



REGIONE LAZIO

Comune di Paliano



PROGETTO DEFINITIVO

PROGETTO DEFINITIVO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO AGRIVOLTAICO A TERRA DELLA POTENZA DI PICCO PARI A 37.807,2 kWp INTEGRATO CON UN SISTEMA DI ACCUMULO DELLA POTENZA DI 12.000 kW E POTENZA IN IMMISSIONE PARI A 48.000 kW UBICATO NEL COMUNE DI PALIANO (FR) E DELLE OPERE CONNESSE NEL COMUNE DI ANAGNI (FR)

TITOLO

Calcoli preliminari sulle strutture

PROGETTAZIONE

PROPONENTE

 **STUDIO
RINNOVABILI**

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



ATON 27 S.r.l.

ATON 27 S.r.l.
VIA EZIO MACCANI 54 - 38121 Trento (TN)
C.F e P.IVA 02708670225
PEC: aton27.srl@pec.it

Revisione	Data	Elaborato	Verificato	Approvato	Descrizione
00	15/06/2023	Ing. Cavuoto	Ing. Bartolazzi	Ing. Bartolazzi	Calcoli preliminari strutture

Codice Elaborato

TCN-PLN-CPS

Scala

-

Formato

A4

INDICE

INDICE	1
INDICE DELLE FIGURE	1
INDICE DELLE TABELLE	2
1 PREMESSA	3
2 LOCALIZZAZIONE AGRIVOLTAICO	4
3 DESCRIZIONE GENERALE DELLE OPERE	5
4 NORMATIVA DI RIFERIMENTO	5
5 MATERIALI IMPIEGATI	6
6 INQUADRAMENTO GEOLOGICO	6
7 AZIONI SULLA STRUTTURA.....	6
7.1 Carichi permanenti strutturali.....	7
7.2 Carichi permanenti non strutturali.....	7
7.3 Azione del vento.....	7
7.4 Azione della neve	8
7.5 Azione sismica	10
8 DEFINIZIONE DELLE COMBINAZIONI	10
9 MODELLO DI CALCOLO.....	11
10 METODO DI ANALISI	11
11 PROGETTO E VERIFICA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI.....	11
11.1 Verifiche strutturali elementi in acciaio	11
Verifiche SLU	11
Verifiche SLE	16
12 VALUTAZIONE DEL SISTEMA DI FONDAZIONE	16
13 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	16

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 – Stralcio su ortofoto dell’area d’ impianto con indicazione della connessione alla SST della RTN a 150 kV	4
Figura 2 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità configurazione 0°	12
Figura 3 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità (elementi cold formed) configurazione 0°	12
Figura 4 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio configurazione 0°	13
Figura 5 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio (elementi cold formed) configurazione 0°	13
Figura 6 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità configurazione 55°	14

Figura 7 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità (elementi cold formed) configurazione 55°14

Figura 8 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio configurazione 55°15

Figura 9 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio (elementi cold formed) configurazione 55°15

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 - calcolo pressione del vento 8

Tabella 2 - Valori di riferimento del carico della neve al suolo, qsk (cfr. §3.4.2 D.M. 2018)..... 9

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) 9

Tabella 4 - Valori dei coefficienti di forma per coperture cilindriche (cfr. §C3.4.3.3.1 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 6 – Pericolosità sismica10

	Calcoli Preliminari Dimensionamento Strutture	<i>ATON 27 S.r.l.</i>
---	--	-----------------------

1 PREMESSA

Il presente progetto ha come obiettivo di realizzare un impianto agrivoltaico, che combini la produzione di energia elettrica al mantenimento della produzione agricola. La realizzazione dell'opera prevede l'utilizzo di moduli in silicio monocristallino installati a terra su strutture ad inseguitori solari. Inoltre, verrà installato un impianto per l'accumulo ed immissione in rete di energia elettrica, tramite un impianto di storage (BESS).

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 Soggetto Responsabile dell'impianto agrivoltaico di Paliano (FR) e della progettazione delle opere di connessione alla nuova SE della RTN, è la società ATON 27 S.r.l. che si occupa di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, con sede a Trento, in Via Ezio Maccani n.54, cap. 38121, C.F. e P.IVA 02708670225.

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 prevedendo la totale cessione dell'energia generata e/o accumulata, secondo le vigenti norme, alla rete elettrica in AT di proprietà della società Terna SpA.

2 LOCALIZZAZIONE AGRIVOLTAICO

Il sito, ove si prevede di realizzare l'impianto agrivoltaico denominato "Paliano", è localizzato nella regione Lazio, in provincia di Frosinone, all'interno del territorio comunale di Paliano. L'area prevista per la realizzazione dell'impianto agrivoltaico e del sistema di accumulo (in blu nella figura 1), e di tutte le opere necessarie alla connessione alla rete elettrica e delle infrastrutture per la produzione di energia elettrica, sono situate a circa 5 km in linea d'aria a Sud rispetto al Comune di Paliano (FR) e a circa 4 km ad Est del Comune di Colferro (RM). L'area inoltre dista circa 2 km dalla futura Stazione di trasformazione della RTN (in giallo) da realizzare nel comune di Anagni (FR). Nella stessa figura è visibile anche il cavidotto di collegamento che trasporta l'energia prodotta dall'impianto agrivoltaico ed accumulata dal BESS, verso la rete elettrica in AT (in ciano).

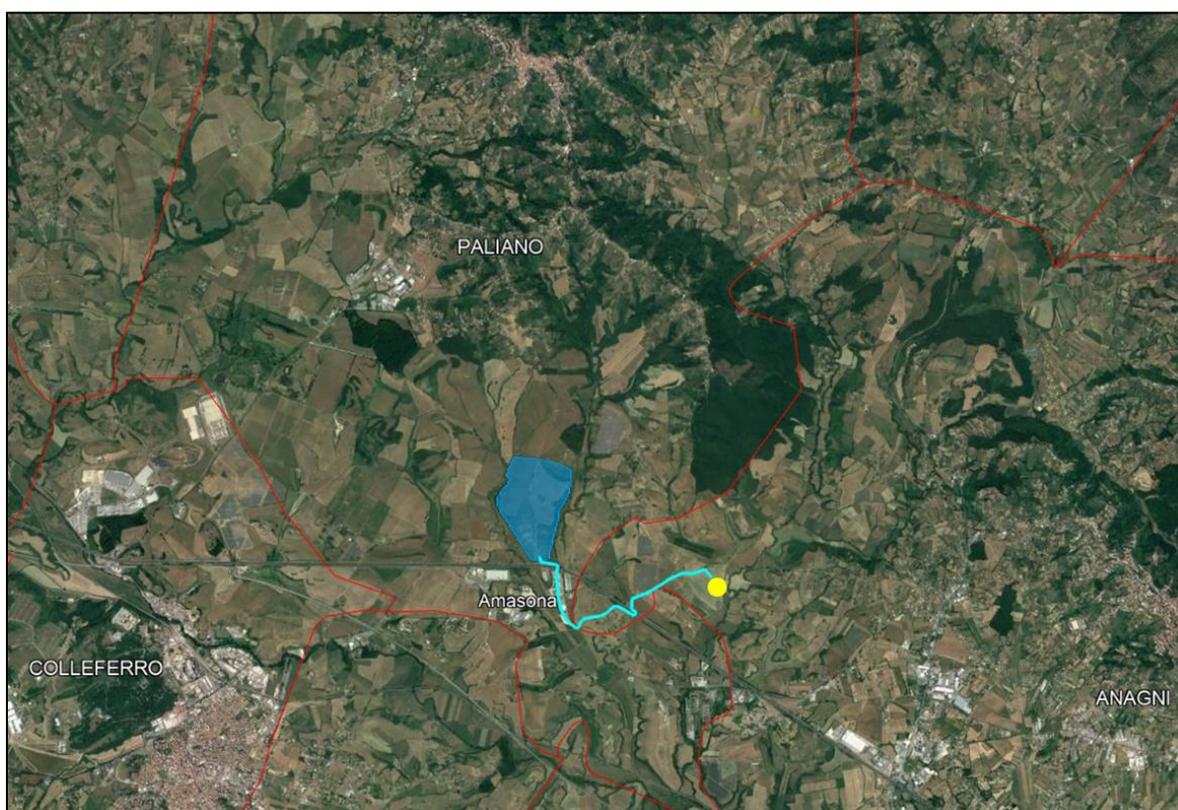


Figura 1 – Stralcio su ortofoto dell'area d'impianto con indicazione della connessione alla SST della RTN a 150 kV

Di seguito sono riportate le coordinate dell'area d'impianto e del BESS:

COORDINATE UTM WGS-84		
	Latitudine	Longitudine
Area Impianto Agrivoltaico	4624597.34	338341.94
Area BESS	4623769.53	338487.65

I dettagli relativi agli aspetti territoriali, ambientali e naturalistici connessi all'installazione dell'impianto in progetto saranno analizzati nelle rispettive tavole e relazioni di natura ambientale allegata al seguente progetto definitivo.

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 HE140 e IPE220, 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 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Come specificato nella relazione geologica, la geologia di superficie dell'area è caratterizzata da materiale vulcanico, in sommità evoluto a terreno vegetale, composto da materiali compatti e litoidi di colate piroclastiche alternato e coperto da materiale cineritico. Nella parte a valle è presente anche una lieve copertura di materiale alluvionale sciolta.

Da un punto di vista topografico in linea generale ed in prima approssimazione si può considerare una Categoria sismica T1 e Coefficiente di amplificazione topografica T1, con valore $S_T = 1$.

Si identifica infine, una falda freatica basale ad una profondità variabile compresa tra circa 10 m e 20 m dal piano campagna circolante nei materiali piroclastici e cineritici.

Come specificato nella relazione geologica, in fase di progettazione esecutiva, a valle delle indagini per la caratterizzazione geotecnica, sarà possibile una definizione puntuale 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_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	Paliano - Lazio						
altitudine sito (m)	235						
STOW POSITION							
zona	v_{b,0} (m/s)	a₀ (m)	k_s	c_a		V_b (m/s)	
3	27	500	0,37	1		27,0	
	rugosità	esposizione	k_r	z₀ (m)		z_{min} (m)	
	D	II	0,19	0,05		4	
VELOCITA' RIFERIMENTO	Tr (anni)	c_r		V_r (m/s)		q_r (N/m²)	
	50	1		27,0		456,29	
WORKING POSITION							
zona	v_{b,0} (m/s)	a₀ (m)	k_s	c_a		V_b (m/s)	
3	16	500	0,37	1		16,0	
	rugosità	esposizione	k_r	z₀ (m)		z_{min} (m)	
	D	II	0,19	0,05		4	
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_f	C_d	p (N/m²)
pannelli fotovoltaico	3,00	0	0,8	1,80	0,2	1	131
	3,00		0,8	1,80	-0,5	1	-329
pannelli fotovoltaico	3,00	55	-	1,80	1,8	1	519
	3,00		-	1,80	-1,8	1	-519

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 ≤ 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

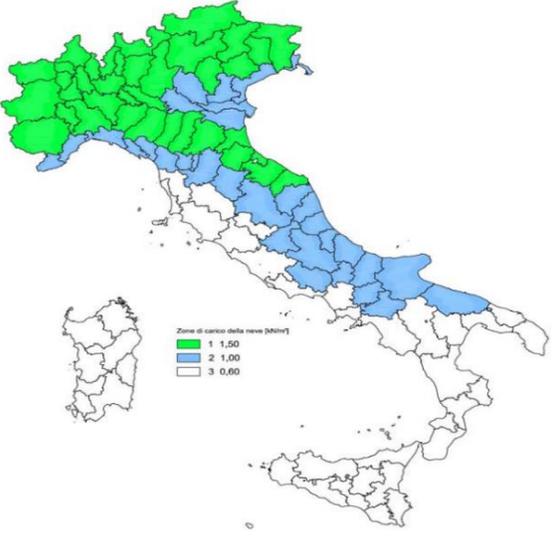
	<p><i>Zone di carico della neve</i></p> <p>I - Alpina: Aosta, Belluno, Bergamo, Biella, Bolzano, Brescia, Como, Cuneo, Lecco, Pordenone, Sondrio, Torino, Trento, Udine, Verbano-Cusio-Ossola, Vercelli, Vicenza</p> <p>I - Mediterranea: Alessandria, Ancona, Asti, Bologna, Cremona, Forlì-Cesena, Lodi, Milano, Modena, Monza Brianza, Novara, Parma, Pavia, Pesaro e Urbino, Piacenza, Ravenna, Reggio Emilia, Rimini, Treviso, Varese</p> <p>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</p> <p>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</p>
<p>Mappa delle zone di carico della neve [cfr. Fig. 3.4.1 D.M. 2018].</p>	

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: $q_s = \mathbf{0.45 \text{ kN/m}^2}$
- Per $\alpha = 55^\circ$ avremo: $q_s = \mathbf{0.08 \text{ kN/m}^2}$

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	0,053	2,476	0,262
SLD	50	0,065	2,482	0,277
SLV	475	0,150	2,471	0,318
SLC	975	0,187	2,504	0,326

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 $CS < 1$.

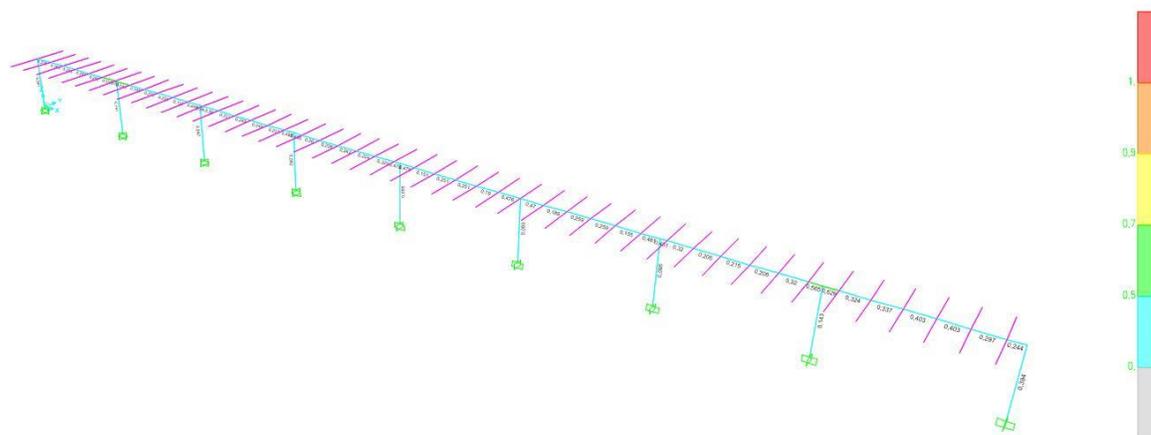


Figura 2 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità configurazione 0°

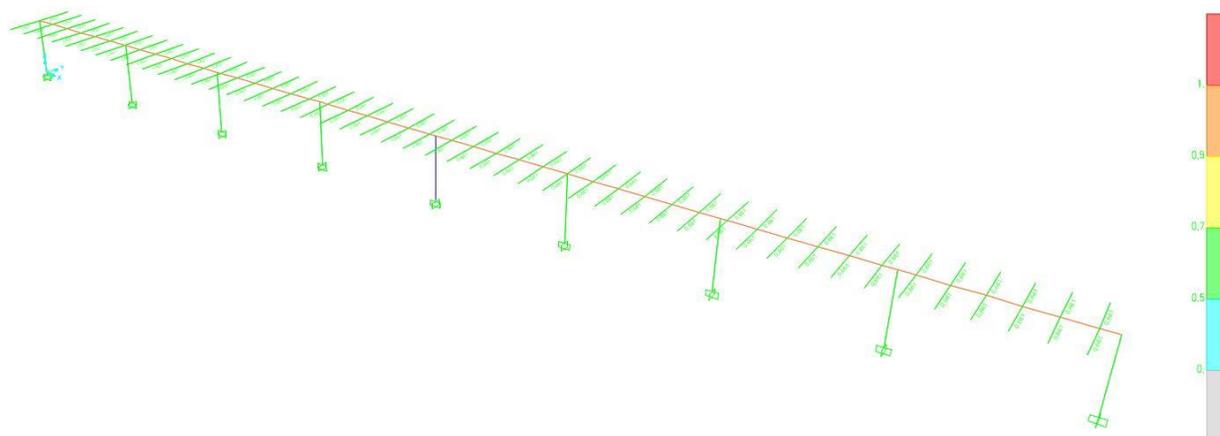


Figura 3 – coefficienti di sicurezza verifica di instabilità (elementi cold formed) configurazione 0°

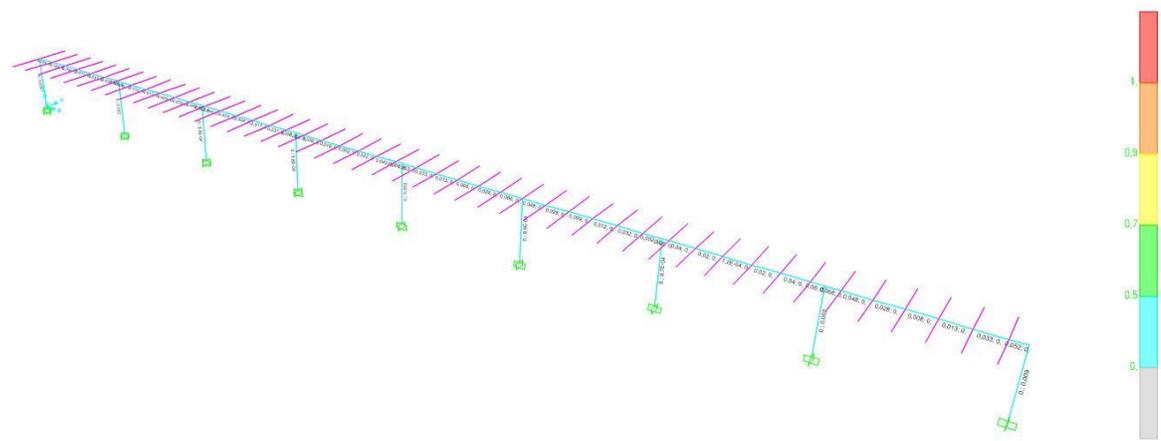


Figura 4 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio configurazione 0°

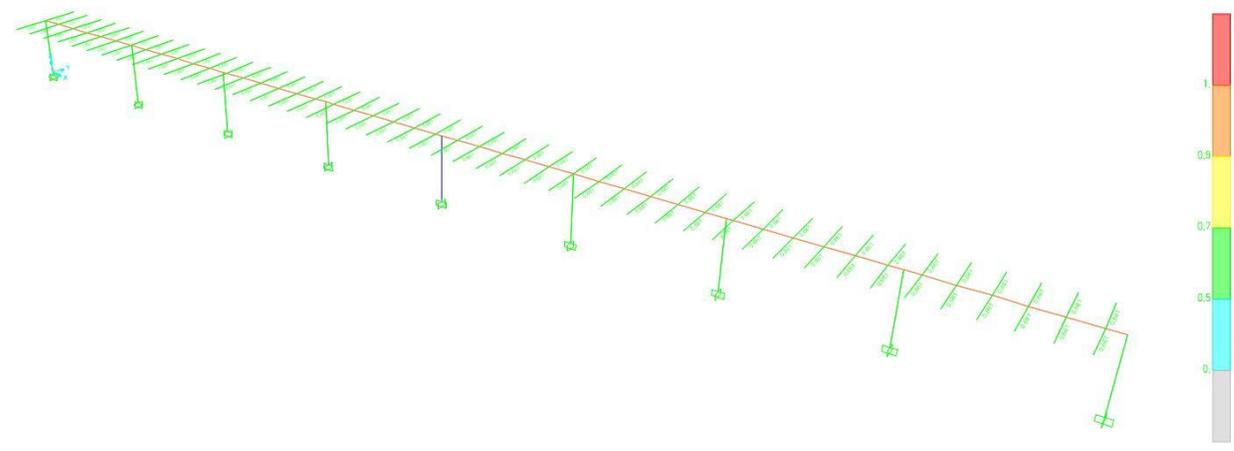


Figura 5 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio (elementi cold formed) configurazione 0°

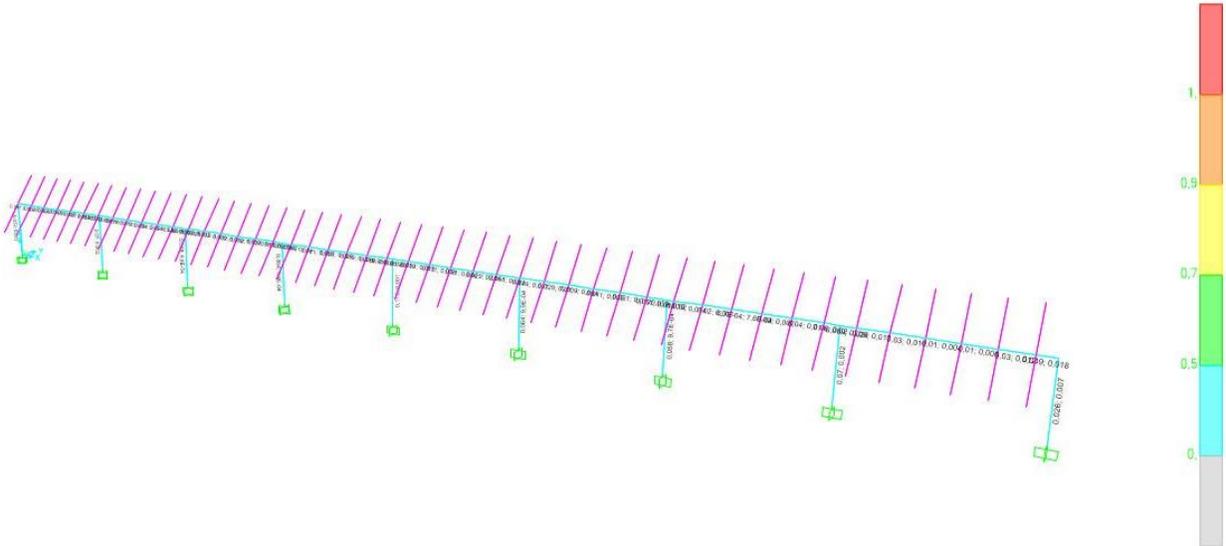


Figura 8 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio configurazione 55°

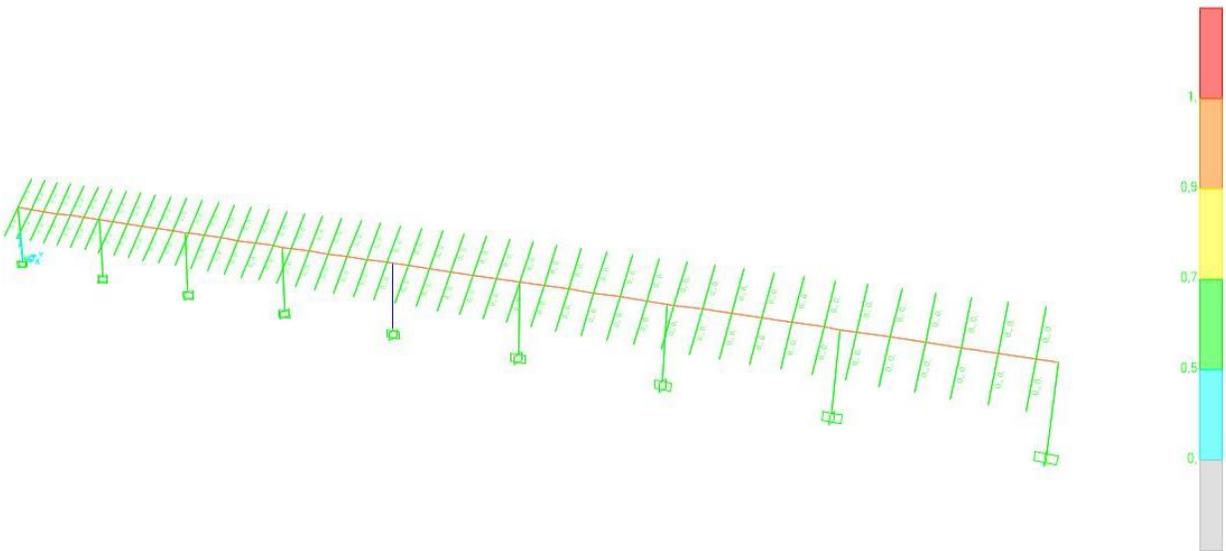


Figura 9 – coefficienti di sicurezza verifica a taglio (elementi cold formed) configurazione 55°

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:

$$\delta_{v,amm} = \frac{6900}{200} = 34.5mm;$$

in base alle verifiche condotte risulta uno spostamento massimo di 25.3, 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, si stima una profondità di infissione tra i **150 e i 250 cm** compatibili con la tipologia strutturale oggetto di progettazione.

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.