

Regione Basilicata



Comune di Rapolla



Comune di Venosa



PROGETTO DEFINITIVO

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN CLUSTER DI N. 2 IMPIANTI AGRIVOLTAICI DENOMINATI "RAPOLLA" E "VENOSA" DELLA POTENZA COMPLESSIVA DI PICCO PARI A 29.353,68 kWp DA REALIZZARSI IN AGRO DI RAPOLLA E VENOSA (PZ) E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE UBICATE ANCHE NEL COMUNE DI MELFI (PZ)

TITOLO

Calcoli preliminari dimensionamento strutture

PROGETTAZIONE

 **STUDIO
RINNOVABILI**

SR International S.r.l.
Via di Monserrato 152 - 00186 Roma
Tel. 06 8079555 - Fax 06 80693106
C.F e P.IVA 13457211004



Ing. Andrea Bartolazzi

PROPONENTE

ATON 36

ATON 36 S.r.l.
Via Ezio Maccani, 54 - 38121 Trento
aton36.srl@pec.it
C.F e P.IVA 02729140224

Revisione	Data	Elaborato	Verificato	Approvato	Descrizione
00	26/03/2024	Ing. Cavuoto	Ing. Bartolazzi	ATON 36 S.r.l.	Calcoli preliminari dimensionamento strutture

Codice Elaborato

PSR-GRM-CPS

Scala

-

Formato

A4

INDICE

INDICE.....	1
INDICE DELLE FIGURE	1
INDICE DELLE TABELLE.....	2
1 PREMESSA.....	3
2 LOCALIZZAZIONE DEGLI IMPIANTI	4
3 DESCRIZIONE GENERALE DELLE OPERE	5
4 NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
5 MATERIALI IMPIEGATI	7
6 INQUADRAMENTO GEOLOGICO	7
7 AZIONI SULLA STRUTTURA.....	8
7.1 Carichi permanenti strutturali.....	8
7.2 Carichi permanenti non strutturali	8
7.3 Azione del vento.....	8
7.4 Azione della neve	9
7.5 Azione sismica	11
8 DEFINIZIONE DELLE COMBINAZIONI	11
9 MODELLO DI CALCOLO.....	12
10 METODO DI ANALISI.....	12
11 PROGETTO E VERIFICA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI	13
11.1 Verifiche strutturali elementi in acciaio	13
Verifiche SLU	13
Verifiche SLE.....	17
12 VALUTAZIONE DEL SISTEMA DI FONDAZIONE	18
13 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	18

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Stralcio su ortofoto degli impianti	4
Figura 2 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità configurazione 0°	13
Figura 3 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità (elementi cold formed) configurazione 0°	14
Figura 4 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio configurazione 0°	14
Figura 5 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio (elementi cold formed) configurazione 0°	15
Figura 6 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità configurazione 55°	15
Figura 7 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità (elementi cold formed) configurazione 55°	16
Figura 8 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio configurazione 55°	16
Figura 9 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio (elementi cold formed) configurazione 55°	17

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - calcolo pressione del vento strutture	9
Tabella 2 - Valori di riferimento del carico della neve al suolo, qsk (cfr. §3.4.2 D.M. 2018) ...	10
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)	10
Tabella 4 - Valori dei coefficienti di forma per coperture cilindriche (cfr. §C3.4.3.3.1 Circolare 2019 n. 7)	10
Tabella 5 - Valori di CE per diverse classi di esposizione (cfr. Tab. 3.4.I D.M. 2018).....	10
Tabella 6 - Pericolosità sismica	11
Tabella 7 - verifica carico limite verticale	18
Tabella 8 - verifica carico limite orizzontale.....	18

1 PREMESSA

Il presente progetto ha come obiettivo la realizzazione di n.2 impianti per la produzione di energia da fonte rinnovabile (Sole) tramite l'impiego di tecnologia fotovoltaica integrata con la produzione agricola. 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.

Il progetto prevede la produzione di energia elettrica "green" ovvero senza emissioni di sostanze inquinanti, allineandosi con le politiche comunitarie e nazionali, coniugando la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile con la tutela dell'attività agricola, nonché con elevati standard di sostenibilità agronomica, ambientale, naturalistica. Quindi consente di azzerare la combustione fossile, permettendo così una soluzione minimamente impattante sull'uomo e sull'ambiente circostante.

Il Soggetto Responsabile della realizzazione degli impianti agrivoltaici di Rapolla e Venosa (PZ) e della progettazione delle opere di connessione alla RTN nel comune di Melfi (PZ), è la Società ATON 36 S.r.l., con Via Ezio Maccani, 54 - 38121 Trento - C.F. e P.IVA 02729140224.

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 energie rinnovabili e prevede la totale cessione dell'energia, secondo le vigenti norme, alla rete della società Terna S.p.A., proprietaria della Rete elettrica di Trasmissione Nazionale.

2 LOCALIZZAZIONE DEGLI IMPIANTI

Il cluster composto dai 2 impianti agrivoltaici, denominati "Rapolla" e "Venosa", di potenza di picco pari a 29.353,68 kWp, sono ubicati in Provincia di Potenza, rispettivamente nel Comune di Rapolla e Venosa.

L'area è prossima all'invaso del Rendina (circa 1,4 km) ed è localizzata in un'area posta ad una distanza compresa tra i 6 e 8 km dai centri abitati di Lavello, Venosa, Rionero in Vulture, Rapolla e Melfi. Il sito dista circa 10 km in direzione sud, dal confine con la regione Puglia e la provincia di Foggia.

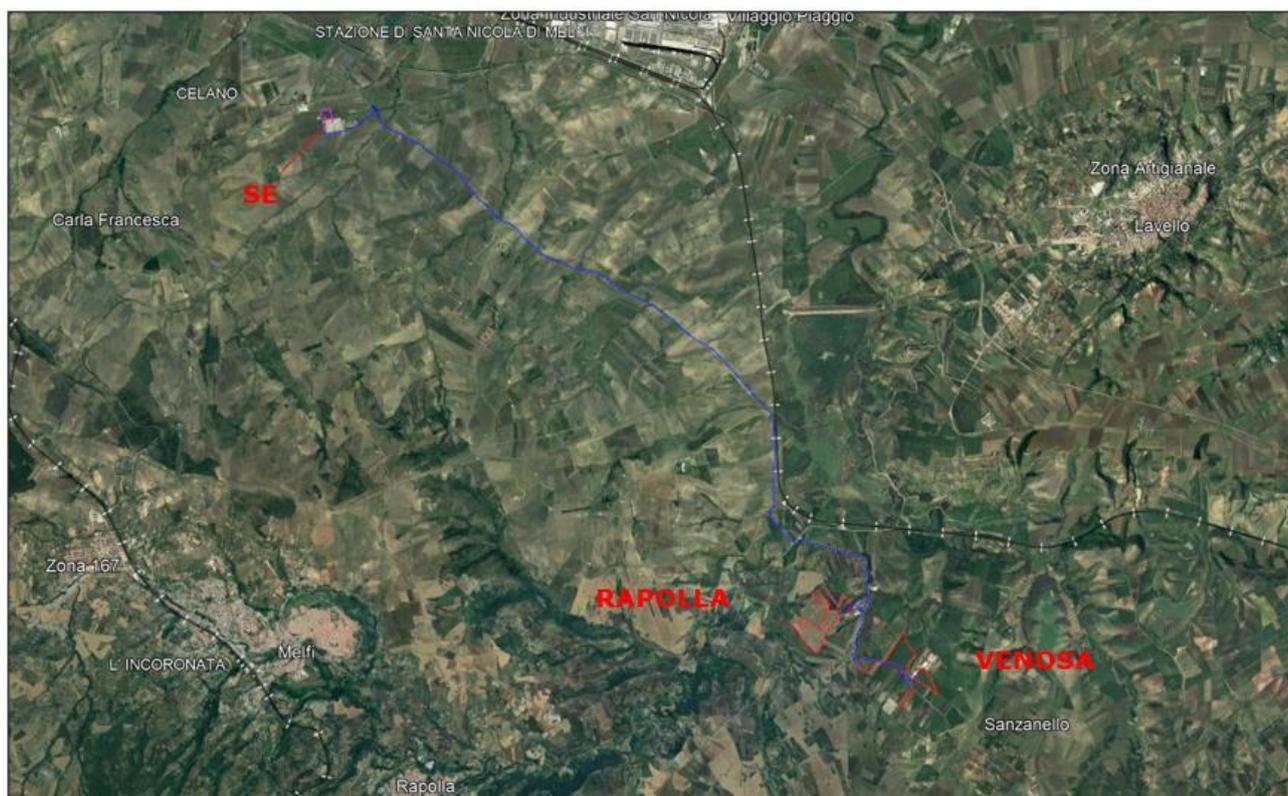


Figura 1 – Stralcio su ortofoto degli impianti

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'impianto agrivoltaico sarà realizzato sia su strutture metalliche ad inseguitori solari monoassiali, con sistema back-tracking, del tipo "1-in-portrait", aventi un pitch di circa 5 m. Le strutture tracker saranno in stringhe da 24 moduli.

Per i tracker 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 IPE220, alle quali sono incernierate dei correnti di sezione scatolare 140x140x3 mm e su quest'ultimi si vincolano le aste porta pannelli di sezione omega 100x30x30x1.5.

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: S355 / S355 (profilati a freddo) / S550 (profilati a freddo)
- Tensione caratteristica di snervamento: 355 MPa / 350 MPa (profilati a freddo) / 550 MPa (profilati a freddo)
- Tensione caratteristica di rottura: 510 MPa / 430 MPa (profilati a freddo) / 600 MPa (profilati a freddo)
- 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 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Come specificato nella relazione geologica, Al fine di ricostruire l'assetto litostratigrafico dell'area oggetto di studio e di pervenire ad una sua caratterizzazione geologica, si è proceduto:

- al rilevamento geologico di campagna di dettaglio;
- all'analisi di dati in possesso dello scrivente;
- all'analisi di dati e informazioni desunte da letteratura tecnica;
- all'esecuzione di un piano di investigazione costituito da
- indagini indirette:
 - n.5 profili sismici a rifrazione con ricostruzione tomografica;
 - n.3 profili sismici con metodologia MASW per caratterizzazione sismica con individuazione delle $V_{s,eq}$.

Lo studio ha evidenziato che la successione stratigrafica dei terreni in sito può essere ricostruita nel seguente modo:

- 0,00 m ÷ 1,55 m terreno vegetale e/o parte superiore dei depositi fluvio-lacustri;
- 1,55 m ÷ prof. non indagata depositi sabbioso-ghiaiosi più o meno cementati (tufiti).

Vengono altresì riportati i seguenti valori delle proprietà geomeccaniche dei terreni:

Strato	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	ϕ (°)	C (kg/cmq)	γ (gr/cm ³)	E Din. (Kg/cmq)	η
1	400-500	-	-	-	-	-	-
2	950-1100	260	30	0.12	1.82	2725	0.42
3	1150-1200	320	31	0.05	1.93	3400	0.48

In fase di progettazione esecutiva, a valle di ulteriori indagini per la caratterizzazione geotecnica, sarà possibile una definizione di dettaglio delle opere di fondazione.

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 **312 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):

$v_r = v_b \cdot C_r$, 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_s : 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:

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

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

(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.

Località	Venosa - Basilicata						
altitudine sito (m)	345						
STOW POSITION							
zona	$v_{b,0}$ (m/s)	a_0 (m)	k_s	c_a	V_b (m/s)		
3	27	500	0,37	1,00	27,0		
	rugosità	esposizione	k_r	z_0 (m)	z_{\min} (m)		
	D	II	0,19	0,05	4		
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)		
3	16	500	0,37	1	16,0		
	rugosità	esposizione	k_r	z_0 (m)	z_{\min} (m)		
	D	II	0,19	0,05	4		
VELOCITA' RIFERIMENTO	Tr (anni)	c_r	V_r (m/s)		q_r (N/m ²)		
	50	1	16,0		160,23		
opera	h costruzione (m)	angolo (°)	γ_{EF}	C_e	$C_p=C_f$	C_d	p (N/m ²)
pannelli fotovoltaico	2,23	0	0,8	1,80	0,2	1	131
	2,23		0,8	1,80	-0,5	1	-329
pannelli fotovoltaico	3,19	55	-	1,80	1,8	1	519
	3,19		-	1,80	-1,8	1	-519

Tabella 1 - calcolo pressione del vento strutture

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]:

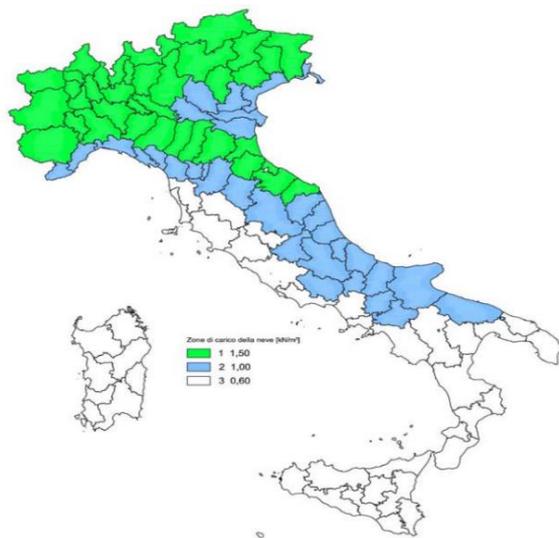
$$q_s = q_{sk} \cdot \mu_i \cdot C_e \cdot C_t$$

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	$q_{sk} = 1,50 \text{ kN/m}^2$	$q_{sk} = 1,35 [1+(as/602)^2] \text{ kN/m}^2$
II	$q_{sk} = 1,00 \text{ kN/m}^2$	$q_{sk} = 0,85 [1+(as/481)^2] \text{ kN/m}^2$
III	$q_{sk} = 0,60 \text{ kN/m}^2$	$q_{sk} = 0,51 [1+(as/481)^2] \text{ kN/m}^2$



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

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, Ogliastra, Olbia-Tempio, Oristano, Palermo, Pisa, Potenza, Ragusa, Reggio Calabria, Roma, Salerno, Sassari, Siena, Siracusa, Taranto, Terni, Trapani, Vibo Valentia, Viterbo

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 $\alpha = 20^\circ$ avremo: $q_s = 0,62 \text{ kN/m}^2$
- Per $\alpha = 55^\circ$ avremo: $q_s = 0,10 \text{ kN/m}^2$

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	60	0,067	2,526	0,323
SLD	101	0,089	2,452	0,341
SLV	949	0,255	2,434	0,422
SLC	1950	0,352	2,377	0,436

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.

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).

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

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 $CS < 1$.

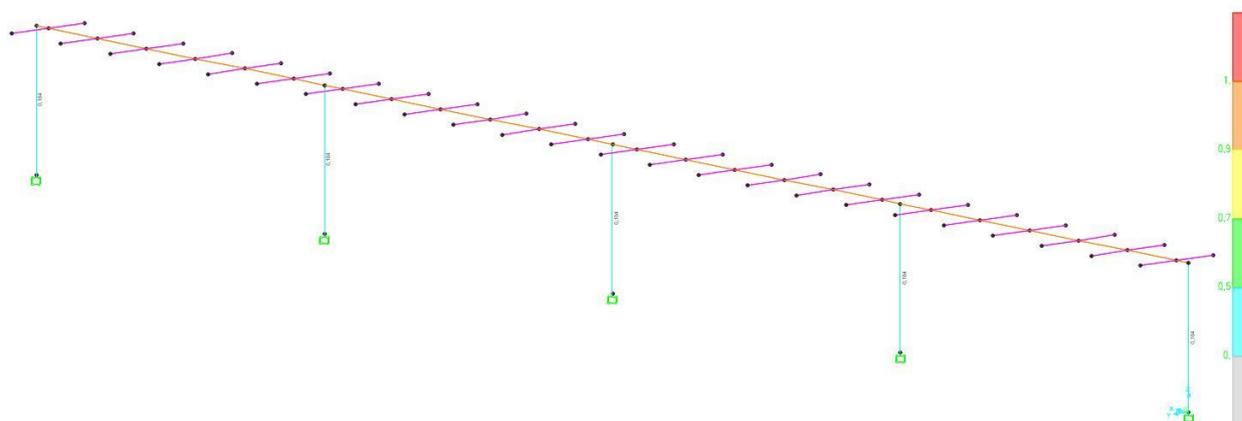


Figura 2 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità configurazione 0°

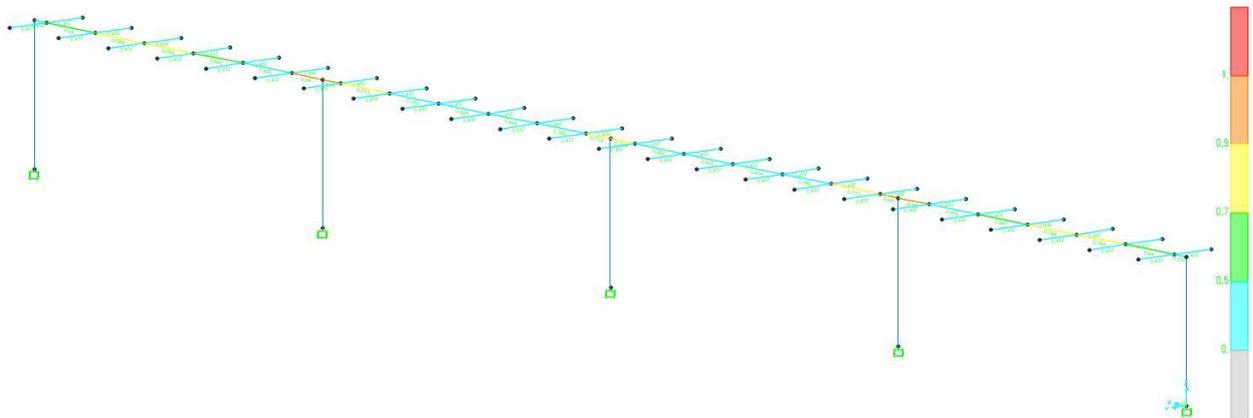


Figura 3 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità (elementi cold formed) configurazione 0°

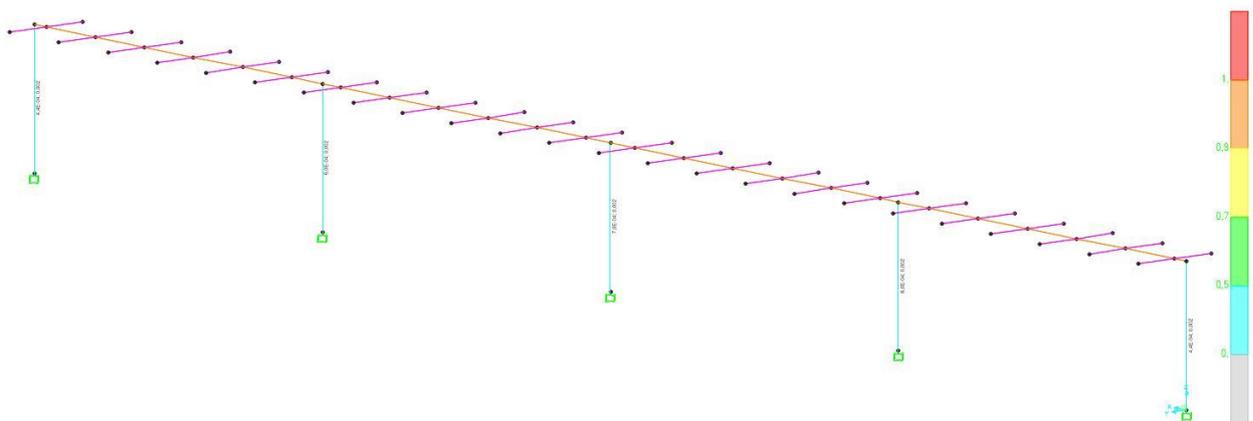


Figura 4 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio configurazione 0°

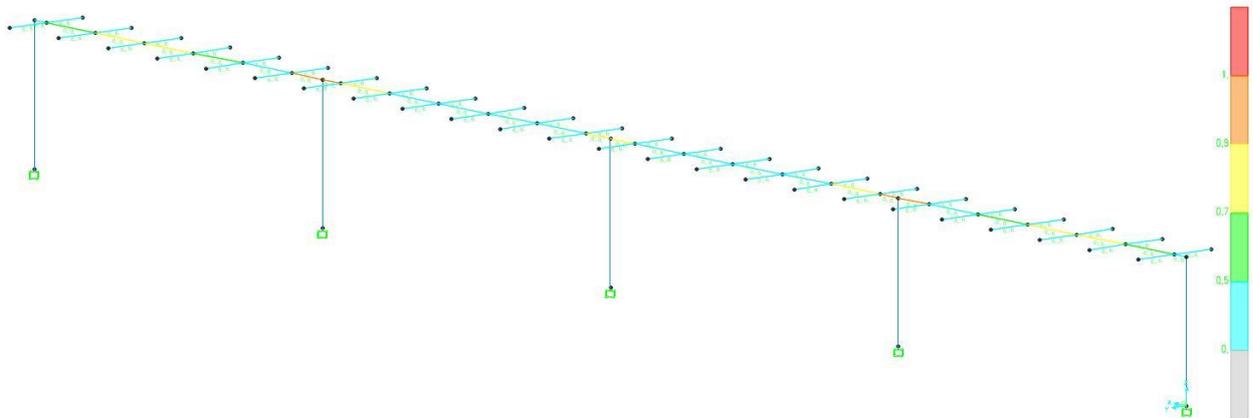


Figura 5 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio (elementi cold formed) configurazione 0°

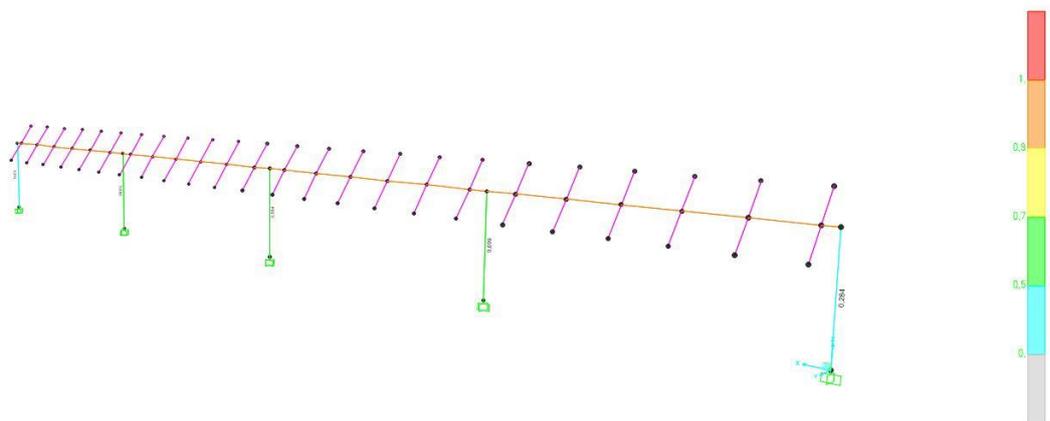


Figura 6 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità configurazione 55°

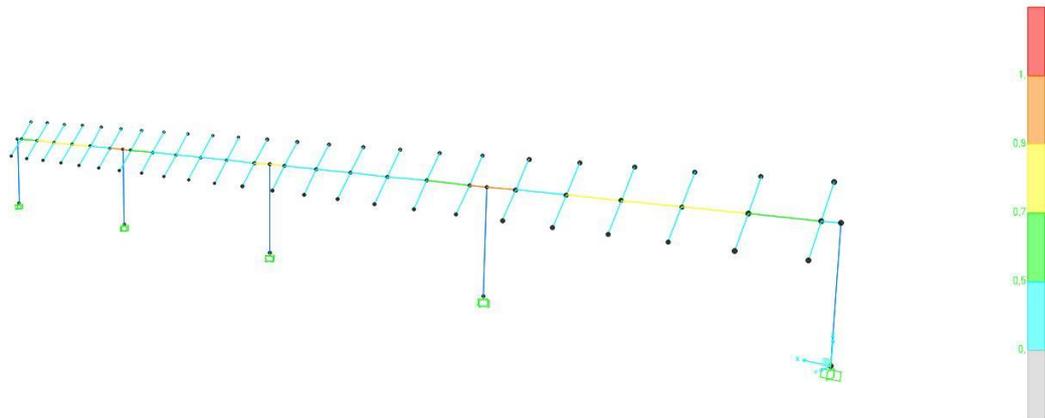


Figura 9 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio (elementi cold formed) configurazione 55°

Verifiche SLE

Gli spostamenti devono essere verificati per garantire la funzionalità dell'opera, pertanto è stata eseguita una verifica di deformabilità in accordo con §4.2.4.2 del D.M. 17/01/2018.

Per gli spostamenti verticali del corrente orizzontale delle strutture del fotovoltaico si assume un limite pari a $L/200$, ovvero:

$$\delta_{v,amm} = \frac{6900}{200} = 34,5 \text{ mm};$$

in base alle verifiche condotte risulta uno spostamento massimo di circa 32 mm, inferiore al limite normativo.

12 VALUTAZIONE DEL SISTEMA DI FONDAZIONE

Per quanto concerne il sistema terreno-fondazione, l'opera in esame prevede che le strutture metalliche verticali siano infisse nel terreno.

In considerazioni dei carichi agenti e alla caratterizzazione geotecnica fornita nella relazione geologica e richiamata nel paragrafo §6 della presente relazione, si è valutata una profondità di infissione media di **350 cm**. Di seguito i risultati sintetici delle verifiche condotte:

Tabella 7 - verifica carico limite verticale

$N_{d,comp}$ [kN]	$N_{d,traz}$ [kN]	$R_{d,tot}$ [kN]	$R_{lat,traz}$ [kN]	CS_{totale}	$CS_{trazione}$
48,57	-11,06	55,51	-21,4	1,14	1,94

Tabella 8 - verifica carico limite orizzontale

infissione [m]	K_p	H_u [kN]	F_d [kN]	F_e [kN]	CS
3,0	2,0	37,49	23,84	21,93	1,09

In fase di progettazione esecutiva, a valle delle indagini per la caratterizzazione geotecnica, sarà possibile una definizione puntuale delle opere di fondazione.

Inoltre, si specifica che la lunghezza di infissione delle colonne verticali, potrà essere ottimizzata mediante 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.