

# **VALUTAZIONE DELL'AZIONE DEL VENTO SU DI UN CONCENTRATORE SOLARE PARABOLICO LINEARE**

A. MILIOZZI, G.M. GIANNUZZI, D. NICOLINI

ENEA - Dipartimento Tecnologie per l'Energia, Fonti Rinnovabili e Risparmio Energetico  
Centro Ricerche Casaccia, Roma

# **Valutazione dell'azione del vento su di un concentratore solare parabolico lineare**

*A. Miliozzi, G.M. Giannuzzi, D. Nicolini*

(ENEA Casaccia - Progetto Solare Termodinamico)



## ***Riassunto***

Le prestazioni di un concentratore solare parabolico lineare sono correlate sia alla rigidità della struttura che alla entità dei carichi ad essa applicati. Tra questi, il carico predominante è quello derivante dall'azione del vento. Scopo del lavoro qui presentato è stato quello di valutare le azioni esercitate dal vento sui concentratori parabolici lineari di un impianto solare ad alta temperatura per la produzione di energia elettrica. Tale valutazione, inquadrata nell'ambito normativo sia nazionale che europeo, è stata eseguita per via numerica utilizzando il modulo fluidodinamico Flotran del codice di calcolo agli elementi finiti Ansys. I risultati, ottenuti per tre velocità di riferimento (7, 14 e 28 m/s) e per diverse posizioni dei collettori, hanno permesso di determinare i coefficienti di forma del concentratore parabolico. Attraverso tali coefficienti, relativi alle azioni di spinta e portanza, al momento torcente, alla pressione media ed alla distribuzione di pressione, è possibile per ogni velocità del vento e per ogni posizione del concentratore ottenere le azioni corrispondenti esercitate sulla struttura. Successivamente, per assicurare sul grado di affidabilità numerica dei risultati ottenuti, si è analizzata la sensibilità numerica del modello utilizzato ed, in particolare, sono stati condotti studi facendo variare l'infillamento della maglia e le dimensioni del dominio di calcolo. Infine, essendo gli attuali codici CFD ancora "non certificati", si sono condotte delle prove sperimentali in galleria del vento finalizzate alla verifica della affidabilità complessiva della previsione. Contemporaneamente alle prove sperimentali, sono state condotte delle simulazioni numeriche 2D e 3D cercando di riprodurre le analoghe condizioni di prova della galleria del vento. I risultati ottenuti da queste prove e dalle simulazioni numeriche sono stati messi a confronto utilizzando i coefficienti aerodinamici. Visti gli esiti positivi del confronto numerico-sperimentale effettuato, è possibile concludere che il modello numerico fluidodinamico utilizzato per valutare le azioni del vento esercitate su un concentratore parabolico lineare è in grado di prevedere correttamente tali azioni ed è quindi applicabile a strutture di questo tipo con un buon grado di affidabilità. La validazione del modello numerico porta come ulteriore conseguenza la validazione delle azioni del vento valutate per via numerica in precedenza. I carichi così ottenuti vanno pertanto considerati avere un buon livello di affidabilità.

Parole chiave : collettore solare, azione del vento, FEM, CFD, galleria del vento.

## ***Abstract***

The performance of a parabolic-trough concentrator is correlated both to the structure stiffness and to the entity of the applied loads. The main load from the action of the wind is deriving. Scope of this work is the estimation of the actions of the wind on a parabolic-trough concentrator of an high temperature solar plant for electric power production. Such evaluation, referring the national and European codes and standards, is performed numerically using the CFD Flotran module of Ansys finite element code. The results, obtained for three reference speeds (7, 14 and 28 m/s) and for various angular positions of the collectors, have allowed to determine the parabolic-trough concentrator shape coefficients. Through such coefficients, it is possible for every wind speed and concentrator angular position to obtain the corresponding actions on the structure. Then, in order to reassure on the degree of numerical reliability of the obtained results, the numerical sensibility of the used model has been analyzed and, in particular, studies have been performed varying the mesh density and field dimensions. At last, being the present CFD codes still "not certified", wind tunnel experimental tests have been conducted, finalized to the verification of the total reliability of the numerical forecast. At the same time of the experimental tests, 2D and 3D numerical simulations have been conducted to reproduce the analogous conditions of wind tunnel tests. The results obtained from the tests and the numerical simulations have been compared using the aerodynamic coefficients. After the positive numerical-experimental comparison, it is possible to conclude that the fluid-dynamic numerical model, used in order to estimate the wind actions on a parabolic-trough concentrator, is able to predict correctly such actions and is therefore applicable to structures of this type with a good degree of reliability. The validation of the numerical model leads, as ulterior consequence, to the validation of the wind actions numerically estimated. The obtained loads must be therefore considered to have a good level of reliability.

Key words : solar collector , wind actions, FEM, CFD, wind tunnel.

### *Ringraziamenti*

*Si ringraziano gli Ingg. Kenny, Rondoni e Crobu del Dipartimento di Scienza e Tecnica dei Materiali della sede di Terni dell'Università degli Studi di Perugia per la fattiva collaborazione con l'ENEA nelle attività connesse agli argomenti qui riportati e per gli utili consigli nella redazione del presente documento.*

# SOMMARIO

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>GENERALITÀ</b> .....	<b>9</b>
2.1	UNITÀ DI MISURA .....	9
2.2	IL CODICE DI CALCOLO .....	9
2.3	INQUADRAMENTO NORMATIVO .....	9
2.4	CONDIZIONI OPERATIVE .....	10
2.5	VELOCITÀ MEDIA DEL VENTO IN FUNZIONE DELL'ALTEZZA.....	10
2.5.1	<i>Definizione di velocità media del vento</i> .....	10
2.5.2	<i>Velocità di riferimento e velocità di picco del vento</i> .....	11
2.5.3	<i>Coefficiente di rugosità</i> .....	12
2.5.4	<i>Coefficiente topografico</i> .....	13
2.6	I COEFFICIENTI AERODINAMICI .....	15
<b>3</b>	<b>VALUTAZIONE NUMERICA DELL'AZIONE DEL VENTO</b> .....	<b>16</b>
3.1	INTRODUZIONE.....	16
3.2	DIMENSIONI DEL CONCENTRATORE .....	16
3.3	IPOTESI DI CALCOLO .....	17
3.3.1	<i>Il fluido</i> .....	17
3.3.2	<i>Il dominio</i> .....	19
3.3.3	<i>Il mesh</i> .....	19
3.3.4	<i>Le condizioni al contorno</i> .....	20
3.3.5	<i>Le condizioni di convergenza</i> .....	21
3.4	DATI CARATTERISTICI DELLE ANALISI CFD .....	21
3.5	RISULTATI DELLE ANALISI CFD .....	22
3.6	DETERMINAZIONE DEI COEFFICIENTI DI FORMA.....	30
3.7	LIMITI DI APPLICABILITÀ .....	33
3.8	CONCLUSIONI.....	34
<b>4</b>	<b>ANALISI DI SENSIBILITÀ SUL MODELLO NUMERICO</b> .....	<b>35</b>
4.1	INTRODUZIONE.....	35
4.2	CALCOLO DI RIFERIMENTO .....	35
4.3	CALCOLI DI SENSIBILITÀ .....	36
4.3.1	<i>Discretizzazione spaziale</i> .....	36
4.3.2	<i>Dimensione del dominio</i> .....	37
4.4	RISULTATI.....	38
4.4.1	<i>Sensibilità alla discretizzazione spaziale</i> .....	39
4.4.2	<i>Sensibilità alla dimensione del dominio</i> .....	43
4.5	ANALISI DEI RISULTATI .....	47
4.5.1	<i>Convergenza</i> .....	47
4.5.2	<i>Modifica discretizzazione spaziale</i> .....	48
4.5.3	<i>Modifica dimensioni del dominio</i> .....	49
4.6	CONCLUSIONI.....	49
<b>5</b>	<b>VERIFICA DELLA AFFIDABILITÀ DEL MODELLO NUMERICO ATTRAVERSO PROVE SPERIMENTALI IN GALLERIA DEL VENTO ..</b>	<b>51</b>
5.1	INTRODUZIONE.....	51
5.2	LE PROVE IN GALLERIA DEL VENTO .....	51

5.3	LE SIMULAZIONI NUMERICHE .....	55
5.4	CONFRONTO TRA I RISULTATI NUMERICI E QUELLI SPERIMENTALI.....	58
5.5	DISCUSSIONE.....	62
5.6	CONCLUSIONE .....	65
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI E PROSPETTIVE .....</b>	<b>66</b>
<b>7</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>68</b>
	<b>APPENDICE A – COEFFICIENTI AERODINAMICI .....</b>	<b>69</b>

# 1 Introduzione

Le prestazioni di un concentratore solare parabolico lineare sono correlate sia alla rigidità della struttura che alla entità dei carichi ad essa applicati. Tra questi, il carico predominante è quello derivante dall'azione del vento<sup>[1]</sup>.



*Figura 1-1 – Collettori solari parabolico-lineari ENEA (Impianto PCS)*

Scopo principale del lavoro qui descritto è stato quello di valutare l'entità delle azioni esercitate dal vento sui concentratori parabolici lineari di un impianto solare ad alta temperatura per la produzione di energia elettrica. Tale valutazione (paragrafo 3), inquadrata nell'ambito normativo sia nazionale che europeo, è stata eseguita per via numerica utilizzando il modulo fluidodinamico Flotran del codice di calcolo agli elementi finiti Ansys. I risultati ottenuti, relativi a tre velocità di riferimento del vento (7, 14 e 28 m/s)<sup>[1]</sup> ed a diverse posizioni angolari dei collettori, hanno permesso di determinare i coefficienti di forma del concentratore parabolico. Attraverso tali coefficienti, relativi alle azioni di spinta e portanza, al momento torcente, alla pressione media ed alla distribuzione di pressione, è possibile per ogni velocità del vento e per ogni posizione del concentratore ottenere le azioni corrispondenti esercitate sulla struttura.

Tali risultati, per poter essere utilizzati con un buon grado di affidabilità nella fase di progettazione meccanica, dovrebbero essere oggetto di una attenta valutazione metodologica e di un opportuno riscontro sperimentale.

Per quanto riguarda l'aspetto metodologico (paragrafo 4), si è proceduto a valutare la sensibilità numerica del modello utilizzato per lo studio delle azioni esercitate dal vento. In particolare sono stati condotti degli studi per valutare la sensibilità del modello al variare dell'infittimento della magliatura (mesh) ed delle dimensioni del dominio di calcolo.

La sola affidabilità numerica non è, però, in grado di assicurare l'affidabilità complessiva della previsione, essendo gli attuali codici CFD ancora “non certificati”.

Di conseguenza, i risultati numerici necessitano comunque di essere confermati attraverso prove sperimentali. A tal fine si sono realizzate una serie di prove sperimentali in galleria del vento (paragrafo 5). Tali prove sono state progettate e realizzate in collaborazione con l'Università di Perugia ed il modello di concentratore è stato realizzato rispettando l'analogia fluidodinamica di Reynolds con quello reale.

Contemporaneamente alle prove sperimentali, sono state condotte delle simulazioni numeriche sia 2D che 3D nel tentativo di riprodurre le analoghe condizioni di prova della galleria del vento. I risultati ottenuti da queste prove e dalle simulazioni numeriche sono stati messi a confronto utilizzando i coefficienti aerodinamici.

## 2 Generalità

### 2.1 Unità di Misura

Il sistema di misura adottato è il sistema internazionale (SI); di conseguenza le unità di misura delle principali grandezze fisiche utilizzate nel presente documento sono:

- Velocità del vento ..... [m/s]
- Forza ..... [N]
- Forza per unità di lunghezza ..... [N/m]
- Momento ..... [Nm]
- Momento per unità di lunghezza ..... [Nm/m].

### 2.2 Il codice di calcolo

Per le analisi di fluidodinamiche (CFD) atte alla determinazione dell'azione del vento su di un concentratore lineare parabolico si è utilizzato il modulo Flotran del codice di calcolo Ansys.

*Ansys* è un codice di calcolo utilizzando il metodo degli elementi finiti (FEM) adatto ad analisi di tipo lineare e con ogni tipo di non linearità (materiali, geometria e contatti) che consente di risolvere problemi di tipo statico e dinamico nei vari campi di applicazione (strutturale, termico, elettromagnetico, fluidodinamico, ecc.).

E' possibile affrontare problemi accoppiati senza effettuare analisi successive nei vari domini; questo permette ad esempio di studiare accoppiamenti di tipo fluido/strutturale, fenomeni piezoelettrici, termo/strutturali, ecc. con un'unica soluzione.

Il software consente inoltre di affrontare studi di ottimizzazione rimanendo sempre all'interno dello stesso ambiente.

Ansys si interfaccia con i più diffusi sistemi CAD ed è dotato di un potente linguaggio parametrico che consente di far fronte alle esigenze più disparate.

*ANSYS/Flotran* permette di trattare una grande varietà di problemi nell'ambito della termofluidodinamica e dell'interazione fluido-struttura, compresi: flussi laminari, turbolenti, comprimibili e incompressibili, in regime subsonico, transonico e supersonico; fluidi singoli e multipli e accoppiamento termo/fluido.

### 2.3 Inquadramento normativo

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

- ☞ D.M. 16/1/96, *Norme tecniche relative ai "criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi"*;
- ☞ Circolare ministeriale 4 Luglio 1996 n. 156, *Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi"* di cui al D.M. 16 gennaio 1996.
- ☞ Eurocodice 1 - UNI-ENV-1991-2- 4 Marzo 1997. *Basi di calcolo ed azioni sulle strutture. Parte 2-4: Azioni sulle strutture ed Azioni del vento.*

La normativa esistente propone una serie di regole per determinare l'azione del vento in termini di distribuzioni di pressione e di forze da applicare alle strutture nella fase di progettazione.

Tale normativa è principalmente indirizzata alla progettazione di edifici e strutture civili soggette al carico del vento di cui fornisce i vari coefficienti di forma.

Chiaramente il concentratore solare parabolico lineare non è una struttura conosciuta in ambito civile. In tal caso, la normativa prevede la possibilità di condurre dette valutazioni attraverso studi ingegneristici o di utilizzare metodi di calcolo alternativi a quanto riportato al suo interno a patto che tali studi siano condotti utilizzando metodi analitici, numerici e sperimentali ben fondati.

Con il termine "ben fondato" si intende in sostanza la capacità di effettuare una corretta modellizzazione del vento naturale, sia in termini di variazione della velocità media del vento con l'altezza dal suolo, sia in termini di turbolenza indotta dalla situazione del terreno del sito.

## 2.4 Condizioni operative

Per un concentratore solare sono state assunte<sup>[1]</sup> le seguenti condizioni operative:

<i>Livello</i>	<i>Condizione</i>
<b>W1</b>	Rispondere ai requisiti di prestazione in condizioni operative normali con venti leggeri. L'efficienza di concentrazione deve essere la massima possibile per velocità del vento inferiori ad un valore $v_1$ caratterizzante questo livello.
<b>W2</b>	Rispondere ai requisiti di prestazione in condizioni operative normali con venti medi. L'efficienza di concentrazione va gradualmente a diminuire per velocità del vento comprese tra $v_1$ e $v_2$ . La velocità del vento $v_2$ è caratterizzante per questo livello.
<b>W3</b>	Transizione tra le condizioni operative normali e la posizione di sopravvivenza per venti medio - forti o forti. La sopravvivenza deve essere assicurata in qualsiasi posizione per venti medio - forti. La motorizzazione deve essere in grado di portare il collettore nella posizione di salvaguardia per qualsiasi velocità del vento compresa tra $v_2$ e $v_3$ . La velocità del vento $v_3$ è caratterizzante per questo livello.
<b>W4</b>	Sopravvivenza per forti venti in posizione di riposo. La velocità del vento di sopravvivenza deve essere adattata alle richieste del sito secondo quanto previsto dalla normativa. La velocità del vento $v_4$ è caratterizzante per questo livello.

*Tabella 2-1 - Condizioni operative*

## 2.5 Velocità media del vento in funzione dell'altezza

### 2.5.1 Definizione di velocità media del vento

La velocità media del vento in funzione della distanza dal suolo  $V_m(z)$  è definita<sup>[2]</sup>:

$$V_m(z) = C_r(z) \cdot C_t(z) \cdot V_{ref}$$

dove:

$V_{ref}$  è la velocità del vento di riferimento;

$C_r(z)$  è il coefficiente di rugosità;

$C_t(z)$  è il coefficiente topografico.

## 2.5.2 Velocità di riferimento e velocità di picco del vento

La velocità di riferimento del vento ( $V_{ref}$ ), è definita come la velocità media del vento su 10 min, a 10m d'altezza al di sopra del suolo, in un terreno di seconda categoria e avente una probabilità annuale di eccedenza di 0,02 (comunemente si dice "avente un periodo di ritorno di 50 anni"). In Italia, per il calcolo della velocità di riferimento del vento, viene proposta la seguente relazione, espressa in funzione della sola altitudine del sito:

$$V_{ref} = V_{ref,0} \quad \text{per} \quad a_s \leq a_0$$

$$V_{ref} = V_{ref,0} + k_a (a_s - a_0) \quad \text{per} \quad a_s > a_0$$

dove  $a_s$  è l'altitudine [m] sopra il livello del mare del sito della struttura.

In Tabella 2-2 sono riportati i valori base della velocità di riferimento del vento per differenti zone italiane. Nel caso di un sito posizionato nelle regioni del Sud Italia o nelle Isole maggiori, situato ad una altitudine sul livello del mare inferiore ai 500 m si ottiene:  $V_{ref} = V_{ref,0} = 28$  m/s.

Tabella 2-2 – Parametri di base per il calcolo della velocità di riferimento del vento per differenti zone italiane

Zona	Descrizione	$V_{ref,0}$ [m/s]	$a_0$ [m]	$k_a$ [1/s]
1	Valle d'Aosta, Piemonte, Lombardia, Trentino Alto Adige, Veneto, Friuli Venezia Giulia (eccetto la provincia di Trieste)	25	1000	0,012
2	Emilia Romagna	25	750	0,024
3	Toscana, Marche, Umbria, Lazio, Abruzzo, Molise, Campania, Puglia, Basilicata, Calabria (eccetto la provincia di Reggio Calabria)	27	500	0,030
4	Sicilia e provincia di Reggio Calabria	28	500	0,030
5	Sardegna (Iato est della linea congiungente capo Teulada con l'isola della Maddalena)	28	750	0,024
6	Sardegna (Iato ovest della linea congiungente capo Teulada con l'isola della Maddalena)	28	500	0,030
7	Liguria	29	1000	0,024
8	Provincia di Trieste	31	1500	0,012
9	Isole (eccetto Sicilia e Sardegna) e mare aperto	31	500	0,030

La velocità di picco del vento può essere vista come la sovrapposizione della velocità media del vento più una sua variazione dovuta alle condizioni di turbolenza presenti. In tal modo è possibile scrivere che:

$$V_{picco}(z) = G(z) \cdot V_m(z)$$

dove con  $G(z)$  si è indicato il "fattore di picco". Tale fattore ha la seguente espressione:

$$G(z) = \sqrt{1 + \frac{7}{C_t(z) \cdot \ln(z/z_0)}}$$

Il valore di  $G$  in genere si aggira tra 1.5 e 1.6.

**Nota** : la verifica ai carichi di collasso deve essere effettuata necessariamente sulla base della velocità di picco in quanto questa, sia pure di breve durata, è in grado di dare un sovraccarico tale da raggiungere il limite di resistenza del materiale. Per quanto invece riguarda le verifiche delle prestazioni in esercizio è più logico utilizzare la velocità media ovvero un fattore di picco  $G = 1.0$ .

Per la condizione operativa W4, la velocità di riferimento del vento deve necessariamente essere posta uguale a quella caratteristica del sito (velocità di riferimento  $V_{ref}$ ). Per le altre condizioni operative (W1 e W2) le velocità di riferimento dovranno essere scelte in base alla strategia di gestione dell'impianto. Nella tabella seguente è riportata una possibile scelta per le velocità di riferimento. Le velocità di picco sono ricavate applicando la relazione:

$$V_{picco} = 1.6 * V_{ref}$$

<i>Velocità del vento (m/s) @10m</i>		
<i>Livello</i>	<i>Vr</i>	<i>Vpicco</i>
<b>W1</b>	7	11.2
<b>W2</b>	14	22.4
<b>W3</b>	21	33.6
<b>W4</b>	28	44.8
$V_r$ : velocità media del vento $V_{picco}$ : velocità massima del vento (raffica). E' valutata essere 1.6 volte la velocità di riferimento.		

Tabella 2-3 - Velocità media e di picco per ciascuna condizioni operativa

### 2.5.3 Coefficiente di rugosità

Il coefficiente di rugosità,  $C_r(z)$ , tiene conto della variabilità della velocità media del vento e della conformazione del sito, considerando: l'altezza al di sopra del suolo e la rugosità del terreno in dipendenza della direzione del vento.

Il coefficiente di rugosità a quota  $z$  è definito dal profilo logaritmico:

$$C_r(z) = k_r \ln(z / z_0)$$

dove:

- $k_r$  è il fattore del terreno;
- $z_0$  è la lunghezza di rugosità;

I parametri precedenti dipendono dalla categoria di esposizione del terreno. L'azione del vento dovrà essere valutata assumendo la categoria di esposizione in funzione della posizione geografica definita dalla Figura 2-2 e la rugosità del terreno definita dalla Tabella 2-5.

Supponendo di considerare le regioni del Sud Italia o le Isole maggiori (zone 3, 4, e 5 della mappa del vento di Figura 2-1) ed un sito che non presenti ostacoli isolati, o comunque quest'ultimi siano rari (classe di rugosità D di Tabella 2-4). Supponendo, inoltre, che il sito si trovi al di sotto dei 500 m di altitudine, la categoria di rugosità corrispondente è la II (Figura 2-2). Per tale categoria si ottengono i seguenti parametri (Tabella 2-5):

$$k_r=0.19 \quad z_0[m]=0.05$$

### 2.5.4 Coefficiente topografico

Il coefficiente topografico  $C_t(z)$ , tiene conto dell'incremento della velocità media su scarpate e colline isolate, nel caso di regioni non ondulate o montagnose ed è correlato alla velocità del vento alla base della collina o della scarpata. Deve essere preso in considerazione per siti più vicini di metà della lunghezza del declivio della collina dalla cima, o 1.5 volte l'altezza del rilievo. Nelle valli,  $C_t(z)$  può essere considerato pari a 1.0, se non sono attesi aumenti di velocità causati dall'effetto imbuto. Per strutture situate all'interno di valli, o per ponti che le attraversino, si deve tener conto degli incrementi della velocità del vento causati dall'effetto imbuto. Nel nostro caso si può assumere  $C_t=1$ .



Figura 2-1 – Mappa del vento in Italia.

Tabella 2-4 – Classi di rugosità del terreno

Classi di rugosità del terreno	Descrizione
A	Aree urbane dove almeno il 115% è coperto con edifici e la loro altezza media supera 15 m.
B	Aree urbane (eccetto la classe A), suburbane, industriali e boschive.
C	Aree con ostacoli diffusi (alberi, edifici, muri, recinzioni); aree che non è possibile definire nelle classi A, B.
D	Aree senza o con rari ostacoli isolati (terreni aperti, aeroporti, terreni agricoli, pascoli, terre paludose o sabbiose, neve, ghiaccio, laghi, mari, ...).

La rugosità del terreno non dipende dalla topografia e dall'orografia.  
Le classi A, B si applicano ai siti circondati da questi terreni in tutte le direzioni per almeno 1 Km e comunque non meno di 20 volte l'altezza dell'edificio.

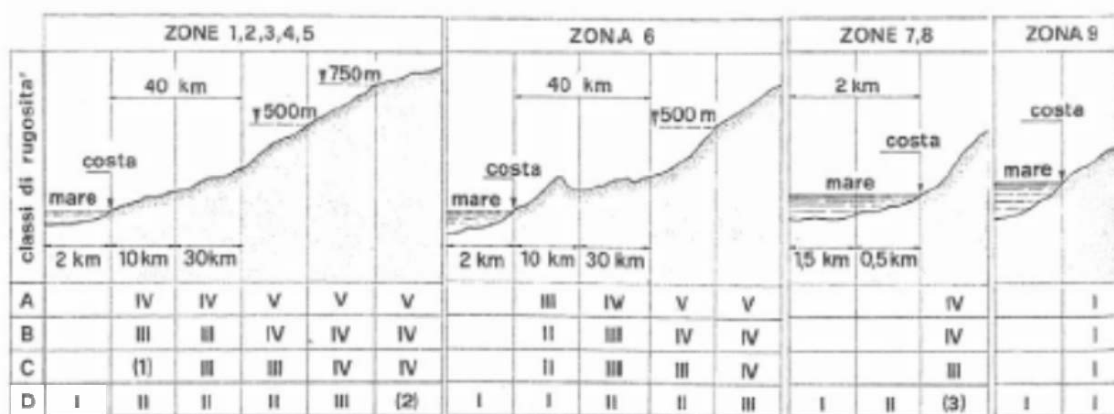


Figura 2-2 – Categorie di rugosità delle varie zone italiane.asdfadf asdfasdfdf sdfsdf sdff

Tabella 2-5 – Categorie di esposizione e relativi parametri

Categoria di esposizione	$k_r$	$z_0$ [m]	$z_{min}$ [m]
I	0,17	0,01	2
II	0,19	0,05	4
III	0,20	0,10	5
IV	0,22	0,30	8
V	0,23	0,70	12

## 2.6 I coefficienti aerodinamici

Per determinare i coefficienti aerodinamici di un concentratore parabolico si fa riferimento alle seguenti relazioni:

Spinta :	$F_x = q(V_r) \cdot C_e(z) \cdot C_{fx}(\alpha) \cdot A$
Portanza :	$F_y = q(V_r) \cdot C_e(z) \cdot C_{fy}(\alpha) \cdot A$
Momento torcente :	$M_z = q(V_r) \cdot C_e(z) \cdot C_{mz}(\alpha) \cdot A \cdot a$
Pressione media :	$P_m = q(V_r) \cdot C_e(z) \cdot C_{pm}(\alpha)$
Distribuzione di pressione :	$P(x) = q(V_r) \cdot C_e(z) \cdot C_p(\alpha, x)$

dove:

$q(V_r) = \frac{V_r^2}{1.6}$	pressione dinamica di riferimento [N/m <sup>2</sup> ]
$C_e(z) = C_r^2(z) \cdot G^2(z)$	coefficiente di esposizione
$G(z) = \sqrt{1 + \frac{7}{\ln(z/z_0)}}$	fattore di picco
$C_r(z) = k_r \ln(z/z_0)$	coefficiente di rugosità

e con:

$z$	:	altezza dal suolo [m]
$\alpha$	:	posizione angolare collettore [°]
$x$	:	coordinata che si sviluppa secondo l'apertura della parabola
$V_r$	:	velocità del vento a 10 m di altezza [m/s]
$k_r, z_0$	:	parametri funzione della categoria di esposizione del sito
$A$	:	area del collettore [m <sup>2</sup> ]
$a$	:	apertura del collettore [m]

### 3 Valutazione numerica dell'azione del vento

#### 3.1 Introduzione

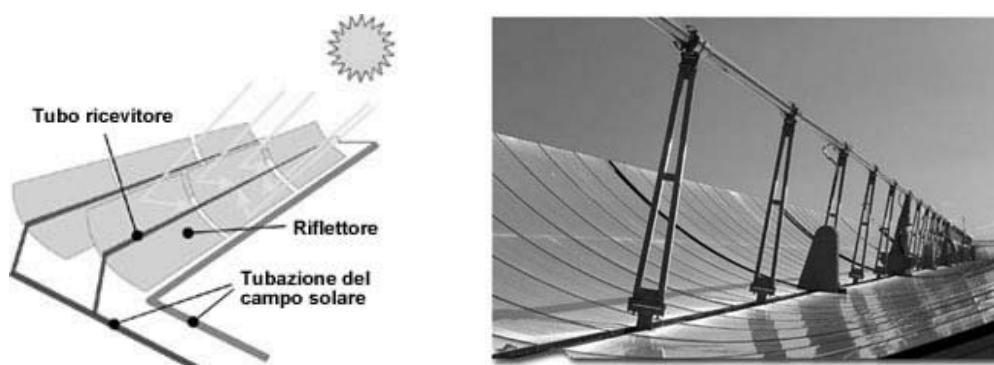
Le prestazioni di un concentratore solare parabolico lineare, sia in termini di resistenza meccanica che di precisione ottica, sono correlate da un lato alla rigidità della struttura e dall'altro all'entità dei carichi ad essa applicati. Per un concentratore solare il carico predominante è quello che deriva dall'azione del vento sulla struttura, che si esplica con una distribuzione di pressione agente sulle superfici del concentratore.

Le azioni del vento risultanti, ossia la pressione ma anche la spinta, la portanza ed i momenti, risultano essere funzione dei coefficienti aerodinamici del concentratore parabolico-lineare, che a loro volta dipendono dalla posizione angolare dello stesso.

Obiettivo di questa sezione è quello di determinare per via numerica, attraverso l'utilizzo di analisi CFD, i suddetti coefficienti aerodinamici in modo tale da poter ricavare, per ogni posizione del collettore e per ogni velocità del vento, le relative azioni esercitate dal vento.

#### 3.2 Dimensioni del concentratore

Il concentratore solare parabolico lineare è una struttura cilindro-parabolica (Figura 3-1) che concentra la radiazione solare in un punto coincidente con il fuoco della parabola.



*Figura 3-1 – Schema di funzionamento ed esempio realizzativi di un concentratore solare parabolico lineare*

Tale struttura è caratterizzata da una superficie riflettente parabolica con:

- ☞ Una apertura 5.76 m;
- ☞ Un fuoco posto a 1.81 m dal vertice della parabola;
- ☞ Una finestra centrale di 0.1 m

Il concentratore ruota attorno ad un asse di rotazione posto ad una quota di 3.5 m dal suolo. In prima istanza, non sapendo a priori la posizione di tale punto rispetto la parabola, si fa coincidere il centro di rotazione della struttura con il vertice della parabola.

Le file di concentratori sono parallele e distanziate di 2 volte l'apertura della parabola (11.86 m).



Figura 3-2 – Impianto a collettori parabolici lineari di Kramer Junction (California)

### 3.3 Ipotesi di calcolo

Le analisi CFD eseguite si riferiscono ad una serie di 6 concentratori parabolici lineari infinitamente lunghi ed in una posizione angolare variabile tra  $120^\circ$  e  $-120^\circ$ . L'angolo che identifica la posizione angolare è definito nullo ( $0^\circ$ ) quando la concavità è rivolta verso l'alto e positivo quando il vento investe la superficie concava dei pannelli (valori negativi si riferiscono alle posizioni in cui il vento incide sulla superficie convessa)

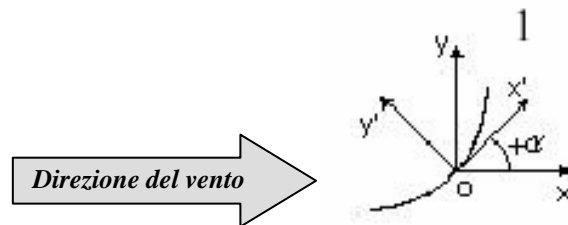


Figura 3-3 – Definizione di posizione angolare del concentratore

Le ipotesi prese in considerazione per l'esecuzione dei calcoli sono le seguenti.

#### 3.3.1 Il fluido

Il fluido considerato è ARIA a temperatura ambiente ( $293 \text{ }^\circ\text{K}$ ) ed a pressione ambiente ( $101350 \text{ Pa}$ ). In tal caso la sua densità è  $1.205 \text{ Kg/m}^3$  e la sua viscosità cinematica  $1.8135\text{E-}05 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Supponendo che il collettore parabolico sia posto in un condotto in cui il fluido di lavoro (l'aria) è un fluido reale, particolare influenza rivestono le resistenze viscosive e le forze d'inerzia. Il rapporto tra forze viscosive e forze d'inerzia si esprime mediante la grandezza adimensionale Numero di Reynolds.

Nel nostro caso, a grandi linee, si ha:

$$Re_L = \frac{L \cdot \rho \cdot c}{\mu} = \frac{L \cdot c}{\nu} = \frac{6 \cdot 10}{1.6 \cdot 10^{-5}} = 3 \cdot 10^6$$

dove:

$\mu$  è la viscosità dinamica;

$\nu$  è la viscosità cinematica ( $16 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s);

$c$  è la velocità del fluido (circa 10 m/s);

$L$  è una dimensione geometrica caratteristica (apertura parabola = 6 m).

Il valore di  $Re_L$  al di sotto del quale la corrente è completamente laminare è detto numero di Reynolds critico. In tubi industriali, il campo di valori di  $Re_{L\_cr}$  è  $2000 < Re_{L\_cr} < 4000$ . Nel nostro caso in numero di Reynolds è così elevato che è necessario effettuare una analisi fluidodinamica in regime turbolento.

Fra i vari modelli disponibili che esprimono la turbolenza, è stato utilizzato il modello base, lo Standard K- $\epsilon$ , che fornisce una descrizione realistica del flusso per tubi e condotti. Qui di seguito sono riportati i principali parametri :

Turbulence Model used :	Standard K-E Model		
Turbulence Inlet Parameters :	Turbulence Intensity 1.0000E-02		
Length Scale Factor	1.0000E-02		
Base Turbulence Model Constants :			
CMu 0.090	C1	1.440	
Kappa 0.400	C2	1.920	
E 9.000	C3	1.000	
A 26.000	C4	0.000	
Transition Point for Y Plus Calc:	11.500		
Coefficient of Thermal Expansion:	0.00E+00		
Wall Conductivity Model:	Van Driest		

Per determinare invece se il fluido è comprimibile o incomprimibile bisogna determinare il numero di Mach definito dall'equazione :

$$Ma = \frac{c}{c^*}$$

dove:

☞  $c$  è la velocità della corrente;

☞  $c^*$  è la velocità caratteristica adiabatica o velocità del suono.

Poiché la velocità del suono è relativa all'aria (330 m/s) ed il fluido ha una velocità di circa 28 m/s il numero di Mach vale:

$$Ma = \frac{28}{330} = 0.08$$

ed è inferiore a 0.3.

In tal caso, il fluido può essere considerato incomprimibile.

### 3.3.2 Il dominio

Il dominio di analisi è costituito dallo spazio che racchiude 6 file di collettori parabolici lineari. Una rappresentazione schematica del dominio è la seguente:

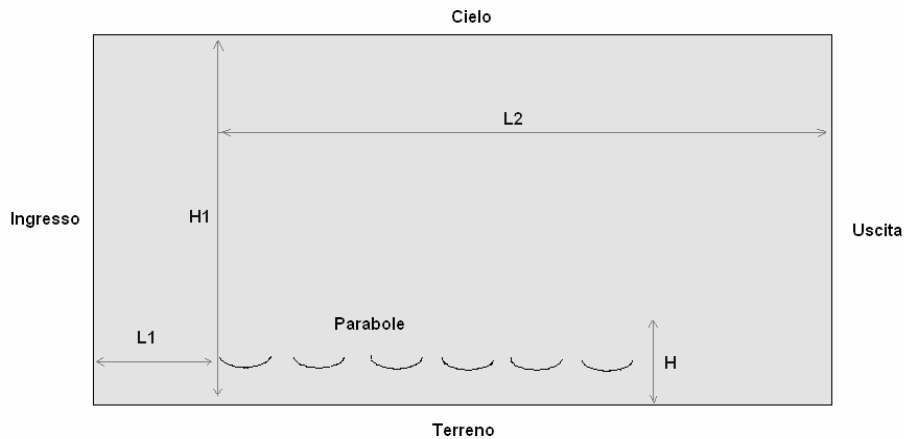


Figura 3-4 – Dominio per le analisi CFD

Le dimensioni rappresentate sono:

H	Altezza massima dell'ostacolo. Nel nostro caso è stata posta pari a 5.8 m.
H1	Altezza del dominio. In generale, affinché non perturbi sostanzialmente il flusso dell'aria si consiglia di prenderla da 2 a 5 volte H. Nel nostro caso, è stata considerata pari a 30m.
L1	Distanza della parete di ingresso dall'ostacolo. In generale, affinché non perturbi sostanzialmente il flusso dell'aria si consiglia di prenderla da 2 a 5 volte H. Nel nostro caso è di 45m.
L2	Distanza dell'ostacolo dalla parete di uscita. In generale, affinché non perturbi sostanzialmente il flusso dell'aria si consiglia di prenderla da 20 a 50 volte H. Nel nostro caso è pari a circa 350m

### 3.3.3 Il mesh

Per questa tipologia di problemi il mesh deve essere realizzato sempre piuttosto fitto. Particolare attenzione va posta sui WALL poiché nel caso di analisi in regime turbolento utilizzando il modello k-epsilon occorre rispettare delle dimensioni del mesh compatibili con il parametro  $y^+$ . Per il modello standard il valore di  $y^+$  è di norma pari a 11.5 ed è determinato dalla seguente espressione:

$$y^+ = \frac{c_t y}{\nu}$$

con:

- ct      velocità tangenziale
- v        viscosità cinematica

Nel caso del terreno è abbastanza evidente che un elemento (o più) a contatto con la linea di terra avente una altezza pari alla rugosità  $z_0$  sia in grado di definire il limite di validità per il modello k-epsilon. Più difficile è il discorso per la parabola dove non si conoscono a priori le velocità in prossimità del WALL.

### 3.3.4 Le condizioni al contorno

Le condizioni al contorno applicate al dominio di analisi sono mostrate in figura 0 e riassunte come segue.

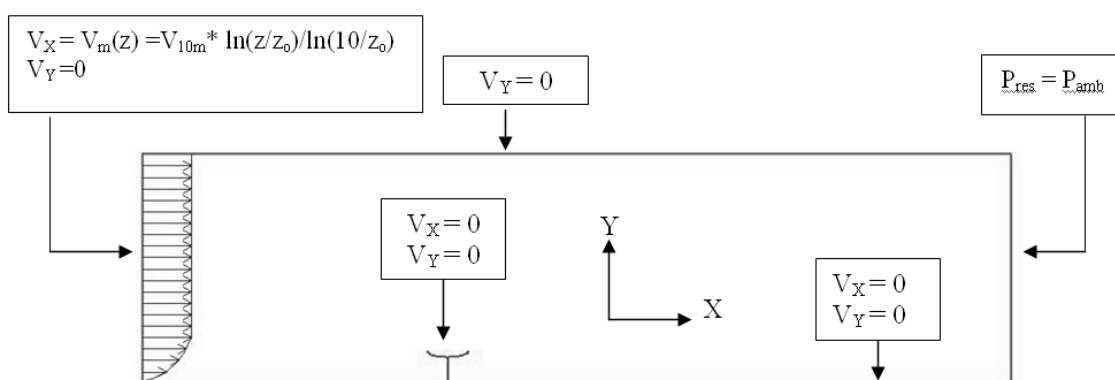


Figura 3-5 – Condizioni al contorno applicate sul condotto

#### Sezione di ingresso

Nella sezione di ingresso va imposta la velocità di riferimento del fluido:

$$V_x = V(10m) * \ln(z/z_0) / \ln(10./z_0)$$
$$V_y = 0.$$

La velocità orizzontale al dominio è funzione dell'altezza e presenta un andamento logaritmico con  $V$  che rappresenta la velocità del vento a 10 m di altezza e  $z_0$  la rugosità del terreno della zona considerata.

#### Sezione di uscita

Nella sezione di uscita si può imporre la pressione di riferimento pari alla pressione atmosferica:

$$P = 101350. Pa$$

Affinché tale imposizione sia attendibile la sezione di uscita deve trovarsi sufficientemente lontano dall'ostacolo in modo tale che la distribuzione delle velocità sulla stessa sia praticamente uguale a quella in ingresso (condizione di flusso indisturbato).

#### Terreno

Il terreno si comporta come un WALL perfettamente liscio :  $V_x = 0$  e  $V_y = 0$ .

I realtà dovrebbe avere una sua caratteristica di rugosità. Tale caratteristica dovrebbe essere relativa al campo e non al sito poiché il terreno del campo è stato trattato. Per

semplicità si può ipotizzare che tale trattamento abbia ridotto la rugosità a valori molto bassi tanto da poter essere trascurati.

### Cielo

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

### Parabola

La parabola si comporta come un WALL perfettamente liscio :  $VX = 0$  e  $VY = 0$ .

## **3.3.5 Le condizioni di convergenza**

Poiché l'oggetto delle analisi è la determinazione dei carichi (forze e momenti) indotti dal vento, il calcolo andrebbe considerato terminato quando queste grandezze raggiungono la convergenza (es:  $10^{-5}$ ). Nel caso classico dei residui (velocità, pressioni, etc.) ciò probabilmente corrisponde ad una convergenza molto bassa (es.:  $10^{-8}$ ).

## **3.4 Dati caratteristici delle analisi CFD**

Per eseguire le analisi CFD richieste, in condizioni stazionarie, sono stati realizzati una serie di file di input per Ansys/Flotran tali da realizzare il mesh ed eseguire il calcolo in modo del tutto automatico e parametrico.

I vari casi analizzati si differenziano al variare della velocità del vento a 10 m di quota e della posizione angolare del concentratore.

Le velocità del vento prese in considerazione sono quelle medie corrispondenti ai tre stati operativi del concentratore: 7, 14 e 28 m/s.

Invece, la posizione angolare è stata fatta variare tra  $-120^\circ$  a  $120^\circ$  con un passo di  $15^\circ$ . Solo nel caso della velocità massima, sono state analizzate tutte le posizioni tra  $-180^\circ$  a  $180^\circ$  con lo stesso passo.

In tal modo, il numero di casi simulati è di 58 (17 a 7 m/s, 17 a 14 m/s e 24 a 28 m/s).

I mesh realizzati in automatico hanno un numero di elementi variabile a seconda del caso, ma in generale il loro numero è superiore ai 60000 elementi tipo il Fluid 141 (un elemento 2D di solito usato per analisi fluidodinamiche-termiche, definito da 3 o 4 nodi e da proprietà del materiale isotrope).

I vari calcoli sono stati condotti tutti con lo stesso numero di iterazioni: 1500. Questo è il numero minimo di iterazioni che, a seguito di alcune analisi di sensibilità, è stato valutato essere sufficiente a garantire le necessarie condizioni di convergenza.

Il tempo medio necessario alla esecuzione di un singolo calcolo CFD si aggira di norma tra le 4 e le 6 ore a seconda della macchina utilizzata.

### **3.5 Risultati delle analisi CFD**

Qui di seguito sono riportati, a titolo esemplificativo, alcuni dei risultati delle simulazioni numeriche CFD, condotte con Ansys/Flotran, sui collettori parabolici lineari delle prime 6 file di un campo solare.

Da Figura 3-6 a Figura 3-17 sono mostrati il campo di velocità, la distribuzione di pressione e l'energia turbolenta  $k-\varepsilon$  per differenti configurazioni (posizioni angolari) del concentratore.

Invece, la Figura 3-18 e la Figura 3-19 mostrano, per la prima e la sesta fila, gli andamenti delle azioni ( $F_x$ -spinta,  $F_y$ -portanza,  $M_z$ -momento torcente) che agiscono sui pannelli al variare dell'orientazione del collettore nonché i valori di pressione media, minima e massima registrati. Dalla Figura 3-20 alla Figura 3-23 sono messe a confronto le singole azioni per ciascuna delle 6 parabole.

Le forze ed i momenti sono forniti per unità di lunghezza del collettore ed espressi in N/m e Nm/m. Sono anche riportati gli andamenti delle pressioni media, minima e massima espresse in N/m<sup>2</sup>.

Per avere una presentazione più dettagliata ed estesa dei risultati ottenuti si può consultare il riferimento [3].

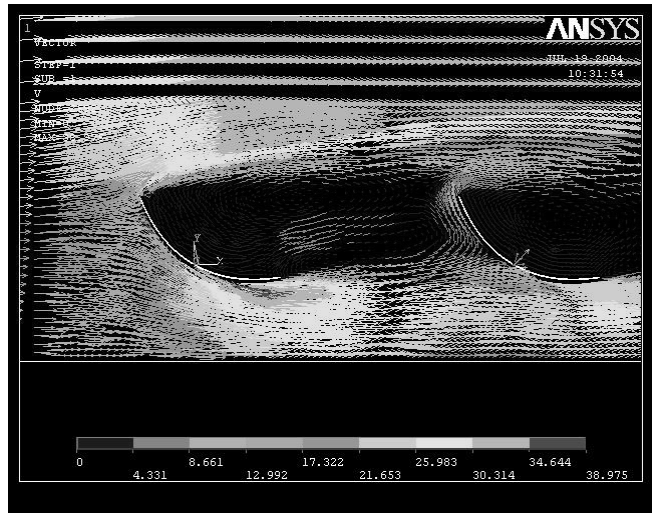


Figura 3-6 – Velocità vento 28 m/s, posizione angolare  $-30^\circ$  - Campo di velocità

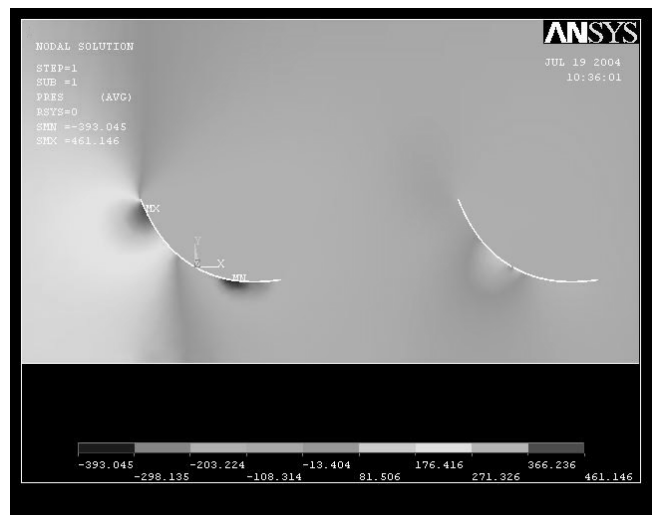


Figura 3-7 – Velocità vento 28 m/s, posizione angolare  $-30^\circ$  - Distribuzione pressione

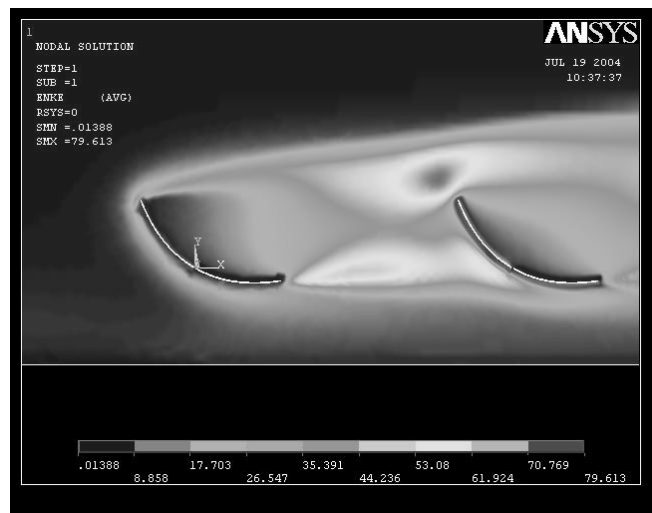


Figura 3-8 – Velocità vento 28 m/s, posizione angolare  $-30^\circ$  - Energia turbolenta  $k-\epsilon$

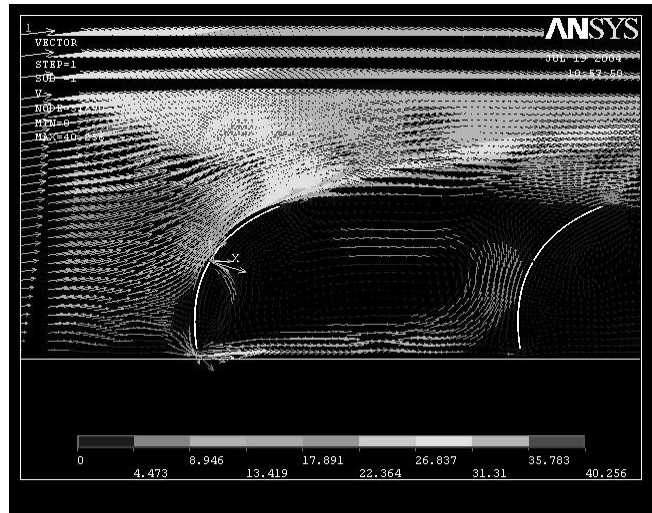


Figura 3-9 – Velocità vento 28 m/s, posizione angolare  $-120^\circ$  - Campo di velocità

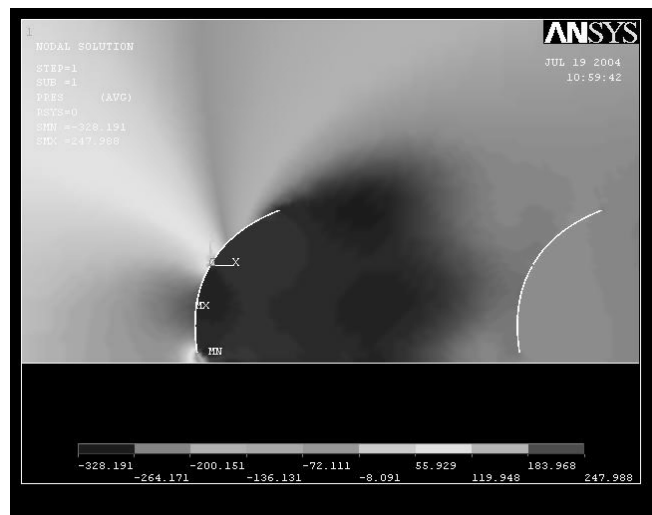


Figura 3-10 – Velocità vento 28 m/s, posizione angolare  $-120^\circ$  - Distribuzione pressione

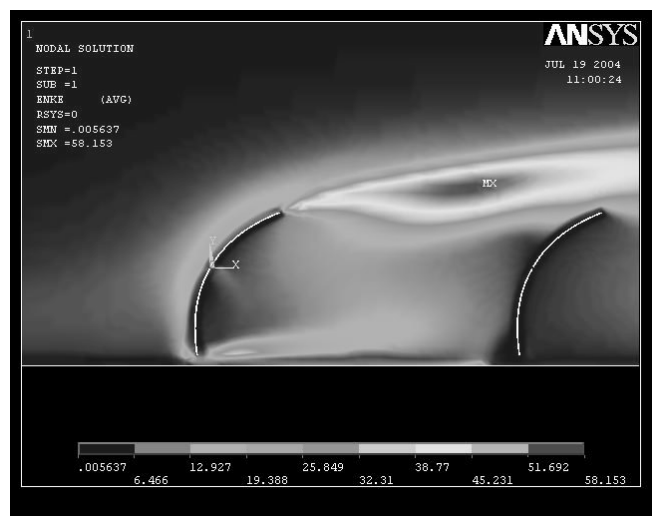


Figura 3-11 – Velocità vento 28 m/s, posizione angolare  $-120^\circ$  - Energia turbolenta  $k-\epsilon$

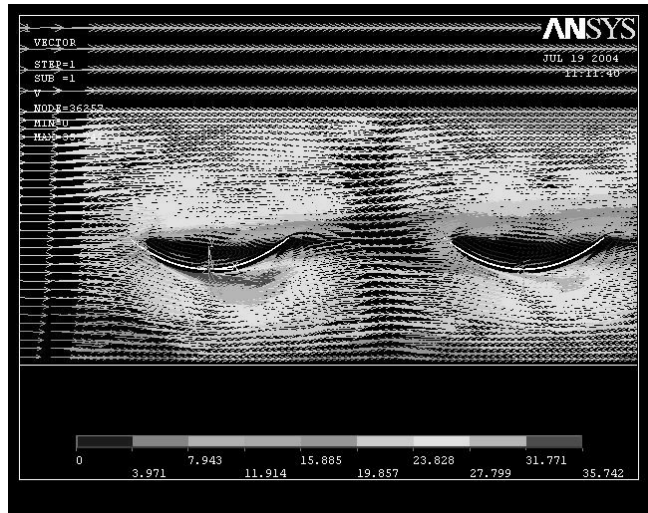


Figura 3-12 – Velocità vento 28 m/s, posizione angolare 0° - Campo di velocità

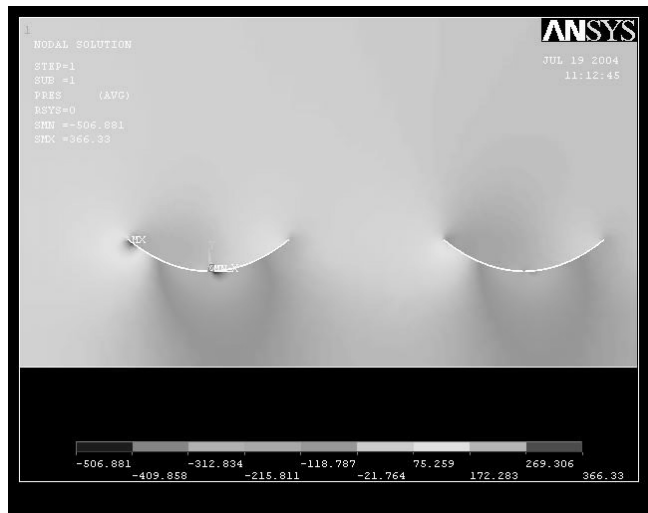


Figura 3-13 – Velocità vento 28 m/s, posizione angolare 0° - Distribuzione pressione

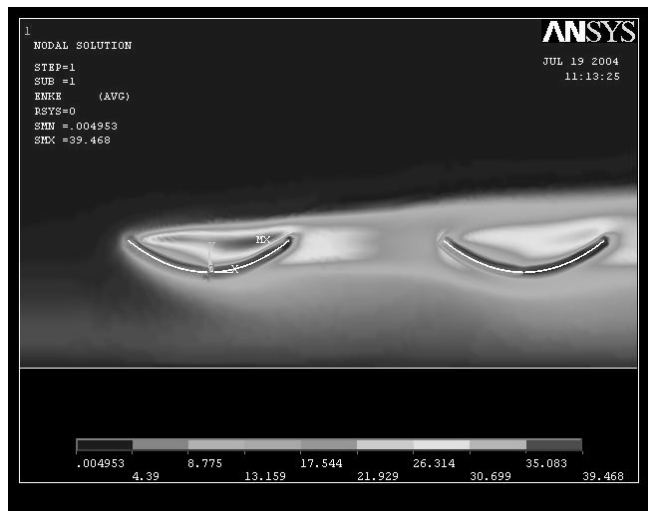


Figura 3-14 – Velocità vento 28 m/s, posizione angolare 0° - Energia turbolenta k-ε

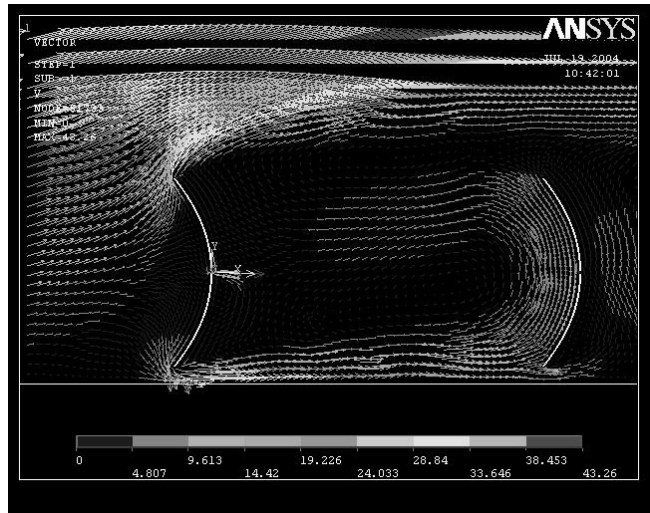


Figura 3-15 – Velocità vento 28 m/s, posizione angolare 90° - Campo di velocità

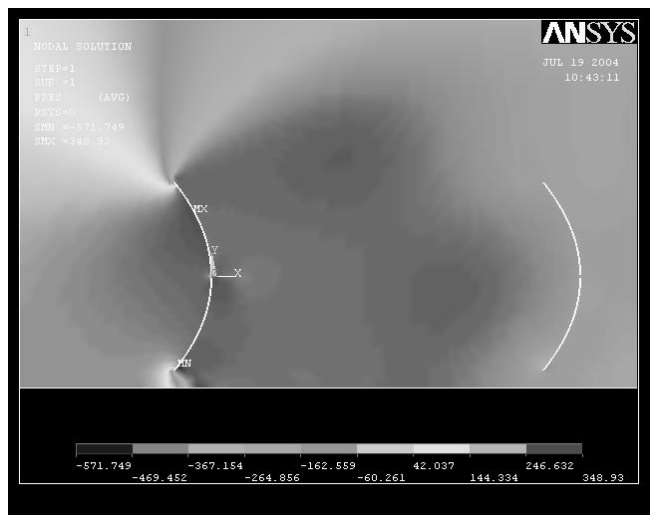


Figura 3-16 – Velocità vento 28 m/s, posizione angolare 90° - Distribuzione pressione

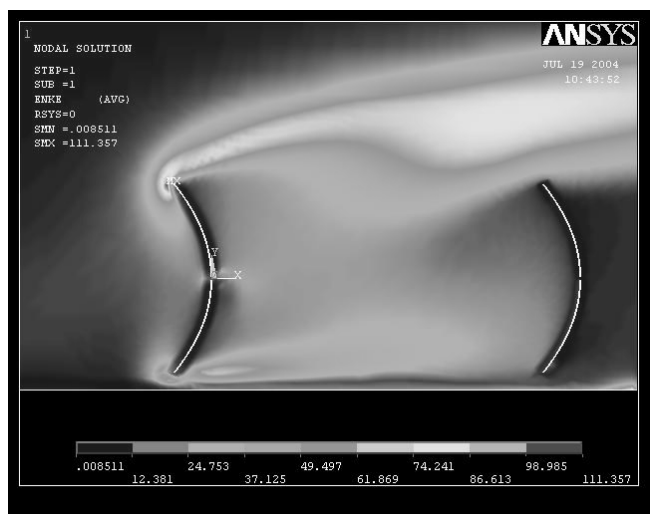
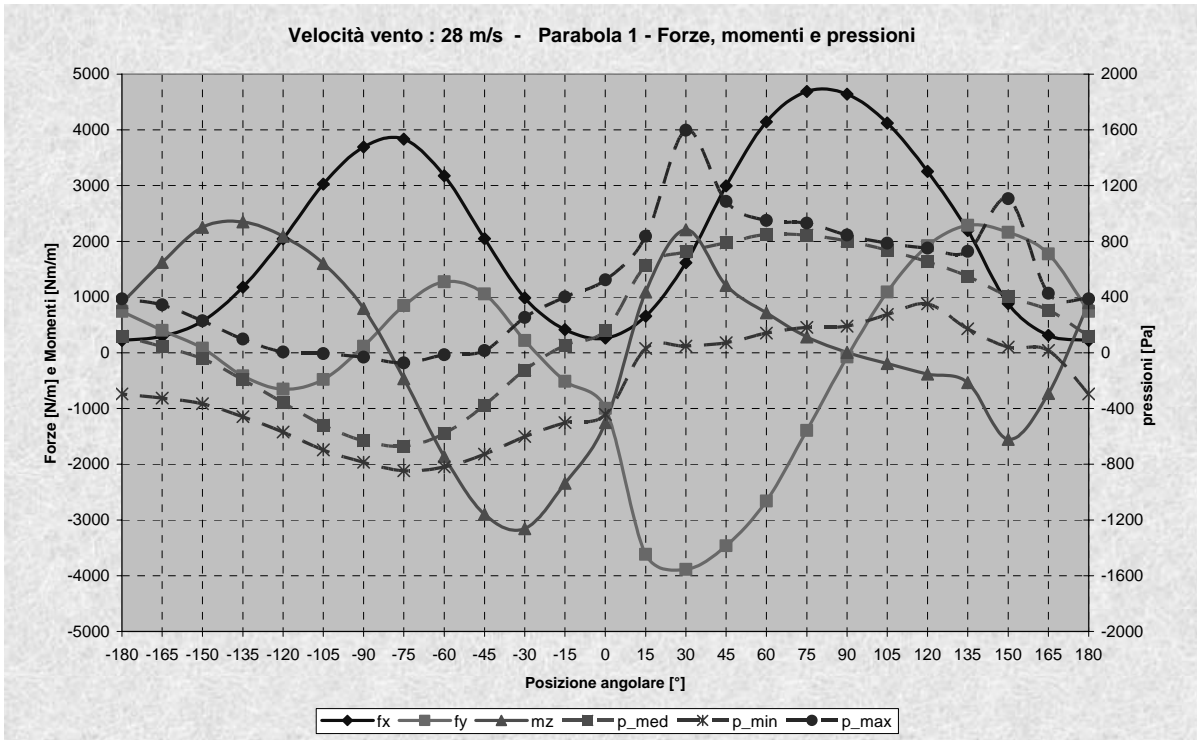
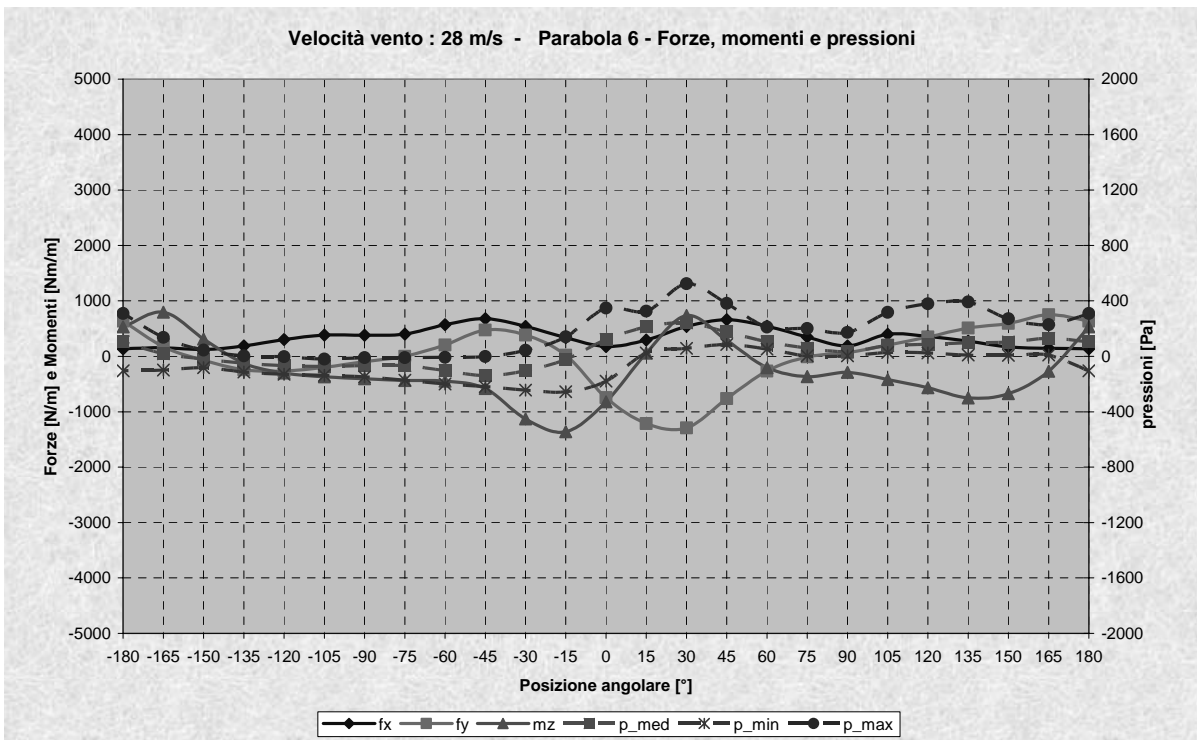


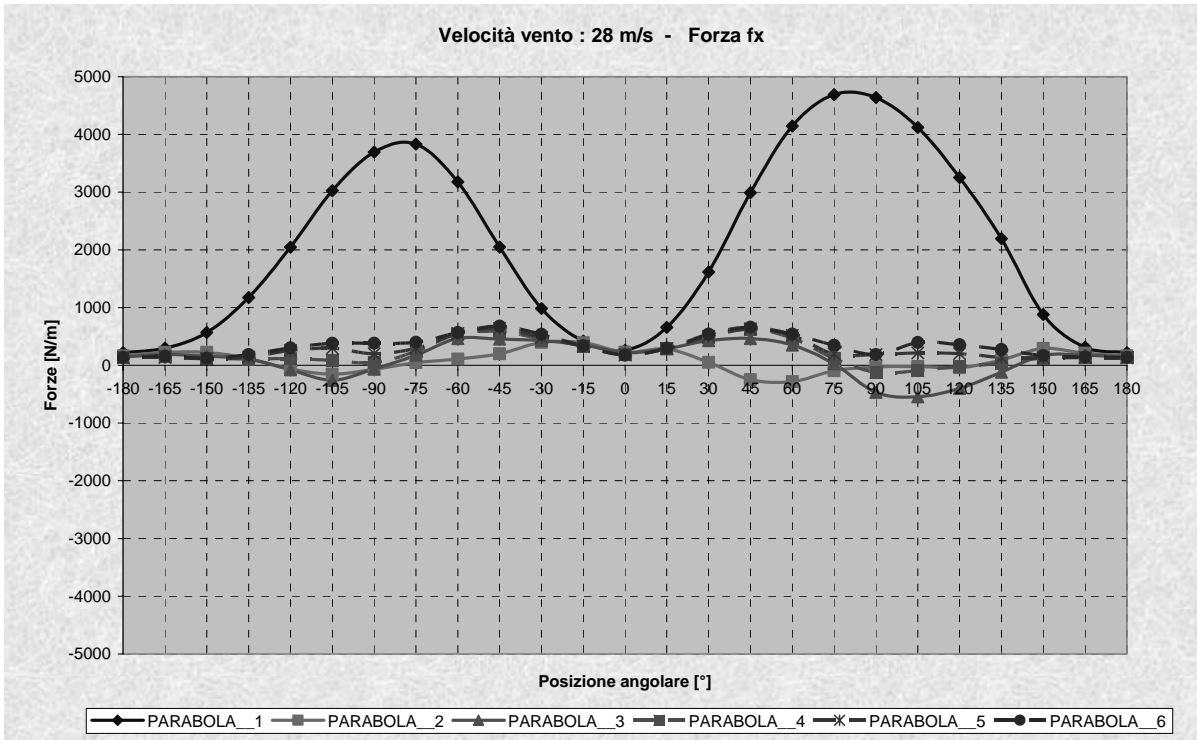
Figura 3-17 – Velocità vento 28 m/s, posizione angolare 90° - Energia turbolenta k-ε



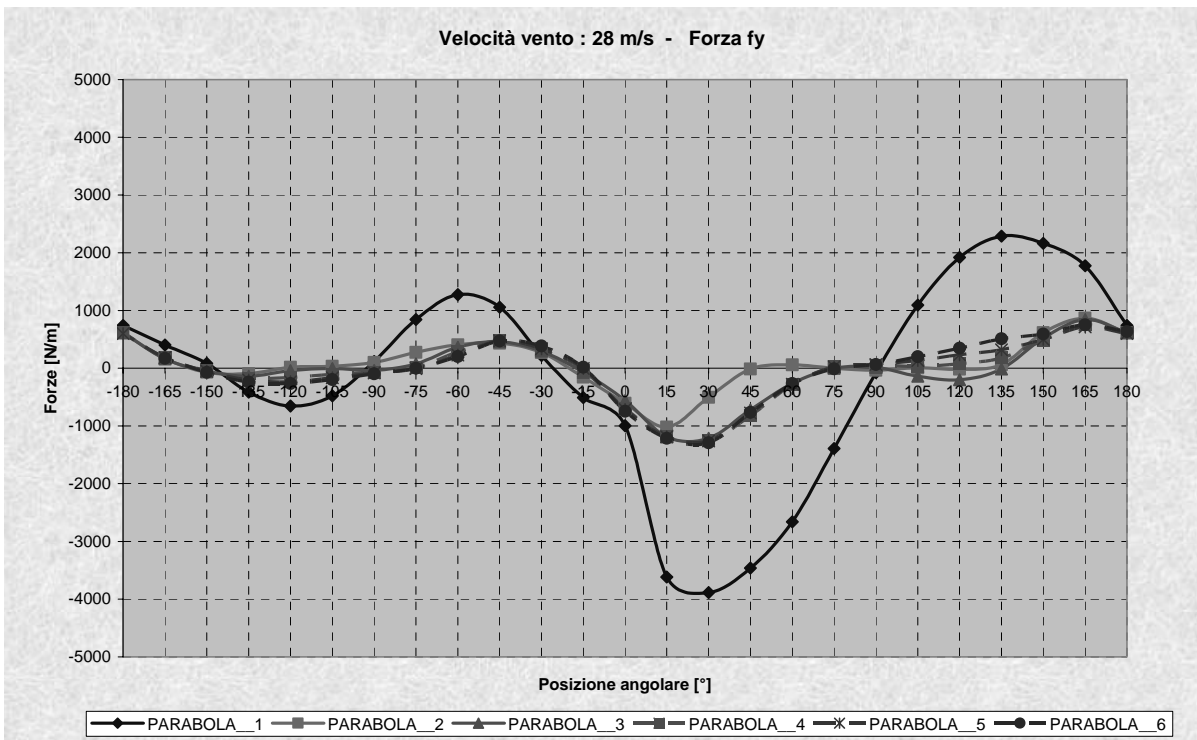
*Figura 3-18*



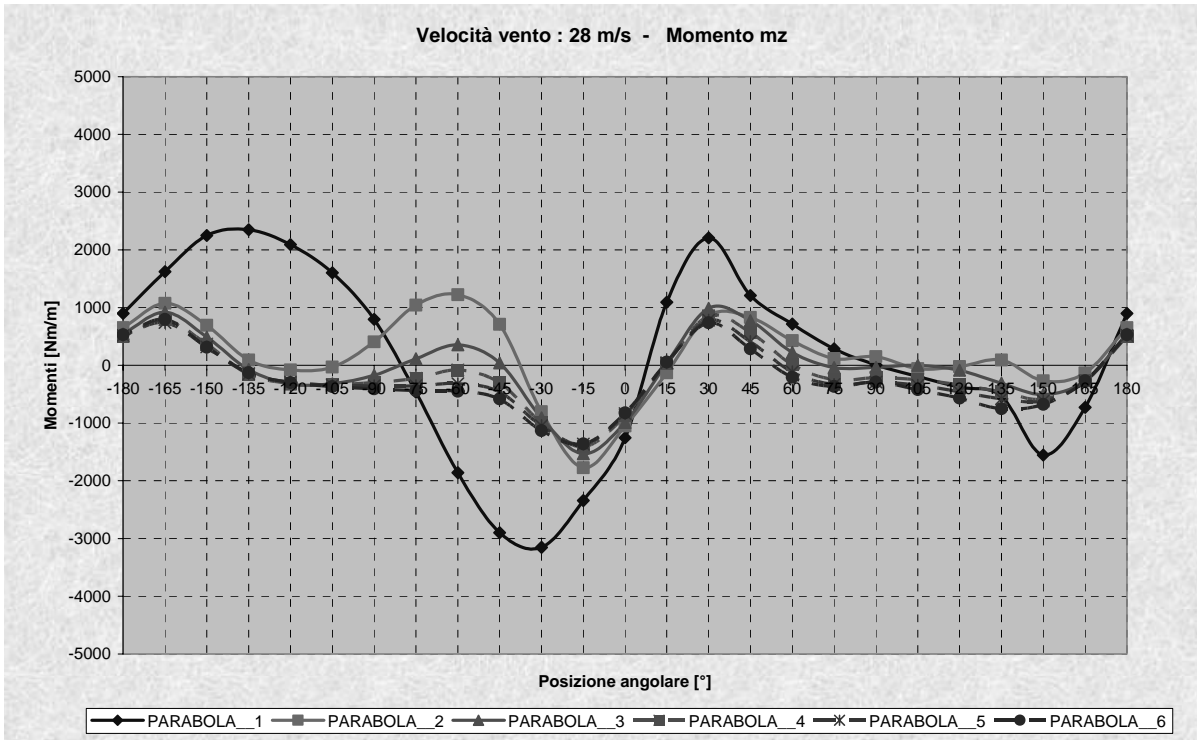
*Figura 3-19*



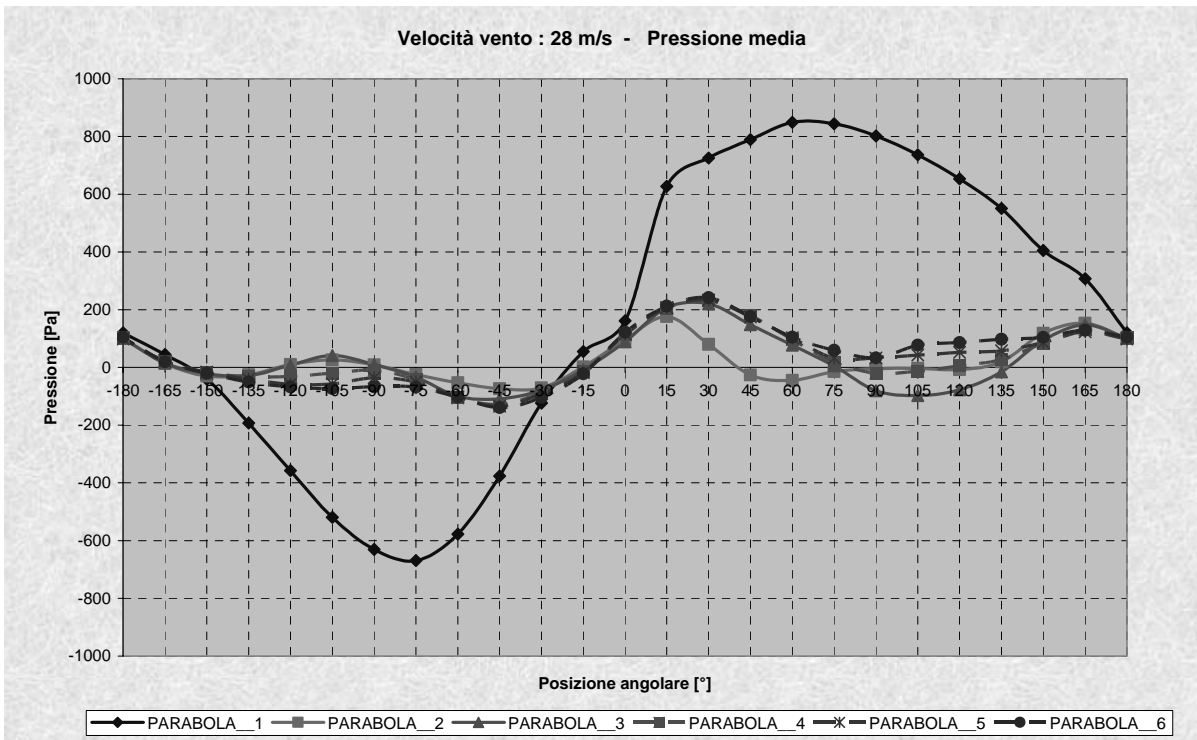
*Figura 3-20*



*Figura 3-21*



*Figura 3-22*



*Figura 3-23*

### 3.6 Determinazione dei coefficienti di forma

A partire dai risultati ottenuti dall'analisi CFD e sulla base delle relazioni del paragrafo 2.6, è stato possibile identificare i coefficienti di forma relativi alle varie azioni esercitate dal vento sul collettore parabolico lineare in funzione della posizione angolare dello stesso.

Tali coefficienti sono stati determinati per il collettore più sollecitato, quello di prima fila, in assenza di qualsiasi schermo frangivento artificiale.

In Figura 3-24 sono riportati, in forma grafica, i coefficienti di forma  $c_{fx}$ ,  $c_{fy}$ ,  $c_{mz}$  e  $c_{pm}$ . Inoltre, da Figura 3-25 a Figura 3-28 sono mostrati gli andamenti, in funzione dell'apertura della parabola, del coefficiente di pressione distribuita  $CP$  per differenti angoli.

In Appendice A – Coefficienti aerodinamici è possibile trovare in dettaglio tutti i coefficienti aerodinamici ottenuti sia in forma grafica che tabellare.

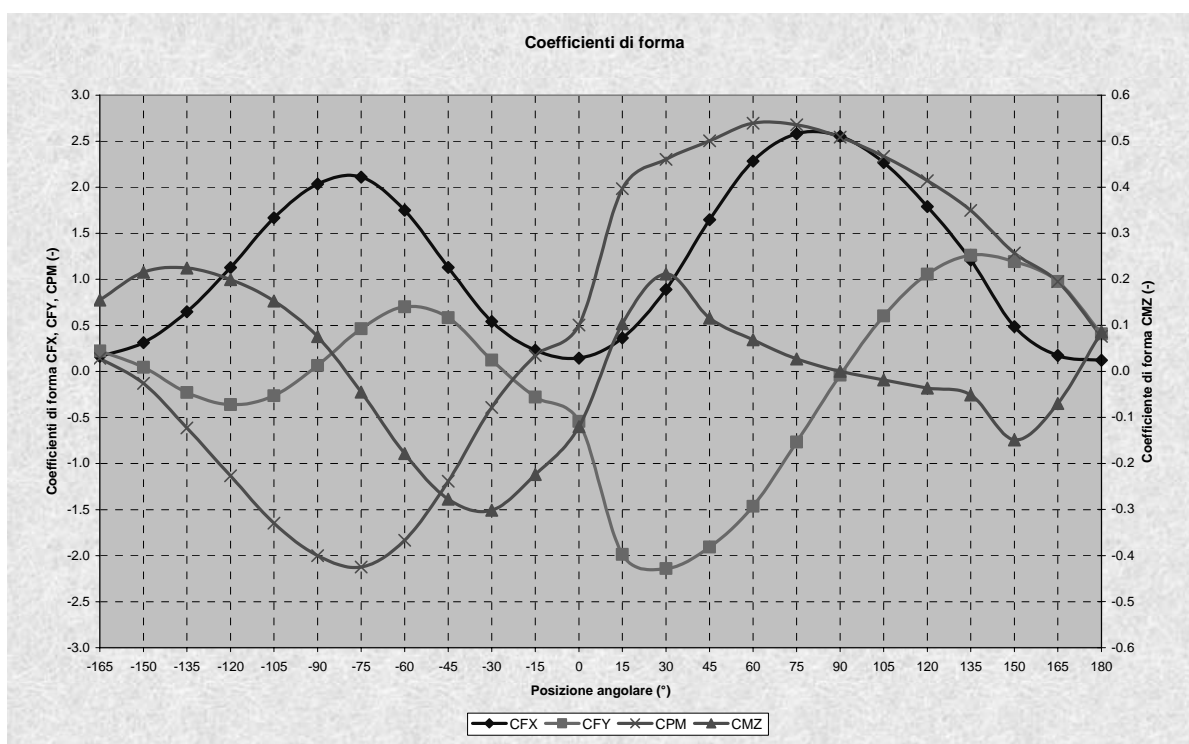
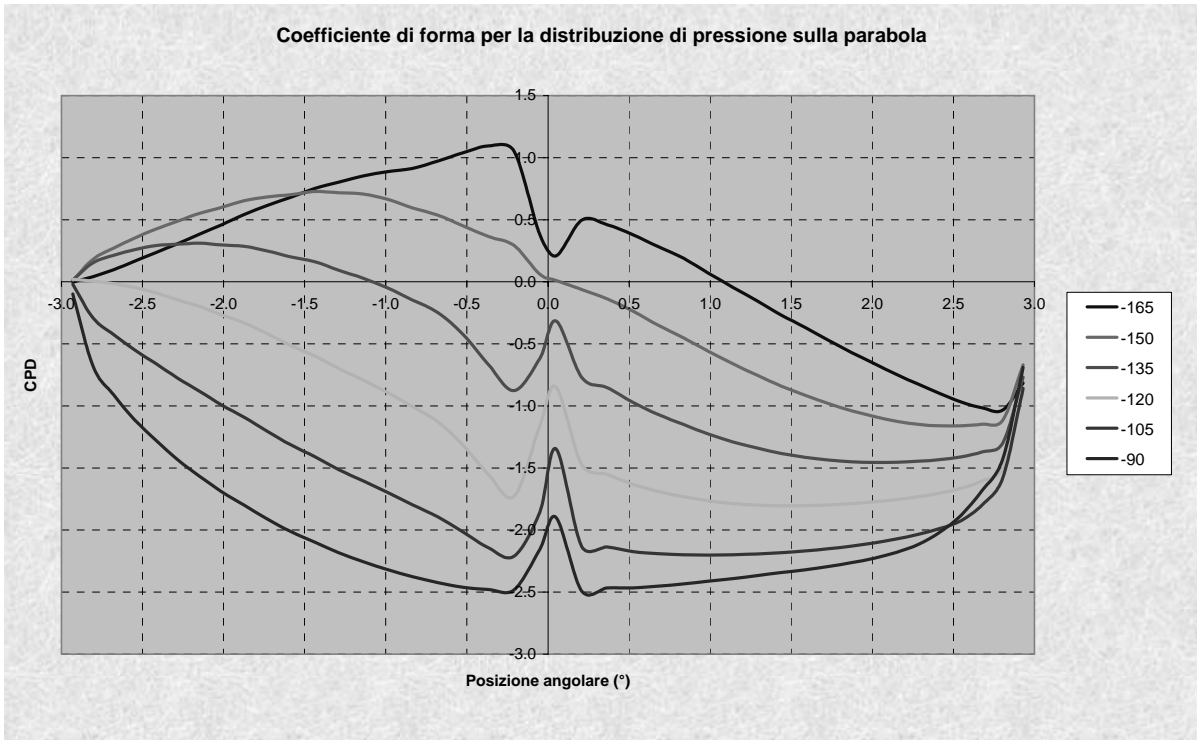
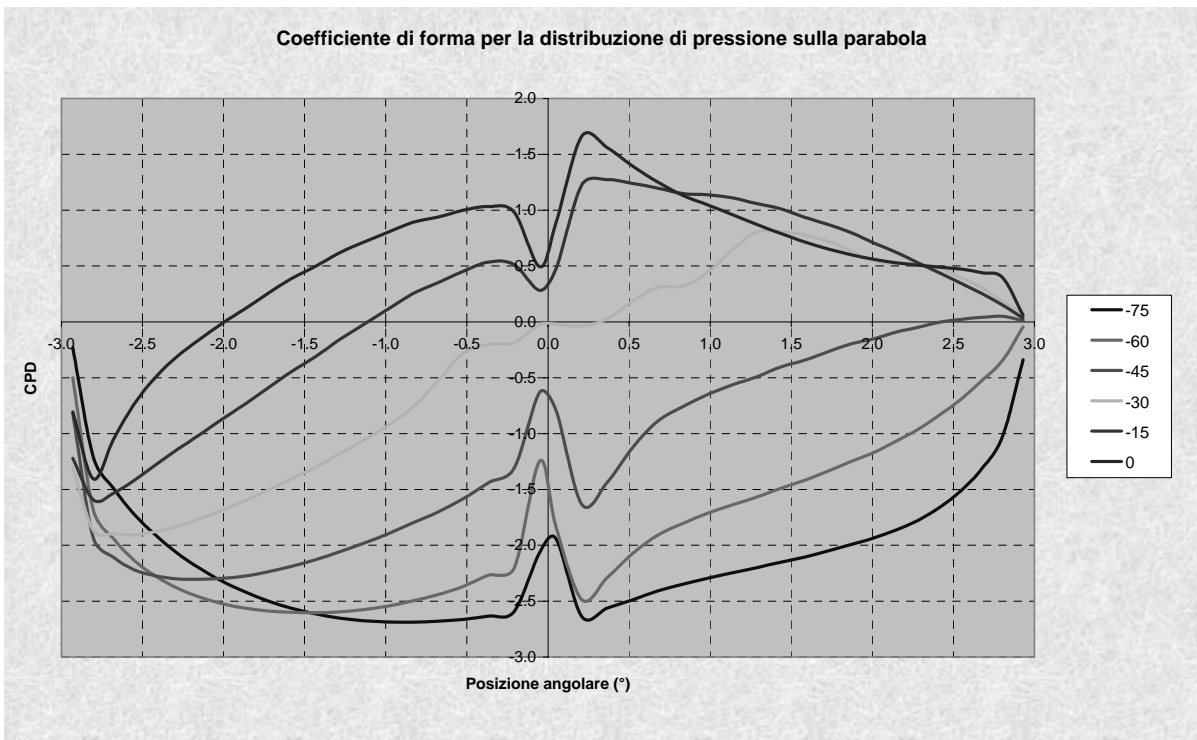


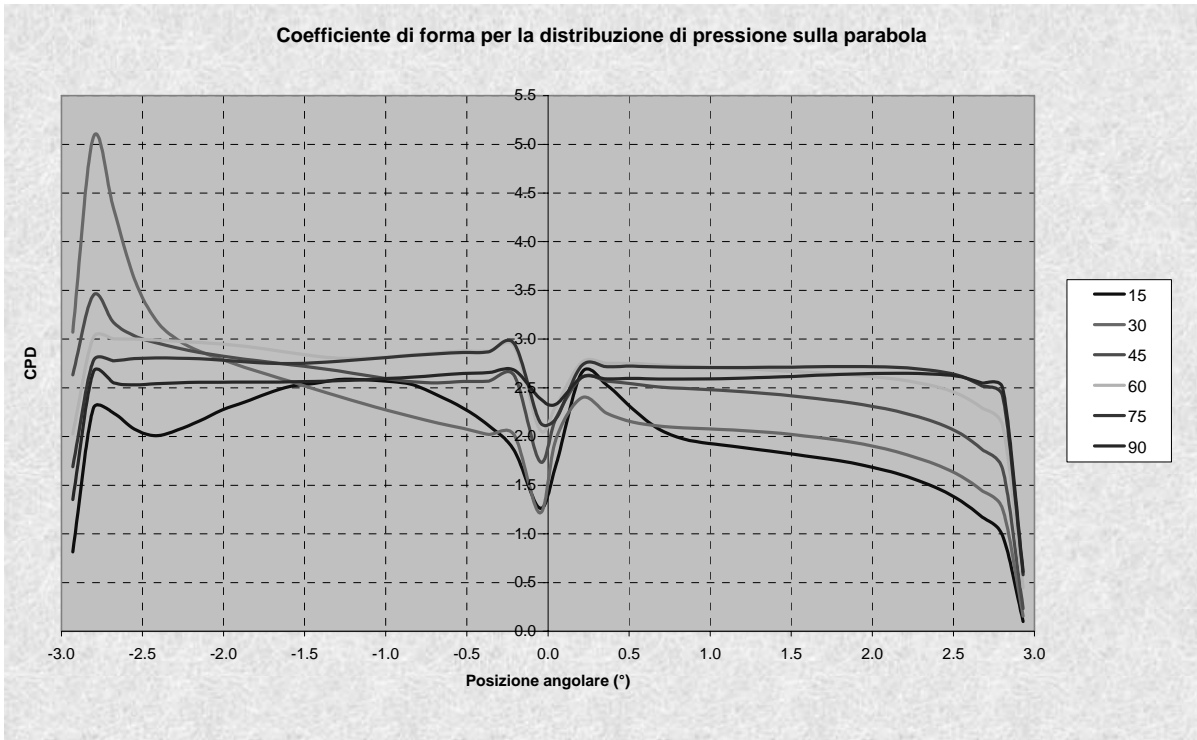
Figura 3-24



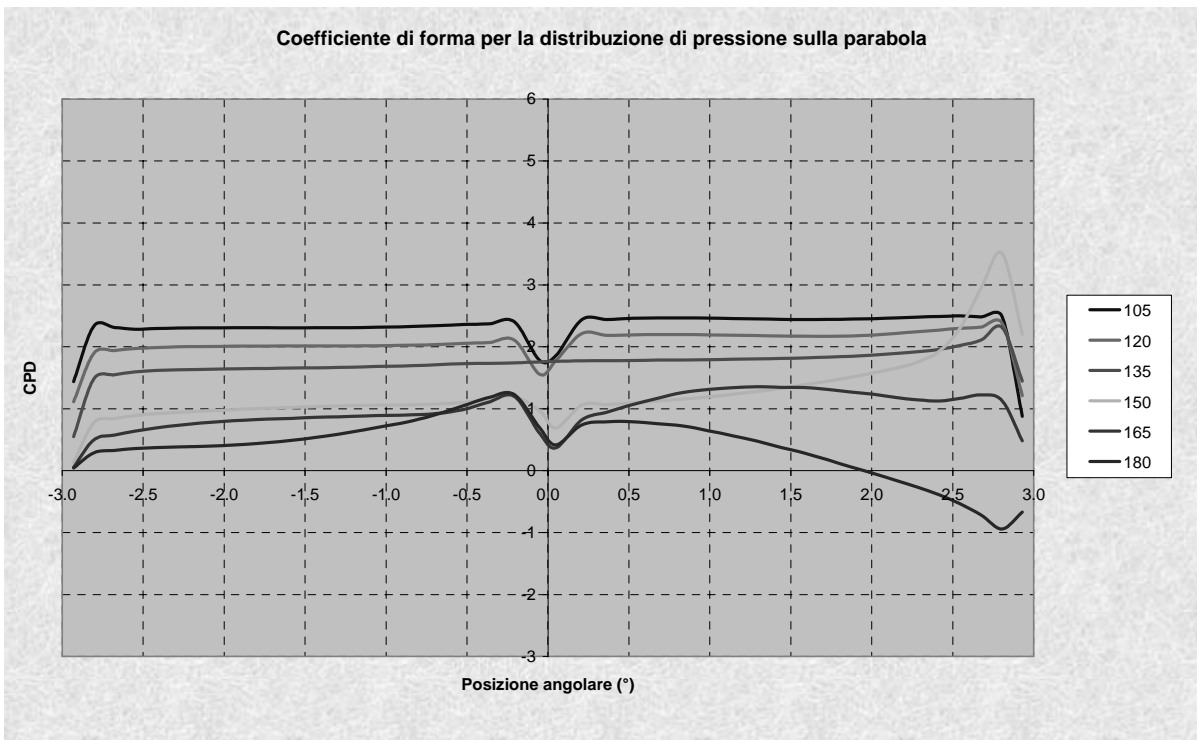
*Figura 3-25*



*Figura 3-26*



*Figura 3-27*



*Figura 3-28*

### 3.7 Limiti di applicabilità

Dalle analisi numeriche precedenti si sono ricavate le azioni esercitate dal vento sul concentratore sotto forma di coefficienti di forma per la struttura in esame. Tale dato risulta essere di fondamentale importanza per il dimensionamento e la verifica della struttura.

Occorre però tener presente che i dati riportati sono stati ottenuti esclusivamente per via numerica e che, sebbene le condizioni al contorno siano state “ben poste” ed il codice di calcolo sia estesamente utilizzato, i codici di fluidodinamica sono ancora oggi “non certificati”.

In sostanza, per un corretto utilizzo dei risultati, questi dovrebbero essere comunque confermati attraverso prove sperimentali condotte in galleria del vento oppure direttamente in campo. Un esempio di test sperimentale è mostrato in Figura 3-29 e in Figura 3-30.



*Figura 3-29 – Modello di collettore parabolico lineare strumentato*



*Figura 3-30 – Modello di campo solare*

Il risultato di queste prove dovrebbe essere sia di tipo quantitativo (distribuzione di pressione) che qualitativo (direzione dei flussi, localizzazione e dimensione dei vortici (esempi mostrati in Figura 3-31 e Figura 3-32).

L'assenza di una conferma sperimentale riduce l'attendibilità dei risultati ottenuti e ne limita il loro utilizzo.



*Figura 3-31 – Distribuzione linee di corrente per un eliostato*



*Figura 3-32 – Distribuzione linee di corrente per un collettore piano*

### **3.8 Conclusioni**

Attraverso il lavoro presentato in questo capitolo, sono valutate per via numerica le azioni indotte dal vento su un collettore solare parabolico-lineare in termini di pressioni, forze e momenti.

L'analisi fluidodinamica, basata sulle indicazioni fornite dalla normativa italiana ed europea e condotta utilizzando il modulo CFD Flotran/Ansys, ha inoltre permesso di ricavare i coefficienti di forma del collettore relativi alle azioni sopra indicate.

La conoscenza di questi coefficienti di forma consente di ottenere i carichi sulla struttura, sia integrati che distribuiti, dovuti al vento per qualsiasi posizione del collettore e velocità del vento.

In conclusione, vanno sottolineati i limiti di validità delle simulazioni qui presentate:

- ☞ Le simulazioni sono state condotte imponendo delle condizioni al contorno “ben poste” e che scaturiscono dalle indicazioni trovate in letteratura, dalla esperienza maturata in questo ambito e da una serie di analisi di sensibilità condotte in precedenza.
- ☞ Una analisi di sensibilità più approfondita dovrebbe completare l'aspetto puramente numerico fornendo una idea della variabilità della soluzione trovata al variare delle condizioni al contorno.
- ☞ Occorre tenere sempre presente che i codici di fluidodinamica sono “di fatto” non certificati. Questo significa che un problema numericamente “ben posto” potrebbe nella realtà avere un comportamento diverso dalla previsione. Ciò che può condurre a differenze anche importanti tra la numerica e la realtà rimane principalmente la bontà del modello di turbolenza utilizzato. Notoriamente, il modello K-epsilon è un modello che funziona bene lontano dalle pareti: nel nostro caso invece l'importanza delle pareti (sulla parete della parabola si vanno a determinare i carichi) e della loro interazione (per posizioni tra 60 e 300 le pareti di terreno e parabola si avvicinano) potrebbe essere rilevante.

Da quanto detto ne consegue che i risultati ottenuti per via numerica hanno la necessità, per essere affidabili, di trovare riscontro nella realtà ovvero nei dati ottenuti per via sperimentale (galleria del vento, prove in campo ben organizzate, etc.).

## 4 Analisi di sensibilità sul modello numerico

### 4.1 Introduzione

L'ingegneria computazionale ed in generale la scienza computazionale si occupa dell'uso di metodi di calcolo per la simulazione di eventi fisici e di sistemi ingegneristici. In particolare la CFD (Computational Fluid Dynamics) consiste nell'uso di modelli (set semplificati di equazioni) al fine di simulare il comportamento di un sistema fluido reale.

Nelle analisi CFD si deve individuare una zona di volume finito nella quale si vuole andare ad indagare il comportamento del fluido. Il fatto di considerare una zona circoscritta nello spazio non significa comunque che si possa trascurare la presenza del 'mondo esterno' a tale zona, ma al contrario bisogna simulare correttamente tale presenza all'interno del modello di calcolo; ciò si ottiene attraverso una corretta valutazione delle dimensioni del dominio e l'impostazione delle condizioni al contorno sulla sua frontiera.

Una volta individuato il dominio bisogna procedere alla sua discretizzazione per la realizzazione della griglia sulla quale si appoggia il modello computazionale; tale modello è la versione discretizzata del modello matematico, che rappresenta numericamente il modello fisico, progettata per essere implementata su computer.

Da quanto detto precedentemente si capisce l'importanza della corretta impostazione sia delle dimensioni del dominio sia della sua discretizzazione; e quindi la necessità di svolgere una analisi di sensibilità al fine di valutare come varia la soluzione numerica al variare delle due precedenti impostazioni.

Nel presente lavoro sono riportati i risultati ottenuti dalle analisi di sensibilità condotte sulla magliatura e sulle dimensioni del dominio del modello utilizzato per la valutazione numerica dell'azione del vento su concentratori parabolici lineari (capitolo 3 e riferimento [3]).

### 4.2 Calcolo di riferimento

Come calcolo di riferimento, dal quale partire con le modifiche al fine si svolgere l'analisi di sensibilità, si è considerato il caso  $\alpha = +30^\circ$  e velocità del vento  $V=28\text{m/s}$  (Figura 4-1) svolto nei calcoli effettuati per la valutazione numerica dell'azione del vento su concentratori parabolici lineari [1].

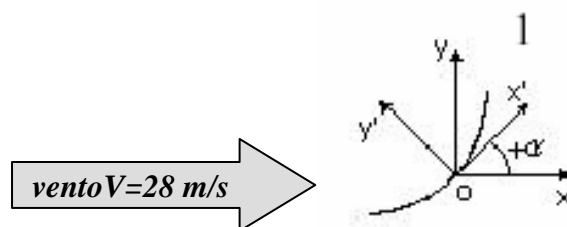


Figura 4-1

A parte le modifiche alle dimensioni del dominio ed alle dimensioni della magliatura non sono state apportate altre modifiche al calcolo di riferimento.

### 4.3 Calcoli di Sensibilità

Sono stati condotti due differenti tipi di calcoli di sensibilità: il primo riguardo alla discretizzazione spaziale (la mesh), il secondo riguardo alla dimensione del dominio.

#### 4.3.1 Discretizzazione spaziale

Con la discretizzazione spaziale si sostituisce lo spazio continuo con un numero finito di punti nei quali si determina il valore numerico delle variabili in gioco; quindi l'accuratezza della simulazione numerica dipende direttamente dalle dimensioni della mesh. Inoltre la dimensione della griglia di magliatura deve essere sufficientemente piccola per simulare tutte le caratteristiche del flusso reale, ed in alcuni casi l'unico modo per essere sicuri di avere ben simulato la fenomenologia del flusso è quello di raffinare la magliatura sull'intero dominio. Il primo calcolo di sensibilità ha quindi lo scopo di verificare in che modo una variazione del numero di elementi e nodi nel quale è suddiviso il dominio influenza i risultati ottenuti dal calcolo, sia per verificare l'accuratezza del risultato, sia per verificare di avere bene individuato la fenomenologia del flusso.

Nella Tabella 4-1 sono riportate le caratteristiche delle magliature utilizzate nei calcoli. Per ottenere la variazione della discretizzazione del dominio rispetto al caso di riferimento (Caso10) si sono moltiplicati i numeri di divisioni dei vari elementi geometrici per un fattore di scala.

	Caso 08	Caso 10	Caso 12	Caso 14
Fattore di scala	0.8	1	1.2	1.4
n. NODI	39582	62465	88821	120122
n. nodi/n. nodi rif.	0.63	1.00	1.42	1.92
n. ELEMENTI	38622	61263	87383	118447
n. elem/n. elem. rif.	0.63	1.00	1.43	1.93

Tabella 4-1

### 4.3.2 Dimensione del dominio

Nelle simulazioni dell'ingegneria computazionale bisogna individuare una zona di interesse (dominio) all'interno della quale eseguire la simulazione ed imporre le condizioni al contorno (boundary conditions) sulla frontiera del dominio in esame al fine di considerare nella simulazione la presenza del mondo esterno al dominio stesso. L'introduzione delle condizioni al contorno equivale ad imporre ad alcune variabili in gioco di assumere ben determinati valori.

Nel caso in esame la presenza di un oggetto all'interno di un flusso comporta la modifica della traiettoria di un certo numero di particelle fluide le cui linee di flusso si trovano in una zona circostante l'oggetto, mentre tale variazione può essere trascurata al di fuori di tale zona.

Da quanto detto si capisce quindi l'importanza della corretta individuazione del dominio: se il dominio è considerato troppo piccolo, le particelle fluide al suo esterno risentirebbero ancora della presenza dell'oggetto ma l'imposizione delle condizioni al contorno, che in questo caso corrispondono a condizioni sulle componenti di velocità del fluido e sulla pressione, forzano il flusso ad assumere le condizioni di flusso indisturbato sulla frontiera del dominio stesso andando quindi ad influire sul comportamento delle particelle all'interno del dominio, creando nella simulazione un flusso non reale, e di conseguenza i risultati così ottenuti risultano affetti da un certo errore.

Nella Figura 4-2 è riportato lo schema del dominio in esame e nella Tabella 4-2 sono riportate le caratteristiche dei domini confrontati. Nel passare da un dominio all'altro si sono modificate le magliature in modo da mantenere circa costante la dimensione degli elementi rispetto al caso di riferimento.

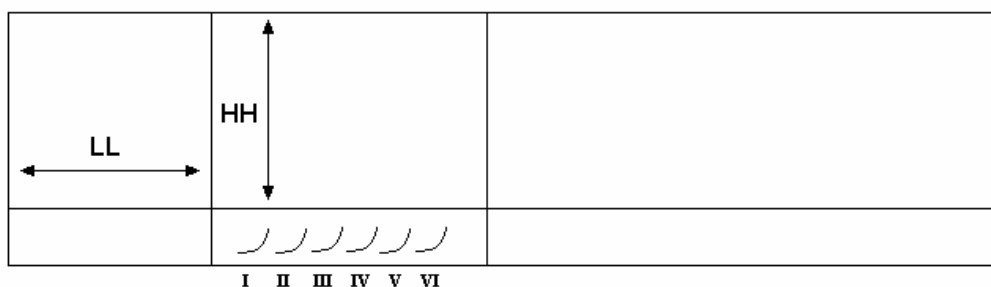


Figura 4-2

	CASO 10	CASO Ant	CASO Sup	CASO Ant-Sup
HH (m)	~ 37	~ 37	~ 74	~ 74
LL (m)	~ 23	~ 46	~ 23	~ 46

Tabella 4-2

#### 4.4 Risultati

In questo paragrafo sono riportati i risultati ottenuto dai vari calcoli di sensibilità eseguiti nel presente lavoro, per semplicità il confronto tra i risultati è stato condotto attraverso la comparazione di tre variabili globali per ogni parabola (essendo sei le parabole, si hanno complessivamente  $3 \times 6 = 18$  variabili per ogni calcolo), ritenute ben rappresentative di tutto il fenomeno. Le tre variabili sono:

1. la forza orizzontale,
2. la forza verticale,
3. il momento torcente;

applicate al vertice di ogni parabola (Figura 4-3).

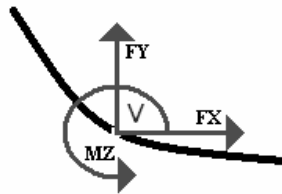


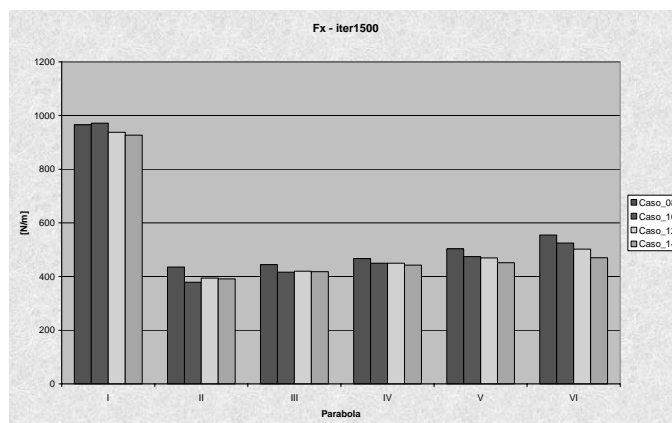
Figura 4-3 - Variabili globali per ogni parabola.

Il confronto tra i risultati è stato fatto a due diversi passi di iterazione, a 1500 ed a 3000, e per ogni variabile è riportata la variazione percentuale rispetto alla corrispondente del caso di riferimento (Caso10):

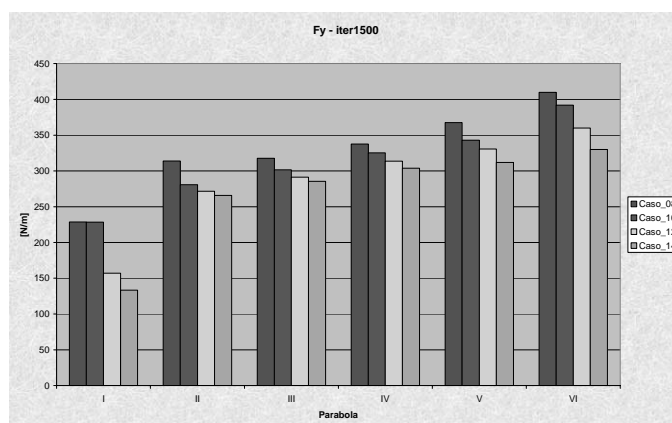
$$\text{var \%} = \frac{Val_{InEsame} - Val_{Caso10}}{Val_{Caso10}}.$$

### 4.4.1 Sensibilità alla discretizzazione spaziale

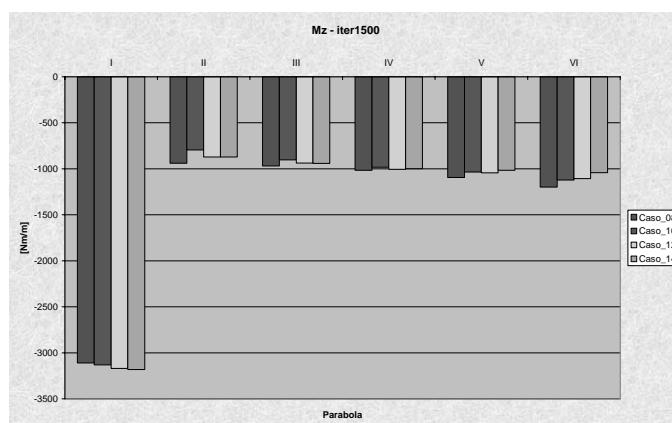
Da *Figura 4-4* a *Figura 4-6* sono riportati rispettivamente i grafici delle  $F_x$ ,  $F_y$  e  $M_z$  a 1500 iterazioni, e da *Tabella 4-3* a *Tabella 4-5* sono riportati i valori numerici con le variazioni percentuali.



*Figura 4-4 - Componente  $F_x$  alla iterazione 1500*



*Figura 4-5 - Componente  $F_y$  alla iterazione 1500*



*Figura 4-6 - Componente  $M_z$  alla iterazione 1500*

Parabola	Caso_08	Caso_10	Caso_12	Caso_14
I	966	<b>971</b>	938	927
var %	-0,6%		-3,5%	-4,5%
II	436	<b>379</b>	395	391
var %	14,9%		4,1%	3,2%
III	445	<b>416</b>	420	418
var %	6,8%		0,9%	0,5%
IV	468	<b>450</b>	450	443
var %	3,8%		-0,1%	-1,7%
V	504	<b>474</b>	470	452
var %	6,1%		-1,0%	-4,7%
VI	555	<b>525</b>	503	470
var %	5,7%		-4,3%	-10,6%

Tabella 4-3 - Valori di FX (iter.1500) e differenze percentuali rispetto a Caso10

Parabola	Caso_08	Caso_10	Caso_12	Caso_14
I	229	<b>228</b>	157	133
var %	0,0%		-31,2%	-41,6%
II	314	<b>281</b>	272	266
var %	11,8%		-3,2%	-5,3%
III	318	<b>302</b>	291	285
var %	5,3%		-3,5%	-5,4%
IV	338	<b>325</b>	314	304
var %	3,8%		-3,6%	-6,6%
V	367	<b>343</b>	331	312
var %	7,2%		-3,5%	-9,1%
VI	410	<b>392</b>	360	330
var %	4,6%		-8,1%	-15,8%

Tabella 4-4 - Valori di FY (iter.1500) e differenze percentuali rispetto a Caso10

Parabola	Caso_08	Caso_10	Caso_12	Caso_14
I	-3110	<b>-3132</b>	-3168	-3182
var %	-0,7%		1,1%	1,6%
II	-939	<b>-796</b>	-871	-872
var %	18,0%		9,5%	9,6%
III	-969	<b>-902</b>	-938	-942
var %	7,4%		3,9%	4,4%
IV	-1016	<b>-983</b>	-1005	-997
var %	3,4%		2,2%	1,5%
V	-1095	<b>-1034</b>	-1044	-1016
var %	5,8%		0,9%	-1,8%
VI	-1199	<b>-1122</b>	-1106	-1042
var %	6,9%		-1,4%	-7,2%

Tabella 4-5 - Valori di MZ (iter.1500) e differenze percentuali rispetto a Caso10

Da Figura 4-7 a Figura 4-9 sono riportati rispettivamente i grafici delle  $F_x$ ,  $F_y$  e  $M_z$  a 3000 iterazioni, e da Tabella 4-6 a Tabella 4-8 sono riportati i valori numerici con le variazioni percentuali.

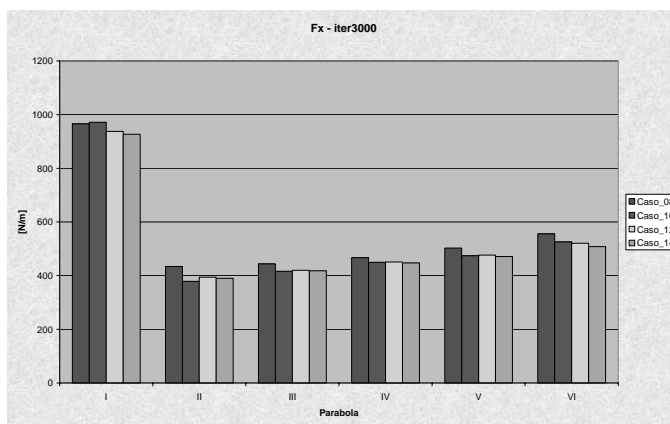


Figura 4-7 - Componente  $F_x$  alla iterazione 3000

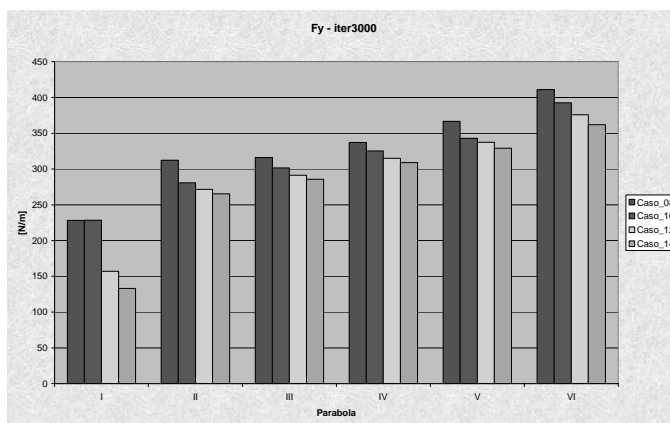


Figura 4-8 - Componente  $F_y$  alla iterazione 3000

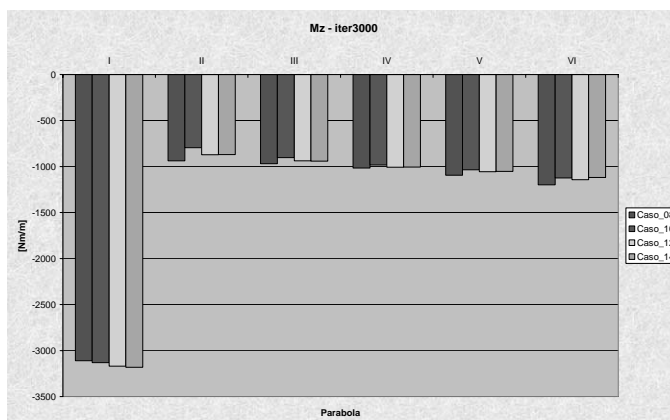


Figura 4-9 - Componente  $M_z$  alla iterazione 3000

Parabola	Caso_08	Caso_10	Caso_12	Caso_14
I	966	<b>971</b>	938	927
var %	-0,6%		-3,5%	-4,5%
II	435	<b>379</b>	394	391
var %	14,7%		4,0%	3,0%
III	444	<b>416</b>	420	418
var %	6,6%		0,9%	0,4%
IV	467	<b>450</b>	451	448
var %	3,7%		0,2%	-0,6%
V	503	<b>474</b>	477	471
var %	6,0%		0,4%	-0,7%
VI	556	<b>526</b>	521	508
var %	5,7%		-1,0%	-3,3%

Tabella 4-6 - Valori di FX (iter.3000) e differenze percentuali rispetto a Caso10

Parabola	Caso_08	Caso_10	Caso_12	Caso_14
I	228	<b>228</b>	157	133
var %	-0,1%		-31,3%	-41,7%
II	312	<b>281</b>	272	265
var %	11,2%		-3,3%	-5,6%
III	316	<b>302</b>	291	286
var %	4,8%		-3,4%	-5,4%
IV	337	<b>325</b>	315	309
var %	3,6%		-3,1%	-5,0%
V	367	<b>343</b>	337	329
var %	6,9%		-1,7%	-4,1%
VI	411	<b>393</b>	376	362
var %	4,7%		-4,3%	-7,8%

Tabella 4-7 - Valori di FY (iter.3000) e differenze percentuali rispetto a Caso10

Parabola	Caso_08	Caso_10	Caso_12	Caso_14
I	-3110	<b>-3132</b>	-3168	-3182
var %	-0,7%		1,1%	1,6%
II	-938	<b>-796</b>	-871	-870
var %	17,9%		9,5%	9,4%
III	-970	<b>-902</b>	-938	-941
var %	7,4%		3,9%	4,3%
IV	-1016	<b>-983</b>	-1007	-1005
var %	3,3%		2,5%	2,3%
V	-1094	<b>-1035</b>	-1056	-1052
var %	5,7%		2,1%	1,7%
VI	-1200	<b>-1123</b>	-1142	-1119
var %	6,8%		1,7%	-0,4%

Tabella 4-8 Valori di MZ (iter.3000) e differenze percentuali rispetto a Caso10

### 4.4.2 Sensibilità alla dimensione del dominio

Da Figura 4-10 a Figura 4-12 sono riportati rispettivamente i grafici delle  $F_x$ ,  $F_y$  e  $M_z$  a 1500 iterazioni, e da Tabella 4-9 a Tabella 4-11 sono riportati i valori numerici con le variazioni percentuali.

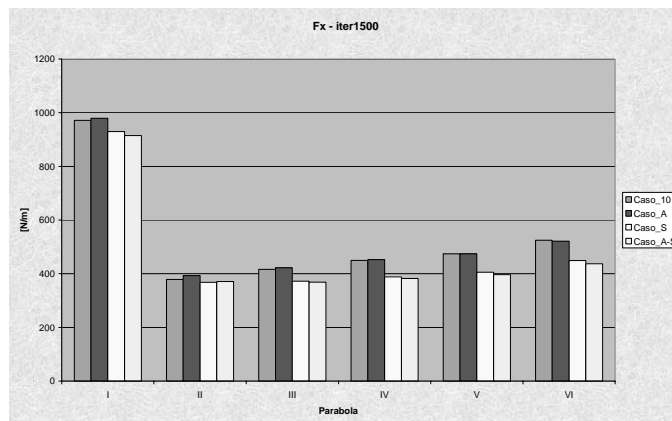


Figura 4-10 - Componente  $F_x$  alla iterazione 1500

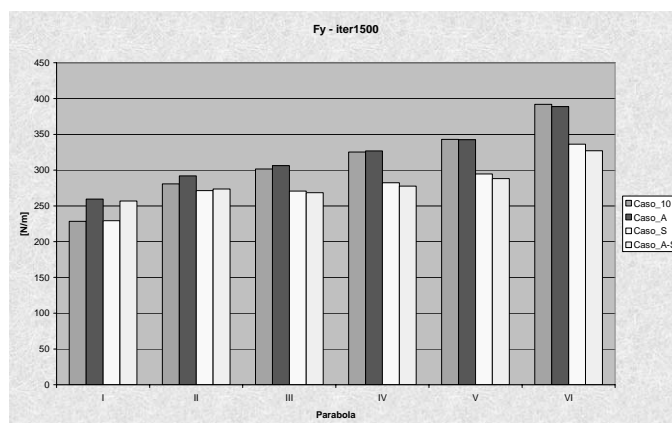


Figura 4-11 - Componente  $F_y$  alla iterazione 1500

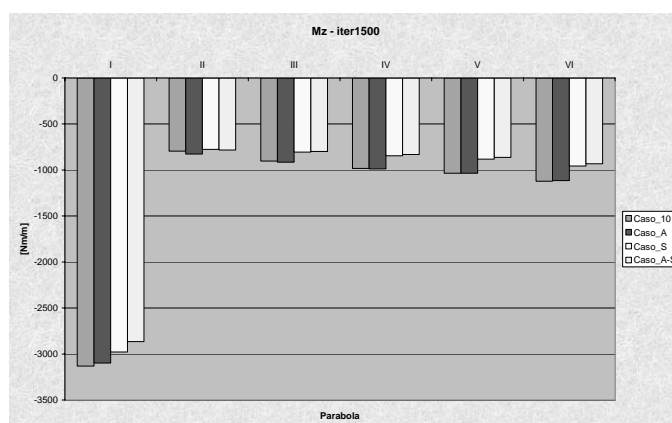


Figura 4-12 - Componente  $M_z$  alla iterazione 1500

Parabola	Caso_10	Caso_A	Caso_S	Caso_A-S
I var %	<b>971</b>	980 0,9%	930 -4,3%	915 -5,8%
II var %	<b>379</b>	394 3,8%	368 -2,9%	371 -2,1%
III var %	<b>416</b>	422 1,5%	372 -10,6%	369 -11,4%
IV var %	<b>450</b>	453 0,5%	389 -13,6%	382 -15,1%
V var %	<b>474</b>	474 -0,1%	406 -14,5%	397 -16,4%
VI var %	<b>525</b>	522 -0,7%	449 -14,5%	437 -16,8%

Tabella 4-9 - Valori di FX (iter.1500) e differenze percentuali rispetto a Caso10

Parabola	Caso_10	Caso_A	Caso_S	Caso_A-S
I var %	<b>228</b>	260 13,6%	229 0,4%	257 12,4%
II var %	<b>281</b>	292 4,0%	271 -3,4%	274 -2,6%
III var %	<b>302</b>	306 1,5%	271 -10,3%	268 -11,1%
IV var %	<b>325</b>	327 0,5%	282 -13,2%	278 -14,7%
V var %	<b>343</b>	342 -0,1%	295 -14,1%	288 -16,0%
VI var %	<b>392</b>	389 -0,8%	336 -14,2%	327 -16,5%

Tabella 4-10 - Valori di FY (iter.1500) e differenze percentuali rispetto a Caso10

Parabola	Caso_10	Caso_A	Caso_S	Caso_A-S
I var %	<b>-3132</b>	-3097 -1,1%	-2978 -4,9%	-2865 -8,5%
II var %	<b>-796</b>	-826 3,9%	-776 -2,5%	-783 -1,6%
III var %	<b>-902</b>	-915 1,4%	-805 -10,8%	-798 -11,6%
IV var %	<b>-983</b>	-988 0,5%	-846 -14,0%	-831 -15,4%
V var %	<b>-1034</b>	-1034 0,0%	-882 -14,8%	-863 -16,6%
VI var %	<b>-1122</b>	-1115 -0,6%	-958 -14,7%	-932 -16,9%

Tabella 4-11 - Valori di MZ (iter.1500) e differenze percentuali rispetto a Caso10

Da Figura 4-13 a Figura 4-15 sono riportati rispettivamente i grafici delle  $F_x$ ,  $F_y$  e  $M_z$  a 3000 iterazioni, e da Tabella 4-12 a Tabella 4-14 sono riportati i valori numerici con le variazioni percentuali.

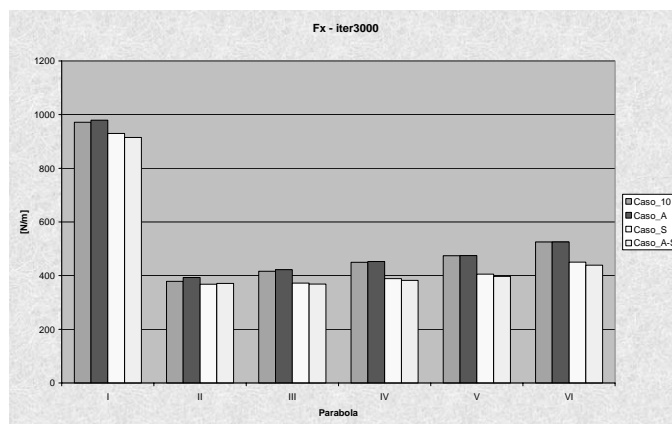


Figura 4-13 Componente  $F_x$  alla iterazione 3000

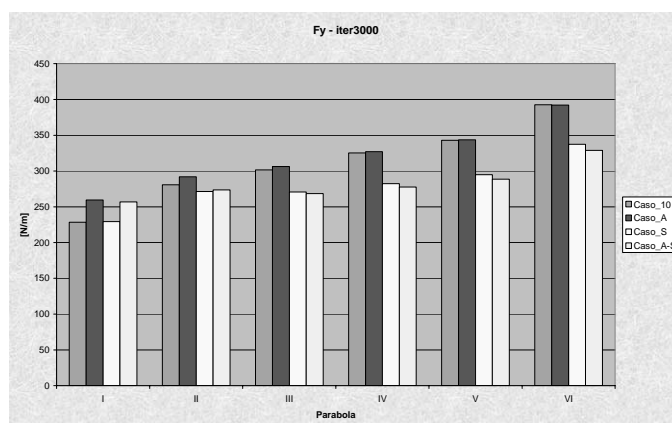


Figura 4-14 - Componente  $F_y$  alla iterazione 3000

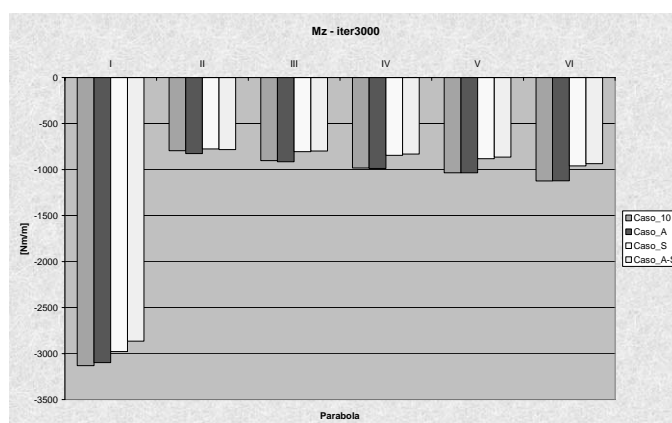


Figura 4-15 - Componente  $M_z$  alla iterazione 3000

Parabola	Caso_10	Caso_A	Caso_S	Caso_A-S
I var %	<b>971</b>	980 0,9%	930 -4,3%	915 -5,8%
II var %	<b>379</b>	394 3,8%	368 -2,9%	371 -2,1%
III var %	<b>416</b>	422 1,5%	372 -10,6%	369 -11,4%
IV var %	<b>450</b>	453 0,5%	389 -13,6%	383 -15,1%
V var %	<b>474</b>	475 0,1%	406 -14,4%	397 -16,3%
VI var %	<b>526</b>	525 -0,1%	451 -14,4%	439 -16,5%

Tabella 4-12 - Valori di FX (iter.3000) e differenze percentuali rispetto a Caso10

Parabola	Caso_10	Caso_A	Caso_S	Caso_A-S
I var %	<b>228</b>	260 13,6%	229 0,4%	257 12,4%
II var %	<b>281</b>	292 4,0%	271 -3,4%	274 -2,6%
III var %	<b>302</b>	306 1,5%	271 -10,3%	268 -11,0%
IV var %	<b>325</b>	327 0,6%	282 -13,2%	278 -14,6%
V var %	<b>343</b>	344 0,2%	295 -14,0%	289 -15,9%
VI var %	<b>393</b>	392 -0,1%	337 -14,1%	329 -16,3%

Tabella 4-13 - Valori di FY (iter.3000) e differenze percentuali rispetto a Caso10

Parabola	Caso_10	Caso_A	Caso_S	Caso_A-S
I var %	<b>-3132</b>	-3097 -1,1%	-2978 -4,9%	-2865 -8,5%
II var %	<b>-796</b>	-826 3,9%	-776 -2,5%	-783 -1,6%
III var %	<b>-902</b>	-916 1,5%	-805 -10,8%	-798 -11,6%
IV var %	<b>-983</b>	-988 0,5%	-846 -14,0%	-832 -15,4%
V var %	<b>-1035</b>	-1036 0,1%	-882 -14,7%	-864 -16,5%
VI var %	<b>-1123</b>	-1122 -0,1%	-960 -14,5%	-936 -16,7%

Tabella 4-14 - Valori di MZ (iter.3000) e differenze percentuali rispetto a Caso10

## 4.5 Analisi dei risultati

### 4.5.1 Convergenza

Nell'analizzare i risultati ottenuti dai precedenti calcoli di sensibilità si prenderanno in considerazione i risultati ottenuti dopo 3000 iterazioni di calcolo; la scelta è dettata dalla necessità di confrontare risultati di calcoli nei quali si sia raggiunta presumibilmente la stabilità numerica. Confrontando i valori numerici dei calcoli a 1500 e 3000 iterazioni riportati nelle tabelle precedenti si nota come i risultati nei primi due casi 08 e 10 rimangano praticamente invariati dopo 1500 iterazioni, mentre i risultati per le ultime file di parabole dei due ultimi casi 12 e 14 siano leggermente differenti tra 1500 e 3000 iterazioni.

Il motivo di questo comportamento è dovuto al fatto che più si aumenta il numero di nodi all'interno di una magliatura, che equivale ad un aumento del numero totale di gradi di libertà all'interno del modello, più aumenta il numero di iterazioni necessario per arrivare ad una stabilizzazione dei risultati; inoltre la discrepanza tra i risultati a 1500 e 3000 iterazioni avviene prevalentemente nelle ultime file di parabole poiché il calcolo inizia considerando il fluido in quiete nell'intero campo e con una velocità di ingresso data. Mano a mano che il calcolo procede numericamente il flusso procede dall'ingresso all'uscita del campo, e quindi investe prima le prime file raggiungendo in queste la convergenza numerica prima.

Tale comportamento è messo bene in luce, da Figura 4-16 a Figura 4-18, dagli andamenti delle tre componenti (FX, FY e MZ) dell'ultima parabola (VI) al variare del numero di iterazioni.

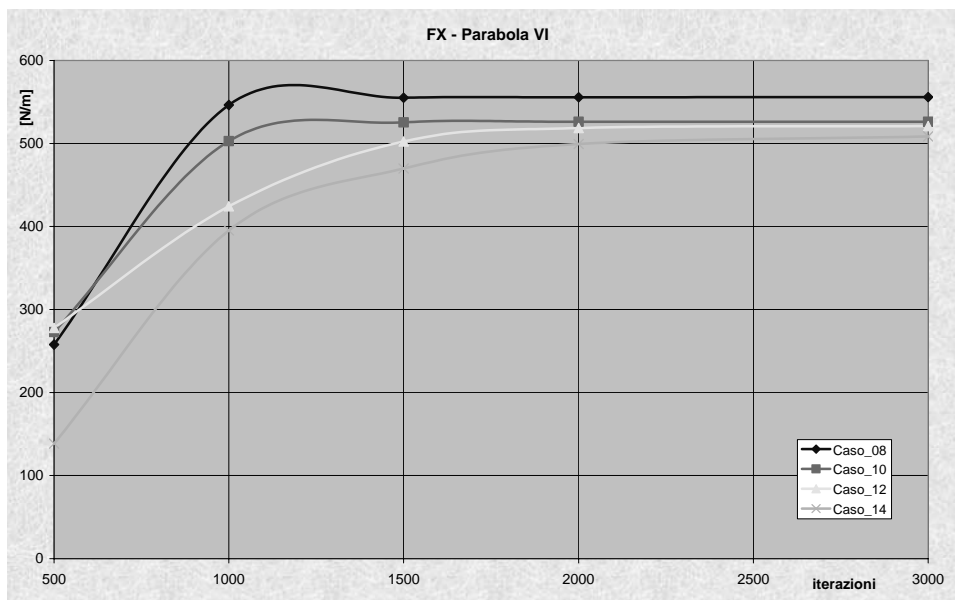


Figura 4-16 - Componente FX, parabola VI

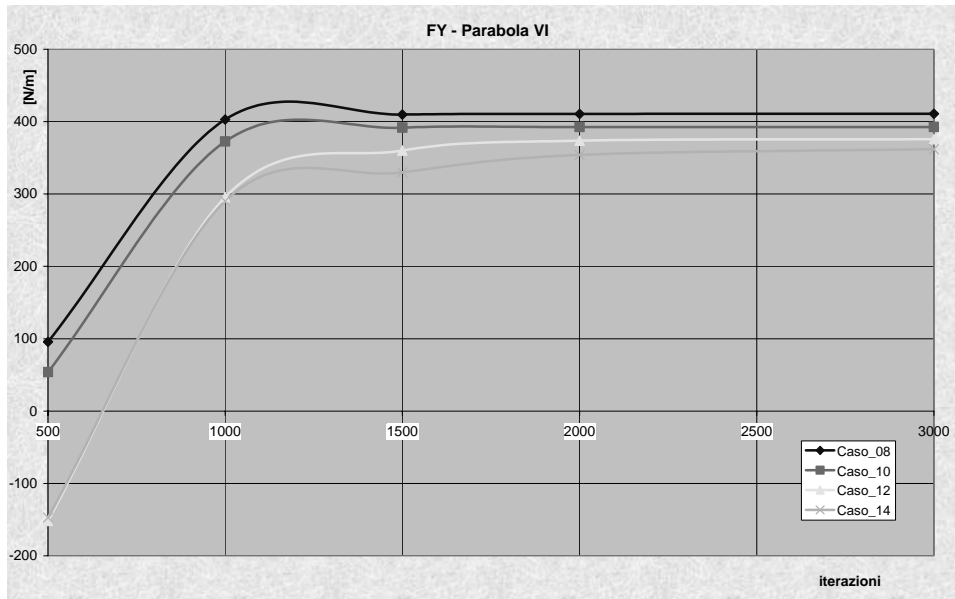


Figura 4-17 - Componente FY, parabola VI

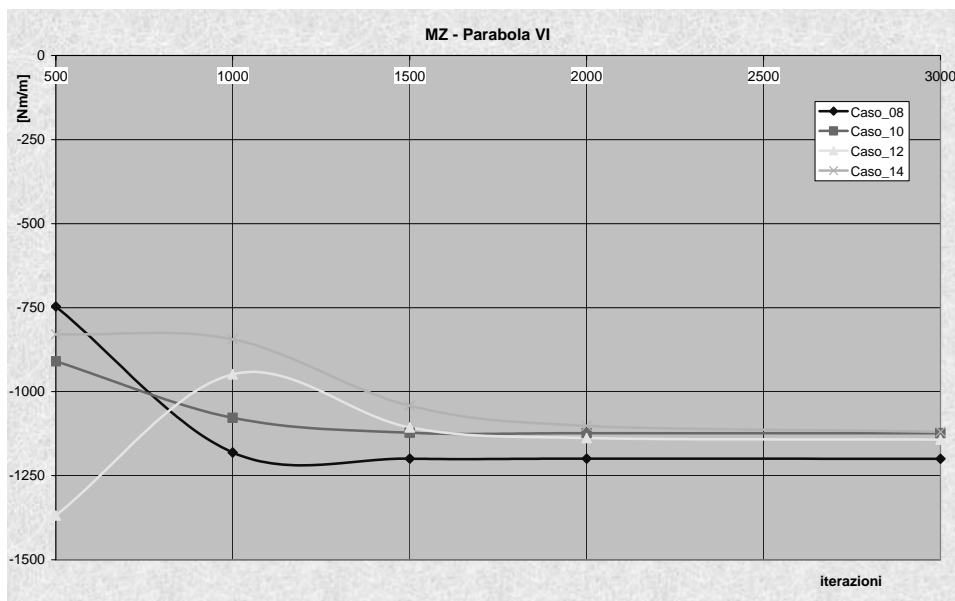


Figura 4-18 - Componente MZ, parabola VI

#### 4.5.2 Modifica discretizzazione spaziale

Analizzando i grafici della figure da Figura 4-7 a Figura 4-9 e le tabelle da Tabella 4-6 a Tabella 4-8, si nota come i valori ottenuti dai vari calcoli per la componente FX e la componente MZ siano in buon accordo tra di loro, e le differenze in percentuale rispetto al caso di riferimento 10 risultino tutte abbondantemente inferiori al 20% ed in particolare a parte il caso della seconda parabola del calcolo 08 le differenze siano inferiori al 10%.

I risultati ottenuti per la componente FY sono globalmente in accordo tra di loro, ma presentano una netta differenza numerica tra la prima fila dei calcoli 12 e 14 e quella dei

calcoli 08 e 10 con differenze dell'ordine del 40%, mentre per le altre parabole le differenze rimangono dell'ordine del 10-12%. Differenze così elevate (40-50%) possono essere spiegate considerando che si riferiscono a valori numerici relativamente piccoli in modulo e quindi maggiormente soggetti a errori di tipo numerico.

### **4.5.3 Modifica dimensioni del dominio**

Dall'analisi delle figure da Figura 4-13 a Figura 4-15 e delle tabelle da Tabella 4-12 a Tabella 4-14, si evince che globalmente i valori ottenuti per le componenti FX, FY e MZ sono in buon accordo tra di loro.

L'aumento delle dimensioni del campo davanti alle parabole (caso A e caso A-S) non produce un effetto rilevante sui risultati ottenuti: confrontando i valori numerici ottenuti per le varie componenti nei due casi 10 ed A e nei due casi S ed A-S, la cui differenza nelle dimensioni del campo è proprio l'aumento della dimensione anteriore, si nota come questi risultino simili tra di loro; l'unica eccezione è il caso della componente FY della prima parabola dove tale modifica al campo sembra produrre un aumento in modulo della componente.

L'aumento dell'altezza del campo produce invece una leggera riduzione del modulo di tutte le componenti di tutte le parabole ad eccezione del caso già visto precedentemente della componente FY della prima parabola.

Comunque le differenze tra i valori numerici sono abbondantemente inferiori al 20%, per cui rientrano nelle incertezze numeriche dei modelli agli elementi finiti.

## **4.6 Conclusioni**

Nel presente lavoro sono state svolte le analisi di sensibilità al variare delle dimensioni della magliatura ed al variare delle dimensioni del dominio, del modello di calcolo utilizzato per la valutazione numerica delle azioni del vento su concentratori parabolici lineari<sup>[3]</sup>.

In particolare nella prima analisi si è effettuato un primo calcolo riducendo la dimensione della magliatura di riferimento secondo un fattore 0.8 e due successivi calcoli aumentandola rispettivamente di un fattore 1.2 ed 1.4, portando in questo ultimo caso quasi ad un raddoppio del numero di nodi.

Nella seconda analisi di sensibilità si è modificata la dimensione del dominio aumentando in un primo caso la distanza tra la frontiera anteriore e le parabole, in un secondo caso la distanza tra le parabole e la frontiera superiore ed in un ultimo caso aumentando contemporaneamente entrambe le distanze.

I risultati numerici ottenuti dai vari calcoli hanno messo in luce un buon accordo tra questi e quelli ottenuti nel calcolo di riferimento, quindi si può ritenere di avere ben impostato sia le dimensioni della magliatura sia le dimensioni del dominio nel modello di calcolo utilizzato per la valutazione numerica delle azioni del vento su concentratori parabolici lineari.



## **5 Verifica della affidabilità del modello numerico attraverso prove sperimentali in galleria del vento**

### **5.1 Introduzione**

La progettazione dei concentratori solari parabolici richiede la conoscenza dell'azione esercitata dal vento, che è il carico principale della struttura, per verificare gli stati limiti sia ultimi o di collasso sia operativi. Le attuali norme sia italiane che europee (Eurocodice 1, rif.[2]) propongono una serie di regole per determinare l'azione del vento, in termini di distribuzione di pressione e di forze applicate alle strutture, nella fase di progetto. Tali norme sono indirizzate prevalentemente alla progettazione di edifici e strutture civili soggette all'azione del vento attraverso l'uso di coefficienti aerodinamici predefiniti. Per "costruzioni aventi forma o tipologia inusuale", le norme stabiliscono che "il vento può produrre effetti la cui valutazione richiede l'applicazione di specifiche procedure analitiche, numeriche o sperimentali adeguatamente verificate". Il collettore solare rientra in questa categoria di strutture e conseguentemente, i suoi coefficienti aerodinamici dovrebbero essere determinati utilizzando metodi numerici (codici CFD). Un approccio CFD permette un considerevole risparmio sia in termini di tempo che di costi ma richiede una appropriata validazione sperimentale.

Questo paragrafo è dedicato alla valutazione della affidabilità della risposta dei modelli di fluidodinamica utilizzati attraverso una serie di prove in galleria del vento. Nel caso di uno spazio aperto a 10 m dal suolo, è presente una velocità di riferimento del vento di circa 28 m/s ed una intensità di turbolenza di circa il 18%. In queste condizioni, in numero di Reynolds è talmente alto (circa  $10^7$ ) da generare condizioni di forte turbolenza. A partire dai dati sperimentali e/o numerici, i principali coefficienti aerodinamici, relativi all'azione del vento su di un concentratore parabolico lineare, possono essere determinati facendo riferimento alle equazioni riportate nel paragrafo 2.6. Tali coefficienti saranno calcolati ed utilizzati per confrontare i risultati sperimentali e quelli numerici.

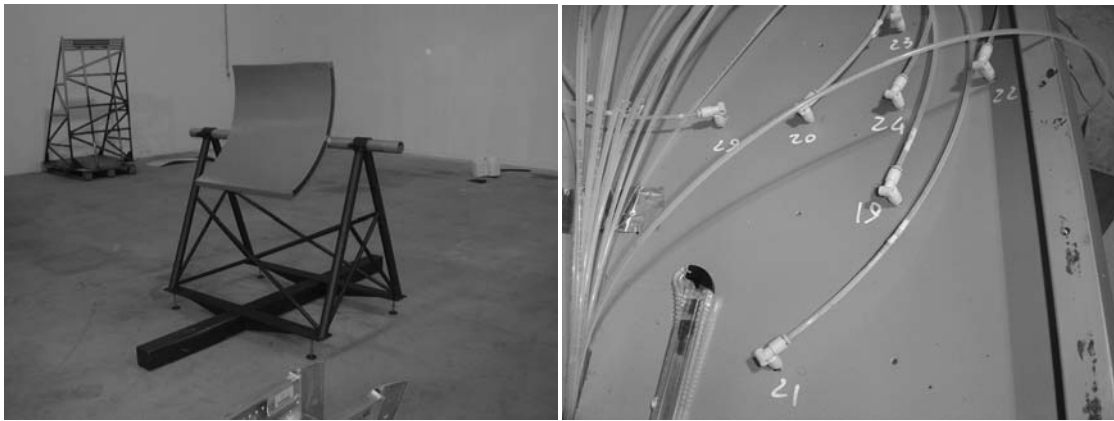
### **5.2 Le prove in galleria del vento**

Le prove sperimentali in galleria del vento sono state studiate, progettate e realizzate dall'ENEA e dal laboratorio di Scienza e Tecnologia dei Materiali (STM) dell'Università di Perugia sito in Terni. Le prove sono state realizzate su di un modello ridotto del collettore parabolico lineare utilizzando la galleria del vento del Dipartimento di Ingegneria Industriale di Perugia. Questa galleria del vento ha una sezione di prova di 2x2m ed è capace di produrre un flusso d'aria uniforme sino ad una velocità massima di 44m/s. Il tunnel ha una bilancia equipaggiata con celle di carico sia unidirezionali che bidirezionali così come con un apparato per la produzione di fumo. Tenendo in conto tali caratteristiche, è stata progettata e realizzata una struttura in acciaio con i seguenti requisiti:

- Lo specchio parabolico deve poter ruotare attorno ad un tubo di torsione per poter misurare la distribuzione di pressione sulla sua superficie e le forze conseguenti in funzione dell'angolo di rotazione.
- Le dimensioni dello specchio parabolico debbono garantire che il flusso d'aria incidente risulti essere il più uniforme possibile e che gli effetti di bordo del tunnel non influenzino la misura.

- Le dimensioni geometriche della struttura di supporto debbono consentire il corretto montaggio sulla bilancia, creando il minimo intralcio possibile al flusso di aria.
- La struttura deve avere una rigidità flessionale e torsionale tale da non indurre vibrazioni connesse alle condizioni di turbolenza che si stabiliscono su di essa.
- I tubicini di materiale plastico che misurano la pressione debbono essere connessi senza interferire con le misure stesse.

In conseguenza di ciò è stato realizzato un modello di concentratore parabolico lineare avente una apertura di 0.70m ed una lunghezza di 0.70m. E' stato necessario realizzare una struttura tipo sandwich per poter inserire al suo interno i tubicini di misura senza alterare il campo di flusso. La struttura di supporto del concentratore è stata realizzata tenendo in conto due opposti requisiti: è stato necessario realizzare una struttura che avesse, da un lato, la minore interferenza possibile con il flusso d'aria e, dall'altro lato, una rigidità tale da prevenire vibrazioni che possono alterare in modo inaccettabile le misure (Figura 5-1). Sulla superficie parabolica sono stati realizzati una serie di fori dove sono stati inseriti i tubicini di misura della pressione.



*Figura 5-1 – La struttura completa e un particolare interno al sandwich*

Le prove sperimentali sono state effettuate in due sessioni separate. La prima sessione (durata 3 giorni) è stata effettuata imponendo una velocità di uscita del condotto convergente di circa 44m/s. Invece, durante la seconda sessione (durata 2 giorni), la velocità è stata dimezzata ad approssimativamente 22m/s. I valori suddetti di velocità si riferiscono al flusso in assenza del concentratore. Per ogni velocità, le prove sono state effettuate con il concentratore disposto con diverse angolazioni da 0° a 330°, ad intervalli di 30°. L'angolazione del concentratore è definita attraverso l'angolo  $\alpha$  e segue la convenzione dei segni in un riferimento fisso xyz, come appare in Figura 5-2. Da qui in poi, indipendentemente dall'angolazione del concentratore, la parte anteriore della parabola è costituita dalla superficie concava e quella posteriore dalla superficie convessa. La Figura 5-2 mostra il concentratore parabolico durante l'una delle prove effettuate il primo giorno.

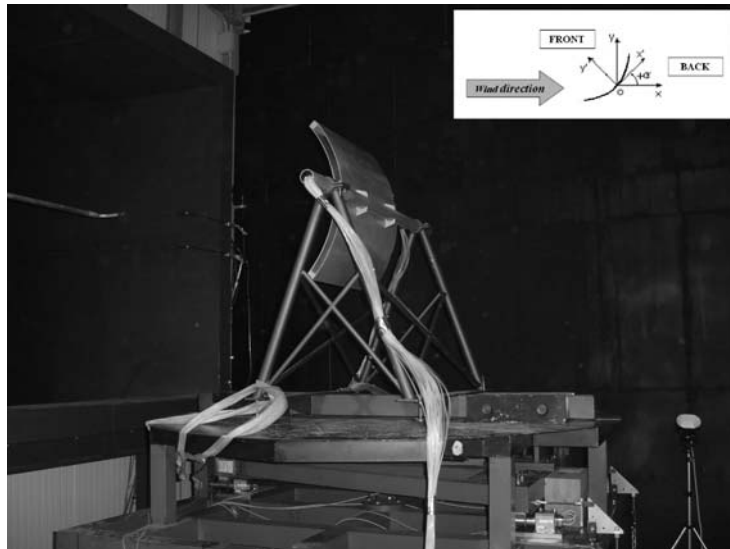


Figura 5-2 – Modello di concentratore parabolico lineare in fase di test con  $\alpha = 90^\circ$  e relativo sistema di riferimento.

Il software per l'acquisizione dati fornisce diverse uscite per ogni test. I dati più importanti includono: la pressione misurata con il sistema di acquisizione, le forze di spinta e portanza (in kg) e il momento di ribaltamento (in kgm). Per poter calcolare il momento  $M_z$  rispetto l'origine del sistema di riferimento xyz (posto al centro della superficie del concentratore), è necessario utilizzare i dati di ciascuna cella di carico e conoscere le distanze mostrate in Figura 5-3.

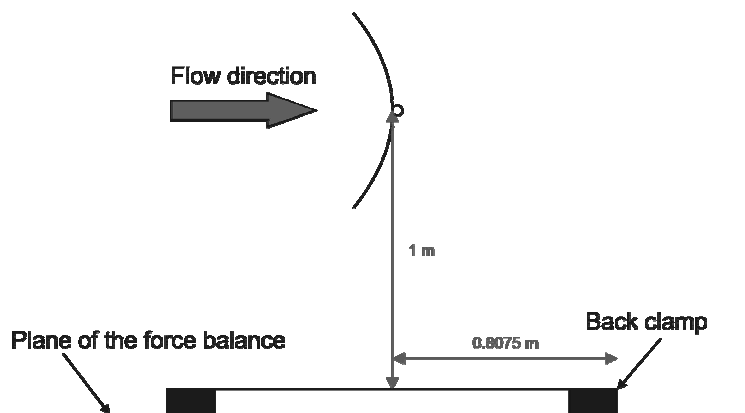


Figura 5-3 – Schema per il calcolo del momento ribaltante

I risultati sperimentali ottenuti nelle due sessioni di prove sono presentati sotto forma di coefficienti aerodinamici. Questo metodo è utile per poter eseguire un confronto numerico-sperimentale e fornisce risultati indipendenti dalla velocità imposta al flusso d'aria, come accade nel caso di elevati valori del numero di Reynolds.

I coefficienti aerodinamici relativi all'azione del vento sono stati calcolati dalla base delle relazioni riportate nel paragrafo 2.6. La velocità misurata con il tubo pitot è stata utilizzata per ottenere  $v_r$  mentre la proiezione dell'area del concentratore sul piano yz, quando questo si trova nella posizione angolare di  $90^\circ$ , è stata utilizzata per ottenere  $A_{ref}$  ( $A_{ref} = 0.49 \text{ m}^2$ ) e l'apertura dello specchio parabolico è stata utilizzata per misurare  $L_{ref}$  ( $L_{ref} = 0.70 \text{ m}$ ). Questi coefficienti possono essere ottenuti sia direttamente, attraverso le misure sulle celle di carico, sia indirettamente, integrando la distribuzione di pressione misurata sulla sezione mediana del concentratore. Nonostante il loro accordo

qualitativo, I coefficienti diretti ed indiretti calcolati mostrano una notevole differenza qualitativa (Figura 5-4).

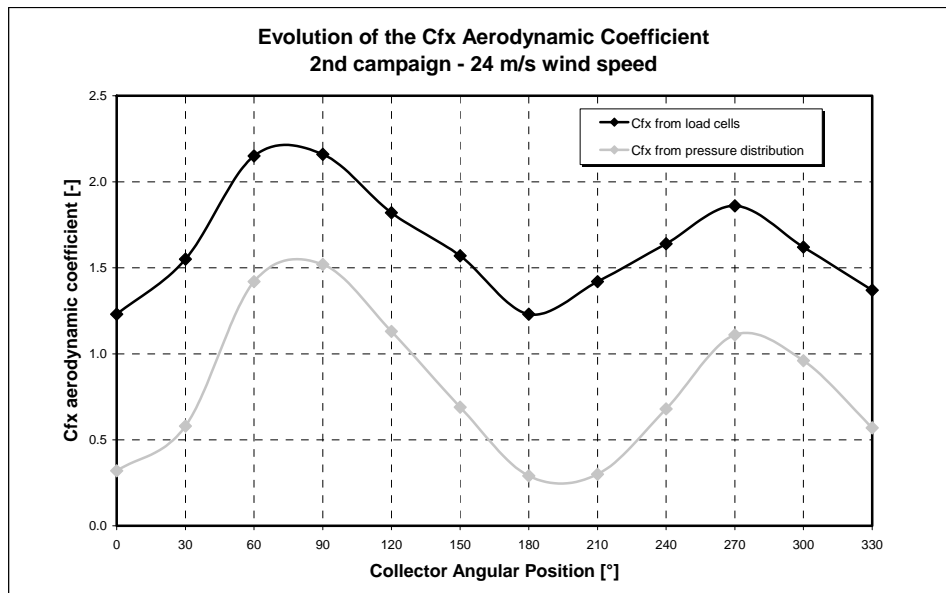


Figura 5-4 –Confronto tra i coefficienti aerodinamici  $C_{Fx}$  calcolati dai dati delle celle di carico (diretti) a dalla distribuzione di pressione sul concentratore (indiretti)

In particolare, i valori indiretti sono notevolmente inferiori di quelli diretti e sono ridotti di un fattore circa costante. Questi dati indicano chiaramente che la struttura di supporto del concentratore non è invisibile all'aria che fluisce su di essa, infatti, essa influenza pesantemente i dati misurati dalle celle di carico. Invece, i valori indiretti non dovrebbero essere eccessivamente influenzati dalla presenza della struttura di supporto e quindi possono fornire dati più affidabili. Per questa ragione, da ora in avanti saranno presi in considerazione soltanto questi ultimi dati.

La Figura 5-5 mostra in forma grafica l'evoluzione dei coefficienti aerodinamici di entrambe le sessioni di prova in funzione della posizione angolare del concentratore.

Questa evoluzione mostra che i valori relativi alle due sessioni di prova sono molto simili tra loro e sono fondamentalmente indipendenti dalla velocità del fluido. La differenza maggiore tra i coefficienti di forma delle due sessioni si può osservare ad una posizione angolare di circa  $+60^\circ$ . E' ovvio che sia la maggiore turbolenza sviluppata sia qualsiasi variazione, comunque lieve, delle condizioni di prova, possono aver influenzato la misura relativa a questa posizione. In considerazione delle incertezze che hanno condizionato alcune delle misure prese durante la prima sessione e la migliore qualità dei risultati sperimentali della seconda sessione, dovrebbe essere più appropriato prendere in considerazione da qui in poi solo le ultime misure.

Una ultima considerazione può essere fatta esaminando il filmato della prova con fumo tracciante fatta durante la seconda sessione. Sulla base delle dimensione limitate del modello, è ovvio che il flusso d'aria che investe il concentratore tende ad aggirare l'ostacolo, specialmente quando la resistenza è elevata (a  $90^\circ$ ) (Figura 5-6). Ciò rende le condizioni fluidodinamiche fondamentalmente tridimensionali.

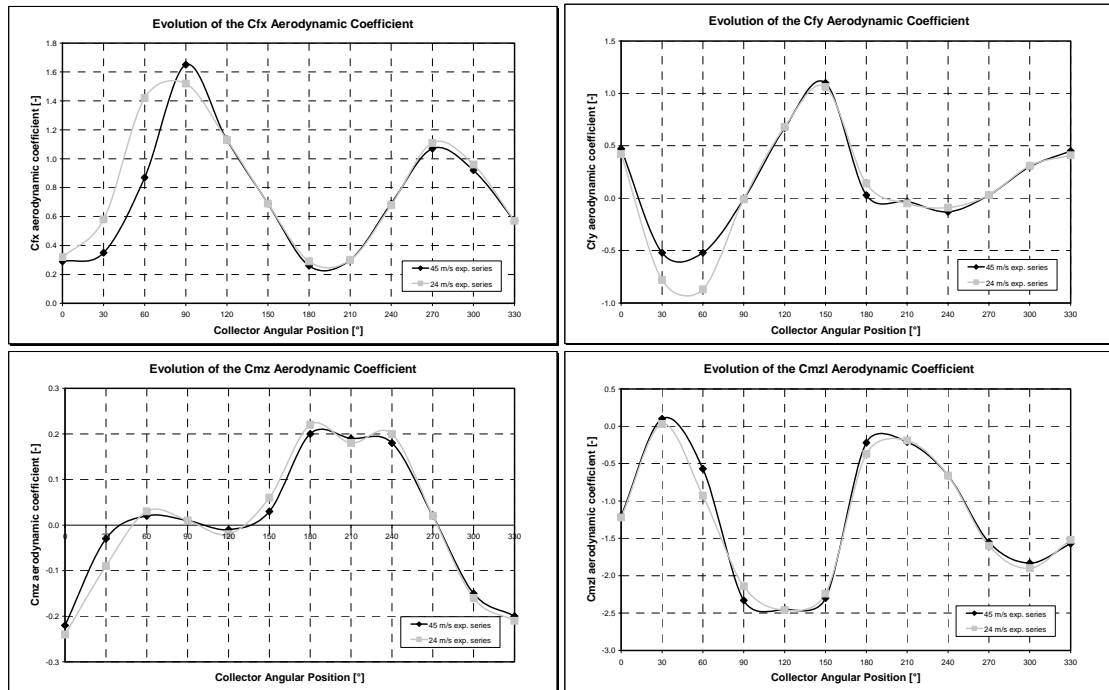


Figura 5-5 – Confronto tra i coefficienti aerodinamici  $C_{Fx}$ ,  $C_{Fy}$ ,  $C_{Mz}$  e  $C_{Mzl}$  relativi alle due sessioni sperimentali

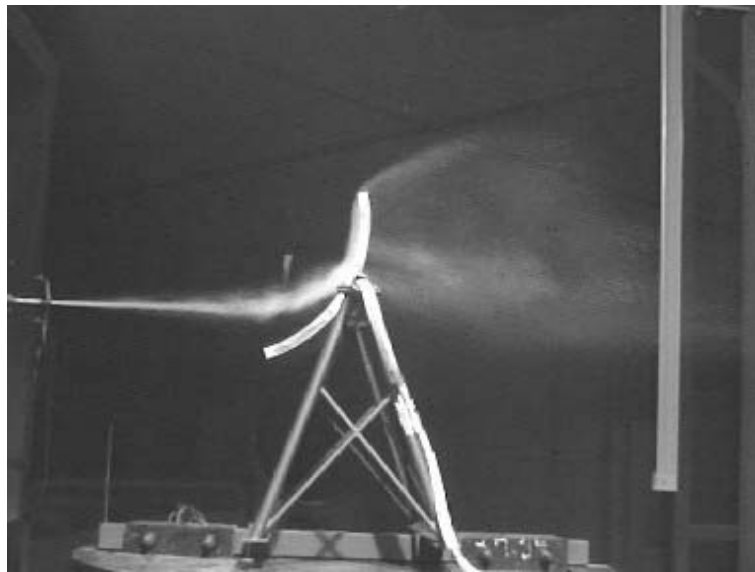


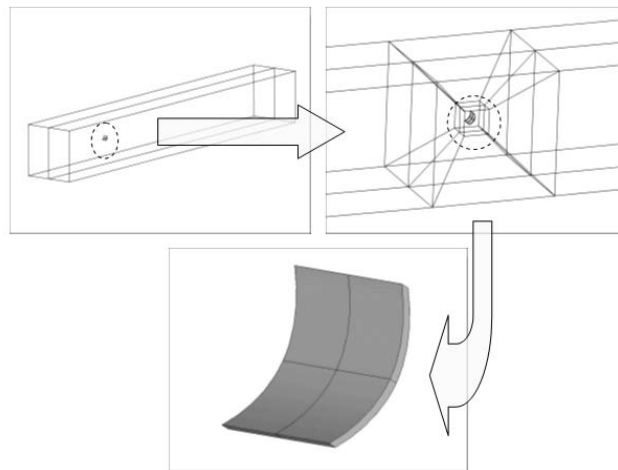
Figura 5-6 – Prove con fumo tracciante su un modello di collettore posizionato ad un angolo di +60°

### 5.3 Le simulazioni numeriche

Una analisi di problemi fluido-dinamici attraverso l'uso del calcolatore è uno strumento realmente utile per la comprensione di questi fenomeni. Per poter utilizzare i risultati numerici ottenuti con un certo margine di affidabilità, è opportuno confrontarli a fenomeni reali sia naturali che modellizzati in una galleria del vento. In questo

paragrafo saranno mostrati ed esaminati i risultati ottenuti attraverso una simulazione numerica in un dominio tridimensionale con l'intenzione di riprodurre i test sperimentali precedentemente menzionati. A tal fine, è stato utilizzato, per tutte le simulazioni numeriche, il modulo FLOTRAN del codice di calcolo agli elementi finiti ANSYS.

Nella realizzazione del modello geometrico tridimensionale, per ragioni di semplicità e per non sovraccaricare il computer, abbiamo preferito omettere la modellazione esatta della galleria del vento, in favore di un condotto con sezioni quadrate contenenti il concentratore parabolico lineare. Ancora una volta, per ragioni di semplicità, abbiamo scelto non modellare il tubo posteriore di torsione (Figura 5-7)



*Figura 5-7 – Condotto a sezioni quadrate e dettagli del modello geometrico usato*

L'analisi CFD si riferisce ad un singolo concentratore parabolico lineare con posizione angolare variabile fra  $0^\circ$  e  $330^\circ$ , ad intervalli  $30^\circ$ , rispetto alla direzione del vento. Il flusso considerato sarà certamente di tipo turbolento con il numero del Reynolds che è vicino a  $10^6$ . Per analizzare il flusso in condizione di turbolenza, ANSYS/Flotran consente l'uso di metodi RANS e la modellizzazione della turbolenza. Il modello usato per questo tipo di simulazione è stato il k- $\epsilon$  standard. Per quanto riguarda le condizioni al contorno, una velocità nulla è stata imposta lungo le pareti laterali e sulla superficie del concentratore ( $V_x=V_y=V_z=0$ ) mentre una velocità di 22m/s è stata imposta all'ingresso lungo la direzione x e nessuna velocità nelle altre due direzioni ( $V_y=V_z=0$ ). Alla uscita del condotto, è stato assunto che il fluido ritorni alla pressione atmosferica lontano dalla zona in esame e quindi è stata imposta una pressione relativa nulla. Riguardo questa simulazione, e' necessario notare che è stato deciso di simulare soltanto le prove della galleria del vento a bassa velocità, prendendo in considerazione i dati sperimentali disponibili di qualità migliore. L'intensità di turbolenza all'ingresso è stata trascurata, in accordo con il tipo di flusso generato durante le prove sperimentali. Al fine di ottenere una sicura convergenza così come la stabilità della soluzione e considerando il fatto che il movimento laterale del flusso aiuta ad ottenere una convergenza rapida, sono state realizzate 1500 iterazioni globali per ogni simulazione. Una verifica grafica dell'andamento dei risultati in funzione del numero di ripetizioni ha confermato a posteriori questa scelta.

La Figura 5-8 mostra le forze ed i momenti esercitati sulla struttura ed i rispettivi coefficienti aerodinamici. Alla luce della simmetria del problema, sono mostrate le sole componenti  $F_x$ ,  $F_y$  ed  $M_z$  così come il momento  $M_{zl}$  calcolato rispetto alla posizione del morsetto posteriore (momento di ribaltamento). L'assenza delle altre componenti è stata tuttavia verificata durante l'elaborazione dei dati numerici.

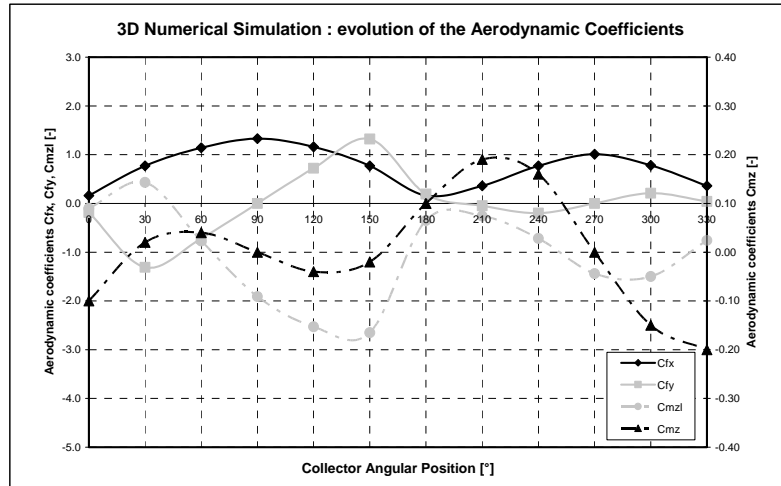


Figura 5-8 –Evoluzione dei coefficienti aerodinamici del concentratore da una simulazione numerica 3D

Per valutare l'effetto del flusso intorno al concentratore (l'effetto tridimensionale) sulle azioni esercitate su di esso, è stata inoltre realizzata una simulazione numerica bidimensionale. La configurazione 2D è più simile a quella dei concentratori disposti in linea, ognuno molto vicino al successivo. Approfittando della ridotta quantità di gradi di libertà, è stato possibile trattare un modello geometrico più dettagliato del precedente con la conseguente discretizzazione sia della sezione di test della galleria del vento che del tubo di torsione (Figura 5-9). I coefficienti aerodinamici ottenuti in questo caso sono indicati in Figura 5-10. Può essere immediatamente osservato che questi risultati sono molto superiori a quelli ottenuti con l'analisi 3D. Questo effetto era certamente prevedibile. Tuttavia, il fatto che i risultati siano molto più alti conduce ad una attenta riflessione sulla possibilità di riduzione del carico attraverso un maggiore distanziamento fra i moduli di una singola fila dei collettori.

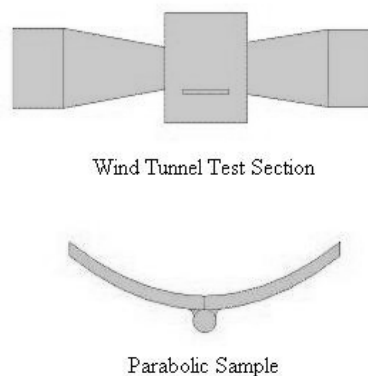


Figura 5-9 –modello geometrico 2D della sezione di prova della galleria del vento del concentratore parabolico con tubo di torsione

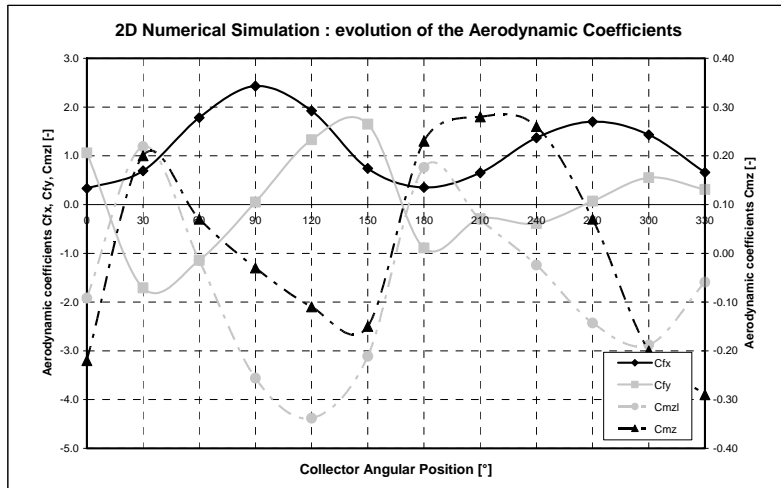


Figura 5-10 – Evoluzione dei coefficienti aerodinamici del concentratore da una simulazione numerica 2D

### 5.4 Confronto tra i risultati numerici e quelli sperimentali

I risultati ottenuti attraverso le simulazioni numeriche e le misure effettuate durante le prove sperimentali sono confrontati qui di seguito. Conseguentemente, sarà quindi possibile valutare la capacità di simulare il fenomeno fluido-dinamico, realizzato nella galleria del vento, utilizzando dei codici CFD. Questo confronto è stato realizzato utilizzando i coefficienti aerodinamici sia sperimentali che numerici ottenuti in precedenza. In particolare, sono stati scelti i coefficienti sperimentali “indiretti” ovvero quelli ottenuti per integrazione della distribuzione della pressione misurata durante la seconda sessione sperimentale. La Figura 5-11 mostra l’andamento dei coefficienti sperimentali e di quelli numerici ottenuti in una simulazione 3D.

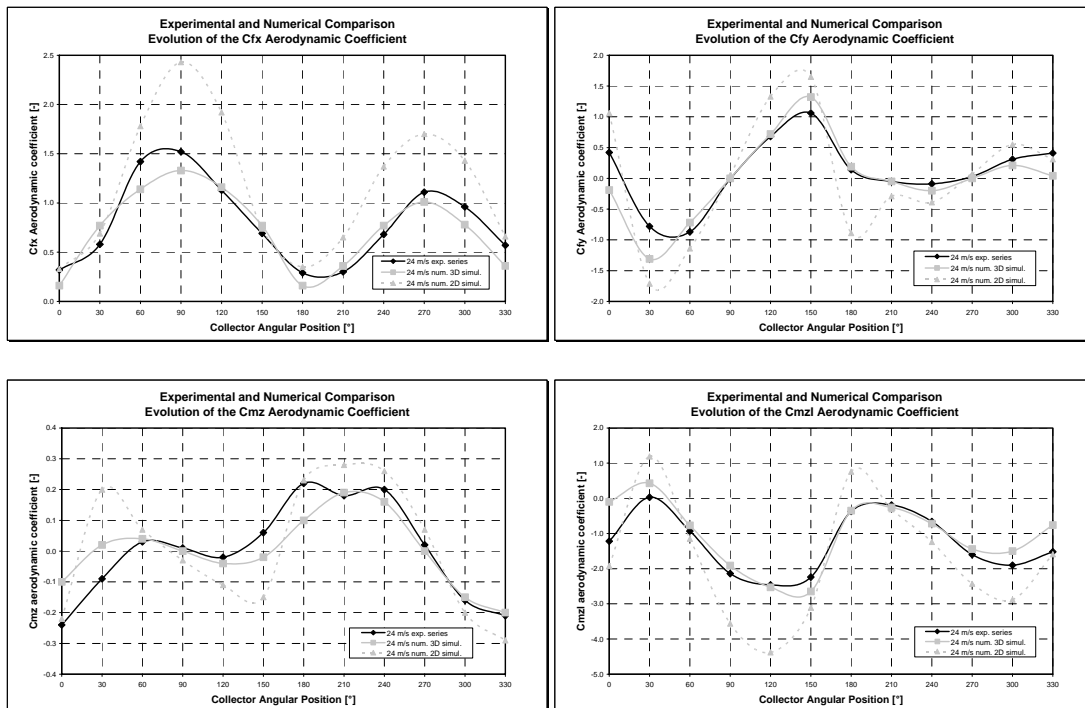


Figura 5-11 – Coefficienti  $C_{Fx}$ ,  $C_{Fy}$ ,  $C_{Mz}$  e  $C_{MzL}$  sperimentali e numerici della seconda sessione di prova

Una analisi preliminare indica che c'è un buon accordo sia qualitativo che quantitativo tra i risultati sia numerici che sperimentali. Al variare della posizione angolare del concentratore, i valori numerici seguono abbastanza bene l'andamento di quelli sperimentali corrispondenti. Inoltre, la somiglianza nei valori conduce a credere che da un lato, le pressioni misurate sul concentratore non siano diverse da quelle calcolate per mezzo del codice di calcolo e dall'altro, che i valori delle pressioni stessi non variano sostanzialmente quando si muove dal centro verso la zona laterale del concentratore. Gli effetti di bordo, considerati come una variazione sensibile nella pressione fra le zone centrali e quelle laterali, dovrebbero essere presenti in regioni relativamente limitate. Un confronto fra la pressione sperimentale e numerica può certamente aiutare nel chiarire questo aspetto. A tal fine, sono stati elaborati dei grafici comparativi, che riportano le misure di pressione nella zona centrale del concentratore sia numeriche che sperimentali. Per interpretare correttamente i dati, è necessario spiegare che l'asse x si riferisce all'asse del sistema di riferimento analogo a quello riportato in Figura 5-2 ma solidale sul concentratore. La dizione "front., (anteriore) e "back., (posteriore) si riferiscono al sistema di riferimento fisso del concentratore. Ad esempio, per una configurazione con  $\alpha = -90^\circ$ , la parte anteriore corrisponde alla zona sotto vento (il flusso non incide direttamente su di essa) mentre la parte posteriore corrisponde alla zona dove il flusso incide direttamente. Dall'esame dei grafici con una posizione angolare variabile tra  $-90^\circ$  e  $90^\circ$  (Figura 5-12 e Figura 5-13), può essere osservato un buon accordo fra i valori sperimentali e quelli numerici. I valori di pressione, particolarmente quei a valle, sono considerevolmente prossimi ai valori sperimentali.

Alla luce delle differenze nella pressione 2D (indicata negli stessi grafici), è stata confermata l'ipotesi che il flusso generato dal modello di prova ha un importante carattere tridimensionale che non può essere previsto con le simulazioni bidimensionali. Questo fatto inoltre è stato confermato in molte altre configurazioni anche se la differenza con la simulazione bidimensionale è meno importante, ciò indica che quando il flusso può seguire la direzione principale l'effetto tridimensionale è certamente più ridotto. Tuttavia, la situazione nella configurazione  $180^\circ$  non può essere considerata soddisfacente, come indicato in Figura 5-14. Anche se la pressione posteriore nella simulazione tridimensionale è in gran parte simile ai valori sperimentali, non ne segue esattamente l'andamento. Ciò è compatibile con l'ipotesi che il codice di calcolo ha difficoltà nella modellizzazione della zona dove lo strato di contorno tende a separare il flusso e sono generati dei fenomeni di ricircolo. Soprattutto, questa zona non è grande quanto le dimensioni caratteristiche dell'oggetto. Di conseguenza, in questa zona sarebbe necessaria una magliatura particolarmente più fine di quella generata in questo caso.

Un'ulteriore osservazione per quanto riguarda la pressione sulla superficie posteriore è che mentre le simulazioni bidimensionali hanno dimostrato una notevole differenza quantitativa rispetto ai dati sperimentali, queste hanno mostrato un buon accordo qualitativo. Invece, le simulazioni tridimensionali hanno parzialmente perso questa corrispondenza, evidentemente a causa dell'assenza di una modellazione del tubo di torsione. Questa differenza è molto più visibile quando il tubo di torsione è un ostacolo significativo al flusso. Le posizioni angolari ad  $\alpha = 180^\circ$  e  $\alpha = 0^\circ$  evidenziano maggiormente questo fenomeno. Quindi, non è una coincidenza che queste due configurazioni, la  $0^\circ$  in particolare, presentino la differenza maggiore con i coefficienti aerodinamici ottenuti sperimentalmente.

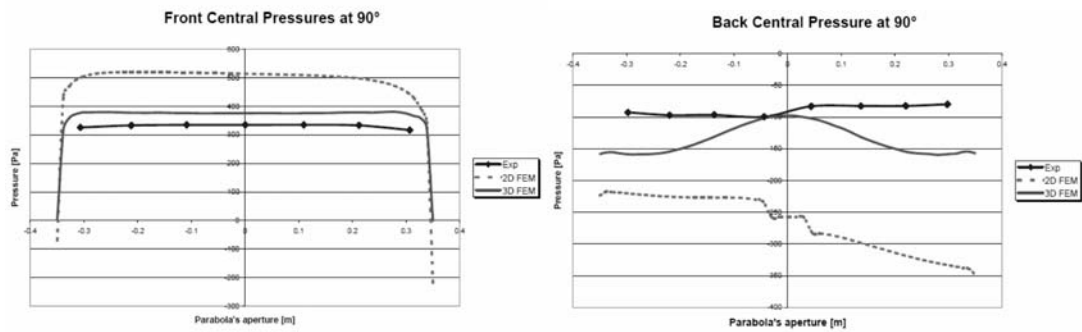


Figura 5-12 – Pressione centrale front e back per una configurazione con  $\alpha = 90^\circ$

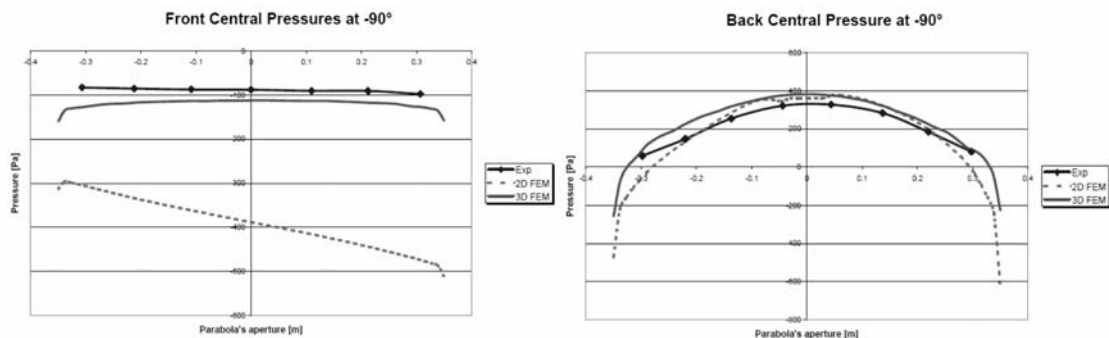


Figura 5-13 – Pressione centrale front e back per una configurazione con  $\alpha = -90^\circ$

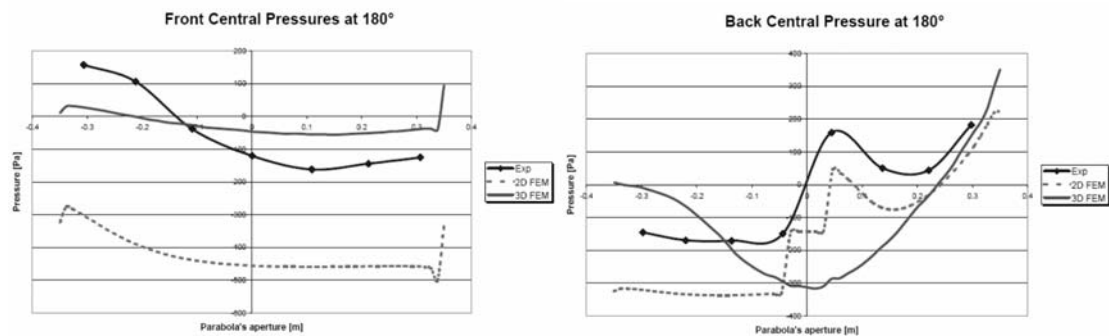


Figura 5-14 – Pressione centrale front e back per una configurazione con  $\alpha = 180^\circ$

Facendo di nuovo riferimento all'analisi dei dati in Figura 5-11, si può vedere che anche se le simulazioni bidimensionali mostrano una tendenza simile, forniscono dei valori dei coefficienti aerodinamici amplificati rispetto a quelli delle simulazioni tridimensionali. Il fenomeno è più evidente quando i coefficienti mostrano i valori locali di minimo e di massimo, cioè, la differenza fra i rispettivi valori risulta aumentata. Questo fenomeno, che non è certamente facile da interpretare, potrebbe essere attribuito alla natura tipicamente tridimensionale del fenomeno studiato. Le prove sperimentali, in particolare le prove effettuate con l'aiuto del fumo, indicano la tendenza del flusso a aggirare lateralmente il modello disposto nel mezzo della sezione di prova e quindi di generare un campo di flusso non prevedibile in simulazioni bidimensionali. Ovviamente, la possibilità che il flusso si sposti nella direzione dell'asse del concentratore conduce ad una variazione nell'azione esercitata su di esso e quindi, al differente comportamento mostrato nei grafici. Ad esempio, la differenza nei coefficienti  $C_{Fx}$  è ben visibile per le posizioni angolari angoli di  $-90^\circ$  e  $90^\circ$ , poiché queste posizioni producono il maggiore ostacolo possibile al movimento del fluido, che è allora obbligato a muoversi anche nella terza direzione.

La posizione angolare del concentratore per la quale i coefficienti aerodinamici hanno raggiunto il valore massimo riguardo a tutte le altre posizioni è indicata, sia per le prove sperimentali che per le simulazioni numeriche, in Tabella 5-1 : per ogni coefficiente si è segnalata la posizione angolare dove sono stati raggiunti i valori massimi sia positivi che negativi. E' facile osservare che i valori massimi di  $C_{Fx}$  e  $C_{Fy}$  sono stati raggiunti nella stessa posizione per sia le prove sperimentali che numeriche. Nel caso degli altri coefficienti, le posizioni non differiscono di più di  $30^\circ$ .

*Tabella 5-1 – Posizioni angolari del concentratore dove sono stati raggiunti i valori massimi dei coefficienti aerodinamici*

	Maximum	$\alpha(C_{Fx})$ [°]	$\alpha(C_{Fy})$ [°]	$\alpha(C_{Mz})$ [°]	$\alpha(C_{Mzl})$ [°]
Cells 1 <sup>st</sup> session	Positive	90	150	180	-
	Negative	-	30	-	150
Cells 2 <sup>nd</sup> session	Positive	90	150	-150	-
	Negative	-	30	-	120, 150
FEM 1 <sup>st</sup> & 2 <sup>nd</sup> session	2D Positive	90	150	-150	30
	Negative	-	30	-30	120
FEM 2 <sup>nd</sup> session	3D Positive	90	150	-150	30
	Negative	-	30	-30	150
Pressure 1 <sup>st</sup> & 2 <sup>nd</sup> session	Positive	90	150	180	30
	Negative	-	30	-30	120

La Tabella 5-2 mostra gli errori relativi fra i coefficienti aerodinamici delle simulazioni tridimensionali e le prove sperimentali, che sono stati calcolati secondo la  $\varepsilon = (C_{num} - C_{exp}) / C_{exp}$ , dove  $C_{exp}$  è relativo alle azioni generali ottenute dalla misura della pressione centrale. In primo luogo, può essere visto che i valori sono tutti positivi, tranne due casi. Ciò significa che i valori assoluti dei dati numerici sono superiori a quei sperimentali.

*Tabella 5-2 – Relative numerical/experimental errors for the aerodynamic coefficients*

Aerodynamic Coef.	Maximum	$\alpha$ [°]	$\varepsilon$
$C_{Fx}$	Positive	90	-0.07
$C_{Fy}$	Positive	150	0.33
$C_{Fy}$	Negative	30	0.41
$C_{Mz}$	Positive	180	-0.49
$C_{Mz}$	Positive	-150	0.19
$C_{Mz}$	Negative	-30	0.20
$C_{Mzl}$	Positive	30	2.08
$C_{Mzl}$	Negative	120	0.09
$C_{Mzl}$	Negative	150	0.31

Per quanto riguarda il primo dei due casi dove il  $\varepsilon < 0$  ( $C_{Fx}$  con  $\alpha = 90^\circ$ ), si può osservare che sebbene il valore numerico sia più basso del valore sperimentale, questo è

molto prossimo ad esso. Nell'altro caso (CMz con  $\alpha = 180^\circ$ ) si evidenzia una differenza più sostanziale. Tuttavia, non si dovrebbe dimenticare che questa era una delle posizioni più critiche per quanto riguarda la corrispondenza tra dati sperimentali e numerici. Infatti, l'assenza del tubo di torsione nella simulazione 3D mostra i maggiori effetti proprio in quelle direzioni in cui il tubo era un ostacolo importante per il concentratore. Tra gli errori relativi positivi, con l'eccezione del valore per CMzl con  $\alpha = 30^\circ$  (dove il CMzl sperimentale è quasi zero e le piccole variazioni possono condurre agli errori elevati), il valore massimo è uguale a 0.41 e si riferisce al coefficiente CFy ( $\alpha = 30^\circ$ ). Gli altri valori sono compresi tra 0.09 e 0.33. Per concludere e tenendo presente che lo scopo di questo studio era valutare l'affidabilità del modello numerico realizzato, possiamo ricapitolare che cosa è stato analizzato come segue:

- I risultati numerici e sperimentali si acconcordano bene da un punto di vista qualitativo. Ciò indica che il fenomeno fisico è stato simulato correttamente;
- La simulazione 3D fornisce una buona approssimazione quantitativa dei dati sperimentali. Sebbene questi valori siano simili, sono stati osservati degli errori importanti per alcune delle posizioni del concentratore. Il motivo di ciò risiede certamente nel modello geometrico usato per la simulazione 3D. Infatti, per limitare sia il tempo di calcolo che lo spazio di memoria, è stato usato un modello semplificato che non riflette esattamente la realtà. La conferma di ciò può essere trovata negli andamenti dei coefficienti aerodinamici e della pressione anteriore e posteriore delle simulazioni 2D, dove sono stati introdotti il tubo di torsione e la geometria della sezione di prova. Tali andamenti sono più simili a quelli sperimentali rispetto i corrispondenti 3D.
- La differenza fra i risultati della simulazione 2D e 3D, da un lato, mette in luce la presenza di un flusso che è tipicamente tridimensionale e relazionato alle limitate dimensioni longitudinali del campione e, dall'altro lato, la significativa differenza relativa alle azioni del vento su un concentratore isolato (caso della galleria del vento) o su uno inserito nelle file di concentratori collegati (caso del campo solare).
- Tutte le valutazioni che sono state effettuate non possono trascurare i numerosi fattori che tendono ad influenzare il fenomeno in esame. Essenzialmente, è molto difficile potere quantificare ogni aspetto della modellazione (la geometria, la discretizzazione, le condizioni al contorno, i modelli di turbolenza usati, gli errori connessi ad una soluzione numerica, ecc.) poichè tutti contribuiscono ad ottenere dei risultati che sono inevitabilmente differenti dalla realtà. Se, da un lato, i risultati ottenuti sembrano eccessivamente diversi da quelli sperimentali, dall'altro, devono essere valutati alla luce delle numerose fonti di incertezza. Tuttavia, occorre segnalare che un'analisi del flusso e della pressione esercitata sul concentratore ci ha permesso di osservare come il modello numerico era in grado di cogliere gli aspetti fondamentali fenomeno studiato.

## **5.5 Discussione**

In base al buon risultato del confronto numerico/sperimentale mostrato in precedenza, si può asserire che il modello CFD qui studiato può essere usato con un buon grado di affidabilità per valutare l'azione indotta da vento su un concentratore solare parabolico-lineare, situato in uno spazio aperto, a condizione che le dimensioni del dominio siano state scelte propriamente e le condizioni al di contorno siano state imposte correttamente [8].

Infatti, il primo passo per questo genere di analisi è disporre le superfici di contorno del dominio abbastanza lontano dal concentratore in modo che la loro presenza, o piuttosto le condizioni al contorno imposte su di esse, non cambino significativamente la pressione all'interno del dominio e, di conseguenza, le azioni imposte al concentratore. Generalmente, le dimensioni migliori del dominio sono determinate attraverso una serie di analisi preliminari di sensibilità.

Riguardo al posizionamento del concentratore in un terreno aperto, si può assumere per la superficie relativa al terreno la condizione di flusso a scorrimento nullo, ovvero a velocità nulla. Per quanto riguarda le altre superfici laterali, è necessario imporre le condizioni tali da impedire la fuoriuscita del flusso. Le condizioni posteriori, inoltre, debbono modellizzare il caso di un corpo immerso in un campo di flusso che si estende all'infinito. Il fatto che la componente perpendicolare di velocità alla superficie è nulla, ad una determinata distanza dal concentratore, suggerisce che il flusso di aria in quella zona può muoversi liberamente sul piano determinato dalla superficie stessa. Invece, all'uscita del condotto, come nel caso della simulazione numerica della galleria del vento, dovrebbe essere imposta una pressione relativa nulla. La situazione relativa alle condizioni da imporre alla superficie di ingresso, è un po' più complessa. Queste condizioni si riferiscono sia alla velocità del vento che alla intensità di turbolenza. Il vento naturale non può essere considerato costante su tutta la superficie ma sarebbe necessario dargli un profilo che consideri la variazione di velocità in funzione dell'altezza dal piano di terra (Figura 5-15). Secondo le norme europee, questo profilo è espresso in termini di velocità media del vento dalla seguente equazione:

$$v_m(z) = v_{ref} \cdot k_r \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot c_t(z)$$

dove il  $v_{ref}$ ,  $k_r$  e  $z_0$  dipendono dalla zona e dalla categoria del terreno dove il manufatto viene realizzato. Ad esempio, tipici valori per questi parametri sono i seguenti:  $v_{ref}=28\text{m/s}$ ,  $k_r=0.19$  e  $z_0=0.05$ . Il coefficiente topografico  $c_t(z)$  può essere considerato uguale a 1, in quanto questi sistemi sono solitamente posti in spazi larghi e piani. Inoltre, l'effetto del vento sul concentratore, dovrebbe essere modellato in modo che ci sia un livello adeguato di turbolenza. L'intensità di turbolenza è un parametro utile per quantificare le fluttuazioni della velocità di vento ed è espressa in percentuale come segue [19]:

$$I = \frac{v_{rms}(z)}{v_m(z)} \cdot 100$$

dove  $v_m$  è il valore della velocità media del vento nell'intervallo di tempo in esame ad un'altezza  $z$  e dove  $v_{rms}$  è la sua deviazione quadratica media. Anche l'intensità della turbolenza avrà un suo profilo che varierà secondo l'altezza dal terreno (Figura 5-15).

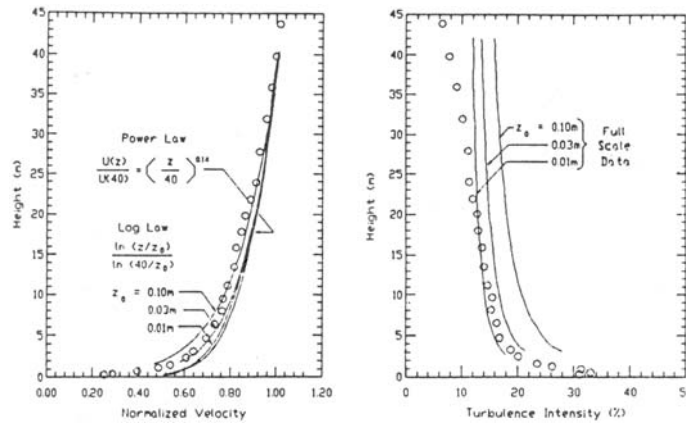


Figura 5-15 –Profili di velocità e di intensità di turbolenza di prove sperimentali trovate in letteratura [10]

L'importanza della turbolenza iniziale nella definizione dei carichi esercitati sulla struttura, sia per i valori di picco che medio, è stata discussa parecchie volte in letteratura [9]-[12]. L'aspetto più interessante che emerge da queste osservazioni, era che i carichi medi variano al variare della turbolenza in ingresso. Ad esempio, questo è evidente per l'eliostato in Figura 5-16.

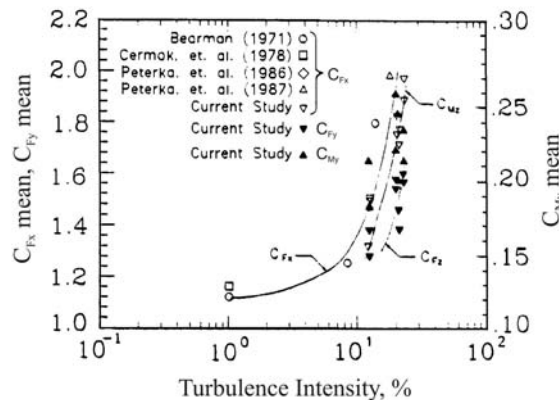


Figura 5-16 –Variazione dei coefficienti aerodinamici  $C_{fx}$ ,  $C_{fy}$  e  $C_{my}$  con l'intensità di turbolenza per un eliostato isolato [12]

Prendendo in considerazione queste indicazioni, è possibile condurre una serie di simulazioni numeriche di CFD, che siano in grado di predire i coefficienti di forma di un concentratore lineare parabolico in funzione della sua posizione angolare e, quindi, predire anche le azioni del vento. Conoscere i coefficienti di forma è un punto essenziale nella progettazione di un collettore solare con delle caratteristiche operative ottimali (stati limite operativi), rispettando allo stesso tempo le condizioni di sicurezza (stati limite ultimi).

Altre indicazioni utili per la progettazione, potrebbero essere ottenute da simulazioni che indirizzate alla analisi di due tipi di effetti: un effetto tridimensionale o “del concentratore solitario”, e l'effetto schermante della prima fila. L'effetto tridimensionale già è stato discusso per le simulazioni 2D e 3D della galleria del vento: esso consiste in una evidente riduzione del carico quando il concentratore è isolato in contrasto con quanto accade se è all'interno di una fila. I concentratori reali si trovano in condizioni intermedie, ovvero, sono disposti in una fila ma con delle aperture tra un modulo e l'altro. L'influenza di questa apertura sull'entità dei carichi esercitati dal vento potrebbe fornire delle utili indicazioni. Un'analisi dell'effetto schermante della prima fila di concentratori sulle file successive dovrebbe essere utile nella scelta della giusta strategia di progettazione. Il risultato di ciò è, anche in questo caso, una forte riduzione dei carichi che può in genere condurre a due tipi di strategie di progettazione:

- progettare due tipi di concentratori: uno forte, per le file esterne, ed uno leggero, per le file interne (che occupano di 90% del campo solare);
- progettare un frangivento esterno ed esclusivamente dei concentratori leggeri.

È chiaro che tutte le possibilità spesso dipendono notevolmente dal fatto che i fenomeni fluidi-dinamici turbolenti sono caratterizzati dal molteplice e spesso non quantificabili fattori, che rendono difficile ottenere una soluzione numerica più vicina possibile alla realtà. La conseguenza naturale è che una convalida sperimentale dei risultati è necessaria ed è saggio effettuare uno studio e una valutazione dei modelli di turbolenza in grado di caratterizzare il più possibile il fenomeno fisico. In conclusione, dovendo affrontare una situazione altamente complessa, si dovrebbe considerare il fatto che questo tipo di flusso non è stazionario e valutare gli effetti dinamici esercitati sulla struttura.

## **5.6 Conclusione**

Lo scopo di questo studio è di valutare l'affidabilità del modello CFD nella stima dell'azione del vento sui concentratori parabolici lineari attraverso l'utilizzo di simulazioni numeriche. A tal fine, sono state condotte una serie di prove sperimentali in galleria del vento realizzate per determinare i coefficienti aerodinamici di un concentratore in funzione della sua posizione angolare. Questi coefficienti sono stati confrontati con quelli analoghi ottenuti attraverso simulazioni numeriche delle prove sperimentali. Il risultato fondamentale del confronto, trattato e commentato in modo esteso nel paragrafo precedente, è stato che il modello utilizzato nella simulazione CFD è in grado di riprodurre il fenomeno fisico e quindi l'azione del vento sul concentratore parabolico, sia qualitativamente che quantitativamente. Le differenze osservate tra i risultati numerici e quelli sperimentali possono essere attribuiti principalmente alle semplificazioni apportate al modello numerico per limitare sia l'ingombro di memoria che i tempi di calcolo. In altre parole, il modello CFD, studiato in questo lavoro, può essere utilizzato con un buon grado di affidabilità nella valutazione delle azioni indotte dal vento su un concentratore solare parabolico lineare posto in uno spazio aperto, purché le dimensioni del dominio siano scelte opportunamente e le condizioni al contorno imposte in modo corretto.

## 6 Conclusioni e prospettive

Il lavoro illustrato in questo documento aveva come scopo principale quello di valutare l'entità delle azioni esercitate dal vento sui concentratori parabolici lineari di un impianto solare ad alta temperatura per la produzione di energia elettrica. Il vento è il carico predominante per questo tipo di strutture e ne condiziona fortemente le prestazioni. La valutazione di tali azioni, basata sul quadro normativo sia nazionale che europeo esistente e sull'uso di codici di calcolo CFD (nel caso Ansys/Flotran), ha consentito di determinare i vari coefficienti di forma del concentratore parabolico in funzione della sua posizione angolare (vedi Appendice A – Coefficienti aerodinamici). Attraverso tali coefficienti, relativi alle azioni di spinta e portanza, al momento torcente, alla pressione media ed alla distribuzione di pressione, è possibile, per ogni velocità del vento e per ogni posizione angolare del concentratore, ottenere le azioni corrispondenti esercitate sulla struttura. I risultati così ottenuti sono stati sottoposti ad una doppia verifica, una numerica (o metodologica) e l'altra sperimentale, al fine di valutarne il grado di affidabilità. La verifica metodologica è consistita in una analisi di sensibilità del modello numerico utilizzato ai vari parametri in gioco (in particolare il grado di infittimento della magliatura e le dimensioni del dominio di calcolo). Per la verifica sperimentale si è, invece, ricorso a delle prove in galleria del vento su di un modello ridotto di concentratore parabolico. Tali prove, progettate e realizzate in collaborazione con l'Università di Perugia, erano finalizzate a verificare che il modello numerico fosse in grado di cogliere il fenomeno fisico analizzato e quindi le azioni esercitate sul provino stesso. In entrambi i casi i risultati ottenuti sono stati soddisfacenti ed hanno permesso di concludere che i dati (coefficienti di forma) scaturiti dalle simulazioni effettuate hanno un buon grado di affidabilità e possono essere utilizzati in fase di progettazione meccanica del componente.

Per quanto riguarda la fase di progettazione meccanica del concentratore si possono fare ulteriori considerazioni. Il concentratore dovrà, in generale, essere progettato per resistere ai carichi derivanti dalla peggiore orientazione del livello W3 e dalla posizione di riposo del livello W4 (Tabella 2-1). Se il collettore possiede una rigidità tale da presentare frequenze proprie di vibrazione al di sopra dei 5 Hz (come previsto dalla normativa), la progettazione potrebbe essere eseguita attraverso delle analisi statiche equivalenti, in ragione del fatto che la maggior parte dell'energia del vento è rilasciata a frequenze al di sotto di 1-2 Hz. In caso contrario, le azioni prodotte dalle vibrazioni indotte dal vento dovrebbero essere prese in considerazione attraverso analisi di tipo dinamico. Per le strutture in acciaio del concentratore dovrebbe essere applicata la normativa relativa alle costruzioni civili. Invece, per le strutture del concentratore realizzate in materiale composito si dovranno applicare normative specifiche. Gli stati W1 e W2 debbono essere considerati come stati limite di esercizio mentre gli stati W3 e W4 sono stati limite ultimi.

Per una progettazione più fine andrebbero distinti i casi di collettore di prima fila e di collettore delle file successive. Infatti, come si può riscontrare dalle analisi fluidodinamiche e/o dalle prove in galleria del vento, le azioni esercitate sui collettori di prima fila sono maggiori di quelle relative ai collettori delle file successive proprio a causa dell'effetto schermante dei primi. Tale considerazione porterebbe a portare alla progettazione di un collettore "robusto" di prima fila e di collettori "leggeri" per le file

successive. La presenza di eventuali schermi frangi-vento consentirebbe la progettazione dei soli collettori “leggeri”.



*Figura 6-1 –Collettori solari dell’impianto PCS dell’ENEA Casaccia*

Sulla base di quanto emerso si aprono diverse prospettive per il proseguimento del lavoro intrapreso. In primo luogo, da un punto di vista numerico (analisi CFD) sarebbe necessario indagare gli effetti sulle azioni dovute al vento derivanti da un lato dalla presenza di eventuali schermi frangivento e dall’altro dal’incremento della distanza tra un modulo ed il successivo. Entrambi gli effetti avrebbero come conseguenza una riduzione dei carichi agenti e quindi una importante influenza sulla progettazione del concentratore. Invece, da un punto di vista sperimentale, occorrerebbe approfondire l’esperienza, fatta presso l’Università di Perugia, in galleria del vento con una modellizzazione in grado di rappresentare maggiormente la realtà (moto bidimensionale con turbolenza pienamente sviluppata) ed iniziare una attività di convalida in campo tramite misure dell’azione del vento sugli specchi reali opportunamente strumentati.

## 7 Bibliografia

- [1] A. Antonaia, M. Avitabile, G. Calchetti, T. Crescenzi, G. Cara, G. M. Giannuzzi, A. Maccari, A. Miliozzi, M. Rufoloni, D. Prischich, M. Vignolini, C. Rubbia - *Progetto di massima del collettore parabolico lineare per impianto solare* - ENEA/TM/PRES/2001\_9
- [2] Eurocode 1 – *Basis of design and action on structures, Part 2-4: Action on structures – Wind actions*, UNI ENV 1991-2-4, march 1997.
- [3] Miliozzi A., Nicolini D., Giannuzzi G. M., Rondoni C., Chieruzzi M., Kenny J. M. – *Valutazione numerica dell'azione del vento sui concentratori parabolici lineari di un impianto solare ad alta temperatura* – SOL/RS/2004/13
- [4] Miliozzi A., Nicolini D. – *Analisi di sensibilità sul modello numerico utilizzato per la valutazione dell'azione del vento sui concentratori parabolici lineari di un impianto solare ad alta temperatura* – SOL/RS/2004/24
- [5] J.M. Kenny, C. Rondoni, M. Chieruzzi - *Progettazione, realizzazione ed esecuzione di prove in galleria del vento per un concentratore solare parabolico-lineare. Prove Sperimentali ed Analisi Fluidodinamiche* - Gruppo di Ricerca STM – Documento finale contratto ENEA - Maggio 2005
- [6] Miliozzi A., Nicolini D., J.M. Kenny, C. Rondoni, F. Crobu – *Verifica della affidabilità del modello numerico utilizzato per valutare l'azione del vento su concentratori parabolici lineari attraverso prove sperimentali in galleria del vento* – SOL/RS/2005/11
- [7] A.G. Davenport, *Past present and future of wind engineering*, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 90 (2002) 1371-1380.
- [8] P. J. Richards, R. P. Hoxey, *Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- $\epsilon$  turbulence model*, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 46&47 (1993) 145-153.
- [9] J. A. Peterka, J. M. Sinou, J. E. Cermak, *Mean Wind Forces on Parabolic-Trough Solar Collectors*, SAND80-7023, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1980
- [10] J.A. Peterka, Z. Tan, B. Bienkiewicz, J. E. Cermak, *Wind Loads on Heliostats and Parabolic Dish Collectors*, SERI/STR-253-3431, Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado, 1988
- [11] J.A. Peterka, R. G. Derickson, J. E. Cermak, *Wind Loads and Local Pressure Distributions on Parabolic Dish Solar Collectors*, SERI/TP-253-3668, Solar Energy Research Institute, Golden, Colorado, 1990
- [12] J.A. Peterka, R. G. Derickson, *Wind Load Design Methods For Ground Based Heliostats and Parabolic Dish Collectors*, SAND92-7009, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 1992
- [13] Manuale di utilizzo del codice di calcolo ANSYS

## Appendice A – Coefficienti aerodinamici

### Concentratore solare parabolico lineare

A partire dai risultati ottenuti attraverso analisi CFD, si sono identificati i vari coefficienti di forma aerodinamici relativi alle azioni esercitate dal vento su di un collettore parabolico lineare in funzione della posizione angolare dello stesso (Figura-A-1).

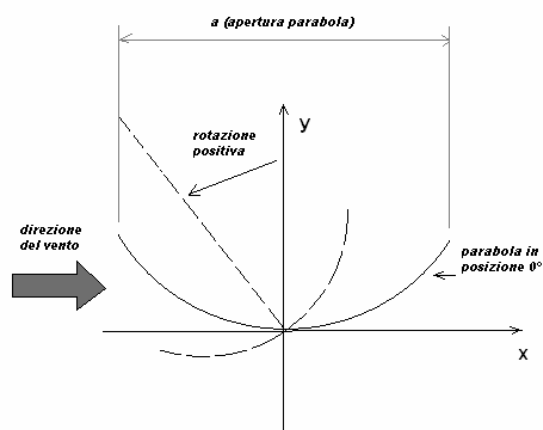


Figura-A-1 - Schema di concentratore parabolico

Tali coefficienti sono stati determinati per il collettore più sollecitato (collettore “periferico”: Figura-B-2 e Tabella-B-0-4 e Tabella-B-0-5) e per quello meno sollecitato (collettore “interno”: Figura-B-3 e Tabella-B-0-6 e Tabella-B-0-7). Si è considerato come collettore periferico quello di prima fila in assenza di qualsiasi schermo frangivento artificiale e come collettore interno quello di sesta fila, preso come rappresentativo di tutte le file di collettori interni. Analizzando detti coefficienti è possibile identificare le seguenti posizioni caratteristiche:

Azione caratteristica	Posizione angolare (°)	
	Collettore “periferico”	Collettore “interno”
Posizione di sicurezza	-120	-120
Posizione di attesa	0	0
Massima azione di torsione	-30	-15
Massima azione di flessione sul tubo di torsione	+60	+30
Massima spinta	+75	-45
Massima portanza (sollevamento)	+120	-45
Massima deportanza (schiacciamento)	+30	+30

Tabella-B-0-1 - Azione del vento : Posizioni caratteristiche

Partendo dai coefficienti di forma riportati è possibile determinare le azioni corrispondenti facendo riferimento alle seguenti relazioni:

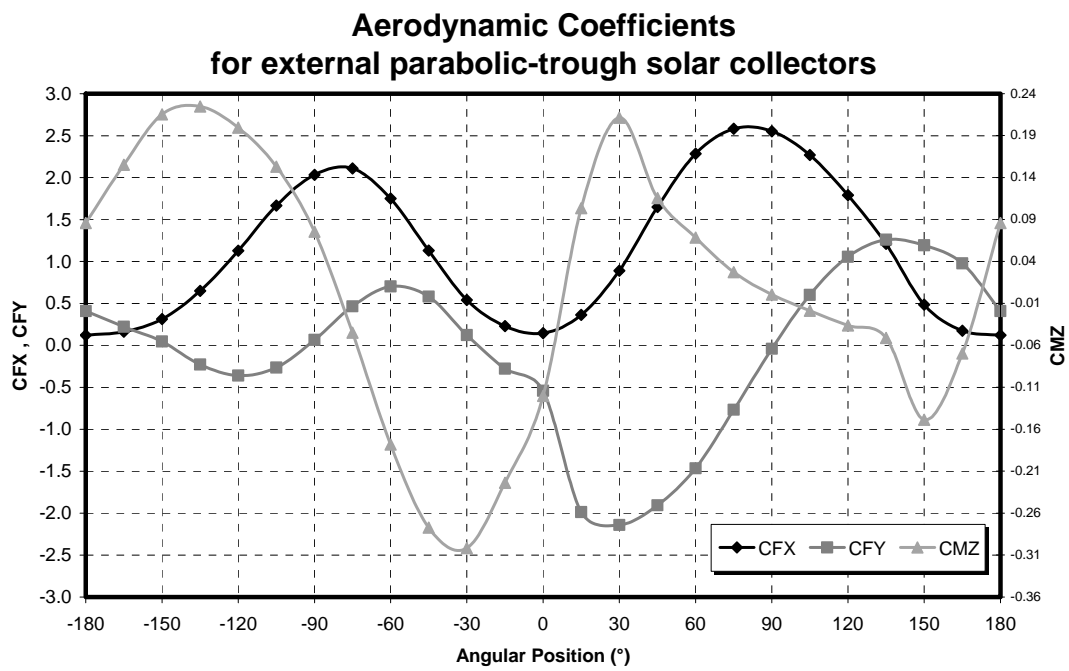
Spinta :	$F_x = q(V_r) \cdot C_e(z) \cdot C_{fx}(\alpha) \cdot A$
Portanza :	$F_y = q(V_r) \cdot C_e(z) \cdot C_{fy}(\alpha) \cdot A$
Momento torcente :	$M_z = q(V_r) \cdot C_e(z) \cdot C_{mz}(\alpha) \cdot A \cdot a$
Pressione media :	$P_m = q(V_r) \cdot C_e(z) \cdot C_{pm}(\alpha)$
Distribuzione di pressione :	$P(x) = q(V_r) \cdot C_e(z) \cdot C_p(\alpha, x)$

dove:

$q(V_r) = \frac{V_r^2}{1.6}$	pressione dinamica di riferimento [N/m <sup>2</sup> ]
$C_e(z) = C_r^2(z) \cdot G^2(z)$	coefficiente di esposizione
$G(z) = \sqrt{1 + \frac{7}{\ln(z/z_0)}}$	fattore di picco
$C_r(z) = k_r \ln(z/z_0)$	coefficiente di rugosità

e con:

z	:	altezza dal suolo [m]
$\alpha$	:	posizione angolare collettore [°]
x	:	coordinata che si sviluppa secondo l'apertura della parabola
V <sub>r</sub>	:	velocità del vento a 10 m di altezza [m/s]
k <sub>r</sub> , z <sub>0</sub>	:	parametri funzione della categoria di esposizione del sito
A	:	area del collettore [m <sup>2</sup> ]
a	:	apertura del collettore [m]



*Figura-B-2 - Distribuzione angolare dei coefficienti di forma per le parabole “periferiche”*

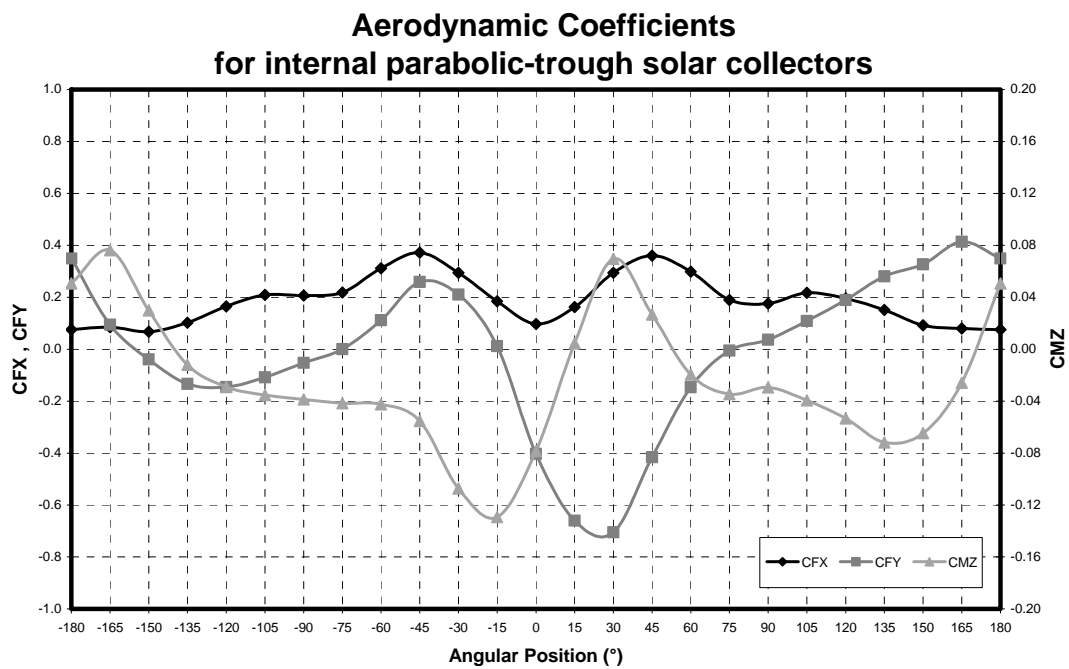


Figura-B-3 - Distribuzione angolare dei coefficienti di forma per le parabole “interne”

<b>COEFFICIENTI DI FORMA PER SPINTA, PORTANZA, MOMENTO TORCENTE E PRESSIONE MEDIA</b>				
<b>Angolo</b>	<b>CFX</b>	<b>CFY</b>	<b>CMZ</b>	<b>CPM</b>
180	0.12	0.41	0.09	0.38
165	0.17	0.98	-0.07	0.98
150	0.49	1.19	-0.15	1.29
135	1.21	1.26	-0.05	1.75
120	1.79	1.06	-0.04	2.07
105	2.27	0.60	-0.02	2.34
90	2.55	-0.04	0.00	2.54
75	2.58	-0.77	0.03	2.68
60	2.28	-1.46	0.07	2.69
45	1.65	-1.91	0.12	2.50
30	0.89	-2.14	0.21	2.30
15	0.36	-1.99	0.10	1.99
0	0.15	-0.54	-0.12	0.50
-15	0.23	-0.28	-0.22	0.17
-30	0.54	0.12	-0.30	-0.39
-45	1.13	0.58	-0.28	-1.19
-60	1.75	0.70	-0.18	-1.83
-75	2.11	0.46	-0.04	-2.12
-90	2.03	0.06	0.08	-2.00
-105	1.67	-0.26	0.15	-1.65
-120	1.13	-0.36	0.20	-1.13
-135	0.65	-0.23	0.22	-0.61
-150	0.31	0.05	0.22	-0.13
-165	0.16	0.22	0.16	0.14

*Tabella-B-0-2 - Coefficienti di forma per le parabole “periferiche”*

<b>COEFFICIENTI DI FORMA PER SPINTA, PORTANZA, MOMENTO TORCENTE E PRESSIONE MEDIA</b>				
<b>Angolo</b>	<b>CFX</b>	<b>CFY</b>	<b>CMZ</b>	<b>CPM</b>
180	0.08	0.35	0.05	0.33
165	0.08	0.41	-0.03	0.41
150	0.09	0.33	-0.06	0.33
135	0.15	0.28	-0.07	0.31
120	0.20	0.19	-0.05	0.27
105	0.22	0.11	-0.04	0.24
90	0.18	0.04	-0.03	0.18
75	0.19	-0.01	-0.03	0.19
60	0.30	-0.15	-0.02	0.33
45	0.36	-0.42	0.03	0.55
30	0.29	-0.71	0.07	0.76
15	0.16	-0.66	0.00	0.67
0	0.10	-0.40	-0.08	0.38
-15	0.18	0.01	-0.13	-0.07
-30	0.29	0.21	-0.11	-0.33
-45	0.37	0.26	-0.06	-0.44
-60	0.31	0.11	-0.04	-0.32
-75	0.22	0.00	-0.04	-0.21
-90	0.21	-0.05	-0.04	-0.21
-105	0.21	-0.11	-0.04	-0.23
-120	0.17	-0.15	-0.03	-0.21
-135	0.10	-0.13	-0.01	-0.16
-150	0.07	-0.04	0.03	-0.06
-165	0.09	0.09	0.08	0.06

*Tabella-B-0-3 - Coefficienti di forma per le parabole “interne”*

*Tabella-B-0-4 - Coefficiente di forma per la distribuzione di pressione. Parabole Periferiche - Parte I*

COEFFICIENTI DI FORMA PER LA DISTRIBUZIONE DI PRESSIONE SULLA PARABOLA IN FUNZIONE DELLA APERTURA (Parabole Periferiche : Parte I – angoli negativi)												
x/a	Posizione angolare											
	-165	-150	-135	-120	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0
-0.500	-0.003	0.010	0.014	0.018	-0.020	-0.098	-0.229	-0.500	-0.818	-1.306	-1.222	-0.804
-0.478	0.041	0.183	0.154	0.005	-0.294	-0.685	-1.209	-1.682	-1.934	-1.865	-1.592	-1.405
-0.457	0.098	0.270	0.213	-0.014	-0.424	-0.910	-1.490	-1.940	-2.108	-1.896	-1.533	-1.049
-0.435	0.166	0.350	0.259	-0.046	-0.549	-1.110	-1.725	-2.139	-2.221	-1.906	-1.416	-0.731
-0.413	0.236	0.424	0.291	-0.088	-0.659	-1.276	-1.910	-2.277	-2.274	-1.877	-1.278	-0.493
-0.390	0.306	0.487	0.302	-0.146	-0.776	-1.433	-2.072	-2.384	-2.299	-1.829	-1.142	-0.307
-0.367	0.383	0.551	0.311	-0.199	-0.881	-1.566	-2.203	-2.462	-2.304	-1.764	-1.011	-0.159
-0.343	0.460	0.599	0.296	-0.268	-0.993	-1.693	-2.319	-2.521	-2.295	-1.686	-0.872	-0.015
-0.319	0.543	0.653	0.285	-0.331	-1.093	-1.801	-2.414	-2.561	-2.274	-1.603	-0.739	0.115
-0.295	0.615	0.684	0.249	-0.419	-1.205	-1.912	-2.496	-2.587	-2.238	-1.508	-0.595	0.252
-0.270	0.681	0.703	0.200	-0.515	-1.314	-2.013	-2.563	-2.600	-2.190	-1.406	-0.449	0.385
-0.245	0.752	0.727	0.161	-0.597	-1.409	-2.098	-2.613	-2.602	-2.132	-1.305	-0.314	0.493
-0.220	0.802	0.719	0.092	-0.699	-1.512	-2.182	-2.651	-2.595	-2.061	-1.186	-0.164	0.615
-0.194	0.853	0.707	0.028	-0.792	-1.604	-2.254	-2.674	-2.576	-1.984	-1.063	-0.026	0.712
-0.169	0.888	0.665	-0.050	-0.893	-1.698	-2.319	-2.686	-2.544	-1.897	-0.930	0.113	0.802
-0.142	0.913	0.595	-0.147	-1.006	-1.796	-2.376	-2.688	-2.498	-1.800	-0.765	0.252	0.890
-0.116	0.972	0.536	-0.248	-1.129	-1.894	-2.424	-2.680	-2.441	-1.702	-0.531	0.351	0.939
-0.089	1.039	0.451	-0.425	-1.317	-2.016	-2.462	-2.663	-2.368	-1.583	-0.281	0.453	1.000
-0.062	1.094	0.363	-0.670	-1.555	-2.144	-2.480	-2.633	-2.267	-1.438	-0.201	0.537	1.034
-0.035	1.050	0.291	-0.876	-1.727	-2.211	-2.481	-2.592	-2.204	-1.308	-0.185	0.513	0.981
-0.009	0.378	0.061	-0.617	-1.159	-1.855	-2.153	-2.061	-1.244	-0.627	-0.023	0.282	0.493
0.009	0.209	0.011	-0.315	-0.848	-1.347	-1.900	-1.940	-1.836	-0.790	-0.021	0.475	0.888
0.035	0.497	-0.063	-0.771	-1.475	-2.133	-2.492	-2.636	-2.485	-1.633	-0.038	1.226	1.662
0.062	0.460	-0.137	-0.852	-1.552	-2.136	-2.467	-2.561	-2.289	-1.436	0.028	1.274	1.561
0.089	0.381	-0.236	-0.971	-1.631	-2.174	-2.466	-2.487	-2.072	-1.124	0.187	1.240	1.394
0.116	0.283	-0.349	-1.069	-1.689	-2.191	-2.452	-2.408	-1.906	-0.887	0.310	1.196	1.251
0.142	0.190	-0.450	-1.149	-1.732	-2.199	-2.434	-2.347	-1.801	-0.756	0.323	1.149	1.131
0.169	0.070	-0.559	-1.225	-1.764	-2.202	-2.412	-2.293	-1.711	-0.647	0.448	1.138	1.045
0.194	-0.045	-0.660	-1.289	-1.786	-2.199	-2.390	-2.245	-1.636	-0.563	0.648	1.109	0.959
0.220	-0.154	-0.753	-1.340	-1.799	-2.192	-2.368	-2.200	-1.567	-0.489	0.807	1.058	0.870
0.245	-0.268	-0.840	-1.383	-1.805	-2.182	-2.344	-2.150	-1.488	-0.402	0.808	1.011	0.791
0.270	-0.367	-0.913	-1.414	-1.804	-2.168	-2.320	-2.104	-1.418	-0.341	0.776	0.936	0.715
0.295	-0.471	-0.980	-1.436	-1.798	-2.151	-2.294	-2.049	-1.334	-0.265	0.720	0.871	0.653
0.319	-0.569	-1.038	-1.450	-1.787	-2.130	-2.264	-1.992	-1.247	-0.196	0.632	0.798	0.601
0.343	-0.658	-1.086	-1.455	-1.773	-2.104	-2.228	-1.933	-1.167	-0.150	0.545	0.706	0.559
0.367	-0.747	-1.124	-1.453	-1.754	-2.072	-2.180	-1.860	-1.065	-0.090	0.524	0.621	0.529
0.390	-0.826	-1.149	-1.446	-1.731	-2.033	-2.115	-1.775	-0.960	-0.047	0.521	0.527	0.507
0.413	-0.901	-1.161	-1.432	-1.702	-1.988	-2.016	-1.658	-0.829	-0.001	0.479	0.437	0.490
0.435	-0.970	-1.161	-1.410	-1.664	-1.924	-1.879	-1.508	-0.689	0.024	0.394	0.344	0.471
0.457	-1.016	-1.148	-1.370	-1.605	-1.797	-1.679	-1.308	-0.522	0.042	0.303	0.251	0.440
0.478	-1.033	-1.117	-1.301	-1.503	-1.583	-1.431	-1.022	-0.343	0.051	0.180	0.151	0.395
0.500	-0.816	-0.668	-0.768	-0.879	-0.859	-0.690	-0.338	-0.043	0.011	0.069	0.033	0.060

*Tabella-B-0-5 - Coefficiente di forma per la distribuzione di pressione. Parabole Periferiche - Parte II*

COEFFICIENTI DI FORMA PER LA DISTRIBUZIONE DI PRESSIONE SULLA PARABOLA IN FUNZIONE DELLA APERTURA (Parabole Periferiche : Parte II – angoli positivi)												
x/a	Posizione angolare											
	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
-0.500	0.816	3.073	2.633	2.027	1.689	1.352	1.439	1.113	0.549	0.134	0.054	0.043
-0.478	2.287	5.070	3.450	3.014	2.776	2.660	2.335	1.894	1.485	0.773	0.497	0.291
-0.457	2.241	4.340	3.170	3.002	2.778	2.551	2.312	1.940	1.549	0.842	0.575	0.328
-0.435	2.074	3.616	3.033	3.001	2.800	2.530	2.284	1.971	1.597	0.890	0.640	0.357
-0.413	2.008	3.196	2.963	2.990	2.805	2.543	2.295	1.990	1.619	0.920	0.692	0.373
-0.390	2.068	2.994	2.908	2.979	2.805	2.551	2.302	2.000	1.628	0.942	0.732	0.383
-0.367	2.159	2.876	2.864	2.966	2.798	2.556	2.306	2.006	1.635	0.961	0.767	0.392
-0.343	2.271	2.792	2.827	2.950	2.783	2.558	2.307	2.009	1.641	0.978	0.793	0.405
-0.319	2.353	2.710	2.794	2.928	2.767	2.559	2.309	2.011	1.648	0.995	0.816	0.425
-0.295	2.442	2.636	2.764	2.897	2.753	2.559	2.308	2.012	1.652	1.009	0.833	0.453
-0.270	2.517	2.564	2.736	2.860	2.748	2.561	2.308	2.012	1.657	1.022	0.846	0.490
-0.245	2.544	2.485	2.707	2.826	2.756	2.565	2.309	2.014	1.662	1.035	0.860	0.537
-0.220	2.585	2.413	2.673	2.805	2.772	2.572	2.310	2.015	1.668	1.044	0.871	0.593
-0.194	2.583	2.338	2.634	2.804	2.791	2.582	2.314	2.018	1.677	1.052	0.883	0.657
-0.169	2.568	2.268	2.592	2.817	2.812	2.595	2.319	2.021	1.687	1.058	0.893	0.728
-0.142	2.533	2.202	2.562	2.838	2.833	2.610	2.328	2.027	1.697	1.063	0.902	0.806
-0.116	2.422	2.138	2.552	2.859	2.850	2.628	2.342	2.037	1.713	1.075	0.924	0.915
-0.089	2.292	2.084	2.565	2.878	2.864	2.647	2.361	2.056	1.727	1.102	0.987	1.049
-0.062	2.111	2.023	2.569	2.875	2.870	2.657	2.372	2.070	1.731	1.145	1.109	1.183
-0.035	1.856	2.017	2.626	2.928	2.953	2.682	2.404	2.111	1.739	1.203	1.201	1.230
-0.009	1.264	1.214	1.745	2.072	2.149	2.391	1.778	1.554	1.756	0.962	0.597	0.687
0.009	1.708	1.976	2.187	2.313	2.184	2.332	1.860	1.781	1.767	0.686	0.370	0.417
0.035	2.655	2.398	2.607	2.762	2.729	2.607	2.437	2.212	1.772	1.061	0.820	0.738
0.062	2.523	2.237	2.569	2.752	2.717	2.592	2.442	2.184	1.775	1.066	0.946	0.792
0.089	2.283	2.148	2.540	2.752	2.722	2.596	2.462	2.193	1.780	1.096	1.071	0.790
0.116	2.082	2.107	2.511	2.735	2.714	2.590	2.466	2.196	1.784	1.123	1.171	0.757
0.142	1.975	2.089	2.494	2.722	2.709	2.589	2.468	2.197	1.787	1.156	1.262	0.722
0.169	1.930	2.080	2.482	2.710	2.708	2.591	2.463	2.193	1.792	1.191	1.309	0.647
0.194	1.898	2.067	2.467	2.699	2.708	2.596	2.457	2.187	1.798	1.232	1.340	0.565
0.220	1.867	2.051	2.448	2.687	2.709	2.604	2.450	2.180	1.804	1.279	1.357	0.478
0.245	1.837	2.032	2.428	2.676	2.712	2.613	2.445	2.174	1.812	1.328	1.347	0.374
0.270	1.802	2.005	2.401	2.662	2.715	2.622	2.443	2.170	1.821	1.386	1.344	0.283
0.295	1.769	1.978	2.375	2.649	2.718	2.632	2.444	2.169	1.833	1.446	1.312	0.174
0.319	1.729	1.943	2.344	2.633	2.719	2.640	2.447	2.176	1.848	1.510	1.270	0.061
0.343	1.679	1.897	2.305	2.612	2.716	2.646	2.455	2.192	1.867	1.581	1.234	-0.044
0.367	1.622	1.844	2.260	2.588	2.710	2.650	2.466	2.217	1.892	1.655	1.181	-0.157
0.390	1.547	1.775	2.201	2.550	2.694	2.647	2.478	2.245	1.920	1.754	1.143	-0.266
0.413	1.455	1.695	2.128	2.501	2.667	2.637	2.490	2.272	1.959	1.933	1.124	-0.391
0.435	1.333	1.590	2.023	2.422	2.618	2.613	2.499	2.301	2.024	2.316	1.168	-0.540
0.457	1.172	1.442	1.865	2.292	2.519	2.550	2.483	2.319	2.114	2.960	1.224	-0.719
0.478	0.981	1.254	1.664	2.111	2.416	2.500	2.492	2.384	2.312	3.512	1.131	-0.940
0.500	0.100	0.155	0.232	0.447	0.580	0.608	0.876	1.212	1.446	2.204	0.483	-0.667

Tabella-B-0-6 - Coefficiente di forma per la distribuzione di pressione. Parabole Interne - Parte I

COEFFICIENTI DI FORMA PER LA DISTRIBUZIONE DI PRESSIONE SULLA PARABOLA IN FUNZIONE DELLA APERTURA (Parabole Interne : Parte I – angoli negativi)												
x/a	Posizione angolare											
	-165	-150	-135	-120	-105	-90	-75	-60	-45	-30	-15	0
-0.500	0.00	0.00	0.01	-0.01	-0.07	-0.21	-0.27	-0.35	-0.42	-0.50	-0.59	-0.42
-0.478	0.07	0.07	-0.01	-0.15	-0.31	-0.42	-0.55	-0.64	-0.69	-0.77	-0.81	-0.57
-0.457	0.11	0.09	-0.03	-0.19	-0.35	-0.46	-0.54	-0.59	-0.66	-0.73	-0.78	-0.41
-0.435	0.15	0.11	-0.05	-0.22	-0.38	-0.47	-0.52	-0.56	-0.63	-0.71	-0.76	-0.30
-0.413	0.19	0.13	-0.07	-0.26	-0.40	-0.47	-0.49	-0.53	-0.60	-0.69	-0.73	-0.22
-0.390	0.22	0.13	-0.10	-0.29	-0.42	-0.46	-0.46	-0.50	-0.58	-0.67	-0.70	-0.15
-0.367	0.26	0.14	-0.12	-0.32	-0.43	-0.44	-0.43	-0.48	-0.57	-0.66	-0.68	-0.09
-0.343	0.30	0.14	-0.15	-0.35	-0.44	-0.42	-0.40	-0.45	-0.56	-0.66	-0.65	-0.02
-0.319	0.33	0.14	-0.17	-0.37	-0.44	-0.40	-0.37	-0.43	-0.55	-0.65	-0.61	0.05
-0.295	0.36	0.13	-0.21	-0.39	-0.43	-0.38	-0.34	-0.41	-0.54	-0.65	-0.57	0.13
-0.270	0.38	0.11	-0.24	-0.40	-0.42	-0.35	-0.31	-0.40	-0.54	-0.65	-0.53	0.20
-0.245	0.41	0.09	-0.26	-0.41	-0.40	-0.32	-0.28	-0.39	-0.54	-0.64	-0.48	0.27
-0.220	0.42	0.07	-0.29	-0.41	-0.38	-0.29	-0.26	-0.38	-0.54	-0.64	-0.42	0.34
-0.194	0.43	0.04	-0.31	-0.41	-0.36	-0.26	-0.23	-0.37	-0.55	-0.63	-0.36	0.41
-0.169	0.43	0.00	-0.33	-0.40	-0.33	-0.23	-0.21	-0.36	-0.55	-0.62	-0.29	0.48
-0.142	0.42	-0.04	-0.35	-0.38	-0.30	-0.20	-0.19	-0.35	-0.56	-0.60	-0.21	0.54
-0.116	0.42	-0.08	-0.36	-0.36	-0.27	-0.18	-0.17	-0.35	-0.56	-0.58	-0.14	0.58
-0.089	0.40	-0.14	-0.36	-0.33	-0.24	-0.15	-0.16	-0.35	-0.59	-0.56	-0.06	0.63
-0.062	0.38	-0.19	-0.36	-0.30	-0.21	-0.13	-0.14	-0.37	-0.62	-0.53	0.01	0.65
-0.035	0.35	-0.22	-0.34	-0.27	-0.18	-0.11	-0.15	-0.39	-0.66	-0.51	0.07	0.63
-0.009	0.11	-0.15	-0.24	-0.11	-0.07	-0.03	-0.06	-0.19	-0.40	-0.23	0.00	0.40
0.009	0.04	-0.15	-0.25	-0.16	-0.11	-0.08	-0.11	-0.24	-0.41	-0.33	0.05	0.55
0.035	0.12	-0.23	-0.30	-0.27	-0.20	-0.16	-0.17	-0.34	-0.59	-0.49	0.26	1.09
0.062	0.09	-0.24	-0.28	-0.22	-0.17	-0.13	-0.15	-0.33	-0.58	-0.40	0.34	1.11
0.089	0.03	-0.26	-0.24	-0.17	-0.13	-0.10	-0.13	-0.32	-0.55	-0.29	0.40	1.01
0.116	-0.02	-0.26	-0.20	-0.13	-0.11	-0.09	-0.12	-0.31	-0.52	-0.20	0.43	0.91
0.142	-0.07	-0.25	-0.17	-0.11	-0.11	-0.10	-0.12	-0.30	-0.49	-0.14	0.43	0.83
0.169	-0.12	-0.24	-0.14	-0.10	-0.10	-0.10	-0.12	-0.29	-0.46	-0.08	0.44	0.78
0.194	-0.17	-0.23	-0.11	-0.09	-0.10	-0.10	-0.12	-0.28	-0.43	-0.04	0.45	0.73
0.220	-0.20	-0.21	-0.09	-0.08	-0.11	-0.11	-0.12	-0.27	-0.40	0.00	0.44	0.69
0.245	-0.24	-0.19	-0.07	-0.08	-0.11	-0.12	-0.12	-0.26	-0.36	0.04	0.43	0.64
0.270	-0.26	-0.17	-0.06	-0.08	-0.12	-0.12	-0.12	-0.25	-0.32	0.07	0.40	0.59
0.295	-0.28	-0.14	-0.05	-0.08	-0.12	-0.12	-0.12	-0.24	-0.28	0.10	0.38	0.55
0.319	-0.30	-0.12	-0.04	-0.08	-0.13	-0.13	-0.12	-0.22	-0.24	0.12	0.35	0.51
0.343	-0.31	-0.11	-0.04	-0.09	-0.13	-0.13	-0.12	-0.21	-0.21	0.13	0.31	0.47
0.367	-0.31	-0.09	-0.03	-0.10	-0.14	-0.13	-0.12	-0.19	-0.17	0.14	0.28	0.43
0.390	-0.31	-0.08	-0.04	-0.10	-0.14	-0.13	-0.12	-0.17	-0.14	0.13	0.24	0.40
0.413	-0.31	-0.07	-0.04	-0.11	-0.14	-0.13	-0.12	-0.15	-0.11	0.13	0.20	0.38
0.435	-0.31	-0.06	-0.04	-0.11	-0.14	-0.13	-0.11	-0.13	-0.08	0.12	0.16	0.35
0.457	-0.30	-0.05	-0.05	-0.11	-0.14	-0.12	-0.10	-0.10	-0.05	0.10	0.12	0.31
0.478	-0.29	-0.04	-0.05	-0.11	-0.14	-0.11	-0.08	-0.07	-0.03	0.08	0.08	0.28
0.500	-0.19	-0.02	-0.02	-0.06	-0.07	-0.05	-0.03	-0.02	0.00	0.01	0.01	0.04

Tabella-B-0-7 - Coefficiente di forma per la distribuzione di pressione. Parabole Interne - Parte II

COEFFICIENTI DI FORMA PER LA DISTRIBUZIONE DI PRESSIONE SULLA PARABOLA IN FUNZIONE DELLA APERTURA (Parabole Interne : Parte II – angoli positivi)												
x/a	Posizione angolare											
	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
-0.500	0.21	1.02	0.77	0.22	0.01	0.01	0.08	0.08	0.03	0.02	0.03	0.02
-0.478	0.48	1.66	1.21	0.37	0.08	0.03	0.16	0.15	0.12	0.11	0.17	0.17
-0.457	0.48	1.38	1.04	0.34	0.08	0.03	0.16	0.16	0.13	0.11	0.19	0.20
-0.435	0.47	1.16	0.85	0.32	0.09	0.04	0.16	0.16	0.14	0.12	0.21	0.23
-0.413	0.50	1.05	0.74	0.30	0.09	0.04	0.16	0.16	0.14	0.12	0.22	0.26
-0.390	0.55	1.01	0.69	0.30	0.10	0.04	0.17	0.16	0.14	0.13	0.24	0.29
-0.367	0.60	1.00	0.65	0.29	0.10	0.04	0.17	0.16	0.14	0.13	0.25	0.32
-0.343	0.66	0.99	0.62	0.29	0.10	0.04	0.17	0.16	0.14	0.14	0.26	0.35
-0.319	0.71	0.98	0.59	0.28	0.11	0.04	0.17	0.15	0.14	0.15	0.27	0.39
-0.295	0.76	0.97	0.57	0.28	0.11	0.04	0.16	0.15	0.14	0.15	0.29	0.43
-0.270	0.80	0.95	0.55	0.28	0.11	0.04	0.16	0.15	0.15	0.16	0.30	0.47
-0.245	0.83	0.93	0.53	0.28	0.11	0.04	0.16	0.15	0.15	0.17	0.32	0.52
-0.220	0.86	0.90	0.51	0.28	0.12	0.04	0.16	0.16	0.16	0.17	0.34	0.56
-0.194	0.88	0.86	0.50	0.28	0.12	0.05	0.16	0.16	0.16	0.18	0.37	0.60
-0.169	0.89	0.82	0.48	0.28	0.12	0.05	0.16	0.16	0.16	0.19	0.40	0.64
-0.142	0.89	0.78	0.47	0.28	0.12	0.05	0.16	0.16	0.17	0.20	0.44	0.68
-0.116	0.86	0.73	0.47	0.29	0.13	0.06	0.16	0.17	0.17	0.21	0.49	0.73
-0.089	0.83	0.68	0.46	0.30	0.14	0.06	0.17	0.17	0.18	0.24	0.57	0.80
-0.062	0.77	0.63	0.46	0.31	0.16	0.08	0.19	0.19	0.20	0.28	0.67	0.90
-0.035	0.68	0.58	0.48	0.34	0.17	0.09	0.20	0.20	0.22	0.32	0.73	0.98
-0.009	0.32	0.30	0.27	0.18	0.07	0.03	0.09	0.12	0.12	0.17	0.34	0.55
0.009	0.51	0.43	0.34	0.16	0.06	0.03	0.09	0.10	0.10	0.13	0.23	0.29
0.035	1.03	0.72	0.48	0.29	0.17	0.09	0.20	0.20	0.19	0.25	0.48	0.51
0.062	1.00	0.68	0.48	0.29	0.18	0.09	0.20	0.19	0.20	0.30	0.53	0.54
0.089	0.88	0.65	0.48	0.30	0.18	0.09	0.19	0.19	0.22	0.34	0.57	0.53
0.116	0.79	0.63	0.48	0.30	0.18	0.09	0.19	0.19	0.24	0.38	0.59	0.50
0.142	0.74	0.63	0.47	0.30	0.18	0.09	0.20	0.20	0.27	0.42	0.61	0.46
0.169	0.71	0.63	0.47	0.30	0.19	0.10	0.20	0.21	0.30	0.44	0.61	0.41
0.194	0.69	0.62	0.47	0.31	0.20	0.10	0.21	0.23	0.32	0.47	0.60	0.36
0.220	0.67	0.62	0.47	0.32	0.20	0.10	0.22	0.24	0.35	0.49	0.59	0.30
0.245	0.66	0.62	0.48	0.33	0.21	0.11	0.22	0.26	0.38	0.50	0.56	0.24
0.270	0.65	0.62	0.48	0.34	0.22	0.11	0.24	0.28	0.41	0.52	0.54	0.19
0.295	0.64	0.61	0.49	0.35	0.23	0.12	0.25	0.30	0.44	0.53	0.51	0.14
0.319	0.63	0.61	0.50	0.37	0.24	0.13	0.27	0.33	0.47	0.53	0.48	0.08
0.343	0.62	0.60	0.51	0.39	0.26	0.14	0.29	0.37	0.51	0.54	0.45	0.03
0.367	0.61	0.60	0.53	0.42	0.28	0.16	0.32	0.41	0.54	0.54	0.41	-0.02
0.390	0.59	0.60	0.55	0.45	0.31	0.19	0.36	0.46	0.58	0.55	0.39	-0.06
0.413	0.57	0.60	0.58	0.48	0.35	0.22	0.41	0.53	0.64	0.57	0.36	-0.11
0.435	0.54	0.61	0.61	0.53	0.41	0.28	0.51	0.66	0.77	0.63	0.36	-0.16
0.457	0.51	0.62	0.65	0.59	0.50	0.38	0.71	0.90	1.00	0.75	0.36	-0.23
0.478	0.49	0.64	0.70	0.67	0.64	0.54	1.01	1.20	1.24	0.86	0.35	-0.33
0.500	0.08	0.18	0.27	0.34	0.47	0.45	0.80	0.87	0.82	0.53	0.17	-0.23