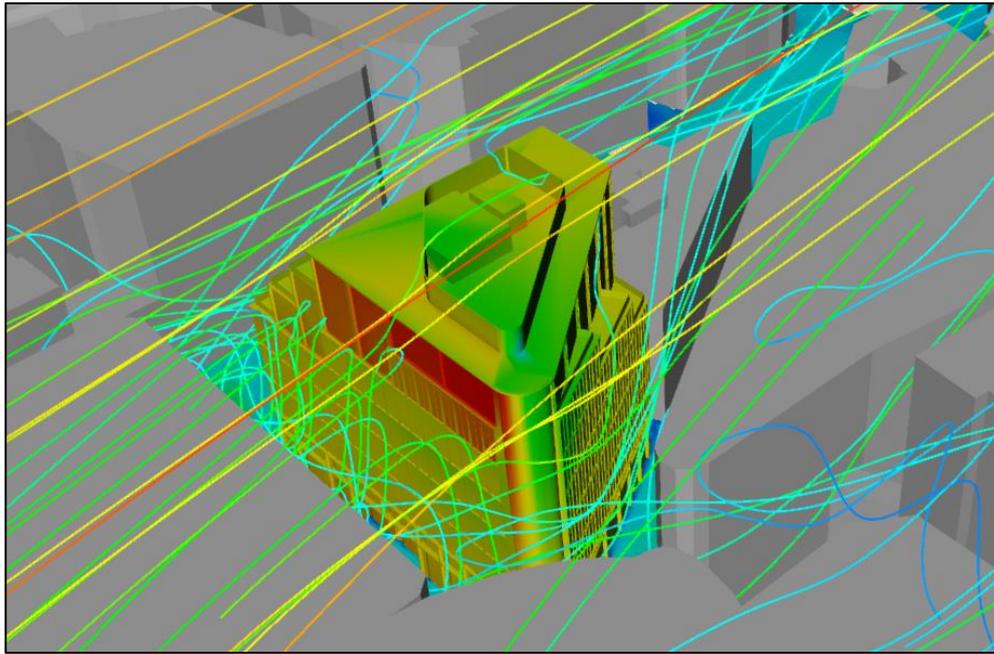
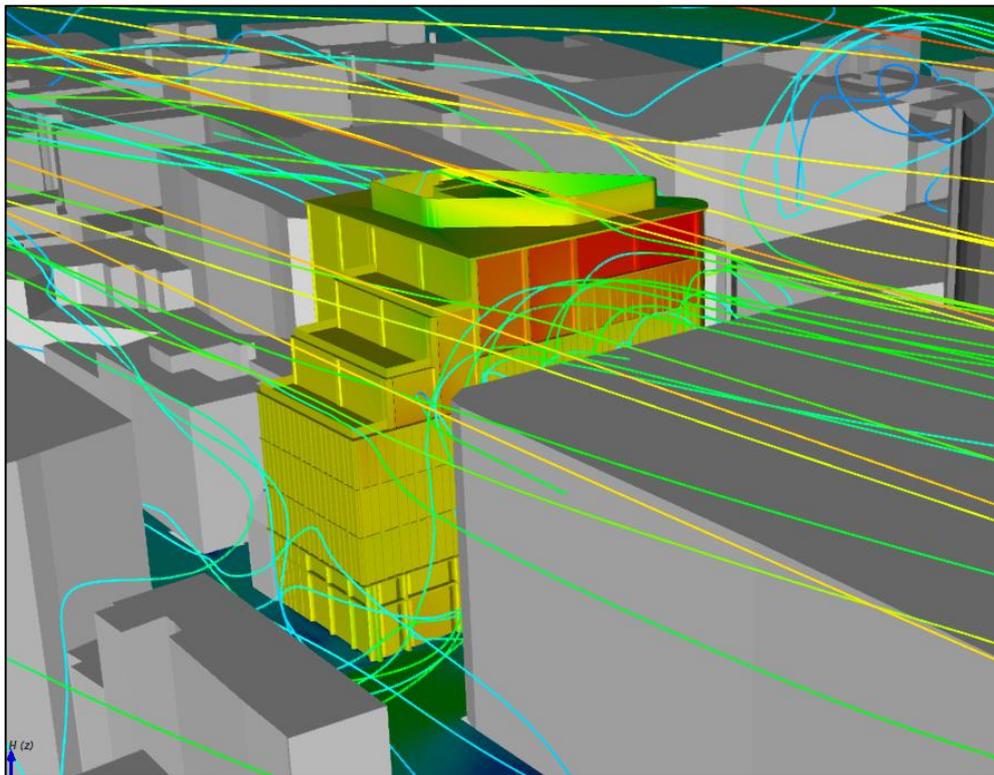


figura 5.5 - Andamento del flusso eolico nei pressi di Stonecutter Court Building – caso 1 vento  $0^\circ$



*figura 5.6 – Dettaglio andamento del flusso eolico nei pressi di Stonecutter Court Building – caso 1 vento 0°*



*figura 5.7– Dettaglio andamento del flusso eolico nei pressi di Stonecutter Court Building – caso 1 vento 0°*

Tale approfondimento è stato eseguito per il solo caso 1 vento 0° ma ciò non toglie che possa essere realizzato per tutti i casi di studio analizzati, i quali vengono tuttavia omessi per brevità di rappresentazione;

- a differenza dell'analisi in galleria, qualora si abbiano le competenze necessarie, è possibile, per studi di progettazione e/o imprese costruttrici, eseguire analisi CFD in maniera indipendente. A parità di risultati, ciò permette la riduzione dei costi rispetto all'approccio sperimentale ed inoltre consente di rendere indipendente la progettazione da studi esterni. In mancanza delle opportune competenze, l'utilizzo del software nella pratica progettuale richiede comunque la presenza di una figura esperta, al fine di evitarne l'uso inconsapevole e potenzialmente dannoso.

Come per i precedenti approcci anche in questo caso è possibile rilevare alcuni aspetti negativi:

- in analogia all'analisi in galleria, i carichi del vento ottenuti sono applicabili in relazione alle particolari configurazioni dell'ambiente modellato. Da ciò consegue che, qualora sia prevista la costruzione di nuovi edifici o la demolizione di edifici esistenti che modificano la configurazione testata, potrebbero ovviamente variare anche i risultati;
- come per l'analisi sperimentale sono necessari lunghi tempi per la costruzione del modello 3D (qualora non sia già stato definito per la progettazione), per la calibrazione del software e per l'esecuzione delle prove stesse;
- si tratta di un approccio ampiamente utilizzato per altre branche dell'ingegneria, soprattutto meccanica e aerospaziale, mentre è ancora emergente nel campo dell'ingegneria civile. Tale aspetto rende tale analisi ancora scarsamente accettata dalle varie parti facenti parte dell'iter progettuale. Negli ultimi anni, comunque, il suo utilizzo sta trovando sempre più spazio nella pratica progettuale grazie alla possibilità di valutare tali azioni in presenza di strutture meno comuni, la cui soluzione non è disponibile in letteratura o nei documenti normativi.

È importante osservare che, qualora non si faccia ricorso a studi approfonditi del carico da vento in galleria del vento o per mezzo di modellazioni CFD, è necessario adottare il valore di carico da vento derivante dal calcolo analitico da normativa. A tal proposito al paragrafo

2.2.3 della normativa “CWCT – Standard for systemised building envelopes – part 2 – Loads, fixing and movement” si evince che:

*“In circostanze standard (approccio normativo) non deve essere prevista una suddivisione in zone della pressione del vento allo scopo di fornire carichi di progetto agenti sull’involucro edilizio di entità ridotta in vicinanza al suolo. Il codice di calcolo britannico BS 6399-2 consente la zonizzazione orizzontale per edifici alti, ossia quelli la cui altezza è superiore a quattro volte la loro dimensione orizzontale massima. Tuttavia, tale procedura è applicabile al solo carico netto agente sull’edificio e non è applicabile invece al calcolo delle pressioni agenti sull’involucro dell’edificio.*

*La suddivisione in zone orizzontali è invece accettata qualora le pressioni del vento localizzate siano verificate mediante test in galleria del vento o analisi CFD”*

In presenza del solo approccio di calcolo standard, la norma impone di adottare il carico più gravoso per la progettazione delle facciate dell’intera struttura senza la possibilità di ricorrere alla zonizzazione. Tale aspetto, nel caso di edifici a torre di elevate dimensioni, implica sovradimensionamenti aggiuntivi che si sommano a quelli già presenti derivanti dai maggiori carichi da normativa.

Nonostante i diversi vantaggi, i due metodi alternativi prevedono come principali svantaggi i costi ed i tempi di analisi. In definitiva, è consigliato ricorrere ad analisi più approfondite solo quando lo si ritiene effettivamente necessario, sia per motivi economici (riduzione del carico da vento e zonizzazione) che per motivi di sicurezza (strutture di forme particolari e/o dimensioni elevate).

Conclusa l’analisi di pregi e difetti dei vari metodi è possibile passare all’effettivo confronto in termini di pressioni derivanti dai tre differenti approcci. Nella figura sottostante vengono riportati i valori di pressione e depressione di picco estratti dai precedenti involucri (rappresentati anche nell’allegato B). Sono riportati inoltre, i valori di pressione e depressione mediati sulla superficie agente. Definiti i differenti valori, si è poi proceduto alla rilevazione della riduzione di pressione dei metodi a due a due.

CONFRONTO PRESSIONI DEL VENTO			
Tipologia di misura	Approccio		
	Normativa	Galleria del vento	CFD
Pressione (+) di picco [kPa]	1.15	1.00	0.90
Depressione (-) di picco [kPa]	2.30	1.20	1.20
Pressione (+) di picco mediata [kPa]	1.14	0.56	0.36
Depressione (-) di picco mediata [kPa]	1.19	0.54	0.55

CONFRONTO PRESSIONI DEL VENTO						
Tipologia di misura	Riduzione Press. Normativa - Galleria		Riduzione Press. Normativa - CFD		Riduzione Press. Galleria - CFD	
	$\Delta P_{Norm. - Gall.}$ [kPa]	$\Delta P_{Norm. - Gall.}$ [%]	$\Delta P_{Norm. - CFD}$ [kPa]	$\Delta P_{Norm. - CFD}$ [%]	$\Delta P_{Gall. - CFD}$ [kPa]	$\Delta P_{Gall. - CFD}$ [%]
Pressione (+) di picco [kPa]	0.15	13.04%	0.25	21.74%	0.10	10.00%
Depressione (-) di picco [kPa]	1.10	47.83%	1.10	47.83%	0.00	0.00%
Pressione (+) di picco mediata [kPa]	0.58	51.12%	0.78	68.38%	0.20	35.31%
Depressione (-) di picco mediata [kPa]	0.65	54.87%	0.64	54.04%	-0.01	-1.84%

figura 5.8 - Confronto pressioni triplice approccio

*In primis*, è importante osservare che i risultati derivanti dal metodo sperimentale e dal metodo computazionale sono perlopiù allineati: i valori di picco di pressione e depressione sono analoghi con errori trascurabili. In relazione, invece, ai valori mediati sulle aree, si osserva una perfetta riproduzione in relazione alle depressioni, mentre, per le pressioni, si osservano piccole discrepanze. In particolare, dagli involuppi di pressione dell'analisi CFD (figure 4.47, 4.48, 4.49 e 4.50), si osserva una sottostima dei valori di pressione positiva nei piani inferiori dell'edificio.

Tale errore di riproduzione è attribuibile al differente numero di prove eseguite, ma comunque risulta non significativo. Tale somiglianza nei risultati è di fondamentale importanza in quanto permette di appurare la validità del metodo computazionale CFD ed al tempo stesso permette eventualmente di sostituirlo all'analisi sperimentale in galleria del vento per l'effettiva progettazione. Si tratta, dunque, di due metodi alternativi.

Entrambe le analisi riportano valori di carico abbondantemente inferiori ai valori previsti da normativa, sia per i valori di picco, che per i valori mediati, con riduzioni anche pari al 50%. Tale risultato è in linea con le aspettative. La spiegazione di tale fenomeno è legata principalmente a due aspetti già introdotti: *in primis*, la normativa fornisce dei risultati a favor di sicurezza validi per un'ampia classe di edifici, mentre nell'analisi sperimentale e/o computazionale viene studiato l'edificio reale. In secondo luogo, tutti i fenomeni di interazione vento-struttura, con riferimento ad un edificio posizionato all'interno di un contesto urbano, vengono rilevati dai metodi innovativi ma non vengono contemplati dall'approccio normativo, che sconta il limite di considerare il singolo edificio soggetto all'azione del vento.

Si tratta comunque di analisi complementari: la simulazione computazionale CFD e l'analisi sperimentale in galleria del vento non possono in alcun modo escludere le analisi analitiche preliminari. In ogni caso è necessario definire: tipologia di struttura, condizioni di vento incidente, comportamento aerodinamico, risposta strutturale al vento e ordine di grandezza dei carichi da vento nel corso della vita utile dell'opera stessa. Quest'ultimo è di fondamentale importanza. Infatti, per avere la certezza del risultato di un processo di calcolo, è necessario giungere alla soluzione con due metodi distinti, in modo tale da evitare errori grossolani.

## **5.2 PROGETTAZIONE DELLA CELLULA UNIT SOGGETTA ALL'AZIONE DEL VENTO**

Definita l'entità del carico da vento relativa ai tre differenti approcci si vuole, nel presente paragrafo, osservare l'influenza che essa ha nel corso della progettazione di una cellula *unit* dell'edificio in esame.

Come osservato nel corso del secondo capitolo, le facciate continue di *Stonecutter Court Building* sono costituite da diverse tipologie di elementi. Trattandosi di un'analisi comparativa dell'influenza del vento sulla progettazione è sufficiente analizzarne solamente una. Si procederà, a tal fine, nella progettazione della tipologia di cellula *unit* 1 di larghezza 1263 mm e altezza 3730 mm.

Una cellula si costituisce, principalmente, degli elementi di seguito elencati:

- struttura portante in alluminio composta da due montanti, un traverso femmina inferiore, due traversi intermedi e un traverso maschio superiore;
- due blocchetti di connessione alla cellula fissati ai montanti;
- staffe e canali di ancoraggio fissati alla struttura principale;
- due superfici vetrate, una trasparente (cosiddetta “*vision*”) e una opaca (cosiddetta “*shadow box*”);
- un elemento decorativo orizzontale in GFRC<sup>37</sup>.

---

<sup>37</sup> GFRC = *Glass Fiber Reinforced Concrete*: conglomerato composto da matrice cementizia, acqua e inerti, nel quale vengono aggiunte fibre di vetro con funzione di rinforzo [19]

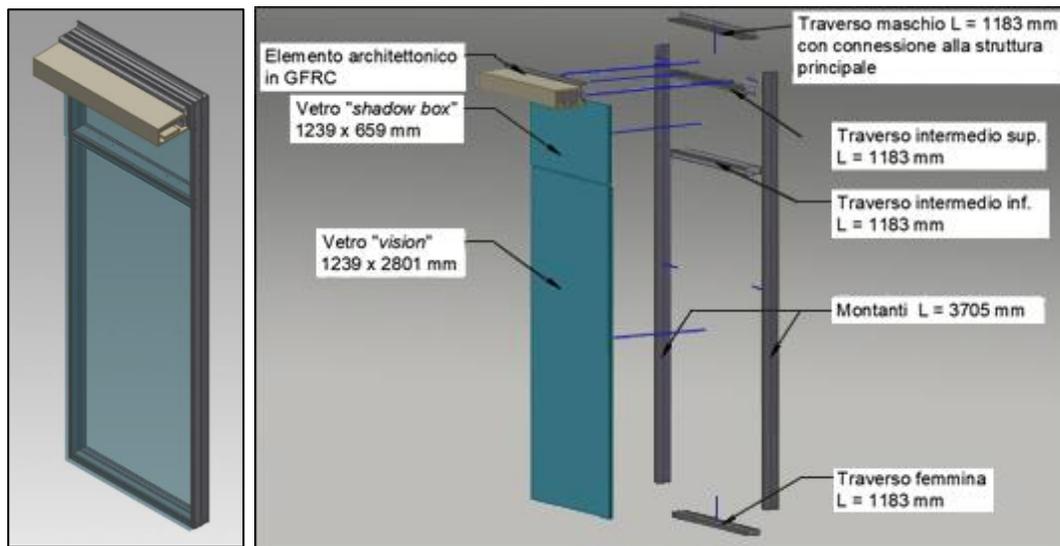


figura 5.9 - cellula unit tipo 1 - vista 3D

Come già anticipato, nell'analisi strutturale di un edificio e di ogni sua componente è necessario considerare tutte le possibili azioni e tutte le combinazioni a cui l'edificio stesso è sottoposto nel corso della sua vita utile. Di conseguenza, nel confronto di seguito esposto, saranno considerate anche altre azioni (pesi propri, carico da neve, carico da manutenzione...) mantenute costanti, mentre il carico da vento verrà variato a seconda dell'analisi adottata. In accordo al confronto sopra riportato i valori di carico da vento da adottare in fase di progettazione valgono:

- per l'approccio normativo:
  - $q_{vento,pressione} = 1,14 \text{ kPa}$
  - $q_{vento,depressione} = 2,29 \text{ kPa}$
- per l'analisi in galleria del vento e per l'analisi CFD, grazie alla somiglianza di risultati è possibile adottare valori univoci:
  - $q_{vento,pressione} = 0,8 \text{ kPa}$
  - $q_{vento,depressione} = 1 \text{ kPa}$

Per quanto riguarda l'approccio normativo sono stati riportati i massimi valori di carico come da indicazioni della norma stessa. Per l'approccio alternativo, invece, i valori di carico adottati sono quelli che effettivamente sollecitano le cellule della struttura in esame: sono

state, infatti, trascurate le pressioni agenti sulle superfici verticali della copertura ed i valori puntuali agenti su zone ristrette di facciate.

In tal caso non si è fatto ricorso alla possibile zonizzazione in quanto, essendo l'altezza dell'edificio non elevata, non si è rilevata una variazione di carichi tale da procedere alla progettazione per zone. Comunque, nel caso di edifici di elevate dimensioni, tale aspetto permette di ottimizzare ulteriormente l'intero iter.

La variazione dell'entità del carico derivante dall'utilizzo dei due differenti approcci influirà sul dimensionamento delle diverse componenti costituenti la cellula (elementi strutturali in alluminio, vetri, silicone strutturale, staffe e canale di ancoraggio). Tali variazioni geometriche si ripercuotono sui costi di approvvigionamento dei materiali e sul trasporto stesso. Nell'ambito di un edificio di grandi dimensioni come *Stonecutter Court Building* ciò può influenzare notevolmente il costo complessivo dell'opera.

Nel corso del presente paragrafo si focalizzerà l'attenzione sulla progettazione degli elementi strutturali in alluminio e dei vetri, in quanto sono gli elementi soggetti a variazioni dimensionali, e di conseguenza economiche, maggiori.

### 5.2.1 ELEMENTI STRUTTURALI IN ALLUMINIO

Ogni tipologia di cellula costituente la facciata continua prevede componenti e forme differenti. L'elemento che le accomuna è sicuramente lo scheletro strutturale, il quale è composto, in genere, da traverso femmina, traverso maschio, traversi intermedi e montanti (figura 5.10).

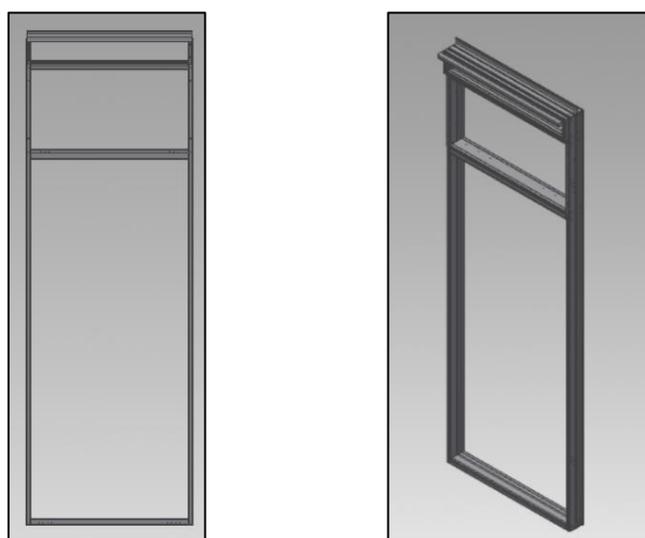


figura 5.10 - Scheletro strutturale – vista frontale (sx) e vista 3D (dx)

Tali elementi sono ottenuti dall'estrusione di alluminio EN AW 6063 T6<sup>38</sup> per mezzo di opportune matrici. Le caratteristiche di tale materiale, in accordo all'Eurocodice “*BS EN 1999-1-1:2007 – Eurocode 9: Design of aluminium structures*”, sono:

- Modulo elastico:  $E = 70000 \text{ MPa}$ ;
- Modulo a taglio:  $G = 26600 \text{ MPa}$ ;
- Peso specifico:  $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ ;
- Tensione ultima:  $f_u = 195 \text{ MPa}$ ;
- Tensione caratteristica:  $f_0 = 160 \text{ MPa}$ ;
- Coefficiente di espansione termica:  $\alpha = 23 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$

In considerazione del fatto che l'obiettivo del presente paragrafo non è sviluppare in toto la progettazione della cellula ma, bensì, apprenderne gli effetti della variazione del carico da vento sulla cellula stessa, si procede direttamente all'analisi statica lineare dei diversi casi. In generale, i componenti strutturali di facciate a cellula sono elementi a spessore sottile di classe 3 o 4, ciò non permette dunque di far riferimento alle risorse plastiche.

Tale analisi viene eseguita grazie all'utilizzo di due modelli *FEM*<sup>39</sup> implementati grazie al software “*Straus 7*”<sup>40</sup> differenti solo per carichi del vento e sezione degli elementi strutturali.

### 5.2.1.1 APPROCCIO NORMATIVO

Partendo dall'approccio normativo, il primo step consiste nella definizione dei carichi. In accordo all'Eurocodice “*BS EN 1991-1-1:2002 – Action on structures*” è lecito assumere i seguenti pesi propri:

- peso proprio alluminio:  $g_{1,alu} = 27 \text{ kN/m}^3$ ;
- peso proprio vetro:  $g_{1,vetro} = 25 \text{ kN/m}^3$ ;
- peso proprio GFRC:  $g_{1,GFRC} = 27 \text{ kN/m}^3$ .

---

<sup>38</sup> Alluminio EN AW 6063 T6: lega di alluminio, magnesio e silicio, di facile estrusione che permette la realizzazione di profili di grande complessità. [20]

<sup>39</sup> *FEM = Finite Element Method*: approccio numerico atto a ricercare la soluzione di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali.

<sup>40</sup> *Straus 7*: software *FEM* per l'analisi di strutture civili.

Tali carichi verranno direttamente applicati ai relativi elementi strutturali e non strutturali grazie all'utilizzo della densità nelle proprietà degli elementi stessi ed alla successiva applicazione dell'accelerazione di gravità.

Definiti i carichi permanenti strutturali e non, è necessario procedere al calcolo dei carichi variabili. *In primis* si riporta il carico del vento precedentemente calcolato:

- pressione del vento:  $q_{vento,p} = 1,14 \text{ kN/m}^2$ ;
- depressione del vento:  $q_{vento,d} = 2,29 \text{ kN/m}^2$ .

Oltre al vento agente sulle vetrate è necessario definire anche il vento agente sul GFRC orizzontale. Essendo tale elemento non soggetto a pressioni interne, in quanto elemento architettonico posto all'esterno della cellula, è possibile considerare la sola pressione esterna, trascurando la pressione interna. Di conseguenza, alla pressione precedentemente definita è necessario sottrarre la pressione interna, in definitiva l'azione agente vale:

$$q_{vento,GFRC} = q_{vento,e} - q_{vento,i} = 2,29 - 0,208 = 2,08 \text{ kN/m}^2$$

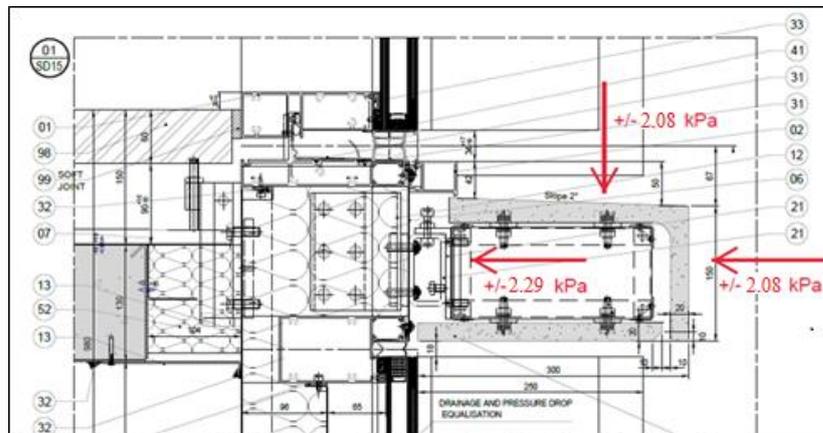


figura 5.11 – Dettaglio azione del vento agente sull'elemento di GFRC orizzontale

Tale processo di definizione del carico sull'elemento architettonico GFRC potrebbe essere sostituito da analisi locali effettuate grazie alla modellazione CFD. Ciò necessita, tuttavia, di una modellazione puntuale di tali elementi che comporterebbe, conseguentemente, un aumento di complessità del modello stesso e della *mesh*, nonché, inevitabilmente, un incremento altresì del costo computazionale. Nel caso in esame, però, la definizione del carico sull'elemento architettonico GFRC riveste rilevanza limitata e, per tale ragione, si è deciso, in prima battuta, di trascurare tale ulteriore analisi ed affidarsi al carico sopra esposto.

L'analisi in galleria del vento, invece, non permette di raggiungere tale grado di dettaglio ed impone, dunque, l'uso del calcolo analitico.

Oltre all'azione del vento, i carichi variabili includono:

- carico da neve<sup>41</sup> agente sul GFRC orizzontale:  $q_{neve} = 0,40 \text{ kN/m}^2$ ;
- carico orizzontale imposto: i locali dell'edificio oggetto di studio saranno adibiti ad uffici i quali rientrano nella categoria di edifici non suscettibili a sovraffollamento.

In tal caso è necessario considerare il più gravoso delle tre possibili casistiche:

- carico lineare imposto:  $q_1 = 0,74 \text{ kN/m}$ ;
- carico distribuito imposto:  $q_2 = 1 \text{ kN/m}^2$ ;
- carico concentrato imposto:  $q_3 = 0,50 \text{ kN}$ ;

essendo quest'ultimo il più gravoso, sarà il carico utilizzato in fase di progettazione.

- carico verticale imposto: analogamente al carico orizzontale, è necessario considerare eventuali carichi verticali imposti da persone occupanti l'edificio stesso.

In tal caso è necessario considerare due possibili casistiche:

- carico concentrato imposto:  $q_1 = 1 \text{ kN}$ ;
- carico lineare imposto:  $q_2 = 0,6 \text{ kN/m}$ .

- carico da manutenzione:  $q_{manutenzione} = 0,50 \text{ kN}$ , carico orizzontale applicato ad un'altezza pari a 1 metro.

Le varie condizioni di carico vengono di seguito riassunte:

CONDIZIONI DI CARICO - APPROCCIO NORMATIVO		
Condizione	Tipologia di carico	Entità del carico
1	Pesi propri	Direttamente implementati
2	Depressione del vento	-2,29 kN/m <sup>2</sup>
3	Pressione del vento	1,14 kN/m <sup>2</sup>
4	Pressione del vento su GFRC orizzontale	-2,08 kN/m <sup>2</sup>
5	Carico da neve	0,4 kN/m <sup>2</sup>
6	Carico orizzontale imposto	0,5 kN
7	Carico lineare verticale imposto	0,6 kN/m
8	Carico concentrato verticale imposto	1 kN
9	Carico orizzontale manutenzione	0,5 kN

figura 5.12 - Condizioni di carico - approccio normative

<sup>41</sup> Carico da neve: calcolato in accordo all'Eurocodice "BS EN 1991-1-1:2002 – Action on structures – Part 1-1: General actions" e relativo annesso nazionale.

I carichi soprariportati sono valori caratteristici. Al fine di eseguire le verifiche allo stato limite d'esercizio (*SLS – Serviceability Limit States*) e allo stato limite ultimo (*ULS – Ultimate Limit States*) i carichi devono essere opportunamente combinati. In accordo all'Eurocodice “*BS EN 1990:2002 – Basis of structural design*” allo SLS è necessario adottare la seguente combinazione:

$$F_d = G + \psi_1 \cdot Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

ove:

- $G$ : pesi propri dei diversi elementi strutturali e non strutturali;
- $Q_{k,1}$ : carico variabile principale;
- $Q_{k,i}$ : carichi variabili secondari;
- $\psi_1$ : coefficiente di combinazione carico variabile principale;
- $\psi_{2,i}$ : coefficiente di combinazione carichi variabili secondari.

Quest'ultimi coefficienti sono anch'essi riportati in normativa, nel caso di spazi adibiti ad uffici è lecito assumere:

- per l'azione del vento:  $\psi_1 = 1$  e  $\psi_{2,i} = 0$ ;
- per l'azione della neve:  $\psi_1 = 1$  e  $\psi_{2,i} = 0,6$ ;
- per i carichi orizzontali e verticali imposti:  $\psi_1 = 1$  e  $\psi_{2,i} = 0$ ;
- per i carichi orizzontali da manutenzione  $\psi_1 = 1$  e  $\psi_{2,i} = 0$ .

In accordo alla precedente relazione, ed ai coefficienti sopra elencati, sarà necessario prevedere 7 combinazioni di carico i cui coefficienti sono riportati nella figura di cui sotto.

COMBINAZIONI DI CARICO STATO LIMITE D'ESERCIZIO - SLS									
Combinazione	Condiz. 1	Condiz. 2	Condiz. 3	Condiz. 4	Condiz. 5	Condiz. 6	Condiz. 7	Condiz. 8	Condiz. 9
1	1	1	0	-1	0	0	0	0	0
2	1	0	1	1	0,6	0	0	0	0
3	1	0	0,6	0,6	1	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	1	0	0	0
5	1	0	0	0	0	0	1	0	0
6	1	0	0	0	0	0	0	1	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	1

figura 5.13 - Combinazioni di carico - stato limite d'esercizio SLS

Analogamente, allo *USL – Ultimate Limit States* vale la seguente relazione:

$$F_d = \gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \gamma_Q \cdot \sum \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

ove, in aggiunta ai termini precedentemente elencati:

- $\gamma_G = 1,35$ : coefficiente per le azioni elementi strutturali;
- $\gamma_G = 1,5$ : coefficiente per le azioni carichi variabili.

Anche in questo caso, in accordo alla precedente relazione ed ai coefficienti sopra elencati, sarà necessario prevedere 7 combinazioni di carico i cui coefficienti sono riportati nella figura di cui sotto.

COMBINAZIONI DI CARICO STATO LIMITE ULTIMO - ULS									
Combinazione	Condiz. 1	Condiz. 2	Condiz. 3	Condiz. 4	Condiz. 5	Condiz. 6	Condiz. 7	Condiz. 8	Condiz. 9
1	1.35	1.5	0	-1.5	0	0	0	0	0
2	1.35	0	1.5	1.5	0.6x1.5	0	0	0	0
3	1.35	0	0.6x1.5	0.6x1.5	1.5	0	0	0	0
4	1.35	0	0	0	0	1.5	0	0	0
5	1.35	0	0	0	0	0	1.5	0	0
6	1.35	0	0	0	0	0	0	1.5	0
7	1.35	0	0	0	0	0	0	0	1.5

figura 5.14 - Combinazioni di carico - stato limite ultimo ULS

Il passo seguente prevede la definizione della geometria della cellula da analizzare. A partire dai carichi agenti e dalle proprietà dell'alluminio adottato vengono definite le sezioni dei diversi componenti strutturali che verranno poi importate nel *software* di calcolo. Le geometrie e le caratteristiche principali (area e momenti principali d'inerzia) dei diversi elementi vengono di seguito riportate:

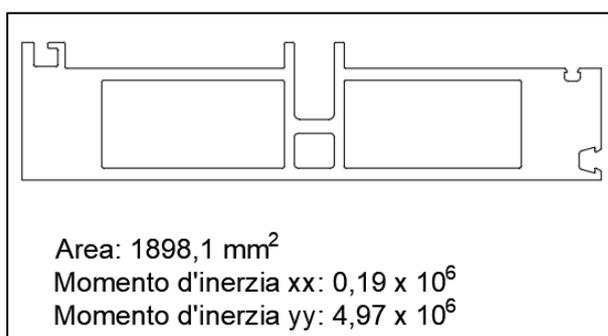


figura 5.15 - Sezione montante - approccio normative

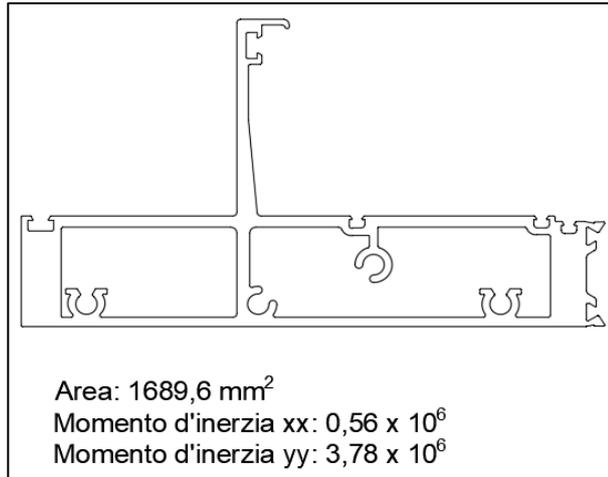


figura 5.16 - Sezione trasverso maschio - approccio normative

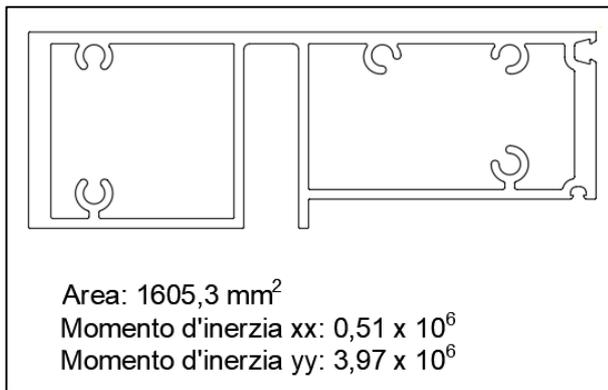


figura 5.17 - Sezione trasverso femmina - approccio normativo

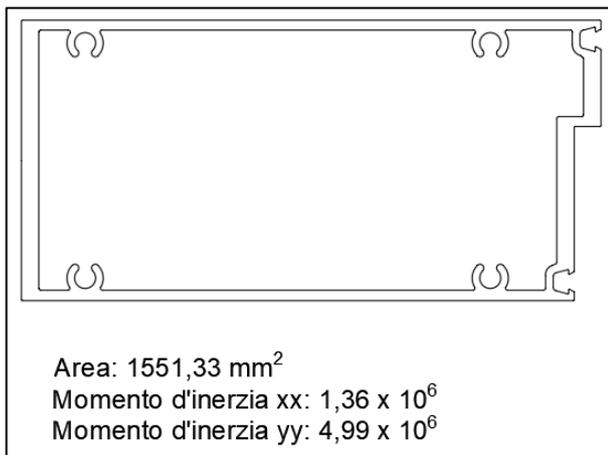


figura 5.18 - Sezione trasverso intermedio inferiore - approccio normativo

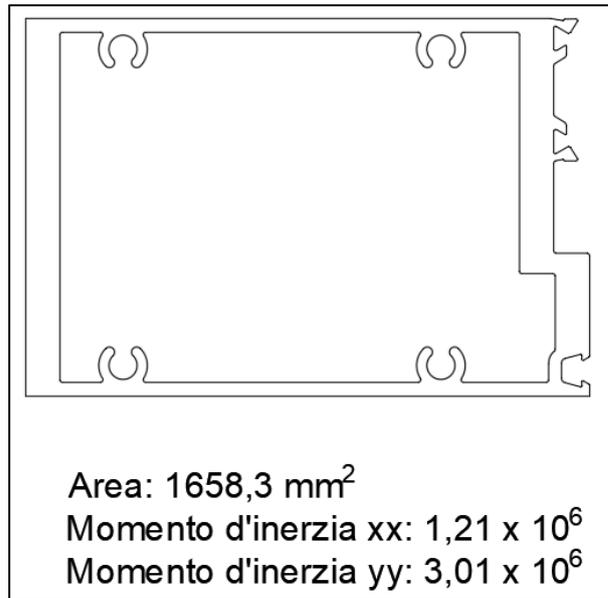


figura 5.19 - Sezione traverso intermedio superiore - approccio normative

Si osservi che, essendo le dimensioni delle cellule imposte da vincoli architettonici, il raggiungimento delle inerzie necessarie è garantito dall'utilizzo di maggior quantità di materiale alle estremità dei profili stessi. In via teorica sarebbe stato più conveniente, dal punto di vista progettuale, prevedere sezioni più allungate in modo tale da aumentare la distanza tra le masse. Tale opzione però non è percorribile dal punto di vista pratico in quanto, aumentando le dimensioni verso l'esterno, ciò genererebbe un aumento di superficie edificabile<sup>42</sup>. Al contempo, aumentandole verso l'interno, si conseguirebbe una riduzione delle superficie calpestabile<sup>43</sup>.

Introducendo poi le proprietà dei diversi elementi strutturali, la geometria della struttura, i carichi agenti e le combinazioni di carico, il modello risulta pronto all'analisi statica lineare. Di seguito viene illustrato il modello FEM della cellula e le varie condizioni di carico previste in fase di progettazione:

<sup>42</sup> Superficie edificabile: proiezione sul piano orizzontale del volume costruito fuori terra nelle sue dimensioni esterne (ingombro). [21]

<sup>43</sup> Superficie calpestabile: somma delle superfici interne dei singoli vani che compongono l'appartamento o il locale commerciale al netto dei muri perimetrali. [21]

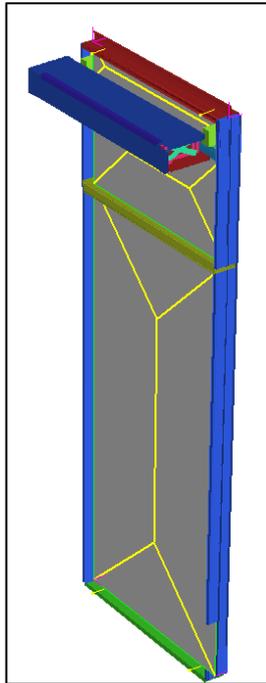


figura 5.20 - Modello FEM cellula unit 1

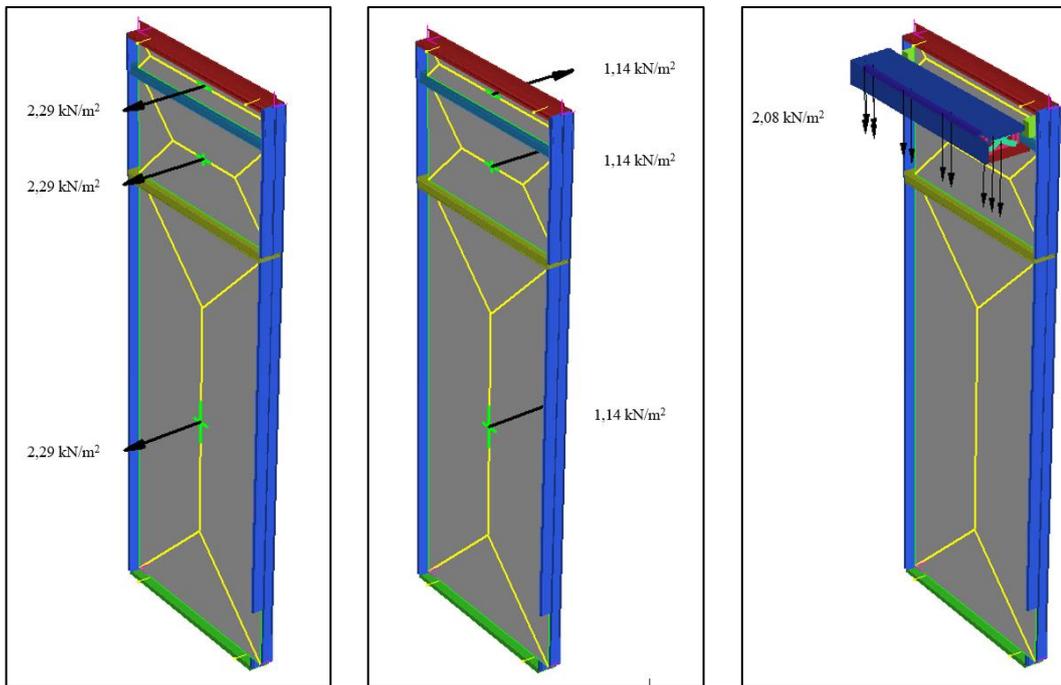


figura 5.21 - Condizioni di carico vento: 2 (sx) – 3 (centro) – 4 (dx)

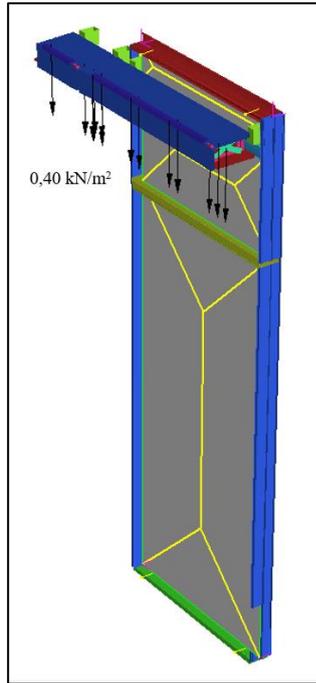


figura 5.22 - Condizione di carico neve (5)

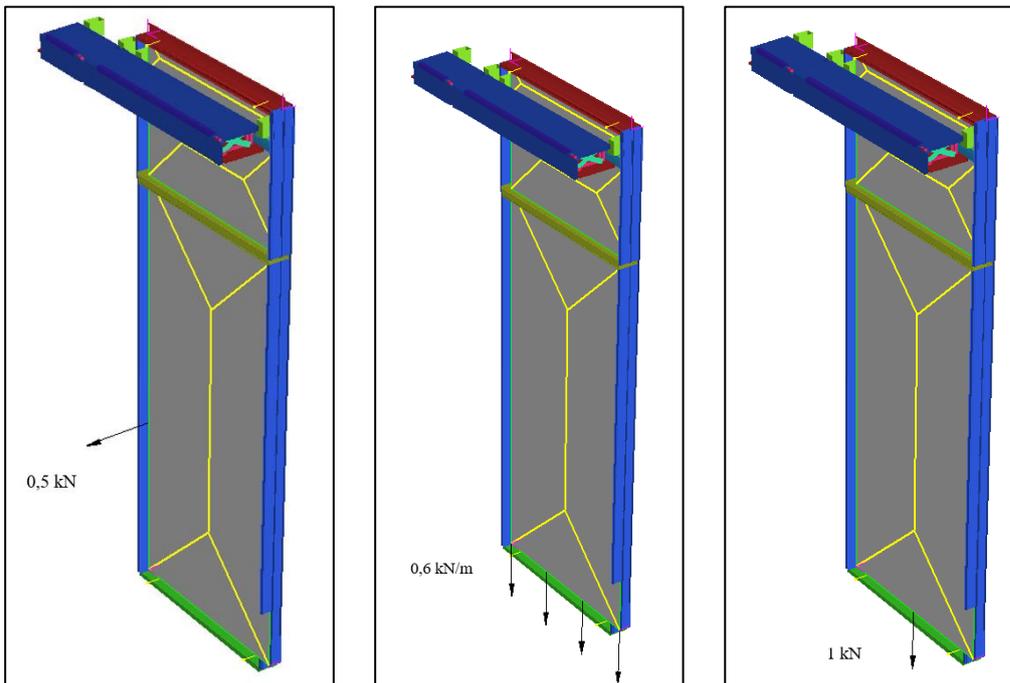


figura 5.23 - Condizioni di carichi imposti: 6 (sx) – 7 (centro) – 8 (dx)

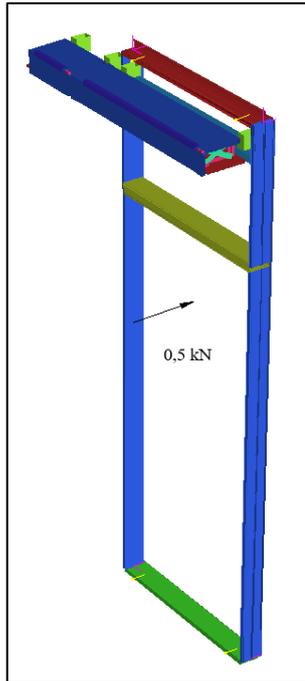


figura 5.24 - Condizione di carico da manutenzione (9)

Eseguita l'analisi, il *software* restituisce sollecitazioni e deformazioni della cellula grazie alle quali è possibile procedere alle verifiche.

In primo luogo si procede alle verifiche di deformabilità allo stato limite d'esercizio (SLS). Tale verifica dovrà essere condotta sia in direzione *y* (ortogonale al piano della cellula) che in direzione verticale *z*.

In direzione *y*, l'elemento maggiormente sollecitato sul quale focalizzare l'attenzione è il montante, mentre in direzione *z* risulta essere il traverso femmina. In accordo al paragrafo 3 della norma “*CWCT – Standard for systemized building envelopes – part 3 – Air, water and wind resistance*” si riportano i valori limite di deformazione da adottare in fase di verifica in direzione *y*:

- deformazione massima dovuta al vento per elementi di altezza compresa tra i 3000 ed i 7500 mm deve essere pari a:

$$w_{y,max} = \frac{H}{300} + 5 = \frac{3730}{300} + 5 = 17,43 \text{ mm}$$

- deformazione massima dovuta al vento per *units* con vetri doppi in condizione di appoggio ai quattro lati deve essere pari a:

$$w_{y,max} = \frac{H}{175} = \frac{3730}{175} = 21,3 \text{ mm}$$

In direzione z, invece, in riferimento alla parte 2 della stessa norma, è necessario soddisfare la seguente deformazione massima:

$$w_{z,max} = \frac{B}{500} = \frac{1263}{500} = 2,53 \text{ mm}$$

Definiti i valori limite, vengono poi confrontate le deformazioni rilevate dal modello con le precedenti deformazioni massime per verificarne il soddisfacimento. Per quanto riguarda la verifica in direzione y la condizione più gravosa risulta essere la 1, mentre in direzione z risulta essere la 6. Viene di seguito riportata la tabella riassuntiva e le deformate delle due condizioni più gravose:

VERIFICA DI DEFORMABILITA' SLS- APPROCCIO NORMATIVO								
Combinazione	Montanti				Traverso Femmina			
	$d_{y,max}$ [mm]	$d_{y,lim}$ [mm]	$d_{y,max} \leq d_{y,lim}$	% di utilizzo	$d_{z,max}$ [mm]	$d_{z,lim}$ [mm]	$d_{z,max} \leq d_{z,lim}$	% di utilizzo
SLS 1	11.25	17.43	Verificato	64.5%	0.71	2.53	Verificato	28.1%
SLS 2	6.04	17.43	Verificato	34.6%	0.67	2.53	Verificato	26.5%
SLS 3	3.76	17.43	Verificato	21.6%	0.68	2.53	Verificato	26.9%
SLS 4	0.88	17.43	Verificato	5.0%	0.68	2.53	Verificato	26.9%
SLS 5	0.24	17.43	Verificato	1.4%	1.26	2.53	Verificato	49.9%
SLS 6	0.24	17.43	Verificato	1.4%	1.89	2.53	Verificato	74.8%
SLS 7	1.55	17.43	Verificato	8.9%	0.68	2.53	Verificato	26.9%

figura 5.25 - Tabella riassuntiva verifiche stati limite di esercizio SLS – approccio normative

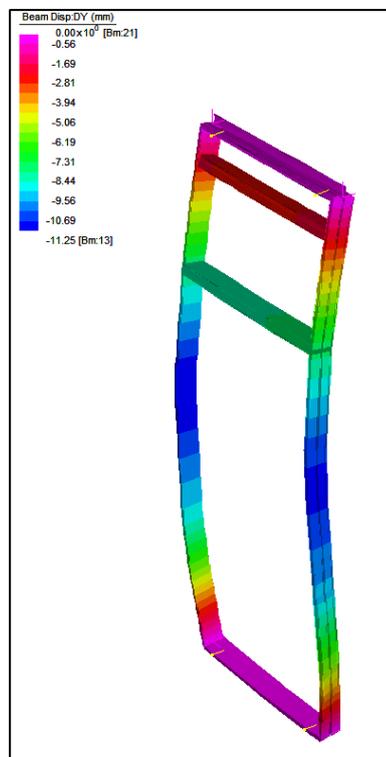


figura 5.26 – Deformazione direzione y – combinazione SLS 1 – approccio normative

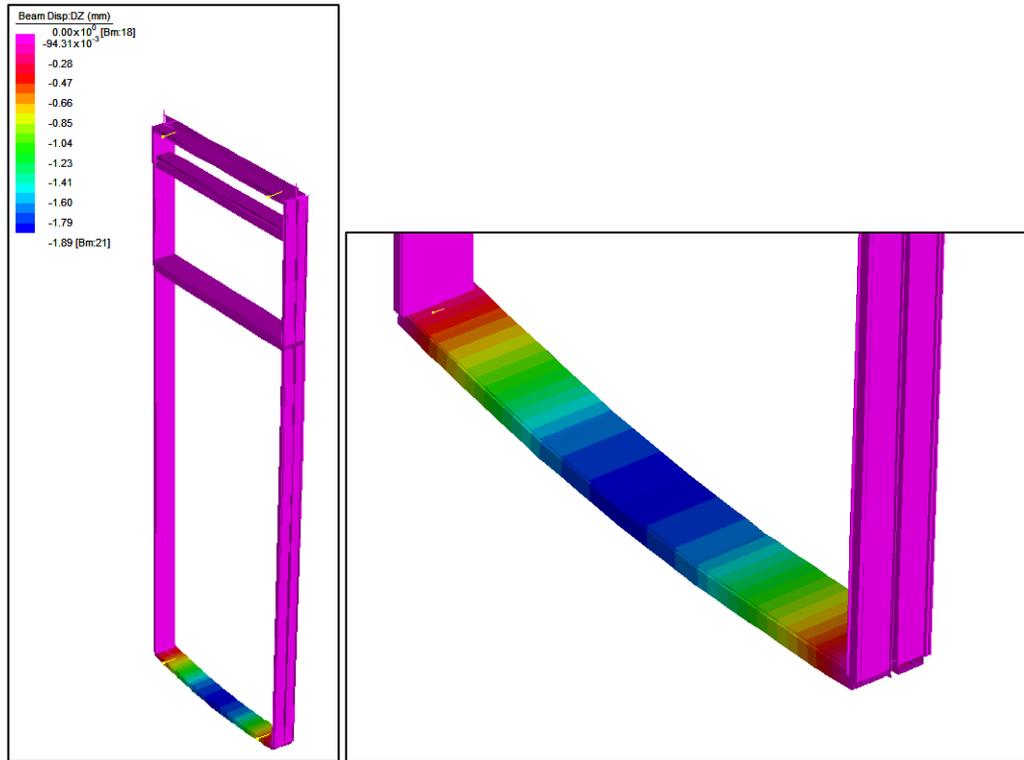


figura 5.27 - Deformazione direzione z - combinazione SLS 6 – approccio normative

Passando allo stato limite ultimo ULS, la verifica alla quale porre particolare attenzione risulta essere la verifica tensionale. Anche in questo caso il montante è l'elemento maggiormente sollecitato, la cui tensione massima deve soddisfare la seguente tensione limite:

$$f_d \leq \frac{f_0}{\gamma_{M1}} = \frac{160}{1,1} = 145,5 \text{ MPa}$$

Ove:

- $f_0 = 160 \text{ MPa}$ : tensione caratteristica dell'alluminio;
- $\gamma_{M1} = 1,1$ : coefficiente parziale dell'alluminio.

Per tutte e sette le combinazioni ULS vengono rilevate le sollecitazioni da modello, le quali vengono poi confrontate con il precedente valore limite di tensione per verificarne il soddisfacimento. Viene di seguito riportata la tabella riassuntiva e l'andamento delle tensioni nella combinazione di carico più gravosa (ULS 1):

VERIFICA TENSIONALE ULS - APPROCCIO ALTERNATIVO				
Combinazione	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{lim}$ [MPa]	$\sigma_{max} \leq \sigma_{lim}$	% di utilizzo
ULS 1	61.65	145.45	Verificato	42.4%
ULS 2	54.15	145.45	Verificato	37.2%
ULS 3	34.69	145.45	Verificato	23.8%
ULS 4	20.71	145.45	Verificato	14.2%
ULS 5	22.94	145.45	Verificato	15.8%
ULS 6	43.13	145.45	Verificato	29.7%
ULS7	24.94	145.45	Verificato	17.1%

figura 5.28 - Tabella riassuntiva verifiche stato limite ultimo ULS

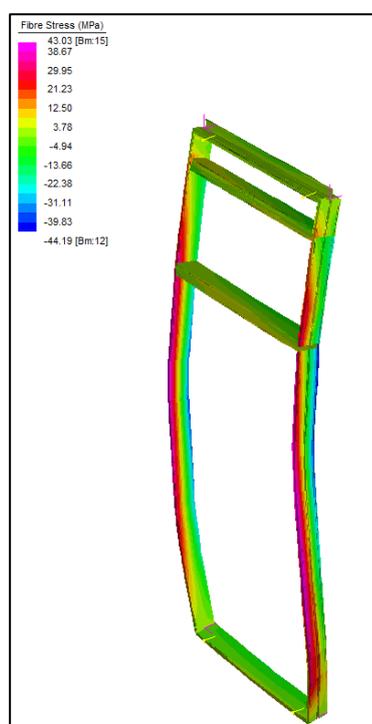


figura 5.29 – Tensioni totali – combinazione ULS 1 – approccio normativo

### 5.2.1.2 APPROCCIO ALTERNATIVO

Conclusa la progettazione degli elementi in alluminio grazie ai carichi provenienti dal calcolo da normativa si procede alla stessa con carichi ridotti derivanti dall'approccio alternativo. Avendo, infatti, rilevato carichi da vento analoghi tra analisi sperimentale in galleria del vento e analisi computazionale CFD, si procede alla progettazione considerando un'unica configurazione di carichi.

Analogamente a quanto effettuato in precedenza, al fine di eseguire le verifiche degli elementi strutturali costituenti la cellula, si procede alla realizzazione di un modello FEM. Tale modello di seguito esposto differirà dal precedente per il carico da vento e per le sezioni degli elementi strutturali. La geometria, le rimanenti azioni (pesi propri, carico da neve, carichi imposti e carico da manutenzione), i coefficienti e le combinazioni di carico non vengono alterate e, per tale motivo, non vengono riproposte.

*In primis*, si riporta il carico del vento precedentemente definito:

- pressione del vento:  $q_{vento,p} = 1 \text{ kN/m}^2$ ;
- depressione del vento:  $q_{vento,d} = 0,8 \text{ kN/m}^2$ ;
- pressione del vento sul GFRC orizzontale:  $q_{vento,GFRC} = 1 - 0,17 = 0,83 \text{ kN/m}^2$ .

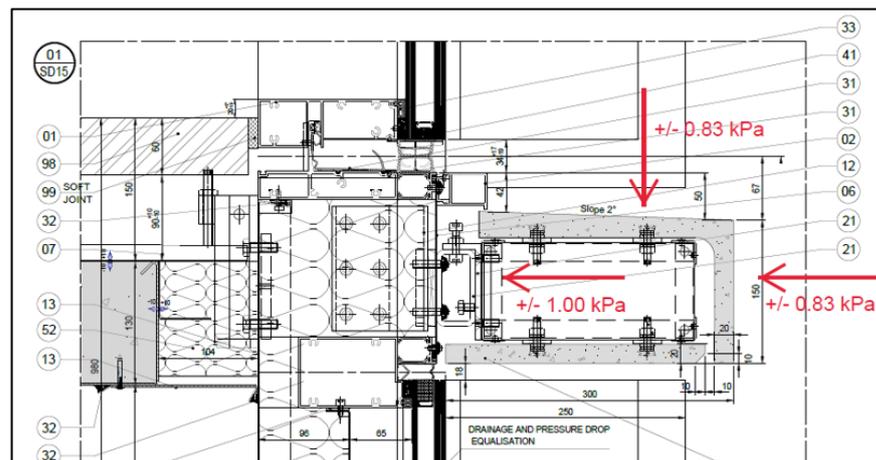
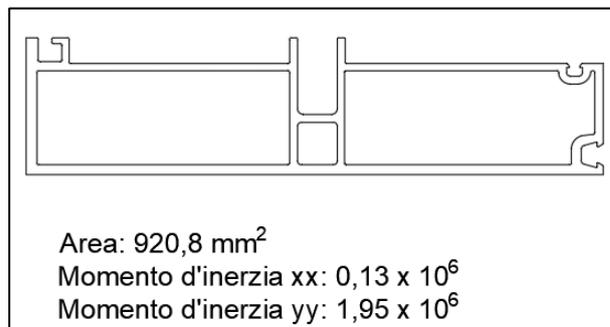


figura 5.30 - Dettaglio azione del vento agente sull'elemento di GFRC orizzontale

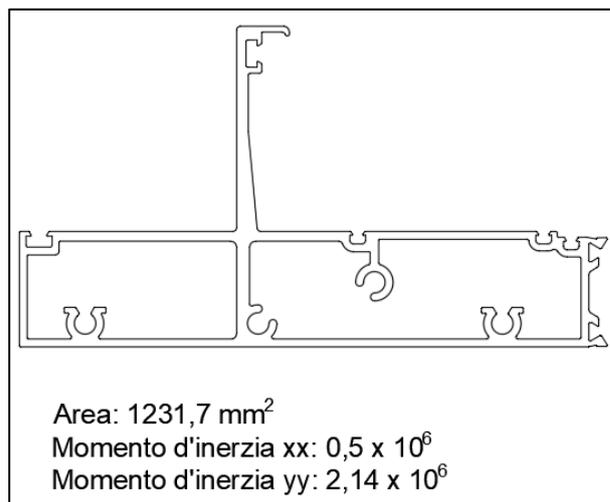
La riduzione dell'azione del vento derivante dal differente approccio di calcolo si ripercuote sulle sezioni dei diversi elementi strutturali costituenti la cellula. In particolare, vengono ridotti gli spessori delle pareti mantenendo inalterato l'ingombro, il perimetro esterno, la posizione e la dimensione dei noccioli<sup>44</sup> e le cavità per l'alloggiamento delle guarnizioni. Trattandosi di un confronto sull'influenza del carico da vento sul dimensionamento degli elementi strutturali, si è deciso di aggiornare gli spessori a parità di grado di sfruttamento

<sup>44</sup> Noccioli: elementi di forma cilindrica disposti lungo tutto lo sviluppo dei singoli profili, necessari per il collegamento dei diversi elementi strutturali.

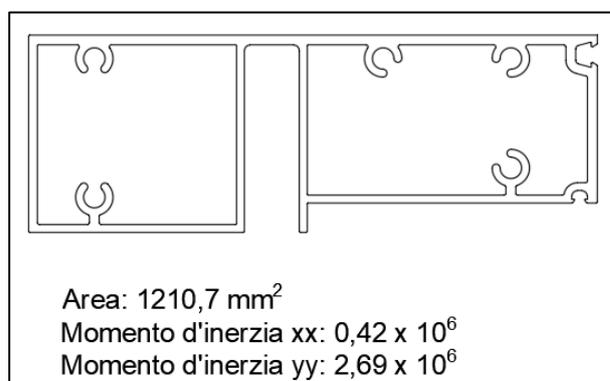
della verifica più gravosa, ossia la verifica di deformabilità in direzione y. Le sezioni aggiornate illustrate nelle seguenti figure, vengono poi importate nel software di calcolo.



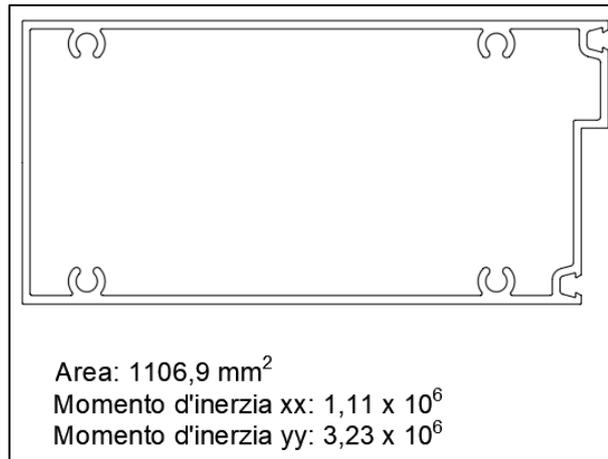
*figura 5.31 - Sezione montante - Approccio alternativo*



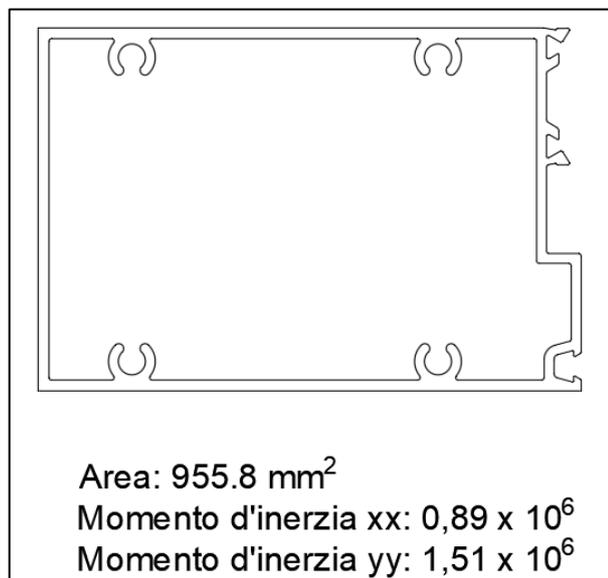
*figura 5.32 - Sezione traverso maschio - Approccio alternativo*



*figura 5.33 - Sezione traverso femmina - Approccio alternativo*



*figura 5.34 - Sezione trasverso intermedio inferiore - Approccio alternativo*



*figura 5.35 - Sezione trasverso intermedio superiore - Approccio alternativo*

Aggiornate le proprietà dei diversi elementi strutturali ed il carico da vento il modello risulta pronto all'analisi statica lineare. Di seguito vengono illustrate le sole condizioni di carico relative al vento in quanto, i rimanenti carichi, sono analoghi a quelli precedentemente esposti.

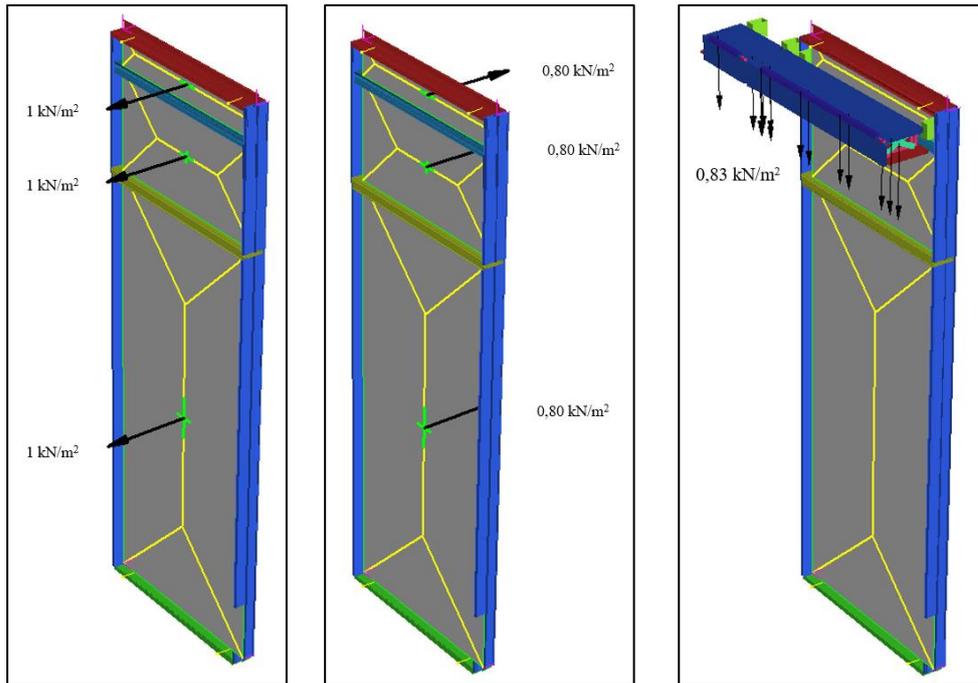


figura 5.36 - Condizioni di carico vento: 2 (sx) – 3 (centro) – 4 (dx)

Eseguita l'analisi, il *software* restituisce anche in questo caso sollecitazioni e deformazioni grazie alle quali è possibile procedere alle verifiche.

Analogamente a quanto effettuato in precedenza si procede in primo luogo alle verifiche di deformabilità allo stato limite d'esercizio nelle due direzioni (y e z). Viene di seguito riportata la tabella riassuntiva delle due verifiche e le deformate relative alle due condizioni più gravose, rispettivamente la 1 per la verifica in direzione y e la 6 in direzione z.

VERIFICA DI DEFORMABILITA' ULS - APPROCCIO ALTERNATIVO								
Combinazione	Montanti				Traverso Femmina			
	$d_{y,max}$ [mm]	$d_{y,lim}$ [mm]	$d_{y,max} \leq d_{y,lim}$	% di utilizzo	$d_{z,max}$ [mm]	$d_{z,lim}$ [mm]	$d_{z,max} \leq d_{z,lim}$	% di utilizzo
SLS 1	11.25	17.43	Verificato	64.5%	0.86	2.53	Verificato	34.0%
SLS 2	10.13	17.43	Verificato	58.1%	0.83	2.53	Verificato	32.9%
SLS 3	6.41	17.43	Verificato	36.8%	0.84	2.53	Verificato	33.3%
SLS 4	1.89	17.43	Verificato	10.8%	0.85	2.53	Verificato	33.7%
SLS 5	0.59	17.43	Verificato	3.4%	1.55	2.53	Verificato	61.4%
SLS 6	0.59	17.43	Verificato	3.4%	2.32	2.53	Verificato	91.8%
SLS 7	3.55	17.43	Verificato	20.4%	0.85	2.53	Verificato	33.7%

figura 5.37 - Tabella riassuntiva verifiche stati limite di esercizio SLS – approccio alternativo

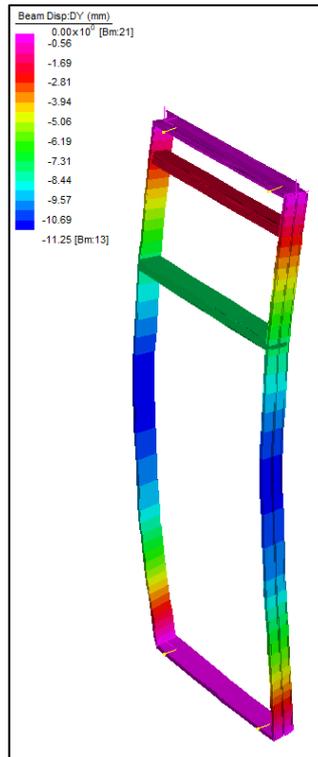


figura 5.38 – Deformazione direzione y – combinazione SLS 1 – approccio alternativo

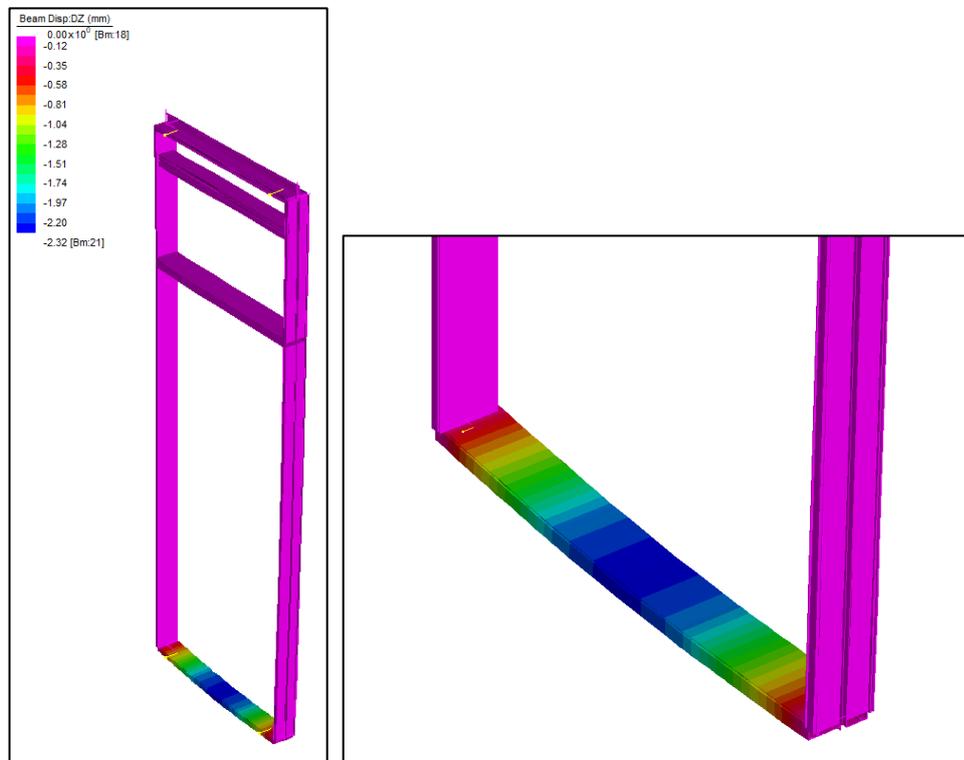


figura 5.39 - Deformazione direzione z - combinazione SLS 6 – approccio alternativo

Dalla tabella in figura 5.37 si può osservare che la freccia massima in direzione y, e dunque il grado di sfruttamento dell'approccio alternativo, sono uguali ai valori relativi alla precedente trattazione. Come già anticipato, tale uguaglianza è stata ricercata al fine di valutare la reale variazione dimensionale dei diversi elementi strutturali al variare del carico da vento, in quanto, tale verifica, risulta essere la più gravosa per la struttura resistente in alluminio.

In secondo luogo, viene riproposta la verifica tensionale allo stato limite ultimo (ULS) di cui viene riportata la tabella riassuntiva e l'andamento delle tensioni nella combinazione di carico più gravosa (ULS 1).

VERIFICA TENSIONALE ULS - APPROCCIO ALTERNATIVO				
Combinazione	$\sigma_{max}$ [MPa]	$\sigma_{lim}$ [MPa]	$\sigma_{max} \leq \sigma_{lim}$	% di utilizzo
ULS 1	61.65	145.45	Verificato	42.4%
ULS 2	54.15	145.45	Verificato	37.2%
ULS 3	34.69	145.45	Verificato	23.8%
ULS 4	20.71	145.45	Verificato	14.2%
ULS 5	22.94	145.45	Verificato	15.8%
ULS 6	43.13	145.45	Verificato	29.7%
ULS7	24.94	145.45	Verificato	17.1%

figura 5.40 - Tabella riassuntiva verifiche stato limite ultimo ULS



figura 5.41 – Tensioni totali – combinazione ULS 1 – approccio alternativo

### 5.2.1.3 INFLUENZA DELLA VARIAZIONE DEL CARICO DA VENTO SUL DIMENSIONAMENTO DELLA STRUTTURA RESISTENTE

Conclusa la progettazione della struttura resistente nei due differenti approcci è possibile procedere alla valutazione dell'influenza della variazione del carico da vento su di essa.

Nella tabella e nelle figure di seguito riportate è possibile osservare la variazione dell'area e delle inerzie dei vari elementi strutturali. I montanti, essendo gli elementi maggiormente sollecitati dall'azione del vento, sono i componenti che prevedono la maggiore riduzione di inerzia  $J_{yy}$  (60%) e di conseguenza di area (51 %). I rimanenti componenti subiscono anch'essi delle variazioni, ma in maniera limitata.

CONFRONTO CARATTERISTICHE ELEMENTI STRUTTURALI									
Elemento	Approccio normativo			Approccio alternativo			Riduzione		
	Area [mm <sup>2</sup> ]	Jxx [mm <sup>4</sup> ]	Jyy [mm <sup>4</sup> ]	Area [mm <sup>2</sup> ]	Jxx [mm <sup>4</sup> ]	Jyy [mm <sup>4</sup> ]	ΔArea [%]	ΔJxx [%]	ΔJyy [%]
Montante	1898.1	1.90E+05	4.97E+06	920.8	1.30E+05	1.95E+06	51.49%	31.58%	60.76%
Traverso maschio	1689.6	5.60E+05	3.78E+06	1231.7	5.00E+05	2.14E+06	27.10%	10.71%	43.39%
Traverso femmina	1605.3	5.10E+05	3.97E+06	1210.7	4.20E+05	2.69E+06	24.58%	17.65%	32.24%
Traverso intermedio inf.	1551.3	1.36E+06	4.99E+06	1106.9	1.11E+06	3.23E+06	28.65%	18.38%	35.27%
Traverso intermedio sup.	1658.3	1.21E+06	3.01E+06	955.8	8.90E+05	1.51E+06	42.36%	26.45%	49.83%

figura 5.42 - Confronto caratteristiche elementi strutturali

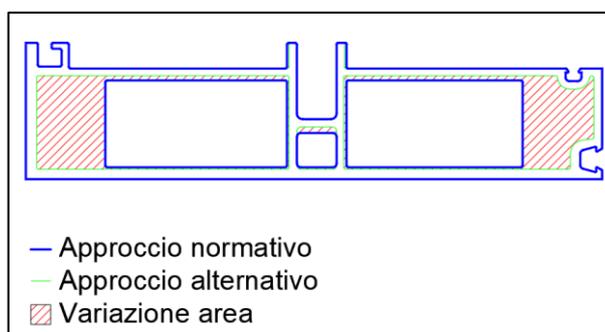


figura 5.43 - Variazione di sezione – Montante

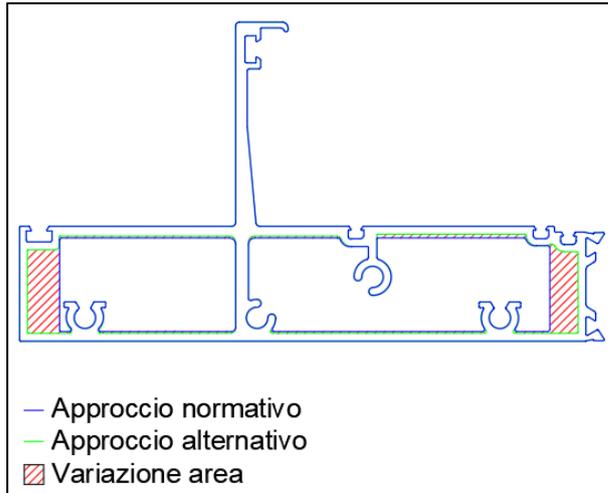


figura 5.44 - Variazione di sezione - Traverso maschio

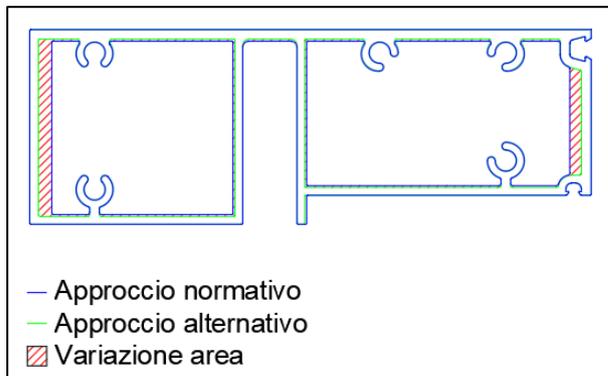


figura 5.45 - Variazione di sezione - Traverso femmina

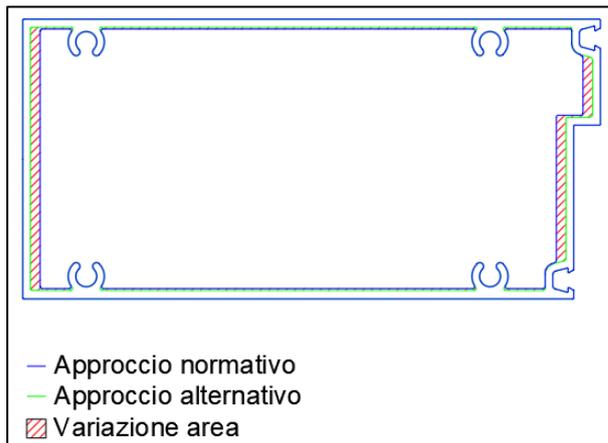


figura 5.46 - Variazione di sezione - Traverso intermedio inferior

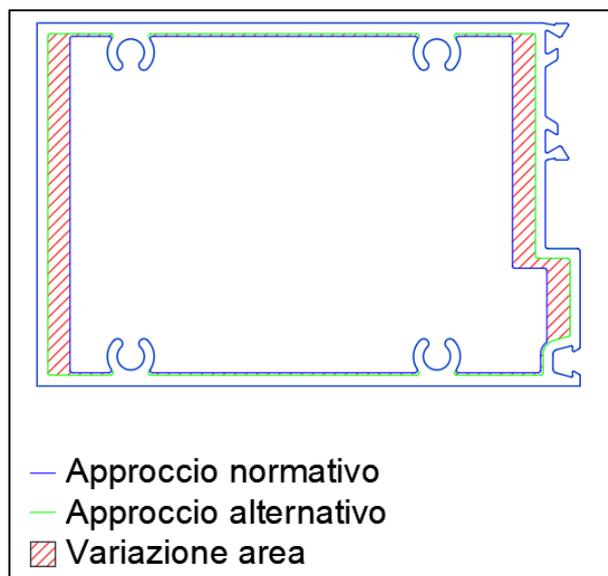


figura 5.47 - Variazione di sezione - Traverso intermedio superiore

Nell'ipotesi in cui fosse stato possibile modificare la profondità dell'elemento cellula (e quindi l'ingombro del profilo), il passaggio dall'approccio normativo all'approccio approfondito avrebbe generato una minor riduzione di area del montante, in quanto l'aumento di inerzia necessario sarebbe avvenuto aumentando la distanza tra le masse. Tale approccio, oltre a non essere perseguibile a causa del superamento dei vincoli architettonici, comporterebbe un sovradimensionamento dei rimanenti elementi strutturali. Difatti, essendo il montante maggiormente sollecitato, una sua variazione dimensionale comporterebbe l'incremento delle dimensioni degli altri profili al fine di garantire la congruenza strutturale.

Ipotizzando che, in via semplificata, l'intero edificio sia composto dalla sola tipologia di cellula analizzata, è possibile stimare l'eventuale riduzione del costo di approvvigionamento degli elementi strutturali in alluminio nel caso di utilizzo del carico da vento rilevato in galleria o per mezzo di modellazione CFD a discapito del carico da normativa. *In primis*, a partire dalle aree relative ai due approcci, conoscendo il numero e la lunghezza dei diversi elementi è possibile calcolarsi il volume di alluminio necessario alla realizzazione di una sola cellula in ambo i metodi di analisi.

VARIAZIONE VOLUME ALLUMINIO CELLULA UNITS 1								
Elemento	n°	L [mm]	A <sub>norma</sub> [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>altert.</sub> [mm <sup>2</sup> ]	V <sub>norma</sub> [mm <sup>3</sup> ]	V <sub>altert.</sub> [mm <sup>3</sup> ]	ΔV [mm <sup>3</sup> ]	ΔV [m <sup>3</sup> ]
Montante	2	3705	1898.1	920.8	14064921	6823128	7241793	0.00724
Traverso maschio	1	1183	1689.6	1231.7	1998796.8	1457101.1	541695.7	0.00054
Traverso femmina vision	1	1183	1605.3	1210.7	1899069.9	1432258.1	466811.8	0.00047
Traverso intermedio inf.	1	1183	1551.3	1106.9	1835187.9	1309462.7	525725.2	0.00053
Traverso intermedio sup.	1	1183	1658.3	955.8	1961768.9	1130711.4	831057.5	0.00083
<b>TOT</b>					<b>21759744.5</b>	<b>12152661.3</b>	<b>9607083.2</b>	<b>0.00961</b>

figura 5.48 - Variazione volume alluminio cellula units 1

Dopodiché, conoscendo le dimensioni della cellula e la geometria dell'intero edificio oggetto di studio, è possibile ricavarsi il numero teorico totale di cellule necessarie alla realizzazione dell'intero edificio, ossia circa 2680 cellule:

$$A_{prospetto\ Nord} = 3,69 \cdot 10^9 \text{ mm}^2$$

$$A_{prospetto\ Est} = 2,73 \cdot 10^9 \text{ mm}^2$$

$$A_{prospetto\ Sud} = 3,61 \cdot 10^9 \text{ mm}^2$$

$$A_{prospetto\ Ovest} = 2,60 \cdot 10^9 \text{ mm}^2$$

$$A_{tot} = 1,26 \cdot 10^{10} \text{ mm}^2$$

$$A_{cellula} = b \cdot h = 1263 \cdot 3730 = 4,71 \cdot 10^6 \text{ mm}^2$$

$$n^{\circ}_{cellule} = \frac{A_{tot}}{A_{cellula}} \cong 2680 \text{ cellule units tipo 1}$$

Infine, introducendo la densità dell'alluminio ( $\delta = 2700 \text{ kg/m}^3$ ) ed il prezzo dell'alluminio estruso ossidato ( $5 + 1,5 \text{ €/kg}$ )<sup>45</sup>, si ottiene una riduzione di costo pari a:

$$\text{€}_{norma} = V_{norma} \cdot \delta \cdot n^{\circ}_{cellule} \cdot (5 + 1,5) \text{ €/kg} \cong 1\,020\,000 \text{ €}$$

$$\text{€}_{altern.} = V_{altern.} \cdot \delta \cdot n^{\circ}_{cellule} \cdot (5 + 1,5) \text{ €/kg} \cong 570\,000 \text{ €}$$

$$\Delta\text{€} = \text{€}_{norma} - \text{€}_{altern.} \cong 450\,000 \text{ €}$$

$$\Delta\text{€}_{\%} = \frac{\Delta\text{€}}{\text{€}_{norma}} \cong 44,1 \%$$

È importante ricordare che l'ottimizzazione effettuata non inficia la sicurezza strutturale, in quanto le verifiche vengono soddisfatte con ampio margine di sicurezza. Comunque, in caso di raggiungimento di valori limite, si avrebbe una deformazione superiore a quella limite senza che essa degeneri nella rottura dell'elemento cellula. In tal caso si avrebbe dunque il tempo necessario per sostituire l'elemento danneggiato ad opera dell'azienda realizzatrice.

---

<sup>45</sup> Costi dell'alluminio grezzo estruso (5 €/kg) e dell'ossidazione (1,5 €/kg) riferiti a febbraio 2022. Fonte: analisi di mercato effettuata dal *procurement department* Focchi Spa

## 5.2.2 VETRI-CAMERA

Oltre alla struttura portante in alluminio, l'altro elemento la cui progettazione è fortemente influenzata dall'azione del vento è il vetro.

In genere, trattandosi di cellule di grandi dimensioni costituenti il rivestimento principale dell'edificio stesso ed avendo, quindi, anche funzione di isolamento termico ed acustico, si ha a che fare con i cosiddetti vetri camera. Tali elementi sono composti da due o più superfici vetrate intervallate da camere in cui sono presenti gas, quali aria o argon<sup>46</sup>, con potere isolante. Inoltre, i vetri saranno a loro volta costituiti da più strati di dimensioni variabili a seconda delle necessità. Anche in questo caso, l'obiettivo del presente paragrafo non è sviluppare in toto la progettazione dei vetri stratificati, ma bensì apprenderne gli effetti della variazione del carico da vento sul loro dimensionamento.

Come precedentemente osservato, la cellula oggetto di studio prevede due tipologie di vetri: vetro trasparente cosiddetto "*vision*" e vetro opaco cosiddetto "*shadow box*". In entrambi i casi si tratta di pannelli di tamponamento che chiudono le aperture presenti senza contribuire alla resistenza ed alla stabilità della struttura portante.

Nel corso del seguente paragrafo analizzeremo per brevità di trattazione solamente il vetro "*vision*" in quanto, prevedendo dimensioni maggiori, sarà soggetto a sollecitazioni più elevate. I risultati verranno poi estesi anche al restante vetro "*shadow box*".

### 5.2.2.1 APPROCCIO NORMATIVO

In primo luogo, si procede al calcolo analitico in accordo all'Eurocodice "*BS EN 16612:2019 – Glass in building: determination of the lateral load resistance of glass panes by calculation*". A conferma di tale processo di calcolo, l'analisi verrà anche riproposta grazie all'uso del *software* agli elementi finiti "*Mepla*"<sup>47</sup>.

In analogia alla progettazione della struttura resistente, il primo passo consiste nella definizione dei carichi. In aggiunta ai carichi precedentemente considerati, nella progettazione dei vetri è necessario considerare anche i carichi climatici. In accordo

---

<sup>46</sup> Argon: gas nobile presente in natura, viene utilizzato nella realizzazione di infissi e serramenti al fine di generare uno strato isolante tra i due vetri che compongono il vetro-camera. [22]

<sup>47</sup> *Mepla*: *software* agli elementi finiti sviluppato per il calcolo statico e dinamico di vetro strutturale.

all'annesso nazionale dell'Eurocodice “*BS EN 1991-1-5:2003 – Eurocode 1 part 5: actions on structures - thermalactions*” è lecito assumere:

- temperatura interna al vetro-camera in estate: + 30°;
- temperatura interna al vetro-camera in inverno: -15°.

Le varie condizioni di carico vengono di seguito riassunte:

CONDIZIONI DI CARICO - APPROCCIO NORMATIVO		
Condizione	Tipologia di carico	Entità del carico
1	Peso proprio vetro	Direttamente implementati
2	Depressione del vento	-2,29 kN/m <sup>2</sup>
3	Pressione del vento	1,14 kN/m <sup>2</sup>
4	Carico orizzontale imposto	0,74 kN/m
5	Carico orizzontale imposto	1 kN/m <sup>2</sup>
6	Carico orizzontale imposto	0,5 kN
7	Carico climatico inverno	-15°
8	Carico climatico estate	+30°
9	Carico orizzontale manutenzione	0,5 kN

figura 5.49 - Condizioni di carico - approccio normative

I carichi soprariportati sono valori caratteristici. Al fine di eseguire le verifiche allo stato limite d'esercizio (*SLS – Serviceability Limit States*) e allo stato limite ultimo (*ULS – Ultimate Limit States*) i carichi devono essere opportunamente combinati. In accordo alla normativa “*BS EN 16612:2019*” allo SLS è necessario adottare la seguente combinazione:

$$F_d = G + Q_{k,1} + \sum \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

ove:

- $G$ : peso proprio del vetro;
- $Q_{k,1}$ : carico variabile principale;
- $Q_{k,i}$ : carichi variabili secondari;
- $\psi_{0,i}$ : coefficiente di combinazione carichi variabili secondari.

Questi ultimi coefficienti sono anch'essi riportati in normativa, in accordo alla precedente direttiva ed alla *CWCT – “Guidance on the action on non-loadbearing building envelopes”*.

Nel caso di spazi adibiti ad uffici è ammesso assumere:

- per l'azione del vento:  $\psi_{0,i} = 0$ ;
- per i carichi orizzontali imposti:  $\psi_{0,i} = 0$ ;

- per i carichi orizzontali da manutenzione  $\psi_{0,i} = 0$ ;
- per i carichi climatici  $\psi_{0,i} = 0,3$ .

In accordo alla precedente relazione, ed ai coefficienti sopra elencati, sarà necessario prevedere 13 combinazioni di carico i cui coefficienti sono riportati nella figura di cui sotto.

COMBINAZIONI DI CARICO STATO LIMITE D'ESERCIZIO - SLS									
Combinazione	Condiz. 1	Condiz. 2	Condiz. 3	Condiz. 4	Condiz. 5	Condiz. 6	Condiz. 7	Condiz. 8	Condiz. 9
1	1	1	0	0	0	0	0,3	0	0
2	1	1	0	0	0	0	0	0,3	0
3	1	0	1	0	0	0	0,3	0	0
4	1	0	1	0	0	0	0	0,3	0
5	1	0	0	1	0	0	0,3	0	0
6	1	0	0	1	0	0	0	0,3	0
7	1	0	0	0	1	0	0,3	0	0
8	1	0	0	0	1	0	0	0,3	0
9	1	0	0	0	0	1	0,3	0	0
10	1	0	0	0	0	1	0	0,3	0
11	1	0	0	0	0	0	1	0	0
12	1	0	0	0	0	0	0	1	0
13	1	0	0	0	0	0	0,3	0	1

figura 5.50 - Combinazioni di carico - stato limite d'esercizio SLS

Analogamente, allo *USL – Ultimate Limit States* vale la seguente relazione:

$$F_d = \gamma_G \cdot G + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \gamma_Q \cdot \sum \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

ove, in aggiunta ai termini precedentemente elencati, in accordo alla “*BS EN 16612:2019*”:

- $\gamma_G = 1,1$ : coefficiente per le azioni elementi strutturali (vetro);
- $\gamma_Q = 1,1$ : coefficiente per le azioni carichi variabili.

Anche in questo caso, in accordo alla precedente relazione ed ai coefficienti sopra elencati, sarà necessario prevedere 13 combinazioni di carico i cui coefficienti sono riportati nella figura di cui sotto.

COMBINAZIONI DI CARICO STATO LIMITE ULTIMO - ULS									
Combinazione	Condiz. 1	Condiz. 2	Condiz. 3	Condiz. 4	Condiz. 5	Condiz. 6	Condiz. 7	Condiz. 8	Condiz. 9
1	1.1	1.1	0	0	0	0	1.1X0.3	0	0
2	1.1	1.1	0	0	0	0	0	1.1X0.3	0
3	1.1	0	1.1	0	0	0	1.1X0.3	0	0
4	1.1	0	1.1	0	0	0	0	1.1X0.3	0
5	1.1	0	0	1.1	0	0	1.1X0.3	0	0
6	1.1	0	0	1.1	0	0	0	1.1X0.3	0
7	1.1	0	0	0	1.1	0	1.1X0.3	0	0
8	1.1	0	0	0	1.1	0	0	1.1X0.3	0
9	1.1	0	0	0	0	1.1	1.1X0.3	0	0
10	1.1	0	0	0	0	1.1	0	1.1X0.3	0
11	1.1	0	0	0	0	0	1.1	0	0
12	1.1	0	0	0	0	0	0	1.1	0
13	1.1	0	0	0	0	0	1.1X0.3	0	1.1

figura 5.51 - Combinazioni di carico - stato limite ultimo ULS

È importante osservare che, per mezzo dei coefficienti di combinazione, il carico da vento non viene combinato con i carichi imposti dalle persone occupanti l'edificio. Trattandosi di una progettazione atta a valutare l'influenza del carico da vento sul dimensionamento delle vetrate è lecito considerare in prima battuta le sole combinazioni di carico ove è presente il vento (combinazioni 1, 2, 3 e 4).

Il passo successivo consiste nella definizione delle caratteristiche e della sezione del vetro da analizzare. A partire dalle dimensioni della superficie vetrata 1239 x 2801 mm, ed ai carichi agenti, è stata definita la seguente stratigrafia:

- Vetro esterno: doppio vetro ricotto da 8 mm con strato di PVB<sup>48</sup> da 0,76 mm;
- Camera interna: cavità da 18 mm con gas argon sigillata con silicone strutturale;
- Vetro interno: doppio vetro ricotto da 6 mm con strato di PVB da 0,76 mm.

<sup>48</sup> PVB = polivinilbutirrale: materiale plastico che, opportunamente plastificato ed additivato, viene utilizzato sotto forma di pellicola tra vetri laminati. Tale interstrato risulta trasparente e permette la connessione dei due vetri.

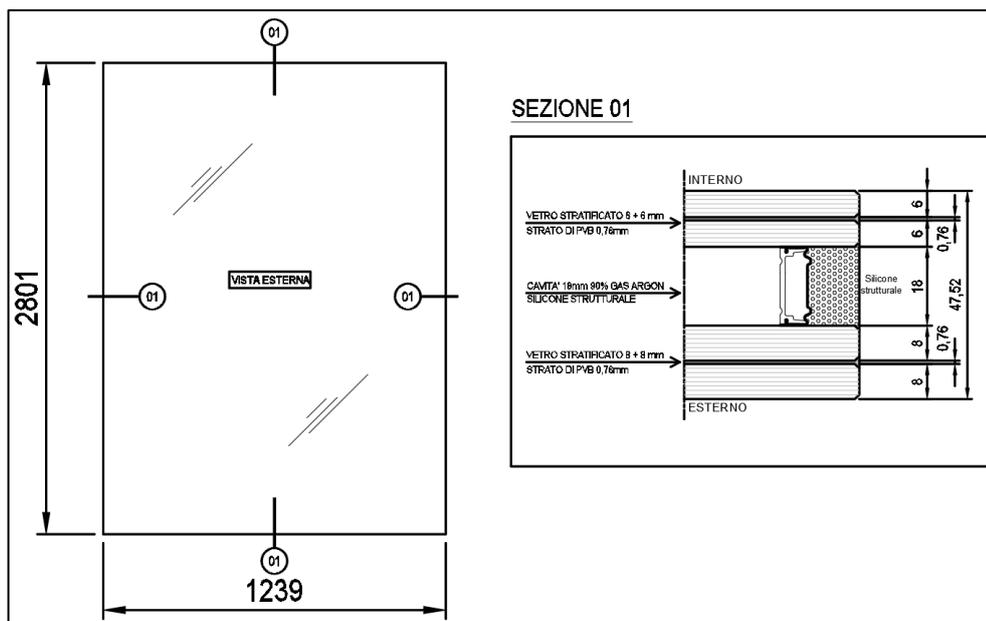


figura 5.52 – Vista esterna e sezione vetro-camera - approccio normative

In accordo all'Eurocodice “*BS EN 16612:2019*”, vengono poi riportate le principali proprietà del vetro ricotto adottato:

- Modulo elastico:  $E = 70000 \text{ MPa}$ ;
- Coefficiente di Poisson:  $\mu = 0,22$ ;
- Peso specifico:  $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ ;
- Tensione caratteristica a flessione:  $f_{g,k} = 45 \text{ MPa}$ ;
- Coefficiente di espansione termica:  $\alpha = 9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ .

Mentre per il PVB, essendo questo un materiale viscoelastico, il modulo elastico ed il modulo di taglio possono variare considerevolmente a seconda della durata di applicazione del carico e della temperatura. Le principali proprietà vengono ricavate dalla scheda tecnica del materiale (“*Saflex R series PVB interlayer*”) ipotizzando una durata di carico pari a 3 secondi a 60°:

- Modulo di taglio:  $G = 0,35 \text{ MPa}$ ;
- Coefficiente di Poisson:  $\mu = 0,5$ ;
- Peso specifico:  $\gamma = 10,5 \text{ kN/m}^3$ ;
- Modulo elastico:  $E = 2 \cdot G \cdot (1 + \mu) = 1,05 \text{ MPa}$ .

Avendo a disposizione tutti i dati necessari è poi possibile procedere al calcolo delle tensioni e delle deformazioni. *In primis*, si procede al calcolo analitico da normativa considerando la sola pressione del vento, dopodiché grazie a *software Mepla* verranno implementati anche i carichi climatici.

Trattandosi di vetro stratificato, la determinazione delle sollecitazioni e delle deformazioni risulta essere complessa. Nel caso di lastre di vetro supportate linearmente su quattro lati e soggette a carichi uniformi è stato sviluppato il metodo semplificato dello spessore equivalente riportato nell'Eurocodice. Tale metodo prevede l'assimilazione della lastra stratificata oggetto di analisi ad una lastra monolitica di spessore equivalente. Essendo rispettate tali ipotesi per i vetri oggetto di studio è lecito procedere al calcolo con il suddetto metodo.

Per il calcolo della freccia, lo spessore equivalente a flessione vale:

$$h_{eff,w} = \sqrt[3]{\sum_i h_i^3 + 12 \cdot \omega \cdot \left( \sum_i h_i \cdot h_{m,i}^2 \right)}$$

Mentre, per il calcolo della tensione nel j-esimo pannello di vetro, lo spessore equivalente vale:

$$h_{eff,\sigma} = \sqrt[3]{\frac{h_{ef,w}^3}{h_i + 2 \cdot \omega \cdot h_{m,i}}}$$

ove:

- $\omega$ : coefficiente compreso tra 0 e 1, rappresenta il trasferimento del taglio tra i vari strati di vetro ad opera dell'interstrato di PVB. Si adotta 1 quando si ha completo trasferimento e 0 in assenza di trasferimento. Come accennato in precedenza, essendo il PVB un materiale viscoelastico, il suo modulo elastico ed il suo modulo di taglio possono variare considerevolmente a seconda della durata di applicazione del carico e della temperatura. A tal fine, nella norma sono riportati differenti valori a seconda della tipologia ed alla durata del carico. Nel caso in esame, essendo il carico principale l'azione del vento, si è deciso di adottare  $\omega = 0,1$ ;
- $h_i$ : spessore dell'i-esimo strato di vetro;

- $h_{m,i}$ : distanza tra asse baricentrico dell'i-esimo strato di vetro ed asse dell'intero pannello di vetro.

Inserendo le dimensioni del vetro in esame nelle precedenti relazioni si ottengono i seguenti spessori efficaci:

CALCOLO SPESSORI EFFICACI - APPROCCIO NORMATIVO											
Elemento	$h_1$ [mm]	$s_{pvB}$ [mm]	$h_2$ [mm]	$h_{m1}$ [mm]	$h_{m2}$ [mm]	$h_{tot}$ [mm]	$h_m$ [mm]		$h_{eff,e,1}$ [mm]	$h_{eff,e,2}$ [mm]	$h_{eff,w}$ [mm]
VETRO ESTERNO	8	0.76	8	4.38	4.38	16.76	8.38	→	12.52	12.52	11.17
VETRO INTERNO	6	0.76	6	3.38	3.38	12.76	6.38	→	9.45	9.45	8.42
INTERLAYER	18 mm di gas argon										

figura 5.53 - Spessori efficaci - approccio normativo

Determinati gli spessori efficaci, è possibile procedere al calcolo del carico agente su ciascun pannello. Difatti, in presenza di vetri-camera con lastre di spessore  $h_1$  e  $h_2$ , la distribuzione dei carichi avviene in relazione alla rigidezza dei vetri. I coefficienti di ripartizione sono così definiti:

$$\delta_1 = \frac{h_{eff,w,1}^3}{h_{eff,w,1}^3 + h_{eff,w,2}^3}$$

$$\delta_2 = \frac{h_{eff,w,2}^3}{h_{eff,w,1}^3 + h_{eff,w,2}^3} = 1 - \delta_1$$

Inserendo gli spessori efficaci ed i valori del carico da vento precedentemente determinati si ottengono i carichi caratteristici agenti sui singoli pannelli. Dopodiché, moltiplicandoli per il coefficiente relativo alle azioni variabili  $\gamma_Q = 1,1$ , si ottengono i carichi allo stato limite ultimo (ULS):

RIPARTIZIONE CARICHI - APPROCCIO NORMATIVO								
$\delta_1$	0.700	→	Depressione	$q_{1,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-1.60	→	$q_{1,ULS}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-1.76
$\delta_1$	0.300	→		$q_{2,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-0.69	→	$q_{2,ULS}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-0.76
$q_{press.}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	1.14	→	Pressione	$q_{1,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.80	→	$q_{1,ULS}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.88
$q_{depress.}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-2.29	→		$q_{2,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.34	→	$q_{2,ULS}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.38

figura 5.54 - Ripartizione dei carichi sui singoli pannelli del vetro camera

Grazie alla determinazione dei carichi agenti su ciascun pannello è possibile procedere alla definizione delle sollecitazioni e delle deformazioni. Trattandosi del caso standard di lastra

rettangolare appoggiata su quattro lati, la normativa fornisce direttamente le relazioni per il calcolo:

$$\sigma = k_1 \cdot \frac{a^2}{h_{eq,\sigma}^2} \cdot q_d$$

$$w = k_4 \cdot \frac{a^4}{h_{eq,\sigma}^3} \cdot \frac{q_d}{E}$$

ove:

- $a = 1239 \text{ mm}$ : dimensione minore del vetro-camera;
- $b = 2801 \text{ mm}$ : dimensione maggiore del vetro-camera;
- $\lambda = \frac{a}{b} = \frac{1239}{2801} = 0,442$ : rapporto tra le dimensioni del vetro-camera;
- $k_1 = \frac{1}{4 \cdot \sqrt{1/z_2^2}} = 0,6425$  : coefficiente;
- $k_4 = \frac{z_1}{16 \cdot \lambda^2} = 0,1246$  : coefficiente;
- $z_1 = 192 \cdot (1 - \mu^2) \cdot \lambda^2 \cdot \left[ 0,00406 + 0,00896 \cdot \left( 1 - e^{\left( -1,123 \cdot \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right)^{1,097} \right)} \right) \right] = 0,3902$  : coefficiente;
- $z_2 = 24 \cdot \left[ 0,0447 + 0,0803 \cdot \left( 1 - e^{\left( -1,17 \cdot \left( \frac{1}{\lambda} - 1 \right)^{1,073} \right)} \right) \right] = 2,5701$  : coefficiente;
- $q_d$ : azione di calcolo, nel caso in esame il carico del vento;
- $E = 70000 \text{ MPa}$ : modulo elastico del vetro.

Inserendo i carichi in tali relazioni è possibile ricavare le tensioni agenti su ogni strato e le deformazioni di ciascun pannello di seguito riportate in forma tabellare:

TENSIONI ULS - APPROCCIO NORMATIVO			
Vento	Elemento	$\sigma_1$ [Mpa]	$\sigma_2$ [Mpa]
Depressione	Vetro Esterno	11.09	11.09
	Vetro Interno	8.34	8.34
Pressione	Vetro Esterno	5.52	5.52
	Vetro Interno	4.15	4.15

DEFORMAZIONE SLS - APPROCCIO NORMATIVO		
Vento	Elemento	w [mm]
Depressione	Vetro Esterno	4.83
	Vetro Interno	4.83
Pressione	Vetro Esterno	2.40
	Vetro Interno	2.40

figura 5.55 - Deformazioni e tensioni negli strati vetrati - Approccio normativo

Infine, i valori di tensione e di deformazione così calcolati devono essere confrontati con i rispettivi valori limite. In primo luogo, si procede alla definizione della resistenza di progetto del vetro definita dalla seguente relazione:

$$f_{g,d} = \frac{k_e \cdot k_{mod} \cdot k_{sp} \cdot f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} = \frac{1 \cdot 0,74 \cdot 1 \cdot 45}{1,8} = 18,5 \text{ MPa}$$

ove:

- $k_e$  = fattore di resistenza del bordo: tale coefficiente permette di ridurre la resistenza del vetro qualora i bordi siano soggetti ad elevate sollecitazioni le quali possono generare eventuali cricche. Tale fattore assume valori compresi tra 0 e 1. Nel caso di vetro nella configurazione di lastra supportata su 4 lati sono previste sollecitazioni ridotte in tali zone e dunque è lecito assumere un valore unitario;
- $k_{mod}$  = fattore di durata del carico: tale coefficiente permette di alterare la resistenza del vetro a seconda della durata del carico stesso: all'aumentare della durata si riduce il fattore per tener conto di resistenze del vetro inferiori. A tal fine, l'Eurocodice fornisce una tabella (figura 5.56) con valori differenti a seconda dell'azione principale, nel caso in esame è lecito adottare  $k_{mod} = 0,74$ ;

Action	Load duration	$k_{mod}$
Wind gusts <sup>a</sup>	5 s (or less)	1,0
Wind storm accumulative	10 min equivalent <sup>b</sup>	0,74
Barrier personnel loads - normal duty	30 s <sup>c</sup>	0,89
Barrier personnel loads - crowds	5 min <sup>c</sup>	0,77
Maintenance loads	30 min	0,69
Snow	3 weeks <sup>d</sup>	0,45
Cavity pressure variations on insulating glass units	8 h <sup>e</sup>	0,58
Dead load, self weight, altitude load on insulating glass units	permanent (50 years)	0,29

figura 5.56 - Fattore  $k_{mod}$  - Table 5 Eurocode BS EN 16612:2019

- $k_{sp}$  = fattore di superficie del vetro: tale coefficiente permette di alterare la resistenza del vetro a seconda del processo di produzione del vetro stesso, in quanto esso influisce sulle sue caratteristiche. Anche in tal caso, l'Eurocodice fornisce una tabella

riportante i principali processi produttivi, nel caso in esame si è optato per vetro *float*<sup>49</sup> a cui corrisponde  $k_{sp} = 1$ ;

Glass material <sup>a</sup> (whichever glass composition)	Factor for the glass surface profile $k_{sp}$	
	As produced <sup>c</sup>	Sandblasted <sup>c</sup>
Float glass	1,0	0,6
Drawn sheet glass	1,0	0,6
Enamelled float or drawn sheet glass <sup>b</sup>	(1,0)	(0,6)
Patterned glass	0,75	0,45
Enamelled patterned glass <sup>b</sup>	(0,75)	(0,45)
Polished wired glass	0,75	0,45
Patterned wired glass	0,6	0,36

figura 5.57 - Fattore  $k_{sp}$  - Table 4 Eurocode BS EN 16612:2019

- $f_{g,k} = 45 \text{ MPa}$ : resistenza caratteristica a flessione del vetro ricotto;
- $\gamma_{M,A}$  = coefficiente parziale del vetro, nel caso in esame avendo adottato vetro ricotto (“annealed glass = A”) è pari a  $\gamma_{M,A} = 1,8$ .

Passando allo stato limite d’esercizio è necessario evitare vetri eccessivamente flessibili, in quanto ciò potrebbe mettere in allarme gli occupanti dell’edificio stesso. A tal fine la norma fissa il seguente limite di deformabilità:

$$w_{max} = \min\left(\frac{l_{min}}{65}; 50 \text{ mm}\right) = \min\left(\frac{1263}{50}; 50 \text{ mm}\right) = 25,26 \text{ mm}$$

Definiti i valori limite, è quindi possibile procedere alle due verifiche distinte: tensionale allo stato limite ultimo (ULS) e di deformazione allo stato limite elastico (SLS).

$$\sigma \leq f_{g,d}$$

$$w \leq w_{max}$$

VERIFICA TENSIONALE STATO LIMITE ULTIMO (ULS) - APPROCCIO NORMATIVO						
Vento	Elemento	$\sigma_1$ [Mpa]	$\sigma_2$ [Mpa]	$\sigma_{max}$ [Mpa]	Verifica	Grado di sfruttamento %
Depressione	Vetro Esterno	11.09	11.09	18.5	Verificato	59.94%
	Vetro Interno	8.34	8.34	18.5	Verificato	45.08%
Pressione	Vetro Esterno	5.52	5.52	18.5	Verificato	29.84%
	Vetro Interno	4.15	4.15	18.5	Verificato	22.44%

figura 5.58 - Verifica tensionale ULS - Approccio normativo

<sup>49</sup> Vetro *float* (o vetro piano): lastra di vetro prodotta facendo galleggiare il vetro fuso su un letto di metallo fuso, in genere stagno. Si tratta di un processo produttivo molto utilizzato in quanto conferisce spessori uniformi.

VERIFICA DEFORMATA STATO LIMITE D'ESERCIZIO (SLS)					
Vento	Elemento	w <sub>wind</sub> [mm]	w <sub>max</sub> [mm]	Verifica	Grado di sfruttamento %
Depressione	Vetro Esterno	4.83	19.06	Verificato	25.34%
	Vetro Interno	4.83	19.06	Verificato	25.34%
Pressione	Vetro Esterno	2.40	19.06	Verificato	12.62%
	Vetro Interno	2.40	19.06	Verificato	12.62%

figura 5.59 - Verifica deformabilità SLS - Approccio normative

A completamento della progettazione del vetro-camera è stata analizzata la medesima configurazione con il *software* agli elementi finiti *Mepla*. In aggiunta a quanto calcolato analiticamente sono stati previsti anche i carichi climatici, i quali, agendo sul gas presente all'interno della cavità del vetro stesso, amplificano e/o riducono sollecitazioni e deformazioni a seconda delle combinazioni.

Riproducendo le prime quattro combinazioni precedentemente esposte si procede alla definizione di sollecitazioni e deformazioni. I risultati ottenuti, osservabili in figura 5.60 e in figura 5.61, sono perlopiù allineati a quanto calcolato analiticamente. Si notano solamente piccole discrepanze attribuibili all'influenza dello strato di PVB sul comportamento complessivo.

VERIFICA TENSIONALE STATO LIMITE ULTIMO (ULS)						
Verifica	Elemento	$\sigma_1$ [Mpa]	$\sigma_2$ [Mpa]	$\sigma_{max}$ [Mpa]	Verifica	Grado di sfruttamento %
ULS 1	Vetro Esterno (1)	9.69	6.35	18.5	Verificato	52.38%
	Vetro Interno (2)	8.16	4.68	18.5	Verificato	44.11%
ULS 2	Vetro Esterno (1)	11.07	7.25	18.5	Verificato	59.84%
	Vetro Interno (2)	5.87	3.37	18.5	Verificato	31.73%
ULS 3	Vetro Esterno (1)	3.61	5.51	18.5	Verificato	29.78%
	Vetro Interno (2)	1.68	2.93	18.5	Verificato	15.84%
ULS 4	Vetro Esterno (1)	2.71	4.14	18.5	Verificato	22.38%
	Vetro Interno (2)	2.98	5.19	18.5	Verificato	28.05%

figura 5.60 - Verifica tensionale ULS – Mepla - Approccio normative

VERIFICA DEFORMATA STATO LIMITE D'ESERCIZIO (SLS)					
Verifica	Elemento	w <sub>wind</sub> [mm]	w <sub>max</sub> [mm]	Verifica	Grado di sfruttamento %
SLS 1	Vetro Esterno (1)	3.95	19.06	Verificato	20.72%
	Vetro Interno (2)	4.24	19.06	Verificato	22.24%
SLS 2	Vetro Esterno (1)	4.52	19.06	Verificato	23.71%
	Vetro Interno (2)	3.05	19.06	Verificato	16.00%
SLS 3	Vetro Esterno (1)	2.25	19.06	Verificato	11.80%
	Vetro Interno (2)	1.52	19.06	Verificato	7.97%
SLS 4	Vetro Esterno (1)	1.69	19.06	Verificato	8.87%
	Vetro Interno (2)	2.70	19.06	Verificato	14.16%

figura 5.61 - Verifica deformabilità SLS – Mepla - Approccio normative

Inoltre, l'utilizzo del *software* permette di valutare l'andamento delle tensioni nei diversi strati costituenti il vetro-camera. In figura 5.63 viene riportato l'andamento delle tensioni nell'elemento maggiormente sollecitato, ossia lo strato di vetro 1 del pannello esterno nella combinazione ULS 2 . Tale immagine permette di osservare come al centro del pannello di vetro è presente la tensione massima, mentre alle estremità tende a ridursi. Ciò riproduce esattamente il comportamento a lastra appoggiata su quattro lati.

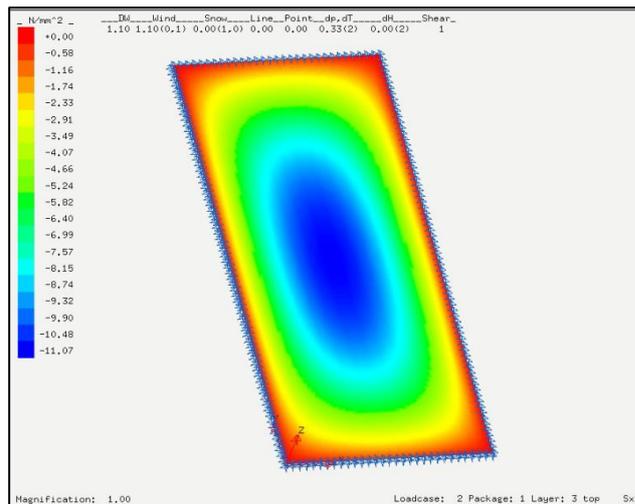


figura 5.62 – Mappatura delle tensioni vetro 1 pannello esterno combinazione ULS 2 – Mepla- Approccio normativo

### 5.2.2.2 APPROCCIO ALTERNATIVO

Conclusa la progettazione del vetro-camera a partire dai carichi provenienti dal calcolo da normativa si procede alla stessa con carichi ridotti derivanti dall'approccio alternativo.

Analogamente a quanto effettuato in precedenza, al fine di eseguire le verifiche necessarie, si procede dapprima al calcolo analitico ed in seguito all'utilizzo di un modello FEM. Tale duplice analisi qui esposta differirà dalla precedente per il solo carico da vento e per la sezione del vetro stesso. La geometria, le rimanenti azioni (pesi propri, carico da neve, carichi imposti e carico da manutenzione), i coefficienti e le combinazioni di carico non vengono alterate e, per tale motivo, non vengono riproposte.

*In primis*, si riporta il carico del vento precedentemente definito:

- pressione del vento:  $q_{vento,p} = 1 \text{ kN/m}^2$ ;
- depressione del vento:  $q_{vento,d} = 0,8 \text{ kN/m}^2$ ;

La riduzione dell'azione del vento derivante dal differente approccio di calcolo si ripercuote sulla sezione del vetro. In particolare, vengono ridotti gli spessori dei singoli strati di vetro mantenendo inalterate le dimensioni degli strati di PVB e della cavità contenente gas argon. Trattandosi di un confronto sull'influenza del carico da vento sul dimensionamento dell'elemento strutturale vetro, come per la struttura in alluminio, si è deciso di aggiornare gli spessori a parità di grado di sfruttamento della verifica più gravosa, in tal caso la verifica tensionale. La sezione aggiornata è così composta:

- Vetro esterno: doppio vetro ricotto da 5 mm con strato di PVB da 0,76 mm;
- Camera interna: cavità da 18 mm con gas argon sigillata con silicone strutturale;
- Vetro interno: doppio vetro ricotto da 4 mm con strato di PVB da 0,76 mm.

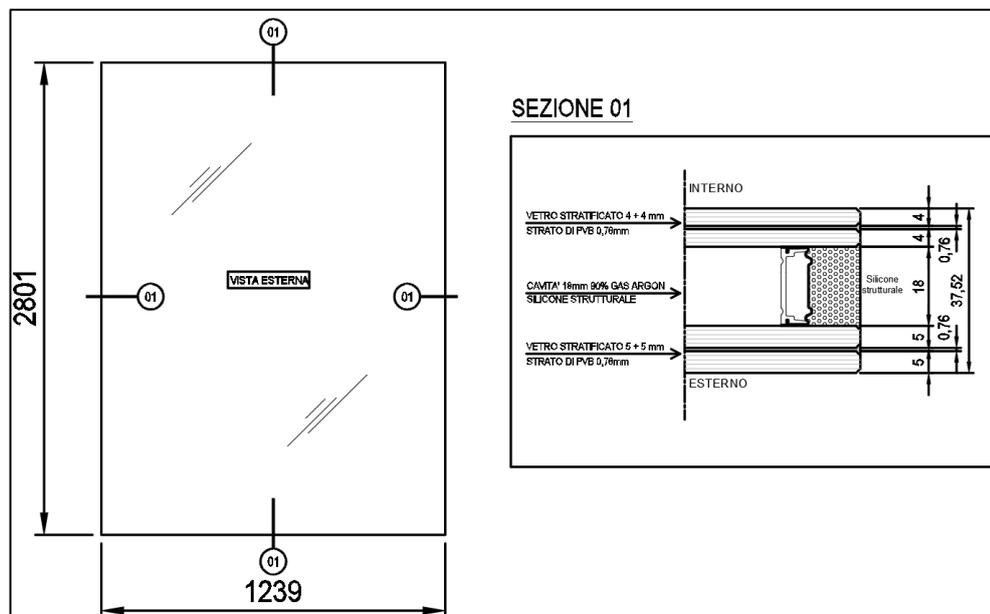


figura 5.63 – Vista esterna e sezione vetro-camera - approccio alternativo

Aggiornate le dimensioni dei singoli strati ed il carico da vento è possibile procedere alla determinazione delle sollecitazioni e delle deformazioni con i due metodi di calcolo. Grazie ad esse è poi possibile procedere alle verifiche di seguito riportate:

CALCOLO SPESSORI EFFICACI - APPROCCIO ALTERNATIVO												
Elemento	$h_1$ [mm]	$s_{PVB}$ [mm]	$h_2$ [mm]	$h_{m1}$ [mm]	$h_{m2}$ [mm]	$h_{tot}$ [mm]	$h_m$ [mm]		$h_{eff,\sigma,1}$ [mm]	$h_{eff,\sigma,2}$ [mm]	$h_{eff,w}$ [mm]	
VETRO ESTERNO	5	0.76	5	2.88	2.88	10.76	5.38		→	7.92	7.92	7.04
VETRO INTERNO	4	0.76	4	2.38	2.38	8.76	4.38		→	6.38	6.38	5.67
INTERLAYER 18 mm di gas argon												
RIPARTIZIONE CARICHI - APPROCCIO ALTERNATIVO												
$\delta_1$	0.657	→	Depressione	$q_{1,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-0.66	→	$q_{1,SLL}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-0.72				
$\delta_2$	0.343	→		$q_{2,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-0.34	→	$q_{2,SLL}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	-0.38				
$q_{press}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.80	→	Pressione	$q_{1,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.53	→	$q_{1,SLL}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.58				
$q_{depress}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.00	→		$q_{2,k}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.27	→	$q_{2,SLL}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0.30				
VERIFICA DEFORMABILITA' STATO LIMITE D'ESERCIZIO (SLS) - APPROCCIO ALTERNATIVO												
Vento	Elemento	$w_{wind}$ [mm]	$w_{max}$ [mm]	Verifica	Grado di sfruttamento %							
Depressione	Vetro Esterno	7.89	19.06	Verificato	41.38%							
	Vetro Interno	7.89	19.06	Verificato	41.38%							
Pressione	Vetro Esterno	6.31	19.06	Verificato	33.11%							
	Vetro Interno	6.31	19.06	Verificato	33.11%							
VERIFICA TENSIONALE STATO LIMITE ULTIMO (ULS) - APPROCCIO ALTERNATIVO												
Vento	Elemento	$\sigma_1$ [Mpa]	$\sigma_2$ [Mpa]	$\sigma_{max}$ [Mpa]	Verifica	Grado di sfruttamento %						
Depressione	Vetro Esterno	11.37	11.37	18.5	Verificato	61.48%						
	Vetro Interno	9.13	9.13	18.5	Verificato	49.35%						
Pressione	Vetro Esterno	9.10	9.10	18.5	Verificato	49.18%						
	Vetro Interno	7.30	7.30	18.5	Verificato	39.48%						

figura 5.64 – Verifica tensionale (ULS) e deformabilità (SLS) – Approccio alternativo

VERIFICA TENSIONALE STATO LIMITE ULTIMO (ULS)						
Verifica	Elemento	$\sigma_1$ [Mpa]	$\sigma_2$ [Mpa]	$\sigma_{max}$ [Mpa]	Verifica	Grado di sfruttamento %
ULS 1	EXTERNAL GLASS (1)	8.95	4.62	18.5	Verificato	48.38%
	INTERNAL GLASS (2)	8.09	3.57	18.5	Verificato	43.73%
ULS 2	EXTERNAL GLASS (1)	10.02	5.18	18.5	Verificato	54.16%
	INTERNAL GLASS (2)	6.52	2.88	18.5	Verificato	35.24%
ULS 3	EXTERNAL GLASS (1)	4.03	7.80	18.5	Verificato	42.16%
	INTERNAL GLASS (2)	2.45	5.54	18.5	Verificato	29.95%
ULS 4	EXTERNAL GLASS (1)	3.48	6.73	18.5	Verificato	36.38%
	INTERNAL GLASS (2)	3.13	7.09	18.5	Verificato	38.32%
VERIFICA DEFORMATA STATO LIMITE D'ESERCIZIO (SLS)						
Verifica	Elemento	$w_{wind}$ [mm]	$w_{max}$ [mm]	Verifica	Grado di sfruttamento %	
SLS 1	EXTERNAL GLASS (1)	5.40	19.06	Verificato	28.33%	
	INTERNAL GLASS (2)	5.83	19.06	Verificato	30.59%	
SLS 2	EXTERNAL GLASS (1)	6.05	19.06	Verificato	31.74%	
	INTERNAL GLASS (2)	4.70	19.06	Verificato	24.66%	
SLS 3	EXTERNAL GLASS (1)	4.71	19.06	Verificato	24.71%	
	INTERNAL GLASS (2)	3.99	19.06	Verificato	20.93%	
SLS 4	EXTERNAL GLASS (1)	5.11	19.06	Verificato	26.81%	
	INTERNAL GLASS (2)	4.06	19.06	Verificato	21.30%	

figura 5.65 - Verifica tensionale (ULS) e deformabilità (SLS) – Mepla - Approccio alternativo

Dalle tabelle sopra riportate si può osservare come la tensione nel pannello esterno, e dunque il grado di sfruttamento, è simile al valore relativo alla precedente trattazione. Come già anticipato, tale uguaglianza è stata ricercata al fine di valutare la reale variazione dimensionale del vetro strutturale al variare del carico da vento, in quanto tale verifica, è la più gravosa per il vetro stesso.

Anche in questo caso, in figura 5.66 viene riportato l'andamento delle tensioni nell'elemento maggiormente sollecitato, ossia lo strato di vetro 1 del pannello esterno nella combinazione ULS 2.

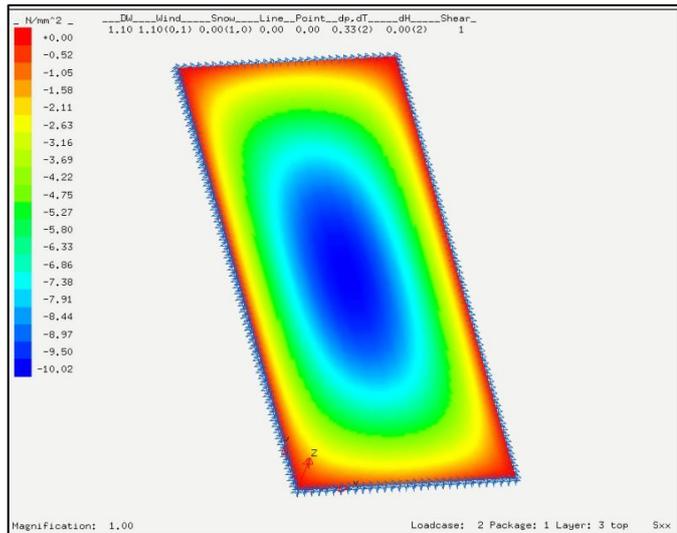


figura 5.66– Mappatura delle tensioni vetro 1 pannello esterno combinazione ULS 2 – Mepla - Approccio alternativo

### 5.2.2.3 INFLUENZA DELLA VARIAZIONE DEL CARICO DA VENTO SUL DIMENSIONAMENTO DEI VETRI-CAMERA

Conclusa la progettazione del vetro nei due differenti approcci è possibile procedere alla valutazione dell’influenza della variazione del carico da vento su di esso.

Nella tabella e nelle figure di seguito riportate è possibile osservare la variazione degli spessori dei differenti componenti del vetro-camera.

CONFRONTO CARATTERISTICHE VETRI									
Elemento	APPROCCIO NORMATIVO			APPROCCIO ALTERNATIVO			RIDUZIONE		
	$h_1$ [mm]	$s_{PVB}$ [mm]	$h_2$ [mm]	$h_1$ [mm]	$s_{PVB}$ [mm]	$h_2$ [mm]	$\Delta h_1$ [%]	$\Delta s_{PVB}$ [%]	$\Delta h_2$ [%]
VETRO ESTERNO	8	0.76	8	5	0.76	5	37.50%	0.00%	37.50%
VETRO INTERNO	6	0.76	6	4	0.76	4	33.33%	0.00%	33.33%
INTERLAYER	18 mm di gas argon			18 mm di gas argon			0.00%		

figura 5.67 - Confronto caratteristiche di vetro

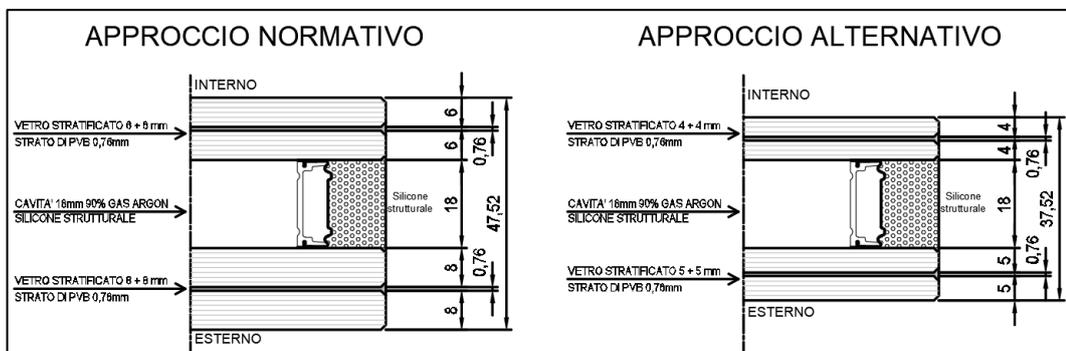


figura 5.68 - Variazione di sezione del vetro

Anche in questo caso, ipotizzando in via semplificata che l'intero edificio sia composto dalla sola tipologia di cellula analizzata, è possibile stimare l'eventuale riduzione del costo di approvvigionamento del vetro strutturale. Ciò avviene nel caso di utilizzo del carico da vento rilevato in galleria o per mezzo di modellazione CFD, a discapito del carico da normativa.

*In primis*, conoscendo le dimensioni dei vetri della *unit 1*, ed i prezzi delle due possibili soluzioni<sup>50</sup>, è possibile calcolarsi i costi relativi alla singola cellula:

$$\begin{aligned}
 A_{\text{vetro vision}} &= l \cdot h = 1239 \cdot 2801 = 3,47 \cdot 10^6 \text{ mm}^2 \cong 3,47 \text{ m}^2 \\
 A_{\text{vetro shadow box}} &= l \cdot h = 1239 \cdot 659 = 0,82 \cdot 10^6 \text{ mm}^2 \cong 0,82 \text{ m}^2 \\
 A_{\text{vetro,tot}} &= A_{\text{vetro vision}} + A_{\text{vetro shadow box}} = 4,29 \cdot 10^6 \text{ mm}^2 \cong 4,29 \text{ m}^2 \\
 \epsilon_{\text{vetro 88-66}} &= 105 \text{ €/m}^2 \\
 \epsilon_{\text{vetro 55-44}} &= 75 \text{ €/m}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{\text{norma, 1 cellula}} &= A_{\text{vetro,tot}} \cdot \epsilon_{\text{vetro 88-66}} = 450,1 \text{ €} \\
 \epsilon_{\text{altern., 1 cellula}} &= A_{\text{vetro,tot}} \cdot \epsilon_{\text{vetro 55-44}} = 321,5 \text{ €} \\
 \Delta\epsilon_{\text{1 cellula}} &= \epsilon_{\text{norma, 1 cellula}} - \epsilon_{\text{altern., 1 cellula}} = 128,6 \text{ €}
 \end{aligned}$$

Dopodiché, conoscendo il numero teorico di cellule necessarie alla realizzazione dell'intero edificio (circa 2680 cellule) è possibile ottenere la differenza di costo di approvvigionamento del vetro:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{\text{norma}} &= \epsilon_{\text{norma, 1 cellula}} \cdot n^{\circ} \text{ cellule} \cong 1\,207\,000 \text{ €} \\
 \epsilon_{\text{altern.}} &= \epsilon_{\text{norma, 1 cellula}} \cdot n^{\circ} \text{ cellule} \cong 862\,000 \text{ €} \\
 \Delta\epsilon &= \epsilon_{\text{norma}} - \epsilon_{\text{altern.}} = 345\,000 \text{ €} \\
 \Delta\epsilon_{\%} &= \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_{\text{norma}}} \cong 28,6 \text{ \%}
 \end{aligned}$$

Anche in questo caso è importante ricordare che l'ottimizzazione effettuata non inficia la sicurezza strutturale in quanto le verifiche vengono soddisfatte con ampio margine di

---

<sup>50</sup> Costi dei vetri 88-66 e 55-44 riferiti a febbraio 2022. Fonte: analisi di mercato effettuata dal *procurement department* Focchi Spa

sicurezza. Comunque, in caso di raggiungimento dei valori limite, si verificherebbe la rottura del singolo strato di vetro.

Peraltro, nonostante si tratti di un materiale molto fragile, questo è provvisto di una particolare stratificazione che, anche nella malaugurata ipotesi di rottura, non arrecherebbe danni a persone e/o cose. In tal caso, si avrebbe dunque il tempo necessario per sostituire l'elemento danneggiato ad opera dell'azienda realizzatrice.



## CONCLUSIONI

---

Nel presente elaborato è stato analizzato l'effetto dell'azione del vento sulle facciate continue dell'edificio *Stonecutter Court Building* attraverso un triplice approccio: calcolo da normativa, analisi in galleria del vento e modellazione CFD.

In prima battuta sono state ricavate le pressioni del vento agenti sulle facciate in accordo all'Eurocodice "BS EN 1991-1-4". Tale approccio permette di analizzare le sole 4 direzioni del vento incidente ortogonalmente ai singoli prospetti. Per ogni singola direzione vengono restituiti i valori di pressione sulla facciata frontale direttamente investita dal vento ed i valori di depressione agenti sulle due facciate laterali e su quella posteriore.

Successivamente si è proceduto all'analisi sperimentale in galleria del vento. *In primis* è stato realizzato un modello in scala 1:300 dell'edificio e del reale contesto urbano nel quale è inserito. In seguito, si è passati alla calibrazione dei dati di input del flusso eolico grazie alla realizzazione di un modello climatico basato sui dati rilevati nelle stazioni meteorologiche degli aeroporti di *Gatwick*, *Heathrow* e *Stansted* posti nelle vicinanze.

Si è dunque proceduto alle analisi sperimentali variando la direzione del vento incidente grazie all'utilizzo di una piastra rotante, in particolare si è optato per l'esecuzione di 36 analisi con variazioni angolari pari a 10°. Grazie al sistema di misura predisposto all'interno del modellino dell'edificio *Stonecutter Court Building* sono state ottenute le pressioni e le depressioni agenti sulle diverse facciate.

A completamento dello studio si è poi passati all'analisi computazionale CFD. Grazie al software *VENTO AEC* è stato analizzato il modello virtuale dell'edificio nella medesima configurazione di contesto urbano e dati di input precedentemente adottati in galleria del vento. In tal caso, a causa della notevole durata di ciascuna prova, si è optato per l'esecuzione di 8 analisi con variazioni angolari pari a 45°. Per ognuna di esse il software prevede la restituzione di pressioni e depressioni agenti sull'intero edificio.

Completate le tre analisi è stato possibile effettuare un confronto sui tre differenti approcci di calcolo dal quale è emerso l'allineamento dei valori di pressione di picco del metodo sperimentale in galleria e del metodo computazionale CFD (figura 5.8). In relazione, invece, ai valori mediati sulle aree, si osserva una perfetta riproduzione in relazione alle depressioni,

mentre per le pressioni si osservano piccole discrepanze nei piani inferiori dell'edificio, attribuibili al differente numero di prove eseguite.

Tale analogia è di fondamentale importanza in quanto permette di appurare la validità del metodo computazionale CFD ed al tempo stesso permette, eventualmente, di sostituirlo all'analisi sperimentale in galleria del vento per l'effettiva progettazione.

In secondo luogo si è proceduto al confronto con il calcolo analitico da normativa, dal quale è emerso come entrambe le analisi approfondite restituiscano valori di carico abbondantemente inferiori, con riduzioni anche pari al 50%. Tale risultato era atteso ed è legato principalmente a due aspetti: *in primis* la normativa fornisce dei risultati a favore di sicurezza validi per un'ampia classe di edifici, mentre nell'analisi sperimentale e/o computazionale viene studiato l'edificio reale. In secondo luogo, tutti i fenomeni di interferenza, con riferimento all'edificio posizionato all'interno di un contesto urbano, vengono rilevati dai metodi innovativi ma non vengono contemplati dall'approccio normativo, che sconta il limite di considerare il singolo edificio soggetto all'azione del vento.

Infine, ottenuti i valori dell'azione del vento dai tre differenti approcci è stato possibile effettuare la progettazione di una cellula tipica costituente la facciata continua dell'edificio. In particolare, si è proceduto all'analisi della struttura portante in alluminio e delle due superfici vetrate.

A parità di grado di sfruttamento delle verifiche più gravose, sono state definite le variazioni dimensionali dovute al differente valore di carico (figure 5.42, 5.43, 4.55, 5.45, 5.46, 5.47, 5.67 e 5.68). Dopodiché, introducendo i costi di approvvigionamento dei materiali è stato possibile stimare il risparmio derivante dall'utilizzo di un metodo di calcolo approfondito a discapito del calcolo da normativa. In particolare, è stata rilevata una riduzione di costo pari a 450 000 euro circa (44,1 % dell'approccio normativo) per l'alluminio, nonché di 345 000 euro (28,6 % dell'approccio normativo) per il vetro. Ad essi si aggiungeranno altresì, seppur in maniera ridotta, risparmi sul silicone strutturale, piastre e canali di ancoraggi ed al tempo stesso variazioni di costo legati al trasporto.

Nonostante i diversi vantaggi analizzati nel corso del quinto capitolo, i metodi innovativi prevedono anche alcuni effetti negativi. I più rilevanti sono sicuramente i lunghi tempi di analisi ed il costo, i quali sono sicuramente superiori rispetto al calcolo da normativa. Per quanto riguarda il costo, almeno nel caso in esame, si è rilevato essere un ottimo investimento in quanto è stato nettamente colmato dal solo risparmio nel materiale di alluminio e vetro.

In definitiva, i due metodi di analisi innovativi adottati sono stati ritenuti affidabili a tal punto da essere stati impiegati per l'effettiva progettazione delle facciate dell'edificio in esame. Tale elaborato costituisce, inoltre, un ottimo confronto, applicato su un edificio reale, necessario alla validazione ed allo sviluppo futuro dell'analisi in galleria del vento e della modellazione CFD.



## **ALLEGATI**

---

- A Risultati analisi CFD
- B Confronto involucri di pressione



## BIBLIOGRAFIA

---

- {1} BS EN 1990:2002 – “*Basis of structural design*”
- {2} BS EN 1991-1-1:2002 – “*Action on structures – Part 1-1: General actions*”
- {3} BS EN 1991-1-4:2005 “*Eurocode 1: Actions on structures – part 1-4: General actions – wind actions*”
- {4} “*National annex for building structures to BS EN 1991-1-4:2005*”
- {5} PD 6688-1-4:2015 – “*Background information to the National Annex to BS EN 1991-1-4:2005 and additional guidance*”
- {6} BS 6399-2:1997 – “*Loading for building – part 2: Code of practice for wind loads*”
- {7} CWCT – “*Standard for systemized building envelopes – part 3 – Air, water and wind*”
- {8} CWCT – “*Standard for systemised building envelopes – part 2 – Loads, fixing and movement, resistance*”
- {9} CWCT – “*Guidance on the action on non-loadbearing building envelopes*”
- {10} CNR-DT 207 R1/2018 – “*Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni*”
- {11} BS EN 1999-1-1:2007 – “*Eurocode 9: Design of aluminium structures*”
- {12} BS EN 16612:2019 – “*Glass in building – Determination of the lateral load resistance of glass panes by calculation*”
- {13} BS EN 1991-1-5:2003 – “*Eurocode 1 part 5: actions on structures – thermalactions*”
- {14} “*National annex for actions on structures – thermalactions to BS EN 1991-1-5:2003*”
- {15} Focchi SPA – “*Calculation of wind loads of Stonecutter Court Building*” (2021)
- {16} G. Cavanna (ITC, CNR) – “*Valutazione del comportamento sismico di elementi non strutturali: le facciate continue*” (2016)
- {17} N. Caterino, G. Maddaloni, A. Bonati, G. Cavanna, A. Occhiuzzi, “*Seismic assessment and finit element modelling of glazed curtain walls*” (2017)
- {18} M. Bozza – “*Sperimentazione di strutture in galleria del vento*”

- {19} K.G. Ranga Raju e Vijaya Sing, “*Journal of Wind engineering and industrial aerodynamics*” – volume 1 (1975)
- {20} RWDI – “*Cladding wind load study report of Stonecutter Court Building*” (2021)
- {21} Agerneh K. Dagneu, Girma T. Bitsuamalk, Ryan Merrick, “*Computational evaluation of wind pressures on tall buildings*” (2009)
- {22} R. Mittal and G. Iaccarino. “*Immersed boundary methods. Annual Review of Fluid Mechanics*” (2005)
- {23} Y. Abu-Zidan, P. Mendis, T. Gunawardena, “*Optimising the computational domain size in CFD simulations of tall buildings*” (2021)
- {24} M. Mulas and R. Zucca, “*An immersed boundary CFD code for building & environment applications*” (2018)
- {25} M. Mulas, S. Chibbaro, G. Delussu, I. Di Piazza and M. Talice, “*Efficient parallel computations of flows of arbitrary fluids for all regimes of Reynolds, Mach and Grashof numbers*”
- {26} F. Sgallari (CIRAM UNIBO) – “*Metodi numerici per l’ingegneria civile M’*”
- {27} Focchi SPA – “*Type 1 and type 2 façade calculation report*” (2021)
- {28} Focchi SPA – “*Type 3 façade calculation report*” (2021)

## SITOGRAFIA

---

- [1] [https://it.wikipedia.org/wiki/Risonanza\\_\(fisica\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Risonanza_(fisica))
- [2] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095514000558#:~:text=Abstract,complex%20and%20least%20understood%20microclimates.>
- [3] [http://www.adoperaprogetti.it/index.php?option=com\\_k2&view=itemlist&layout=category&task=category&id=12&Itemid=337](http://www.adoperaprogetti.it/index.php?option=com_k2&view=itemlist&layout=category&task=category&id=12&Itemid=337)
- [4] [https://www.unica.it/static/resources/cms/documents/MAU\\_SLU1.pdf](https://www.unica.it/static/resources/cms/documents/MAU_SLU1.pdf)
- [5] [https://it.hrvwiki.net/wiki/Urban\\_canyon](https://it.hrvwiki.net/wiki/Urban_canyon)
- [6] <https://www.ivanhoecambridge.com/en/news/2021/08/redevelopment-of-stonecutter-court-in-london/>
- [7] <https://www.co-re.co.uk/news/travers-smith-signs-158-000-sq-ft-pre-let-at-stonecutter-court>
- [8] <https://www.focchi.it/it/>
- [9] <https://tpbennett.com/projects/stonecutter-court/>
- [10] <https://www.ingenio-web.it/20985-elementi-costruttivi-non-strutturali-negli-edifici-in-ca-in-zona-sismica-cosa-cambia-con-le-ntc-2018>
- [11] [https://it.wikipedia.org/wiki/Galleria\\_del\\_vento](https://it.wikipedia.org/wiki/Galleria_del_vento)
- [12] <https://www.unifimagazine.it/porte-aperte-alla-galleria-del-vento-prato/>
- [13] <https://www.cspfea.net/prodotti/vento-aec/>
- [14] <http://www.vento-cfd.com/>
- [15] [https://it.wikipedia.org/wiki/Modellazione\\_della\\_turbolenza](https://it.wikipedia.org/wiki/Modellazione_della_turbolenza)
- [16] [https://moodle2.units.it/pluginfile.php/381483/mod\\_resource/content/1/Turbolenza.pdf](https://moodle2.units.it/pluginfile.php/381483/mod_resource/content/1/Turbolenza.pdf)
- [17] [https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-920j-numerical-methods-for-partial-differential-equations-sma-5212-spring-2003/lecture-notes/lec6\\_notes.pdf](https://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-920j-numerical-methods-for-partial-differential-equations-sma-5212-spring-2003/lecture-notes/lec6_notes.pdf)
- [18] <https://www.teknoring.com/guide/guide-ingegneria/fluidodinamica-computazionale-cfd-applicazioni-comuni-e-software/>
- [19] <https://www.edilbetonperugia.it/gfrc/>

- [20] <http://www.ambrogiocolombo.it/prodotto/alluminio-en-aw-6063/#:~:text=L'Alluminio%20EN%20AW%206063,di%20profili%20di%200grande%20complessit%C3%A0.>
- [21] <http://esercitazionidepetrinis.altervista.org/wp-content/uploads/2015/05/Parametri-Urbanistici-ed-Edilizi.pdf>
- [22] <https://www.cogesinfissi.it/ristrutturazione-casa/gas-argon-nei-vetri-a-cosa-serve/>

## INDICE DELLE FIGURE

figura 1.1- Moto laminare (sx) - Moto Turbolento (dx) – Università di Parma.....	9
figura 1.2 - Profilo della velocità del vento al variare della rugosità del terreno – CNR DT207.....	10
figura 1.3 - Profilo logaritmico della velocità in campo aperto ed in presenza di un bosco .....	10
figura 1.4 - Macro e micrometeorologia .....	11
figura 1.5 - Struttura dello Strato Limite Urbano.....	12
figura 1.6 - Figura2.19 CNR DT 207 - Strato limite laminare (sx) e turbolento (dx).....	13
figura 1.7 - figura 2.20 CNR DT 207 - Flusso cilindro di infinita lunghezza .....	14
figura 1.8 - figura 2.21 CNR DT 207 - Separazione del flusso da corpi a spigoli vivi .....	15
figura 1.9 - Cilindro investito da un flusso di corrente stazionaria .....	16
figura 1.10 - Variazioni del flusso d'aria in vicinanza di un edificio singolo.....	17
figura 1.11 - Variazioni di velocità in vicinanza di un edificio singolo.....	17
figura 1.12 - figura 2.35 CNR DT 207 - Interferenza dinamica edifici contigui .....	19
figura 1.13 – Rappresentazione qualitative dell'effetto ombra in pianta ed in prospetto .....	20
figura 1.14 - skimming flow $Hd < 1.5$ .....	22
figura 1.15 - wake interference flow $1.5 < Hd < 2.5$ .....	22
figura 1.16 – isolated roughness flow $Hd > 2.5$ .....	22
figura 1.17 - Andamento qualitativo dell'effetto barriera.....	23
figura 1.18 - Andamento qualitativo dell'effetto scia.....	23
figura 1.19 – Andamento qualitative dell'effetto canale.....	24
figura 1.20 – Andamento qualitativo dell'effetto venturi generato da canyon urbano.....	24
figura 2.1 - Geolocalizzazione Stonecutter Court Building .....	27
figura 2.2 - Vista in pianta - Google maps .....	27
figura 2.3 - Stato di fatto - 1° vista.....	28
figura 2.4 - Stato di fatto - 2° vista.....	28
figura 2.5 - Stato di fatto - 3° vista.....	29
figura 2.6 - Stato di fatto - 4° vista.....	29
figura 2.7 - Stato di fatto - 5° vista.....	30
figura 2.8 - Render stato di progetto - 1° vista.....	31
figura 2.9 - Render stato di progetto - 2° vista.....	31
figura 2.10 - Render stato di progetto - 3° vista.....	32
figura 2.11 - Render stato di progetto - 4° vista.....	32
figura 2.12 - Render stato di progetto - 5° vista.....	33
figura 2.13 - Tipologie facciate - Prospetto Ovest .....	35
figura 2.14 – Tipologie facciate – prospetto Sud .....	36
figura 2.15 - Tipologie facciate - Prospetto Est .....	36
figura 2.16 - Tipologie facciate - Prospetto Nord .....	37
figura 2.17 - Valore della velocità base del vento - Figure NA.1 (UK NA) .....	39

figura 2.18 – categorie di terreno – Table 4.1 UNI EN 1991-1-4:2005 .....	41
figura 2.19 - Velocità media del vento al variare di quota .....	42
figura 2.20 - Coefficiente di esposizione $C_e$ - Figure NA.7 National Annex to BS EN 1991-1-4 .....	43
figura 2.21 – Coefficiente correttivo di esposizione $C_{e,T}$ - Figure NA.8 National Annex to BS EN 1991-1-4 .....	44
figura 2.22 - Andamento del coefficiente di esposizione al variare di quota .....	45
figura 2.23 – Andamento del coefficiente di esposizione – Figure 4.2 UNI EN 1991-1-4:2005 .....	46
figura 2.24 – Andamento del Coefficiente $C_{pe}$ – Figure 7.2 UNI EN 1991-1-4:2005 .....	47
figura 2.25 - Relazione tra comportamento di un edificio soggetto all'azione del vento e divisione in zone ..	48
figura 2.26 – Coefficienti di pressione $C_{pe}$ – Table 7.1 BS EN 1991-1-4:2005 .....	48
figura 2.27 – Coefficienti di pressione $C_{pe}$ – Table NA.4 “National annex to BS EN 1991-1-4:2005” .....	48
figura 2.28 – Zone di pressione edificio schematizzato di forma rettangolare – direzione del vento $0^\circ$ .....	49
figura 2.29 – Zone di pressione edificio schematizzato di forma rettangolare – direzione del vento $90^\circ$ .....	49
figura 2.30 – Zone di pressione edificio schematizzato di forma rettangolare – direzione del vento $180^\circ$ .....	49
figura 2.31 – Zone di pressione edificio schematizzato di forma rettangolare – direzione del vento $270^\circ$ .....	50
figura 2.32 - Andamento della pressione del vento nelle 5 zone dell'edificio - Eurocodice .....	51
figura 2.33 – Combinazione pressioni interne e pressioni esterne – Figure 5.1 BS EN 1991-1-4:2005 .....	52
figura 2.34 – definizione delle zone per edifice con terrazzamenti – Figure 15 BS 6399-2:1997 .....	53
figura 2.35 – Prospetto Ovest – dimensioni della zona E .....	53
figura 2.36 - Prospetto Est - direzione del vento Est-Ovest.....	54
figura 2.37 - Prospetto Est - direzione del vento Sud Nord .....	54
figura 2.38 – Prospetto Est – dimensioni della zona E .....	54
figura 2.39 - Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Nord.....	55
figura 2.40 - Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Ovest.....	56
figura 2.41 - Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Sud.....	56
figura 2.42 - Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Est.....	57
figura 2.43 - Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Nord.....	57
figura 2.44 - Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Ovest.....	58
figura 2.45 - Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Sud.....	58
figura 2.46 - Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Est.....	59
figura 2.47 – Blocchetti e staffe di collegamento cellule "units" – struttura.....	60
figura 2.48 – Giunto maschio – femmina e vista laterale del blocchetto .....	60
figura 2.49 - Deformazione del sistema a cellule units sottoposto a sisma.....	61
figura 3.1 - Galleria a strato limite di Prato – Analisi cattedrale di Notre-Dame.....	65
figura 3.2 - Andamento del flusso eolico in ambiente teoricamente infinito (caso reale).....	66
figura 3.3 - Andamento del flusso eolico in ambiente circoscritto (galleria del vento) .....	66
figura 3.4 - Prese di pressione e trasduttori cattedrale di Notre-Dame – Analisi in galleria del vento di Prato [12] .....	67
figura 3.5 - Direzioni del vento analizzate.....	69

figura 3.6 – Modello analisi in galleria del vento in scala 1:300 – vista Nord.....	70
figura 3.7 – Modello analisi in galleria del vento in scala 1:300 – vista Est.....	70
figura 3.8 – Modello analisi in galleria del vento in scala 1:300 – vista Sud.....	71
figura 3.9 – Modello analisi in galleria del vento in scala 1:300 – vista Ovest.....	71
figura 3.10 - Mappa delle stazioni metereologiche utilizzate per la realizzazione del modello climatico .....	72
figura 3.11 – Valocità del vento comuni (sx) e di Progetto (dx) al variare della direzione .....	72
figura 3.12 – Velocità del vento al variare del tempo di ritorno .....	73
figura 3.13 - Modello di Stonecutter Court Building in scala 1:300 – Vista Sud Est .....	74
figura 3.14 - Modello di Stonecutter Court Building in scala 1:300 – Vista Nord Est .....	74
figura 3.15 - Modello di Stonecutter Court Building in scala 1:300 – Prospetto Ovest.....	75
figura 3.16 – Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Nord .....	77
figura 3.17 – Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto ovest .....	77
figura 3.18 – Pressioni negative di picco – Prospetto Sud.....	78
figura 3.19 – Pressioni negative di picco – Prospetto Est.....	78
figura 3.20 – Pressioni positive di picco – Prospetto Nord.....	79
figura 3.21 – Pressioni positive di picco – Prospetto Ovest.....	79
figura 3.22 – Pressioni positive di picco – Prospetto Sud.....	80
figura 3.23 – Pressioni positive di picco – Prospetto Est.....	80
figura 3.24 – Confronto tra pressioni esterne di picco galleria del vento e pressioni da normativa.....	81
figura 4.1 - Software VENTO AEC.....	85
figura 4.2 - Software Revit .....	86
figura 4.3 – Vista 3D Nord Ovest Stonecutter Court Building – Revit.....	87
figura 4.4 – Vista 3D Sud Est Stonecutter Court Building – Revit.....	87
figura 4.5 - Vista 3D Nord complesso urbano di Farringdon – Autocad 3D .....	88
figura 4.6 – Vista 3D Est complesso urbano di Farringdon – Autocad 3D.....	88
figura 4.7 – Vista 3D Sud complesso urbano di Farringdon – Autocad 3D.....	89
figura 4.8 – Vista 3D Ovest complesso urbano di Farringdon – Autocad 3D.....	89
figura 4.9 - Vista 3D Nord modello CFD – VENTO AEC .....	90
figura 4.10 - Vista 3D Est modello CFD – VENTO AEC .....	90
figura 4.11 - Vista 3D Sud modello CFD – VENTO AEC .....	90
figura 4.12 - Vista 3D Ovest modello CFD – VENTO AEC .....	91
figura 4.13 - Vista 3D Nord - Ovest modello CFD – VENTO AEC .....	91
figura 4.14 - Vista 3D Sud - Est modello CFD – VENTO AEC.....	91
figura 4.15 - Rappresentazione dominio di calcolo .....	92
figura 4.16 – Dimensioni dominio di calcolo .....	93
figura 4.17 - Direzioni del vento analizzate.....	94
figura 4.18 - Condizioni al contorno del vento .....	95
figura 4.19 - Condizioni al contorno dell'aria .....	95

figura 4.20- Confronto tra immersed boundary IB (sx) e body conformal (dx).....	96
figura 4.21 – mesh xy a quota z = 0 m.....	99
figura 4.22 – mesh xy a quota z = 40 m.....	99
figura 4.23 – mesh xy a quota z = 80 m.....	99
figura 4.24 – mesh zy (direzione del flusso eolico) a x = 0 .....	100
figura 4.25 – mesh xyz a quota z = 0 m.....	100
figura 4.26 – mesh xyz a quota z = 40 m.....	100
figura 4.27 – mesh xyz a quota z = 80 m.....	101
figura 4.28 - Dettaglio mesh xyz a quota z = 0m.....	101
figura 4.29 - Dettaglio mesh xyz a quota z = 0m.....	101
figura 4.30 - Scomposizione matrice A - slides metodi numerici per l'ingegneria civile - Fiorella Sgallari .	102
figura 4.31 – Pattern a scacchiera .....	103
figura 4.32 - Esempio di convergenza matematica e ingegneristica .....	105
figura 4.33 - Andamento delle pressioni vista 3D Nord Ovest - caso 1 vento 0° (Nord).....	106
figura 4.34 - Andamento delle pressioni vista 3D Nord Ovest - caso 1 vento 0° (Nord).....	107
figura 4.35 - Andamento delle pressioni prospetto Nord - caso 1 vento 0° (Nord) .....	107
figura 4.36 - Andamento delle pressioni prospetto Ovest - caso 1 vento 0° (Nord) .....	108
figura 4.37 - Andamento delle pressioni prospetto Est - caso 1 vento 0° (Nord) .....	108
figura 4.38 - Andamento delle pressioni prospetto Est - caso 1 vento 0° (Nord) .....	109
figura 4.39 - Andamento delle depressioni prospetto Nord - caso 1 vento 0° (Nord).....	109
figura 4.40 - Andamento delle depressioni prospetto Ovest - caso 1 vento 0° (Nord).....	110
figura 4.41 - Andamento delle depressioni prospetto Sud - caso 1 vento 0° (Nord).....	110
figura 4.42 - Andamento delle depressioni prospetto Est - caso 1 vento 0° (Nord).....	111
figura 4.43 – Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Nord .....	112
figura 4.44 – Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Ovest .....	112
figura 4.45 – Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Sud .....	113
figura 4.46 – Pressioni negative di picco (kPa) – Prospetto Est .....	113
figura 4.47 – Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Nord .....	114
figura 4.48 – Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Ovest .....	114
figura 4.49 – Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Sud .....	115
figura 4.50 – Pressioni positive di picco (kPa) – Prospetto Est .....	115
figura 5.1 – Velocità del flusso eolico sul piano xy (z=0m) e sul piano yz (x=0m) – caso 1 vento 0°.....	120
figura 5.2 – Dettaglio velocità del flusso eolico sul piano xy (z=0m) e sul piano yz (x=0m) – caso 1 vento 0° .....	120
figura 5.3 – Dettaglio velocità del flusso eolico sul piano xy (z=30m) – caso 1 vento 0° .....	121
figura 5.4 – Dettaglio velocità del flusso eolico sul piano sul piano yz (x=0m) – caso 1 vento 0° .....	121
figura 5.5 - Andamento del flusso eolico nei pressi di Stonecutter Court Building – caso 1 vento 0° .....	122
figura 5.6 – Dettaglio andamento del flusso eolico nei pressi di Stonecutter Court Building – caso 1 vento 0° .....	123

figura 5.7– Dettaglio andamento del flusso eolico nei pressi di Stonecutter Court Building – caso 1 vento 0° .....	123
figura 5.8 - Confronto pressioni triplice approccio .....	126
figura 5.9 - cellula unit tipo 1 - vista 3D.....	128
figura 5.10 - Scheletro strutturale – vista frontale (sx) e vista 3D (dx).....	129
figura 5.11 – Dettaglio azione del vento agente sull'elemento di GFRC orizzontale.....	131
figura 5.12 - Condizioni di carico - approccio normative .....	132
figura 5.13 - Combinazioni di carico - stato limite d'esercizio SLS.....	133
figura 5.14 - Combinazioni di carico - stato limite ultimo ULS .....	134
figura 5.15 - Sezione montante - approccio normative .....	134
figura 5.16 - Sezione traverso maschio - approccio normative.....	135
figura 5.17 - Sezione traverso femmina - approccio normativo.....	135
figura 5.18 - Sezione traverso intermedio inferiore - approccio normativo .....	135
figura 5.19 - Sezione traverso intermedio superiore - approccio normative .....	136
figura 5.20 - Modello FEM cellula unit 1 .....	137
figura 5.21 - Condizioni di carico vento: 2 (sx) – 3 (centro) – 4 (dx).....	137
figura 5.22 - Condizione di carico neve (5) .....	138
figura 5.23 - Condizioni di carichi imposti: 6 (sx) – 7 (centro) – 8 (dx).....	138
figura 5.24 - Condizione di carico da manutenzione (9).....	139
figura 5.25 - Tabella riassuntiva verifiche stati limite di esercizio SLS – approccio normative.....	140
figura 5.26 – Deformazione direzione y – combinazione SLS 1 – approccio normative.....	140
figura 5.27 - Deformazione direzione z - combinazione SLS 6 – approccio normative .....	141
figura 5.28 - Tabella riassuntiva verifiche stato limite ultimo ULS.....	142
figura 5.29 – Tensioni totali – combinazione ULS 1 – approccio normativo .....	142
figura 5.30 - Dettaglio azione del vento agente sull'elemento di GFRC orizzontale .....	143
figura 5.31 - Sezione montante - Approccio alternativo .....	144
figura 5.32 - Sezione traverso maschio - Approccio alternativo.....	144
figura 5.33 - Sezione traverso femmina - Approccio alternativo .....	144
figura 5.34 - Sezione traverso intermedio inferiore - Approccio alternativo .....	145
figura 5.35 - Sezione traverso intermedio superiore - Approccio alternativo .....	145
figura 5.36 - Condizioni di carico vento: 2 (sx) – 3 (centro) – 4 (dx).....	146
figura 5.37 - Tabella riassuntiva verifiche stati limite di esercizio SLS – approccio alternativo.....	146
figura 5.38 – Deformazione direzione y – combinazione SLS 1 – approccio alternativo.....	147
figura 5.39 - Deformazione direzione z - combinazione SLS 6 – approccio alternativo .....	147
figura 5.40 - Tabella riassuntiva verifiche stato limite ultimo ULS.....	148
figura 5.41 – Tensioni totali – combinazione ULS 1 – approccio alternativo .....	148
figura 5.42 - Confronto caratteristiche elementi strutturali .....	149
figura 5.43 - Variazione di sezione – Montante.....	149
figura 5.44 - Variazione di sezione - Traverso maschio .....	150

figura 5.45 - Variazione di sezione - Traverso femmina .....	150
figura 5.46 - Variazione di sezione - Traverso intermedio inferior .....	150
figura 5.47 - Variazione di sezione - Traverso intermedio superiore.....	151
figura 5.48 - Variazione volume alluminio cellula units 1 .....	151
figura 5.49 - Condizioni di carico - approccio normative .....	154
figura 5.50 - Combinazioni di carico - stato limite d'esercizio SLS .....	155
figura 5.51 - Combinazioni di carico - stato limite ultimo ULS .....	156
figura 5.52 – Vista eseterna e sezione vetro-camera - approccio normative.....	157
figura 5.53 - Spessori efficaci - approccio normativo.....	159
figura 5.54 - Ripartizione dei carichi sui singoli pannelli del vetro camera .....	159
figura 5.55 - Deformazioni e tensioni negli strati vetriati - Approccio normativo.....	160
figura 5.56 - Fattore Kmod - Table 5 Eurocode BS EN 16612:2019.....	161
figura 5.57 - Fattore Ksp - Table 4 Eurocode BS EN 16612:2019 .....	162
figura 5.58 - Verifica tensionale ULS - Approccio normativo .....	162
figura 5.59 - Verifica deformabilità SLS - Approccio normative .....	163
figura 5.60 - Verifica tensionale ULS – Mepla - Approccio normative.....	163
figura 5.61 - Verifica deformabilità SLS – Mepla - Approccio normative .....	163
figura 5.62 – Mappatura delle tensioni vetro 1 pannello esterno combinazione ULS 2 – Mepla- Approccio normativo.....	164
figura 5.63 – Vista esterna e sezione vetro-camera - approccio alternativo.....	165
figura 5.64 – Verifica tensionale (ULS) e deformabilità (SLS) – Approccio alternativo .....	166
figura 5.65 - Verifica tensionale (ULS) e deformabilità (SLS) – Mepla - Approccio alternativo .....	166
figura 5.66– Mappatura delle tensioni vetro 1 pannello esterno combinazione ULS 2 – Mepla - Approccio alternativo .....	167
figura 5.67 - Confronto caratteristiche dl vetro.....	167
figura 5.68 - Variazione di sezione del vetro .....	167

## RINGRAZIAMENTI

---

Con questo elaborato si conclude definitivamente il mio percorso universitario. Vorrei ora dedicare un pensiero a tutte le persone che con interesse e pazienza hanno contribuito al superamento di questi cinque lunghi anni.

Un ringraziamento particolare va al relatore Dott. Ing. Luca Pozza, il quale in questi mesi di lavoro mi ha guidato con preziosi consigli nelle ricerche e nella stesura dell'elaborato. Grazie anche al correlatore Dott. Ing. Stefano Pagliarani, presenza di fondamentale importanza che ha saputo dispensare ottimi consigli nei mesi della stesura dell'elaborato, sempre disponibile a chiarire ogni mio dubbio o incertezza. Grazie, inoltre, a tutta la Focchi Spa (in particolar modo allo studio tecnico) per la disponibilità accordatami, fondamentale per portar a compimento questo elaborato.

Mi sembra inoltre doveroso ringraziare tutti coloro che mi sono stati vicini in questi anni di carriera universitaria e, soprattutto, in questi ultimi mesi.

*In primis* un ringraziamento speciale lo devo alla mia famiglia. Grazie ai miei genitori Miriam e Rodolfo, i quali mi hanno permesso di seguire le mie passioni ed intraprendere questo percorso di studi, durante il quale mi hanno sempre sostenuto ed appoggiato. Grazie anche a Viola, sulla quale posso sempre contare nonostante i nostri numerosi litigi.

Un pensiero speciale a Martina, per avermi spronato ed incoraggiato durante tutto il percorso accademico. Grazie per essermi stata sempre accanto anche nei momenti no, con pazienza ma soprattutto amore.

Grazie perché senza di voi non sarei mai arrivato fino in fondo a questo difficile, lungo e tortuoso cammino. Questa tesi la dedico a voi che siete la mia famiglia, il mio più grande sostegno e la mia guida.

Un ringraziamento anche ai miei amici ed ai miei compagni di corso, che ogni giorno hanno condiviso con me sacrifici, gioie e successi. In particolare grazie ad Alberto, per aver condiviso con me anche l'esperienza della convivenza a Bologna: grazie per il sostegno reciproco nelle giornate di studio ma soprattutto per i rari, ma fondamentali, momenti di spensieratezza.

Grazie a tutti!