



## IMPIANTO AGRIVOLTAICO BACCHILEDDU

COMUNE DI SASSARI

PROPONENTE

### Ferrari Agro Energia s.r.l.

Traversa Bacchileddu, n. 22  
07100 SASSARI (SS)

IMPIANTO AGRIVOLTAICO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA DA FONTE SOLARE  
NEL COMUNE DI SASSARI

*AUTORIZZAZIONE UNICA REGIONALE - PROGETTO DEFINITIVO*

**OGGETTO:**

Relazione di calcolo preliminare fondazioni tracker

CODICE ELABORATO

PD  
R06

COORDINAMENTO

**bm!**

Studio Tecnico Dott. Ing Bruno Manca

GRUPPO DI LAVORO A.U.

Dott.ssa Geol. Cosima Atzori  
Dott.ssa Ing. Silvia Exana  
Dott.ssa Ing. Ilaria Giovagnorio  
Dott. Ing Bruno Manca  
Dott. Ing. Giuseppe Pili  
Dott. Ing. Michele Pigliaru  
Dott.ssa Ing. Alessandra Scalas

REDATTORE

Dott. Ing. Giuseppe Pili  
Dott. Ing. Michele Pigliaru

REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE
00	Ottobre 2022	Prima emissione

FORMATO  
ISO A4 - 297 x 210

## Sommario

1. PREMESSA .....	3
2. TIPOLOGIA STRUTTURE DI SOSTEGNO .....	3
3. OPERE DI FONDAZIONE DEI TRACKERS .....	5
4. GEOMETRIA DELLE OPERE.....	5
5. ANALISI DEL TERRENO DI FONDAZIONE.....	6
6. NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	8
7. ANALISI AZIONI DI CALCOLO .....	8
8. CALCOLO DELLE FONDAZIONI .....	16
9. CONCLUSIONI .....	17

## RELAZIONE DI CALCOLO PREDIMENSIONAMENTO FONDAZIONI

### 1. PREMESSA

La relazione tecnica espone il predimensionamento delle strutture di sostegno e di fondazione di un impianto agrivoltaico in progetto, ubicato nell'agro del Comune di SASSARI in località "BACCHILEDDU".

**In fase di progetto esecutivo, lo schema strutturale potrebbe essere oggetto di modifiche, in funzione della scelta definitiva della tipologia strutturale e alla luce dei risultati delle prove di estrazione degli elementi di fondazione.**

### 2. TIPOLOGIA STRUTTURE DI SOSTEGNO

Per struttura di sostegno di un generatore agrivoltaico, si intende un sistema costituito dall'assemblaggio di profili metallici, in grado di sostenere e ancorare al suolo una struttura raggruppante un insieme di moduli fotovoltaici, nonché di ottimizzare l'esposizione di quest'ultimi nei confronti della radiazione solare.

In particolare, i moduli fotovoltaici verranno montati su strutture di sostegno ad inseguimento automatico su un asse (tracker monoassiali) e verranno ancorate al terreno mediante paletti di fondazione infissi nel terreno naturale sino ad una determinata profondità in funzione della tipologia di terreni e dell'azione del vento.

Le strutture di sostegno saranno distanziate con un interasse, le une dalle altre, in direzione est-ovest, in modo da evitare fenomeni di ombreggiamento reciproco, che si manifestano nelle primissime ore e nelle ultime ore della giornata.

Il Tracker è un inseguitore orizzontale ad asse singolo (nord-sud), a fila singola; può contenere 1 modulo agrivoltaico in verticale o 2 moduli in configurazione orizzontale.



*Fig. 1- Tracker - Inseguitore mono-assiale*

Nel caso in esame trattasi di tracker con singolo pannello bifacciale in posizione verticale (single portrait), posizionato secondo la direzione Nord-Sud, che ruota intorno al proprio asse indipendentemente dagli altri, guidati dal proprio sistema di guida. La figura seguente, unitamente alle dimensioni principali del tracker, mostra le posizioni estreme: la posizione assunta all'alba, al mezzogiorno solare e al tramonto e gli intervalli di rotazione.

L'intervallo di rotazione esteso del Tracker è  $110^\circ$  ( $-55^\circ$ ;  $+55^\circ$ ) e consente rendimenti energetici più elevati rispetto all'indice di riferimento del settore ( $-45^\circ$ ;  $+45^\circ$ ).

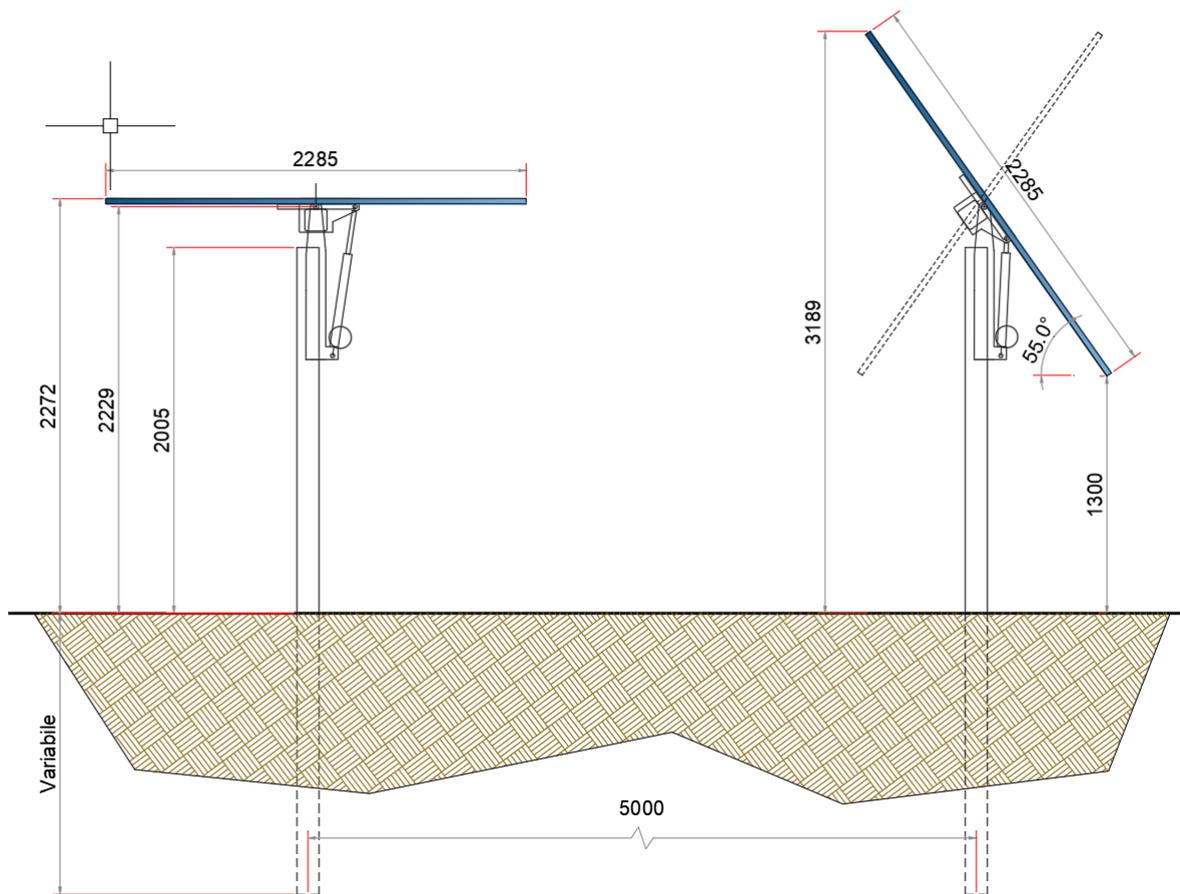


Fig. 2- Tracker - Inseguitore mono-assiale - intervalli di rotazione

Tali strutture verranno fissate su pali di fondazione denominati "pali battuti"; il loro dimensionamento verrà calcolato, dal punto di vista statico, in fase di progetto esecutivo e sarà stabilito definitivamente a seconda delle condizioni del suolo e dell'ubicazione dell'impianto.

La profondità d'infissione di tali strutture verrà accuratamente valutata mediante prove dirette condotte in situ mediante dinamometro; tali prove consisteranno nella valutazione delle condizioni di rottura per taglio del terreno di sedime, raggiunte applicando una forza orizzontale in testa all'elemento e nella verifica allo sfilamento.

L'utilizzo dei "pali battuti" consente l'ancoraggio delle strutture di sostegno dei moduli, determinando un impatto trascurabile sul terreno rispetto alle strutture di fondazione convenzionali (plinti in c.a.).

Questa tecnica presenta numerosi vantaggi, quali:

- l'immediata utilizzazione dell'opera, che potrà essere direttamente sottoposta al carico;
- la stabilità e durevolezza dell'intervento, grazie alle operazioni di ancoraggio;
- l'economicità e compatibilità ambientale dell'intervento, riducendo al minimo il disturbo e l'occupazione del suolo, rispetto alle strutture di fondazione convenzionali (plinti e platee di fondazione);

### **3. OPERE DI FONDAZIONE DEI TRACKERS**

La progettazione delle opere di fondazione dei trackers è strettamente legata alla conoscenza delle caratteristiche litostratigrafiche dell'area oggetto di intervento.

L'analisi condotta all'interno dello studio geologico allegato al presente progetto, basato in parte su dati di letteratura e in parte su dati provenienti da studi geologici realizzati sulle aree limitrofe, lascia spazio a differenti scenari stratigrafici.

**In virtù di quanto evidenziato, viste le incertezze legate al sistema di elevazione (i reali scarichi in fondazione provenienti dalla sovrastruttura saranno forniti in fase esecutiva dalla casa produttrice) e le incertezze legate al modello litostratigrafico del terreno (non sono presenti in questa fase indagini geognostiche di dettaglio relative alle aree di progetto), si è deciso di validare un modello geologico, in questa fase progettuale, ritenuto idoneo a simulare le caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi presenti nelle aree di progetto.**

In tal senso è stato condotto il dimensionamento di un palo infisso con la sezione metallica standard del tracker e si è studiato il comportamento geotecnico e strutturale nei confronti delle sollecitazioni agenti scaricate in fondazione.

### **4. GEOMETRIA DELLE OPERE**

L'intervento prevede la realizzazione di una serie di supporti in profili commerciali di carpenteria metallica (tracker), sui quali sono montati i pannelli fotovoltaici per la produzione di energia elettrica.

I pannelli sono montati su una struttura, come già specificato in precedenza, del tipo "inseguitore monoassiale", e pertanto la loro inclinazione varia durante la giornata.

L'inclinazione massima prevista sull'asse orizzontale è di +/- 55° rispetto all'orizzonte.

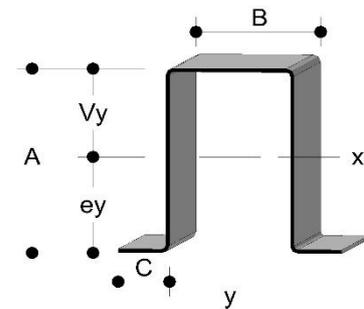
L'interasse tra i montanti interni è di circa 7,10 mentre per quelli esterni abbiamo circa 7,20 m.

L'interdistanza tra le singole file di moduli, calcolata per evitare problemi di ombreggiamento tra file contigue, è di 5,00 metri.

I moduli utilizzati, affiancati secondo il lato maggiore, hanno dimensioni di 1,134 m x 2,285 m ed un peso di 32,5 kg cadauno.

L'impalcato così costituito è impostato sui correnti di supporto aventi l'asse di rotazione ad un'altezza di circa 2,23 metri da terra, con un'altezza massima di 3,19 m ed un'altezza minima di 1,30 metri quando raggiungono l'inclinazione massima di 55°.

Tali supporti sono costituiti da profili metallici verticali in acciaio presso-piegato a "Ω", come da immagine allegata a lato:



Nel caso in oggetto il profilo verticale derivante dal predimensionamento ha dimensioni 40x120x80 con caratteristiche meccaniche riportate nella tabella che segue:

CxAxB	Sp.	Sv.	Peso	Area	ey	Vy	Jx	Wx	Ix	Jy	Wy	Iy
	mm	mm	Kg/ml	cm2	cm	cm	cm4	cm3	cm	cm4	cm3	cm
<b>40x120x80</b>	2	390	6,12	7,8	6	6	158,92	26,49	4,51	133,12	17,07	4,13
	2,5	385	7,56	9,6	6	6	195,68	32,61	4,51	163,35	21,08	4,12
	3	380	8,95	11,4	6	6	229,7	38,28	4,49	191,7	24,9	4,1
	3,5	375	10,3	13,1	6	6	263,87	43,98	4,48	219,46	28,69	4,09

Il vincolo strutturale con il terreno sarà realizzato direttamente tramite infissione dei montanti nel terreno, per la profondità valutata in fase di analisi successiva al paragrafo 8.

## 5. ANALISI DEL TERRENO DI FONDAZIONE

La conoscenza della caratterizzazione geologica del terreno per le analisi strutturali da eseguirsi è relativa principalmente alla verifica di stabilità del supporto.

Da un punto di vista sismico il territorio dell'intera Regione è ricompreso in zona 4 dalle NTC vigenti.

Inoltre per la particolare conformazione strutturale e i carichi permanenti applicati, la condizione più gravosa risulta quella relativa all'azione del vento.

Pertanto, in una fase di valutazione preliminare delle caratteristiche meccaniche del terreno di fondazione, si fa riferimento alle informazioni reperibili in letteratura e alla conoscenza diretta del sedime.

Inoltre in fase di analisi si adotteranno delle caratteristiche cautelative, a vantaggio di sicurezza. Come da letteratura, si fa riferimento in particolare alla stima della capacità portante del singolo montante infisso.

Il metodo di valutazione è quello che consente di ricavare la tensione massima di aderenza terreno-montante in funzione delle caratteristiche meccaniche indirette del terreno.

Nel caso specifico ci si riferisce alle prove penetrometriche. La capacità portante viene valutata in funzione della superficie laterale di contatto con il terreno e la tensione tangenziale massima. La tensione per infissione in terreni incoerenti è approssimata verosimilmente (secondo Meyerhof) dalla seguente formula:

$$\tau_s = 2 \times N_{spt} < 100 \text{ kPa}$$

Cautelativamente si assume per il terreno in oggetto il seguente valore:  $N_{spt} = 40$

Pertanto si avrà

$$\tau_s = 80 \text{ kPa} = 0,815 \text{ Kg/cm}^2$$

## 6. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Le fasi di analisi e verifica della struttura sono state condotte in accordo alle seguenti disposizioni normative, per quanto applicabili in relazione al criterio di calcolo adottato dal progettista, evidenziato nel prosieguo della presente relazione:

Legge 5 novembre 1971 n. 1086 (G. U. 21 dicembre 1971 n. 321) "Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica".

Legge 2 febbraio 1974 n. 64 (G. U. 21 marzo 1974 n. 76) "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche". Indicazioni progettive per le nuove costruzioni in zone sismiche a cura del Ministero per la Ricerca scientifica - Roma 1981.

D. M. Infrastrutture Trasporti 17/01/2018 (G.U. 20/02/2018 n. 42 - Suppl. Ord. n. 8) "Aggiornamento delle Norme tecniche per le Costruzioni".

Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. (G.U. Serie Generale n. 35 del 11/02/2019 - Suppl. Ord. n. 5) Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.

## 7. ANALISI AZIONI DI CALCOLO

La valutazione dei carichi e dei sovraccarichi è stata eseguita in accordo con le disposizioni del punto 3.1 del Norme Tecniche sulle Costruzioni del 2018 (NTC2018).

In particolare, è stato fatto riferimento alle Tabelle 3.1.I e 3.1.II del D.M. 2018, per i pesi propri dei materiali e per la quantificazione e classificazione dei sovraccarichi.

Relativamente ai carichi permanenti si evidenzia che il peso della struttura è a favore di sicurezza in quanto contrasta l'azione del vento su un possibile "sfilamento" dal terreno dei montanti della struttura. Nell'analisi dei carichi permanenti si è riportato il peso della struttura di sostegno di circa 750 kg totali per tracker da 26 moduli, alla sua incidenza a m<sup>2</sup> di superficie incidente.

### Carichi permanenti:

Peso dei pannelli:  $q = 12,54 \text{ kg/m}^2$ ;

Peso delle strutture di sostegno:  $q = 9,03 \text{ kg/m}^2$ ;

AZIONE DEL VENTO PAR. 3.3 NTC18

## DEFINIZIONE DEI DATI

**Zona:** 6) Sardegna (zona a OCCIDENTE della retta congiungente Capo Teulada con l'Isola di Maddalena)



**Classe di rugosità del terreno:** D) Aree prive di ostacoli (aperta campagna, aeroporti, aree agricole, pascoli, zone paludose o sabbiose, superfici innevate o ghiacciate, mare, laghi,....)

Nelle fasce entro i 40 km dalla costa delle zone 1,2,3,4,5 e 6 la categoria di esposizione è indipendente dall'altitudine del sito.

as (altitudine sul livello del mare della costruzione): **80 m**

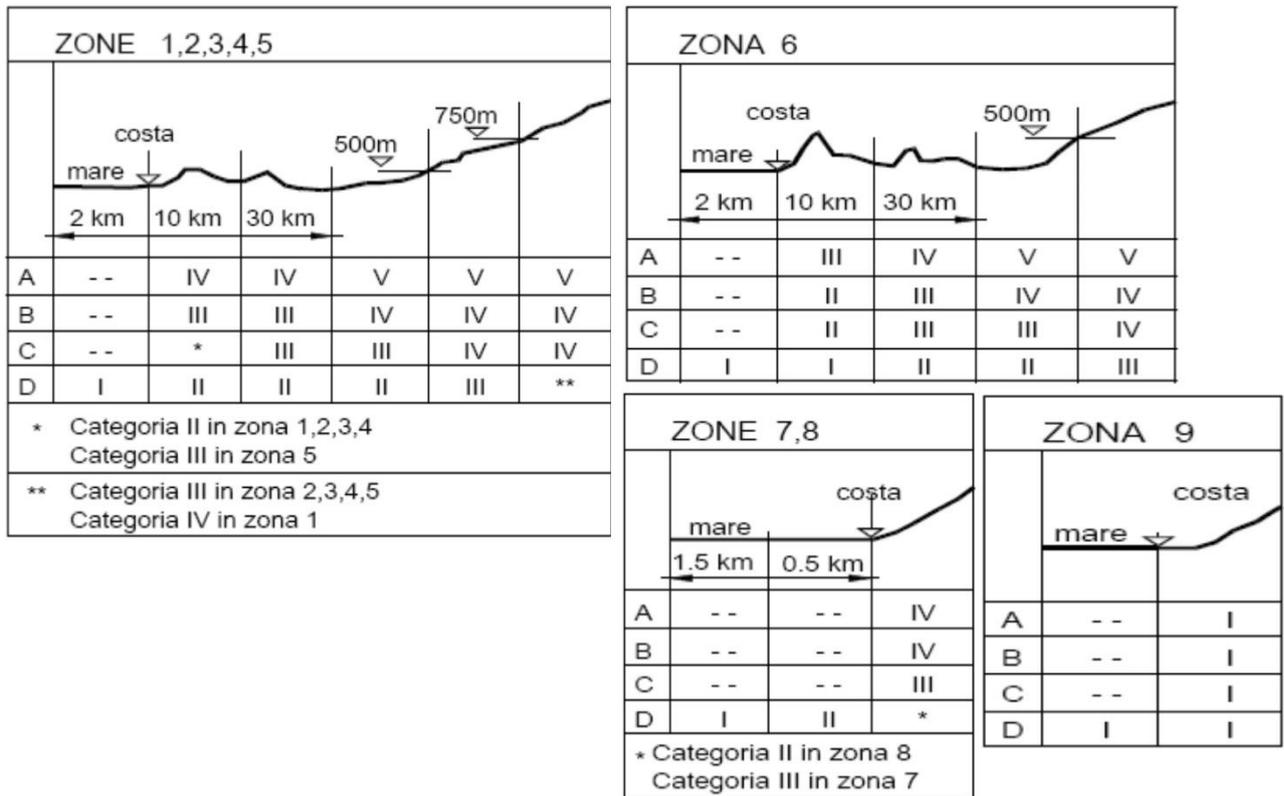
Distanza dalla costa **4,7 km**

TR (Tempo di ritorno):

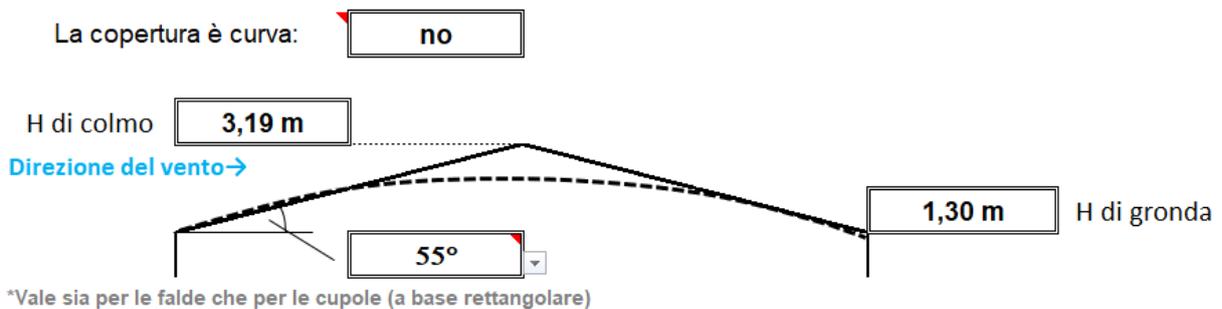
50 anni

Categoria di esposizione

I



Altezza del colmo della copertura, rispetto al suolo e inclinazione della falda sopravento:



CALCOLO VELOCITA' DI RIFERIMENTO DEL VENTO §3.3.2.

Zona	vb,0 [m/s]	a0 [m]	ks	Ca
6	28	500	0.36	1,000

$$vb = vb,0 * ca$$

ca = 1 per  $as \leq a0$

ca =  $1 + ks (as/a0 - 1)$  per  $a0 < as \leq 1500$  m

$v_b$  (velocità base di riferimento) = 28,00 m/s

$$v_r = v_b \cdot c_r$$

$c_r$  coefficiente di ritorno 1,00

$v_r$  (velocità di riferimento) = 28,02 m/s

**PRESSIONE CINETICA DI RIFERIMENTO §3.3.6.**

$q_r$  (pressione cinetica di riferimento [N/mq])

$$q_r = 1/2 \cdot \rho \cdot v_r^2 \quad (\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3)$$

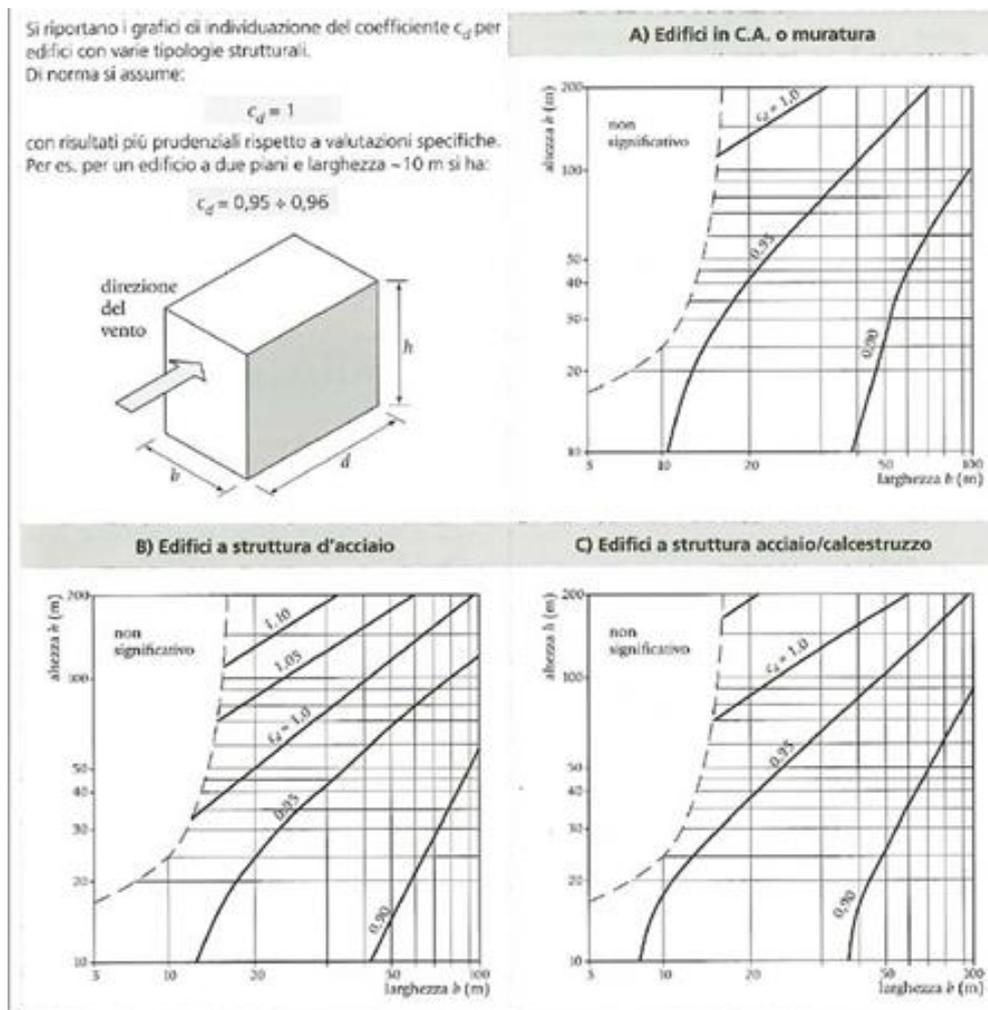
**Pressione cinetica di riferimento  $q_r = 490,72 \text{ [N/m}^2\text{]}$**

**CALCOLO DEI COEFFICIENTI**

**Coefficiente dinamico [§3.3.8]**

$c_d$	<b>1,00</b>
-------	-------------

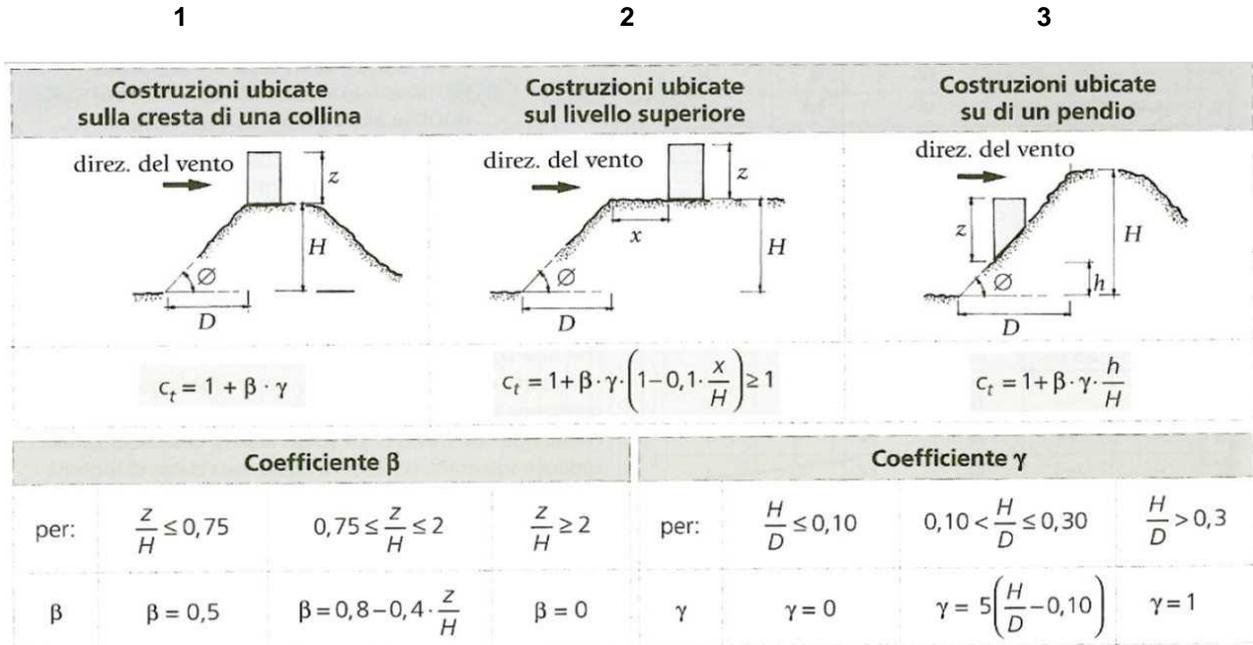
Esso può essere assunto cautelativamente pari ad 1 nelle costruzioni di tipologia ricorrente, quali gli edifici di forma regolare non eccedenti 80 m di altezza ed i capannoni industriali, oppure può essere determinato mediante analisi specifiche o facendo riferimento a dati di comprovata affidabilità.



**Coefficiente Topografico (Orografico)**

Il coefficiente topografico si assume di norma uguale ad 1, sia per zone pianeggianti, ondulate, collinose e montane.

Nel caso di costruzioni che sorgono presso la sommità di colline o pendii isolati si procede nel modo seguente:



**Caso selezionato:** Condizione non isolata

**Il coefficiente topografico vale:  $c_t$  1,00**

**Coefficiente di esposizione [§3.3.7]**

Il coefficiente di esposizione dipende dall'altezza z sul suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito (e quindi dalla classe di rugosità del terreno) ove sorge la costruzione; per altezze non maggiori di z=200 m valgono le seguenti espressioni

$$c_e(z) = k_r \cdot c_t \cdot \ln(z/z_0) [7 + c_t \cdot \ln(z/z_0)] \text{ per } z \geq z_{min}$$

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

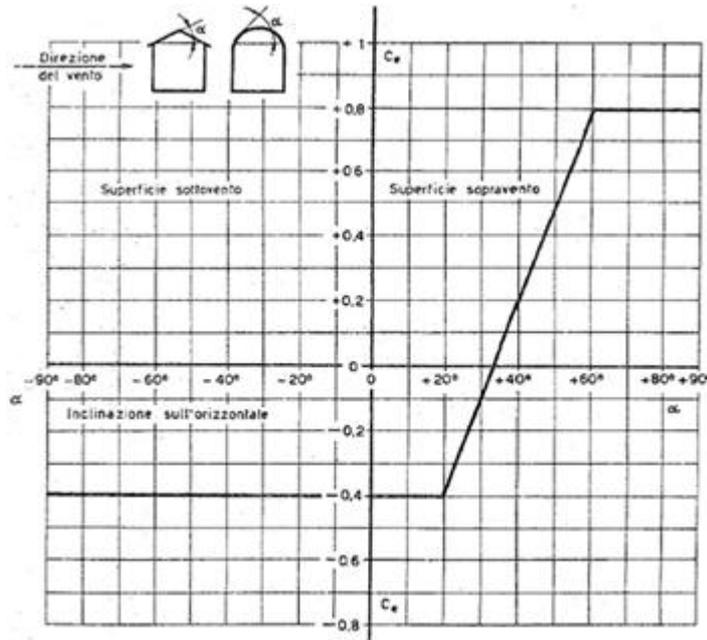
$k_r$	$Z_0$	$Z_{min}$
0,17	0,01	2,00

<b>Coefficiente di esposizione minimo</b>	$C_{e,min}$	<b>1,88</b>	$z < 2,00$
<b>Coefficiente di esposizione alla gronda</b>	$C_{e,gronda}$	<b>1,88</b>	$z = 1,30$
<b>Coefficiente di esposizione al colmo</b>	$C_{e,colmo}$	<b>2,13</b>	$z = 3,19$

### Coefficiente di forma

Edifici a pianta rettangolare con coperture piane, a falde, inclinate, curve

E' il coefficiente di forma (o coefficiente aerodinamico), funzione della tipologia e della geometria della costruzione e del suo orientamento rispetto alla direzione del vento. Il suo valore può essere ricavato da dati suffragati da opportuna documentazione o da prove sperimentali in galleria del vento.



Tettoia ad uno spiovente

Configurazione più svantaggiosa

Configurazione A

(1) parete sopravvento	$c_p$	0,00
(2) copertura sopravvento	$c_p$	2,18
(3) copertura sottovento	$c_p$	0,00
(4) parete sottovento	$c_p$	0,00

Direzione del vento →

(2)  $c_{pe} = 2,18$



Configurazione A

(1) parete sopravvento	$c_p$	0,00
(2) copertura sopravvento	$c_p$	-2,18
(3) copertura sottovento	$c_p$	0,00
(4) parete sottovento	$c_p$	0,00

Direzione del vento →

(2)  $c_{pe} = -2,18$



Configurazione B

## PRESSIONI DEL VENTO

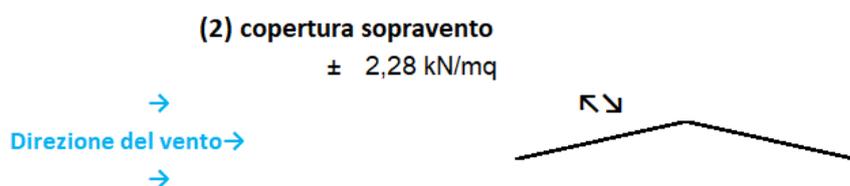
Combinazione più sfavorevole per pareti e copertura:

Valori massimi della pressione per ogni elemento

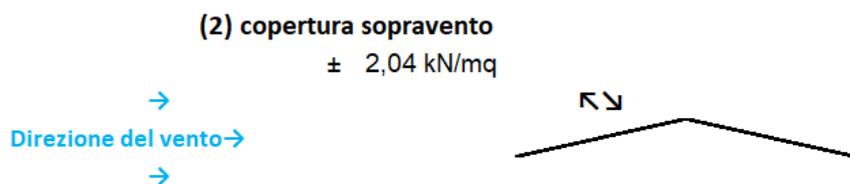
$$p \text{ (pressione del vento)} = q_{cd} \cdot c_t \cdot c \cdot c_p$$

$c_d$  (coefficiente dinamico)  $c_t$  (coefficiente topografico)  $c_e$  (coefficiente di esposizione)  
 $c_p$  (coefficiente di forma)

	$p$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$c_d$	$c_t$	$c_e$	$c_p$	$P$ [kN/m <sup>2</sup> ]
(1) par. sopravent.	0,491	1,00	1,00	1,883	0,00	0,00
(2) cop. sopravent.	0,491	1,00	1,00	2,127	2,18	2,28
(3) cop. Sottovent.	0,491	1,00	1,00	2,127	0,00	0,00
(4) par. sottovent.	0,491	1,00	1,00	1,883	0,00	0,00



Valori medi della pressione per ogni elemento (da utilizzare per caricare il modello FEM)



Il simbolo ± indica che bisogna considerare due combinazioni nel modello FEM

### Azione del sisma:

Il sito è in zona classificata di quarta categoria ai sensi delle NTC2018.

Come visto relativamente al carico da vento, data la preponderanza dell'azione del vento rispetto a quella del sisma, si tralascia l'esposizione delle relative azioni orizzontali.

Carico Neve:

Oltre alla ridotta azione del carico relativo, si fa presente che il carico da neve nei confronti dell'azione negativa del vento risulterebbe stabilizzante, pertanto anche in questo caso se ne tralascia, a favore di sicurezza, il calcolo e l'applicazione sulla struttura.

## 8. CALCOLO DELLE FONDAZIONI

Con riferimento a quanto precedentemente indicato, relativamente ai carichi adottati, alle resistenze dei materiali, alla geometria strutturale ed alla metodologia di calcolo, si riporta, di seguito, il calcolo della fondazione dei montanti da infiggere sul terreno.

### **Geometria:**

Interasse montanti:  $l = 7,20 \text{ m}$

Larghezza esposizione moduli:  $L = 2,29 \text{ m}$

Superficie esposta al vento:  $S = 16,49 \text{ m}^2$

### **Azione risultante sul montante:**

Pressione del vento  $p = 2,28 \text{ kN/m}^2$

Azione del vento:  $F_v = p \times S = 759,72 \text{ kg}$

Peso dei pannelli:  $12,54 \text{ kg/m}^2$

Peso delle strutture di sostegno:  $9,03 \text{ kg/m}^2$

Carichi permanenti:  $F_p = 355,69 \text{ kg}$

Applicando i coefficienti di normativa l'azione verticale di sfilamento  $S_f$  sulla fondazione per un angolo di  $55^\circ$  sarà:

$$S_f = F_v * \sin 55^\circ = 3\,080 \text{ kg}$$

### **Azione resistente sul montante:**

Tensione massima tangenziale:  $\tau_s = 80 \text{ kPa} = 0,815 \text{ Kg/cm}^2$

Superficie di attrito equivalente:  $A_a = 80 \text{ cm}^2/\text{cm}$

L'analisi di equilibrio, comprensiva dei coefficienti normativi amplificativi e di sicurezza, permette di determinare la lunghezza minima di infissione per i montanti dei moduli esposti direttamente all'azione del vento, che sono quelli maggiormente esposti rispetto a quelli delle file intermedie, e sarà pari a:

$$L_{\min} = \frac{S_f \cdot \phi}{\tau_s \cdot A_a} = 61 \text{ cm}$$

Considerando le azioni applicate, l'inclinazione massima e lo schema strutturale, la condizione di carico più sfavorevole sulla struttura è quella che si riferisce al vento posteriore con azione di sfilamento della fondazione.

In considerazione del fatto che l'aumento della lunghezza di infissione è a favore della sicurezza, si considera in questa fase preliminare, una lunghezza di infissione minima di 1.00 m.

## 9. CONCLUSIONI

Per quanto riportato nei vari paragrafi precedenti si riassume e si conclude che:

- la relazione ha per oggetto la verifica delle fondazioni delle strutture portanti dei moduli fotovoltaici dell'impianto. L'impianto prevede il posizionamento di moduli inseguitori cosiddetti *traker*, su strutture in carpenteria metallica. Le strutture sono vincolate al suolo per "infissione" dei montanti verticali (pali infissi);
- per il calcolo di predimensionamento delle fondazioni, *di tipo preliminare*, si sono definite le condizioni al contorno adottate nelle analisi e nelle verifiche facendo riferimento a indicazioni bibliografiche, pratiche di ingegneria usuali per interventi simili, conoscenza dello stato di fatto dei luoghi e metodologie adeguate a tale natura. ***Sicuramente si dovranno, nelle successive fasi di progettazione, verificare ed approfondire tali condizioni coerentemente alle susseguenti fasi di indagine;***
- dal calcolo effettuato è stata avvalorata la possibilità di realizzare la fondazione delle strutture dell'impianto per infissione dei pali metallici, che risulta essere la tipologia di intervento meno invasiva e completamente riutilizzabile. ***La lunghezza di infissione prevista preliminarmente ( $L_{min} = 1,00\text{ m}$ ) potrà eventualmente variare con l'approfondimento delle indagini volte a determinare le caratteristiche del terreno e con riferimentola alla tipologia strutturale optata;***
- la fattibilità delle opere previste, sia staticamente, che dal punto di vista operativo, funzionale e con riferimento alla caratterizzazione geologica del sito d'intervento, sia assicurata per i dati al momento disponibili.