

IMPIANTO AGRIVOLTAICO GINESTRAS

COMUNE DI SASSARI (SS)

PROPONENTE

Sardegna Green 7 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

DOTT. ING. MICHELE PIGLIARU
 VIA PIEMONTE, 100 - NUORO
 TEL.-FAX: 0784/259024

GRUPPO DI LAVORO AU

Dott. Ing. Diego Bellini
 Dott. Geol. Gianni Calia
 Dott. Ing. Giuseppe Pili
 Dott. Ing. Michele Pigliaru

REDATTORE

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

REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE
00	Gennaio 2024	Prima emissione

FORMATO
 ISO A4 - 297 x 210

Sommario

1. PREMESSA.....	3
2. TIPOLOGIA STRUTTURE DI SOSTEGNO.....	3
3. OPERE DI FONDAZIONE DEI TRACKERS.....	7
4. GEOMETRIA DELLE OPERE.....	11
5. ANALISI DEL TERRENO DI FONDAZIONE a.....	12
6. NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	14
7. ANALISI AZIONI DI CALCOLO.....	14
8. CALCOLO DELLE FONDAZIONI.....	24
9. CONCLUSIONI.....	25

RELAZIONE DI CALCOLO PREDIMENSIONAMENTO FONDAZIONI

1. PREMESSA

La presente relazione tecnica espone il predimensionamento delle strutture di sostegno e di fondazione dell'impianto agrivoltaico denominato "GINESTRAS" per la produzione di energia da fonte rinnovabile solare nel comune di Sassari (SS). L'impianto avrà una potenza di picco di **23'411,70 kWp** ed una potenza inverter di **20'200,00 kW**. L'impianto in questione appartiene alla fattispecie di "impianto agrivoltaico" che dista meno di 3 km "da aree a destinazione industriale, artigianale e commerciale".

L'impianto in progetto appartiene alla fattispecie di "impianto agri-voltaico" che dista meno di 3 km "da aree a destinazione industriale, artigianale e commerciale". Esso ricade in una delle fattispecie previste dal **comma 9-bis dell'articolo 6 del decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28** così come modificato dal **Decreto-legge n. 13 del 24 febbraio 2023 convertito con modificazioni nella Legge di Conversione 21 aprile 2023 n. 41**.

L'impianto sarà del tipo grid-connected e l'energia elettrica prodotta sarà riversata completamente in rete, salvo gli autoconsumi di centrale, con connessione collegata in antenna a 15 kV alla futura Cabina Primaria BARATZ di e-distribuzione.

Trattasi di lotto di cinque impianti fotovoltaici corrispondenti a **5 linee MT a 15 kV ARG7H1R 12/20 kV in cavo tripolare elicordato** che collegano le cinque cabine MT di consegna e-distribuzione alle cinque cabine MT di consegna utente poste nelle immediate vicinanze. Dalle cinque cabine di consegna utente partono le linee MT a 15 kV in cavo interrato che alimentano le cabine di trasformazione MT/BT di sottocampo.

2. TIPOLOGIA STRUTTURE DI SOSTEGNO

Per struttura di sostegno di un generatore fotovoltaico si intende un sistema costituito da una fondazione e da una parte in elevazione 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.

La struttura metallica di sostegno è costituita da una parte in elevazione che sostiene e orienta i pannelli fotovoltaici e da elementi verticali che svolgono la funzione di collegamento della struttura al suolo. In base alle caratteristiche del terreno tali elementi metallici possono essere infissi

direttamente al suolo, con tecniche che possono variare in base alla consistenza del terreno, oppure vengono collegati a fondazioni superficiali in calcestruzzo (plinti o travi di fondazione).

Per l'impianto in oggetto i moduli fotovoltaici verranno montati su strutture di sostegno mobili che nell'arco della giornata "inseguono" il movimento del sole orientando i moduli fotovoltaici su di essi installati da est a ovest, con rotazione su un singolo asse (tracker monoassiali), che verranno ancorate al terreno mediante profili metallici infissi nel terreno naturale sino ad una determinata profondità, in funzione della tipologia dei terreni e dell'azione del vento. La profondità di infissione è funzione sia delle caratteristiche del terreno che della sezione e forma del profilo metallico utilizzato come montante verticale infisso.

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); può contenere 1 modulo fotovoltaico in verticale (fig.1) o 2 moduli in configurazione orizzontale o verticale (fig.2).



Fig. 1- Tracker - Inseguitore mono-assiale single portrait



Fig. 2- Tracker - Inseguitore mono-assiale double portrait

Nel caso in esame trattasi di tracker con pannelli bifacciali in posizione verticale affiancati secondo il lato maggiore (single portrait), posizionato secondo la direzione Nord-Sud, che ruota intorno al proprio asse indipendentemente dagli altri, guidati dal proprio sistema di guida.

Nella figura 3, unitamente alle dimensioni principali del tracker, sono rappresentate le posizioni assunte dai pannelli nell'arco della giornata: la posizione assunta all'alba (55°), al mezzogiorno solare (0°) e al tramonto (-55°).

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

Le strutture che permettono la rotazione dei pannelli verranno fissate su pali di fondazione denominati "pali battuti" il cui dimensionamento verrà calcolato, dal punto di vista statico, in fase di progetto esecutivo e sarà stabilito definitivamente a seconda delle condizioni del suolo e della tipologia di profilato metallico utilizzato come montante verticale.

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. I pannelli fotovoltaici utilizzati, della potenza di **575 W**, hanno dimensioni in pianta di **2285 x 1134 mm**.

La scelta effettuata, relativamente all'altezza dei moduli da terra, è stata quella di optare per l'altezza minima da terra di **1,30 m**, come riportato nello schema che segue.

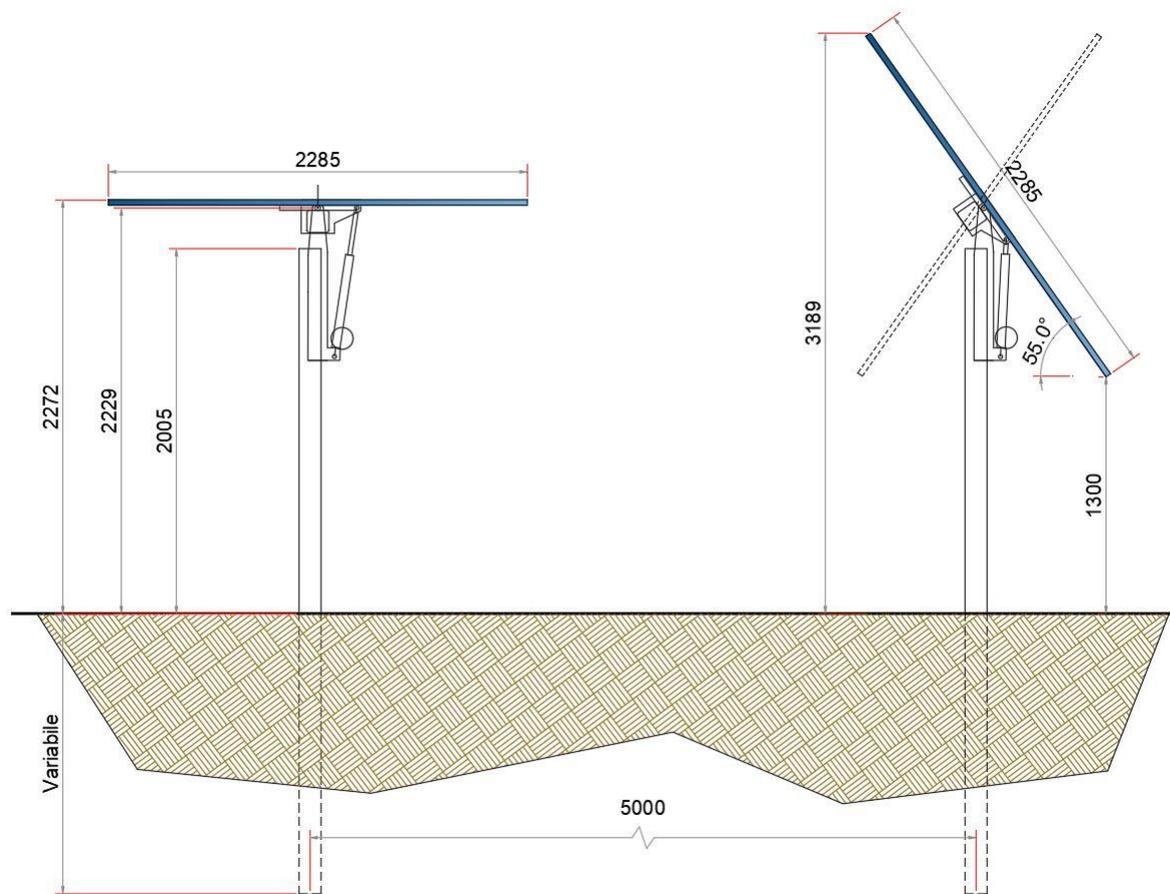


Fig. 3- Tracker - Inseguitore mono-assiale - intervalli di rotazione

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

Nel caso in cui localmente si presentassero problemi per l'infissione "a palo battuto", si provvederà all'utilizzo di micropali metallici autoperforanti.

Un micropalo è un palo trivellato di piccolo diametro, rinforzato per l'intera lunghezza da un'armatura tubolare in acciaio di diametro variabile.

Questo tipo di micropalo viene costruito per mezzo dell'infissione nel terreno per rotopercolazione di una barra in acciaio cava filettata che dispone di una punta di perforazione a perdere. Successivamente, si crea attorno alla barra un bulbo cementato che permette il trasferimento del carico strutturale al terreno circostante. La perforazione continua fino a quando non si raggiunge la profondità di progetto, intersecando lo strato di terreno resistente al fine della trasmissione del carico. In più, la cementazione protegge la barra dalla corrosione. In condizioni particolari si prevede l'utilizzo di rivestimenti speciali che migliorino la durabilità dell'opera. La perforazione non ha bisogno di un preforo perché la realizzazione del micropalo avviene in un'unica fase che comprende la perforazione, l'inserimento della barra e la cementazione. Questo processo rende la tecnica particolarmente rapida e ne riduce i costi. Non c'è nessuna asportazione del terreno, come succede invece con altre tecniche, e per questo motivo è ideale per siti dove la contaminazione del suolo e lo smaltimento del terreno di scarto renderebbero costose altre tipologie di intervento. Si possono eseguire pali autoperforanti inclinati e ottimizzare il trasferimento dei carichi in profondità.

Si evidenzia che il ricorso alla suddetta tecnica di infissione per rotopercolazione, in fase esecutiva, sarà limitata ai soli casi in cui la semplice infissione a palo battuto non possa essere utilizzata per la presenza di trovanti che impedirebbero la corretta posa in opera delle strutture verticali.

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 geologica condotta, basata sui rilievi e sulle indagini eseguite in situ, su dati di letteratura e in parte su dati provenienti da studi geologici realizzati sulle aree limitrofe, lascia spazio a differenti scenari stratigrafici. Di seguito si riporta uno stralcio della Relazione Geologica e di Caratterizzazione Geotecnica allegata al presente progetto:

“ ... SITUAZIONE LITOSTRATIGRAFICA LOCALE

L'area in esame è posta a quote variabili da circa 45 m sino a circa 55 m s.l.m..

La situazione litostratigrafica locale è stata definita attraverso l'osservazione diretta dei litotipi affioranti e informazioni dedotte sia dalla letteratura che da precedenti studi in terreni simili. La situazione litostratigrafica può essere schematizzata come segue:

- **Suolo:** L'origine è dovuta principalmente alla pedogenizzazione degli strati superficiali dei depositi olocenici. La potenza di tali accumuli è variabile da qualche decimetro sino ad 1.50/2.00 m. Dal punto di vista fisico, in linea di massima li possiamo definire incoerenti e con bassa resistenza meccanica.
- **Calcari Formazione di Capo Caccia:** calcari prevalentemente micritici. $H > 10.0$ m

Idrogeologia

Il criterio col quale sono state impostate e svolte le indagini idrogeologiche è stato quello di reperire dati indicativi in merito all'entità e alla dinamica della circolazione idrica sotterranea attraverso le unità geologiche affioranti nell'area studiata.

L'analisi critica di tutti i dati litostratigrafici e idrogeologici raccolti nel corso di questa indagine e delle precedenti campagne di sondaggi e durante le attività di monitoraggio ed emungimento delle falde, hanno consentito di ricostruire, in maniera coerente con le evidenze riscontrate, il modello idrogeologico delle coperture sedimentarie plio-quadernarie, dei sedimenti alluvionali tardo miocenici rinvenuti nell'area.

L'acquifero maggiore di questo settore è sicuramente costituito dalla successione carbonatica mesozoica. Il calcari della Formazione di Capo Caccia sono caratterizzati da una permeabilità $K=1 \times 10^{-5}$ m/sec.

La potenzialità di immagazzinamento idrico nei calcari mesozoici della Nurra è direttamente proporzionale allo spessore della successione carbonatica.

La tettonica ha deformato in più riprese le coperture carbonatiche mesozoiche di questo settore provocando:

- l'emersione e l'erosione condizionando le differenze di spessore nelle diverse aree;
- la formazione di barriere impermeabili dovute a faglie che limitano la circolazione idrica laterale;
- la generazione di geometrie e strutture che possano aver consentito l'instaurarsi di falde sospese, conservazione della potenza degli strati originari e/o il loro ispessimento a causa del raccorciamento degli stessi.

I depositi detritici olocenici pur essendo caratterizzati da una permeabilità medio-alta per porosità, raramente sono in grado di raccogliere falde produttive. Spesso consentono il flusso verso le sottostanti formazioni carbonatiche sottostanti.

Idrografia

*Il bacino idrografico di riferimento per questo settore è quello del **Rio Don Gavino**, che all'ingresso nel territorio di Alghero prende il nome di Riu Filibertu, affluente del Riu Barca. L'asta fluviale nel tratto posto nell'entroterra con andamento pressoché rettilineo defluisce verso Sud, solo nel tratto finale, poco a valle della confluenza, devia verso Ovest con un andamento quasi meandriforme fino a sfociare dopo poco più di 3 km sullo Stagno di Calich, nella costa algherese.*

*Sulla base delle osservazioni sul deflusso delle acque superficiali e dagli studi compiuti sugli acquiferi sotterranei, **si può affermare che quanto in progetto non interferisce in alcun modo con gli acquiferi superficiali e sotterranei presenti nel sito e nelle aree circostanti.***

*Il Riu Don Gavinu, (numero di Horton-Strahler 4), con i suoi affluenti minori drena la coltre detritica olocenica. L'area su cui sorgerà la centrale agrivoltaica in esame è intersecata da un'asta fluviale di ordine gerarchico 1 per cui è stata prevista la fascia di tutela della pubblica incolumità di 10 m di profondità su entrambe le sponde. **I campi agrivoltaici sorgeranno all'esterno di tale fascia.***

LINEAMENTI GEOMORFOLOGICI DELLA ZONA

I paesaggi della zona in esame sono fortemente caratterizzati dalla presenza antropica delle attività agricole e zootecniche.

Le zone più naturali si inseriscono spesso a mosaico fra le attività produttive e finiscono per esserne fortemente condizionate; le zone naturaliformi di maggior estensione sono più rappresentate man mano che ci si avvicina alle zone collinari.

Dal punto di vista altimetrico l'area è posta mediamente a quote variabili da circa 40 m sino a circa 60 m s.l.m.. e si inserisce in un contesto morfologico caratterizzato da modeste variazioni di quota dell'ordine della decina di metri che limitano le vedute panoramiche.

I dati ottenuti dalle osservazioni geomorfologiche e geologiche condotte in campagna, hanno messo in evidenza che nell'area interessata dall'intervento in oggetto non sono presenti pendenze che superano i valori dell'ordine del 20%. Inoltre, non sono state rilevate gravi anomalie di discontinuità litologica.

È stato possibile, grazie ai rilievi effettuati, notare come non ci siano segni di squilibrio o manifestazioni geomorfiche di tipo evolutivo, che possano far nutrire dubbi sulle condizioni di

stabilità d'insieme dell'area, si evidenzia che l'area interessata dal progetto, viene a ricadere in corrispondenza di una zona non interessata da fenomeni franosi attivi o quiescenti.

MODELLO GEOTECNICO DEL SOTTOSUOLO

Il rilevamento geologico eseguito nel settore in esame ha consentito di delineare sia la stratigrafia dell'area che la natura e lo stato fisico dei terreni costituenti il sottosuolo.

L'indagine sul campo ha messo in evidenza nell'area di progetto una prevalenza di terreni calcarei e calcarenitici ricoperti da una modesta coltre detritica di alterazione e nei fondovalle da depositi alluvionali recenti.

L'impianto fotovoltaico verrà realizzato sui terreni calcarei e calcarenitici. Il cavidotto, invece, oltre che le precedenti litologie interesserà negli attraversamenti in TOC le alluvioni sabbioso limose del Riu Mannu e localmente materiali di riporto e derivanti da attività antropiche nei tratti stradali e all'interno della Zona Industriale di Porto Torres.

Per la caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni attraversati si è fatto riferimento a parametri derivanti da lavori effettuati in precedenza nella stessa zona, aventi le medesime caratteristiche litologiche:

➤ Suolo agrario

Per questo strato si fa riferimento ad una resistenza al taglio che comunque deve considerarsi allo stato residuo.

- ✓ *Peso di volume apparente $\gamma = 1.600,00 \text{ kg/m}^3$*
- ✓ *Angolo di attrito interno $\varphi = 15^\circ$.*

➤ Depositi alluvionali Olocenici: Sabbie con subordinati limi e argille.

- ✓ *Peso di volume apparente $\gamma = 1.850,00 \text{ kg/m}^3$*
- ✓ *Angolo d'attrito $\alpha = 28-30^\circ$*
- ✓ *Coesione $C = 0.1 \text{ kg/cm}^2$*

➤ Calcari e calcari bioclastici: Calcari a rudiste e calcari micritici.

- ✓ *Peso di volume apparente $\gamma = 2.120,00 \text{ kg/m}^3$*
- ✓ *Angolo d'attrito $\alpha = 35^\circ$*
- ✓ *Coesione $C = 10 \text{ kg/cm}^2$*
- ✓ *Modulo Elastico $E = 85.000 \text{ kg/cm}^2$*

RACCOMANDAZIONI ESECUTIVE

Da quanto esposto nei paragrafi precedenti si evince che nella realizzazione dell'impianto fotovoltaico in progetto non esistono problematiche relative alla stabilità dei versanti.

- ✓ *La natura e le caratteristiche del terreno di fondazione, unitamente alle indicazioni progettuali di massima, sono tali da consentire l'uso generalizzato di fondazioni superficiali per le cabine elettriche a servizio dell'impianto, mentre potranno essere previste fondazioni profonde per il sostegno dei pannelli fotovoltaici.*

..."

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 sezione ad "omega 30x100x50" e si è studiato il comportamento geotecnico e strutturale nei confronti delle sollecitazioni agenti scaricate in fondazione tenendo presente che sarà probabile il ricorso alla tecnica della roto-percussione per il posizionamento dei sostegni dei tracker. Anche in quest'ultimo caso (roto-percussione) la quantità di terreno di scavo proveniente dal posizionamento di un singolo sostegno è dell'ordine dei 0,018 m³ per un foro di 15 cm di diametro e per la lunghezza di un metro, quindi trascurabile. Per il predimensionamento delle fondazioni dei tracker si è scelto la tipologia a "palo battuto" rispetto alla fondazione eseguita per roto-percussione, precisando che solo in seguito ad approfondite indagini puntuali e alle specifiche prove di sfilamento potrà essere individuata la soluzione migliore da utilizzare, sempre con la finalità di optare, tra le soluzioni possibili, per quella che avrà il minor impatto sul sito di installazione.

4. GEOMETRIA DELLE OPERE

L'intervento in oggetto prevede la realizzazione di un impianto fotovoltaico a terra con i moduli sorretti da una serie di strutture 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 zenitale varia durante la giornata.

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

Considerando il **tracker da 26 moduli**, della lunghezza di circa 30,45 m, l'interasse tra i montanti interni è di circa 7,10 m mentre per quelli esterni ne abbiamo una di circa 7,20 m.

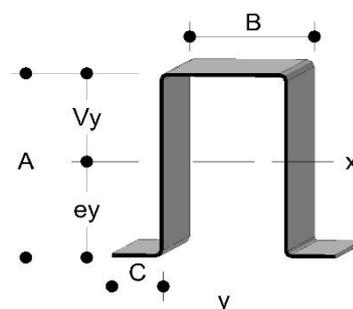
L'interdistanza tra le singole file di moduli, in direzione Est-Ovest, calcolata per evitare problemi di ombreggiamento tra file contigue, è di **5,00 metri**.

I moduli utilizzati, affiancati secondo il lato maggiore, hanno dimensioni di **2285 x 1134 mm** 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 **30x100x50** 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
30x100x50	2,0	300	4,71	6,00	4,84	5,16	80,48	16,64	3,66	42,05	7,93	2,65
	2,5	295	5,79	7,40	4,84	5,16	98,54	20,38	3,66	51,1	9,73	2,63
	3,0	2,90	6,83	8,70	4,83	5,17	115,8	23,95	3,65	59,6	11,46	2,62

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 a

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 preliminare 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 progettuali 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 m² 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): **50 m**

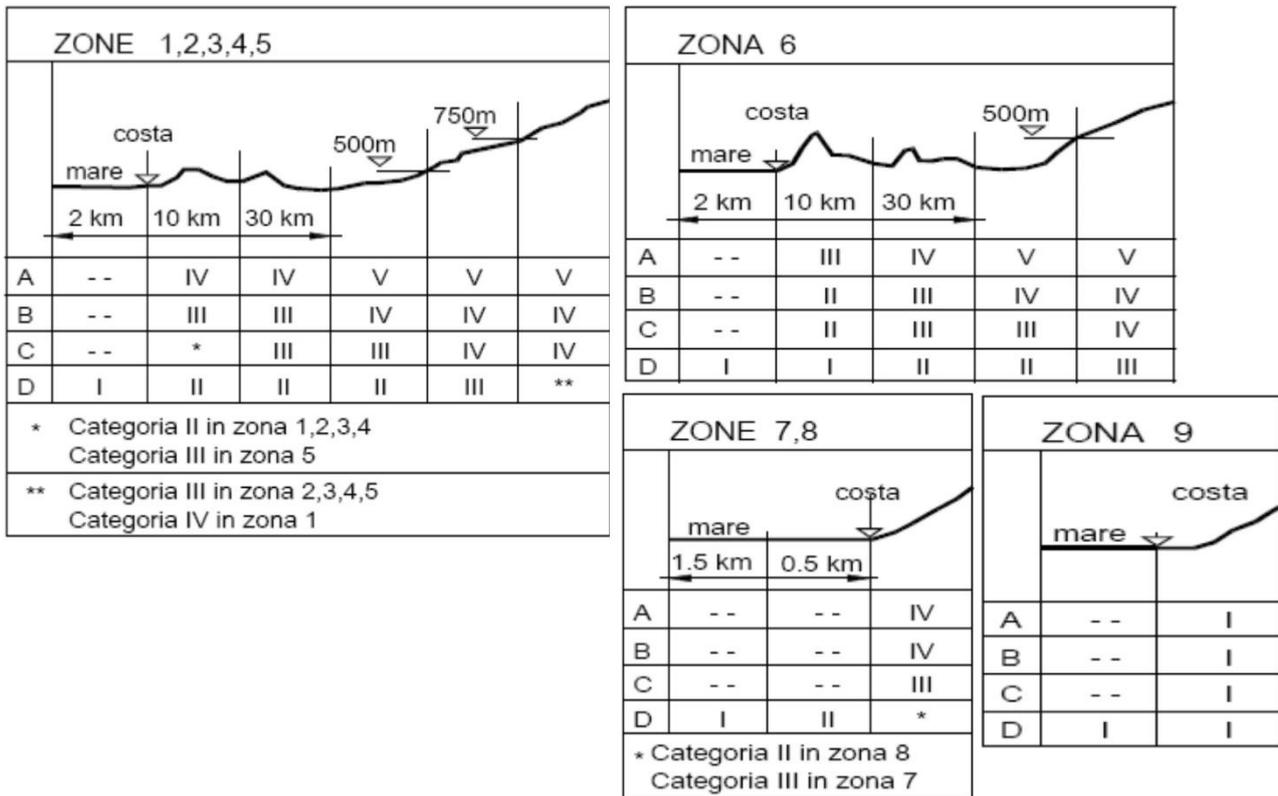
Distanza dalla costa **11,0 km**

TR (Tempo di ritorno):

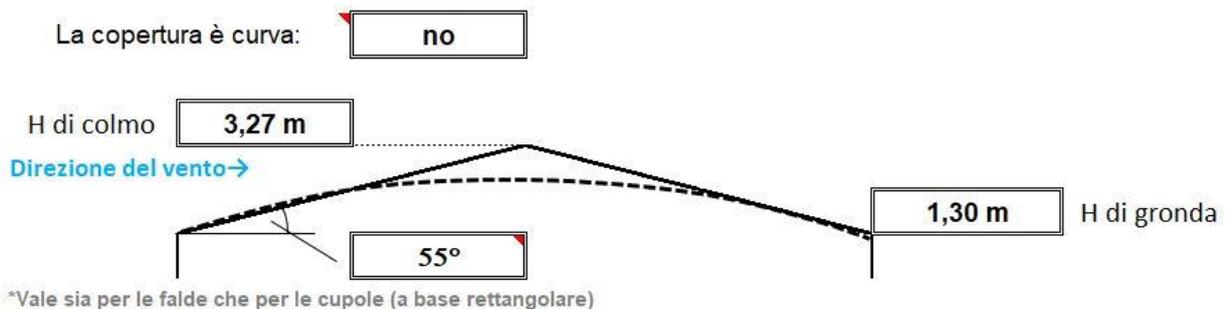
50 anni

Categoria di esposizione

II



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



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

$$v_b = v_{b,0} * c_a$$

ca = 1 per as ≤ a0
ca = 1 + ks (as/a0 - 1) per a0 < as ≤ 1500 m

vb (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])

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

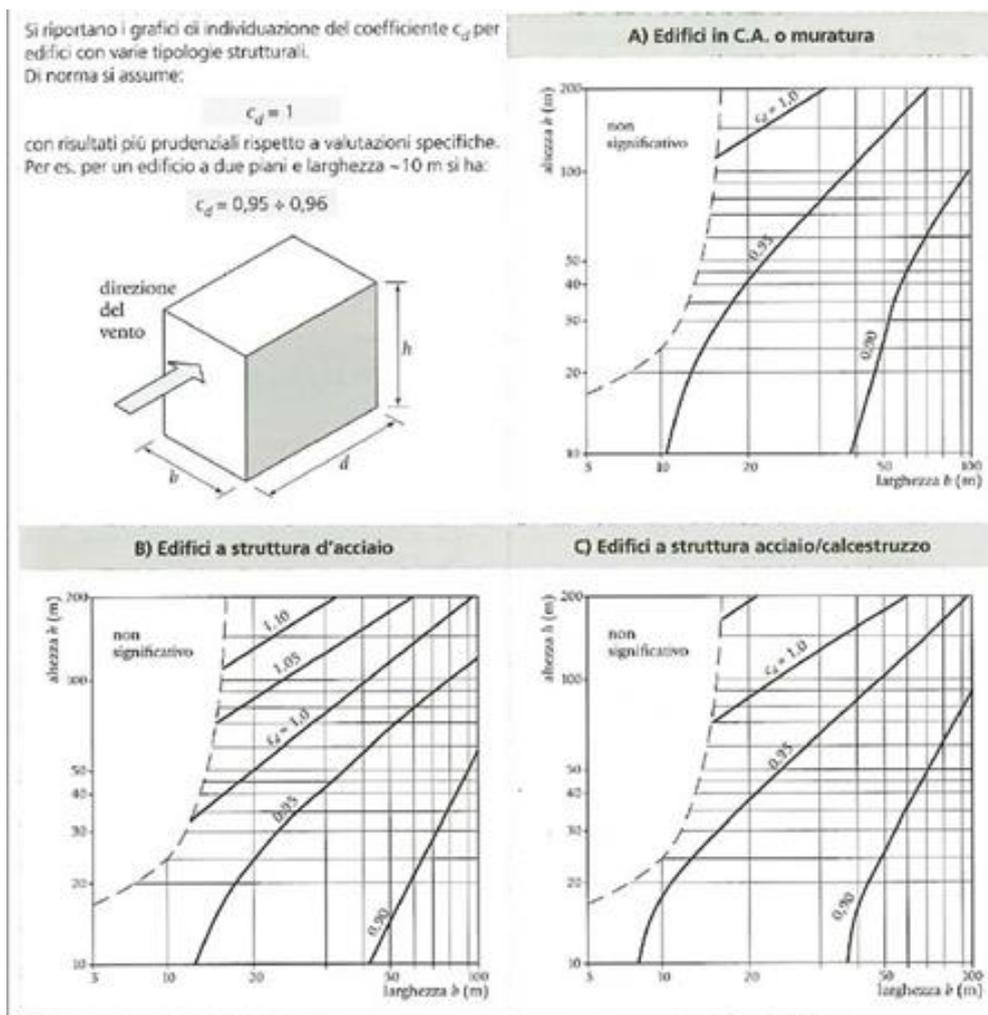
Pressione cinetica di riferimento $q_r = 490,72 \text{ [N/m}^2\text{]}$

CALCOLO DEI COEFFICIENTI

Coefficiente dinamico [§3.3.8]

c_d	1,00
-------	-------------

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:

1	2	3																				
Costruzioni ubicate sulla cresta di una collina	Costruzioni ubicate sul livello superiore	Costruzioni ubicate su di un pendio																				
$c_t = 1 + \beta \cdot \gamma$	$c_t = 1 + \beta \cdot \gamma \cdot \left(1 - 0,1 \cdot \frac{x}{H}\right) \geq 1$	$c_t = 1 + \beta \cdot \gamma \cdot \frac{h}{H}$																				
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="3" style="text-align: center;">Coefficiente β</th> <th colspan="3" style="text-align: center;">Coefficiente γ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">per:</td> <td style="text-align: center;">$\frac{z}{H} \leq 0,75$</td> <td style="text-align: center;">$0,75 \leq \frac{z}{H} \leq 2$</td> <td style="text-align: center;">per:</td> <td style="text-align: center;">$\frac{H}{D} \leq 0,10$</td> <td style="text-align: center;">$0,10 < \frac{H}{D} \leq 0,30$</td> <td style="text-align: center;">$\frac{H}{D} > 0,3$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">β</td> <td style="text-align: center;">$\beta = 0,5$</td> <td style="text-align: center;">$\beta = 0,8 - 0,4 \cdot \frac{z}{H}$</td> <td style="text-align: center;">γ</td> <td style="text-align: center;">$\gamma = 0$</td> <td style="text-align: center;">$\gamma = 5 \left(\frac{H}{D} - 0,10\right)$</td> <td style="text-align: center;">$\gamma = 1$</td> </tr> </tbody> </table>			Coefficiente β			Coefficiente γ			per:	$\frac{z}{H} \leq 0,75$	$0,75 \leq \frac{z}{H} \leq 2$	per:	$\frac{H}{D} \leq 0,10$	$0,10 < \frac{H}{D} \leq 0,30$	$\frac{H}{D} > 0,3$	β	$\beta = 0,5$	$\beta = 0,8 - 0,4 \cdot \frac{z}{H}$	γ	$\gamma = 0$	$\gamma = 5 \left(\frac{H}{D} - 0,10\right)$	$\gamma = 1$
Coefficiente β			Coefficiente γ																			
per:	$\frac{z}{H} \leq 0,75$	$0,75 \leq \frac{z}{H} \leq 2$	per:	$\frac{H}{D} \leq 0,10$	$0,10 < \frac{H}{D} \leq 0,30$	$\frac{H}{D} > 0,3$																
β	$\beta = 0,5$	$\beta = 0,8 - 0,4 \cdot \frac{z}{H}$	γ	$\gamma = 0$	$\gamma = 5 \left(\frac{H}{D} - 0,10\right)$	$\gamma = 1$																

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

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

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

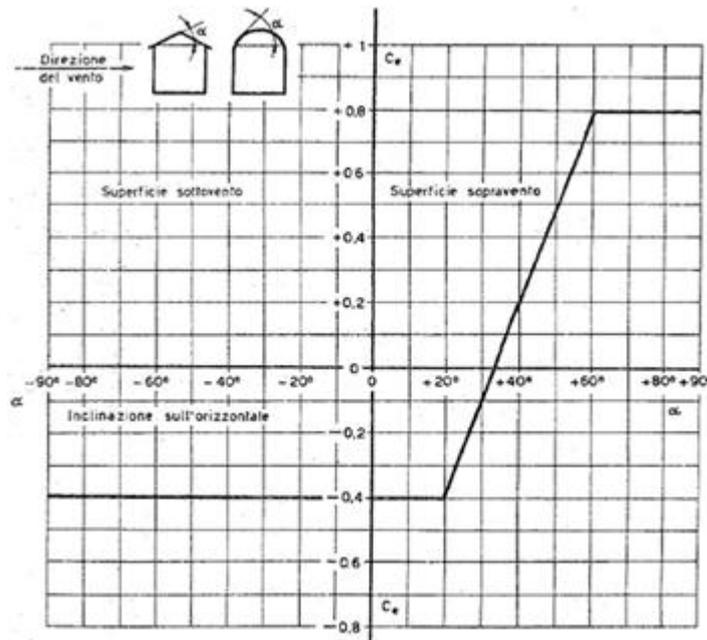
k _r	z ₀	z _{min}
0,19	0,05	4,00

Coefficiente di esposizione minimo	$c_{e,min}$	1,80	z < 2,00
Coefficiente di esposizione alla gronda	$c_{e,gronda}$	1,80	z = 1,30
Coefficiente di esposizione al colmo	$c_{e,colmo}$	1,80	z = 3,27

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.

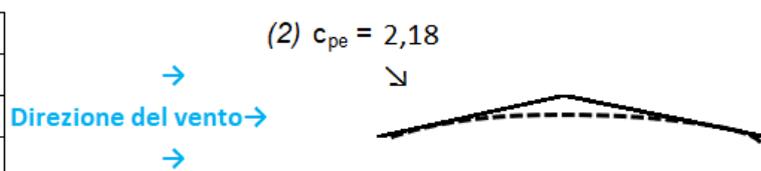


Tettoia ad uno spiovente

Configurazione più svantaggiosa

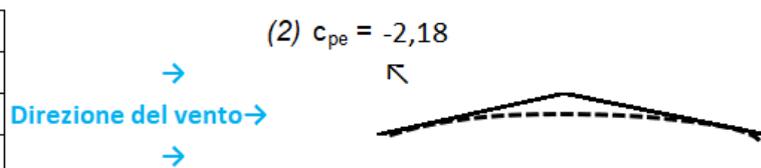
Configurazione A

(1) parete sopravento	C_p	0,00
(2) copertura sopravento	C_p	2,18
(3) copertura sottovento	C_p	0,00
(4) parete sottovento	C_p	0,00



Configurazione A

(1) parete sopravento	C_p	0,00
(2) copertura sopravento	C_p	-2,18
(3) copertura sottovento	C_p	0,00
(4) parete sottovento	C_p	0,00



Configurazione B

PRESSIONI DEL VENTO

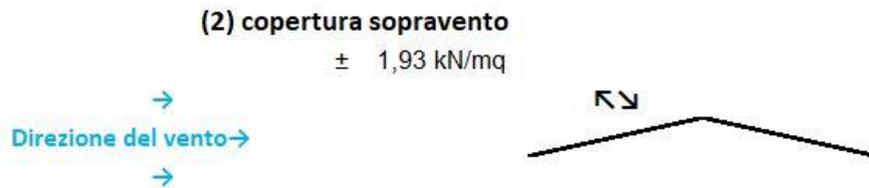
Combinazione più sfavorevole per pareti e copertura:

Valori massimi della pressione per ogni elemento

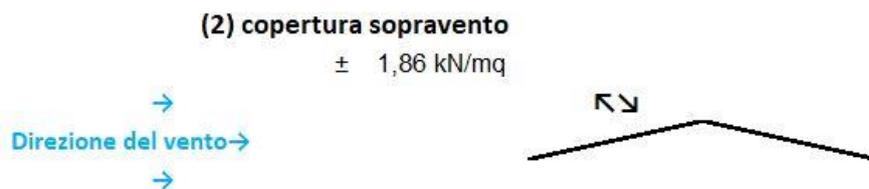
$$p \text{ (pressione del vento)} = q_{cd} \cdot c_t \cdot c_e \cdot c_p$$

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

	p [kN/m ²]	c_d	c_t	c_e	c_p	P [kN/m ²]
(1) par. sopravent.	0,491	1,00	1,00	1,801	0,00	0,00
(2) cop. sopravent.	0,491	1,00	1,00	1,801	2,18	1,93
(3) cop. Sottovent.	0,491	1,00	1,00	1,801	0,00	0,00
(4) par. sottovent.	0,491	1,00	1,00	1,801	0,00	0,00



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



Azione del sisma:

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla pericolosità sismica di base del sito di costruzione e sono funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale.

Dalla normativa vigente **NTC2018** si evince che la pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa **Ag** in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A come definita al § 3.2.2), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza PVR come definite nel § 3.2.1, nel periodo di riferimento **VR**, come definito nel § 2.4. Inoltre, in alternativa è ammesso l'uso di accelerogrammi, purchè correttamente commisurati alla pericolosità sismica locale dell'area della costruzione.

Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento PVR nel periodo di riferimento VR, a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

Probabilità di superamento nella vita di riferimento	Probabilità di avere almeno un sisma con tempo di ritorno TR, durante il periodo di riferimento della costruzione considerata (vita nominale)
Periodo di ritorno (anni)	Tempo di ritorno del terremoto considerato
Ag	Accelerazione orizzontale massima espressa in funzione di g (accelerazione di gravità)
Fo	Valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
Tc*	Periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale

Per i valori di **Ag**, **Fo** e **TC*** necessari per la determinazione delle azioni sismiche, si fa riferimento agli Allegati A e B al Decreto del Ministro delle Infrastrutture 14 gennaio 2008, pubblicato nel S.O. alla Gazzetta Ufficiale del 4 febbraio 2008, n.29, ed eventuali successivi aggiornamenti.

Per la classificazione sismica dei terreni, come da NTC 2018, viste le caratteristiche geologico-stratigrafiche e strutturali e la modesta entità dell'intervento in progetto, si ritiene correttamente percorribile e utilizzabile l'**approccio semplificato** (basato sull'individuazione delle categorie di sottosuolo).

Con questo tipo di caratterizzazione si ottengono i parametri sismici di riferimento per 4 differenti stati limite:

Stati Limite di Esercizio SLE	SLO Stato Limite di Operatività
	SLD Stato Limite di Danno
Stati Limite Ultimi SLU	SLV Stato Limite di Salvaguardia della Vita
	SLC Stato Limite di Collasso

In base a questa zonizzazione dalla relazione Geologica si estraggono i seguenti dati:

DATI SULLA COSTRUZIONE			
CLASSE D'USO	VITA NOMINALE	COEFFICIENTE D'USO	VITA DI RIFERIMENTO
II Affollamento normale. Assenza di funzioni pubbliche e sociali	30 anni	1	50 anni

VALORI CALCOLATI				
STATO LIMITE	SLO	SLD	SLV	SLC
PARAMETRO				
Probabilità di superamento nella vita di riferimento	0.810	0.630	0.100	0.050
Periodo di ritorno (anni)	30	35	332	682
ag [g]	0,019	0,020	0,045	0,055
Fo	2,610	2,628	2,855	2,930
Tc*[s]	0,273	0,280	0,332	0,356

Come visto relativamente al carico da vento, data la preponderanza dell'azione del vento rispetto a quella del sisma, si **tralascia l'esposizione alle 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 trascurava, 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 preliminare della fondazione con montanti da infiggere nel terreno con la tecnica a "palo battuto".

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: $p = 1,93 \text{ kN/m}^2$

Azione del vento: $F_v = p \times S = 3\,182,57 \text{ kg}$

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° sarà:

$$S_f = F_v * \sin 55^\circ = 2\,607 \text{ kg}$$

Azione resistente sul montante:

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

Superficie di attrito equivalente: $A_a = 62 \text{ cm}^2/\text{cm}$

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:

$$L_{\min} = \frac{S_f \cdot \phi}{\tau_s * A_a} = 67 \text{ cm}$$

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 e/o per roto-percussione, che risultano essere le tipologie di intervento meno invasive e recuperabili al momento della dismissione dell'impianto. ***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 riferimento 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.