

TAV.

0.13

REVISIONI	N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO
	00	2/09/2021	PRIMA EMISSIONE		SCM Ingegneria	SCM Ingegneria

NOME FILE		CODIFICA DELL'ELABORATO	
FV222324-PD_A_0.13_REL_Strutture		PROGETTO DEFINITIVO	
DOCUMENTO N°		TITOLO	
FV222324-PD_A_0.13_REL_r00		COMUNE DI MISILISCEMI (TP) - c.da Costa Guardia Impianto Agrovoltaiico di 48,23 MWp denominato GUARRATO	
SCALA CAD	FORMATO	RELAZIONE DI CALCOLO PRELIMINARE SULLE STRUTTURE	
SCALA	FOGLIO		
	/		

COMMITTENTE



Guarrato SRL

Questo documento contiene informazioni di proprietà Guarrato s.r.l. e deve essere utilizzato esclusivamente dal destinatario in relazione alle finalità per le quali è stato ricevuto. E' vietata qualsiasi forma di riproduzione o di divulgazione senza l'esplicito consenso di Guarrato s.r.l.

This document contains information proprietary to Guarrato s.r.l. and it will have to be used exclusively for the purposes for which it has been furnished. Whichever shape of spreading or reproduction without the written permission of Guarrato s.r.l is prohibit.

PROJECT EXECUTION

I TECNICI



Via C. del Croix, 55

72022 Latiano BR

Mail: info@scmingegneria.it

Tel : +39 0831 728955

INTRODUZIONE

La presente relazione tecnica ha lo scopo di descrivere i criteri di progetto impiegati nel dimensionamento delle strutture di supporto dei moduli fotovoltaici, da installarsi all'interno del parco Fotovoltaico "GUARRATO", che la omonima società ha intenzione di realizzare nel territorio del Comune di Misiliscemi (TP).

Il dimensionamento delle strutture nel seguito descritte, in questa fase progettuale, è basato su ipotesi di base che potrebbero venire modificate nella fase di progetto successiva all'Autorizzazione (progetto esecutivo); per tal motivo le calcolazioni di seguito esposte sono da considerarsi a carattere preliminare.

Dati sintetici dell'intervento:

Tipologia: Progetto impianto di produzione di energia elettrica da fonte solare fotovoltaica.

Proponente: Guarrato s.r.l. .

Ubicazione: Comune di Misiliscemi (TP).

Potenza complessiva in immissione: 48.23 MW

Nome del progetto dell'impianto fotovoltaico: Impianto fotovoltaico "GUARRATO".

1. INQUADRAMENTO GENERALE DEL PROGETTO

1.1. Inquadramento geografico e territoriale

L'area oggetto dell'intervento progettuale ricade nel territorio comunale di Misiliscemi (TP) in località "Costa Guardia", in una porzione di territorio che è già stato del Comune di Trapani, frazioni Guarrato e Rilievo.

Essa si trova ad una distanza media di circa 18 Km a Nord-Est dal centro abitato Marsala, 5 km in direzione Sud-Sud-Est rispetto al nucleo urbano di Paceco, a 8 km in direzione Sud-Sud-Est rispetto al centro abitato di Trapani e a 23 km in direzione Nord-Ovest rispetto al centro abitato del comune di Salemi.

I dati geografici di riferimento dell'impianto, sono:

- Latitudine = 37°55'50.23"
- Longitudine = 12°34'45.59"E
- Altitudine media = 90 m s.l.m.

Dal punto di vista cartografico l'area si localizza all'interno delle seguenti cartografie:

- I.G.M. n° 257 IV NO alla scala 1:25000 denominata "PACECO"
- Carta Tecnica Regionale CTR, della Sicilia in scala 1:10.000; si estende in un'area a cavallo tra le sezioni
- n° 605070 - "Marausa";
- n° 605080 - "Baglio Borromia";

Catastalmente l'impianto è inserito nei Fogli di mappa 35, 36, 37, 46 e 57 del Comune di Misiliscemi per una superficie nominale complessiva pari a circa Ha 88; il cavodotto MT interessa anche i fogli catastali 58, 71, 79, 80, 95, 98 e 102 dello stesso Comune.

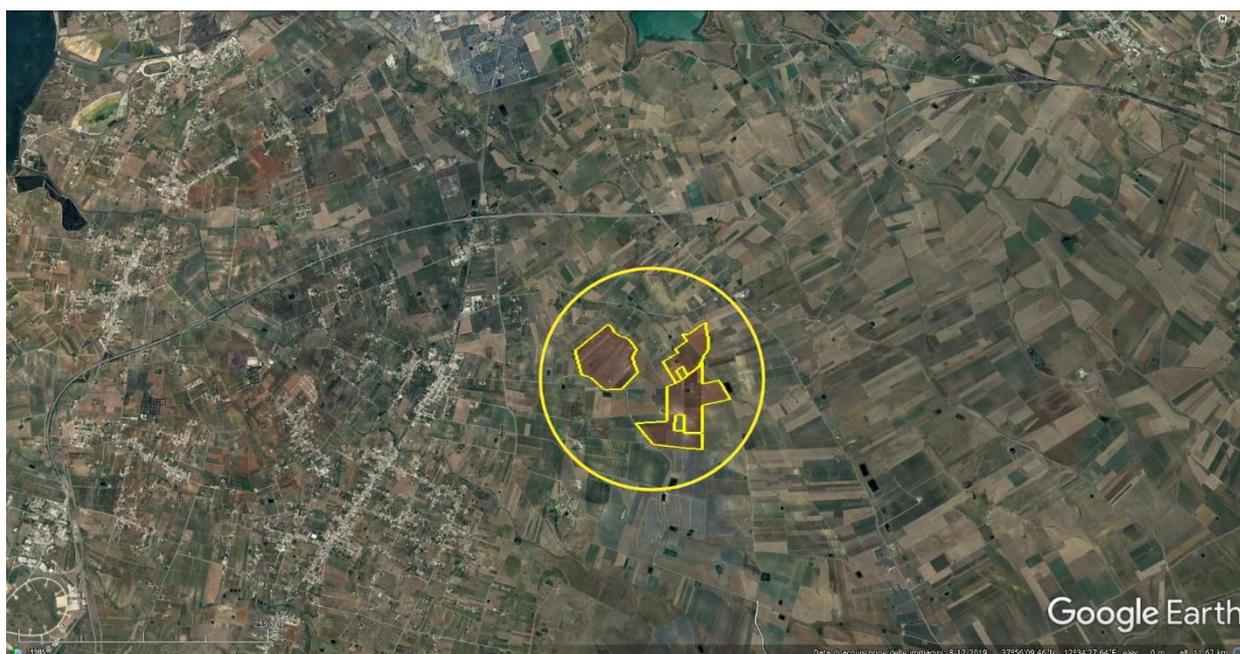


Figura 1 _Inquadramento territoriale impianto FV "Guarrato"

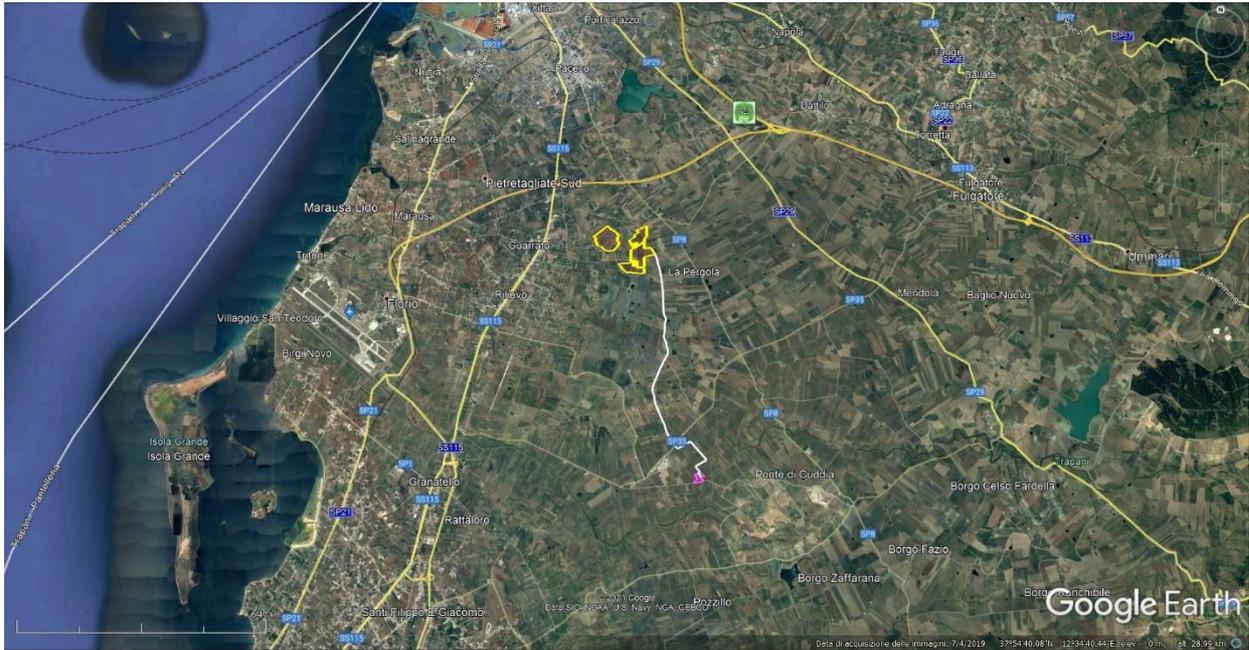


Figura 2_Inquadramento impianto FV “Guarrato” ed area di connessione



Figura 3_Vista a volo d’uccello are impianto FV “Guarrato”

1.2. Inquadramento geologico e geomorfologico

Dal punto di vista geologico-strutturale il comprensorio Dell’area oggetto del presente lavoro è inquadrabile nel contesto geologico noto nella letteratura specifica come “I monti di Trapani”, i quali rappresentano l’estrema porzione nord-occidentale della catena Appenino – Magrebidie che costituisce tutta la dorsale montuosa della

Sicilia settentrionale; tale dorsale rappresenta il risultato dalla sovrapposizione tettonica, in falda, di unità carbonatiche e terrigeno-carbonatiche di età Mesozoica–Terziaria, derivanti dalle deformazioni mioceniche dei domini paleogeografici noti come Dominio Sicilide, Bacino Imerese e Bacino Numidico.

1.3. Caratterizzazione litologica e geotecnica

la caratterizzazione stratigrafica e geomeccanica dei terreni è stata definita facendo riferimento ad una campagna di indagini geognostiche eseguite attraverso la realizzazione che hanno previsto:

1) Realizzazione di n°5 prove penetrometriche dinamiche medie;

La caratterizzazione stratigrafica e sismica dell'area di progetto è stata fatta interpretando i dati geofisici di n° 3 prove di sismica a rifrazione e di n°3 stese sismiche per indagini di tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) che hanno permesso di calcolare il parametro VSeq, e di determinare il modello stratigrafico dell'area in cui saranno progettati le strutture portanti dei moduli fotovoltaici.

Le prove sono state eseguite in accordo con il D.M. 17.01.2018,

Il modello geologico ricostruito è un modello a due strati costituiti essenzialmente da:

- Livello 1: Terreno di Copertura

Livello di copertura di natura agrario-eluviale a prevalente matrice limo-argillosa, molto umido/bagnato, da inconsistente a poco consistente, con uno spessore variabile da 1.00 – 2,0 mt; a seconda dell'areale di riferimento. Per tale livello i parametri geotecnici di riferimento assumibili sono:

$\gamma = 16-17 \text{ KN/m}^3$ (peso specifico apparente)

$C_u = 0-0.2 \text{ Kpa}$ (coesione in condizioni drenate)

$\phi' = 15^\circ$ (angolo di attrito interno)

- Livello 2: Limi argillosi (moderatamente consistenti)

Orizzonte a prevalente componente limo-argillosa costituiti prevalentemente da terre di colore biancastro ed argille grigiastre più o meno sabbiose. Lo spessore è valutabile in circa 10mt

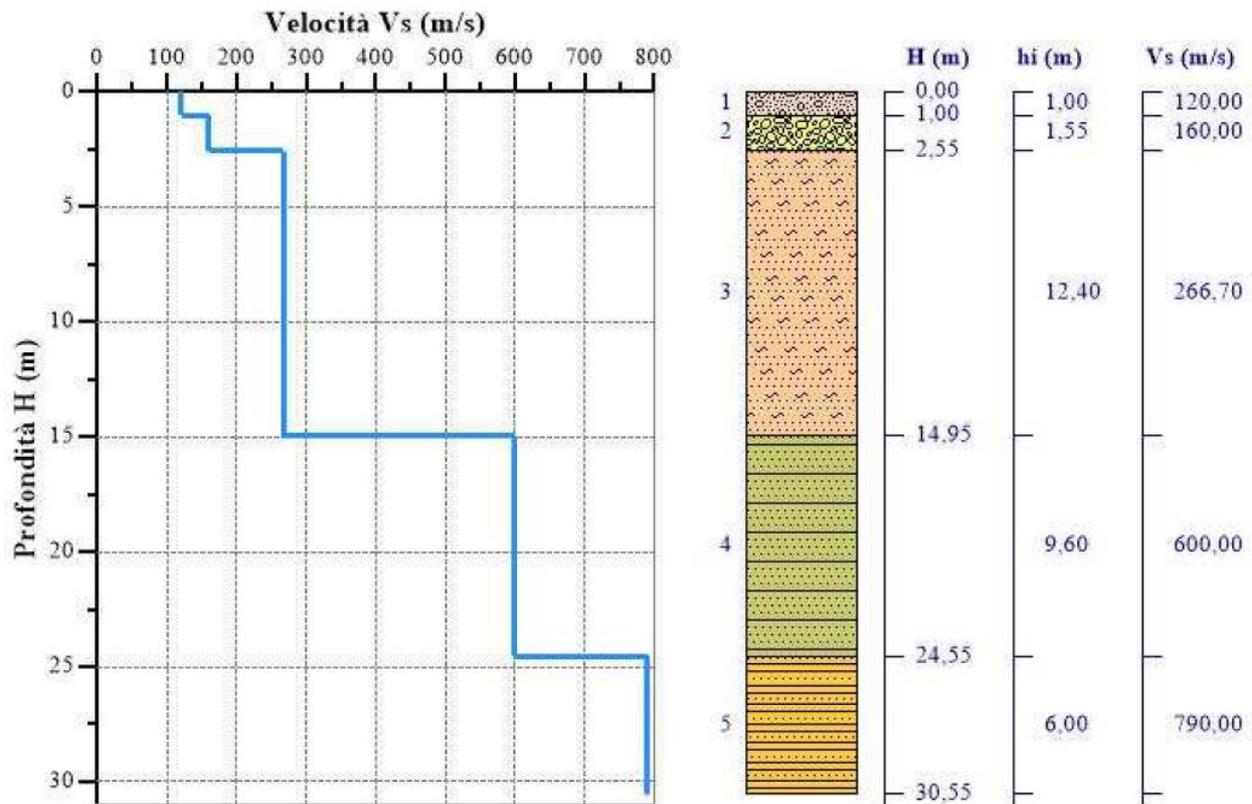
I principali parametri geomeccanici di riferimento per tale orizzonte risultano essere:

$\gamma = 21 \text{ KN/m}^3$ (peso specifico apparente)

$C_u = 0-0.3 \text{ Kpa}$ (coesione in condizioni drenate)

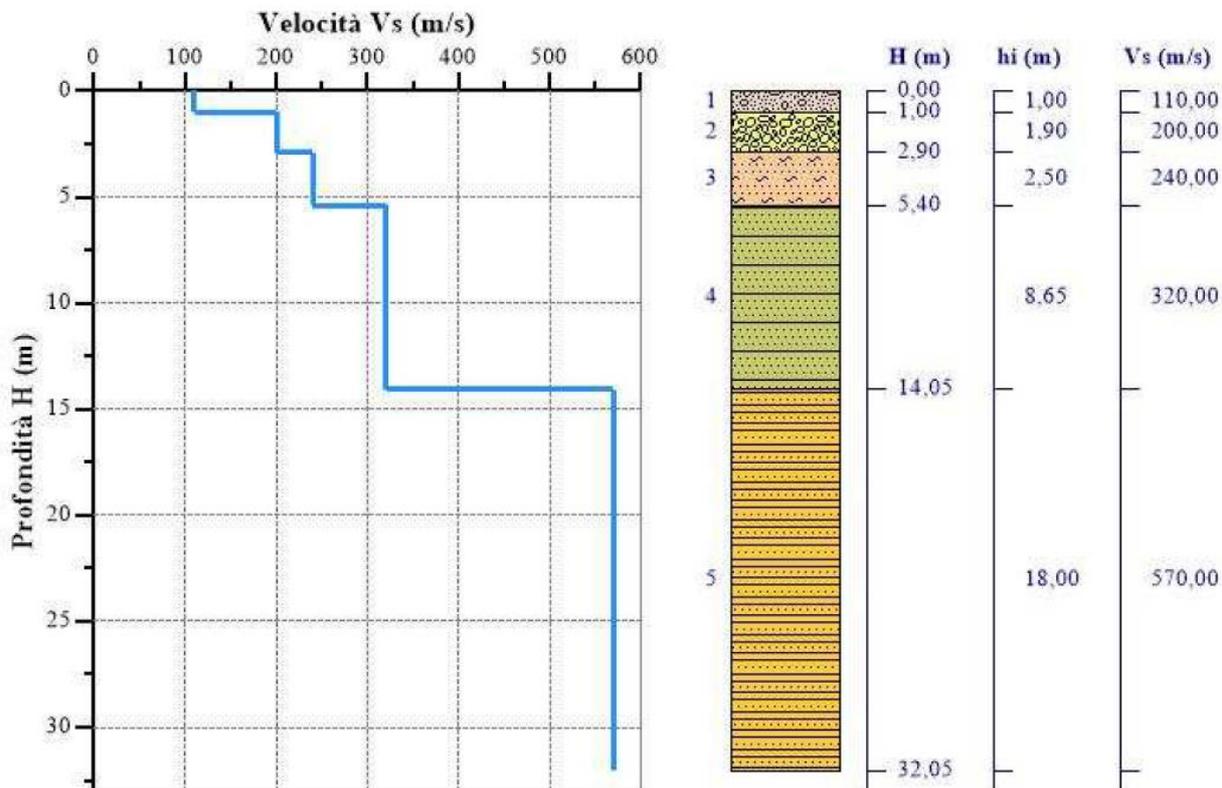
$\phi' = 26 - 28^\circ$ (angolo di attrito interno)

In corrispondenza dell'area in progetto sono state eseguite n°2 indagini di sismica masw identificate con le sigle Mw1-Mw2. Il modello interpretativo ha permesso di ottenere le seguenti sismo-stratigrafie con i relativi valori di velocità delle onde S:



n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso unità volume [kg/mc]	Coefficient e Poisson	Falda	Vp [m/sec]	Vs [m/sec]
1	1.00	1.00	1700.0	0.30	No	224.5	120.0
2	2.55	1.55	1800.0	0.30	No	299.3	160.0
3	14.95	12.40	1800.0	0.30	No	498.9	266.7
4	24.55	9.60	1800.0	0.30	No	1122.5	600.0

Tabella 1 - Valori utilizzati per il calcolo della categoria di sottosuolo Masw1



n.	Profondità [m]	Spessore [m]	Peso unità volume [kg/mc]	Coefficiente Poisson	Falda	Vp [m/sec]	Vs [m/sec]
1	1.00	1.00	1700.0	0.32	No	213.8	110.0
2	2.90	1.90	1800.0	0.32	No	388.7	200.0
3	5.40	2.50	1800.0	0.30	No	449.0	240.0
4	14.05	8.65	1800.0	0.30	No	598.7	320.0
5	oo	oo	1900.0	0.30	No	1066.4	570.0

Tabella 2 - Valori utilizzati per il calcolo della categoria di sottosuolo Masw2

Sulla base dei valori della velocità equivalente V_{seq} di propagazione delle onde di taglio per le due differenti indagini, pari rispettivamente a $V_{seq}(masw1)=343,17$ m/s e $V_{seq}(masw2)=357,07$ m/s, unitamente a valutazioni circa la stratigrafia e l'andamento del valore della Vs, la categoria del sottosuolo in esame per entrambi i punti di indagine in applicazione delle NTC 2018 (punto 3.2.2) risulta classificabile come tipo C e categoria topografica T1.

2. DESCRIZIONE DELLE STRUTTURE FOTOVOLTAICHE

Le strutture di supporto dei moduli fotovoltaici appartengono alla tipologia inseguitore monoassiale (Tracker), con asse di rotazione avente sviluppo longitudinale lungo l'asse Nord-Sud ed esposizione dei moduli fotovoltaici variabile da Est a Ovest.

Questo tipo di inseguitore è definito ad asse polare, in quanto insegue le radiazioni solari, ruotando intorno a un asse parallelo all'asse di rotazione terrestre nord-sud.

L'angolo di inclinazione dei moduli oscilla da -60° a $+60^\circ$ rispetto all'orizzontale, con esposizione dei moduli fotovoltaici variabile da Est a Ovest.

Il singolo tracker ospita n.30 moduli affiancati in configurazione verticale 1V, a formare strutture indipendenti di lunghezza pari a 40,42 mt e altezza pari a 2,384 mt. L'altezza massima al suolo è invece pari a 3,284 mt.

L'ancoraggio delle strutture al terreno sarà affidato ad un sistema di pali in acciaio, infissi tramite battitura o trivellazione, a profondità variabili in funzione delle caratteristiche geologiche del substrato.

Di seguito si riportano alcune viste qualitative delle strutture tipo Trackers; si rimanda agli elaborati grafici 1423-PD_A_3.4_TAV_Tipico strutture, per i dettagli sui tipici di queste strutture.



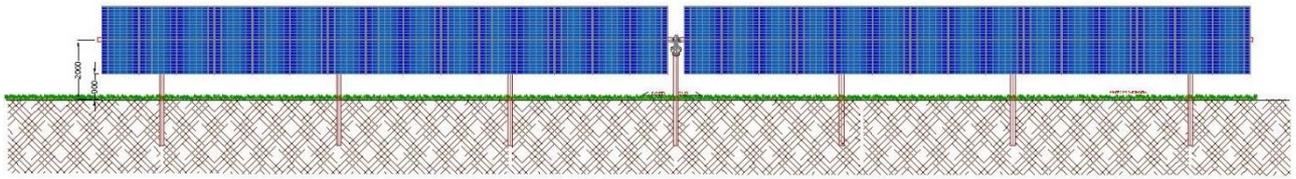
Vista qualitativa di tracker in configurazione 1V



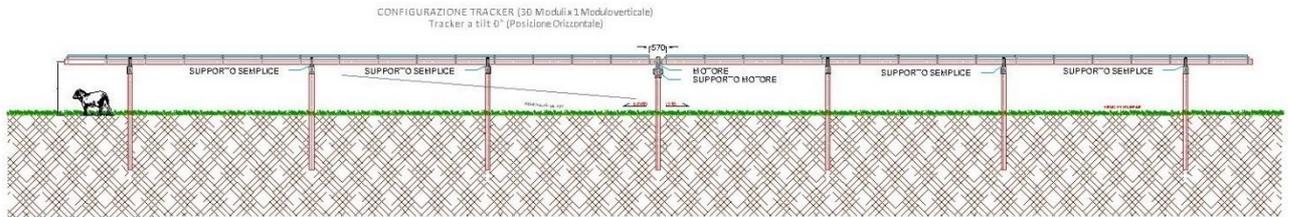
Immagine qualitativa della struttura di supporto



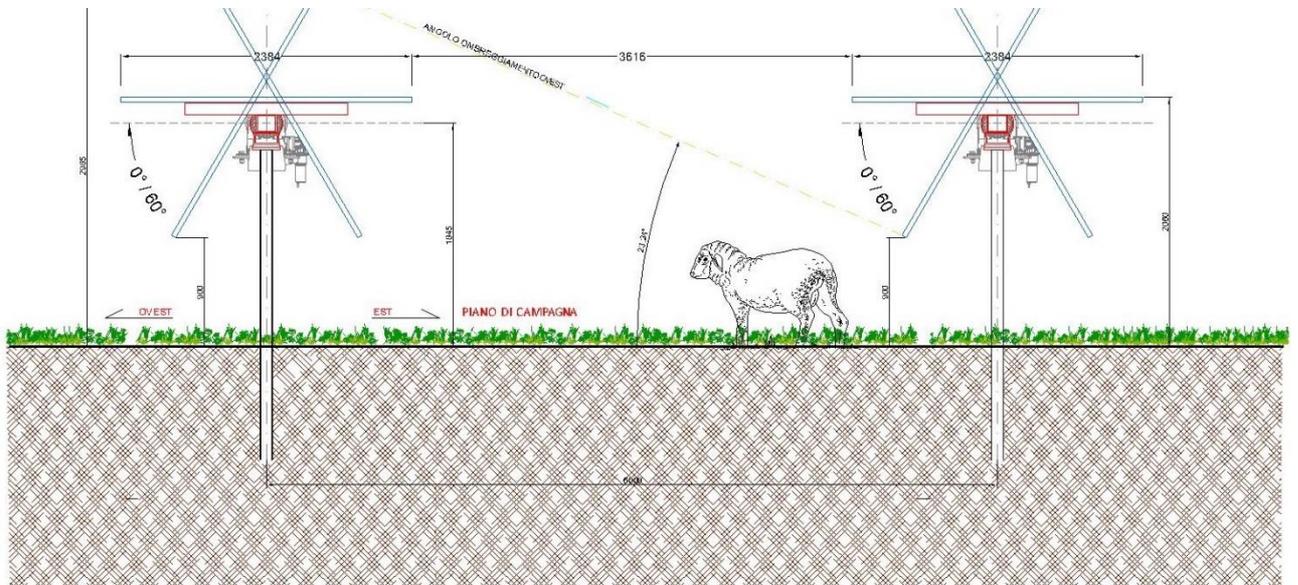
Dettaglio dell'attacco asse rotazione montante



Prospetto longitudinale Tracker - tilt 60°



Prospetto longitudinale Tracker - tilt 0°



Sezione trasversale tracker

3. CARICHI AGENTI

È ormai ampiamente dimostrato che carichi più sollecitanti che agiscono sulle strutture fotovoltaiche sono quelli dovuti al vento, il quale, in casi eccezionali, può portare finanche allo sfilamento dei montanti verticali.

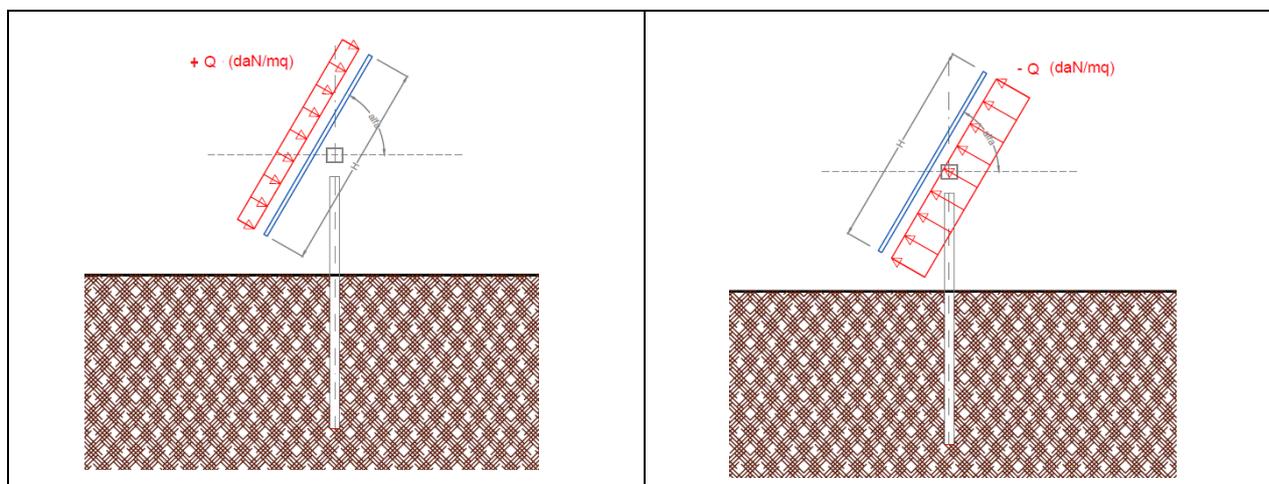
In questi tipi di strutture i carichi vento risultano di gran lunga più gravosi rispetto ai quelli sismici; questi ultimi, infatti, di tipo inerziale, sono proporzionali alle masse sollecitate, che essendo relative ai soli moduli, rendono l'azione tagliante estremamente modesta. I carichi sismici, pertanto, non vengono presi in considerazione nelle analisi che seguono.

3.1. Carico VENTO

Per quanto riguarda i carichi da vento si utilizzano gli schemi riportati al DM 17/01/2018 (Norme Tecniche per le Costruzioni) – Cap. 3 AZIONI SULLE COSTRUZIONI e relativa Circolare C.S.LL.PP. n. 7. 21/01/2019.

L'azione del vento viene ricondotta ad un'azione statica equivalente, costituita da pressioni e depressioni agenti normalmente alle superfici delle vele.

L'azione del vento viene esplicita sul pannello di carico, con intensità e direzioni variabili nel seguito illustrate; si generano dunque carichi di pressione + Q - e depressione - Q, variabili in funzione dell'angolo di inclinazione α .



La pressione del vento Q è data dall'espressione (par.3.3.4):

$$Q = q_r * c_e * c_p * c_d$$

dove

- q_r pressione cinetica di riferimento
- c_e coefficiente di esposizione,
- c_p coefficiente di pressione (ex coefficiente di forma),
- c_d coefficiente dinamico;

I metodi di calcolo dei valori dei coefficienti c_e c_p c_d sono riportati nella Circolare Applicativa (paragrafi C.3.3.7-C.3.3.9).

Pressione cinetica di riferimento q_r

La pressione cinetica di riferimento si calcola mediante la formula (par. 3.3.6)

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

dove

v_r è la velocità di riferimento $v_r = v_{b,0} \cdot c_a$

ρ è la densità dell'aria, espressa convenzionalmente in 1,25 daN/mc

La pressione cinetica di riferimento si calcola a partire dalla zona di vento e dall'altezza del sito slm, secondo la procedura seguente:

Nota la Zona di vento: 4 – Sicilia

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

Si ricavano i valori di $v_{b,0}$, a_0 , k_s :

$$v_{b,0} = 28 \text{ m/s};$$

$$a_0 = 500 \text{ m};$$

$$k_s = 0,36$$

Nota l'altezza del sito slm (a_s), e confrontata questa con il valore di a_0 , si determina il coeff. altitudine c_a

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

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

nel nostro caso $a_s = 400 \text{ m} < a_0 = 500 \text{ m}$; pertanto $c_a = 1$

si calcola la velocità di riferimento $v_r = v_{b,0} \cdot c_a = 28 \text{ m/s}$

e la pressione cinetica di riferimento $q_r = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 = 0,5 \cdot 1,25 \cdot (28)^2 = 490,0$ (espressa in N/mq), ossia 49,00 daN/mq

Coefficiente di esposizione c_e

Il coefficiente di esposizione c_e è tabellato in funzione della quota in cui sorge l'edificio, della topografia del terreno e della categoria di esposizione del sito (3.3.7);

Partendo dalla Classe di rugosità del terreno: D -

Tab. 3.3.III - Classi di rugosità del terreno

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).

nota la distanza del sito dalla costa: <10 km,

si possono incrociare i dati relativi alla zona di vento e la classe di rugosità per risalire alla categoria di esposizione:

ZONE 1,2,3,4,5							
		costa					
		mare		500m	750m		
		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	**	

Si ottiene la Categoria esposizione: II

Tab. 3.3.II - Parametri per la definizione del coefficiente 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

Dalla categoria di esposizione ricaviamo i valori

$$k_r = 0,19;$$

$$z_0 = 0,05 \text{ m};$$

$$z_{min} = 4 \text{ m}$$

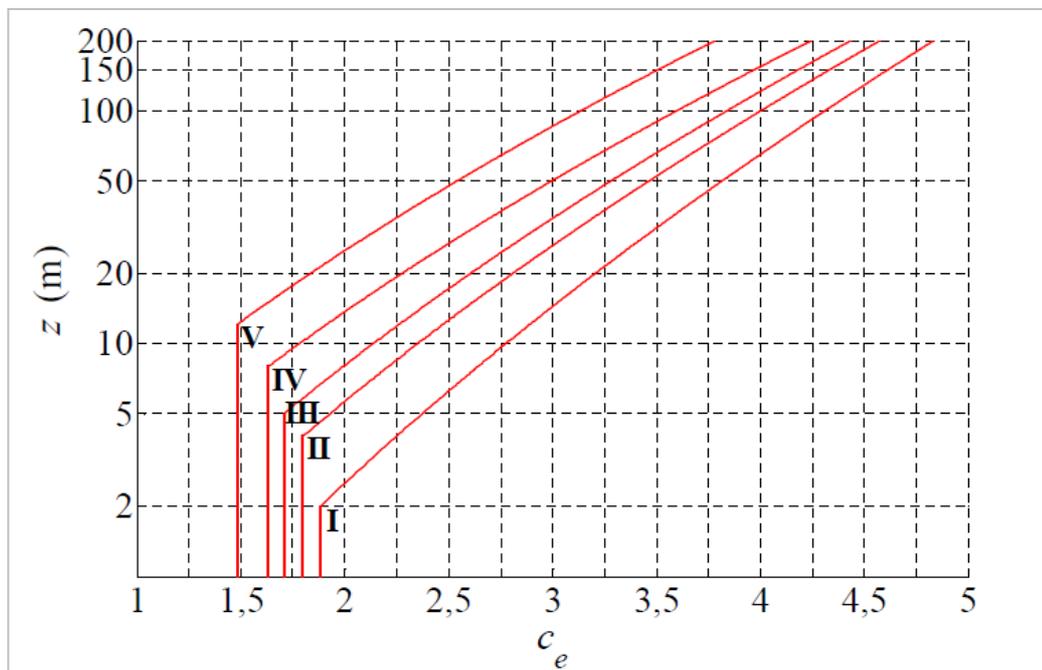
Nota l'altezza della costruzione (z) la si confrontata col valore di z_{min} (4mt), si calcola il coefficiente di esposizione, mediante la formula:

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

Oppure, nel caso in cui

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

con il grafico seguente:



Nel nostro caso,

$$z = 2,384 \text{ mt} \leq z_{min} (4 \text{ mt}),$$

per la categoria di esposizione tipo II,

$$c_e = 1,8$$

Coefficiente dinamico c_d

Il coefficiente dinamico c_d è il coefficiente con cui si tiene conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alle vibrazioni strutturali (3.3.9).

Esso può essere assunto cautelativamente pari ad 1 nelle costruzioni di tipologia ricorrente, oppure può essere determinato mediante analisi specifiche o facendo riferimento a dati di comprovata affidabilità.

Coefficiente di pressione c_p

Ai fini della determinazione del coefficiente di pressione c_p , si assume l'ipotesi di assimilare le strutture fotovoltaiche a tettoie a singola falda, con assenza di ostruzioni al di sotto di esse (coefficiente di bloccaggio $\Phi=0$). Tale assunzione è sicuramente valida per le vele fotovoltaiche perimetrali, sottoposte all'azione di retta del vento; potrebbe invece risultare eccessivamente cautelativa per le vele interne, che invece non sono sottoposte all'azione diretta, in quanto le vele perimetrali fungono da ostruzione.

La normativa, al punto C3.3.8.2 della Circolare, introduce, per le strutture tipo tettoia, il coefficiente di forza c_f , così definito:

Per valori positivi $C_F = +0,2 + \alpha/30$

Per valori negativi $C_F = -0,5 + 1,3 * \alpha/30$

Come già asserito in precedenza, i valori di c_f variano a seconda dell'angolo di inclinazione dei moduli, così come le pressioni vento:

Le forze trasmesse dal pannello di carico alle strutture portanti sono quindi anch'esse funzione dell'angolo di inclinazione dei moduli.

3.2. CARICO NEVE

AZIONE DELLA NEVE	CARICO DI NEVE AL SUOLO													
	Carico di neve al suolo	qs	0,432	[kN/m ²]										
	VALORE CARATTERISTICO DEL CARICO DI NEVE AL SUOLO													
	Zona III	Agrigento, Avellino, Benevento, Brindisi, Cagliari, Caltanissetta, Carbonia-Iglesias, Caserta, Catania, Catanzaro, Cosenza, Crotona, Enna, Frosinone, Grosseto, L'Aquila, Latina, Lecce, Livorno, Matera, Medio Campidano, Messina, Napoli, Nuoro, Ogliastro, Olbia Tempio,												
	Altezza sul livello del mare		86	[m]										
	Valore caratteristico carico di neve al suolo	qsk	0,6	[kN/m ²]										
	COEFFICIENTE DI ESPOSIZIONE													
	Battuta dai venti	Aree pianeggianti non ostruite esposte su tutti i lati, senza costruzioni o alberi più alti												
		CE	0,9											
	COEFFICIENTE TERMICO													
Coefficiente termico		Ct	1											
COEFFICIENTE DI FORMA														
Inclinazione della falda	α	0	[Gradi]											
Coefficiente di forma per coperture ad una o due falde	μ₁	0,8												
	μ₁	<table border="0" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="padding-right: 10px;">Caso I</td> <td style="padding-right: 10px;">μ₁(α₁)</td> <td style="text-align: center;"></td> <td style="padding-left: 10px;">μ₁(α)</td> </tr> <tr> <td>Caso II</td> <td>0,5 μ₁(α₁)</td> <td style="text-align: center;"></td> <td>μ₁(α)</td> </tr> <tr> <td>Caso III</td> <td>μ₁(α₁)</td> <td style="text-align: center;"></td> <td>0,5 μ₁</td> </tr> </table>	Caso I	μ₁(α₁)		μ₁(α)	Caso II	0,5 μ₁(α₁)		μ₁(α)	Caso III	μ₁(α₁)		0,5 μ₁
Caso I	μ₁(α₁)		μ₁(α)											
Caso II	0,5 μ₁(α₁)		μ₁(α)											
Caso III	μ₁(α₁)		0,5 μ₁											

4. DESCRIZIONE DEL MODELLO

4.1. Descrizione generale e geometria

L'inseguitore solare – Tracker - è costituito da una trave orizzontale continua, sorretta di montanti verticali infissi al suolo; la trave ha la possibilità di ruotare intorno al proprio asse grazie a dei sistemi supporto rotante posti in testa ai pali stessi;

I pali sono infissi nel terreno mediante battitura (o trivellazione) ad una profondità variabile che dovrà essere comunque confermata nella fase di progettazione esecutiva, sulla base di indagini geognostiche più approfondite.

Lungo la trave principale sono fissati gli arcarecci, sui quali vengono a loro volta fissati i moduli fotovoltaici.

Partendo dalla geometria e dai gradi di vincolo dei diversi elementi che compongono la struttura, ed applicando ad essa i carichi esterni previsti in progetto, si arriva al calcolo delle sollecitazioni e delle deformazioni degli elementi strutturali, e si valuta la loro compatibilità con i valori ritenuti accettabili.

Le ipotesi assunte nella modellazione sono le seguenti:

- La trave longitudinale viene modellata come *asta 2D*, in semplice appoggio sui montanti verticali (no vincolo di incastro);
- I montanti verticali vengono modellati come *asta 2D*, vincolati alla base con vincolo di incastro posizionato a 50 cm al di sotto del piano di campagna, per tenere conto della presenza dello strato superficiale composto da terreno vegetale con caratteristiche scadenti;
- L'area occupata dai moduli viene modellata come *pannello di carico*, elemento virtuale che trasmette i carichi esterni (vento, neve, ecc...) alla trave principale;
- Il pannello di carico viene orientato con inclinazione variabile rispetto all'orizzontale, da 15% a 60%, in modo tale da presentare la massima esposizione ai carichi vento.

I trackers sono dotati di dispositivo di sicurezza in grado di mettere in “protezione” le vele, ossia in configurazione orizzontale, allorquando i dati di vento raggiungono dei valori di soglia critica; per tal motivo è lecito escludere dai massimi carichi di vento la configurazione a 55-60°, e considerare quale massima possibile quella a 45°.

4.2. TIPO DI ANALISI E MOTIVAZIONE

L'analisi per le combinazioni delle azioni permanenti e variabili è stata condotta in regime elastico lineare.

Gli elementi in acciaio sono stati considerati a comportamento elastico lineare isotropo.

Il metodo di analisi utilizzato è quello statico, che modella le azioni dinamiche agenti sulla struttura mediante l'applicazione di forze statiche equivalenti. Le forze applicate sono comprensive degli effetti dinamici ordinari delle azioni che rappresentano.

4.3. VERIFICHE STRUTTURALI AGLI SLU E SLE

La sicurezza e le prestazioni saranno garantite verificando gli opportuni stati limite in funzione dell'utilizzo della struttura, della sua vita nominale e di quanto stabilito dalle norme di cui al D.M. 14.01.2008. Gli stati limite analizzati sono:

- Stati limite ultimi (SLU)

La sicurezza nei riguardi degli stati limite ultimi (SLU) che possono provocare eccessive deformazioni permanenti, crolli parziali o globali, dissesti, che possono compromettere l'incolumità delle persone e/o la perdita di beni, provocare danni ambientali e sociali, mettere fuori servizio l'opera. Per le verifiche sono stati utilizzati i coefficienti parziali relativi alle azioni ed alle resistenze dei materiali in accordo a quanto previsto dal D.M. 14.01.2008 per i vari tipi di materiale. I valori utilizzati sono riportati nei tabulati di calcolo.

-Stati limite di esercizio (SLE)

La sicurezza nei riguardi degli stati limite di esercizio (SLE) che possono limitare nell'uso e nella durata l'utilizzo della struttura per le azioni di esercizio.

I valori limite, così come definiti nelle norme tecniche, sono riportati nelle tabelle di calcolo.

Secondo quanto previsto dalla normativa le verifiche sono state eseguite nei confronti dei seguenti stati limite:

SLU di tipo geotecnico (GEO)

collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno

collasso per scorrimento sul piano di posa

SLU di tipo strutturale (STR)

raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali, accertando per ogni stato limite considerato la sollecitazione agente sia minore o al più uguale a quella resistente.

Si possono adottare due diversi approcci progettuali:

Approccio 1:

Combinazione 1: $(A1+M1+R1)$

Combinazione 2: $(A2+M2+R2)$

La combinazione 1 è generalmente più severa nei confronti del dimensionamento strutturale delle opere a contatto con il terreno, mentre la seconda combinazione è generalmente più severa nei riguardi del dimensionamento geotecnico.

Approccio 2:

Un'unica combinazione $(A1+M1+R3)$.

Per gli stati limite ultimi le verifiche vengono effettuate confrontando la resistenza di progetto (R_d) il valore di progetto dell'effetto delle azioni (E_d), utilizzando il metodo dei coefficienti parziali di sicurezza.

I coefficienti parziali di sicurezza, associati ai materiali ed alle azioni, tengono in conto della variabilità delle rispettive grandezze e le incertezze relative alle tolleranze geometriche e alla affidabilità del modello di calcolo.

5. TRACKERS MONOASSIALI

5.1. METODOLOGIE DI CALCOLO

Le strutture in elevazione saranno del tipo prefabbricato e prodotte in stabilimento da un costruttore che ne fornirà i calcoli e/o i certificati di prodotto nella fase esecutiva. In questa fase è stata focalizzata l'attenzione sulla determinazione degli scarichi in fondazione.

Il calcolo delle sollecitazioni che agiscono sulle strutture dei trackers viene effettuato, in questa fase di progetto definitivo, per mezzo di modalità semplificate che tengono conto della conformazione della struttura in elevazione e di come questa è collegata ai pali di fondazione.

La struttura in elevazione sarà dotata di un sistema intelligente di controlli elettronici, impostato sul movimento della struttura, che la regolano in posizione orizzontale quando il vento supera il valore di controllo impostato. La tipologia scelta in questa fase è stata quindi progettata per resistere alle seguenti inclinazioni, in funzione della velocità limite del vento impostata:

- una posizione con inclinazione massima di 60° nel caso di venti inferiori a 20 m/s;
- una posizione con inclinazione massima di 15° nel caso di venti inferiori a 33 m/s.

Pertanto sono stati sottoposti a verifica n° 3 configurazioni di carico:

- configurazione 1 con inclinazione dei traversi a 0° e vento a 28m/s, che rappresenta la velocità di riferimento del vento di progetto desunto dalla normativa che investe la struttura in posizione di protezione;
- configurazione 2 con inclinazione dei traversi a 15° e vento a 33m/s, che rappresenta la combinazione di progetto della struttura in posizione di protezione;
- configurazione 3 con inclinazione dei traversi a 60° e vento a 20m/s, che rappresenta la combinazione di progetto della struttura in posizione di lavoro.

5.2. DEFINIZIONE DELLE AZIONI ELEMENTARI

Le azioni elementari sono state definite per il sostegno centrale, con una zona di influenza della larghezza complessiva di 5,78 m, pari alla larghezza media delle campate.

Le altre proprietà geometriche considerate sono:

- Larghezza vela: 2,38m
 - Area di influenza: 13,76 m²
 - Altezza asse di rotazione 1,845m

5.3. Peso degli elementi in elevazione

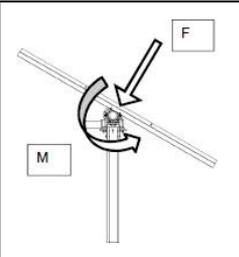
Considerando la tipologia di struttura scelta in questa fase, si è ipotizzato un peso complessivo, pari a 3000 N, comprensivo di:

- peso proprio delle strutture in elevazione;
- minuteria di collegamento;

- motore per la movimentazione della vela;
- pannelli fotovoltaici (4X380=1520N)

5.4. Azione del vento

L'azione del vento è stata determinata secondo quanto riportato nel cap. C3.3.8.2.1 della Circolare esplicativa n° 7 del 21/01/2019 per le tettoie a falda singola, individuando le condizioni di carico più gravose:

	configurazione 1		configurazione 2		configurazione 3	
	$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 15^\circ$		$\alpha = 60^\circ$	
v_r	28 m/s	v_r	33 m/s	v_r	20 m/s	
q_r	490 N/m ²	q_r	680 N/m ²	q_r	250 N/m ²	
Q_p	882 N/m ²	Q_p	1225 N/m ²	Q_p	450 N/m ²	
C_{ft}	0,2	C_{ft}	0,7	C_{ft}	2,2	
F	2,43 kN	F	11,80 kN	F	13,62 kN	
C_{fb}	-0,5	C_{fb}	-0,15	C_{fb}	-2,1	
F	-6,07 kN	F	-2,53 kN	F	-13,00 kN	

α	c_f	V_{ref} m/s	F kN	azioni al mozzo			azioni al piede del piedritto		
				F_x kN	F_z kN	M kN m	F_x kN	F_z kN	M kN m
0	>0	28,00	2,43	0,00	2,22	1,32	0,00	2,22	1,32
0	<0	28,00	-6,07	0,00	-15,51	-9,24	0,00	-15,51	-9,24
15	>0	33,00	11,80	3,05	11,40	7,03	3,05	11,40	12,65
15	<0	33,00	-2,53	-0,65	-2,44	-1,51	-0,65	-2,44	-2,71
60	>0	20,00	13,62	11,80	6,81	8,12	11,80	6,81	29,87
60	<0	20,00	-13,00	-11,26	-6,50	-7,74	-11,26	-6,50	-28,51

7.2.2. Azione della neve

configurazione 1		configurazione 2		configurazione 3	
$\alpha = 0^\circ$		$\alpha = 15^\circ$		$\alpha = 60^\circ$	
μ_i	0,8	μ_i	0,8	μ_i	0,00
q_s	0,432 kN/m ²	q_s	0,432 kN/m ²	q_s	0,00 kN/m ²
F_z	5,94 kN	F_z	5,94 kN	F_z	0,00 kN

5.5. COMBINAZIONI DI CARICO

Sono state considerate le seguenti sollecitazioni di carico ritenute più gravose per il piedritto .

					F_x kN	F_z kN	M kN m		
CO1	1,5	Sp +	1,5	Neve +	0,9	Vento 0° +	0,00	15,41	1,19
CO2	1,5	Sp +	0,75	Neve +	1,5	Vento 0° +	0,00	12,29	1,98
CO3	0,8	Sp +	0	Neve +	1,5	Vento 0° -	0,00	-20,87	-13,87
CO4	1,5	Sp +	1,5	Neve +	0,9	Vento 15° +	16,16	23,67	11,39
CO5	1,5	Sp +	0,75	Neve +	1,5	Vento 15° +	13,53	26,06	18,98
CO6	0,8	Sp +	0	Neve +	1,5	Vento 15° -	6,98	19,50	-4,07
CO7	1,5	Sp +	1,5	Neve +	0,9	Vento 60° +	19,62	10,63	26,88
CO8	1,5	Sp +	0,75	Neve +	1,5	Vento 60° +	22,20	14,72	44,81

CO9 0,8 Sp + 0 Neve + 1,5 Vento 60° -

20,10	-7,35	-42,77
-------	-------	--------

Sono state considerate le seguenti sollecitazioni di carico ritenute più gravose per la trave portante i moduli FV, composta da uno scatolare 150x150x10 avente $W_x=236 \text{ cm}^3$

							Fx kN	Fz kN	M kN m			
CO1	1,5	Sp	+	1,5	Neve	+	0,9	Vento	0° +	0,00	15,41	1,19
CO2	1,5	Sp	+	0,75	Neve	+	1,5	Vento	0° +	0,00	12,29	1,98
CO3	0,8	Sp	+	0	Neve	+	1,5	Vento	0° -	0,00	-20,87	-13,87
CO4	1,5	Sp	+	1,5	Neve	+	0,9	Vento	15° +	16,16	23,67	6,33
CO5	1,5	Sp	+	0,75	Neve	+	1,5	Vento	15° +	13,53	26,06	10,55
CO6	0,8	Sp	+	0	Neve	+	1,5	Vento	15° -	6,98	19,50	-2,27
CO7	1,5	Sp	+	1,5	Neve	+	0,9	Vento	60° +	19,62	10,63	7,31
CO8	1,5	Sp	+	0,75	Neve	+	1,5	Vento	60° +	22,20	14,72	12,18
CO9	0,8	Sp	+	0	Neve	+	1,5	Vento	60° -	20,10	-7,35	-11,69

6. VERIFICHE

6.1. Verifiche elementi strutturali

Viene eseguita la verifica dei seguenti tipi di elementi:

- verifica a pressoflessione dei montanti verticali
- verifica a flessione della trave orizzontale

Per quel che riguarda i montanti verticali, come visto al paragrafo precedente, il valore del momento sollecitante massimo, è pari a:

$$M_{\max} = 44,81 \text{ kN*m}$$

Considerando un IPE 240 S355 con Modulo di resistenza $W_x=324,3 \text{ cm}^3$

S355 ($f_y=355 \text{ N/mm}^2=35500 \text{ N/cm}^2=3550 \text{ daN/cm}^2$)

Il valore del momento di snervamento è pari a:

$$M_y = W_x \cdot \sigma_y = 324,3 \text{ cm}^3 \cdot 3550 \text{ daN/cm}^2 = 115,13 \text{ kN*m}$$

dal rapporto tra momento di snervamento e momento sollecitante si ottiene:

$$M_y/M_{\max} = 115,13 / 44,81 = 2,57 > 1 \text{ (verificato)}$$

Per quel che riguarda la trave di supporto, come visto al paragrafo precedente, il valore del momento sollecitante massimo, è pari a:

$$M_{\max} = 13,87 \text{ kN*m}$$

Il valore del momento di snervamento è pari a

$$M_y = W_x \cdot \sigma_y = 236 \text{ cm}^3 \cdot 2350 \text{ daN/cm}^2 = 55,46 \text{ kN*m}$$

dal rapporto tra momento di snervamento momento sollecitante si ottiene:

$$M_y/M_{\max} = 55,46 / 13,87 = 4,00 > 1 \text{ (verificato)}$$

Considerando sia la flessione che il taglio

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} = 0,70 f_d = 0,70 \cdot 2350 = 1645 \text{ daN/cm}^2$$

$$\sigma = M/W_x = 138700 / 236 = 588 \text{ daN/cm}^2$$

$$\tau = T / (s \cdot a \cdot h) = 2606 / (1 \cdot 150) = 17,37 \text{ daN/cm}^2$$

$$\sigma_{\max} = \sqrt{588^2 + 3 \cdot 17,37^2} = 588,5 < 0,70 \cdot 2350 = 1645 \text{ daN/cm}^2$$

L'esito delle verifiche è dunque positivo in termini di tensioni di lavoro .

6.2. Verifiche geotecniche

L'interazione palo-terreno, per quel che riguarda le strutture fotovoltaiche, non può essere soggetta alle classiche leggi della geotecnica, in quanto non sono applicabili i modelli matematici che descrivono i meccanismi di rottura, né i cedimenti.

È pertanto indispensabile, per questi tipi di strutture, eseguire una campagna di indagini di tipo **empirico**, volte a sperimentare la reale interazione palo – terreno. I metodi di indagine maggiormente diffusi consistono in prove di carico – pull out test e prove di carico laterale; i test consistono nell'infiggere alcuni pali pilota ad una certa profondità di infissione, e nell'applicare alla testa dei pali i carichi previsti allo Stato Limite Ultimo; durante i cicli di carico-scarico si misurano, con strumenti di precisione, gli spostamenti e/o le eventuali rotture.

Le prove devono essere eseguite in numero adeguato all'estensione dell'area di intervento, al fine di fornire un campione statistico di risultati che può rispecchiare o meno le ipotesi di progetto. Nel caso in cui i risultati si discostino da quelli previsti in fase di progetto, di potrà ricorrere a soluzioni di costruttive differenti, come ad esempio:

- aumento della profondità di infissione;
- incremento dell'inerzia dei montanti;
- riduzione del passo dei montanti;
- modificare della tipologia di infissione.

Volendo utilizzare un metodo analitico per il calcolo della profondità di infissione del montante, si parte dal presupposto che azione di sfilamento a trazione venga contrastata della resistenza per attrito laterale nell'intorno del montante.

Nel caso di profilato di acciaio, infisso nel terreno per battitura, la tensione laterale vale:

$$s = a + \mu \cdot \sigma_h$$

dove:

- a = adesione – termine di tipo coesivo, che in condizioni drenate viene assunto pari a 0
- μ = coeff attrito palo-terreno, che per pali battuti in tubolari di acciaio vale 0,36 (cfr Viggiani, Fondazioni)
- σ_h = tensione orizzontale = $k \cdot \sigma_v$, con σ_v che corrisponde alla tensione litostatica verticale alla generica profondità z , mentre k , per pali battuti in tubolari di acciaio, vale 0,85 (cfr Viggiani, Fondazioni)

pertanto in prima approssimazione si può ricavare la relazione

$$s = 0,3 \cdot \sigma_v$$

La resistenza laterale nasce dall'integrazione delle tensioni orizzontali tra la profondità 0 ed H

$$S = \pi \cdot d \cdot 0,3 \int (\gamma \cdot z) dz$$

ossia

$$S = \pi \cdot d \cdot 0,3 \cdot \gamma \cdot H^2 / 2$$

funzione della sola variabile H

La profondità di infissione viene pertanto determinata ponendo la condizione che:

$$S/T > 1.5$$

dove T (Fz=-20,87 kN) è l'azione di sfilamento precedentemente calcolata.

$$S > 1.5T > 1.5 \times 20,87 = 31.3$$

Considerando il perimetro esterno del IPE 240

$$\text{Si ha } p = 240 \times 2 + 120 \times 2 + 2 \times (120 - 6,2) = 947,6 \text{ mm} = 0,9476 \text{ m}$$

$$\text{Il diametro equivalente } p = \pi \cdot d \Rightarrow d = 0,9476 / 3,14 = 0,30 \text{ mt}$$

$$S = \pi \cdot d \cdot 0,3 \cdot \gamma \cdot H^2 / 2 = 3,14 \times 0,3 \times 0,3 \times 21 \times 3,5^2 / 2 = 36,35$$

$$S = 36,35 > 1.5T > 1.5 \times 20,87 = 31.3 \quad (\text{verificato})$$

Si raccomanda ad ogni modo per questi tipi di strutture una attenta valutazione delle prestazioni attese confrontando le massime sollecitazioni teoriche con quelle determinate da prove di carico in situ (pull out tests e carico laterale).