



REGIONE LAZIO



Comune di Roma (RM)

PROGETTO DEFINITIVO

per la realizzazione di un impianto agrivoltaico della potenza di picco di 18,21 MWp presso via Boccea

TITOLO

Calcoli Preliminari Dimensionamento Strutture

PROGETTAZIONE	CONSULENZA	PROPONENTE
 <p>SR International S.r.l. C.so Vittorio Emanuele II, 282-284 - 00186 Roma Tel. 06 8079555 - Fax 06 80693106 C.F e P.IVA 13457211004</p> 	<p>MASSIMO FORDINI SONNI ARCHITETTO</p> <p>Arch. Massimo Fordini Sonni Via Verdi 16c, Celleno (VT) - 01020 C.F. FRD MSM 65C21C446A, P.IVA 01505150563</p> <p>Collaboratori: Arch. Alessandra Rocchi Arch. Marco Musetti</p>  	<p>SWE IT 09 Srl</p> <p>SWE IT 09 Srl. Con sede legale a Milano (MI) Piazza Borromeo 14 - 20123 C.F. e P.IVA 12498800965</p>

Revisione	Data	Elaborato	Verificato	Approvato	Descrizione
00	1/05/2023	Cavuto	Bartolazzi	SWE IT 09 Srl	Calcoli Preliminari di Dimensionamento Strutture

N° DOCUMENTO	SWE-BCC-CDS	SCALA	--	FORMATO	A4
--------------	-------------	-------	----	---------	----

INDICE

INDICE.....	1
INDICE DELLE FIGURE	1
INDICE DELLE TABELLE.....	2
1 PREMESSA.....	3
2 UBICAZIONI DELL'IMPIANTO AGRIVOLTAICO E DELLE OPERE DI CONNESSIONE.....	4
3 DESCRIZIONE GENERALE DELLE OPERE	5
4 NORMATIVA DI RIFERIMENTO	5
5 MATERIALI IMPIEGATI	6
6 GRANDEZZE GEOTECNICHE.....	6
7 AZIONI SULLA STRUTTURA.....	6
7.1 Carichi permanenti strutturali.....	6
7.2 Carichi permanenti non strutturali	6
7.3 Azione del vento.....	7
7.4 Azione della neve	8
7.5 Azione sismica	9
8 DEFINIZIONE DELLE COMBINAZIONI	10
9 MODELLO DI CALCOLO.....	10
10 METODO DI ANALISI.....	10
11 PROGETTO E VERIFICA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI	10
11.1 Verifiche strutturali elementi in acciaio	11
Verifiche SLU	11
Verifiche SLE.....	14
12 CALCOLO DELLA FONDAZIONE.....	15
13 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	15

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Inquadramento progettuale su ortofoto.....	4
Figura 1 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità configurazione 0°	11
Figura 1 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità (elementi cold formed) configurazione 0°	11
Figura 1 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio configurazione 0°	12
Figura 1 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio (elementi cold formed) configurazione 0°	12
Figura 1 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità configurazione 0°	13
Figura 1 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità (elementi cold formed) configurazione 0°	13

Figura 1 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio configurazione 0° 14

Figura 1 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio (elementi cold formed) configurazione 0° 14

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - calcolo pressione del vento 8

Tabella 3 - Valori di riferimento del carico della neve al suolo, qsk (cfr. §3.4.2 D.M. 2018) 9

Tabella 4 - Valori dei coefficienti di forma per falde piane (cfr. Tab. 3.4.II D.M. 2018 e Tab. C3.4.I Circolare 2019 n. 7)..... 9

Tabella 5 - Valori dei coefficienti di forma per coperture cilindriche (cfr. §3.4.3.3.1 Circolare 2019 n. 7) 9

Tabella 5 - Valori di CE per diverse classi di esposizione (cfr. Tab. 3.4.I D.M. 2018)..... 9

Tabella 5 – Pericolosità sismica 9

1 PREMESSA

Si propone di realizzare un progetto agrivoltaico permettendo la coesistenza dell'attività agricola e la produzione di energia da fonte rinnovabile (sole) tramite l'impiego di tecnologia fotovoltaica. La realizzazione dell'opera prevede l'utilizzo di moduli in silicio monocristallino installati a terra su strutture di supporto ad inseguimento monoassiale solare (tracker); tuttavia non si esclude la possibilità di ricorrere ad alcune varianti progettuali per incrementare la produttività dell'impianto, anche in funzione dei futuri sviluppi di mercato ed alle disponibilità dei componenti. Le aree libere d'impianto e quelle tra le file di tracker verranno coltivate. Al contempo la messa a dimora di vegetazione perimetrale avrà la duplice funzione di mitigazione visiva e produzione agricola.

Il Soggetto Responsabile della Centrale agrivoltaica di Boccea (RM) e della progettazione delle opere di connessione alla RTN nel comune di Roma (RM), è la Società SWE IT 09 S.r.l. , con sede a Milano, Piazza Borromeo, n.14, CAP 20123 P.IVA 12498800965.

SR International S.r.l. è una società di consulenza e progettazione operante nel settore delle fonti rinnovabili di energia, in particolare solare fotovoltaica ed eolica. Per la realizzazione del progetto in esame essa funge da soggetto di riferimento per il supporto tecnico-progettuale.

L'impianto in progetto comporta un significativo contributo alla produzione di energia rinnovabile da fonte solare e prevede la totale cessione di quest'ultima, secondo le vigenti norme, alla società Areti proprietaria della Rete elettrica di Trasmissione Nazionale (RTN) .

2 UBICAZIONI DELL'IMPIANTO AGRIVOLTAICO E DELLE OPERE DI CONNESSIONE

Il campo agrivoltaico (in blu in Figura 1), un lotto di n.2 impianti fotovoltaici attigui per un totale di picco di 18.207 kWp e con una potenza in immissione totale richiesta di circa (art.1 TICA) 17.250,0 kW. è ubicato nel territorio comunale di Roma, in provincia di Roma, in zona Boccea. I terreni appartengono a più proprietari e sono censiti al Catasto Terreni del comune di Roma:

- Foglio 335, Particella 651 e 652

I riferimenti cartografici della Carta Tecnica Regionale in scala 1:5.000 e della Carta d'Italia IGM in scala 1:100.000 sono rappresentati da:

- Elementi CTRN n. 373081
- IGM Foglio n. 149

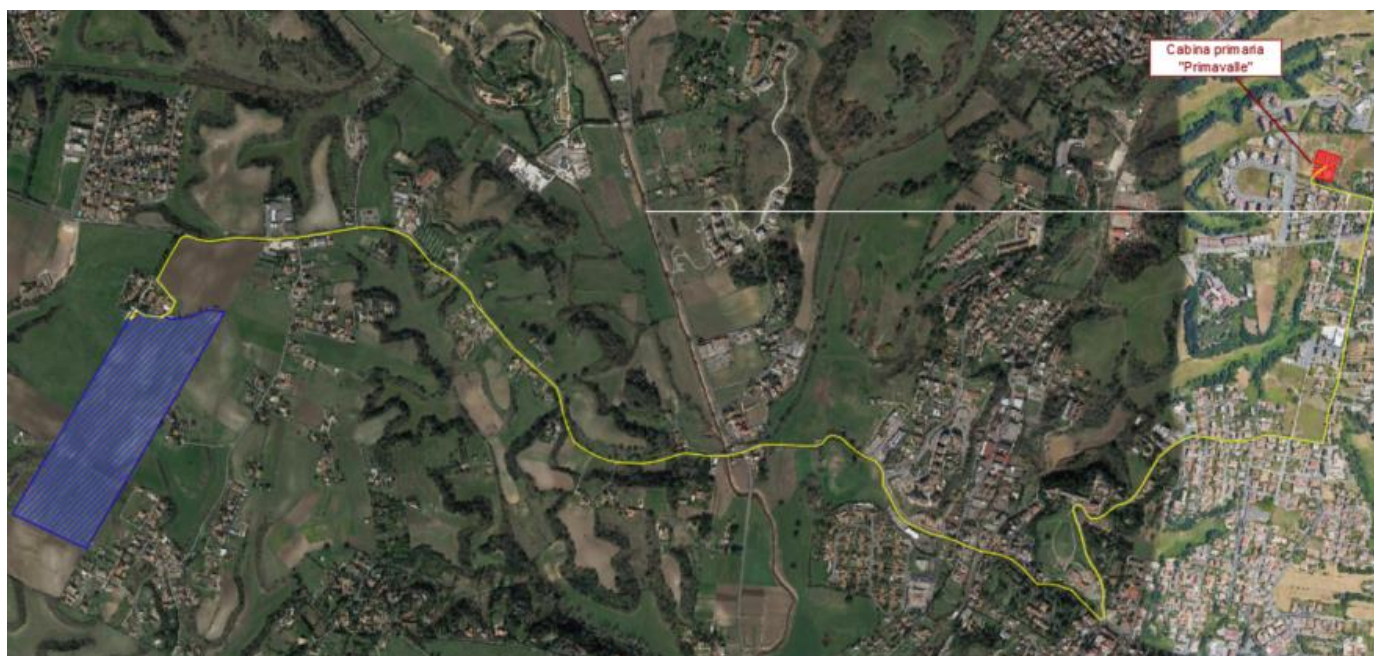


Figura 1 – Inquadramento progettuale su ortofoto

L'impianto sarà collegato in MT tramite cavidotto interrato ad uno stallo a 20 kV nella Cabina Primaria "Primavalle" di proprietà della società Areti Di seguito si riportano le coordinate delle aree di intervento:

COORDINATE UTM WGS84 – T33		
Area 1 Impianto FV	278589.15 E	4645368.29 N
Area 2 Impianto FV	278426.60 E	4645093.64 N
CP Primavalle	282439.00 E	4646102.00 N

3 DESCRIZIONE GENERALE DELLE OPERE

La presente relazione descrive le strutture di sostegno per i pannelli fotovoltaici. Nello specifico, le strutture di sostegno ipotizzate hanno la caratteristica di poter essere infisse nel terreno senza bisogno di alcun tipo di fondazione in calcestruzzo, compatibilmente alle caratteristiche geotecniche del terreno e alle prove penetrometriche che verranno effettuate in fase esecutiva; inoltre, come certificato dal costruttore, le strutture sono in grado di supportare il peso dei moduli anche in presenza di raffiche di vento di elevata velocità, di neve e altri carichi accidentali. L'altezza al mozzo delle strutture è di circa 3,00 m dal suolo; l'angolo di rotazione del mozzo è di $\pm 55^\circ$ rispetto all'orizzontale.

La struttura portante sarà costituita da colonne verticali infisse nel terreno, un corrente longitudinale e degli arcarecci posti perpendicolarmente al corrente stesso. Nel dettaglio in questa fase sono stati previsti l'utilizzo per le colonne di profilati tipo HEA160 e IPE 220, alle quali sono incernierate dei correnti di sezione scatolare 140x140x4 mm e su quest'ultimi si vincolano le aste di sezione omega 100x30x30x1.5 che servono da sostegni ai pannelli fotovoltaici.

Deve essere specificato che in fase di progettazione esecutiva è necessario verificare la disponibilità dei profili da parte del fornitore prescelto ed eventualmente individuare soluzioni in grado di garantire proprietà meccaniche e inerziali adeguate alle prestazioni richieste.

4 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Le fasi di analisi e verifica della struttura sono state condotte in accordo alle seguenti disposizioni normative:

Legge 5 novembre 1971 n. 1086 (G. U. 21 dicembre 1971 n. 321)

"Norme per la disciplina delle opere di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica".

Legge 2 febbraio 1974 n. 64 (G. U. 21 marzo 1974 n. 76)

"Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche".

Indicazioni progettive per le nuove costruzioni in zone sismiche a cura del Ministero per la Ricerca scientifica - Roma 1981.

D. M. Infrastrutture Trasporti 17/01/2018 (G.U. 20/02/2018 n. 42 - Suppl. Ord. n. 8)

"Aggiornamento delle Norme tecniche per le Costruzioni".

Inoltre, in mancanza di specifiche indicazioni, ad integrazione della norma precedente e per quanto con esse non in contrasto, sono state utilizzate le indicazioni contenute nelle seguenti norme:

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.

Eurocodice 3 - *"Progettazione delle strutture in acciaio"* - EN 1993-1-1.

CEI 82-74 - *"Metodi di calcolo delle azioni del vento e criteri di dimensionamento di strutture di supporto di moduli fotovoltaici o di collettori solari"* - 2018-02.

CNR-DT 207 R1/2018 - *"Istruzioni per la valutazione delle azioni e degli effetti del vento sulle costruzioni"*.

5 MATERIALI IMPIEGATI

Tutti i materiali strutturali impiegati devono essere muniti di marcatura "CE", ed essere conformi alle prescrizioni del "REGOLAMENTO (UE) N. 305/2011 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO del 9 marzo 2011", in merito ai prodotti da costruzione.

Per la realizzazione dell'opera in oggetto saranno impiegati i seguenti materiali:

Acciaio tipo: S275 / S355

Tensione caratteristica di snervamento 275 MPa / 355 MPa

Tensione caratteristica di rottura: 430 MPa / 510 MPa

Modulo elastico: $E = 210.000 \text{ MPa}$

Coefficiente di Poisson = 0.3

Coefficiente di dilatazione termica: $\lambda = 1.2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

Densità: 7850 kg/m^3

6 GRANDEZZE GEOTECNICHE

Come specificato nella relazione geologica, la geologia di superficie dell'area è caratterizzata da depositi vulcanici del Pleistocene Medio riferibili al Complesso Vulcanico "Sabatino". La successione della zona studiata, conformemente al resto dell'area romana, ha come substrato profondo la "Formazione di Monte Vaticano" costituita da argille grigie del Pliocene, deposte in ambiente marino ma non affiorante nel contorno dell'area.

Ai fini delle calcolazioni condotte, a vantaggio di sicurezza, si è considerato un terreno dalle caratteristiche meccaniche relativamente scadenti, dotate peso specifico γ pari a 17 kN/m^3 e angolo di attrito ϕ pari a 20° .

7 AZIONI SULLA STRUTTURA

Le azioni sulla struttura in esame sono valutate in accordo al capitolo 3 del D.M. 2018. In particolare sono presenti:

- Carichi permanenti strutturali e non strutturali;
- Azione del vento;
- Azione da neve;
- Azione sismica.

Le azioni così ottenute sono opportunamente combinate tra loro in base alle combinazioni di carico indicate dalla norma di riferimento e riportate in dettaglio al §8 della presente. Da queste si ottengono i valori di progetto delle sollecitazioni da impiegare successivamente nelle verifiche. I calcoli e le verifiche sono condotti con il metodo semiprobabilistico degli stati limite secondo le indicazioni del D.M. 2018.

7.1 Carichi permanenti strutturali

Il peso proprio degli elementi strutturali in acciaio e in c.a. è stato portato in considerazione automaticamente dal programma di calcolo nella modellazione geometrica della struttura, le azioni permanenti gravitazionali associate ai pesi propri dei materiali strutturali sono derivate dalle dimensioni geometriche e dai pesi dell'unità di volume dei materiali con cui sono realizzate le parti strutturali della costruzione.

7.2 Carichi permanenti non strutturali

Peso proprio dei pannelli fotovoltaici, ognuno dei quali avente peso di **294 N**.

7.3 Azione del vento

La pressione del vento è data dall'espressione:

$$p = q_r \cdot C_e \cdot C_p \cdot C_d \quad (\text{relazione 3.3.4 - D.M. 2018});$$

dove

q_r : la pressione cinetica di riferimento data dall'espressione:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_r^2 \quad (\text{relazione 3.3.6 - D.M. 2018});$$

con:

ρ : densità dell'aria (assunta pari a 1,25 kg/m³);

v_r : velocità di riferimento del vento (in m/s), data da (Eq. 3.3.2 - D.M. 2018):

$v_r = v_b \cdot C_{r_f}$ con:

c_r : coefficiente dato dalla seguente relazione:

$$c_r = 0,75 \cdot \sqrt{1 - 0,2 \cdot \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T_R} \right) \right]} \quad (\text{relazione 3.3.3 - D.M. 2018});$$

v_b : velocità di riferimento del vento associata ad un periodo di ritorno di 50 anni, data da: $v_b = v_{b,0} \cdot C_a$

dove:

C_a è il coefficiente di altitudine fornito dalla relazione:

$$C_a = 1 \quad \text{per } a_s \leq a_{0a} = 1 + k_s (a_s/a_0 - 1) \quad \text{per } a_0 < a_s \leq 1500 \text{ m}$$

$v_{b,0}$, a_0 , k_a : parametri forniti dalla Tab. 3.3.I del §3.3.2 D.M. 2018 a_s : altitudine sul livello del mare (m.s.l.m) del sito ove sorge la costruzione;

T_R : periodo di ritorno espresso in anni.

C_e : coefficiente di esposizione, che per altezza sul suolo (z) non maggiori di 200 m è dato dalla formula:

$$\begin{aligned} C_e(z) &= k_r^2 \cdot C_t \cdot \ln(z/z_0) \cdot [7 + C_t \cdot \ln(z/z_0)] & \text{per } z \geq z_{\min} \\ C_e(z) &= C_e(z_{\min}) & \text{per } z < z_{\min} \end{aligned} \quad (\text{relazione 3.3.7 - D.M. 2018});$$

dove:

k_r , z_0 , z_{\min} : parametri forniti dalla Tab. 3.3.II del par. 3.3.7 D.M. 2018 (*funzione della categoria di esposizione del sito e della classe di rugosità del terreno*);

C_t : coefficiente di topografia (assunto pari ad 1).

C_p : coefficiente di forma (o coefficiente aerodinamico), funzione della tipologia e della geometria della costruzione e del suo orientamento rispetto alla direzione del vento (cfr. § 3.3.8 - D.M. 2018).

C_d : coefficiente dinamico (assunto pari ad 1; par. 3.3.9 - D.M. 2018).

Per la valutazione del coefficiente di forma (o pressione) si è fatto riferimento alle indicazioni della norma CEI 82-74, secondo la quale in presenza di pannelli con inclinazione maggiore di 55°, si fa riferimento alla trattazione usata per le insegne e i tabelloni e pertanto si assume un valore di C_f pari a 1,8.

Per il caso in esame:

Località	Roma - Lazio				
altitudine sito (m)	89				
STOW POSITION					
zona	$v_{b,0}$ (m/s)	a_0 (m)	k_s	C_a	V_b (m/s)
3	27	500	0,37	1	27,0
	rugosità	esposizione	k_r	z_0 (m)	z_{\min} (m)
	D	III	0,2	0,1	5
VELOCITA' RIFERIMENTO	Tr (anni)	c_r		V_r (m/s)	q_r (N/m ²)
	50	1		27,0	456,29
WORKING POSITION					
zona	$v_{b,0}$ (m/s)	a_0 (m)	k_s	C_a	V_b (m/s)

\bar{z}	16	500	0,37	1	16,0		
	rugosità	esposizione	k_r	z_0 (m)	z_{min} (m)		
	D	III	0,2	0,1	5		
VELOCITA' RIFERIMENTO	Tr (anni)	c_r		V_r (m/s)	q_r (N/m²)		
	50	1		16,0	160,23		
opera	h costruzione (m)	angolo (°)	γ_{EF}	C_e	$C_p=C_r$	C_d	p (N/m²)
pannelli fotovoltaico	3,00	0	0,8	1,71	0,2	1	125
	3,00		0,8	1,71	-0,5	1	-312
pannelli fotovoltaico	4,89	55	-	1,71	1,8	1	492
	4,89		-	1,71	-1,8	1	-492

Tabella 1 - calcolo pressione del vento

7.4 Azione della neve

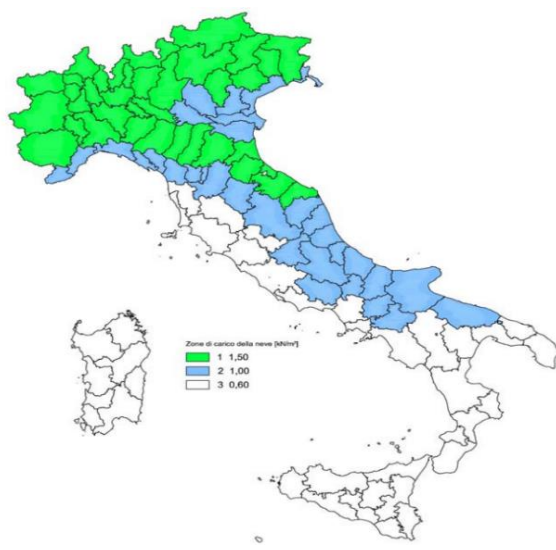
Il carico da neve è stato calcolato seguendo le prescrizioni del §3.4 del D.M. 2018 e le integrazioni della Circolare 2019 n. 7. Il carico da neve, calcolato come di seguito riportato, è stato combinato con le altre azioni variabili definite al §2.5.3, ed utilizzando i coefficienti di combinazione della Tabella 2.5.I del D.M. 2018. Il carico da neve superficiale da applicare sulle coperture è stato stimato utilizzando la relazione [cfr. §3.4.1 D.M. 2018]:

$$q_s = q_{sk} \cdot \mu_i \cdot C_e \cdot C_t$$

dove:

q_{sk} è il valore di riferimento del carico della neve al suolo, in [kN/m²]. Tale valore è calcolato in base alla posizione ed all'altitudine (a_s) secondo quanto indicato alla seguente tabella;

Zona	$a_s \leq 200$ m	$a_s > 200$ m
I - Alpina	$q_{sk} = 1,50$ kN/m ²	$q_{sk} = 1,39 [1+(a_s/728)^2]$ kN/m ²
I - Mediterranea	$q_{sk} = 1,50$ kN/m ²	$q_{sk} = 1,35 [1+(a_s/602)^2]$ kN/m ²
II	$q_{sk} = 1,00$ kN/m ²	$q_{sk} = 0,85 [1+(a_s/481)^2]$ kN/m ²
III	$q_{sk} = 0,60$ kN/m ²	$q_{sk} = 0,51 [1+(a_s/481)^2]$ kN/m ²



Zona di carico della neve [kN/m²]
■ 1 1,50
■ 2 1,00
■ 3 0,60

Zone di carico della neve

I - Alpina: Aosta, Belluno, Bergamo, Biella, Bolzano, Brescia, Como, Cuneo, Lecco, Pordenone, Sondrio, Torino, Trento, Udine, Verbano-Cusio-Ossola, Vercelli, Vicenza

I - Mediterranea: Alessandria, Ancona, Asti, Bologna, Cremona, Forlì-Cesena, Lodi, Milano, Modena, Monza Brianza, Novara, Parma, Pavia, Pesaro e Urbino, Piacenza, Ravenna, Reggio Emilia, Rimini, Treviso, Varese

II: Arezzo, Ascoli Piceno, Avellino, Bari, Barletta-Andria-Trani, Benevento, Campobasso, Chieti, Fermo, Ferrara, Firenze, Foggia, Frosinone, Genova, Gorizia, Imperia, Isernia, L'Aquila, La Spezia, Lucca, Macerata, Mantova, Massa Carrara, Padova, Perugia, Pescara, Pistoia, Prato, Rieti, Rovigo, Savona, Teramo, Trieste, Venezia, Verona

III: Agrigento, Brindisi, Cagliari, Caltanissetta, Carbonia-Iglesias, Caserta, Catania, Catanzaro, Cosenza, Crotone, Enna, Grosseto, Latina, Lecce, Livorno, Matera, Medio Campidano, Messina, Napoli, Nuoro, Olbia-Tempio, Oristano, Palermo, Pisa, Potenza, Ragusa, Reggio Calabria, Roma, Salerno, Sassari, Siena, Siracusa, Taranto, Terni, Trapani, Vibo Valentia, Viterbo

Mapa delle zone di carico della neve
 [cfr. Fig. 3.4.1 D.M. 2018].

Tabella 2 - Valori di riferimento del carico della neve al suolo, q_{sk} (cfr. §3.4.2 D.M. 2018)

μ_i è il coefficiente di forma della copertura, funzione dell'inclinazione della falda (α) e della sua morfologia (vedi tabelle seguenti)

Coefficiente di forma	$0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$	$30^\circ < \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0,8	$0,8 \cdot (60 - \alpha) / 30$	0,0
μ_2	$0,8 + 0,8 \cdot \alpha / 30$	1,6	-

Tabella 3 - Valori dei coefficienti di forma per falde piane (cfr. Tab. 3.4.II D.M. 2018 e Tab. C3.4.I Circolare 2019 n. 7)

Angolo di tangenza delle coperture cilindriche, β	Coefficiente di forma, μ_3
per $\beta > 60^\circ$	$\mu_3 = 0$
per $\beta \leq 60^\circ$	$\mu_3 = 0.2 + 10 h / b \leq 2.0$

Tabella 4 - Valori dei coefficienti di forma per coperture cilindriche (cfr. §C3.4.3.3.1 Circolare 2019 n. 7)

C_E è il coefficiente di esposizione, funzione della topografia del sito (si veda la seguente tabella)

Topografia	Descrizione	C_E
Battuta dai venti	Aree pianeggianti non ostruite esposte su tutti i lati, senza costruzioni o alberi più alti	0,9
Normale	Aree in cui non è presente una significativa rimozione di neve sulla costruzione prodotta dal vento, a causa del terreno, altre costruzioni o alberi	1,0
Riparata	Aree in cui la costruzione considerata è sensibilmente più bassa del circostante terreno o circondata da costruzioni o alberi più alti	1,1

Tabella 5 - Valori di C_E per diverse classi di esposizione (cfr. Tab. 3.4.I D.M. 2018)

C_t è il coefficiente termico, cautelativamente posto pari ad 1 (cfr. §3.4.4 D.M. 2018).

Poiché anche il carico neve è funzione dell'inclinazione della superficie su cui si deposita, ovvero dell'inclinazione dei pannelli fotovoltaici, avremo le seguenti due situazioni limite:

- Per $\alpha = 0^\circ$ avremo: $q_s = \mathbf{0.43 \text{ kN/m}^2}$
- Per $\alpha = 55^\circ$ avremo: $q_s = \mathbf{0.07 \text{ kN/m}^2}$

7.5 Azione sismica

Ai fini della pericolosità sismica sono stati analizzati i dati relativi alla sismicità dell'area di interesse e ad eventuali effetti di amplificazione stratigrafica e topografica. Si sono tenute in considerazione anche la classe delle opere e la vita nominale, in particolare è stata considerata una **Vita Nominale** pari a **50** e per **Classe d'Uso** pari a **2**. Per tale caratterizzazione si riportano di seguito i dati di pericolosità come da normativa:

SLATO LIMITE	T_R [anni]	a_g [g]	F_o [-]	T_C^* [s]
SLO	30	0,034	2,568	0,232
SLD	50	0,041	2,595	0,263
SLV	475	0,076	2,807	0,328
SLC	975	0,090	2,880	0,347

Tabella 6 – Pericolosità sismica

8 DEFINIZIONE DELLE COMBINAZIONI

Le azioni sulla costruzione sono state combinate secondo le regole previste dalla normativa vigente. Le combinazioni previste sono destinate al controllo di sicurezza della struttura ed alla verifica degli spostamenti e delle sollecitazioni.

Ai fini delle verifiche degli stati limite si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni:

Combinazione fondamentale SLU

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Combinazione caratteristica (rara) SLE

$$G_{1k} + G_{2k} + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Combinazione frequente SLE

$$G_{1k} + G_{2k} + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Combinazione quasi permanente SLE

$$G_{1k} + G_{2k} + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E

$$E + G_{1k} + G_{2k} + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

Le verifiche strutturali e geotecniche sono state effettuate in conformità agli approcci previsti dal D.M.2018 applicando gli opportuni coefficienti richiesti dalle specifiche verifiche.

9 MODELLO DI CALCOLO

Le verifiche strutturali preliminari sono state condotte utilizzando un modello di calcolo composto da elementi beam, simulanti il comportamento delle membrature componenti.

Nel dettaglio, il modello di calcolo impiegato prevede dei vincoli di incastro alla base delle colonne verticali, i correnti orizzontali collegati alla testa delle colonne verticali, sono state muniti, alle estremità degli stessi di vincolo a cerniera, mentre gli arcarecci si sono considerati incastrati al corrente orizzontale.

Il modello della struttura viene creato automaticamente dal codice di calcolo, individuando i vari elementi strutturali e fornendo le loro caratteristiche geometriche e meccaniche.

Si precisa che per ogni tracker si sono impiegati due modelli di calcolo strutturale. Uno che schematizza l'angolo di inclinazione dei pannelli fotovoltaici $\alpha=0^\circ$ (pannello orizzontale), e uno che schematizza l'angolo di inclinazione $\alpha=55^\circ$ (inclinazione massima).

10 METODO DI ANALISI

Nel modello in esame è stata condotta un'analisi dinamica lineare tenendo conto delle azioni gravitazionali che sono state applicate al modello geometrico mediante forze concentrate e distribuite.

11 PROGETTO E VERIFICA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI

La verifica degli elementi allo SLU – SLV avviene col seguente procedimento:

- si costruiscono le combinazioni non sismiche in base al D.M. 2018, ottenendo un insieme di sollecitazioni;
- si costruiscono le combinazioni sismiche in base al D.M. 2018 secondo quanto indicato nel §2.5.3, relazione (2.5.5) del D.M. 2018, ottenendo un ulteriore insieme di sollecitazioni;
- per sollecitazioni semplici (flessione retta, taglio, etc.) si individuano i valori minimo e massimo, tra tutte le combinazioni, con cui progettare o verificare l'elemento considerato; per sollecitazioni composte (pressoflessione retta/deviata) vengono eseguite le verifiche per

tutte le possibili combinazioni e solo a seguito di ciò si individua quella che ha originato il minimo coefficiente di sicurezza.

11.1 Verifiche strutturali elementi in acciaio

La progettazione delle membrature è avvenuta in modo da soddisfare le verifiche richieste per gli SLU e per gli SLE mediante l'ausilio del codice di calcolo. Le verifiche condotte sulle sezioni sono sotto riportate:

Verifiche SLU

- Flessione: in accordo con § 4.2.4.1.2 del D.M. 17/01/2018;
- Taglio: in accordo con § 4.2.4.1.2 del D.M. 17/01/2018;
- Instabilità: in accordo con § 4.2.4.1.2 del D.M. 17/01/2018;

Di seguito una rappresentazione grafica dei risultati maggiormente significativi. I coefficienti di sicurezza sono espressi in termini di rapporto domanda/capacità, pertanto la verifica è soddisfatta se si verifica la condizione $CS < 1$.

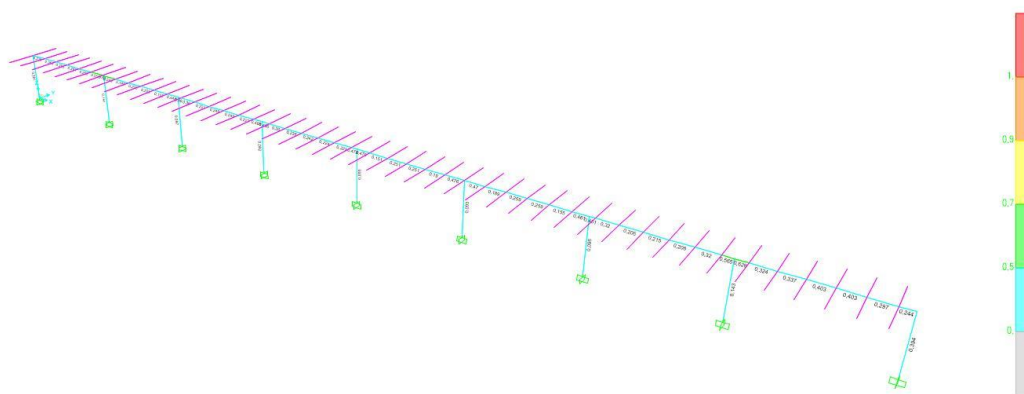


Figura 2 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità configurazione 0°

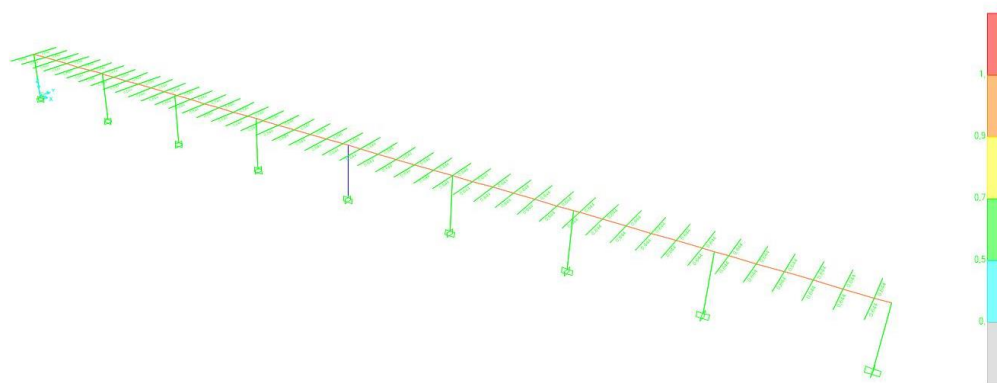


Figura 3 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità (elementi cold formed) configurazione 0°

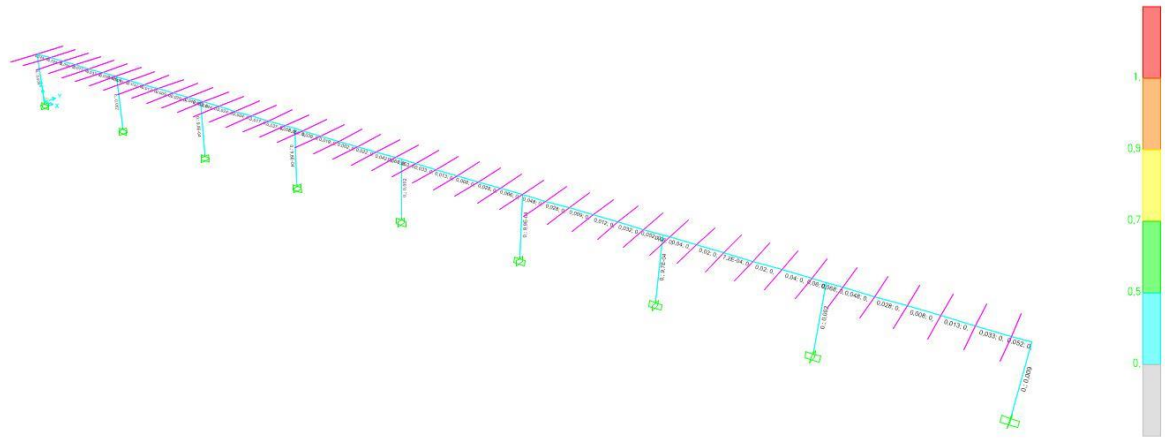


Figura 4 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio configurazione 0°

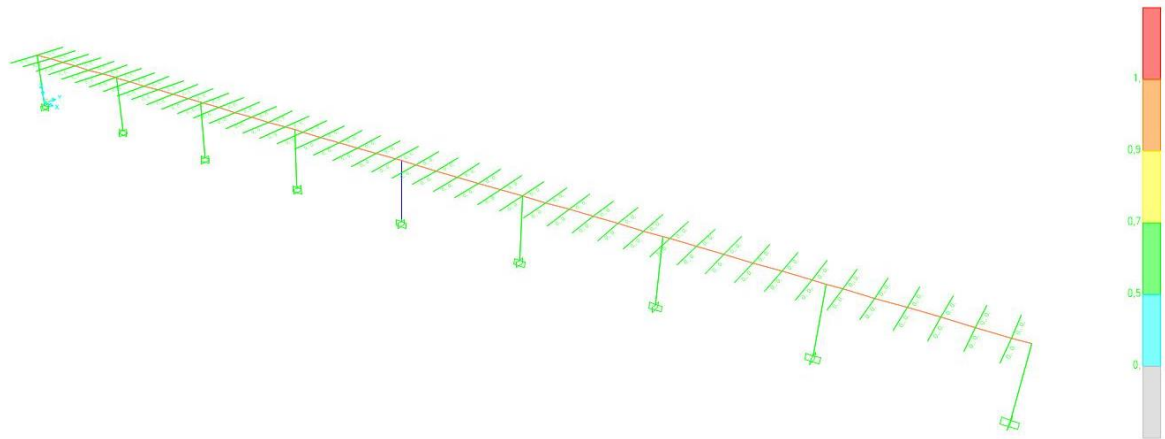


Figura 5 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio (elementi cold formed) configurazione 0°

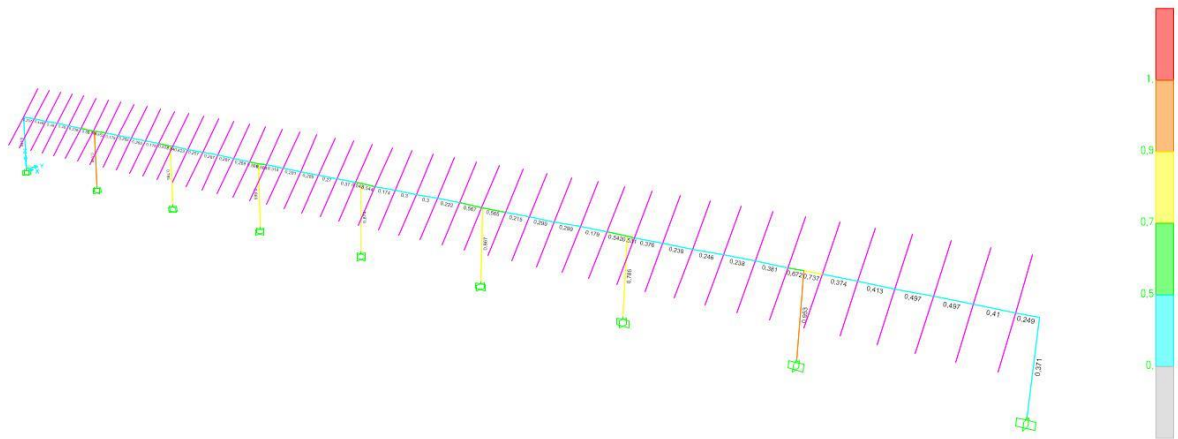


Figura 6 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità configurazione 0°

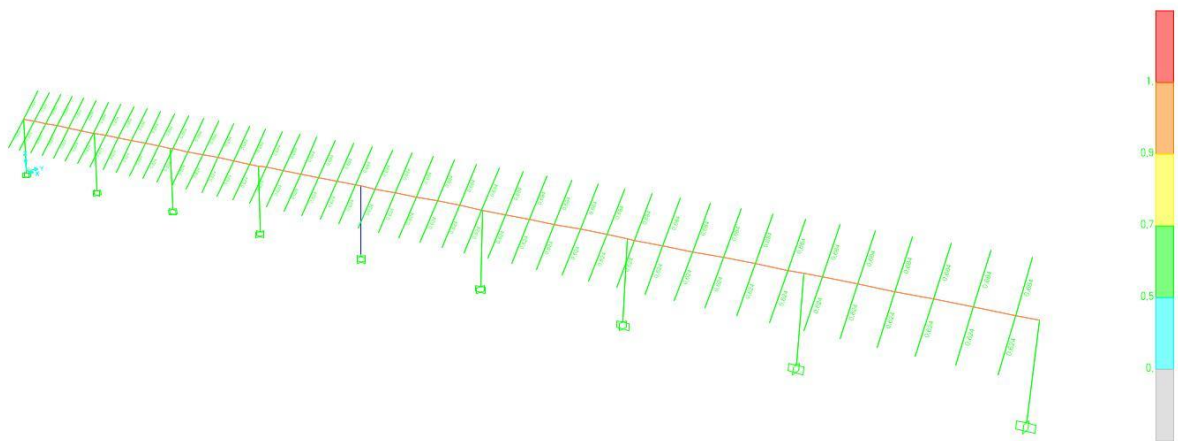


Figura 7 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità (elementi cold formed) configurazione 0°

12 CALCOLO DELLA FONDAZIONE

Per quanto concerne il sistema terreno-fondazione, l'opera in esame prevede che le strutture metalliche verticali siano infisse nel terreno, pertanto, le verifiche sono condotte in accordo a quanto specificato dal § 6.4.3.1 del D.M. 17/01/2018 per gli SLU per le fondazioni profonde. Al fine di poter utilizzare le classiche formule statiche per i pali infissi, la sezione dei profili impiegati per le colonne verticali viene ricondotta ad un palo equivalente il cui perimetro della sezione è uguale al perimetro della sezione della colonna verticale.

Dai risultati dell'analisi si ottengono i seguenti risultati per verifiche a carichi verticali e trasversali:

N [kN]	Pd [kN]	FS_v	T [kN]	Td [kN]	FS_o
24,22	37,12	1.533 (1)	20,71	21,79	1.052 (1)

Simbologia adottata

Pd Portanza di progetto, espresso in [kN]

FS_v Fattore di sicurezza (Pd/N). Tra parentesi l'indice della combinazione con fattore di sicurezza minimo.

T Carico orizzontale agente alla testa del palo, espresso in [kN]

Td Portanza trasversale di progetto, espresso in [kN]

FS_o Fattore di sicurezza (Vd/V). Tra parentesi l'indice della combinazione con fattore di sicurezza minimo.

La profondità di infissione che soddisfa le verifiche è pari a **250 cm**.

In fase di progettazione esecutiva, la lunghezza di infissione delle colonne verticali, potrà essere ottimizzata prescrivendo delle prove di carico su pali pilota. Qualora la profondità di infissione desunta anche dalle prove fosse "significativa" si valuterà l'adozione di un altro tipo di fondazione.

13 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'opera sopra descritta è conforme ai requisiti prestazionali richiesti dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. del 17/01/2018.