

COMUNI DI:
CASSANO ALLO IONIO
SPEZZANO ALBANESE

PROVINCIA: COSENZA
REGIONE: CALABRIA

"FATTORIA SOLARE SAN BIAGIO"
AGRIVOLTAICO DI TIPO ELEVATO E AVANZATO

PROGETTO DEFINITIVO

RELAZIONE PRELIMINARE DI CALCOLO STRUTTURALE

Tipo Elaborato	Codice Elaborato	Data	Scala CAD	Formato	Foglio / di	Scala
REL.	2204_R.13	01/04/2024	-	A4	1/70	-

PROPONENTE

EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.
Via Tiziano, 32
20145 - Milano (MI)

SVILUPPO



SET SVILUPPO s.r.l.
Corso Trieste, 19
00198 - Roma (RM)

PROGETTAZIONE

Ing. Giacomo Greco



Ing. Marco Marsico



Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
00	01/04/2024	Prima Emissione	Ing. G. Greco	Ing. M. Marsico	Ing. G. Greco

**RELAZIONE PRELIMINARE DI CALCOLO
STRUTTURALE**

**FATTORIA SOLARE "SAN BIAGIO"
AGRIVOLTAICO DI TIPO ELEVATO E AVANZATO**

**di potenza pari a 63,180 MWp
e sistema di accumulo pari a 12,5 MW**

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 3
---	---	--------------

SOMMARIO

1. INTRODUZIONE.....	5
2. PRINCIPI FONDAMENTALI.....	5
3. CLASSIFICAZIONI DELLE AZIONI.....	8
4. COMBINAZIONI DELLE AZIONI	10
5. STRUTTURE TRACKING.....	13
5.1. Normative Dimensionamento Tracker	13
5.2. Caratteristiche geometriche moduli fotovoltaici.....	13
5.3. Strategie di stowing.....	17
5.4. Caratteristiche dei materiali considerati.....	18
5.5. Analisi dei Carichi	20
5.5.1. Carichi permanenti portati definiti - G1	20
5.5.2. Carichi permanenti portati definiti - G2	20
5.5.3. Carichi accidentali - Azione del Vento.....	20
5.5.3.1. Pressione del Vento	21
5.5.3.2. Coefficiente di pressione	23
5.5.4. Carichi accidentali - Azione della Neve.....	23
5.5.5. Carico Termico	24
5.5.6. Spettro di risposta per l'analisi sismica.....	24
5.6. Combinazione dei carichi e criteri di verifica.....	24
5.6.1. Risultati delle Combinazioni di carico.....	26
5.7. Caratteristiche dei profili e classificazione delle sezioni.....	34
5.8. Verifica di resistenza strutturale	34
5.8.1. Criteri di verifica.....	34
5.8.2. Capacità Elementi.....	35
5.9. Fondazioni di sostegno.....	35
6. BASAMENTI FONDAZIONI.....	36
6.1. Caratteristiche geometriche basamenti fondazioni.....	36
6.2. Normativa di riferimento	39
6.3. Materiali impiegati e resistenze di calcolo	40
6.4. Geometria.....	45
6.5. Analisi dei carichi.....	46
6.6. Azioni sulla struttura	46
6.6.1. Stato Limite di Salvaguardia della Vita	46
6.6.2. Stato Limite di Danno	49
6.6.3. Stato Limite di Esercizio.....	49

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 4
---	---	--------------

6.7. Progetto e verifica degli elementi strutturali	50
6.7.1. Verifiche di resistenza.....	51
6.7.2. Spinta del terreno.....	52
6.7.3. Spinta Idrostatica	54
6.8. Terreno di fondazione	56
6.8.1. Caratterizzazione geotecnica	57
6.8.2. Modellazione geotecnica.....	58
6.8.3. Scelta tipologica delle opere di fondazione.....	59
6.8.4. Verifiche di sicurezza.....	59
6.8.5. Carico limite fondazioni dirette	60
6.9. Verifiche.....	67
6.9.1. Platea Storage Power Station.....	67
6.9.2. Platea Storage Container.....	69
6.9.3. Stima dei cedimenti delle fondazioni.....	70
7. CONCLUSIONI.....	70

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 5
---	---	--------------

1. INTRODUZIONE

La presente relazione ha l'intento di:

- Introdurre i criteri per la progettazione delle opere e dei componenti strutturali di impianto del progetto denominato "Fattoria Solare San Biagio";
- Fornire la verifica preliminare degli elementi delle strutture di sostegno dei moduli fotovoltaici con inseguitori meccanici monoassiali (c.d. tracker) idonei per un progetto agrivoltaico simile a quello proposto;
- Fornire un primo dimensionamento delle fondazioni di apparecchiature e cabine prefabbricate di impianto con indicazione del tipo di acciaio e calcestruzzo utilizzabile.

Si rimanda alla fase esecutiva il dimensionamento definitivo di quanto sopra introdotto.

Si specifica che, con riferimento ai tracker, la verifica preliminare è stata fornita dalla ditta Valmont Solar – Convert, fornitore delle strutture selezionate per il progetto definitivo. Le assunzioni sono basate su strutture esistenti e con caratteristiche dimensionali, materiali e di peso simili a quelle selezionate per il progetto. In fase esecutiva, lo stesso si riserva di dimensionare in via definitiva gli elementi delle strutture. In ogni caso, verranno utilizzate strutture simili che rispettano standard tecnici e normative di settore, garantiti da fornitori di primario standing nazionale o internazionale.

2. PRINCIPI FONDAMENTALI

Secondo quanto riportato nel D.M. 17-01-18 le opere e i componenti strutturali devono essere progettate, eseguite, collaudate e soggette a manutenzione in modo tale da consentirne la prevista utilizzazione, in forma economicamente sostenibile e con il livello di sicurezza previsto dalla normativa. La sicurezza e le prestazioni di un'opera o di una parte di essa devono essere valutate in relazione agli stati limite che si possono verificare durante la vita nominale di progetto. Si definisce stato limite una condizione superata la quale l'opera non soddisfa più le esigenze elencate nella normativa.

In particolare, le opere e le varie tipologie strutturali devono possedere i seguenti requisiti:

- sicurezza nei confronti di stati limite ultimi (SLU): capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e dissesti gravi, totali o parziali che possano compromettere l'incolumità delle persone oppure comportare la perdita di beni, oppure provocare gravi danni ambientali e sociali, oppure mettere fuori servizio l'opera;
 - sicurezza nei confronti di stati limite di esercizio (SLE): capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio;
-

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 6
---	---	--------------

- durabilità, capacità della costruzione di mantenere, nell'arco della vita nominale di progetto, i livelli prestazionali per i quali è stata progettata, tenuto conto delle caratteristiche ambientali in cui si trova e del livello previsto di manutenzione;
- robustezza: capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità di possibili cause innescanti eccezionali quali esplosioni e urti.

Il superamento di uno stato limite ultimo ha carattere irreversibile, il superamento di uno stato limite di esercizio può avere carattere reversibile o irreversibile

I principali Stati Limite Ultimi (SLU) sono indicati nell'elenco riportato di seguito:

- perdita di equilibrio della struttura o di una sua parte, considerati come corpi rigidi
- spostamenti o deformazioni eccessive
- raggiungimento della massima capacità di parti di strutture, collegamenti, fondazioni
- raggiungimento della massima capacità della struttura nel suo insieme
- raggiungimento di una condizione di cinematismo irreversibile
- raggiungimento di meccanismi di collasso nei terreni
- rottura di membrature e collegamenti per fatica
- rottura di membrature e collegamenti per altri effetti dipendenti dal tempo
- instabilità di parti della struttura o del suo insieme

Altri stati limite ultimi sono considerati in relazione alle specificità delle singole opere; in presenza di azioni sismiche, gli Stati Limite Ultimi comprendono gli Stati Limite di salvaguardia della Vita (SLV) e gli Stati Limite di prevenzione del Collasso (SLC).

I principali Stati Limite di Esercizio (SLE) sono elencati di seguito:

- danneggiamenti locali (ad es. eccessiva fessurazione del calcestruzzo) che possano ridurre la durabilità della struttura, la sua efficienza o il suo aspetto
- spostamenti e deformazioni che possano limitare l'uso della costruzione, la sua efficienza e il suo aspetto
- spostamenti e deformazioni che possano compromettere l'efficienza e l'aspetto di elementi non strutturali, impianti, macchinari
- vibrazioni che possano compromettere l'uso della costruzione
- danni per fatica che possano compromettere la durabilità
- corrosione e/o degrado dei materiali in funzione del tempo e dell'ambiente di esposizione che possano compromettere la durabilità

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 7
---	---	--------------

Altri stati limite sono considerati in relazione alle specificità delle singole opere; in presenza di azioni sismiche, gli Stati Limite di Esercizio comprendono gli Stati Limite di Operatività (SLO) e gli Stati Limite di Danno (SLD).

Nel metodo di calcolo agli stati limite, la sicurezza strutturale nei confronti degli stati limite ultimi (SLU) deve essere verificata confrontando la capacità di progetto R_d , in termini di resistenza, duttilità e/o spostamento della struttura o della membratura strutturale, funzione delle caratteristiche meccaniche dei materiali che la compongono (X_d) e dei valori nominali delle grandezze geometriche interessate (a_d), con il corrispondente valore di progetto della domanda E_d , funzione dei valori di progetto delle azioni (F_d) e dei valori nominali delle grandezze geometriche della struttura interessate.

La verifica della sicurezza nei riguardi degli stati limite ultimi (SLU) è espressa dall'equazione:

$$R_d \geq E_d$$

Il valore di progetto della resistenza di un dato materiale X_d è, a sua volta, funzione del valore caratteristico della resistenza, definito come frattile 5% della distribuzione statistica della grandezza, attraverso l'espressione:

$$X_d = X_k / \gamma_m,$$

essendo γ_m il fattore parziale associato alla resistenza del materiale.

Il valore di progetto di ciascuna delle azioni agenti sulla struttura F_d è ottenuto dal suo valore caratteristico F_k , inteso come frattile 95% della distribuzione statistica o come valore caratterizzato da un assegnato periodo di ritorno, attraverso l'espressione:

$$F_d = \psi_f * F_k$$

essendo ψ_f il fattore parziale relativo alle azioni. Nel caso di concomitanza di più azioni variabili di origine diversa si definisce un valore di combinazione $\psi_0 * F_k$, ove $\psi_0 < 1$ è un opportuno coefficiente di combinazione, che tiene conto della ridotta probabilità che più azioni di diversa origine si realizzino simultaneamente con il loro valore caratteristico.

La capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio (SLE) deve essere verificata confrontando il valore limite di progetto associato a ciascun aspetto di funzionalità esaminato (C_d), con il corrispondente valore di progetto dell'effetto delle azioni (E_d), attraverso la seguente espressione formale:

$$C_d \geq E_d$$

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 8
---	---	--------------

3. CLASSIFICAZIONI DELLE AZIONI

Si definisce azione ogni causa o insieme di cause capace di indurre stati limite in una struttura.

Classificazione delle azioni in base al modo di esplicarsi:

- Dirette: forze concentrate, carichi distribuiti, fissi o mobili;
- Indirette: spostamenti impressi, variazioni di temperatura e di umidità, ritiro, precompressione, cedimenti di vincoli;
- Degrado:
 - Endogeno, alterazione naturale del materiale di cui è composta l'opera strutturale;
 - Esogeno, alterazione delle caratteristiche dei materiali costituenti l'opera strutturale, a seguito di agenti esterni.

Classificazione delle azioni secondo la risposta strutturale:

- Statiche: azioni applicate alla struttura che non provocano accelerazioni significative della stessa o di alcune sue parti;
- Pseudo statiche: azioni dinamiche rappresentabili mediante un'azione statica equivalente;
- Dinamiche: azioni che causano significative accelerazioni della struttura o dei suoi componenti.

Classificazione delle azioni secondo la variazione della loro intensità nel tempo:

- Permanenti (G), azioni che agiscono durante tutta la vita nominale di progetto della costruzione, la cui variazione di intensità nel tempo è molto lenta e di modesta entità:
 - peso proprio di tutti gli elementi strutturali, forze risultanti dalla pressione dell'acqua quando si configurino costanti nel tempo;
 - peso proprio di tutti gli elementi non strutturali;
 - spostamenti e deformazioni impressi, incluso il ritiro;
 - presollecitazione (P).
- Variabili (Q), azioni che agiscono con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi fra loro nel corso della vita nominale della struttura:
 - sovraccarichi;
 - azioni del vento;
 - azioni della neve;
 - azioni della temperatura.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 9
---	---	--------------

- Eccezionali (A), azioni che si verificano solo eccezionalmente nel corso della vita nominale della struttura:
 - Incendi;
 - Esplosioni;
 - Urti ed impatti.
 - Sismiche (E), azioni derivanti dai terremoti.
-

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 10
---	---	---------------

4. COMBINAZIONI DELLE AZIONI

Come anticipato precedentemente la capacità di progetto $R_d = f(X_d, a_d)$ mentre la domanda di progetto $E_d = f(F_d)$. A sua volta F_d è ottenuta dal suo valore caratteristico F_k per mezzo di ψ_f il fattore parziale relativo alle azioni che si ricorda essere < 1 .

Il valore caratteristico G_k di azioni permanenti caratterizzate da distribuzioni con coefficienti di variazione minori di 0,10 si può assumere coincidente con il valore medio.

Nel caso di azioni variabili caratterizzate da distribuzioni dei valori estremi dipendenti dal tempo, si assume come valore caratteristico quello caratterizzato da un assegnato periodo di ritorno.

Nella definizione delle combinazioni delle azioni, i termini Q_{kj} rappresentano le azioni variabili di diversa natura che possono agire contemporaneamente: Q_{k1} rappresenta l'azione variabile di base e Q_{k2}, Q_{k3}, Q_{kn} le azioni variabili d'accompagnamento, che possono agire contemporaneamente a quella di base.

Con riferimento alla durata relativa ai livelli di intensità di un'azione variabile, si definiscono:

- valore quasi permanente $\psi_{2j} * Q_{kj}$ il valore superato oltre il 50% del tempo nel periodo di riferimento. Indicativamente, esso può assumersi uguale alla media della distribuzione temporale dell'intensità;
- valore frequente $\psi_{1j} * Q_{kj}$ il valore superato per un periodo totale di tempo che rappresenti una piccola frazione del periodo di riferimento. Indicativamente, esso può assumersi uguale al frattile 95% della distribuzione temporale dell'intensità;
- valore di combinazione $\psi_{0j} * Q_{kj}$: il valore tale che la probabilità di superamento degli effetti causati dalla concomitanza con altre azioni sia circa la stessa di quella associata al valore caratteristico di una singola azione.

Nella tabella di seguito vengono riportati i valori dei coefficienti di combinazione da adottarsi per strutture civili e industriali.

Tab. 2.5.I – Valori dei coefficienti di combinazione

Categoria/Azione variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria A - Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B - Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D - Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E – Aree per immagazzinamento, uso commerciale e uso industriale Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRICOLA SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 11
---	---	---------------

Categoria G – Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H - Coperture accessibili per sola manutenzione	0,0	0,0	0,0
Categoria I – Coperture praticabili	da valutarsi caso per caso		
Categoria K – Coperture per usi speciali (impianti, eliporti, ...)			
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

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

Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (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, cosiddetta rara, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

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

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots$$

Nelle verifiche agli stati limite ultimi SLU si distinguono:

- lo stato limite di equilibrio come corpo rigido EQU
- lo stato limite di resistenza della struttura compresi gli elementi di fondazione STR
- lo stato limite di resistenza del terreno GEO

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRICOLA SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 12
---	---	---------------

Tab. 2.6.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

		Coefficiente	EQU	A1	A2
		γ_F			
Carichi permanenti G_1	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(1)}$	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevoli	γ_{Q1}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

Il coefficiente parziale di precompressione si assume pari a $\gamma_p = 1$.

Le azioni sismiche di progetto (E), 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. La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale, nonché di ordinate dello spettro di risposta elastica in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{vr} , nel periodo di riferimento V_r .

Ai fini della presente normativa le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento P_{vr} nel periodo di riferimento V_r , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

- a_g accelerazione orizzontale massima al sito
- F_0 valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- T_c^* valore di riferimento per la determinazione del periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale

Per i valori di a_g , F_0 , T_c^* necessari per la determinazione delle azioni sismiche, si fa riferimento agli Allegati Ae B del decreto delle infrastrutture 14 Gennaio 2008.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRICOLA SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 13
---	---	---------------

5. STRUTTURE TRACKING

5.1. Normative Dimensionamento Tracker

- D.M. LL. PP. 11-03-88: Norme Tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.
- Circolare Ministeriale del 24-07-88, n. 30483/STC.
- Legge 02-02-74 n. 64, art. 1 - D.M. 11-03-88: Norme Tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.
- Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 17-01-18: Sicurezza e prestazioni attese (cap.2), Azioni sulle costruzioni (cap.3), Costruzioni in calcestruzzo (par.4.1), Costruzioni in legno (par.4.4), Costruzioni in muratura (par.4.5), Progettazione geotecnica (cap.6), Progettazione per azioni sismiche (cap.7), Costruzioni esistenti (cap.8), Riferimenti tecnici (cap.12), EC3.
- Circolare n.7 del 21-01-19 C.S.LL.PP: Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle N.T.C. di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.
- EUROCODICE 1 – Azioni sulle strutture – Parte 1-4: Azioni in generale – azioni del vento (UNI EN 1991-1-4:2005);
- EUROCODICE 3 – Progettazione delle Strutture in acciaio – Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici (UNI EN 1993-1-1:2005);
- EUROCODICE 3 – Progettazione delle Strutture in acciaio – Parte 1-8: Progettazione dei collegamenti (UNI EN 1993-1-8:2005);

5.2. Caratteristiche geometriche moduli fotovoltaici

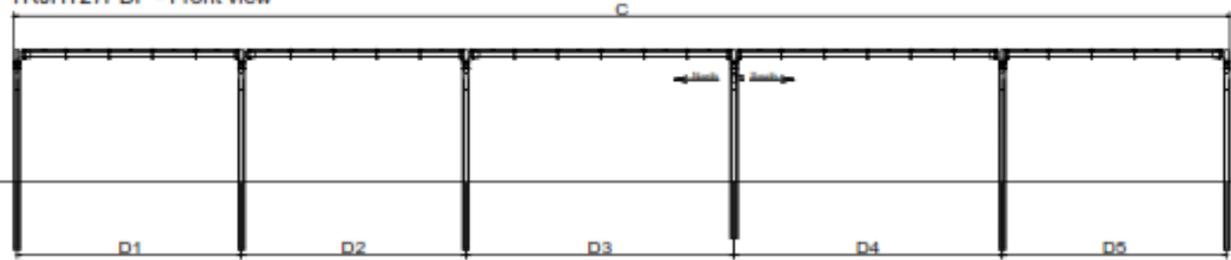
La struttura meccanica è costituita da elementi verticali infissi direttamente nel terreno. Detti elementi rappresentano al contempo sia i montanti verticali fuori terra che le fondazioni profonde. Gli elementi orizzontali principali sono costituiti da profili a sezione tubolare cava, denominati *beam*. I supporti moduli sono posizionati sulla trave in maniera ortogonale alla stessa ed hanno la funzione di sorreggere i pannelli fotovoltaici.

Per il calcolo strutturale sono state considerate le due configurazioni generanti le massime tensioni:

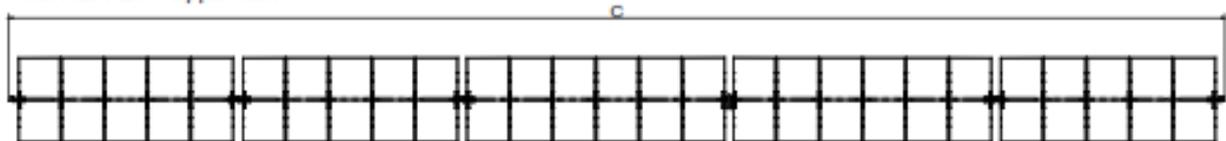
- MODELLO A $\alpha = 0^\circ$
- MODELLO B $\alpha = 55^\circ$

Configurazione per TRJ HT 27

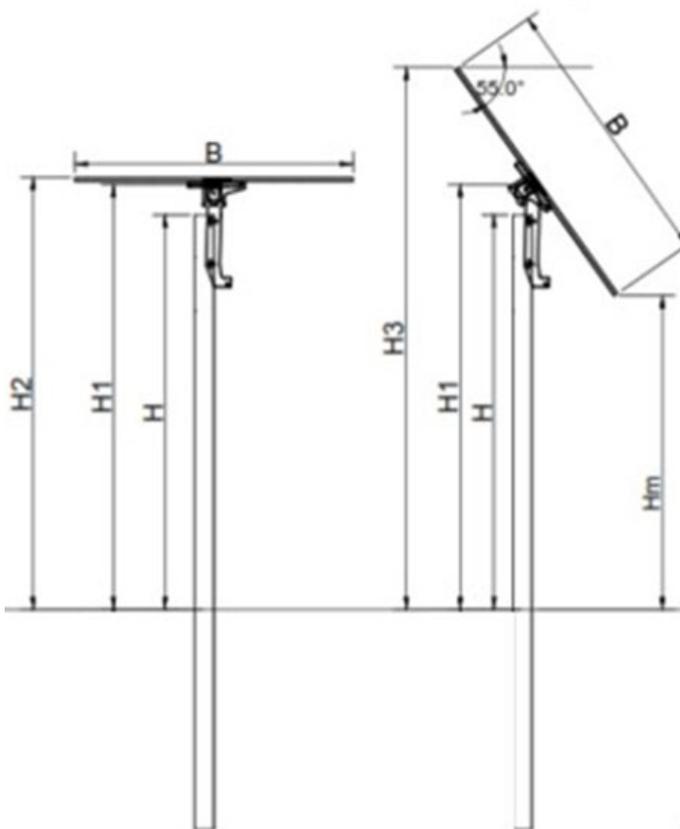
TRJHT27PDP - Front view



TRJHT27PDP - Upper view

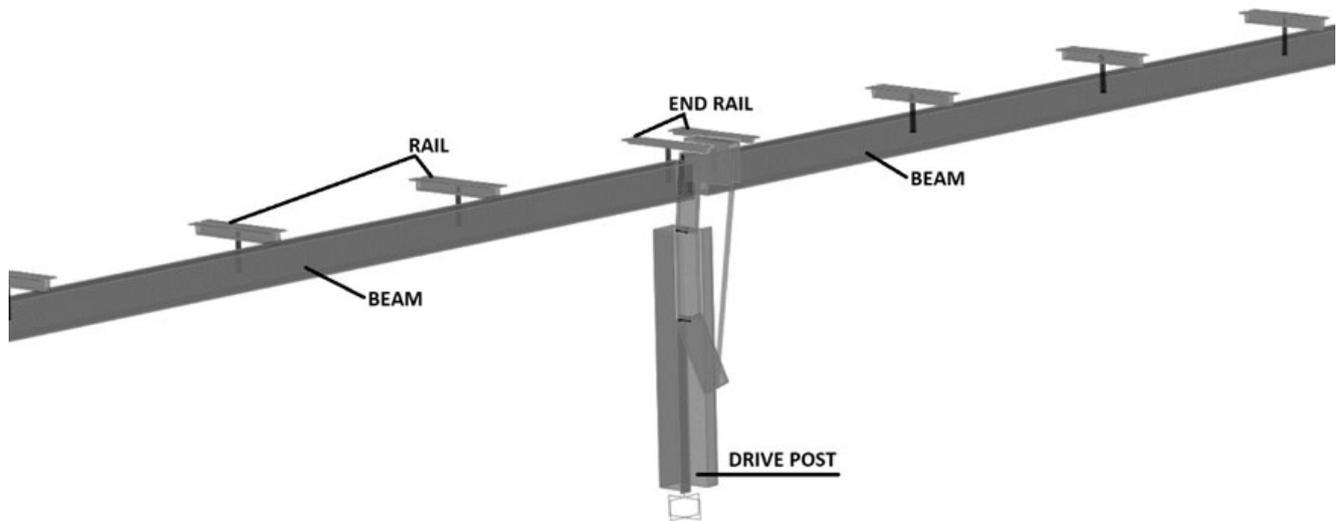


Configurazione per TRJ HT 27 - Vista Laterale con $\alpha = 0^\circ$ e 55°

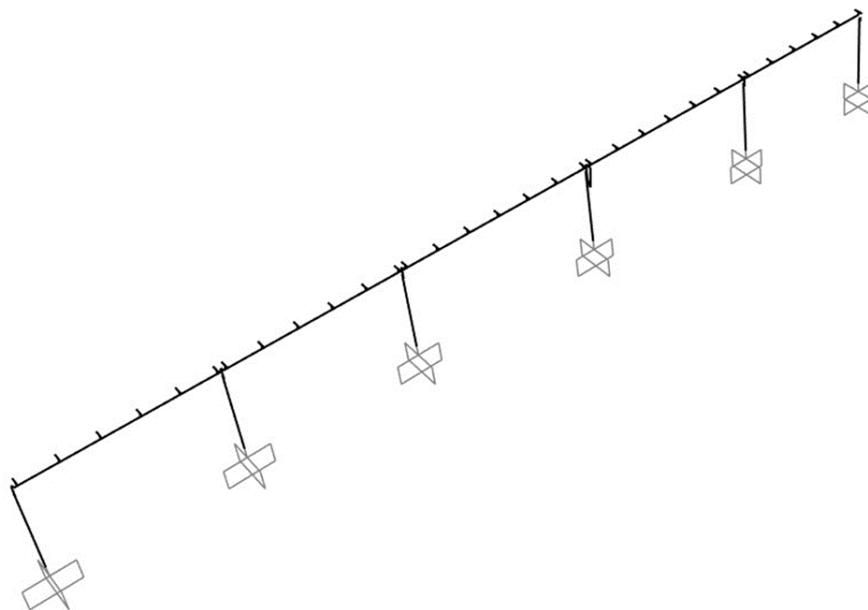


APPROXIMATE DIMENSIONS	
B	2285 mm
H	3435 mm
H1	3635 mm
H2	3700 mm
H3	4571 mm
Hm	2700 mm
D1/2/5	5970 mm
D3/4	7120 mm

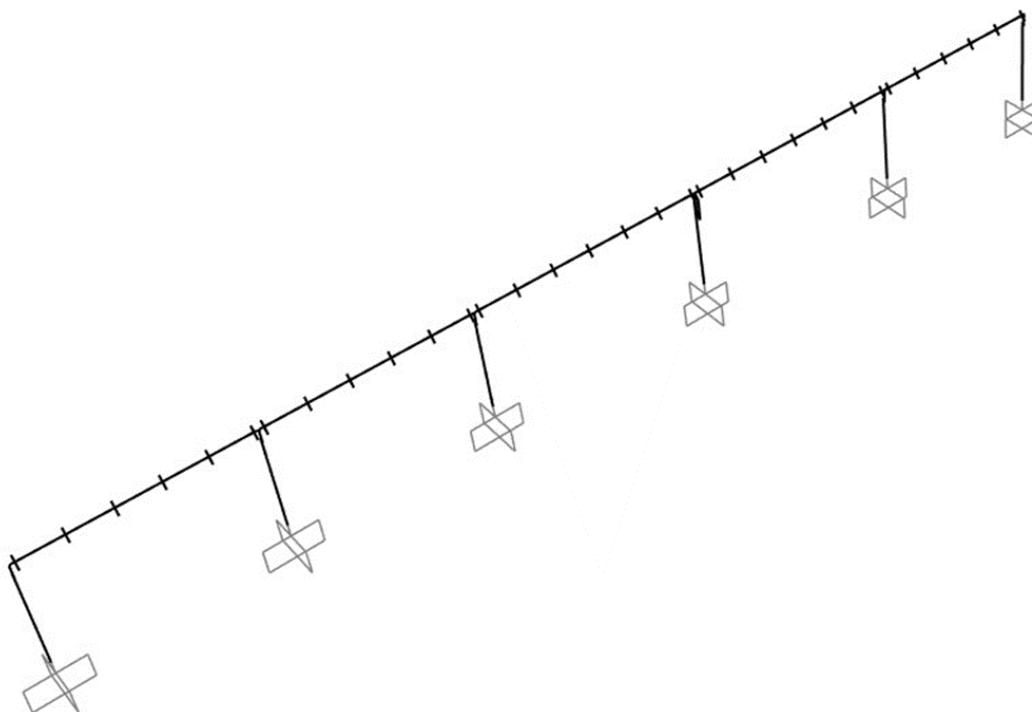
TRJ HT 27 PDP



MODELLO A $\alpha = 0^\circ$



MODELLO B $\alpha = 55^\circ$



Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRISOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 17
--	---	---------------

5.3. Strategie di stowing

Vento

La progettazione del tracker si basa sul presupposto che non è mai sottoposto ad una velocità del vento da normativa se non quando è in STOW POSITION ($\alpha = 0^\circ$). Pertanto, l'attuatore deve essere in grado di condurre il sistema nella posizione di sicurezza sotto i carichi previsti a seguito del rilevamento di una velocità del vento di innesco chiamata "Go To Stow Wind Speed".

La velocità del vento di innesco è impostata di default a 15,6 m/s, misurata come una raffica di 3 secondi a 5m di altezza. Questo valore deve essere scalato ai valori misurati all'altezza dell'anemometro. Si può supporre che l'anemometro abbia la massima precisione di circa una raffica di 3 secondi; quindi, ogni misurazione viene confrontata con il valore di innesco. Per scalare la raffica a 10 m di altezza, all'altezza dell'anemometro (h), ci basiamo sulla relazione derivata dalle equazioni del EN 1991.1.4:

$$V_p(h) = V_p(10m) * \frac{\sqrt{C_e(h)}}{\sqrt{C_e(10m)}}$$

Neve

La progettazione del tracker si basa sul presupposto che non è mai sottoposto ad una pressione da normativa se non quando è in STOW POSITION ($\alpha = 55^\circ$). Pertanto, l'attuatore deve essere in grado di condurre il sistema nella posizione di sicurezza sotto i carichi previsti a seguito del rilevamento di uno spessore della neve di innesco chiamato "Trigger accumulation".

Lo spessore della neve di innesco è impostato di default a 30 mm ed è misurato a terra da un sensore in una zona indisturbata.

Vento VS Neve

L'utilizzo contemporaneo delle strategie sopra descritte è reso possibile dal calcolo dello spessore massimo della neve secondo l'equazione 7-7.1 dell'ASCE 7-16:

$$h = \gamma_s \cdot \frac{s_k}{\gamma} = \gamma_s \cdot \frac{s_k}{0.426 \cdot s_k + 2.2}$$

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 18
---	---	---------------

Tale spessore deve essere minore dell'altezza da terra misurata al massimo angolo di inclinazione del tracker, cosicché nel caso in cui si azioni l'allarme vento la struttura sia in grado sempre di tornare nella STOW POSITION.

5.4. Caratteristiche dei materiali considerati

STANDARD

S420

Limite di Snervamento	$f_y \geq 420 \text{ N/mm}^2$
Limite di rottura	$f_t \geq 480 \text{ N/mm}^2$
Resilienza a 20°C	$R \leq 27 \text{ J}$
Modulo Elastico	$E = 210000 \text{ N/mm}^2$
Modulo Tangenziale	$G = E/[2(1+\nu)] = 80769 \text{ N/mm}^2$
Coefficiente di espansione lineare termica	$\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ per } ^\circ\text{C}^{-1}$

I profili realizzati con il seguente materiale sono:

- Drive Post 155 x 111 x 53 x 5 mm
- Lateral Post 155 x 109 x 35 x 4 mm
- Main beam 150x150x2,5 mm
- Cantilever 150 x 50 x 4 mm

S345

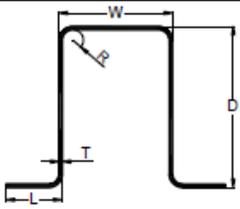
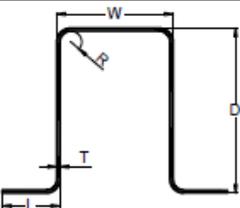
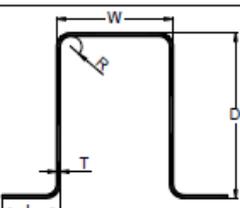
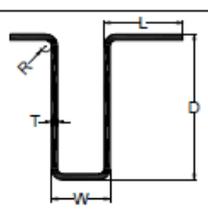
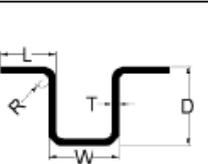
Limite di Snervamento	$f_y \geq 345 \text{ N/mm}^2$
Limite di rottura	$f_t \geq 490 \text{ N/mm}^2$
Resilienza a 20°C	$R \leq 27 \text{ J}$
Modulo Elastico	$E = 210000 \text{ N/mm}^2$
Modulo Tangenziale	$G = E/[2(1+\nu)] = 80769 \text{ N/mm}^2$
Coefficiente di espansione lineare termica	$\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ per } ^\circ\text{C}^{-1}$

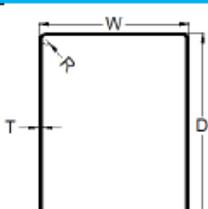
I profili realizzati con il seguente materiale sono:

- Module Support Type S 100 x 21 x 33 x 10 x 1,5 mm
- Module support Type LS 85 x 23 x 35 x 10 x 2,5 mm

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 19
---	---	---------------

- Module support Type E 70 x 20 x 13,5 x 2,5 mm
- Module support Type P 75,5 x 32 x 24 x 3,5 m

	SEZIONE	DIMENSIONI [mm]	STEEL GRADE	CLASSIFICAZIONE
DRIVE POST		Depth: 155mm Width: 111.5mm Leg: 50mm Thickness: 5.5 mm	S420 $f_y \geq 420$ MPa $f_u \geq 480$ MPa E = 210 GPa	CLASSE 1
MIDDLE POST		Depth: 155 mm Width: 110.5 mm Leg: 50 mm Thickness: 5 mm	S420 $f_y \geq 420$ MPa $f_u \geq 480$ MPa E = 210 GPa	CLASSE 2
END POST		Depth: 155mm Width: 108.5 mm Leg: 50 mm Thickness: 4 mm	S420 $f_y \geq 420$ MPa $f_u \geq 480$ MPa E = 210 GPa	CLASSE 3
RAIL		Depth: 44 mm Width: 27 mm Leg max: 36.8 mm Thickness: 1.8 mm	S420 $f_y \geq 420$ MPa $f_u \geq 480$ MPa E = 210 GPa	CLASSE 4
END RAIL		Depth: 19 mm Width: 19 mm Leg: 30 mm Thickness: 2.5 mm	S420 $f_y \geq 420$ MPa $f_u \geq 480$ MPa E = 210 GPa	CLASSE 3

	SEZIONE	DIMENSIONI [mm]	STEEL GRADE	CLASSIFICAZIONE
BEAM		Depth: 140mm Width: 100mm Thickness: 3.5mm	S420 $f_y \geq 420$ MPa $f_u \geq 480$ MPa E = 210 GPa	CLASSE 2

f_y = limite di snervamento, f_u = limite di rottura, **E**: Modulo elastico

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 20
---	---	---------------

BULLONERIA

I bulloni, conformi per le caratteristiche dimensionali alle norme UNI EN ISO 4016:2002 e UNI 5592:1968, devono appartenere alle classi della norma UNI EN ISO 898-1:2001 sottoindicate.

Limite di Snervamento	$f_{yb} \geq 649 \text{ N/mm}^2$
Limite di rottura	$f_{tb} \geq 800 \text{ N/mm}^2$

SALDATURE

Eventuali saldature dell'acciaio dovranno avvenire con uno dei procedimenti all'arco elettrico codificati secondo la norma UNI EN ISO 4063:2001. È ammesso l'uso di procedimenti diversi purché sostenuti da adeguata documentazione teorica e sperimentale.

5.5. Analisi dei Carichi

5.5.1. Carichi permanenti portati definiti - G1

I pesi propri strutturali vengono generati in automatico dal software di calcolo.

5.5.2. Carichi permanenti portati definiti - G2

Sezione	Peso	Peso
[mm]	[N]	[N/m ²]
2285mmx1136 mm	322	124

Nel modello di calcolo i carichi sono stati applicati con carichi distribuiti linearmente coerentemente con il modello reale:

- cond.2 → G2 - pannelli fotovoltaici - elemento interno $\Omega P_z = \text{Peso}/2 \text{ [N]}$
- cond.2 → G2 - pannelli fotovoltaici - elemento esterno $\Omega P_z = \text{Peso}/4 \text{ [N]}$

5.5.3. Carichi accidentali - Azione del Vento

L'azione del vento viene determinata in accordo con il D.M. 17 gennaio 2018 - Norme Tecniche per le Costruzioni.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 21
---	---	---------------

5.5.3.1. Pressione del Vento

La pressione del vento, in riferimento al §3.3.4 delle NTC-18, è data dall'espressione:

$$P = q_r C_e C_p C_d$$

Dove:

q_r è la pressione cinetica di riferimento di cui al §3.3.6 delle NTC-18;

C_e è il coefficiente di esposizione di cui al §3.3.7 delle NTC-18;

C_p è il coefficiente di pressione di cui al §3.3.8 delle NTC-18;

C_d è il coefficiente dinamico di cui al §3.3.9 delle NTC-18.

Pressione del vento

Categoria di esposizione	III	-		Tab. 3.3.II
Stow Wind Position				
Angolo tracking di riferimento	α	0	°	
Velocità base di riferimento	$v_{b,0}$	28	m/s	Tab 3.3.1
Coefficiente di ritorno	c_r	1.001	-	Eq. 3.3.3
Coefficiente di altitudine	c_a	1.0	-	Eq. 3.3.1.b
Velocità di base del vento	v_b	28.0	m/s	Tab 3.3.1
Velocità di riferimento	v_r	28.0	m/s	Eq. 3.3.2
Densità dell'aria	ρ	1.225	kg·m ⁻³	ISO 2533:1975
Pressione cinetica di riferimento	q_r	0.481	kN/m ²	Eq. 3.3.6
Coefficiente di esposizione	$c_e(z)$	1.708	-	Eq. 3.3.7
Pressione del vento	$q_{p,z}$	0.821	kN/m²	Eq. 3.3.5
Working Wind Position				
"Go To Stow Wind Speed" [3 sec]	V_{stow}	17.2	m/s	
"Go To Stow Wind Speed" [10 min]	V_{stow}	11.6	m/s	ISO 4354:2009
Coefficiente di ritorno	c_r	1	-	*
Coefficiente di altitudine	c_a	1	-	*
Velocità di base del vento	v_b	11.6	m/s	Tab 3.3.1
Velocità di riferimento	v_r	11.6	m/s	Eq. 3.3.2
Densità dell'aria	ρ	1.225	kg·m ⁻³	ISO 2533:1975
Pressione cinetica di riferimento	q_r	0.082	kN/m ²	Eq. 3.3.6
Coefficiente di esposizione	$c_e(z)$	1.708	-	Eq. 3.3.7

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 22
---	---	---------------

Pressione del vento

$q_{p,z}$ 0.140 kN/m² Eq. 3.3.5

**uguali ad 1 perché la "Go To Stow Windspeed" è misurata*

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 23
---	---	---------------

5.5.3.2. Coefficiente di pressione

I coefficienti di pressione flessionali G_{Cn} e torsionali G_{Cm} sono solitamente ottenuti da test in galleria del vento eseguiti dal Dipartimento di Ingegneria Meccanica del "Politecnico di Milano" -GVPM.

Applicazione dei coefficienti statici e dinamici dal RWDI Wind Tunnel Report. L'utilizzo dei risultati del Wind Tunnel consente una diversa progettazione tra le File Esterne e le File Interne [RWDI's Wind Tunnel Site].

5.5.4. Carichi accidentali - Azione della Neve

Il carico da neve viene determinato in accordo con il paragrafo §3.4.1 del D.M. 17 gennaio 2018 - Norme Tecniche per le Costruzioni. Il carico provocato dalla neve sulle coperture sarà valutato mediante la seguente espressione:

$$q_{s,\alpha} = \mu_{i,\alpha} \cdot c_e \cdot c_t \cdot q_{sk}$$

Dove:

q_{sk} è il valore di riferimento del carico della neve al suolo, di cui al §3.4.3 delle NTC-18; μ_i è il coefficiente di forma di cui al §3.4.3 delle NTC-18;

c_e è il coefficiente di esposizione di cui al §3.4.4 delle NTC-18; c_t è il coefficiente termico di cui al §3.4.5 delle NTC-18.

AZIONE DELLA NEVE

Stow Snow Position

Angolo tracking di riferimento	A	55	°	
Altitudine	As	36	m	
Valore di riferimento della neve	Qsk	600.0	N/m ²	§3.4.2
Coefficiente di esposizione	Ce	1	-	Tab. 3.4.1
Coefficiente termico	Ct	1	-	§3.4.5
Coefficiente di forma	Mi	0.13	-	Tab. 3.4.II
Carico neve	Qs	80	N/m ²	Eq. 3.4.1
Carico neve sul torque tube	Qs	105	N/m	
Working Snow Position				
Spessore accumulo neve di innesco		30	mm	
Carico neve	Qs	67	N/m ²	Eq. 7-7.1 [ASCE 7-16]

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 24
---	---	---------------

Carico neve sul torque tube

Q_s 153 N/m

*Carico neve max**

Q_s 153 N/m

**da utilizzare in modo conservativo su tutti gli angoli di tracking*

5.5.5. Carico Termico

Il carico termico viene calcolato in modo automatico dal software strutturale attraverso la seguente espressione lineare:

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \cdot L = 12 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta T \cdot L$$

Nel modello strutturale gli spostamenti vengono generati in relazione alle forze. A favore della sicurezza i carichi termici considerati nel calcolo sono i seguenti:

$$+\Delta T = +30^\circ C$$

$$-\Delta T = -30^\circ C$$

5.5.6. Spettro di risposta per l'analisi sismica

In fase di valutazione e di calcolo preliminare, risulta trascurabile da definizione di carico sismico, constatando l'irrelevanza che tale carico esercita nel dimensionamento della struttura.

5.6. Combinazione dei carichi e criteri di verifica

La combinazione dei carichi agenti sulla struttura e la conseguente verifica strutturale viene fatta in accordo con quanto prescritto dal DM 17/01/18. La relazione fondamentale per la verifica è data dalla seguente espressione

$$E_d \leq R_d = R_k / \gamma_{m0}$$

In accordo con il DM 17/01/18 per le verifiche è stato considerato:

R_k → Valore caratteristico di Resistenza;

$\gamma_{m0} = 1,05$ → Coefficiente parziale di resistenza di Resistenza per acciaio;

Il criterio utilizzato per la progettazione è l'Approccio 1 in accordo al cap. 02 del DM 17/01/18 che considera per le verifiche strutturali i valori dei coefficienti parziali riportati in Tabella 2.6.I colonna A1 STR, come pure per le verifiche geotecniche sono considerati i coefficienti parziali riportati in Tabella A1.2(C).

Combinazione per le verifiche allo SLU di resistenza

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_Q \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRICOLA SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 25
---	---	---------------

Combinazione per le verifiche per azioni dovute da SISMA (SLV)

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + E + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

Combinazione per le verifiche allo SLS - rare

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{1,i} \cdot Q_{k,i}$$

Tab. 2.6.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

		Coefficiente γ_F	EQU	A1	A2
Carichi permanenti G_1	Favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali $G_2^{(1)}$	Favorevoli	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevoli	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾ Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

Tab. 2.5.I – Valori dei coefficienti di combinazione

Categoria/Azione variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria A - Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B - Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D - Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E – Aree per immagazzinamento, uso commerciale e uso industriale Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F - Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 26
---	---	---------------

Categoria G – Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H - Coperture accessibili per sola manutenzione	0,0	0,0	0,0
Categoria I – Coperture praticabili	da valutarsi caso per caso		
Categoria K – Coperture per usi speciali (impianti, eliporti, ...)			
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

5.6.1. Risultati delle Combinazioni di carico

Nel seguito si riporta la tabella con le combinazioni di carico

Combo Name	DEAD	PV_panel s	Snow	DT+	DT-	WL0_C1_dow n	WL0_C1_uplif t	WL0_C3_dow n
ULS_01	1.3	1.3				1.5		
ULS_02	1.3	1.3	0.75			1.5		
ULS_03	1.3	1.3	0.75	0.9		1.5		
ULS_04	1.3	1.3	0.75		0.9	1.5		
ULS_05	1	1		0.9			1.5	
ULS_06	1	1			0.9		1.5	
ULS_07	1.3	1.3	1.5					
ULS_08	1.3	1.3	1.5					0.9
ULS_09	1.3	1.3	1.5	0.9				0.9
ULS_10	1.3	1.3	1.5		0.9			0.9
ULS_11	1.3	1.3		1.5				
ULS_12	1.3	1.3			1.5			
ULS_13	1.3	1.3		1.5		0.9		
ULS_14	1.3	1.3			1.5	0.9		
ULS_15	1.3	1.3	0.75	1.5				
ULS_16	1.3	1.3	0.75		1.5			
ULS_17	1.3	1.3	0.75	1.5		0.9		
ULS_18	1.3	1.3	0.75		1.5	0.9		

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 27
---	---	-------------------

Combo Name	DEAD	PV_panel s	Snow	DT+	DT-	WL1_C1_dow n	WL1_C1_uplif t	WL1_C2_dow n	WL1_C2_uplif t	WL1_C3_dow n	WL1_C4_dow n
ULS_19	1.3	1.3				1.5					
ULS_20	1.3	1.3	0.75			1.5					
ULS_21	1.3	1.3	0.75	0.9		1.5					
ULS_22	1.3	1.3	0.75		0.9	1.5					
ULS_23	1	1		0.9			1.5				
ULS_24	1	1			0.9		1.5				
ULS_25	1.3	1.3	1.5								
ULS_26	1.3	1.3	1.5							0.9	
ULS_27	1.3	1.3	1.5	0.9						0.9	
ULS_28	1.3	1.3	1.5		0.9					0.9	
ULS_29	1.3	1.3		1.5							
ULS_30	1.3	1.3			1.5						
ULS_31	1.3	1.3		1.5		0.9					
ULS_32	1.3	1.3			1.5	0.9					
ULS_33	1.3	1.3	0.75	1.5							
ULS_34	1.3	1.3	0.75		1.5						
ULS_35	1.3	1.3	0.75	1.5		0.9					
ULS_36	1.3	1.3	0.75		1.5	0.9					
ULS_37	1.3	1.3						1.5			
ULS_38	1.3	1.3	0.75					1.5			
ULS_39	1.3	1.3	0.75	0.9				1.5			
ULS_40	1.3	1.3	0.75		0.9			1.5			
ULS_41	1	1		0.9					1.5		
ULS_42	1	1			0.9				1.5		
ULS_43	1.3	1.3	1.5								
ULS_44	1.3	1.3	1.5								0.9
ULS_45	1.3	1.3	1.5	0.9							0.9
ULS_46	1.3	1.3	1.5		0.9						0.9
ULS_47	1.3	1.3		1.5							
ULS_48	1.3	1.3			1.5						
ULS_49	1.3	1.3		1.5				0.9			
ULS_50	1.3	1.3			1.5			0.9			
ULS_51	1.3	1.3	0.75	1.5							
ULS_52	1.3	1.3	0.75		1.5						
ULS_53	1.3	1.3	0.75	1.5				0.9			
ULS_54	1.3	1.3	0.75		1.5			0.9			

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 28
---	---	---------------

Combo Name	DEAD	PV_panels	Snow	DT+	DT-	WL2_C1_dow n	WL2_C1_uplif t	WL2_C2_dow n	WL2_C2_uplift	WL2_C3_dow n	WL2_C4_down
ULS_55	1.3	1.3				1.5					
ULS_56	1.3	1.3	0.75			1.5					
ULS_57	1.3	1.3	0.75	0.9		1.5					
ULS_58	1.3	1.3	0.75		0.9	1.5					
ULS_59	1	1		0.9			1.5				
ULS_60	1	1			0.9		1.5				
ULS_61	1.3	1.3	1.5								
ULS_62	1.3	1.3	1.5							0.9	
ULS_63	1.3	1.3	1.5	0.9						0.9	
ULS_64	1.3	1.3	1.5		0.9					0.9	
ULS_65	1.3	1.3		1.5							
ULS_66	1.3	1.3			1.5						
ULS_67	1.3	1.3		1.5		0.9					
ULS_68	1.3	1.3			1.5	0.9					
ULS_69	1.3	1.3	0.75	1.5							
ULS_70	1.3	1.3	0.75		1.5						
ULS_71	1.3	1.3	0.75	1.5		0.9					
ULS_72	1.3	1.3	0.75		1.5	0.9					
ULS_73	1.3	1.3						1.5			
ULS_74	1.3	1.3	0.75					1.5			
ULS_75	1.3	1.3	0.75	0.9				1.5			
ULS_76	1.3	1.3	0.75		0.9			1.5			
ULS_77	1	1		0.9					1.5		
ULS_78	1	1			0.9				1.5		
ULS_79	1.3	1.3	1.5								
ULS_80	1.3	1.3	1.5								0.9
ULS_81	1.3	1.3	1.5	0.9							0.9
ULS_82	1.3	1.3	1.5		0.9						0.9
ULS_83	1.3	1.3		1.5							
ULS_84	1.3	1.3			1.5						
ULS_85	1.3	1.3		1.5				0.9			
ULS_86	1.3	1.3			1.5			0.9			
ULS_87	1.3	1.3	0.75	1.5							
ULS_88	1.3	1.3	0.75		1.5						
ULS_89	1.3	1.3	0.75	1.5				0.9			
ULS_90	1.3	1.3	0.75		1.5			0.9			

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 29
---	---	-------------------

Combo Name	DEAD	PV_panel s	Snow	DT +	DT-	WL3_C3_dow n	WL3_C3_uplif t	WL3_C4_dow n	WL3_C4_uplif t
ULS_91	1.3	1.3				1.5			
ULS_92	1.3	1.3	0.75			1.5			
ULS_93	1.3	1.3	0.75	0.9		1.5			
ULS_94	1.3	1.3	0.75		0.9	1.5			
ULS_95	1	1		0.9			1.5		
ULS_96	1	1			0.9		1.5		
ULS_97	1.3	1.3	1.5						
ULS_98	1.3	1.3	1.5			0.9			
ULS_99	1.3	1.3	1.5	0.9		0.9			
ULS_100	1.3	1.3	1.5		0.9	0.9			
ULS_101	1.3	1.3		1.5					
ULS_102	1.3	1.3			1.5				
ULS_103	1.3	1.3		1.5		0.9			
ULS_104	1.3	1.3			1.5	0.9			
ULS_105	1.3	1.3	0.75	1.5					
ULS_106	1.3	1.3	0.75		1.5				
ULS_107	1.3	1.3	0.75	1.5		0.9			
ULS_108	1.3	1.3	0.75		1.5	0.9			
ULS_109	1.3	1.3						1.5	
ULS_110	1.3	1.3	0.75					1.5	
ULS_111	1.3	1.3	0.75	0.9				1.5	
ULS_112	1.3	1.3	0.75		0.9			1.5	
ULS_113	1	1		0.9					1.5

Combo Name	DEAD	PV_panel s	Snow	DT +	DT-	WL3_C3_down	WL3_C3_uplift	WL3_C4_dow n	WL3_C4_uplif t
ULS_114	1	1			0.9				1.5
ULS_115	1.3	1.3	1.5						
ULS_116	1.3	1.3	1.5					0.9	
ULS_117	1.3	1.3	1.5	0.9				0.9	
ULS_118	1.3	1.3	1.5		0.9			0.9	
ULS_119	1.3	1.3		1.5					
ULS_120	1.3	1.3			1.5				
ULS_121	1.3	1.3		1.5				0.9	
ULS_122	1.3	1.3			1.5			0.9	
ULS_123	1.3	1.3	0.75	1.5					
ULS_124	1.3	1.3	0.75		1.5				
ULS_125	1.3	1.3	0.75	1.5				0.9	
ULS_126	1.3	1.3	0.75		1.5			0.9	

Combo Name	DEAD	PV_panel s	Ex_SLV	Ey_SLV
ULS_127	1	1	1	0.3
ULS_128	1	1	0.3	1

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 30
---	---	---------------

Combo Name	DEAD	PV_panel s	Snow	DT +	DT-	WL0_C1_dow n	WL0_C1_uplif t	WL0_C3_dow n
SLS_01	1	1				1		
SLS_02	1	1	0.5			1		
SLS_03	1	1	0.5	0.6		1		
SLS_04	1	1	0.5		0.6	1		
SLS_05	1	1		0.6			1	
SLS_06	1	1			0.6		1	
SLS_07	1	1	1					
SLS_08	1	1	1					0.6
SLS_09	1	1	1	0.6				0.6
SLS_10	1	1	1		0.6			0.6
SLS_11	1	1		1				
SLS_12	1	1			1			
SLS_13	1	1		1		0.6		
SLS_14	1	1			1	0.6		
SLS_15	1	1	0.5	1				
SLS_16	1	1	0.5		1			
SLS_17	1	1	0.5	1		0.6		
SLS_18	1	1	0.5		1	0.6		

Combo Name	DEAD	PV_panels	Snow	DT+	DT-	WL1_C1_dow n	WL1_C1_uplif t	WL1_C2_down	WL1_C2_uplift	WL1_C3_dow n	WL1_C4_down
SLS_19	1	1				1					
SLS_20	1	1	0.5			1					
SLS_21	1	1	0.5	0.6		1					
SLS_22	1	1	0.5		0.6	1					
SLS_23	1	1		0.6			1				
SLS_24	1	1			0.6		1				
SLS_25	1	1	1								
SLS_26	1	1	1							0.6	
SLS_27	1	1	1	0.6						0.6	
SLS_28	1	1	1		0.6					0.6	
SLS_29	1	1		1							
SLS_30	1	1			1						
SLS_31	1	1		1		0.6					
SLS_32	1	1			1	0.6					
SLS_33	1	1	0.5	1							
SLS_34	1	1	0.5		1						
SLS_35	1	1	0.5	1		0.6					
SLS_36	1	1	0.5		1	0.6					
SLS_37	1	1						1			
SLS_38	1	1	0.5					1			
SLS_39	1	1	0.5	0.6				1			

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 31
--	--	----------------------

Combo Name	DEAD	PV_panels	Snow	DT+	DT-	WL1_C1_down	WL1_C1_uplift	WL1_C2_down	WL1_C2_uplift	WL1_C3_down	WL1_C4_down
SLS_40	1	1	0.5		0.6			1			
SLS_41	1	1		0.6					1		
SLS_42	1	1			0.6				1		
SLS_43	1	1	1								
SLS_44	1	1	1								0.6
SLS_45	1	1	1	0.6							0.6
SLS_46	1	1	1		0.6						0.6
SLS_47	1	1		1							
SLS_48	1	1			1						
SLS_49	1	1		1				0.6			
SLS_50	1	1			1			0.6			
SLS_51	1	1	0.5	1							
SLS_52	1	1	0.5		1						
SLS_53	1	1	0.5	1				0.6			
SLS_54	1	1	0.5		1			0.6			

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 32
---	---	---------------

Combo Name	DEAD	PV_panels	Snow	DT+	DT-	WL2_C1_dow n	WL2_C1_uplif t	WL2_C2_down	WL2_C2_uplif t	WL2_C3_dow n	WL2_C4_dow n
SLS_55	1	1				1					
SLS_56	1	1	0.5			1					
SLS_57	1	1	0.5	0.6		1					
SLS_58	1	1	0.5		0.6	1					
SLS_59	1	1		0.6			1				
SLS_60	1	1			0.6		1				
SLS_61	1	1	1								
SLS_62	1	1	1							0.6	
SLS_63	1	1	1	0.6						0.6	
SLS_64	1	1	1		0.6					0.6	
SLS_65	1	1		1							
SLS_66	1	1			1						
SLS_67	1	1		1		0.6					
SLS_68	1	1			1	0.6					
SLS_69	1	1	0.5	1							
SLS_70	1	1	0.5		1						
SLS_71	1	1	0.5	1		0.6					
SLS_72	1	1	0.5		1	0.6					
SLS_73	1	1						1			
SLS_74	1	1	0.5					1			
SLS_75	1	1	0.5	0.6				1			
SLS_76	1	1	0.5		0.6			1			
SLS_77	1	1		0.6					1		
SLS_78	1	1			0.6				1		
SLS_79	1	1	1								
SLS_80	1	1	1								0.6
SLS_81	1	1	1	0.6							0.6
SLS_82	1	1	1		0.6						0.6
SLS_83	1	1		1							
SLS_84	1	1			1						
SLS_85	1	1		1				0.6			
SLS_86	1	1			1			0.6			
SLS_87	1	1	0.5	1							
SLS_88	1	1	0.5		1						
SLS_89	1	1	0.5	1				0.6			
SLS_90	1	1	0.5		1			0.6			

Combo Name	DEAD	PV_panels	Snow	DT+	DT-	WL3_C3_dow n	WL3_C3_uplif t	WL3_C4_down	WL3_C4_uplift
SLS_91	1	1				1			
SLS_92	1	1	0.5			1			
SLS_93	1	1	0.5	0.6		1			
SLS_94	1	1	0.5		0.6	1			
SLS_95	1	1		0.6			1		

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 33
---	---	---------------

Combo Name	DEAD	PV_panel s	Snow	DT +	DT- -	WL3_C3_dow n	WL3_C3_uplif t	WL3_C4_dow n	WL3_C4_uplif t
SLS_96	1	1			0.6		1		
SLS_97	1	1	1						
SLS_98	1	1	1			0.6			
SLS_99	1	1	1	0.6		0.6			
SLS_100	1	1	1		0.6	0.6			
SLS_101	1	1		1					
SLS_102	1	1			1				
SLS_103	1	1		1		0.6			
SLS_104	1	1			1	0.6			
SLS_105	1	1	0.5	1					
SLS_106	1	1	0.5		1				
SLS_107	1	1	0.5	1		0.6			
SLS_108	1	1	0.5		1	0.6			
SLS_109	1	1						1	
SLS_110	1	1	0.5					1	
SLS_111	1	1	0.5	0.6				1	
SLS_112	1	1	0.5		0.6			1	
SLS_113	1	1		0.6					1
SLS_114	1	1			0.6				1
SLS_115	1	1	1						
SLS_116	1	1	1					0.6	
SLS_117	1	1	1	0.6				0.6	
SLS_118	1	1	1		0.6			0.6	
SLS_119	1	1		1					
SLS_120	1	1			1				
SLS_121	1	1		1				0.6	
SLS_122	1	1			1			0.6	
SLS_123	1	1	0.5	1					
SLS_124	1	1	0.5		1				
SLS_125	1	1	0.5	1				0.6	
SLS_126	1	1	0.5		1			0.6	

Combo Name	DEAD	PV_panel s	Ex_SLD	Ey_SLD
SLS_127	1	1	1	0.3
SLS_128	1	1	0.3	1

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 34
---	---	---------------

5.7. Caratteristiche dei profili e classificazione delle sezioni

Di seguito di riportano le classificazioni delle sezioni effettuate in accordo alle prescrizioni riportate in tabella 4.2.1 e 4.2.2 delle NTC-18

	e [-]	C _{bending} [mm]	Bending Class[-]	C _{int,c} [mm]	Int compr Class [-]	C _{ext,c L1} [mm]	Ext compr,1 Class [-]	C _{ext,c L2} [mm]	Ext compr,2 Class [-]	Classification [-]
DRIVE POST	0.75	124	1	80.5	1	34.5	1	34.5	1	C1
MIDDLE POST	0.75	125	1	80.5	1	35	2	35	2	C2
LATERAL POST	0.75	127	1	80.5	1	36	3	36	3	C3
RAIL	0.75	36.8	1	19.8	1	33.2	4	33.2	4	C4
END RAIL	0.75	9	1	9	1	25	3	25	3	C3
MAIN BEAM	0.75	130	1	90	2	-	-	-	-	C2

5.8. Verifica di resistenza strutturale

5.8.1. Criteri di verifica

Tutte le verifiche a presso-flessione vengono condotte in accordo all'Euro Codice EN 1993-1-1:2005. Nei seguenti paragrafi le equazioni saranno così nominate:

- **EQ. 1:**
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{yEd}}{\chi_{LT} M_{yRk}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{zEd}}{M_{zRk}} \leq 1$$

- **EQ. 2:**
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{yEd}}{\chi_{LT} M_{yRk}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{zEd}}{M_{zRk}} \leq 1$$

- **EQ. 3:**
$$\frac{T_{1-2}}{V_{bx,Rd}}$$

- **EQ. 4:**
$$\frac{T_{1-3}}{V_{by,Rd}}$$

- **EQ. 5:**
$$\sqrt{\left(\frac{M_{yEd}}{M_{yRd}}\right)^2 + \left(\frac{M_{zEd}}{M_{zRd}}\right)^2} + 3 \cdot \left(\frac{T_{Ed}}{T_{Rd}}\right)^2$$

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 35
---	---	---------------

5.8.2. Capacità Elementi

Le capacità degli elementi sono state valutate in accordo al EN1993 1-3. Si riportano di seguito, tutte le capacità per i profili in esame.

	$N_{c,Rd}$ [N]	$V_{bx,Rd}$ [N]	$V_{by,Rd}$ [N]	$M_{x,Rd}$ [N m]	$M_{y,Rd}$ [N m]	T_{Rd} [N m]
Drive Post	99597	380587	248617	32722	35786	-
Middle Post	75246	347563	226372	27542	32255	-
Lateral Post	43212	267209	173017	18532	24155	-
Main Beam	86079	216639	151975	25612	21400	21256
Rail	92293	33924	39186	1189	909	-
End Rail	65154	16592	40372	343	1029	-

5.9. Fondazioni di sostegno

Per le strutture ad inseguimento si adotteranno pali prefabbricati in acciaio, disponibili in varie geometrie e configurazioni, che vengono infissi nel terreno per mezzo di semplici apparecchiature montabili con facilità sulle più comuni macchine operatrici. Ciò implica la quasi totale assenza di un cantiere per la realizzazione della fondazione, aspetto fondamentale quando ci si trova ad operare in ambiti rurali difficilmente raggiungibili, e soprattutto consente di realizzare opere facilmente reversibili.

Tale tipologia di palo è dimensionata dal Costruttore per resistere sia a sforzi di compressione che di trazione e perciò consente alla struttura di sopportare anche momenti ribaltanti.

In fase esecutiva, a seguito di prove geotecniche, sarà possibile eventualmente definire una diversa tipologia di palo. Ricontrate particolari condizioni geotecniche del sito, il Costruttore potrebbe suggerire, infatti, l'installazione dei cosiddetti "Pali a Vite" i quali, così come i suddetti pali infissi, non richiedono fondazione.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 36
---	---	---------------

6. BASAMENTI FONDAZIONI

6.1. Caratteristiche geometriche basamenti fondazioni

A servizio dell'impianto Agrivoltaico sono previste le apparecchiature elencate e descritte nei seguenti paragrafi.

Apparecchiature relative all'impianto elettrico:

- n.32 Cabine di campo
- n.5 Storage Container
- n.5 Storage Power Station
- n.1 Cabina di raccolta

Cabine di campo: le Cabine di campo sono strutture prefabbricate, corredate di relativa vasca di fondazione predisposta al passaggio cavi per mezzo di appositi di fori. All'interno delle cabine di campo saranno installati quadri e trasformatori. Per la posa delle cabine sarà sufficiente uno scavo di 100 cm dove alloggiare la vasca di fondazione e la predisposizione di una soletta di magrone da 10 cm per ottenere un corretto livellamento.

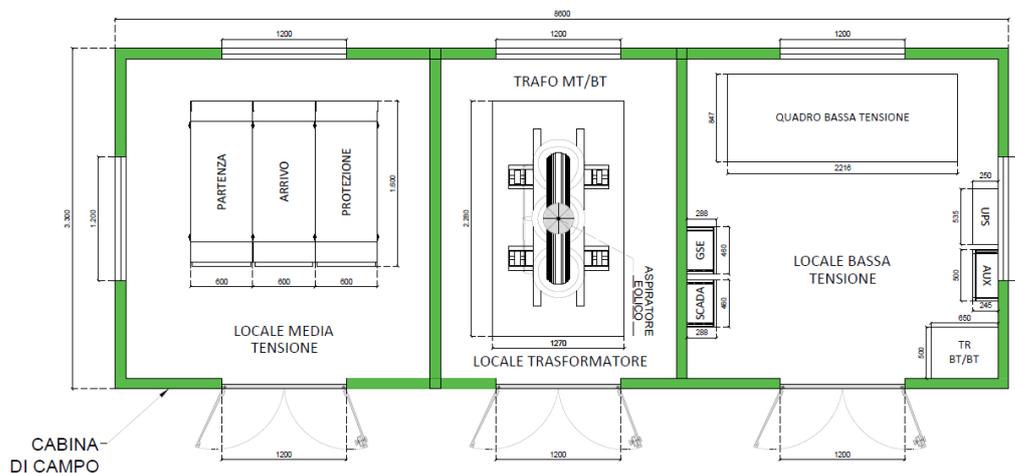


Figura 1: Dettaglio Cabina di campo - Pianta

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 37
--	--	----------------------

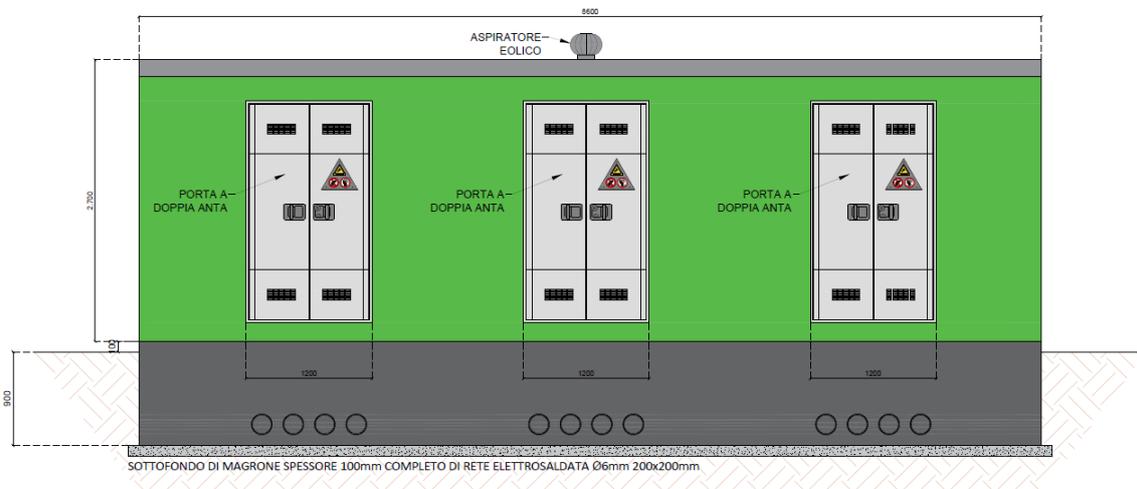


Figura 2: Dettaglio Cabina di campo - Prospetto

Storage container e Storage Power Station: l'unità di accumulo si compone di container corredati di pacchi batterie e di apparecchiature preassemblate corredate di inverter, trasformatore e quadri, dette storage power station. Per l'impianto in progetto sono previsti 5 storage container e 5 storage power station. Per la posa delle suddette apparecchiature è prevista la realizzazione di 10 platee in calcestruzzo armato di spessore pari a 40 cm.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 38
---	---	---------------

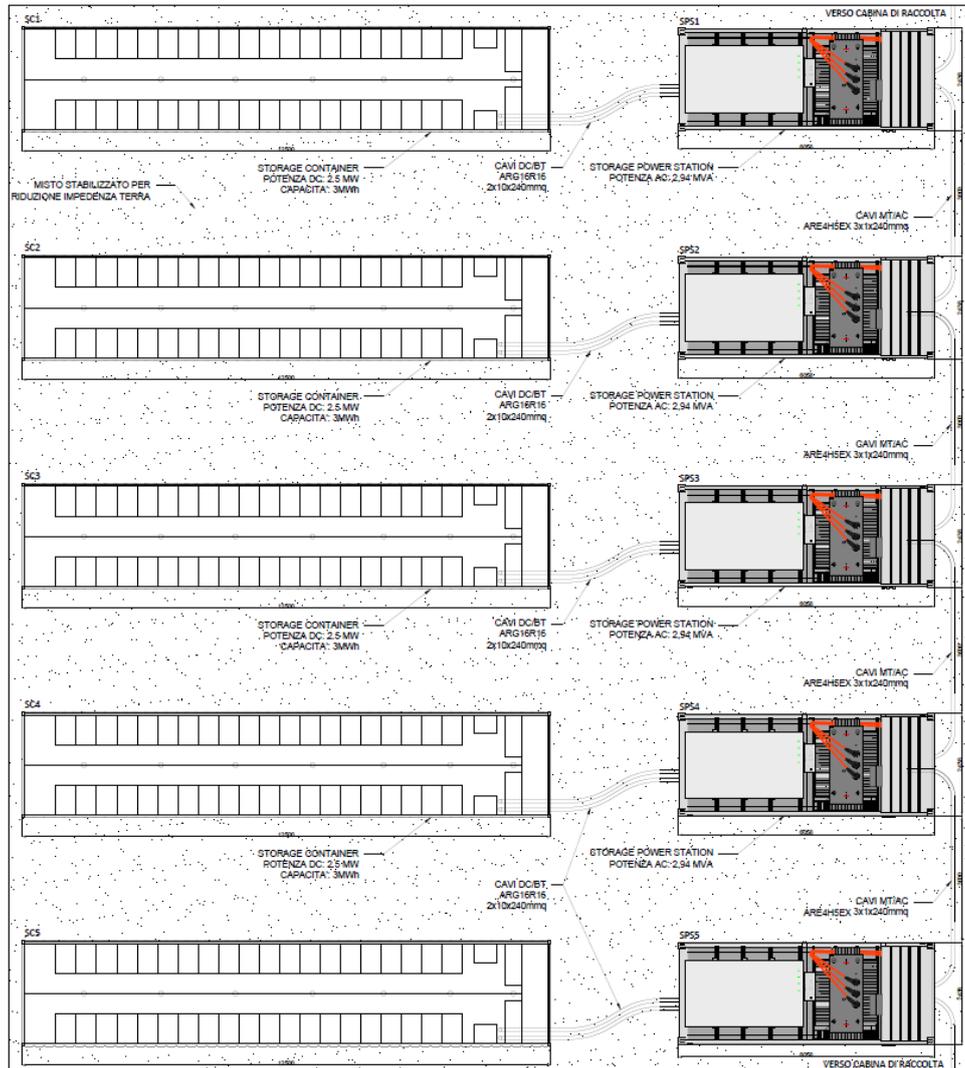


Figura 3: Dettaglio storage container e storage power station

Cabina Raccolta AT: la Cabina di raccolta è una struttura prefabbricata, corredata di vasca di fondazione predisposta al passaggio cavi per mezzo di appositi di fori. Per la posa della cabina sarà sufficiente uno scavo di 100 cm dove alloggiare la vasca di fondazione e la predisposizione di una soletta di magrone da 10 cm per ottenere un corretto livellamento.

Progetto: Fattoria Solare “San Biagio” EF AGRI SOCIETA’ AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 39
--	--	----------------------

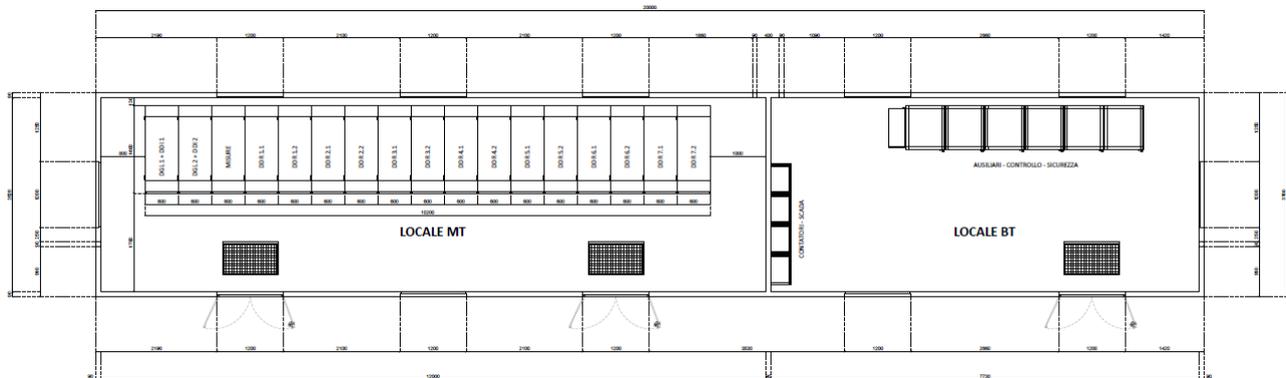


Figura 4: Dettaglio cabina di raccolta – Pianta

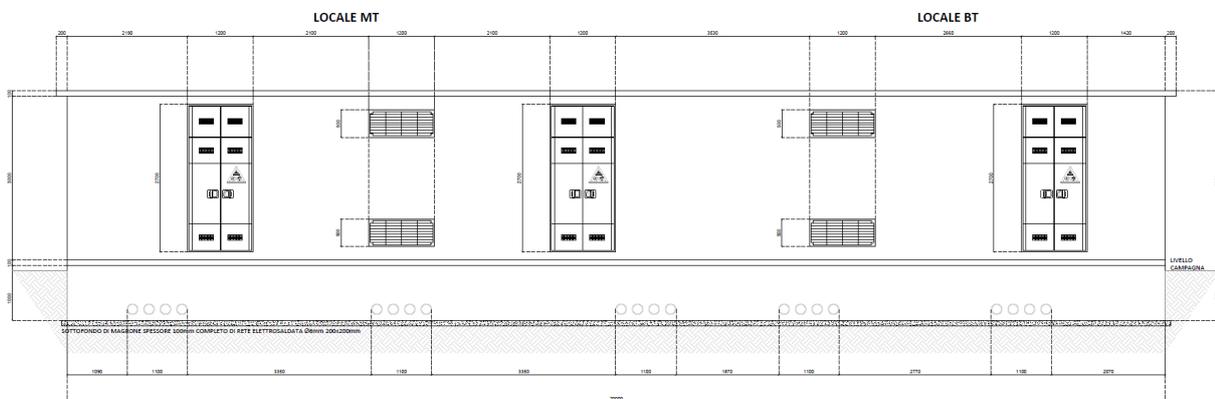


Figura 5: Dettaglio cabina di raccolta - Prospetto

Il basamento di fondazione delle cabine sarà realizzato in stabilimento. Si tratta di struttura prefabbricata monoblocco di tipo “a vasca”, in grado di garantire la massima flessibilità per quanto riguarda la distribuzione dei cavi all’interno della cabina elettrica e al tempo stesso assicurare una corretta distribuzione dei carichi sul terreno.

6.2. Normativa di riferimento

Le fasi di analisi e verifica delle strutture saranno 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 progettive per le nuove costruzioni in zone sismiche a cura del Ministero per la Ricerca scientifica - Roma 1981.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 40
---	---	---------------

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

6.3. Materiali impiegati e resistenze di calcolo

Tutti i materiali strutturali impiegati saranno 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.

I Materiali ed i vari Prodotti necessari per la realizzazione delle componenti strutturali del Progetto dovranno attenersi ai consueti canoni di selezione e scelta riportati in Normativa. Si ritiene comunque necessario sottolineare che essi dovranno essere:

- identificati univocamente a cura del *Produttore*;
- qualificati sotto la responsabilità del *Produttore*;
- accettati dal *Direttore dei Lavori* mediante acquisizione e verifica della documentazione di qualificazione, nonché mediante eventuali prove sperimentali di accettazione.

Le prove su materiali e prodotti devono generalmente essere effettuate da:

- laboratori di prova notificati ai sensi dell'art.18 della Direttiva n.89/106/CEE;
- laboratori di cui all'art.59 del DPR n.380/2001;
- altri laboratori, dotati di adeguata competenza e idonee attrezzature, appositamente abilitati dal Servizio Tecnico Centrale.

I produttori di materiali, prodotti o componenti dovranno dotarsi di adeguate procedure di controllo di produzione in fabbrica. Per controllo di produzione nella fabbrica si intende il controllo permanente della produzione, effettuato dal fabbricante. Tutte le procedure e le disposizioni adottate dal fabbricante dovranno essere documentate sistematicamente ed essere a disposizione di qualsiasi soggetto od ente di controllo che ne abbia titolo.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 41
---	---	---------------

Acciaio in barre da c.a.

Tipo di acciaio: B450C

Caratteristiche	Requisiti	Frattile (%)
Tensione caratteristica di snervamento f_{yk}	$\geq f_{y\ nom}$	5.00
Tensione caratteristica di rottura	$\geq f_{t\ nom}$	5.00
$(f_t/f_y)k$	≥ 1.15 < 1.35	10.00
$(f_y/f_{y\ nom})k$	≤ 1.25	
Allungamento $(A_{gt})k$	$\geq 7.5\ %$	
Diametro del mandrino per prove di piegamento a 90° e successivo raddrizzamento senza cricche		
$\varnothing < 12\ mm$	4 \varnothing	
$12 \leq \varnothing \leq 16\ mm$	5 \varnothing	
per $16 \leq \varnothing \leq 25\ mm$	8 \varnothing	
per $25 \leq \varnothing \leq 40\ mm$	10 \varnothing	

Le barre sono caratterizzate dal diametro Φ della barra tonda liscia equipesante, calcolato nell'ipotesi che la densità dell'acciaio sia pari a 7,85 kg/dm³.

L'acciaio per cemento armato B450C è caratterizzato dai seguenti valori nominali delle tensioni caratteristiche di snervamento e rottura da utilizzare nei calcoli e deve rispettare i requisiti indicati nelle seguenti tabelle.

$e_{yd} = f_{yd} / E_s$
$e_{su} = 1\%$
$f_{yd} = f_{yk} / g_s$
$\sigma_s = 0,8 f_{yk}$

Resistenza a snervamento dell'acciaio	f_{yk}	450	[N/mm ²]
Resistenza a rottura dell'acciaio a trazione	f_t	540	[N/mm ²]
Coefficiente di sicurezza parziale per l'acciaio	γ_s	1.15	[-]
Modulo di elasticità secante dell'acciaio	E_s	206000	[N/mm ²]
Deformazione a snervamento dell'acciaio	ϵ_{yd}	0.001957	[-]
Deformazione ultima dell'acciaio	ϵ_{su}	0.01	[-]
Resistenza di progetto a trazione dell'acciaio	f_{yd}	391.3	[N/mm ²]
Tensione ammissibile nell'acciaio per le combinazioni a SLS	σ_s	360	[N/mm ²]

Prima della fornitura in cantiere gli elementi di cui sopra possono essere saldati, presagomati (staffe, ferri piegati, ecc.) o preassemblati (gabbie di armatura, ecc.) a formare elementi composti direttamente utilizzabili in opera.

Gli acciai delle reti e tralicci elettrosaldati devono essere saldabili. L'interasse delle barre non deve superare 330 mm. I tralicci sono dei componenti reticolari composti con barre ed

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 42
---	---	---------------

assemblati mediante saldature. Gli elementi base devono avere diametro Φ che rispetta la limitazione: $6 \text{ mm} \leq \Phi \leq 16 \text{ mm}$. Il rapporto tra i diametri delle barre componenti reti e tralicci deve essere: $\Phi \text{ min} / \Phi \text{ Max} \geq 0,6$.

Calcestruzzo per getti in opera

Tipo di calcestruzzo: C28/35, rif. UNI ENV 1992-1-1

Nel Presente Progetto è previsto l'impiego di un calcestruzzo C28/35. Le Caratteristiche Meccaniche del Calcestruzzo sono di seguito riportate e seguono le formulazioni classiche della normativa italiana vigente.

$f_{cm} = f_{ck} + 8$	
$f_{ctm} = 0,3 f_{ck}^{2/3}$	$f_{ck} \leq 50 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
$f_{ctm} = 2,12 \ln(1 + f_{cm}/10)$	$f_{ck} > 50 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
$f_{ctk;0,05} = 0,7 f_{ctm}$	
$f_{ctk;0,95} = 1,3 f_{ctm}$	
$E_{cm} = 22[f_{cm}/10]^{0,3}$	in [GPa]
$\epsilon_{c1} = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,53}$	$f_{ck} \geq 50 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
$\epsilon_{cu} = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$	$f_{ck} \geq 50 \text{ [N/mm}^2\text{]}$
$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$	
$f_{ctd} = f_{ctk;0,05} / \gamma_c$	
$\sigma_{c,caratt.} = 0,6 f_{ck}$	
$\sigma_{c,q.p.} = 0,45 f_{ck}$	

Resistenza caratteristica cubica	R_{ck}	35.00	[N/mm ²]
Resistenza caratteristica cilindrica	f_{ck}	28.00	[N/mm ²]
Coefficiente di sicurezza parziale per il calcestruzzo	γ_c	1.50	[-]
Coefficiente che tiene conto degli effetti di lungo termine	α_{cc}	0.85	[-]
Valore medio della resistenza a compressione cilindrica	f_{cm}	36.00	[N/mm ²]
Valore medio della resistenza a trazione assiale del calcestruzzo	f_{ctm}	2.80	[N/mm ²]
Valore caratteristico della resistenza a trazione assiale (frattile 5%)	$f_{ctk;0,05}$	1.90	[N/mm ²]
Valore caratteristico della resistenza a trazione assiale (frattile 95%)	$f_{ctk;0,95}$	3.60	[N/mm ²]
Modulo di elasticità secante del calcestruzzo	E_{cm}	32308	[N/mm ²]
Deformazione di contrazione nel calcestruzzo alla tensione f_c	ϵ_{c1}	0.0020	[-]
Deformazione ultima di contrazione nel calcestruzzo	ϵ_{cu}	0.0035	[-]
Resistenza di progetto a compressione del calcestruzzo	f_{cd}	15.87	[N/mm ²]
Resistenza di progetto a trazione del calcestruzzo	f_{ctd}	1.29	[N/mm ²]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione caratteristica	$\sigma_{c,caratt.}$	16.80	[N/mm ²]
Tensione ammissibile nel calcestruzzo nella combinazione quasi permanente	$\sigma_{c,q.p.}$	12.60	[N/mm ²]

Classe di consistenza: S4-S5 (a seconda della specifica destinazione)

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 43
---	---	---------------

- S4 (consistenza fluida - slump da 160 a 210 mm) → per le struttura entro e fuori terra in genere;
- S5 (consistenza superfluida - slump \geq 220 mm) → per le parti di calcestruzzo a vista e di modesto spessore e per le pareti perimetrali dei serbatoi, relativa fondazione e soletta di copertura;

Classe di esposizione:

- XC3 (protezione contro corrosione armatura indotta da carbonatazione - umidità moderata: $a/c_{max} = 0,55$; dosaggio minimo di cemento (kg/m³) = 320 (280)) → per le strutture entro e fuori terra in genere;
- XC2 (protezione contro corrosione armatura indotta da carbonatazione - bagnato, raramente asciutto: $a/c_{max} = 0,60$; dosaggio minimo di cemento (kg/m³) = 300 (280)) → per le pareti perimetrali dei serbatoi, relativa fondazione e soletta di copertura;

Copriferro: 3.5 cm → per le struttura entro e fuori terra in genere;

Tipo di aggregato: normale, di origine naturale o artificiale;

Dimensione dell'aggregato: diametro massimo circa 20 mm;

Qualità dei componenti:

- La sabbia deve essere viva, con grani assortiti in grossezza da 0 a 3 mm, non proveniente da rocce in decomposizione, scricchiolante alla mano, pulita, priva di materie organiche, melmose, terrose e di salsedine.
- La ghiaia deve contenere elementi assortiti, di dimensioni fino a circa 20 mm, resistenti e non gelivi, non friabili, scevri di sostanze estranee.

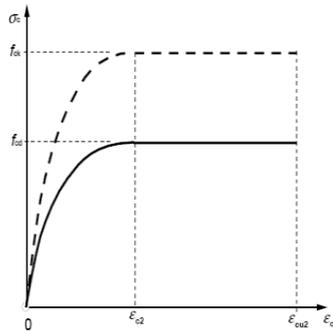
Prescrizioni:

Utilizzare cemento pozzolanico CEMIV secondo UNI EN 197-1 → per le parti di calcestruzzo a vista e di modesto spessore e per le pareti perimetrali dei serbatoi, relativa fondazione e soletta di copertura.

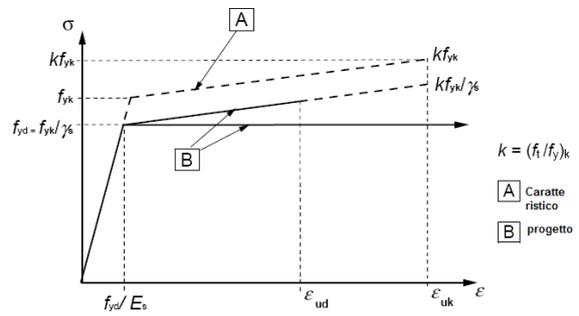
Legami costitutivi:

I modelli di calcolo utilizzati per i materiali componenti il c.a. risultano rappresentativi della realtà fisica per la configurazione finale anche in funzione delle modalità e sequenze costruttive.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 44
--	--	----------------------



Legame Costitutivo di progetto del Calcestruzzo c.a. (Parabola - Rettangolo)



Legame Costitutivo di progetto dell'acciaio per c.a. (Elastico - Perfettamente Plastico o incrudente o duttilità limitata)

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 45
---	---	---------------

6.4. Geometria

SOTTO FONDAZIONE (magrone) Cabina di campo

Platee

Lv	N _{id}	Sp	B	L	A _{EI}
		[m]	[m]	[m]	[m ²]
Fondazione	1	0,10	4,30	9,60	41,28

LEGENDA:

- Lv** Identificativo del livello, nella relativa tabella.
N_{id} Numero identificativo della platea.
Sp Spessore elemento.
B Larghezza elemento.
L Lunghezza elemento
A_{EI} Superficie elemento.

PLATEA Storage Power Station

Platee

Lv	N _{id}	Sp	B	L	A _{EI}
		[m]	[m]	[m]	[m ²]
Fondazione	1	0,40	3,50	7,00	24,50

LEGENDA:

- Lv** Identificativo del livello, nella relativa tabella.
N_{id} Numero identificativo della platea.
Sp Spessore elemento.
B Larghezza elemento.
L Lunghezza elemento

PLATEA Storage Container

Platee

Lv	N _{id}	Sp	B	L	A _{EI}
		[m]	[m]	[m]	[m ²]
Fondazione	1	0,40	3,50	13,50	47,25

LEGENDA:

- Lv** Identificativo del livello, nella relativa tabella.
N_{id} Numero identificativo della platea.
Sp Spessore elemento.
B Larghezza elemento.
L Lunghezza elemento

SOTTO FONDAZIONE (magrone) Cabina di raccolta

Magrone

Lv	N _{id}	Sp	B	L	A _{EI}
		[m]	[m]	[m]	[m ²]
Sottofondazione	1	0,10	4,50	21	94,50

LEGENDA:

- Lv** Identificativo del livello, nella relativa tabella.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 46
---	---	---------------

Magrone

Lv	N _{id}	Sp	B	L	A _{El}
		[m]	[m]	[m]	[m ²]

N_{id} Numero identificativo della platea.

Sp Spessore elemento.

B Larghezza elemento.

L Lunghezza elemento

A_{El} Superficie elemento.

6.5. Analisi dei carichi

La valutazione dei carichi e dei sovraccarichi è effettuata in accordo con le disposizioni del punto 3.1 del D.M. 2018. In particolare, è stato fatto utile 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, rispettivamente.

La valutazione dei carichi permanenti e dei sovraccarichi sarà effettuata sulle dimensioni definitive e in relazione carichi delle macchine che verranno installate in fase di progettazione esecutiva.

Per i basamenti di cui sopra si considerano, in via preliminare, i seguenti carichi:

Storage Container: peso stimato 45.000 kg

Storage Power Station: peso stimato 35.000 kg

6.6. Azioni sulla struttura

I calcoli e le verifiche sono condotti con il metodo semiprobabilistico degli stati limite secondo le indicazioni del D.M. 2018. I carichi agenti sui solai, derivanti dall'analisi dei carichi, vengono ripartiti dal programma di calcolo in modo automatico sulle membrature (travi, pilastri, pareti, solette, platee, ecc.).

6.6.1. Stato Limite di Salvaguardia della Vita

Le azioni sulla costruzione sono cumulate in modo da determinare condizioni di carico tali da risultare più sfavorevoli ai fini delle singole verifiche, tenendo conto della probabilità ridotta di intervento simultaneo di tutte le azioni con i rispettivi valori più sfavorevoli, come consentito dalle norme vigenti.

Per gli stati limite ultimi sono adottate le combinazioni del tipo:

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 47
---	---	---------------

$$g_{G1} \cdot G_1 + g_{G2} \cdot G_2 + g_P \cdot P + g_{Q1} \cdot Q_{K1} + g_{Q2} \cdot y_{02} \cdot Q_{K2} + g_{Q3} \cdot y_{03} \cdot Q_{K3} + \dots \quad (1)$$

dove:

G1 rappresenta il peso proprio di tutti gli elementi strutturali; peso proprio del terreno, quando pertinente; forze indotte dal terreno (esclusi gli effetti di carichi variabili applicati al terreno); forze risultanti dalla pressione dell'acqua (quando si configurino costanti nel tempo);

G2 rappresenta il peso proprio di tutti gli elementi non strutturali;

P rappresenta l'azione di pretensione e/o precompressione;

Q azioni sulla struttura o sull'elemento strutturale con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi fra loro nel tempo:

- di lunga durata: agiscono con un'intensità significativa, anche non continuativamente, per un tempo non trascurabile rispetto alla vita nominale della struttura;
- di breve durata: azioni che agiscono per un periodo di tempo breve rispetto alla vita nominale della struttura;

Q_{ki} rappresenta il valore caratteristico della i-esima azione variabile;

g_g, g_q, g_p coefficienti parziali come definiti nella Tab. 2.6.I del D.M. 2018;

y_{0i} sono i coefficienti di combinazione per tenere conto della ridotta probabilità di concomitanza delle azioni variabili con i rispettivi valori caratteristici.

Le **8 combinazioni** risultanti sono costruite a partire dalle sollecitazioni caratteristiche calcolate per ogni condizione di carico elementare: ciascuna condizione di carico accidentale, a rotazione, è considerata sollecitazione di base (Q_{k1} nella formula precedente).

In zona sismica, oltre alle sollecitazioni derivanti dalle generiche condizioni di carico statiche, devono essere considerate anche le sollecitazioni derivanti dal sisma. L'azione sismica è combinata con le altre azioni secondo la seguente relazione:

$$G_1 + G_2 + P + E + S y_{2i} Q_{ki}$$

dove:

E rappresenta l'azione sismica per lo stato limite in esame;

G₁ rappresenta peso proprio di tutti gli elementi strutturali;

G₂ rappresenta il peso proprio di tutti gli elementi non strutturali;

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 48
---	---	---------------

P rappresenta l'azione di pretensione e/o precompressione;

y_{2i} coefficiente di combinazione delle azioni variabili Q_i ;

Q_{ki} valore caratteristico dell'azione variabile Q_i .

Gli effetti dell'azione sismica sono valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:

$$GK+Si(.y_{2i} \cdot Q_{ki}).$$

I valori dei coefficienti y_{2i} sono riportati nella seguente tabella:

Categoria/Azione	y_{2i}
Categoria A - Ambienti ad uso residenziale	0,3
Categoria B - Uffici	0,3
Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento	0,6
Categoria D - Ambienti ad uso commerciale	0,6
Categoria E - Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	0,8
Categoria F - Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,6
Categoria G - Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,3
Categoria H - Coperture	0,0
Categoria I - Coperture praticabili	*
Categoria K - Coperture per usi speciali (impianti, eliporti, ...)	*
Vento	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,2
Variazioni termiche	0,0
* "Da valutarsi caso per caso"	

Le verifiche strutturali e geotecniche delle fondazioni sono effettuate con l'**Approccio 2** come definito al §2.6.1 del D.M. 2018, attraverso la combinazione **A1+M1+R3**.

Le azioni sono amplificate tramite i coefficienti della colonna A1 definiti nella Tab. 6.2.I del D.M. 2018.

I valori di resistenza del terreno sono ridotti tramite i coefficienti della colonna M1 definiti nella Tab. 6.2.II del D.M. 2018.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 49
---	---	---------------

I valori calcolati delle resistenze totali dell'elemento strutturale sono divisi per i coefficienti R3 della Tab. 6.4.I del D.M. 2018 per le fondazioni superficiali.

6.6.2. Stato Limite di Danno

L'azione sismica, ottenuta dallo spettro di progetto per lo Stato Limite di Danno, è stata combinata con le altre azioni mediante una relazione del tutto analoga alla precedente:

$$G1+G2+P+E+Siy2i \cdot Qki;$$

dove:

- E rappresenta l'azione sismica per lo stato limite in esame;
- G₁ rappresenta peso proprio di tutti gli elementi strutturali;
- G₂ rappresenta il peso proprio di tutti gli elementi non strutturali;
- P rappresenta l'azione di pretensione e/o precompressione;
- y_{2i} coefficiente di combinazione delle azioni variabili Q_i;
- Q_{ki} valore caratteristico dell'azione variabile Q_i.

Gli effetti dell'azione sismica sono valutati tenendo conto delle masse associate ai seguenti carichi gravitazionali:

$$G_K+S_i(y_{2i} \cdot Q_{ki}).$$

I valori dei coefficienti y_{2i} sono riportati nella tabella di cui allo SLV.

6.6.3. Stato Limite di Esercizio

Allo Stato Limite di Esercizio le sollecitazioni con cui sono state semiprogettate le aste in c.a. sono state ricavate applicando le formule riportate nel D.M. 2018 al §2.5.3. Per le verifiche agli stati limite di esercizio, a seconda dei casi, si fa riferimento alle seguenti combinazioni di carico:

rara	frequente	quasi permanente
$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P + Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{0i} \cdot Q_{ki}$	$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki}$	$\sum_{j \geq 1} G_{kj} + P + \sum_{i > 1} \psi_{2i} \cdot Q_{ki}$

dove:

- G_{kj}: valore caratteristico della j-esima azione permanente;
- P_{kh}: valore caratteristico della h-esima deformazione impressa;
- Q_{ki}: valore caratteristico dell'azione variabile di base di ogni combinazione;

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 50
---	---	---------------

Q_{ki} : valore caratteristico della i-esima azione variabile;

y_{0i} : coefficiente atto a definire i valori delle azioni ammissibili di durata breve ma ancora significativi nei riguardi della possibile concomitanza con altre azioni variabili;

y_{1i} : coefficiente atto a definire i valori delle azioni ammissibili ai frattili di ordine 0,95 delle distribuzioni dei valori istantanei;

y_{2i} : coefficiente atto a definire i valori quasi permanenti delle azioni ammissibili ai valori medi delle distribuzioni dei valori istantanei.

Ai coefficienti y_{0i} , y_{1i} , y_{2i} sono attribuiti i seguenti valori:

Azione	y_{0i}	y_{1i}	y_{2i}
Categoria A – Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B – Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C – Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D – Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E – Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F – Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G – Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H – Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

In maniera analoga a quanto illustrato nel caso dello SLU le combinazioni risultanti sono state costruite a partire dalle sollecitazioni caratteristiche calcolate per ogni condizione di carico; a turno ogni condizione di carico accidentale è stata considerata sollecitazione di base [Q_{k1} nella formula (1)], con ciò dando origine a tanti valori combinati. Per ognuna delle combinazioni ottenute, in funzione dell'elemento (trave, pilastro, etc..) sono state effettuate le verifiche allo SLE (tensioni, deformazioni e fessurazione).

6.7. Progetto e verifica degli elementi strutturali

La verifica degli elementi allo SLU avviene col seguente procedimento:

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 51
---	---	---------------

- si costruiscono le combinazioni non sismiche in base al D.M. 2018, ottenendo un insieme di sollecitazioni;
- si combinano tali sollecitazioni con quelle dovute all'azione del sisma secondo quanto indicato nel §2.5.3, relazione (2.5.5) del D.M. 2018;
- per sollecitazioni semplici (flessione retta, taglio, etc.) si individuano i valori minimo e massimo 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.

6.7.1. Verifiche di resistenza

Elementi in C.A.

Illustriamo, in dettaglio, il procedimento seguito in presenza di pressoflessione deviata (pilastri e trave di sezione generica):

- per tutte le terne M_x , M_y , N , individuate secondo la modalità precedentemente illustrata, si calcola il coefficiente di sicurezza in base alla formula 4.1.19 del D.M. 2018, effettuando due verifiche a pressoflessione retta con la seguente formula:

$$\left(\frac{M_{Ex}}{M_{Rx}}\right)^\alpha + \left(\frac{M_{Ey}}{M_{Ry}}\right)^\alpha \leq 1$$

dove:

- M_{Ex} , M_{Ey} sono i valori di calcolo delle due componenti di flessione retta dell'azione attorno agli assi di flessione X ed Y del sistema di riferimento locale;
- M_{Rx} , M_{Ry} sono i valori di calcolo dei momenti resistenti di pressoflessione retta corrispondenti allo sforzo assiale N_{Ed} valutati separatamente attorno agli assi di flessione.

L'esponente può dedursi in funzione della geometria della sezione, della percentuale meccanica dell'armatura e della sollecitazione di sforzo normale agente.

- se per almeno una di queste terne la relazione 4.1.19 non è rispettata, si incrementa l'armatura variando il diametro delle barre utilizzate e/o il numero delle stesse in maniera iterativa fino a quando la suddetta relazione è rispettata per tutte le terne considerate.

Sempre quanto concerne il progetto degli elementi in c.a. illustriamo in dettaglio il procedimento seguito per le travi verificate/semiprogettate a pressoflessione retta:

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 52
---	---	---------------

- per tutte le coppie Mx, N, individuate secondo la modalità precedentemente illustrata, si calcola il coefficiente di sicurezza in base all'armatura adottata;
- se per almeno una di queste coppie esso è inferiore all'unità, si incrementa l'armatura variando il diametro delle barre utilizzate e/o il numero delle stesse in maniera iterativa fino a quando il coefficiente di sicurezza risulta maggiore o al più uguale all'unità per tutte le coppie considerate.

Nei "Tabulati di calcolo", per brevità, non potendo riportare una così grossa mole di dati, si riporta la terna Mx, My, N, o la coppia Mx, N che ha dato luogo al minimo coefficiente di sicurezza.

Una volta semiprogettate le armature allo SLU, si procede alla verifica delle sezioni allo Stato Limite di Esercizio con le sollecitazioni derivanti dalle combinazioni rare, frequenti e quasi permanenti; se necessario, le armature vengono integrate per far rientrare le tensioni entro i massimi valori previsti.

Successivamente si procede alle verifiche alla deformazione, quando richiesto, ed alla fessurazione che, come è noto, sono tese ad assicurare la durabilità dell'opera nel tempo.

6.7.2. Spinta del terreno

Il calcolo della spinta del terrapieno, in condizioni ***statiche***, viene effettuato con:

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot K \cdot H^2;$$

in cui:

g: peso unità di volume del terreno;

H: altezza del terrapieno;

K: coefficiente di spinta.

In condizioni ***sismiche*** la formula precedente diventa:

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot (1 \pm k_v) \cdot K \cdot H^2;$$

con:

$K_v = \pm 0,5 \cdot k_h$ = coefficiente di intensità sismico verticale;

$K_h = b_m \cdot S_T \cdot S_S \cdot a_g / g$ = coefficiente di intensità sismico orizzontale;

b_m = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

S_T = coefficiente di amplificazione topografico;

S_S = coefficiente di amplificazione stratigrafico;

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 53
---	---	---------------

a_g/g = coefficiente di accelerazione al suolo.

Nel caso di muri liberi di traslare o di ruotare intorno al piede (*spostamenti consentiti*), si assume che la spinta dovuta al sisma agisca nello stesso punto di quella statica (andamento triangolare delle tensioni). In questo caso il coefficiente b_m assume i valori indicati al §7.11.6.2.1 del D.M. 2018.

Per muri che non sono in grado di subire spostamenti relativi rispetto al terreno (*spostamenti non consentiti*), il coefficiente b_m assume valore unitario. In questo caso si assume che la spinta sia applicata a metà altezza del muro (andamento costante delle tensioni).

Il calcolo del coefficiente di spinta K può essere effettuato, a scelta dell'utente, nei seguenti modi:

Condizioni statiche	Condizioni sismiche
Attiva	
Passiva	Attiva
Riposo	Passiva
Utente	

Spinta Attiva

Viene calcolato secondo la formulazione di Mononobe-Okabe [OPCM 3274 par. 4.4.3 - EN 1998-5 (EC8) Appendice E]:

$$K = \frac{\text{sen}^2(\psi + \phi - \theta)}{\cos \theta \cdot \text{sen}^2 \psi \cdot \text{sen}(\psi - \theta - \delta) \cdot \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi + \delta) \cdot \text{sen}(\phi - \beta - \theta)}{\text{sen}(\psi - \theta - \delta) \cdot \text{sen}(\psi + \beta)}} \right]^2} \quad (\text{per } b \leq f-q);$$

$$K = \frac{\text{sen}^2(\psi + \phi - \theta)}{\cos \theta \cdot \text{sen}^2 \psi \cdot \text{sen}(\psi - \theta - \delta)} \quad (\text{per } b > f-q);$$

dove:

f = angolo di attrito del terreno;

y = angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale della parete del muro rivolta a monte (assunto pari a 90°);

b = angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale della superficie del terrapieno (assunto pari a zero);

d = valore di calcolo dell'angolo di resistenza a taglio tra terreno e muro (assunto pari a zero);

q = angolo definito dalla seguente espressione (pari a zero in condizioni **statiche**):

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 54
---	---	---------------

$$\tan \theta = \frac{k_h}{1 \pm k_v}$$

Spinta Passiva

Viene calcolato secondo la formulazione di Mononobe-Okabe [OPCM 3274 par. 4.4.3 - EN 1998-5 (EC8) App. E]:

$$K = \frac{\sin^2(\psi + \phi - \theta)}{\cos \theta \cdot \sin^2 \psi \cdot \sin(\psi + \theta) \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sin \phi \cdot \sin(\phi + \beta - \theta)}{\sin(\psi + \beta) \cdot \sin(\psi + \theta)}} \right]^2}$$

Spinta a Riposo

Viene calcolato secondo la formulazione:

$$K = 1 - \text{senf.}$$

Spinta Utente

Va infine ricordato che il coefficiente di spinta K può essere altresì liberamente indicato dall'utente.

- **Terreno con Sovraccarico**

In caso di terreno in cui a tergo della parete agisce un sovraccarico (Q), viene calcolato il contributo:

$$Ds_Q = K \cdot Q.$$

- **Terreno con Coesione**

In caso di terreno dotato di coesione (c), viene calcolato il contributo:

$$\Delta \sigma_c = 2 \cdot c \cdot \sqrt{K}.$$

che può essere additivo (spinta passiva) o sottrattivo (spinta attiva/a riposo).

6.7.3. Spinta Idrostatica

Il calcolo della spinta idrostatica, in condizioni **statiche**, viene effettuato con:

$$E_w = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot H^2;$$

in cui:

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 55
---	---	---------------

g_w : peso unità di volume del liquido;

H: altezza della colonna di acqua.

Per quanto riguarda la sovraspinta idrostatica in regime ***sismico***, essa viene supposta costante lungo l'altezza ed è calcolata secondo la formulazione:

$$D_{s_w} = g_w \cdot S_T \cdot S_S \cdot a_g / g;$$

in cui:

S_T = coefficiente di amplificazione topografico;

S_S = coefficiente di amplificazione stratigrafico;

a_g/g = coefficiente di accelerazione al suolo.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 56
---	---	---------------

6.8. Terreno di fondazione

Le proprietà meccaniche dei terreni saranno definite mediante specifiche prove mirate alla misurazione della velocità delle onde di taglio negli strati del sottosuolo. In particolare, si calcola una velocità di propagazione equivalente delle onde di taglio con la seguente relazione (eq. [3.2.1] D.M. 2018):

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{S,i}}}$$

dove:

- h_i è lo spessore dell' i -simo strato;
- $V_{S,i}$ è la velocità delle onde di taglio nell' i -simo strato;
- N è il numero totale di strati investigati;
- H è la profondità del substrato con $V_S \geq 800$ m/s.

Le proprietà dei terreni, quindi, saranno ricondotte a quelle individuate nella seguente tabella, ponendo $H = 30$ m nella relazione precedente ed ottenendo il parametro $V_{S,30}$.

Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato

(Tab. 3.2.II D.M. 2018)

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le</i>

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 57
---	---	---------------

<i>categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>
--

Le costanti di sottofondo (alla Winkler) del terreno sono corrette secondo la seguente espressione:

$$K = c \cdot K_1;$$

dove:

K_1 = costante di Winkler del terreno riferita alla piastra standard di lato $b = 30$ cm;

c = coefficiente di correzione, funzione del comportamento del terreno e della particolare geometria degli elementi di fondazione. Nel caso di "Riduzione Automatica" è dato dalle successive espressioni (Rif. *Evaluation of coefficients of subgrade reaction K. Terzaghi, 1955 p. 315*):

$$c = \left[\frac{(B + b)}{2 \cdot B} \right]^2 \quad \text{per terreni incoerenti}$$

$$c = \left(\frac{L/B + 0,5}{1,5 \cdot L/B} \right) \cdot \frac{b}{B} \quad \text{per terreni coerenti}$$

Essendo:

$b = 0,30$ m, dimensione della piastra standard;

L = lato maggiore della fondazione;

B = lato minore della fondazione.

Nel caso di stratigrafia la costante di sottofondo utilizzata nel calcolo delle **sollecitazioni** è quella del terreno a contatto con la fondazione, mentre nel calcolo dei **cedimenti** la costante di sottofondo utilizzata è calcolata come media pesata delle costanti di sottofondo presenti nel volume significativo della fondazione.

6.8.1. Caratterizzazione geotecnica

Al fine della determinazione delle caratteristiche geotecniche dei terreni coinvolti nel "volume significativo" dell'opera in esame, saranno condotte delle prove geotecniche in sede di progetto esecutivo. I dati tecnici di seguito riportati, rappresentanti le proprietà meccaniche del terreno, sono stati stimati con un approccio cautelativo e sulla base dell'esperienza. Si rimanda alle prove geotecniche, in sede di esecutivo, la conferma dei valori ipotizzati.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRISOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 58
--	---	---------------

TERRENI

Terreni

N _{TRN}	g _T	g _{Ts}	K ₁			f	c _u	c'	E _d	E _{cu}	A _{S-B}	ST_P
			K _{1X}	K _{1Y}	K _{1Z}							
	[N/m ³]	[N/m ³]	[N/cm ³]	[N/cm ³]	[N/cm ³]	[°]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]		
Sabbia argillosa mediamente consolidata												
T001	18.000	18.000	60	60	200	25	0,000	0,000	60	0	0,000	NO

LEGENDA:

- N_{TRN}** Numero identificativo del terreno.
- g_T** Peso specifico del terreno.
- g_{Ts}** Peso specifico saturo del terreno.
- K₁** Valori della costante di Winkler riferita alla piastra Standard di lato b = 30 cm nelle direzioni degli assi del riferimento globale X (K_{1X}), Y (K_{1Y}), e Z (K_{1Z}).
- f** Angolo di attrito del terreno.
- c_u** Coesione non drenata.
- c'** Coesione efficace.
- E_d** Modulo edometrico.
- E_{cu}** Modulo elastico in condizione non drenate.
- A_{S-B}** Parametro "A" di Skempton-Bjerrum per pressioni interstiziali.
- ST_P** [S]: Il terreno è usato nella valutazione delle spinte a tergo delle pareti/muri controterra; [NO]: Il terreno NON è usato nella valutazione delle spinte a tergo delle pareti/muri controterra.

N.B. Nel caso di fondazioni dirette con stratigrafia, il calcolo del carico limite (q_{lim}) viene fatto su un terreno "equivalente" con parametri geotecnici calcolati come media pesata degli strati compresi tra la quota del piano di posa e la quota della profondità "significativa" (stabilita come "Multiplo della dimensione Significativa della fondazione").

$$\text{Parametro "J"} = \frac{\sum_{i=1}^n [\text{Parametro "J"} (\text{strato}, i) \cdot \text{Spessore} (\text{strato}, i)]}{\text{Profondità significativa}}$$

con i = 1, ..., n (numero di strati compresi tra la quota del piano di posa e la quota della profondità significativa).

6.8.2. Modellazione geotecnica

Ai fini del calcolo strutturale, il terreno sottostante l'opera viene modellato secondo lo schema di Winkler, cioè un sistema costituito da un letto di molle elastiche mutuamente indipendenti. Ciò consente di ricavare le rigidezze offerte dai manufatti di fondazione, siano queste profonde o superficiali, che sono state introdotte direttamente nel modello strutturale per tener conto dell'interazione opera/terreno.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 59
---	---	---------------

6.8.3. Scelta tipologica delle opere di fondazione

La tipologia delle opere di fondazione è consona alle caratteristiche meccaniche del terreno definite in base ai risultati delle indagini geognostiche.

Nel caso in esame, la struttura di fondazione è costituita da fondazioni dirette.

6.8.4. Verifiche di sicurezza

Nelle verifiche allo stato limite ultimo deve essere rispettata la condizione:

$$E_d \leq R_d$$

dove:

E_d è il valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione;

R_d è il valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico.

Le verifiche strutturali e geotecniche delle fondazioni sono effettuate con l'**Approccio 2** come definito al §2.6.1 del D.M. 2018, attraverso la combinazione **A1+M1+R3**. Le azioni sono amplificate tramite i coefficienti della colonna A1 (STR) definiti nella tabella 6.2.I del D.M. 2018.

Tabella 6.2.I - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni [cfr. D.M. 2018]

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente parziale g_F (o g_E)	A1 (STR)	A2 (GEO)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	g_{G1}	1,00	1,00
	Sfavorevole		1,30	1,00
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	g_{G2}	0,80	0,80
	Sfavorevole		1,50	1,30
Azioni variabili Q	Favorevole	g_{Qi}	0,00	0,00
	Sfavorevole		1,50	1,30

⁽¹⁾ Per i carichi permanenti G_2 si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti g_{G1}

I valori di resistenza del terreno sono ridotti tramite i coefficienti della colonna M1 definiti nella tabella 6.2.II del D.M. 2018.

Tabella 6.2.II - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno [cfr. D.M. 2018]

PARAMETRO GEOTECNICO	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale g_M	M1	M2
Tangente dell'angolo di resistenza a taglio	$\tan \varphi_k$	g_j'	1,00	1,25

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 60
---	---	---------------

Coesione efficace	c'_k	$g_{c'}$	1,00	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	g_{cu}	1,00	1,40
Peso dell'unità di volume	g_g	g_g	1,00	1,00

I valori calcolati delle resistenze totali dell'elemento strutturale sono stati divisi per i coefficienti R3 della tabella 6.4.I del D.M. 2018 per le fondazioni superficiali.

Tabella 6.4.I - Coefficienti parziali g_R per le verifiche agli stati limite ultimi di fondazioni superficiali.

Verifica	Coefficiente Parziale (R3)
Carico limite	$g_R = 2,3$
Scorrimento	$g_R = 1,1$

6.8.5. Carico limite fondazioni dirette

La formula del carico limite esprime l'equilibrio fra il carico applicato alla fondazione e la resistenza limite del terreno. Il carico limite è dato dalla seguente espressione:

$$q_{lim} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c \cdot b_c \cdot \Psi_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot g_q \cdot b_q \cdot \Psi_q + \frac{B'}{2} \cdot \gamma_f \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot g_\gamma \cdot b_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot r_\gamma$$

in cui:

c = coesione del terreno al disotto del piano di posa della fondazione;

$q = g \cdot D$ = pressione geostatica in corrispondenza del piano di posa della fondazione;

g = peso unità di volume del terreno al di sopra del piano di posa della fondazione;

D = profondità del piano di posa della fondazione;

B' = larghezza ridotta della suola di fondazione (vedi NB);

L = lunghezza della fondazione;

g_f = peso unità di volume del terreno al disotto del piano di posa della fondazione;

N_c, N_q, N_g = fattori di capacità portante;

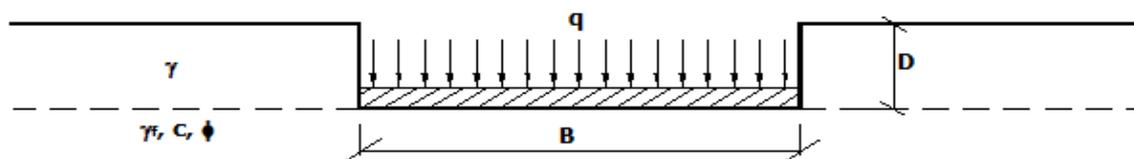
s, d, i, g, b, y, r = coefficienti correttivi.

NB: Se la risultante dei carichi verticali è eccentrica, B e L saranno ridotte rispettivamente di:

$$B' = B - 2 \cdot e_B \quad e_B = \text{eccentricità parallela al lato di dimensione } B;$$

$$L' = L - 2 \cdot e_L \quad e_L = \text{eccentricità parallela al lato di dimensione } L;$$

con $B' \leq L'$.



Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 61
---	---	---------------

Calcolo dei fattori N_c, N_q, N_g

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, f = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, f \neq 0$)
$N_c = 2 + p$	$N_c = (N_q - 1) \cdot \cot f$
$N_q = 1$	$N_q = K_p \cdot e^{p \cdot \tan f}$
$N_g = 0$ se $w = 0$ $N_g = -2 \cdot \sin w$ se $w \neq 0$	$N_g = 2 \cdot (N_q + 1) \cdot \tan f$

$k_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$ è il coefficiente di spinta passiva di Rankine;

f = angolo di attrito del terreno al disotto del piano di posa della fondazione;

w = angolo di inclinazione del piano campagna.

Calcolo dei fattori di forma s_c, s_q, s_g

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, f = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, f \neq 0$)
$s_c = 1 + \frac{B'}{(2 + \pi) \cdot L'}$	$s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \cdot \frac{B'}{L'}$
$s_q = 1$	$s_q = 1 + \frac{B'}{L'} \cdot \tan \phi$
$s_\gamma = 1 - 0.40 \cdot \frac{B'}{L'}$	$s_\gamma = 1 - 0.40 \cdot \frac{B'}{L'}$

con $B'/L' < 1$.

Calcolo dei fattori di profondità del piano di posa d_c, d_q, d_g

Si definisce il seguente parametro:

$$K = \frac{D}{B'} \quad \text{se} \quad \frac{D}{B'} \leq 1;$$

$$K = \arctg \left(\frac{D}{B'} \right) \quad \text{se} \quad \frac{D}{B'} > 1.$$

Terreni puramente coesivi	Terreni dotati di attrito e coesione
----------------------------------	---

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 62
---	---	---------------

$(c \neq 0, f = 0)$	$(c \neq 0, f \neq 0)$
$d_c = 1 + 0,4 \cdot K$	$d_c = d_q - \frac{1 - d_q}{N_c \cdot \tan \phi}$
$d_q = 1$	$d_q = 1 + 2 \cdot \tan \phi \cdot (1 - \sin \phi)^2 \cdot K$
$d_g = 1$	$d_g = 1$

Calcolo dei fattori di inclinazione del carico i_c, i_q, i_g

Si definisce il seguente parametro:

$$m = m_B = \frac{2 + B/L}{1 + B/L} \quad \text{se la forza H è parallela alla direzione trasversale della fondazione}$$

$$m = m_L = \frac{2 + L/B}{1 + L/B} \quad \text{se la forza H è parallela alla direzione longitudinale della fondazione}$$

$$m = m_q = m_L \cdot \cos^2 q + m_B \cdot \sin^2 q \quad \text{se la forza H forma un angolo } q \text{ con la direzione longitudinale della fondazione}$$

Terreni coesivi $(c \neq 0, f = 0)$	Terreni incoerenti $(c = 0, f \neq 0)$	Terreni dotati di attrito e coesione $(c \neq 0, f \neq 0)$
$i_c = 1 - \frac{m \cdot H}{c \cdot N_c \cdot B \cdot L}$	$i_c = 0$	$i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_c \cdot \tan \phi}$
$i_q = 1$	$i_q = \left(1 - \frac{H}{V}\right)^m$	$i_q = \left(1 - \frac{H}{V + B \cdot L \cdot c \cdot \cot \phi}\right)^m$
$i_g = 0$	$i_g = \left(1 - \frac{H}{V}\right)^{m+1}$	$i_g = \left(1 - \frac{H}{V + B \cdot L \cdot c \cdot \cot \phi}\right)^{m+1}$

dove:

H = componente orizzontale dei carichi agente sul piano di posa della fondazione;

V = componente verticale dei carichi agente sul piano di posa della fondazione.

Calcolo dei fattori di inclinazione del piano di campagna b_c, b_q, b_g

Indicando con w la pendenza del piano campagna, si ha:

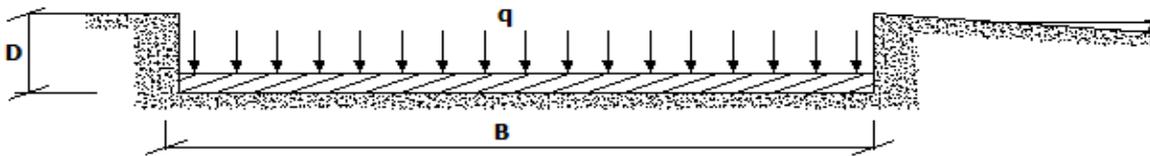
Terreni puramente coesivi $(c \neq 0, f = 0)$	Terreni dotati di attrito e coesione $(c \neq 0, f \neq 0)$
--	--

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 63
---	---	---------------

$b_c = 1 - \frac{2 \cdot \omega}{(2 + \pi)}$	$b_c = b_q - \frac{1 - b_q}{N_c \cdot \tan \phi}$
$b_q = (1 - \tan w)^2 \cdot \cos w$	$b_q = (1 - \tan w)^2 \cdot \cos w$
$b_g = b_q / \cos w$	$b_g = b_q / \cos w$

Per poter applicare tali coefficienti correttivi deve essere verificata la seguente condizione:

$$w < f; \quad w < 45^\circ.$$



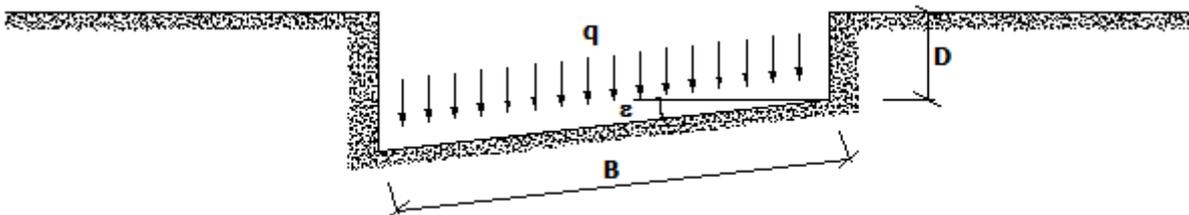
Calcolo dei fattori di inclinazione del piano di posa g_c, g_q, g_g

Indicando con e la pendenza del piano di posa della fondazione, si ha:

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, f = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, f \neq 0$)
$g_c = 1 - \frac{2 \cdot \varepsilon}{(2 + \pi)}$	$g_c = g_q - \frac{1 - g_q}{N_c \cdot \tan \phi}$
$g_q = 1$	$g_q = (1 - e \cdot \tan f)^2$
$g_g = 1$	$g_g = g_q$

Per poter applicare tali coefficienti correttivi deve essere verificata la seguente condizione:

$$e < 45^\circ$$



Calcolo dei fattori di riduzione per rottura a punzonamento y_c, y_q, y_g

Si definisce l'indice di rigidità del terreno come:

$$I_r = \frac{G}{c + \sigma \cdot \tan \phi}$$

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 64
---	---	---------------

dove:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \text{modulo d'elasticità tangenziale del terreno};$$

E = modulo elastico del terreno (nei calcoli è utilizzato il modulo edometrico);

n = modulo di Poisson. Sia in condizioni non drenate che drenate è assunto pari a 0,5 (a vantaggio di sicurezza);

s= tensione litostatica alla profondità D+B/2.

La rottura a punzonamento si verifica quando i coefficienti di punzonamento y_c , y_q , y_g sono inferiori all'unità; ciò accade quando l'indice di rigidezza I_r si mantiene inferiore al valore critico:

$$I_r < I_{r,crit} = \frac{1}{2} \cdot e^{\left[\left(3.3 - 0.45 \cdot \frac{B}{L} \right) \cdot \cot \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \right]}$$

Terreni puramente coesivi (c≠0, f=0)	Terreni dotati di attrito e coesione (c≠0, f≠0)
$\psi_c = 0.32 + 0.12 \cdot \frac{B'}{L'} + 0.6 \cdot \text{Log}(I_r)$	$\psi_c = \psi_q - \frac{1 - \psi_q}{N_c \cdot \tan \phi}$
$Y_q = 1$	$\psi_q = e^{\left\{ \left(0.6 \cdot \frac{B'}{L'} - 4.4 \right) \cdot \tan \phi + \frac{3.07 \cdot \sin \phi \cdot \text{Log}(2 \cdot I_r)}{1 + \sin \phi} \right\}}$
$Y_g = 1$	$Y_g = Y_q$

Correzione per fondazione tipo piastra

Bowles, al fine di limitare il contributo del termine "B·N_g", che per valori elevati di B porterebbe ad ottenere valori del carico limite prossimi a quelli di una fondazione profonda, propone il seguente fattore di riduzione r_g :

$$r_g = 1 - 0.25 \cdot \text{Log}(B/2) \quad \text{con } B \geq 2 \text{ m}$$

Nella tabella sottostante sono riportati una serie di valori del coefficiente r_g al variare della larghezza dell'elemento di fondazione.

B [m]	2	2.5	3	3.5	4	5	10	20	100
r_g	1,00	0,97	0,95	0,93	0,92	0,90	0,82	0,75	0,57

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 65
---	---	---------------

Questo coefficiente assume particolare importanza per fondazioni larghe con rapporto D/B basso, caso nel quale il termine "B·N_g" è predominante.

Calcolo del carico limite in condizioni non drenate

L'espressione generale del carico limite, valutato in termini di *tensioni totale*, diventa:

$$q_{lim} = c_u \cdot (2 + \pi) \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c \cdot b_c + q + \frac{B'}{2} \cdot \gamma_{sat} \cdot B' \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot r_\gamma$$

dove:

c_u = coesione non drenata;

γ_{sat} = peso unità di volume del terreno in condizioni di saturazione.

N.B: Nel calcolo in condizioni non drenate (situazione molto rara per un terreno incoerente) si assume, sempre e comunque, che l'angolo di attrito f sia nullo ($f = 0$).

Fattori correttivi al carico limite in presenza di sisma

L'azione del sisma si traduce in accelerazioni nel sottosuolo (**effetto cinematico**) e nella fondazione, per l'azione delle forze d'inerzia generate nella struttura in elevazione (**effetto inerziale**).

Nell'analisi pseudo-statica, modellando l'azione sismica attraverso la sola componente orizzontale, tali effetti possono essere portati in conto mediante l'introduzione di coefficienti sismici rispettivamente denominati K_{hi} e K_{hk} , il primo definito dal rapporto tra le componenti orizzontale e verticale dei carichi trasmessi in fondazione ed il secondo funzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

La formula generale del carico limite si modifica nel seguente modo:

$$q_{lim} = c \cdot N_c \cdot s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c \cdot b_c \cdot \Psi_c \cdot z_c + q \cdot N_q \cdot s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot g_q \cdot b_q \cdot \Psi_q \cdot z_q + \frac{B'}{2} \cdot \gamma_f \cdot N_\gamma \cdot s_\gamma \cdot d_\gamma \cdot i_\gamma \cdot g_\gamma \cdot b_\gamma \cdot \Psi_\gamma \cdot r_\gamma \cdot z_\gamma \cdot c_\gamma$$

in cui, oltre ai termini già precedentemente indicati, si sono introdotti i seguenti termini:

z_c, z_q, z_g = coefficienti correttivi dovuti all'effetto inerziale;

c_g = coefficiente correttivo dovuto all'effetto cinematico.

Calcolo del fattore correttivo dovuto all'effetto cinematico c_g

L'effetto cinematico modifica il solo coefficiente N_g in funzione del coefficiente sismico K_{hk} che è pari a:

$$K_{hk} = b_s \cdot S_s \cdot S_T \cdot a_g / g;$$

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRI SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 66
---	---	---------------

dove:

b_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

g = accelerazione di gravità;

S_s = coefficiente di amplificazione stratigrafica;

S_T = coefficiente di amplificazione topografica;

a_g = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

I valori di b_s sono riportati nella seguente tabella:

	CATEGORIA DI SOTTOSUOLO	
	A	B,C,D,E
	b_s	b_s
$0,2 < a_g(g) \leq 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g(g) \leq 0,2$	0,27	0,24
$a_g(g) \leq 0,1$	0,20	0,20

Il fattore correttivo dovuto all'effetto cinematico c_g è, pertanto, determinato con la seguente relazione:

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, f = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, f \neq 0$)
$c_g = 1$	$c_g = \left(1 - \frac{K_{hk}}{\tan \phi}\right)^{0.45}$ se $\frac{K_{hk}}{\tan \phi} < 1$, altrimenti $c_g = 0$

Calcolo dei fattori correttivi dovuti all'effetto inerziale Z_c, Z_q, Z_g

L'effetto inerziale produce variazioni di tutti i coefficienti di capacità portante del carico limite in funzione del coefficiente sismico K_{hi} .

Tali effetti correttivi vengono valutati con la teoria di **Paolucci - Pecker** attraverso le seguenti relazioni:

Terreni puramente coesivi ($c \neq 0, f = 0$)	Terreni dotati di attrito e coesione ($c \neq 0, f \neq 0$)	
$Z_c = Z_q = Z_g = 1$	$Z_c = 1 - 0,32 \cdot K_{hi}$	se $z_c > 0$ altrimenti $z_c = 0$
	$z_y = z_q = \left(1 - \frac{K_{hi}}{\tan \phi}\right)^{0.35}$	se $\frac{K_{hi}}{\tan \phi} < 1$ altrimenti $z_g = z_q = 0$

dove:

K_{hi} è ricavato dallo spettro di progetto allo SLV attraverso la relazione:

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRICOLA SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 67
---	---	---------------

$$K_{hi} = S_S \cdot S_T \cdot a_g / g;$$

i cui termini sono stati precedentemente precisati.

Si fa notare che il coefficiente sismico K_{hi} coincide con l'ordinata dello spettro di progetto allo SLU per $T = 0$ ed è indipendente dalle combinazioni di carico.

Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi (SLU)

Di seguito si riporta una tabella riepilogativa relativa alla verifica dello stato limite di collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno.

Si precisa che il valore relativo alla colonna $Q_{d,Rd}$, di cui nella tabella seguente, è da intendersi come il valore di progetto della resistenza R_d , ossia il rapporto fra il carico limite q_{lim} (calcolato come sopra esposto) ed il valore del coefficiente parziale di sicurezza g_R relativo alla capacità portante del complesso terreno-fondazione, in relazione all'approccio utilizzato. Nel caso in esame il coefficiente parziale di sicurezza g_R è stato assunto pari a 2,3 (tabella 6.4.I del D.M. 2018).

Si precisa che, nella sottostante tabella:

- la coppia Q_{Ed} e $Q_{d,Rd}$ è relativa alla combinazione di carico, fra tutte quelle esaminate, che dà luogo al minimo coefficiente di sicurezza (CS);
- nelle colonne "per N_q , per N_c e per N_g ", relative ai "Coef. Cor. Terzaghi", viene riportato il prodotto tra i vari coefficienti correttivi presenti nell'espressione generale del carico limite. Ad esempio si è posto:

$$\text{Coef. Cor. Terzaghi per } N_q = s_q \cdot d_q \cdot i_q \cdot g_q \cdot b_q \cdot y_q \cdot z_q$$

$$\text{Coef. Cor. Terzaghi per } N_c = s_c \cdot d_c \cdot i_c \cdot g_c \cdot b_c \cdot y_c \cdot z_c$$

$$\text{Coef. Cor. Terzaghi per } N_g = s_g \cdot d_g \cdot i_g \cdot g_g \cdot b_g \cdot y_g \cdot r_g \cdot z_g \cdot c_g$$

6.9. Verifiche

6.9.1. Platea Storage Power Station

VERIFICHE CARICO LIMITE FONDAZIONI DIRETTE ALLO SLU

Verifiche Carico Limite fondazioni dirette allo SLU																
Id _{Fnd}	CS	L _x	L _y	R _{tz}	Z _{p,cmp}	Z _{Fld}	Cmp T	C. Terzaghi						Q _{Ed}	Q _{Rd}	R _f
								per N _q	per N _c	per N _g	N _q	N _c	N _g			
		[m]	[m]	[°]	[m]	[m]							[N/mm ²]	[N/mm ²]		
Platea 1	2,84	7,10	3,50	180,00	0,40	-	NON Coesivo	1,29	0,00	0,75	10,66	20,72	10,88	0,060	0,171	NO

LEGENDA:

Id_{Fnd} Descrizione dell'oggetto di fondazione al quale è riferita la verifica.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRICOLA SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 68
---	---	---------------

Verifiche Carico Limite fondazioni dirette allo SLU

Id _{Fnd}	CS	L _X	L _Y	R _{tz}	Z _{P.comp}	Z _{Fld}	Cmp T	C. Terzaghi						Q _{Ed}	Q _{Rd}	R _f
								per N _q	per N _c	per N _g	N _q	N _c	N _g			
		[m]	[m]	[°]	[m]	[m]								[N/mm ²]	[N/mm ²]	

- CS** Coefficiente di sicurezza ([NS] = Non Significativo se $CS \geq 100$; [VNR]= Verifica Non Richiesta; Informazioni aggiuntive sulla condizione: [V] = statica; [E] = eccezionale; [S] = sismica; [N] = sismica non lineare).
- L_{X/Y}** Dimensioni dell'elemento di fondazione.
- R_{tz}** Angolo compreso tra l'asse X e il lato più lungo del minimo rettangolo che delimita il poligono della platea.
- Z_{P.comp}** Profondità di posa dell'elemento di fondazione dal piano campagna.
- Z_{Fld}** Profondità della falda dal piano campagna.
- Cmp T** Classificazione del comportamento del terreno ai fini del calcolo.
- C.** Coefficienti correttivi per la formula di Terzaghi.
- Terzaghi**
- Q_{Ed}** Carico di progetto sul terreno.
- Q_{Rd}** Resistenza di progetto del terreno.
- R_f** [SI] = elemento con presenza di rinforzo; [NO] = elemento senza rinforzo.

VERIFICHE CARICO LIMITE FONDAZIONI DIRETTE ALLO SLD

Verifiche Carico Limite fondazioni dirette allo SLD

Id _{Fnd}	CS	L _X	L _Y	R _{tz}	Z _{P.comp}	Z _{Fld}	Cmp T	C. Terzaghi						Q _{Ed}	Q _{Rd}	R _f
								per N _q	per N _c	per N _g	N _q	N _c	N _g			
		[m]	[m]	[°]	[m]	[m]								[N/mm ²]	[N/mm ²]	
Platea 1	9,10	7,10	3,50	180,00	0,40	-	NON Coesivo	1,29	0,00	0,75	10,66	20,72	10,88	0,024	0,218	NO

LEGENDA:

- Id_{Fnd}** Descrizione dell'oggetto di fondazione al quale è riferita la verifica.
- CS** Coefficiente di sicurezza ([NS] = Non Significativo se $CS \geq 100$; [VNR]= Verifica Non Richiesta; Informazioni aggiuntive sulla condizione: [V] = statica; [E] = eccezionale; [S] = sismica; [N] = sismica non lineare).
- L_{X/Y}** Dimensioni dell'elemento di fondazione.
- R_{tz}** Angolo compreso tra l'asse X e il lato più lungo del minimo rettangolo che delimita il poligono della platea.
- Z_{P.comp}** Profondità di posa dell'elemento di fondazione dal piano campagna.
- Z_{Fld}** Profondità della falda dal piano campagna.
- Cmp T** Classificazione del comportamento del terreno ai fini del calcolo.
- C. Terzaghi** Coefficienti correttivi per la formula di Terzaghi.
- Q_{Ed}** Carico di progetto sul terreno.
- Q_{Rd}** Resistenza di progetto del terreno.
- R_f** [SI] = elemento con presenza di rinforzo; [NO] = elemento senza rinforzo.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRICOLA SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 69
---	---	---------------

6.9.2. Platea Storage Container

VERIFICHE CARICO LIMITE FONDAZIONI DIRETTE ALLO SLU

Verifiche Carico Limite fondazioni dirette allo SLU

Id _{Fnd}	CS	L _X	L _Y	Rtz	Z _{P,cm} p	Z _{Fld}	Cmp T	C. Terzaghi						Q _{Ed}	Q _{Rd}	R _f
								per N _q	per N _c	per N _g	N _q	N _c	N _g			
		[m]	[m]	[°]	[m]	[m]							[N/mm ²]	[N/mm ²]		
Platea 1	5,16	13,50	3,50	180,0 0	0,40	-	NON Coesivo	1,18	0,00	0,84	10,66	20,72	10,88	0,035	0,179	NO

LEGENDA:

- Id_{Fnd}** Descrizione dell'oggetto di fondazione al quale è riferita la verifica.
- CS** Coefficiente di sicurezza ([NS] = Non Significativo se CS ≥ 100; [VNR]= Verifica Non Richiesta; Informazioni aggiuntive sulla condizione: [V] = statica; [E] = eccezionale; [S] = sismica; [N] = sismica non lineare).
- L_{X/Y}** Dimensioni dell'elemento di fondazione.
- Rtz** Angolo compreso tra l'asse X e il lato più lungo del minimo rettangolo che delimita il poligono della platea.
- Z_{P,cmp}** Profondità di posa dell'elemento di fondazione dal piano campagna.
- Z_{Fld}** Profondità della falda dal piano campagna.
- Cmp T** Classificazione del comportamento del terreno ai fini del calcolo.
- C.** Coefficienti correttivi per la formula di Terzaghi.
- Terzaghi**
- Q_{Ed}** Carico di progetto sul terreno.
- Q_{Rd}** Resistenza di progetto del terreno.
- R_f** [SI] = elemento con presenza di rinforzo; [NO] = elemento senza rinforzo.

VERIFICHE CARICO LIMITE FONDAZIONI DIRETTE ALLO SLD

Verifiche Carico Limite fondazioni dirette allo SLD

Id _{Fnd}	CS	L _X	L _Y	Rtz	Z _{P,c} mp	Z _{Fld}	Cmp T	C. Terzaghi						Q _{Ed}	Q _{Rd}	R _f
								per N _q	per N _c	per N _g	N _q	N _c	N _g			
		[m]	[m]	[°]	[m]	[m]							[N/mm ²]	[N/mm ²]		
Platea 1	11,07	13,50	3,50	180,00	0,40	-	NON Coesivo	1,18	0,00	0,84	10,66	20,72	10,88	0,021	0,228	NO

LEGENDA:

- Id_{Fnd}** Descrizione dell'oggetto di fondazione al quale è riferita la verifica.
- CS** Coefficiente di sicurezza ([NS] = Non Significativo se CS ≥ 100; [VNR]= Verifica Non Richiesta; Informazioni aggiuntive sulla condizione: [V] = statica; [E] = eccezionale; [S] = sismica; [N] = sismica non lineare).
- L_{X/Y}** Dimensioni dell'elemento di fondazione.
- Rtz** Angolo compreso tra l'asse X e il lato più lungo del minimo rettangolo che delimita il poligono della platea.
- Z_{P,cmp}** Profondità di posa dell'elemento di fondazione dal piano campagna.
- Z_{Fld}** Profondità della falda dal piano campagna.
- Cmp T** Classificazione del comportamento del terreno ai fini del calcolo.

Progetto: Fattoria Solare "San Biagio" EF AGRICOLA SOCIETA' AGRICOLA A R.L.	Titolo Elaborato: Relazione preliminare di calcolo strutturale	Pagina: 70
---	---	---------------

Verifiche Carico Limite fondazioni dirette allo SLD

Id _{Fnd}	CS	L _x	L _y	R _{tz}	Z _{p.c} mp	Z _{Fid}	Cmp T	C. Terzaghi						Q _{Ed}	Q _{Rd}	R _f
								per N _q	per N _c	per N _g	N _q	N _c	N _g			
		[m]	[m]	[°]	[m]	[m]								[N/mm ²]	[N/mm ²]	

C. Terzaghi Coefficienti correttivi per la formula di Terzaghi.

Q_{Ed} Carico di progetto sul terreno.

Q_{Rd} Resistenza di progetto del terreno.

R_f [SI] = elemento con presenza di rinforzo; [NO] = elemento senza rinforzo.

Si può affermare che le verifiche allegate sono tutte soddisfatte perché R_d valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico è sempre maggiore E_d valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione

$$E_d \leq R_d$$

6.9.3. Stima dei cedimenti delle fondazioni

I cedimenti delle fondazioni superficiali sono il risultato (l'integrale) delle deformazioni verticali del terreno sottostante la fondazione. Queste deformazioni sono conseguenti ad un'alterazione dello stato di tensione nel sottosuolo imputabile a vari motivi quali il carico trasmesso dalle strutture di fondazione, variazioni del regime delle pressioni neutre nel sottosuolo, vibrazioni indotte, scavi eseguiti nei pressi della fondazione.

Nel calcolo eseguito dal software vengono stimati i cedimenti prodotti dai carichi trasmessi dalla fondazione, che sono sempre presenti, e ne è stata valutata l'ammissibilità in condizioni di esercizio.

7. CONCLUSIONI

Si rimanda alla fase esecutiva il dimensionamento definitivo delle opere descritte in relazione. Si precisa che le sovrastanti strutture sono elementi prefabbricati, i relativi calcoli verifiche e dettagli costruttivi del collegamento chiamato "attacco a terra" tra strutture e fondazioni, saranno consegnati dal fornitore in fase di progettazione esecutiva. Si precisa inoltre che i dati relativi al terreno su cui poggeranno le apparecchiature descritte precedentemente sono stati ipotizzati in via cautelativa e in base all'esperienza. Si rimanda a futuri sondaggi geotecnici la validazione dei dati tecnici caratterizzanti il terreno su cui poggeranno le fondazioni.