



REGIONE PUGLIA

PROVINCIA DI TARANTO

COMUNE DI SAN GIORGIO JONICO

Autorizzazione Unica Regionale per la realizzazione di un impianto per la produzione di energia elettrica alimentato da fonte solare fotovoltaica con potenza nominale pari a 73,6515 MWp integrato ad un progetto di utilizzazione agronomica del fondo

ELABORATO:

Verifica al ribaltamento (sfilamento) delle strutture a sostegno dei pannelli fotovoltaici

DATA:

AGOSTO 2020

SCALA:

F.TO: A4

REV. n.: 0

SOGGETTO PROPONENTE:

SAN GIORGIO JONICO S.R.L.

PIAZZA WALTHER VON VOGELWEIDE, 8

39100 Bolzano (BZ)

P.I.: 03027970213

ORDINE DEGLI INGEGNERI
della Provincia di TARANTO
Dott. Ing.
TRAMONTE Fernando
N. 1051

ORDINE DEGLI INGEGNERI
della Provincia di TARANTO
Dott. Ing.
FRASCELLA Francesco Paolo
N. 1682

PROGETTISTI:

Ing. Francesco FRASCELLA

Via Emanuele Filiberto di Savoia, 29 - 74027 San Giorgio Jonico (TA)

Telefax.: 0995919263; Cell.: 3291747756

mail: francescofra72@gmail.com; p.e.c.: francesco.frascella@pec.it

C.F.: FRS FNC 72T07 L049A; P.I.: 02363510732



Ing. Fernando TRAMONTE

Viale Magna Grecia, 38 - 74016 Massafra (TA)

Telefax.: 0998805525; Cell.: 3356652034

mail: info@stiengineering.it; p.e.c.: stiengineering@pec.it

P.I.: 02504860731

Timbri e visti

PREMESSA

La presente relazione illustra la verifica a ribaltamento o, meglio, a sfilamento delle strutture di sostegno dei pannelli fotovoltaici sotto l'azione del vento.

Il progetto prevede la realizzazione di un impianto per la produzione di energia elettrica alimentato da fonte solare con potenza nominale pari a 73,6515 MWp ai sensi della D.G.R. n. 35 del 23.01.2007, da installare su terreno agricolo sito nel territorio di pertinenza del Comune di San Giorgio Jonico (TA), integrato ad un progetto di utilizzazione agronomica del fondo che prevede la coltivazione di grano duro nei filari che, per esigenze impiantistiche, vengono a crearsi tra i moduli fotovoltaici.

La denominazione dell'impianto sarà "Impianto Fotovoltaico SAN GIORGIO JONICO".

L'impianto sarà del tipo *grid connected* e l'energia elettrica prodotta sarà immessa completamente nella rete elettrica nazionale con connessione in antenna a 150 kV alla Cabina Primaria ENEL denominata "San Giorgio Jonico".

Il presente documento si propone di descrivere le tipologie strutturali, gli schemi ed i modelli di calcolo utilizzati. Definisce, inoltre, le azioni agenti, coerentemente con i risultati delle indagini e delle elaborazioni riportate nella relazione geotecnica, ed i criteri di verifica da adottare per soddisfare i requisiti di sicurezza previsti dalla normativa tecnica vigente.

In particolare, si seguiranno le disposizioni dettate dal DM 17/01/2018 e dalla Circolare esplicativa n.7 del 21/01/2019, nonché, per la particolare configurazione geometrica del problema, dalla Circolare esplicativa n.617 del 02/02/2009 laddove non sia applicabile la Circolare 7/2019, coerentemente con il metodo di verifica agli stati limite.

Si anticipa fin d'ora che la vita nominale dell'opera in progetto si assumerà pari 50 anni (Costruzione di Tipo 2 – Opere ordinarie). La classe d'uso sarà la classe II.

Le caratteristiche geologiche e geotecniche dei terreni sono state desunte dallo studio geologico allegato al presente progetto.

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La normativa cui viene fatto riferimento nelle fasi di calcolo sono le "Norme Tecniche per le Costruzioni", D.M. 17/01/2018, supplemento alla Gazzetta Ufficiale n° 42 del 20/02/2018.

Si farà inoltre riferimento alle seguenti norme:

- Circolare esplicativa n°7 del 21/01/2019 "Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17/01/2018";
- Circolare esplicativa n°617 del 02/02/2009 "Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme

Relazione verifica a ribaltamento (sfilamento) strutture di sostegno pannelli

tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008”;

- Istruzioni CNR DT 207/2008 del 19/02/2009 "Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni";
- Legge n. 1086 del 05.11.1971 "Norme per la disciplina delle opere in c.a. normale e precompresso, ed a struttura metallica".
- Legge n. 64 del 02.02.1974 - "Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche".
- Eurocodice 2 "Progettazione delle strutture di calcestruzzo".
- Eurocodice 3 "Progettazione delle strutture di acciaio".
- Eurocodice 8 "Progettazione delle strutture per la resistenza sismica".

INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Il sito su cui sorgerà l’impianto è ubicato in Provincia di Taranto, a Nord - Ovest dell’abitato di San Giorgio Jonico ed a circa 1,8 Km da questi.

Esso rappresenta parte di un vasto compendio, denominato “Fondo Serro”, appartenuto all’Amministrazione Ferroviaria fino al marzo 1919 e successivamente al Demanio dello Stato – Ministero della Marina - fino al dicembre 2007.

Il sito ricade nel foglio 494 della cartografia I.G.M. al 50.000, ovvero parte nell’elemento 494093 e parte nell’elemento 494094 della cartografia I.G.M. al 5.000, tra le coordinate Est 698760 ÷ 700619 e tra le coordinate Nord 4482155 ÷ 4483700 riferite al sistema di riferimento UTM WGS84 33N - ETRS89 (cfr. Elaborato Grafico n. 1).

In catasto i terreni in esame sono censiti al N.C.T. del Comune di San Giorgio Jonico al Foglio di Mappa n. 4, particelle nn. 705, 706, 708, 710, 711, 712, 714, 717, 718, 720, 721, 722, 723, 725 e 726 per una superficie catastale complessiva di Ha 115.02.93.

Come detto, sebbene tutte le particelle risultassero coltivate ad uliveto, solo una piccola porzione delle particella 714 lo era nelle realtà, per circa 4.30 Ha.

La successiva trasformazione del fondo ha reso coltivabili a seminativo circa 80 Ha, mentre la restante porzione del fondo risulta incolta anche per il sopravvenuto P.P.T.R. che ne ha vincolato l’uso a “Prati e pascoli naturali”.

Proprio a causa del vincolo imposto dal P.P.T.R. non saranno installati moduli fotovoltaici né sarà coltivato grano sulle particelle o pozioni di particelle interessate; pertanto l’area occupata dai pannelli e dalla coltivazione di grano sarà complessivamente pari a circa 80,00 Ha, intendendosi comprese in dette superfici anche le aree necessarie per la realizzazione della viabilità interna, delle stazioni di conversione

Relazione verifica a ribaltamento (sfilamento) strutture di sostegno pannelli

dell'energia, della cabina utente e della cabina di consegna per la connessione, nonché tutti i vincoli di distanza, a vario titolo, previsti dalla normativa e dai regolamenti vigenti.

Le restanti superfici, compatibilmente con gli Obiettivi di Qualità e con le Normative d'Uso del P.P.T.R., saranno utilizzate per la realizzazione di misure di mitigazione e compensazione ambientale.

Urbanisticamente il sito ricade in Zona Omogenea "E" – Agricola del vigente strumento urbanistico del Comune di San Giorgio Jonico, in località "SERRO", destinazione compatibile *ex lege* (D.Lgs. 387/2003) con l'intervento proposto (cfr. Elaborato Grafico n. 1).

L'area è pressoché pianeggiante, con quote s.l.m. variabili tra i 22m ed i 60m, e con pendenze variabili tra lo 0% ed il 2% (cfr. Elaborato Grafico n. 5).

La principale via di comunicazione nell'intorno dell'area è rappresentata dalla S.S. 7, la quale si raggiunge percorrendo per circa 1,0 Km la strada vicinale "San Giovanni".

DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO

L'impianto si compone di 15 sottocampi fotovoltaici, dei quali uno di potenza nominale pari a 4.761,90 kW; uno di potenza nominale pari a 5.148,00 kW; dieci di potenza nominale pari a 4.972,50 kW; due di potenza nominale pari a 4.984,20 kW ed uno di potenza nominale pari a 4.048,20 kW; per una potenza nominale totale installata pari a 73.651,50 kW (73,6515 MWp).

Al sottocampo con potenza di picco pari a 4.761,90 kW faranno capo 10.582 moduli fotovoltaici, collegati in serie in gruppi di 26 a formare così una stringa; le stringhe, in numero di 407, saranno collegate a loro volta, in gruppi di 19 o 20, agli inverter di stringa, questi in numero di 21, a formare così il sottocampo.

Al sottocampo con potenza di picco pari a 5.148,00 kW faranno invece capo 11.440 moduli fotovoltaici, sempre collegati in serie in gruppi di 26 a formare così una stringa; le stringhe, in numero di 440, saranno collegate a loro volta, in gruppi di 20, agli inverter di stringa, questi in numero di 22.

A ciascun sottocampo con potenza di picco pari a 4.972,50 kW faranno invece capo 11.050 moduli fotovoltaici, sempre collegati in serie in gruppi di 26 a formare così una stringa; le stringhe, in numero di 425 per ogni sottocampo, saranno collegate a loro volta, in gruppi di 19 o 20, agli inverter di stringa, questi in numero di 22 per ogni sottocampo. A ciascun sottocampo con potenza di picco pari a 4.984,20 kW faranno invece capo 11.076 moduli fotovoltaici, sempre collegati in serie in gruppi di 26 a formare così una stringa; le stringhe, in numero di 426 per ogni sottocampo, saranno collegate a loro volta, in gruppi di 19 o 20, agli inverter di stringa, questi in numero di 22 per ogni sottocampo.

Infine, al sottocampo con potenza di picco pari a 4.048,20 kW faranno invece capo 8.996 moduli fotovoltaici, sempre collegati in serie in gruppi di 26 a formare così una stringa; le stringhe, in numero di 346, saranno collegate a loro volta, in gruppi di 19 o 20, agli inverter di stringa, questi in numero di 18.

Relazione verifica a ribaltamento (sfilamento) strutture di sostegno pannelli

Gli inverter di stringa, tutti con potenza massima in uscita pari a 185 kW in C.A., afferiranno ad una cabina di trasformazione dell'energia da bassa tensione ad 800 V a media tensione a 30.000 V.

In particolare, gli inverter del sottocampo con potenza di picco pari a 4.761,90 kW, afferiranno in numero di 21 ad una cabina di trasformazione di potenza apparente pari a 4.070,00 kVA; gli inverter del sottocampo con potenza di picco pari a 4.048,20 kW, afferiranno in numero di 18 ad una cabina di trasformazione di potenza apparente pari a 3330,00 kVA; gli inverter di tutti gli altri sottocampi afferiranno, in numero di 22 ciascuno, ad una cabina di trasformazione di potenza apparente pari a 4.070,00 kVA.

Dopo la conversione CC/CA e l'innalzamento di tensione da 0,8 kV a 30 kV, si avranno dei quadri di parallelo, disposti nella cabina di consegna, che realizzano il parallelo tra i singoli sottocampi di cui è costituito l'impianto.

Da qui partiranno i cavi interrati di media tensione (cinque terne) che, percorrendo la via pubblica, raggiungeranno la stazione utente di trasformazione 150/30 kV, dove avverrà l'innalzamento di tensione necessaria alla connessione alla Rete Elettrica Nazionale.

Dalla stazione utente partirà una terna di cavi interrati in alta tensione (150 kV) che, dopo un breve percorso (circa 120 metri), raggiungerà infine il nuovo stallo in Cabina Primaria, come da S.T.M.G.

I moduli fotovoltaici saranno montati su dei trackers monoassiali ad asse orizzontale, a realizzare un cosiddetto "impianto ad inseguimento". I trackers potranno montare 26 moduli (13x2), 52 moduli (26x2) o 78 moduli (39x2), ossia una, due o tre stringhe fotovoltaiche, a seconda delle esigenze di layout.

Complessivamente, quindi, l'impianto sarà realizzato utilizzando 163.670 moduli in silicio monocristallino con celle ad alta efficienza; la potenza di ogni singolo modulo è di 450 Wp; tale potenza è intesa in condizioni standard (S.T.C.), ovvero con irraggiamento di 1.000W/mq, AM: 1,5; Temperatura di 25 °C.

L'impianto sarà completato da tutte le infrastrutture tecniche necessarie e dalle opere accessorie, quali: impianti di illuminazione, videosorveglianza, antintrusione, monitoraggio, cancelli e recinzioni.

Tutti i locali tecnici saranno costituiti da prefabbricati in calcestruzzo armato, costruiti secondo le normative vigenti e corredato da tutti gli accorgimenti necessari per garantirne la sicurezza e la rispondenza alla normativa.

TRACKERS MONOASSIALI

Per il fissaggio dei moduli fotovoltaici è stata scelta una struttura metallica sostenuta da pali infissi nel terreno, in cui i moduli risulteranno fissati a profili trasversali in file di 2 disposte in verticale.

Le dimensioni principali di tali strutture sono di seguito riepilogate:

- dimensioni moduli fotovoltaici: (2.098 * 1.046 * 40) mm;

Relazione verifica a ribaltamento (sfilamento) strutture di sostegno pannelli

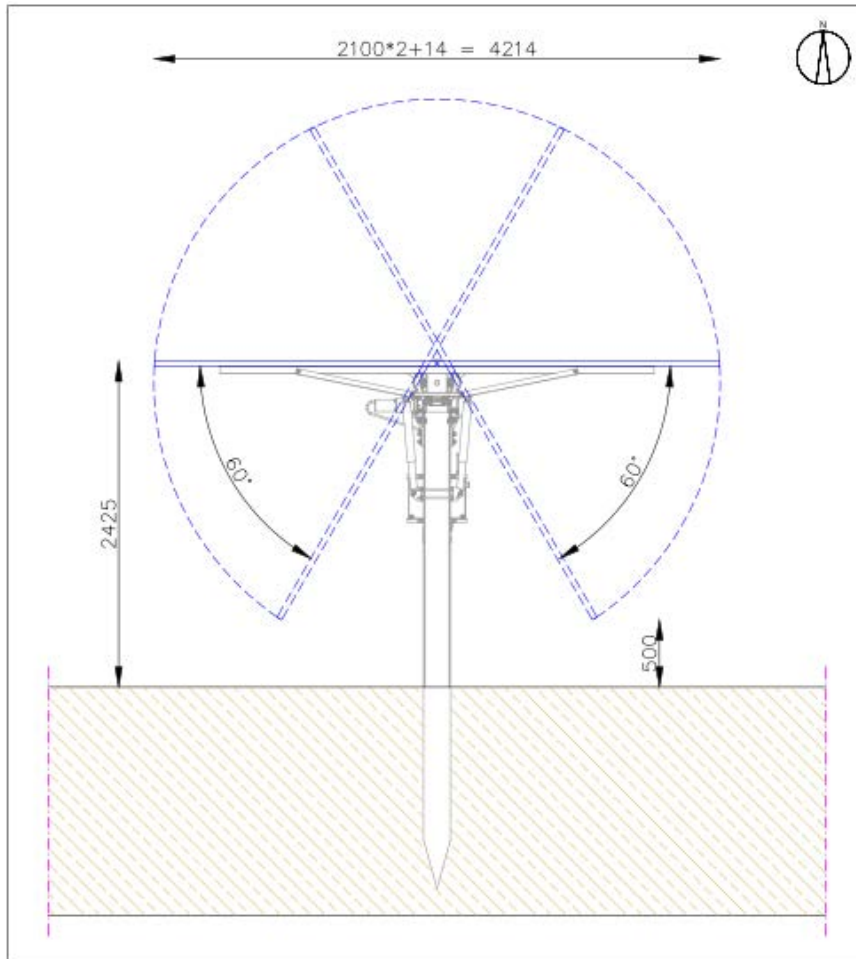
- numero moduli per stringa:	13 * 2 = 26;
- larghezza minima struttura (1 stringa):	14.080 mm;
- larghezza massima struttura (3 stringhe):	41.900 mm;
- lunghezza struttura (lungo piano di giacitura, incluso modulo):	4.214 mm;
- altezza massima fuori terra struttura (rot. $\pm 60^\circ$):	4.169 mm;
- altezza minima fuori terra struttura:	500 mm;
- distanza minima strutture:	300 mm;
- angolo di tilt struttura:	$\pm 60^\circ$;
- interasse trackers (pitch):	8.000 mm.

In particolare, le strutture di sostegno dei moduli fotovoltaici sono ad inseguimento monoassiale con asse di rotazione lungo la direttrice Nord-Sud, e permettono al piano dei pannelli di seguire la rotazione del sole Est-Ovest.

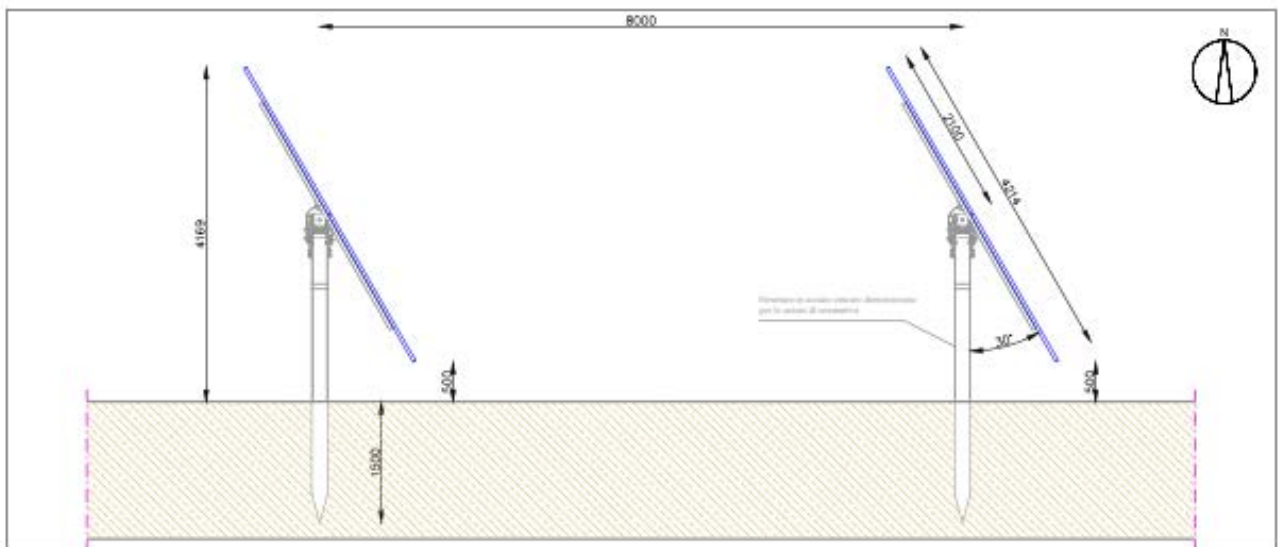
I pannelli sono collegati, per mezzo di profilati trasversali, ad un'asse centrale che ruota attorno alla direttrice Nord-Sud grazie ad un dispositivo meccanico. L'asse orizzontale è posto ad una altezza pari a 2,42 m fuori terra, con un angolo di rotazione di $\pm 60^\circ$, sfruttando così al meglio l'assorbimento dell'energia solare.

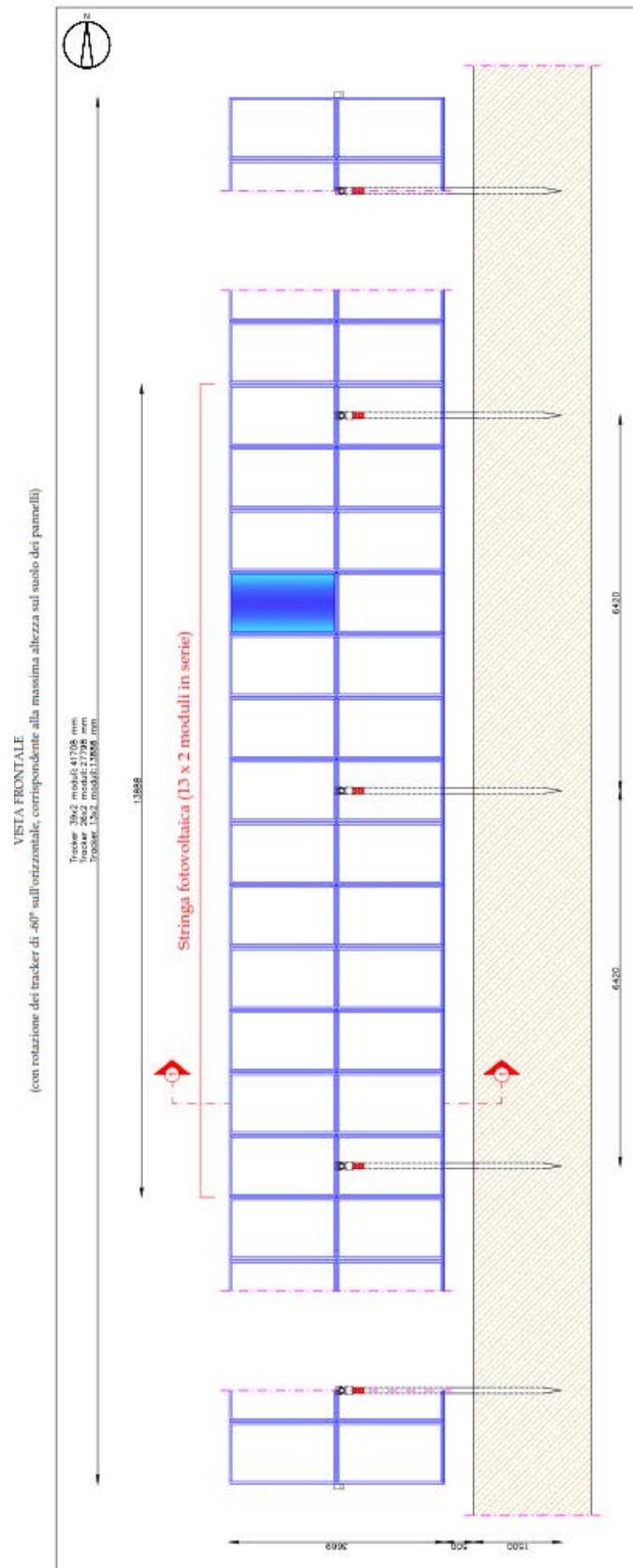
Il corrente che governa il moto della struttura è sostenuto da pilastri cui è collegato mediante delle cerniere con asse parallelo all'asse di rotazione. Nella cerniera centrale trova collocazione una ghiera metallica che, collegata ad un motore ad azionamento remoto, regola l'inclinazione del piano dei pannelli. I pilastri di sostegno sono immorsati nel terreno ad una profondità variabile in funzione delle caratteristiche meccaniche e litostratigrafiche dei terreni di fondazione. Le modalità di ammorsamento di tali profilati variano dalla infissione (battitura) alla trivellazione. In alcuni casi le fondazioni potrebbero consistere anche in zavorre in c.a. .

La struttura proposta è rappresentata nelle tavole allegate al presente progetto (cfr. Elaborato Grafico n. 14).



SEZIONE 1 - 1





AZIONI AGENTI

Le azioni che si sono considerate agenti sulle strutture in esame sono:

- Peso proprio degli elementi strutturali;
- Carichi permanenti non strutturali e apparecchiature;
- Azione del vento.

Per il problema in esame non viene considerata l'azione della neve, in quanto azione favorevole.

PESO PROPRIO DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI

Il peso proprio degli elementi strutturali è stato valutato come prodotto del volume dell'elemento strutturale stesso per il proprio peso specifico. In particolare, sono stati utilizzati i seguenti pesi specifici:

- acciaio: 7.850 kg/m³.

Nel caso in esame, si prevede di adottare per le strutture principali di sostegno dei pannelli dei pali a sezione circolare di diametro esterno pari a 139,7 mm e spessore pari a 6 mm, che hanno un peso a metro lineare pari a 19,8 Kg, con una lunghezza del palo pari a 3,5 metri (1,5 metri di infissione + 2 metri fuori terra), e delle travi orizzontali di sezione tubolare quadrata, di lato 200 mm e spessore 5 mm, che hanno un peso a metro lineare pari a 30,1 Kg, con lunghezza pari a 6,42 metri (ampiezza del campo di pertinenza di ciascun palo).

Il peso proprio degli elementi strutturali è, quindi, pari a:

$$G_1 = 3,5 \times 19,8 + 30,1 \times 6,42 = 69,3 + 193,24 = 262,54 \text{ daN.}$$

Questo valore è da intendersi come caratteristico ed, ai fini delle verifiche, dovrà essere fattorizzato per gli opportuni coefficienti amplificativi, funzione della particolare verifica eseguita.

CARICHI PERMANENTI NON STRUTTURALI

In questa tipologia sono considerati i carichi non rimovibili durante il normale esercizio della costruzione, Ricadono in questa tipologia i pesi propri delle apparecchiature.

E' stato considerato, a favore di sicurezza, il solo peso proprio dei moduli desunto dalla scheda tecnica del produttore, e pari a 24,2 Kg per pannello.

Pertanto il valore dei carichi permanenti non strutturali è, quindi, pari a:

$$G_2 = 24,2 \times 12 = 290,4 \text{ daN.}$$

Anche questo valore è da intendersi come caratteristico ed, ai fini delle verifiche, dovrà essere fattorizzato

per gli opportuni coefficienti amplificativi, funzione della particolare verifica eseguita.

AZIONE DEL VENTO

Le azioni del vento sono state determinate in conformità al par. 3.3 del D.M. 17/01/18, della Circolare del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 21 gennaio 2019 n. 7, e della Circolare esplicativa n.617 del 02/02/2009.

Il vento, la cui direzione si considera generalmente orizzontale, esercita sulle costruzioni azioni che variano nel tempo e nello spazio provocando, in generale, effetti dinamici. Per le costruzioni usuali tali azioni sono convenzionalmente ricondotte a delle forze statiche equivalenti, calcolate come di seguito si riporta.

La geometria del problema permette di considerare la struttura alla stregua di una tettoia a singola falda.

La configurazione più severa dell'orientamento dei trackers, ossia quella che dà luogo alla massima azione del vento, è quella che vede i pannelli inclinati di 60° rispetto all'orizzontale: man mano che l'inclinazione diminuisce, infatti, la superficie "vista" dal vento nel suo moto orizzontale diminuisce, riducendosi così la forza che esso esercita sugli elementi strutturali; l'incremento dell'azione radente del vento associata alla diminuzione dell'inclinazione è trascurabile anche per la finitura liscia delle superfici.

Nel caso di tettoie l'azione del vento è schematizzabile come le forze F risultanti dal campo di pressioni sulla superficie della falda della tettoia, dirette ortogonalmente ad essa. Tali forze sono quantificate dal prodotto dei coefficienti di forza, c_F , per la superficie della falda in esame e sono applicate (nel caso in esame) ad 1/4 della lunghezza della falda misurata dal bordo superiore (Circolare 7/2019, punto C3.3.8.2).

La pressione del vento è data dalla seguente espressione:

$$p = q_r c_e c_p c_d$$

dove:

- q_r = la pressione cinetica di riferimento, valutata secondo il punto 3.3.6 del D.M. 17/01/2018;
- c_e = coefficiente di esposizione, valutata secondo il punto 3.3.7 del D.M. 17/01/2018;
- c_p = il coefficiente di pressione, 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;
- c_d = il coefficiente dinamico con cui si tiene conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alle vibrazioni strutturali, valutato secondo il punto 3.3.9. del D.M. 2018.

La pressione cinetica di riferimento q_r (in N/m^2) è data dall'espressione:

$$q_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2$$

nella quale v_r è la velocità di riferimento del vento (in m/s) e ρ è la densità dell'aria assunta convenzionalmente costante e pari a 1,25 kg/m³.

La velocità di riferimento v_r è riferita al periodo di ritorno di progetto.

$$v_r = v_b \cdot c_r$$

Dove

- v_b = velocità base di riferimento di cui al par. 3.3.1 del D.M. 17/01/2018;
- c_r = il coefficiente di ritorno funzione del periodo di ritorno T_R ; in mancanza di specifiche indagini, è deducibile dalla seguente relazione:

$$c_r = 0.75 \sqrt{1 - 0.2 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T_R} \right) \right]}$$

La velocità di base di riferimento v_b è il valore medio su 10 minuti, misurata a 10 m dal suolo su un terreno con categoria di esposizione II, riferito ad un periodo di ritorno di 50 anni. In mancanza di adeguate indagini statistiche è data dall'espressione

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

Dove

- $v_{b,0}$ = velocità base al livello del mare, assegnata nella tab. 3.3.I del D.M. 17/01/2018 in funzione della zona della zona in cui sorge la costruzione;
 - c_a = coefficiente di altitudine fornito dalla seguente relazione
 - o $c_a = 1$ o per $a_s \leq a_0$
 - o $c_a = 1 + k_s (a_s/a_0 - 1)$ o per $a_0 < a_s < 1500$ m
- dove:
- a_0 , k_s sono riportati nella tabella tab. 3.3.I del D.M. 17/01/2018 in funzione della zona ove sorge la costruzione; a_s è l'altitudine sul livello del mare (in m s.l.m.) del sito ove sorge la costruzione.

Tab. 3.3.I - Valori dei parametri $v_{b,0}$, a_0 , k_s

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

Nel caso in esame la zona di riferimento ha un'altitudine a_s al massimo pari a a 60 m s.l.m. e, in riferimento alla tabella prima riportata ricade all'interno della zona 3; per cui risulta:

- $v_{b,0} = 27$ m/s
- $a_0 = 500$ m
- $k_s = 0,37$.

Pertanto la velocità del vento associata al periodo di ritorno di progetto $T_R = 50$ anni, per l'altezza del sito esaminato è pari a:

$$v_r = 27 \text{ m/s}$$

La pressione cinetica di riferimento q_r pertanto è

$$q_r = 455,63 \text{ N/m}^2$$

Il coefficiente di esposizione c_e dipende dall'altezza z sul suolo del punto considerato, dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito su cui sorge la costruzione.

In assenza di analisi specifiche che tengano in conto la direzione di provenienza del vento e l'effettiva scabrezza e topografia del terreno che circonda la costruzione, per altezze sul suolo non maggiori di $z = 200$ m, esso è dato dalla formula:

$$c_e(z) = k_r^2 c_t \ln(z/z_0) [7 + c_t \ln(z/z_0)] \quad \text{per } z \geq z_{\min}$$

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

Dove k_r , z_0 e z_{\min} sono forniti dalle tabelle indicate nelle figure seguenti e sono legate alla categoria del sito dove sorge la costruzione; mentre il valore di c_t è il coefficiente di topografia assunto normalmente pari ad 1.

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

L'assegnazione della classe di rugosità non dipende dalla conformazione orografica e topografica del terreno. Si può assumere che il sito appartenga alla Classe A o B, purché la costruzione si trovi nell'area relativa per non meno di 1 km e comunque per non meno di 20 volte l'altezza della costruzione, per tutti i settori di provenienza del vento ampi almeno 30°. Si deve assumere che il sito appartenga alla Classe D, qualora la costruzione sorga nelle aree indicate con le lettere a) o b), oppure entro un raggio di 1 km da essa vi sia un settore ampio 30°, dove il 90% del terreno sia del tipo indicato con la lettera c). Laddove sussistano dubbi sulla scelta della classe di rugosità, si deve assegnare la classe più sfavorevole (l'azione del vento è in genere minima in Classe A e massima in Classe D).

Classe di rugosità del terreno

ZONE 1,2,3,4,5						
	costa		500m		750m	
	mare					
	2 km	10 km	30 km			
A	--	IV	IV	V	V	V
B	--	III	III	IV	IV	IV
C	--	*	III	III	IV	IV
D	I	II	II	II	III	**
* Categoria II in zona 1,2,3,4 Categoria III in zona 5						
** Categoria III in zona 2,3,4,5 Categoria IV in zona 1						

Definizione delle categorie di esposizione

Categoria di esposizione del sito	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

Parametri per la definizione del coefficiente di esposizione

Il coefficiente di coefficiente di esposizione c_e , per il caso in esame in cui $z_{max}=4,00m$ si assume:

$$c_e(z_{min}) = k_r^2 c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \left[7 + c_t \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)\right] = 0,19^2 \ln\left(\frac{4,00}{0,05}\right) \left[7 + \ln\left(\frac{4,00}{0,05}\right)\right] = 1,80$$

Il coefficiente dinamico c_d , con cui si considerano gli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alle vibrazioni strutturali, si assume pari ad 1.

Il coefficiente di pressione c_p è funzione della tipologia e della geometria della costruzione e del suo orientamento rispetto alla direzione del vento.

Nel caso in esame la Circolare 7/2019, al punto C3.3.8.2.1, fornisce indicazioni utili per falde inclinate sull'orizzontale da 0° a 30°; per questo motivo si è scelto, in maniera cautelativa, di valutare c_p come da Circolare 617/2019, che al punto C3.3.10.3.1 lega il valore di c_p , genericamente, all'angolo α di inclinazione sull'orizzontale tramite la relazione:

$$c_p = 1,2(1+\sin\alpha)$$

Nel caso in esame, per $\alpha = 60^\circ$, si ha: $c_p = 1,2(1+\sin60^\circ) = 2,24$.

A questo punto si può calcolare la forza risultante F agente sulla struttura (si considera un campo tra due pali successivi) come:

$$F = q_p(z) L^2 c_f$$

dove:

- F = forza statica equivalente agente sulla struttura;
- $q_p(z) = q_r \times c_e(z) = 455,62 \times 1,8 = 820,1 \text{ N/m}^2$;

Relazione verifica a ribaltamento (sfilamento) strutture di sostegno pannelli

- $L^2 = \text{area della superficie investita dal vento} = 6,42 \times 3,67 = 23,56 \text{ m}^2$;
- $C_F = C_D = 2,24$.

Pertanto si ha: $F = q_p(z) L^2 c_F = 820,1 \times 23,56 \times 2,24 = 43.283,70 \text{ N} = 4.328,37 \text{ daN}$.

Come detto la forza F si considera agente perpendicolarmente alla superficie investita dal vento; la componente di F che tende a sfilare il palo di ammassamento della struttura nel terreno è data dalla componente verticale di F , che indichiamo con F_v , e che è pari a:

$$F_v = F \times \cos\alpha = 4.328,37 \times \cos 60^\circ = 2.164,19 \text{ daN}.$$

Questo valore è da intendersi come caratteristico ed, ai fini delle verifiche, dovrà essere fattorizzato per gli opportuni coefficienti amplificativi, funzione della particolare verifica eseguita.

VERIFICHE

Il problema è di tipo geotecnico, e consiste nella verifica allo SLU di collasso per carico limite di sfilamento nei riguardi dei carichi assiali di trazione (punto 6.4.3.1 delle NTC 2018).

Per questa verifica le NTC indicano che si deve procedere secondo l'Approccio 2, con la combinazione dei coefficienti (A1 + M1 + R3).

Il valore dei coefficienti da adottarsi nelle verifiche, quindi, sono pari a:

- $A1 = 1$, per la fattorizzazione di G_1 (effetto favorevole – Tab. 6.2.I delle NTC 2018);
- $A1 = 0,8$, per la fattorizzazione di G_2 (effetto favorevole – Tab. 6.2.I delle NTC 2018);
- $A1 = 1,5$, per la fattorizzazione di F_v (effetto sfavorevole – Tab. 6.2.I delle NTC 2018);
- $M1 = 1$, per la fattorizzazione dei parametri geotecnici (Tab. 6.2.II delle NTC 2018);
- $R3 = 1,25$, per la fattorizzazione delle resistenze caratteristiche a carico verticale dei pali (Tab. 6.4.II delle NTC 2018).

Nel caso di pali soggetti a sforzi di trazione, il calcolo della resistenza allo sfilamento può essere valutata con il metodo proposto da Das e Seeley.

La relazione generale da utilizzare è la seguente:

$$T_u = T_I + T_b + W$$

dove:

- T_u = resistenza ultima allo sfilamento del palo;
- T_I = resistenza allo sfilamento lungo il fusto;
- T_b = resistenza allo sfilamento dovuto all'eventuale svasamento della base (nel caso in esame assunta pari a 0);

Relazione verifica a ribaltamento (sfilamento) strutture di sostegno pannelli

- W= peso del palo (nel nostro caso assunto pari ai carichi permanenti strutturali e non strutturali di competenza di ogni palo.

La componente della resistenza allo sfilamento dovuta all'attrito e all'adesione lungo il fusto si può calcolare con la seguente relazione:

$$T_I = A_l \alpha C_u$$

dove:

- A_l = area laterale del fusto;
- αC_u = fattore di adesione, uguale a $\alpha = 0,9-0,0625 C_u$, se $C_u < 0,8$ daN/cm², e a $\alpha = 0,4 C_u$ se $C_u > 0,8$ daN /cm²;
- C_u = coesione non drenata del terreno.

Avremo quindi:

- $A_l = \pi \times D \times L = \pi \times 0,14 \times 1,5 = 0,66$ m²;
- $\alpha = 0,4$ (essendo $C_u = 1,5$ daN /cm²);
- $C_u = 1,5$ daN /cm².

Ed infine:

$$T_I = 0,66 \times 0,4 \times 15.000 = 3.958,40 \text{ daN.}$$

Questo valore rappresenta il valore caratteristico della resistenza allo sfilamento dovuta all'attrito e all'adesione lungo il fusto del palo.

Per passare dai valori caratteristici a quelli di progetto, bisogna applicare alle grandezze in gioco i rispettivi coefficienti di sicurezza.

Nel caso in esame:

- i parametri geotecnici (C_u) non subiscono alcuna variazione, in quanto il coefficiente parziale M_1 si assume pari ad 1;
- la resistenza caratteristica, invece, viene divisa per il coefficiente parziale $R_3 = 1,25$, ottenendo:

$$T_{I,D} = T_I / 1,25 = 3.958,40 / 1,25 = 3.166,7 \text{ daN.}$$

Invece, per quanto riguarda le azioni di calcolo, considerando i coefficienti di fattorizzazione A_1 sopra illustrati e detta S_D la risultante delle azioni verticali (vento + pesi strutturali + pesi non strutturali), avremo (i valori vanno considerati con segno, positivi se le azioni sono verso il basso, negativi in caso contrario):

$$S_D = 1,0 \times G_1 + 0,8 \times G_2 + 1,5 \times F_v = 1,0 \times 262,54 + 0,8 \times 290,4 + 1,5 \times (-2.164,19) = -2.751,42.$$

Relazione verifica a ribaltamento (sfilamento) strutture di sostegno pannelli

Poichè risulta: $T_{I,D} / S_D > 1$, la verifica è soddisfatta.

In caso contrario si sarebbe potuto intervenire:

- riducendo la distanza tra i pali, in modo da ridurre le azioni di progetto;
- aumentando il diametro del palo e/o la lunghezza di infissione, in modo da aumentare le resistenze di progetto.

I Progettisti

Ing. Francesco FRASCELLA



Ing. Fernando TRAMONTE

