



## **CENTRALE EOLICA OFFSHORE "RIMINI" (330 MW) ANTISTANTE LA COSTA TRA RIMINI E CATTOLICA**

proponente:

**EnergiaWind 2020 srl** \_ Riccardo Ducoli amministratore unico



**RELAZIONE SPECIALISTICA DEL PROGETTO DEFINITIVO**

## **RELAZIONE SISMICA E SULLE STRUTTURE DELLE OPERE IN MARE**



Coordinamento

**Tecnoconsult Engineering Construction srl**

**Ing. Paolo Pierangeli**

Albo Ingegneri di Pesaro e Urbino A2162

F febbraio 2022

## INDICE DELLA RELAZIONE

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>11</b>
1.1	RIFERIMENTI NORMATIVI E METODOLOGICI PER L'ELABORAZIONE DELLO STUDIO.....	11
1.2	UBICAZIONE DELL'IMPIANTO E CARATTERISTICHE DELL'AREA DI INTERVENTO.....	12
1.3	NOTE RELATIVE AL PROGETTO PREDISPOSTO PER LA VIA, ALTERNATIVE CONSIDERATE E AMBITO DI INDAGINE.....	13
1.4	OPERE PRINCIPALI.....	15
<b>2</b>	<b>SCOPO DEL DOCUMENTO</b> .....	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>DATI DI PROGETTO</b> .....	<b>18</b>
3.1	DATI TECNICI DEGLI AEROGENERATORI.....	18
3.2	LAYOUT DELL'IMPIANTO.....	21
3.3	MATERIALI.....	22
3.4	NATURA DEI TERRENI E PARAMETRI GEOTECNICI.....	22
3.5	DATI IDRODINAMICI.....	23
3.5.1	<i>Onde e corrente</i> .....	23
3.5.2	<i>Marine Growth (crescita marina)</i> .....	24
3.5.3	<i>Coefficienti idrodinamici</i> .....	24
3.6	DATI DI VENTO.....	25
3.6.1	<i>Dati vento aerogeneratore</i> .....	26
3.7	DATI SISMICI.....	28
3.7.1	<i>Spettro sismico secondo NTC</i> .....	28
3.7.1.1	<i>Spettro sismico Aerogeneratore</i> .....	28
3.7.1.2	<i>Spettro sismico piattaforma</i> .....	32
3.7.2	<i>Spettro sismico secondo ISO</i> .....	37
3.7.2.1	<i>Spettro sismico Aerogeneratore</i> .....	37
3.7.2.2	<i>Spettro sismico Piattaforma</i> .....	41
3.7.3	<i>Spettri sismici impiegati</i> .....	44
<b>4</b>	<b>CRITERI DI PROGETTO</b> .....	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>METODOLOGIA DI CALCOLO</b> .....	<b>47</b>
5.1	FONDAZIONE MONOPALO AEROGENERATORI.....	47
5.1.1	<i>Dimensionamento preliminare palo di fondazione</i> .....	47
5.1.2	<i>Modello SACS</i> .....	49

5.1.3	Carichi permanenti e carichi variabili.....	51
5.1.4	Carico da vento su turbina .....	52
5.1.5	Azione sismica monopalo.....	53
5.1.6	Combinazioni di carico .....	53
5.2	PIATTAFORMA .....	54
5.2.1	Modello SACS .....	54
5.2.1.1	Generale .....	54
5.2.1.2	Pali di fondazione .....	55
5.2.1.3	Telaio strutturale di irrigidimento (jacket) .....	56
5.2.1.4	Topside .....	58
5.2.1.5	J-tube e supporti.....	64
5.2.1.6	Sistema di riferimento globale .....	65
5.2.1.7	Condizioni al contorno.....	66
5.2.1.8	Lunghezze effettive .....	66
5.2.1.9	Pali di fondazione .....	67
5.2.2	Carichi permanenti.....	67
5.2.3	Carichi ambientali .....	68
5.2.3.1	Proprietà dell'acqua di mare .....	68
5.2.3.2	Crescita marina.....	68
5.2.3.3	Coefficienti idrodinamici .....	68
5.2.3.4	Carico da vento.....	68
5.2.3.5	Carichi d'onda e corrente .....	69
5.2.4	Dati Sismici.....	69
5.2.5	Combinazioni di carico .....	70
5.3	PROTEZIONE DALLO SCOURING .....	72
5.3.1	Introduzione .....	72
5.3.2	Protezione da Scouring .....	77
5.4	BATTITURA PALI.....	78
<b>6</b>	<b>RISULTATI .....</b>	<b>80</b>
6.1	FONDAZIONE MONOPALO AEROGENERATORI .....	80
6.1.1	Analisi statiche.....	80

6.1.2	<i>Analisi sismica</i> .....	83
6.1.3	<i>Verifica geotecnica</i> .....	84
6.2	PIATTAFORMA .....	85
6.2.1	<i>Analisi statiche</i> .....	85
6.2.1.1	Stato Limite Ultimo (SLU) .....	85
6.2.1.1.1	Pali di fondazione emergenti dal terreno .....	85
6.2.1.1.2	Telaio strutturale di irrigidimento (jacket).....	86
6.2.1.1.3	Topside.....	88
6.2.1.1.4	J-tube e supporti .....	93
6.2.1.1.5	Pali di fondazioni infissi nel terreno .....	95
6.2.2	<i>Analisi sismica</i> .....	99
6.2.2.1.1	Pali di fondazione emergenti dal terreno .....	99
6.2.2.1.2	Telaio strutturale di irrigidimento (jacket).....	100
6.2.2.1.3	Topside.....	102
6.2.2.1.4	J-tube e supporti .....	107
6.2.3	<i>Verifica geotecnica</i> .....	109
6.3	PROTEZIONE DA SCOURING .....	110
6.4	BATTITURA PALI.....	111
6.4.1	<i>Aerogeneratore -Risultati in Terreno non drenante (argilloso)</i> .....	111
6.4.2	<i>Aerogeneratore - Risultati in Terreno drenante (sabbioso)</i> .....	115
6.4.3	<i>Palo SET - Risultati in Terreno drenante (sabbioso)</i> .....	119
<b>7</b>	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>123</b>
7.1	FONDAZIONE MONOPALO AEROGENERATORE.....	123
7.2	PIATTAFORMA .....	124
<b>8</b>	<b>RIFERIMENTI</b> .....	<b>125</b>
<b>9</b>	<b>ALLEGATO A (FONDAZIONE MONOPALO AEROGENERATORE)</b> .....	<b>126</b>
9.1	MODELLI ANALISI STATICA .....	126
9.2	MODELLI ANALISI DINAMICA .....	126
<b>10</b>	<b>ALLEGATO B (PIATTAFORMA)</b> .....	<b>127</b>
10.1	MODELLI ANALISI STATICA .....	127
10.2	MODELLI ANALISI DINAMICA .....	127

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1.1 – Ubicazione della Centrale eolica offshore "Rimini" e zone di interdizione (in grigio chiaro).....	12
Figura 1.2 – Centrale eolica offshore "Rimini" _ LAYOUT A .....	14
Figura 1.3 – Centrale eolica offshore "Rimini" _ LAYOUT B .....	14
Figura 3.1 – MySE6.45-180 WTGS .....	18
Figura 3.2 – Rappresentazione Aerogeneratore .....	20
Figura 3.3 – Sezione B-B' indicante la successione sedimentologica dei depositi di superficie nella zona del fondo marino antistante Rimini (da Foglio NL 33-10 "Ravenna" della carta Geologica dei Mari Italiani alla scala 1:250.000). .....	22
Figura 3.4 – Software "Spettri NTC" .....	29
Figura 3.5 – Software "Spettri NTC" .....	33
Figura 3.6 – Spettro di progetto orizzontale per lo stato limite: SLC .....	36
Figura 3.7 – Spettro ALE orizzontale per 5 % damping .....	39
Figura 3.8 – Spettro ELE orizzontale per 5 % damping .....	40
Figura 3.9 – Spettro ALE orizzontale per 5 % damping .....	43
Figura 3.10 – Spettro ELE orizzontale per 5 % damping .....	44
Figura 3.11 – Confronto fra spettro di progetto NTC18 E spettro ELE ISO 19901.....	44
Figura 3.12 – Confronto fra spettro di progetto NTC18 E spettro ELE ISO 19901.....	45
Figura 5.1 – Schema esemplificativo preliminare di un aerogeneratore con WD 14m e WD 44m. ....	48
Figura 5.2 – Modello SACS turbina + elemento di transizione + monopalo (al di sopra del fondale).....	49
Figura 5.3 – Modello SACS sottostazione elettrica (al di sopra del fondale) .....	54
Figura 5.4 – Pali di fondazioni emergenti dal terreno .....	55
Figura 5.5 – Sistema di irrigidimento strutturale (jacket) .....	56
Figura 5.6 – Gambe del jacket .....	56
Figura 5.7 – Elementi di irrigidimento .....	57
Figura 5.8 – Topside sottostazione elettrica .....	58
Figura 5.9 – Elementi verticali a sezione tubolare .....	59
Figura 5.10 – Elementi orizzontali a sezione aperta - impalcato Quota 15 m.....	60

Figura 5.11 – Elementi orizzontali a sezione aperta - impalcato Quota 19 m.....	60
Figura 5.12 – Elementi orizzontali a sezione aperta e boxata - impalcato Quota 32 m (copertura) .....	61
Figura 5.13 – Elementi orizzontali a sezione tubolare - impalcato Quota 32 m (copertura) .....	62
Figura 5.14 – Elementi diagonali a sezione tubolare.....	63
Figura 5.15 – Elementi tubolari del supporto per j-tube.....	64
Figura 5.16 – Elementi tubolari j-tube e supporti .....	65
Figura 5.17 – Assi di riferimento globale .....	66
Figura 5.18 – Flusso attorno alla base di un palo verticale .....	72
Figura 5.19 – Profondità di scouring in funzione del paramentro KC .....	76
Figura 5.20 – Modello della battitura del palo .....	78
Figura 6.1 – UC massimi – elementi al di sopra del fondale (WD 44m/argilla).....	80
Figura 6.2 – UC massimi vs WD per il palo di fondazione (WD 44m/argilla).....	81
Figura 6.3 – Spostamento laterale palo di fondazione (WD 44m/argilla).....	82
Figura 6.4 – UC massimi (WD 44m/sabbia).....	83
Figura 6.5 – UC massimi pali emergenti dal terreno .....	85
Figura 6.6 – UC massimi gambe del jacket .....	86
Figura 6.7 – UC massimi elementi di irrigidimento jacket.....	87
Figura 6.8 – UC massimi pilastri.....	88
Figura 6.9 – UC massimi Elementi orizzontali a sezione aperta - impalcato Quota 15 m.....	89
Figura 6.10 – Elementi orizzontali a sezione aperta - impalcato Quota 19 m.....	90
Figura 6.11 – Elementi orizzontali a sezione aperta e boxata - impalcato Quota 22 m (copertura) .....	90
Figura 6.12 – UC massimi elementi orizzontali a sezione tubolare.....	91
Figura 6.13 – UC massimi elementi diagonali a sezione tubolare.....	92
Figura 6.14 – UC massimi supporti j-tube .....	93
Figura 6.15 – UC massimi j-tube .....	94
Figura 6.16 – Massimo spostamento laterale dei pali di fondazione in terreni argillosi .....	95
Figura 6.17 – Massimo spostamento laterale dei pali di fondazione in terreni sabbiosi.....	96
Figura 6.18 – UC massimi dei pali di fondazione in terreni argillosi.....	97
Figura 6.19 – UC massimi dei pali di fondazione in terreni sabbiosi .....	98

Figura 6.20 – UC massimi pali emergenti dal terreno .....	99
Figura 6.21 – UC massimi gambe del jacket .....	100
Figura 6.22 – UC massimi elementi di irrigidimento jacket.....	101
Figura 6.23 – UC massimi pilastri .....	102
Figura 6.24 – UC massimi Elementi orizzontali a sezione aperta - impalcato Quota 15 m.....	103
Figura 6.25 – Elementi orizzontali a sezione aperta - impalcato Quota 19 m.....	104
Figura 6.26 – Elementi orizzontali a sezione aperta e boxata - impalcato Quota 22 m (copertura) .....	104
Figura 6.27 – UC massimi elementi orizzontali a sezione tubolare.....	105
Figura 6.28 – UC massimi elementi diagonali a sezione tubolare.....	106
Figura 6.29 – UC massimi supporti j-tube .....	107
Figura 6.30 – UC massimi j-tube .....	108
Figura 6.31 – Scour Protection Data.....	110
Figura 6.32 – Dati principali di input per il calcolo .....	111
Figura 6.33 – Rappresentazione del palo .....	112
Figura 6.34 – Conteggio dei colpi ed energia di impatto.....	113
Figura 6.35 – Conteggio dei colpi tempo di battitura.....	114
Figura 6.36 – Dati principali di input per il calcolo .....	115
Figura 6.37 – Rappresentazione del palo .....	116
Figura 6.38 – Conteggio dei colpi ed energia di impatto.....	117
Figura 6.39 – Conteggio dei colpi tempo di battitura.....	118
Figura 6.40 – Dati principali di input per il calcolo .....	119
Figura 6.41 – Rappresentazione del palo .....	120
Figura 6.42 – Conteggio dei colpi ed energia di impatto.....	121
Figura 6.43 – Conteggio dei colpi ed energia di impatto.....	122

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 3.1 – Principali caratteristiche dell'aerogeneratore MingYang MySE6.45-180.....	18
Tabella 3.2 – Principali caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore MingYang MySE6.45-180 .....	19
Tabella 3.3 – Coordinate geografiche delle turbine per i 2 layout.....	21

Tabella 3.4 – Caratteristiche meccaniche acciaio strutturale (EN 10025).....	22
Tabella 3.5 – Caratteristiche geomeccaniche preliminari per le unità deposizionali riportate in Figura 3.3 .	23
Tabella 3.6 – Dati onde .....	23
Tabella 3.7 – Dati corrente .....	23
Tabella 3.8 – Dati velocità estrema del vento (m/s) – $H_{ref}$ 100m .....	25
Tabella 3.9 – Dati velocità estrema del vento – 3 secondi (m/s) .....	25
Tabella 3.10 – Dati velocità estrema del vento – 10 minuti (m/s) .....	26
Tabella 3.11 – Dati vento turbina .....	26
Tabella 3.12 – Dati vento turbina .....	27
Tabella 3.13 – Categorie di sottosuolo che permettono l’approccio semplificato (Tab. 3.2II da NTC18).....	28
Tabella 3.14 – Categorie topografiche (Tab. 3.2III da NTC18).....	29
Tabella 3.15 – Valori del coefficiente d’uso $C_U$ (Tab. 2.4.II da NTC18). .....	29
Tabella 3.16 – Probabilità di superamento $P_{VR}$ (Tab. 3.2.I da NTC18).....	30
Tabella 3.17 – Spettro elastico orizzontale per lo stato limite: SLC .....	30
Tabella 3.18 – Valori massimi del valore di base $q_0$ (Tab. 7.3.II da NTC18).....	31
Tabella 3.19 – Spettro di progetto orizzontale per lo stato limite: SLC.....	32
Tabella 3.20 – Categorie di sottosuolo che permettono l’utilizzo dell’approccio semplificato .....	32
Tabella 3.21 – Categorie topografiche .....	33
Tabella 3.22 – Valori minimi della Vita nominale $V_N$ di progetto per i diversi tipi di costruzioni.....	33
Tabella 3.23 – Valori del coefficiente d’uso $C_U$ .....	33
Tabella 3.24 – Probabilità di superamento $P_{VR}$ in funzione dello stato limite considerato .....	34
Tabella 3.25 – Spettro elastico orizzontale per lo stato limite: SLC .....	34
Tabella 3.26 – Valori massimi del valore di base $q_0$ (Tab. 7.3.II da NTC18).....	35
Tabella 3.27 – Zona sismica del sito .....	37
Tabella 3.28 – Probabilità annua target di guasto, $P_f$ .....	37
Tabella 3.29 – Categoria di rischio sismico, SRC.....	38
Tabella 3.30 – Categorie di sottosuolo .....	38
Tabella 3.31 – Valori di $C_a$ e $C_v$ per fondazioni su pali profondi .....	38
Tabella 3.32 – Fattore di scala per spettro ALE ( $N_{ALE}$ ) .....	39



Tabella 3.33 – Fattore di capacità di riserva sismica per il sistema strutturale $C_r$ .....	40
Tabella 3.34 – Probabilità annua target di guasto, $P_f$ .....	41
Tabella 3.35 – Categoria di rischio sismico, SRC.....	41
Tabella 3.36 – Categorie di sottosuolo.....	42
Tabella 3.37 – Valori di $C_a$ e $C_v$ per fondazioni su pali profondi .....	42
Tabella 3.38 – Fattore di scala per spettro ALE ( $N_{ALE}$ ) .....	42
Tabella 3.39 – Fattore di capacità di riserva sismica per il sistema strutturale $C_r$ .....	43
Tabella 4.1 – Coefficienti di sicurezza per la resistenza delle membrature e la stabilità.....	46
Tabella 5.1 – Palo di fondazione.....	50
Tabella 5.2 – Gruppi modello SACS .....	50
Tabella 5.3 – Carichi permanenti (G).....	51
Tabella 5.4 – Condizioni di carico ambientale (carichi variabili Q).....	52
Tabella 5.5 – Carichi vento su turbina .....	52
Tabella 5.6 – Carico sismico EQK .....	53
Tabella 5.7 – Combinazioni di carico .....	53
Tabella 5.8 – Dimensioni sezioni pali.....	55
Tabella 5.9 – Dimensioni sezioni gambe del jacket .....	57
Tabella 5.10 – Dimensioni sezioni elementi di irrigidimento .....	57
Tabella 5.11 – Dimensioni sezioni elementi verticali a sezione tubolare.....	59
Tabella 5.12 – Dimensioni sezioni elementi orizzontali a sezione aperta e boxate .....	61
Tabella 5.13 – Dimensioni sezioni elementi orizzontali a sezione tubolare – impalcato Quota 32 m (copertura) .....	62
Tabella 5.14 – Dimensioni sezioni elementi diagonali a sezione tubolare.....	63
Tabella 5.15 – Dimensioni sezioni elementi tubolari del supporto per j-tube .....	64
Tabella 5.16 – Dimensioni sezioni elementi tubolari j-tube e supporti .....	65
Tabella 5.17 – Pesi strutturali in aria.....	67
Tabella 5.18 – Pesi strutturali immersi.....	67
Tabella 5.19 – Velocità del vento .....	68
Tabella 5.20 – Dati onda.....	69

Tabella 5.21 – Dati corrente .....	69
Tabella 5.22 – Combinazioni di Carico – Analisi statica.....	70
Tabella 5.23 – Combinazioni di Carico – Analisi Sismica .....	71
Tabella 6.1 – UC massimi.....	80
Tabella 6.2 – UC massimi elementi al di sopra del fondale (WD 44m/argilla) .....	81
Tabella 6.3 – UC massimi palo di fondazione (WD 44m/argilla) .....	81
Tabella 6.4 – UC massimi elementi al di sopra del fondale (WD 44m/sabbia) .....	83
Tabella 6.5 – UC massimi capacità assiale terreno.....	84
Tabella 6.6 – Capacità portante massima palo di fondazione/ suolo e relativo UC (WD 44m/sabbia) .....	84
Tabella 6.7 – UC massimi pali emergenti dal terreno .....	85
Tabella 6.8 – UC massimi gambe del jacket .....	86
Tabella 6.9 – UC massimi elementi di irrigidimento jacket.....	87
Tabella 6.10 – UC massimi pilastri.....	88
Tabella 6.11 – UC massimi elementi orizzontali a sezione aperte e boxate .....	89
Tabella 6.12 – UC massimi elementi orizzontali a sezione tubolare .....	91
Tabella 6.13 – UC massimi elementi diagonali a sezione tubolare .....	92
Tabella 6.14 – UC massimi supporti j-tube.....	93
Tabella 6.15 – UC massimi j-tube .....	94
Tabella 6.16 – UC massimi pali emergenti dal terreno .....	99
Tabella 6.17 – UC massimi gambe del jacket .....	100
Tabella 6.18 – UC massimi elementi di irrigidimento jacket.....	101
Tabella 6.19 – UC massimi pilastri.....	102
Tabella 6.20 – UC massimi elementi orizzontali a sezione aperte e boxate .....	103
Tabella 6.21 – UC massimi elementi orizzontali a sezione tubolare .....	105
Tabella 6.22 – UC massimi elementi diagonali a sezione tubolare .....	106
Tabella 6.23 – UC massimi supporti j-tube.....	107
Tabella 6.24 – UC massimi j-tube .....	108
Tabella 6.25 – UC massimi capacità assiale terreno argilloso .....	109
Tabella 6.26 – UC massimi capacità assiale terreno sabbioso .....	109

---

Tabella 6.27 – Protezione Scouring Turbine.....	110
Tabella 6.28 – Protezione Scouring Piattaforma .....	110
Tabella 7.1 – Palo di fondazione.....	123
Tabella 7.2 – UC massimi.....	123
Tabella 7.3 – Palo di fondazione.....	124

## 1 INTRODUZIONE

Oggetto dello Studio è la progettazione strutturale della SET (Stazione Elettrica di Trasformazione marina) e della fondazione degli aerogeneratori afferenti la Centrale eolica offshore "Rimini" ubicata nel mare antistante la costa tra Rimini e Cattolica.

La Centrale eolica in questione prevede l'installazione di 51 aerogeneratori della potenza di 6,45 MW (per 330 MW complessivi) e relative opere di collegamento alla RTN (Rete di Trasmissione Nazionale), con punto di connessione alla Stazione TERNA "San Martino in Venti" ubicata in comune di Rimini. La fondazione prevista è del tipo a monopilone ancorato al fondale.

Il soggetto proponente è Energia Wind 2020 srl, con sede legale in via Aldo Moro 28 - 25043 Breno (BS) C.F. P. IVA e Iscrizione al Registro delle Imprese di Brescia n. 03466270984.

Il progetto della Centrale Eolica "Rimini" è stato presentato a livello di Preliminare il 30 marzo 2020, allegato all'istanza di Autorizzazione Unica ai sensi dell'art. 12 del D.lgs 387/2003 (secondo quanto stabilito dalla Circolare n. 40 del 05/01/2012 del Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili, che stabilisce l'articolazione del procedimento in 3 fasi) e **ha superato la prima fase del procedimento**, coordinato dalla Capitaneria di Porto di Rimini e relativo all'istruttoria tecnico amministrativa finalizzata al rilascio della Concessione Demaniale.

L'approfondimento tematico di cui al presente studio costituisce parte integrante del Progetto (approfondito a livello di Definitivo) e della documentazione allegata allo Studio di Impatto Ambientale, documenti redatti in conformità delle norme vigenti e richiesti dal D.lgs 152/2006 e ss.mm.ii. e dalla Circolare 40/2012 relativamente alla fase di Valutazione di Impatto Ambientale e alla fase di Autorizzazione Unica.

### 1.1 Riferimenti normativi e metodologici per l'elaborazione dello Studio

Per la progettazione strutturale e geotecnica della fondazione degli aerogeneratori si è fatto riferimento alla seguente normativa italiana ed internazionale:

- [Ref. 1] D.M. 17 gennaio 2018 "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»"
- [Ref. 2] EN 1993-1-1: Eurocode 3 "Design of steel structures"
- [Ref. 3] IEC (2005) "International Standard IEC-61400-1 Wind Turbines - Part 1: Design requirements, Third Edition. 2005"
- [Ref. 4] IEC (2009a) "International Standard IEC 61400-3 Wind turbines - Part 3: Design requirements for offshore wind turbines, 1.0 ed. International Electrotechnical Commission (IEC)"
- [Ref. 5] IEC (2009b) "International Standard IEC-61400-1 Amendment 1 - Wind turbines - Part 1: Design requirements, 3rd Edition"
- [Ref. 6] API-RP-2A-WSD 22 th 2014 "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing; Fixed Offshore Platforms—Working; Stress Design"
- [Ref. 7] ISO 19901-2 Second edition 2017-11 "Petroleum and natural gas Industries -Specific requirements for offshore structures - Part 2: Seismic design procedures and criteria"

Si riportano di seguito alcune informazioni utili per l'inquadramento e la caratterizzazione del progetto:

## 1.2 Ubicazione dell'impianto e caratteristiche dell'area di intervento

Su larga scala l'area di progetto si inserisce nel bacino del mare Adriatico Settentrionale e per ubicazione geografica la centrale eolica offshore impegna il braccio di mare antistante la costa compresa tra Rimini e Cattolica e parte del litorale marchigiano che dal confine della Regione Emilia Romagna prosegue sino a Gabicce e al Colle San Bartolo.

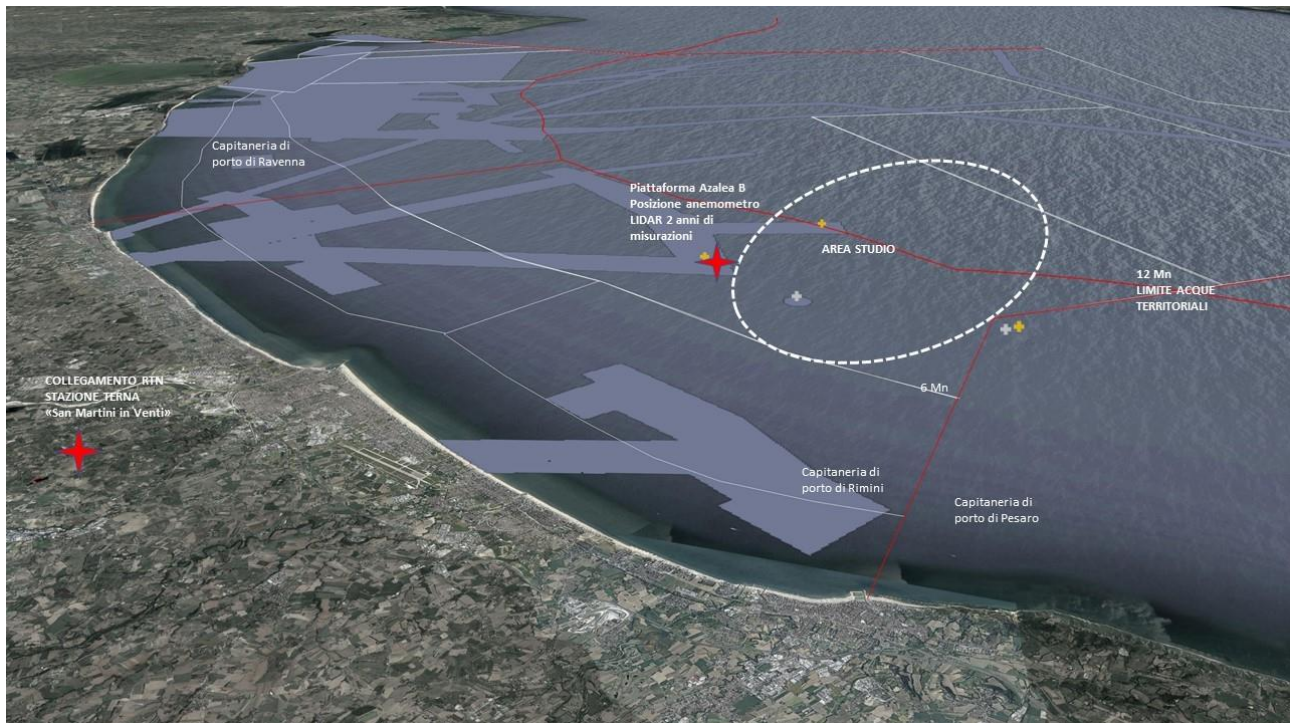


Figura 1.1 – Ubicazione della Centrale eolica offshore "Rimini" e zone di interdizione (in grigio chiaro).

Nello specifico, lo specchio d'acqua complessivo in cui ricadono gli aerogeneratori nelle diverse alternative di configurazione e localizzazione proposte, è compreso nei seguenti limiti:

- a nord ovest da aree concesse a ENI e occupate dalle piattaforme metanifere del gruppo Azalea e da attraversamenti di condotte;
- a nord est dal limite delle acque territoriali (12 MN) per il Layout "A", già oggetto di valutazione nella prima fase istruttoria, e dal limite delle 18 MN per le configurazioni di layout alternative proposte;
- a sud est dalle piattaforme del gruppo "Regina" e dal limite delle competenze amministrative delle Capitanerie di Porto di Rimini e Pesaro;
- a sud ovest da una linea teorica parallela alla costa e coincidente con il limite delle 6 MN per il layout "A" e con il limite delle 9 MN per i layout alternativi, entrambe identificate sia per attenuare la visibilità degli aerogeneratori dalla terra ferma e sia per rispettare le limitazioni relative agli ostacoli e ai pericoli per la navigazione aerea stabilite per l'aeroporto internazionale di Rimini \_ San Marino; in tutti i layout proposti gli aerogeneratori mantengono una distanza minima dal ARP (Airport Reference Point) maggiore di 15 km e risultano esterni alla OHS (Other Horizontal Surface).

### 1.3 Note relative al progetto predisposto per la VIA, alternative considerate e ambito di indagine

Per il completamento delle procedure autorizzative, il progetto recepisce le prescrizioni e le osservazioni degli enti che hanno espresso parere nell'ambito della procedura sino a qui esperita nonché alcune considerazioni espresse dai portatori di interesse.

Come previsto dalle norme in materia di Valutazione di Impatto ambientale, il progetto prevede delle alternative sia riguardo al tracciato delle opere terrestri di connessione (cavo AT interrato) che alla localizzazione e disposizione degli aerogeneratori.

Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, si precisa quanto segue:

- Per tutti i Layout considerati restano invariate la posizione della Stazione di Trasformazione Elettrica ubicata in mare nonché le opere di connessione alla RTN;
- il primo riferimento è il **Layout "A"** compreso tra le 6 Mn e le 12 Mn, presentato come integrazione volontaria il 25/09/2020 nell'ambito del procedimento di concessione demaniale, rispetto al quale si sono espressi gli Enti in Conferenza di Servizi attestandone l'ammissibilità in termini di localizzazione; le turbine occupano posizioni con profondità del fondale variabile e compresa tra -15 e -34 m; l'interdistanza tra le torri è regolare e pari a 680 m; la minima distanza dal punto di misurazione anemometrica (Piattaforma Azalea "B") è pari a 2,8 km;
- rispetto al precedente, sono state studiate delle alternative localizzative e di configurazione che interessano in parte l'areale del layout "A" e in parte una zona immediatamente contigua e disposta verso il largo sino alle 18 MN; in tale ambito sono state verificate 3 configurazioni degli aerogeneratori; tra le alternative ne è stata approfondita una in particolare, il "Layout B", vista la sostanziale parità di implicazioni ambientali e di producibilità energetica rispetto agli altri 2 layout proposti e denominati "C" e "D", che in ogni caso vanno considerati come alternative possibili;
- Il **Layout "B"** esemplificativo delle alternative considerate e contiguo al layout "A", occupa un'area a cavallo delle 12 MN ed è compreso tra le 9 e le 18 MN; gli aerogeneratori si dispongono lungo le direttrici di tre archi, in questo caso paralleli e distanti tra loro 3 km, occupando posizioni con profondità del fondale variabile e compresa tra -22 e -43 m; l'interdistanza tra le torri è regolare e pari a 720 m; la minima distanza dal punto di misurazione anemometrica (Piattaforma Azalea "B") è pari a 6 km;
- gli altri layout considerati sono il layout "C", anch'esso organizzato su tre archi, ma concavi verso Nord Ovest e il Layout "D" che è l'unico organizzato "a freccia" su tre rette che si svasano verso il largo; la distanza minima dal punto di misurazione è rispettivamente pari a circa 2,7 km e 3 km;
- per tutti i layout proposti, la profondità e la natura dei fondali fanno sì che le opere di fondazione siano del tipo a monopilone, con elementi cilindrici in acciaio di circa 7,5 m di diametro e infissi al di sotto del fondale con profondità variabili in base alla batimetria.
- Per quanto riguarda l'elettrodotta interrato AT terrestre il progetto prevede che il tracciato, a partire dalla buca giunti di collegamento tra il cavo marino e quello terrestre, segua prevalentemente la viabilità esistente secondaria con un percorso preferenziale di circa 11,7 km, di cui circa 380 m in TOC per il superamento della SS N. 72 Rimini/San Marino e del Torrente Ausa; si prevede anche un

percorso alternativo che si distacca e si ricongiunge al precedente e segue viabilità primaria, per una lunghezza complessiva di 11,6 km.

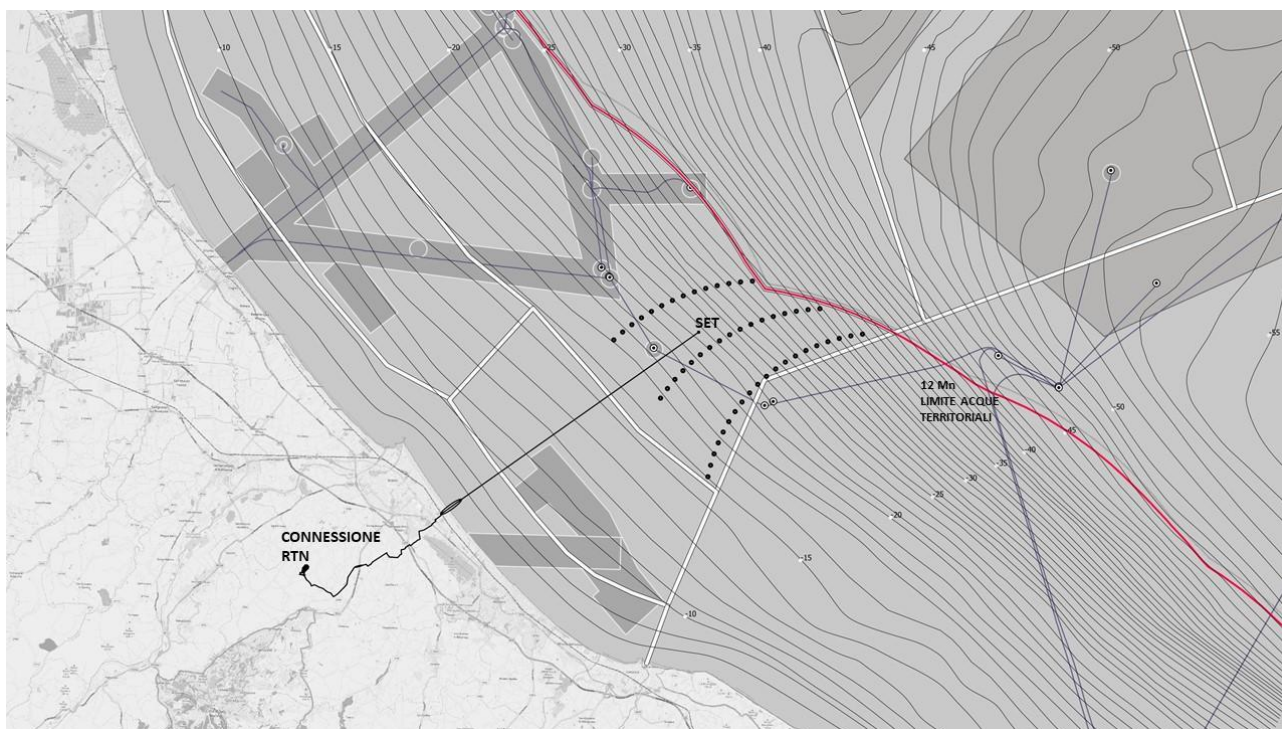


Figura 1.2 – Centrale eolica offshore "Rimini" \_ LAYOUT A

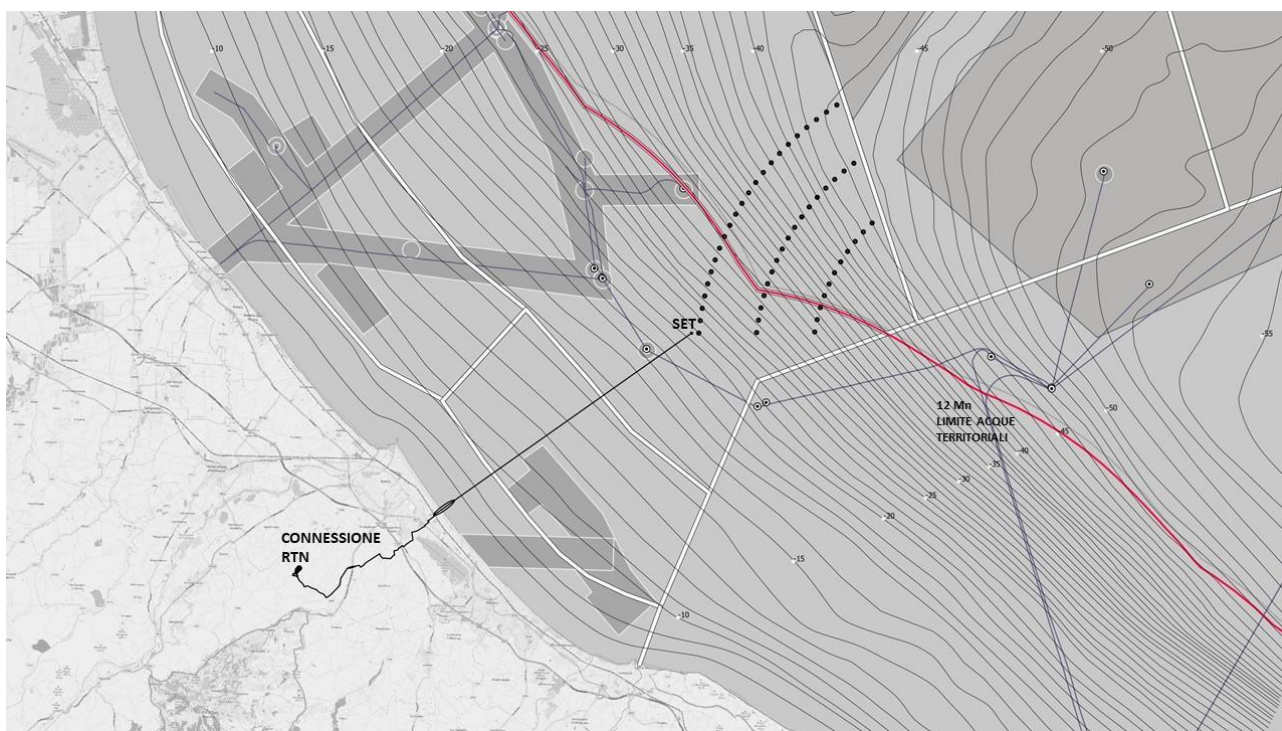


Figura 1.3 – Centrale eolica offshore "Rimini" \_ LAYOUT B

## 1.4 Opere principali

Si riporta di seguito l'elenco sintetico delle principali opere previste dal progetto.

OPERE IN MARE:

- **51 aerogeneratori di potenza nominale unitaria pari a 6,45 MW, per una capacità complessiva di 330 MW, ancorati al fondale con fondazione del tipo monopilone in acciaio;**

gli aerogeneratori presi come riferimento tecnologico per il progetto sono del tipo MingYang MySE 6.45-180, con hub a 110/125 m di altezza, diametro del rotore pari a 180 m, tronco di transizione con parte fuori acqua pari a 9/10 m, per un range di altezza complessiva massima compreso tra 210/220 m dal medio mare (in tali range di potenza e dimensionali rientrano altri aerogeneratori simili che potrebbero essere considerati in fase di progettazione esecutiva); gli aerogeneratori vengono proposti in configurazioni alternative, comparate per aspetti ambientali in merito alla localizzazione;

- **Una rete elettrica sottomarina a tensione nominale pari a 66 kV che collega gli aerogeneratori in serie, raggruppandoli in 8 sezioni principali, per poi connettersi alla Stazione Elettrica di Trasformazione (SET) offshore 66/380 kV ;**
- **Una piattaforma marina che ospita la Stazione Elettrica di Trasformazione (SET) 66/380 kV, attrezzata con 2 trasformatori da 180/200 MVA, 1 reattore per la compensazione della potenza reattiva, apparecchiature, quadri di controllo e manufatti di servizio e accessori;**
- **Un elettrodotto sottomarino di collegamento tra la Stazione Elettrica di Trasformazione (SET) offshore e la buca giunti terra-mare, costituito da un cavo in AT 380 kV di lunghezza pari a 18,15 km di cui 1,45 km realizzato con HDD (Horizontal Directional Drilling) per la parte di transizione terra\_mare);**

la parte di approdo e atterraggio (transizione terra-mare del cavo marino realizzata con HDD) inizia in mare a circa 930 m dalla linea di battigia e raggiunge la buca giunti dopo aver bypassato la spiaggia (in corrispondenza del nuovo circolo velico di Bellariva ubicato tra il bagno 98 e 99), il lungomare Giuseppe Di Vittorio, gli edifici prospicienti, la rete ferroviaria e la linea Metro\_Mare;

OPERE A TERRA PER LA CONNESSIONE ALLA RTN:

- **Una buca giunti interrata, in cui avviene la giunzione tra la l'elettrodotto sottomarino e quello terrestre, interrata e posizionata nello slargo compreso tra il sottopasso di Viale Portofino e Viale Siracusa, immediatamente a sud ovest della linea Metro\_Mare e della Rete Ferroviaria adriatica;**
- **Un elettrodotto terrestre interrato costituito da una terna di cavi isolati in AT 380 kV, di lunghezza pari a circa 11,7 km (con buche giunti ogni 500/600 m), che raggiunge la Stazione di Transizione cavo-aereo adiacente alla SE TERNA 380/150 kV "San Martino in Venti", dove avviene la connessione alla RTN;**

il progetto prevede che il tracciato, a partire dalla buca giunti di collegamento tra il cavo marino e quello terrestre, segua prevalentemente la viabilità esistente secondaria con un percorso preferenziale di circa 11,7 km, di cui circa 380 m in TOC per il superamento della SS N. 72 Rimini/San Marino e del Torrente Ausa; si prevede anche un percorso alternativo che si distacca e si ricongiunge al precedente e segue viabilità primaria, per una lunghezza complessiva di 11,6 km.



- **Una Stazione di Transizione cavo-aereo da realizzarsi in prossimità della stazione elettrica TERNA "San Martino in Venti", che ospiterà il reattore, le apparecchiature elettromeccaniche, i locali quadri e misure e il portale di partenza della linea aerea di collegamento alla stazione RTN;**

verrà realizzato un breve tratto stradale di lunghezza pari a circa 130 m e larghezza pari a 7 m incluso banchine laterali, di collegamento tra Via San Martino in Venti e la Stazione Utente;

- **Un elettrodotto aereo trifase lungo circa 450 m, in conduttori nudi binati alla tensione di 380 kV, di connessione con lo stallo a 380 kV nella stazione elettrica "San Martino in Venti" 150/380 kV esistente e di proprietà TERNA S.p.A.;**
- **Un nuovo stallo a 380 kV, previo ampliamento della stazione TERNA "San Martino in Venti", nella parte nord-ovest, e interrimento di un tratto di linea in cavo aereo esistente;**

per la realizzazione del nuovo stallo, come indicato dal gestore della rete TERNA, è previsto l'interrimento dell'ultima campata di un elettrodotto aereo a 132 kV "San Martino-Gambettola" esistente; l'elettrodotto aereo, lungo circa 170 m, e il traliccio di arrivo saranno eliminati e sostituiti da un elettrodotto interrato AT 150 kV, di lunghezza pari a circa 230 m, da realizzare all'interno dell'area di ampliamento della Stazione Elettrica San Martino in Venti.

## 2 SCOPO DEL DOCUMENTO

Scopo del presente documento è la progettazione e verifica strutturale per il parco eolico offshore antistante Rimini in accordo alle normative come riportato in sezione 1.1 dei seguenti oggetti:

- Piattaforma offshore SET (Stazione Elettrica di Trasformazione);
- Aerogeneratore;

Nello specifico sono state effettuate analisi statiche e sismiche, nonché progettazione e verifica delle fondazioni.

Nello specifico, come tipologia di fondazione, sono stati considerati i pali battuti, comunemente usati per le piattaforme offshore tradizionali del oil & gas, come largamente presenti nell'area, di cui è stata verificata la battitura sia in termini di tipologia di martello necessario, sia i tempi di battitura.

### 3 DATI DI PROGETTO

#### 3.1 Dati tecnici degli aerogeneratori

L'impianto sarà costituito da 51 aerogeneratori.

L'aerogeneratore impiegato nel presente progetto è il modello MySE6.45-180 WTGs. Ciascun aerogeneratore sarà tripala ad asse orizzontale costituito da una torre tubolare metallica a tronco di cono alta 111m e con un diametro di base di circa 7.5m. L'altezza della turbina viene incrementata a 119m grazie al transition piece. In cima alla torre troverà alloggio la navicella cui è collegato il rotore di diametro pari a 178m, per un'altezza massima complessiva del sistema torre-pale di 208m (in punta).



Figura 3.1 – MySE6.45-180 WTGS

Di seguito vengono riportate le principali caratteristiche geometriche e tecniche:

No.	Main component	Packing size (m) L×W×H	Weight (t)	Center of mass
1	Main frame assembly	10.36×5.478×9.207	247	X=-2.484 Y=0 Z=2.905
2	Hub assembly	6.333×5.764×6.111	92	X=0.237 Y=0 Z=0.034
3	Blade	86.5	3X31±3%	X=25.82

Tabella 3.1 – Principali caratteristiche dell'aerogeneratore MingYang MySE6.45-180

No.	Component	Unit	Technical parameter
1	<b>General parameter</b>		
1.1	Manufacturer/model		Ming Yang Smart Energy Group Limited /MySE6.45-180
1.2	Rated power	kW	6450
1.3	Rotor diameter	m	178
1.4	Cut-in wind speed	m/s	3
1.5	Design annual average wind speed	m/s	9
1.6	Turbulence intensity		0.14
1.7	Static rated power	m/s	10.5 (standard air density)
1.8	Cut-out wind speed (average within 10min)	m/s	25 (soft cut-out 28)
1.9	Hub height	m	111
1.10	Extreme (survival) wind speed (maximum within 3s)	m/s	77.28
1.11	Design service life	year	25
2	<b>Blade</b>		
2.1	Blade material		Reinforced glass fiber
2.2	Blade tip linear velocity	m/s	100.6
3	<b>Gearbox</b>		
3.1	Number of gear stage		2
3.2	Gear drive ratio		1: 23.187
3.3	Rated torque	kNm	6366.7 (input)
4	<b>Generator</b>		
4.1	Rated power	kW	7000
4.2	Rated voltage	V	710
4.3	Rated power factor		-0.95C
4.4	Insulation class		H/F
5	<b>Converter</b>		
5.1	Apparent power	kVA	6750
5.2	Rated output voltage	V	690
5.3	Rated output current	A	5648
5.4	Output frequency range:	Hz	50±2.5
5.5	Protection class		IP54
5.6	Cooling method		Water cooling
6	<b>Braking system</b>		
6.1	Main braking system		Independent pitch braking
6.2	Secondary braking system		Hydraulic disc brake
7	<b>Yaw system</b>		
7.1	Control		Active type
7.2	Yaw control speed	°/s	0.293
8	<b>Lightning protection</b>		
8.1	Lightning protection design standard		IEC61400-24 I
8.2	Grounding resistance of turbine	Ω	≤4
9	<b>Weight</b>		
9.1	Nacelle (including generator and gearbox)	kg	24600
9.2	Generator	kg	51000
9.3	Gearbox	kg	76000
9.4	Blades (1 set)	kg	3×31000±3%
9.5	Hub system	kg	92000

Tabella 3.2 – Principali caratteristiche tecniche dell'aerogeneratore MingYang MySE6.45-180

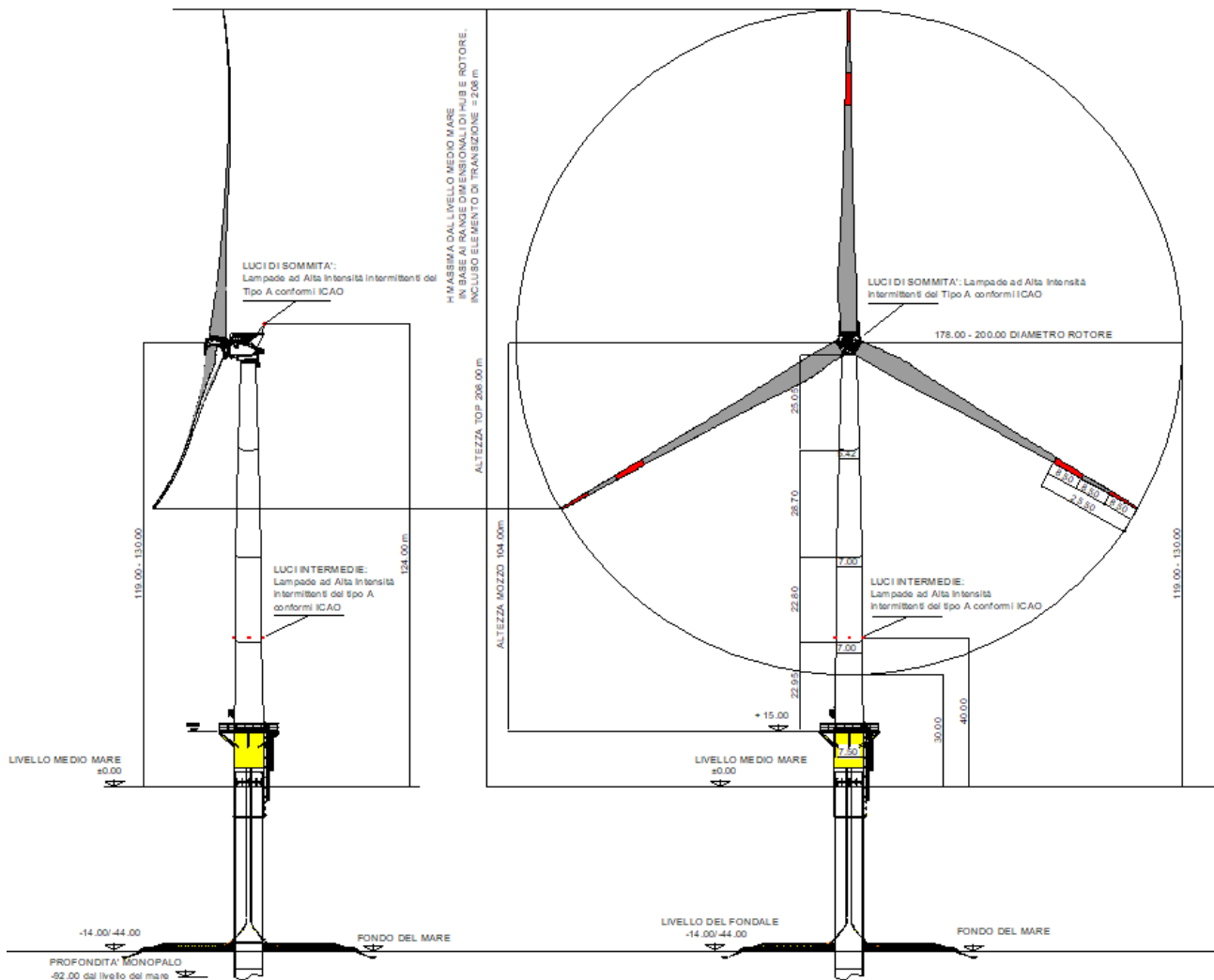


Figura 3.2 – Rappresentazione Aerogeneratore

### 3.2 Layout dell'impianto

Di seguito vengono riportate le rappresentazioni grafiche e le coordinate geografiche (UTM WGS84 fuso 33N) delle turbine per i 2 layout:

Turbine number	Layout A		Layout B	
	Easting	Northing	Easting	Northing
1	325928	4892794	323257	4889864
2	325249	4892745	323342	4890579
3	324575	4892658	323456	4891290
4	323906	4892535	323599	4891996
5	323245	4892375	323770	4892695
6	322594	4892179	323969	4893387
7	321954	4891949	324197	4894070
8	321328	4891683	324451	4894744
9	320718	4891384	324733	4895406
10	320124	4891052	325042	4896057
11	319550	4890688	325377	4896694
12	318996	4890294	325737	4897317
13	318465	4889869	326122	4897926
14	317957	4889417	326532	4898518
15	329803	4891210	326965	4899093
16	329125	4891156	327422	4899650
17	328452	4891063	327900	4900188
18	327785	4890931	328400	4900706
19	327126	4890761	328921	4901203
20	326479	4890554	329461	4901679
21	325844	4890309	330020	4902132
22	325224	4890029	330598	4902563
23	324622	4889713	331192	4902970
24	324039	4889364	326581	4889897
25	323477	4888981	326687	4890610
26	322938	4888567	326828	4891316
27	322423	4888122	327004	4892014
28	321935	4887648	327215	4892702
29	321475	4887147	327460	4893379
30	321045	4886621	327739	4894043
31	320645	4886071	328050	4894692
32	332257	4889748	328393	4895325
33	331584	4889647	328767	4895940
34	330920	4889502	329172	4896536
35	330267	4889314	329605	4897111
36	329627	4889082	330067	4897663
37	329005	4888809	330556	4898192
38	328402	4888494	331070	4898696
39	327821	4888141	331609	4899173
40	327264	4887750	332171	4899623
41	326735	4887323	329919	4889931
42	326235	4886862	330058	4890637
43	325767	4886369	330243	4891333
44	325332	4885846	330472	4892016
45	324933	4885296	330745	4892682
46	324571	4884720	331060	4893329
47	324248	4884122	331417	4893955
48	323966	4883503	331813	4894556
49	323725	4882867	332247	4895131
50	323527	4882217	332717	4895676
51	323372	4881555	333222	4896189

Tabella 3.3 – Coordinate geografiche delle turbine per i 2 layout

### 3.3 Materiali

Le caratteristiche del materiale previsto per la realizzazione delle opere oggetto della presente relazione sono riportate nella tabella seguente:

Denominazione	Tensione di snervamento minima $f_{yk}$ [MPa]					Tensione di rottura $f_{tk}$ [MPa]	
	Spessore nominale [mm]					Spessore nominale [mm]	
	$\leq 16$	$>16$ $\leq 40$	$>40$ $\leq 63$	$>63$ $\leq 80$	$>80$ $\leq 100$	$\leq 3$	$>3$ $\leq 100$
S 355	355	345	335	325	315	510 to 680	470 to 630

Tabella 3.4 – Caratteristiche meccaniche acciaio strutturale (EN 10025)

### 3.4 Natura dei terreni e parametri geotecnici

Le caratteristiche stratigrafiche e geotecniche dei terreni interessati dalla struttura di fondazione, sono state estratte dalla "Relazione geotecnica" (Doc. n. OWFRMN\_V2.SC2.04). In particolare, si è fatto riferimento a quanto indicato nel Foglio NL 33-10 "Ravenna" della Carta Geologica dei Mari Italiani"; in particolare alla sezione B-B che mostra l'andamento dei depositi subacquei nella zona antistante Rimini.

Esagerazione verticale 250X

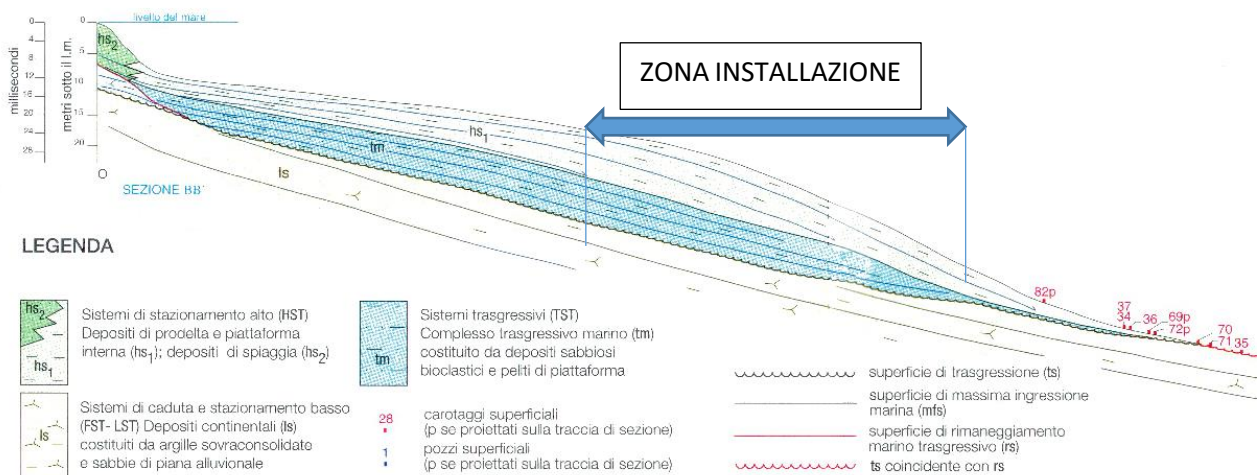


Figura 3.3 – Sezione B-B' indicante la successione sedimentologica dei depositi di superficie nella zona del fondo marino antistante Rimini (da Foglio NL 33-10 "Ravenna" della carta Geologica dei Mari Italiani alla scala 1:250.000).

Unità hs1		Porzioni sabbiose fini	Porzioni argilloso-limose
Peso di volume	(kg/m <sup>3</sup> )	1850-1950	1800-1850
Angolo di attrito	(°)	22-24	18-22
Coesione	(kg/cm <sup>2</sup> )	/	/
Coesione non drenata	(kg/cm <sup>2</sup> )	/	0.3-0.7
Modulo elastico	(kg/cm <sup>2</sup> )	50-200	30-120

Unità tm		Porzioni sabbiose	Porzioni argilloso-limose
Peso di volume	(kg/m <sup>3</sup> )	1850-1950	1850-1900
Angolo di attrito	(°)	24-26	20 -24
Coesione	(kg/cm <sup>2</sup> )	/	/
Coesione non drenata	(kg/cm <sup>2</sup> )	/	0.4-0.8
Modulo elastico	(kg/cm <sup>2</sup> )	100-250	40-150

Unità ls		Porzioni sabbiose	Porzioni argillose OC
Peso di volume	(kg/m <sup>3</sup> )	1850-1950	1900-2000
Angolo di attrito	(°)	28-32	22 -26
Coesione	(kg/cm <sup>2</sup> )	/	0.10-0.25
Coesione non drenata	(kg/cm <sup>2</sup> )	/	0.8-1.6
Modulo elastico	(kg/cm <sup>2</sup> )	150-450	150-300

Tabella 3.5 – Caratteristiche geomeccaniche preliminari per le unità deposizionali riportate in Figura 3.3

### 3.5 Dati idrodinamici

Le turbine eoliche verranno posizionate in una zona di mare con profondità variabile fra 14m e 44m.

#### 3.5.1 Onde e corrente

Ai fini della progettazione della fondazione degli aerogeneratori, sono stati considerati i seguenti parametri idrodinamici:

Tag	Onde estreme (OMNI)											
	U1			U10			U50			U100		
	1 ANNO			10 ANNI			50 ANNI			100 ANNI		
Data Set	Hs (m)	Tp(s)	H <sub>max</sub> (m)	Hs (m)	Tp(s)	H <sub>max</sub> (m)	Hs (m)	Tp(s)	H <sub>max</sub> (m)	Hs (m)	Tp(s)	H <sub>max</sub> (m)
WD<20m	3.95	8.1	7.1	5.24	8.8	9.4	6.17	9.2	11.0	6.57	9.3	11.7
WD>20m	4.38	8.9	7.8	5.76	9.9	10.2	6.74	10.5	11.9	7.17	10.7	12.6

Tabella 3.6 – Dati onde

Tag	Correnti (m/s) (OMNI)							
	U <sub>c_1</sub>		U <sub>c_10</sub>		U <sub>c_50</sub>		U <sub>c_100</sub>	
	1 ANNO		10 ANNI		50 ANNI		100 ANNI	
Data Set	U <sub>sup</sub>	U <sub>bottom</sub> <sup>(1)</sup>	U <sub>sup</sub>	U <sub>bottom</sub> <sup>(1)</sup>	U <sub>sup</sub>	U <sub>bottom</sub> <sup>(1)</sup>	U <sub>sup</sub>	U <sub>bottom</sub> <sup>(1)</sup>
WD<20m	0.70	0.48	0.81	0.56	0.88	0.60	0.90	0.62
WD>20m	0.53	0.31	0.61	0.36	0.66	0.39	0.68	0.40

Note:

(1) U<sub>bottom</sub> = 1m dal fondo, dove il fondo è assunto rispettivamente pari a 14m e a 44m

Tabella 3.7 – Dati corrente



### 3.5.2 Marine Growth (crescita marina)

Per tenere conto dell'accrescimento marino sul raggio del palo, è stato assunto un valore pari a 5cm a ridosso della superficie del mare in una fascia compresa fra -5m e +1m.

### 3.5.3 Coefficienti idrodinamici

I seguenti coefficienti idrodinamici sono stati considerati nel calcolo:

- $C_D = 0.75$  (coefficiente di trascinamento);
- $C_M = 2.00$  (coefficiente d'inerzia).

### 3.6 Dati di vento

I dati da vento sono stati estratti dal NEWA (/A4/ ) e successivamente elaborati in accordo alle ISO 19901 per estrarre i valori delle raffiche a 3 secondi e 10 minuti.

Dir (°N)	1 YEAR	10 YEAR	50 YEAR	100 YEAR
0	17.4	21.2	23.6	24.6
20	21.0	25.4	28.3	29.5
40	25.6	30.8	34.1	35.5
60	23.6	29.1	32.7	34.2
80	17.4	21.0	23.4	24.4
100	15.5	18.2	20.0	20.7
120	18.7	21.7	23.7	24.5
140	19.5	23.0	25.2	26.2
160	19.1	23.0	25.5	26.5
180	21.9	26.7	29.8	31.0
200	21.8	26.9	30.1	31.5
220	17.9	21.8	24.2	25.3
240	20.5	24.9	27.7	28.8
260	21.2	25.2	27.8	28.9
280	16.7	19.6	21.5	22.2
300	16.8	19.6	21.3	22.0
320	15.1	18.1	20.0	20.8
340	15.2	18.6	20.7	21.6
<b>Omnidirezionale</b>	<b>25.6</b>	<b>30.8</b>	<b>34.1</b>	<b>35.5</b>

Tabella 3.8 – Dati velocità estrema del vento (m/s) – H<sub>ref</sub> 100m

Di seguito i valori elaborati riferiti ad un periodo di 3 secondi.

Dir. (°N)	1 YEAR		10 YEAR		50 YEAR		100 YEAR	
	lu(z)	U <sub>w,T(z)</sub>	lu(z)	U <sub>w,T(z)</sub>	lu(z)	U <sub>w,T(z)</sub>	lu(z)	U <sub>w,T(z)</sub>
0	0.105	22.187	0.115	27.577	0.121	31.083	0.123	32.566
20	0.114	27.289	0.126	33.763	0.133	38.173	0.136	40.031
40	0.126	34.063	0.139	42.066	0.148	47.334	0.152	49.614
60	0.121	31.083	0.135	39.409	0.144	45.081	0.148	47.496
80	0.105	22.187	0.114	27.289	0.120	30.787	0.123	32.268
100	0.100	19.565	0.107	23.305	0.112	25.854	0.113	26.857
120	0.108	24.009	0.116	28.301	0.121	31.230	0.123	32.417
140	0.110	25.142	0.119	30.199	0.125	33.463	0.128	34.968
160	0.109	24.574	0.119	30.199	0.126	33.913	0.128	35.422
180	0.117	28.592	0.129	35.726	0.137	40.499	0.140	42.381
200	0.116	28.446	0.129	36.030	0.138	40.967	0.141	43.171
220	0.106	22.885	0.116	28.446	0.122	31.971	0.125	33.613
240	0.113	26.570	0.124	33.014	0.131	37.251	0.134	38.945
260	0.115	27.577	0.125	33.463	0.132	37.404	0.135	39.099
280	0.103	21.215	0.111	25.284	0.115	28.011	0.117	29.028
300	0.103	21.354	0.111	25.284	0.115	27.722	0.117	28.737
320	0.099	19.019	0.107	23.165	0.112	25.854	0.114	27.001
340	0.099	19.155	0.108	23.868	0.113	26.857	0.116	28.156
		U <sub>wind_1</sub>		U <sub>wind_10</sub>		U <sub>wind_50</sub>		U <sub>wind_100</sub>
<b>Omnidirezionale</b>	<b>0.126</b>	<b>34.063</b>	<b>0.139</b>	<b>42.066</b>	<b>0.148</b>	<b>47.334</b>	<b>0.152</b>	<b>49.614</b>

Tabella 3.9 – Dati velocità estrema del vento – 3 secondi (m/s)

Di seguito i valori elaborati riferiti ad un periodo di 10 minuti.

Dir. (°N)	1 YEAR		10 YEAR		50 YEAR		100 YEAR	
	Iu(z)	Uw,T(z)	Iu(z)	Uw,T(z)	Iu(z)	Uw,T(z)	Iu(z)	Uw,T(z)
0	0.105	18.2	0.115	22.3	0.121	24.9	0.123	26.0
20	0.114	22.1	0.126	26.8	0.133	30.0	0.136	31.3
40	0.126	27.1	0.139	32.7	0.148	36.4	0.152	37.9
60	0.121	24.9	0.135	30.9	0.144	34.8	0.148	36.5
80	0.105	18.2	0.114	22.1	0.120	24.7	0.123	25.8
100	0.100	16.2	0.107	19.1	0.112	21.0	0.113	21.8
120	0.108	19.6	0.116	22.8	0.121	25.0	0.123	25.9
140	0.110	20.5	0.119	24.2	0.125	26.6	0.128	27.7
160	0.109	20.0	0.119	24.2	0.126	26.9	0.128	28.0
180	0.117	23.0	0.129	28.3	0.137	31.6	0.140	33.0
200	0.116	22.9	0.129	28.5	0.138	32.0	0.141	33.5
220	0.106	18.8	0.116	22.9	0.122	25.5	0.125	26.7
240	0.113	21.5	0.124	26.3	0.131	29.3	0.134	30.5
260	0.115	22.3	0.125	26.6	0.132	29.4	0.135	30.7
280	0.103	17.5	0.111	20.6	0.115	22.6	0.117	23.4
300	0.103	17.6	0.111	20.6	0.115	22.4	0.117	23.2
320	0.099	15.8	0.107	19.0	0.112	21.0	0.114	21.9
340	0.099	15.9	0.108	19.5	0.113	21.8	0.116	22.7
omni	0.123	25.6	0.132	29.4	0.138	32.0	0.140	33.0
		$U_{wind\_1}$		$U_{wind\_10}$		$U_{wind\_50}$		$U_{wind\_100}$
<b>Omnidirezionale</b>	0.126	<b>27.1</b>	0.139	<b>32.7</b>	0.148	<b>36.4</b>	0.152	<b>37.9</b>

Tabella 3.10 – Dati velocità estrema del vento – 10 minuti (m/s)

### 3.6.1 Dati vento aerogeneratore

Per quanto riguarda la turbina sono stati considerati i seguenti valori significativi:

Tag	Descrizione	$U_{wind}$ (m/s)
$U_{wind\_100}$	Vento con periodo di ritorno 100 anni	37.9
$U_{wind\_rated}$	Velocità operativa della turbina eolica (/A1/ )	10.5
$U_{wind\_cut-out}$	Velocità operativa max della turbina eolica (/A1/ )	25
$U_{wind\_max}$	Velocità del vento massima per la turbina eolica	77

Tabella 3.11 – Dati vento turbina

Di seguito si riporta il coefficiente di thrust per ogni velocità del vento, come da /A2/ .

Nei casi in cui le pale sono ferme (al di fuori della velocità di cut-out ), è stato assunto un coefficiente di trascinamento pari a 0.8.

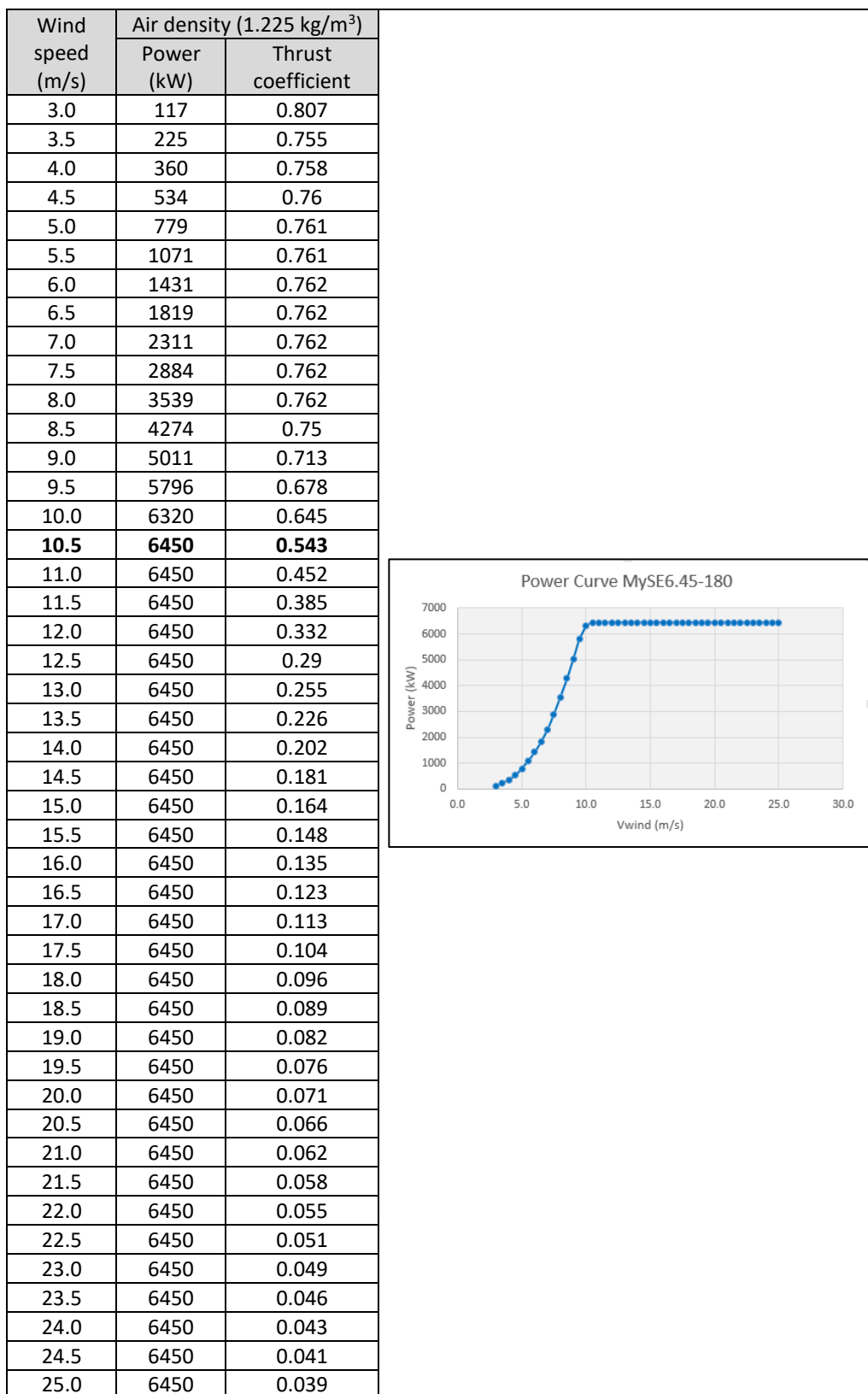


Tabella 3.12 – Dati vento turbina

## 3.7 Dati sismici

Ai fini della progettazione della fondazione monopalo dell'aerogeneratore e della piattaforma che ospita la sottostazione elettrica sono stati ricavati gli spettri sismici prendendo a riferimento due normative, ovvero le NTC [Ref. 1] e le ISO [Ref. 7] (normativa specifica per la progettazione di piattaforme a mare).

Lo spettro sismico utilizzato per la progettazione delle strutture è stato scelto valutando il più cautelativo fra le due normative analizzate.

### 3.7.1 Spettro sismico secondo NTC

Per la valutazione dell'accelerazione spettrale è necessario valutare i parametri sismici a partire dalla conoscenza della posizione del sito in cui l'opera verrà ubicata, dalla categoria di sottosuolo e dalla categoria topografica.

Di seguito vengono riportate le procedure per ricavare lo spettro di risposta sismica rispettivamente dell'aerogeneratore e della piattaforma.

#### 3.7.1.1 Spettro sismico Aerogeneratore

I parametri necessari alla valutazione dello spettro sismico sono di seguito riportati:

- ubicazione opera: zona di mare antistante la costa tra Rimini e Cattolica.
- categoria di sottosuolo: C
- categoria topografica: T1.

La descrizione di tali categorie è illustrata qui nel seguito.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi 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.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, 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.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa medianamente addensati o terreni a grana fina medianamente consistenti 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.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, 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.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tabella 3.13 – Categorie di sottosuolo che permettono l'approccio semplificato (Tab. 3.2II da NTC18).

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Tabella 3.14 – Categorie topografiche (Tab. 3.2.III da NTC18).

Tali dati vengono inseriti nel programma "Spettri NTC" per l'elaborazione dell'azione sismica



Figura 3.4 – Software "Spettri NTC"

Nella fase iniziale, tramite le coordinate in ED50, viene individuata la pericolosità del sito. Le azioni sismiche vengono successivamente calcolate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$ :

$$V_R = C_U \times V_N$$

$C_U$  è pari a 0.7 per classe d'uso pari a I, mentre  $V_N$  viene assunto invece pari a 25 anni.

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE $C_U$	0,7	1,0	1,5	2,0

Tabella 3.15 – Valori del coefficiente d'uso  $C_U$  (Tab. 2.4.II da NTC18).

La valutazione di  $V_R$  risulta

$$V_R = 0.7 \times 25 = 17.5 \text{ anni}$$

A favore di sicurezza il valore di  $V_R$  viene assunto pari a 35 anni.

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ , cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono fissati dalla Normativa e indipendenti dal periodo di

riferimento  $V_R$ . Nel caso in esame, come si osserva dalla seguente tabella, la probabilità di superamento nel periodo di riferimento SLC (stato limite di collasso) è del 5%.

Stati Limite	$P_{V_R}$ : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento $V_R$	
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Tabella 3.16 – Probabilità di superamento  $P_{V_R}$  (Tab. 3.2.I da NTC18)

Il periodo di ritorno del sisma si può ottenere dalla relazione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1-P_{V_R})} = -\frac{C_U V_N}{\ln(1-P_{V_R})}$$

### Spettro di risposta Elastico

lo spettro di risposta elastico è il seguente:

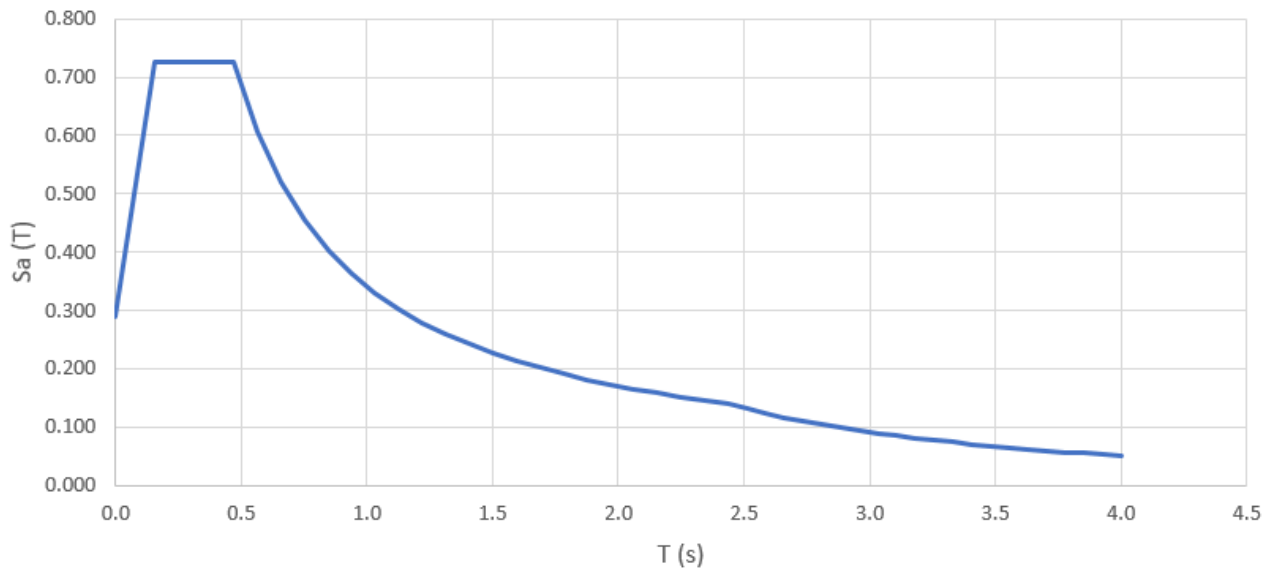


Tabella 3.17 – Spettro elastico orizzontale per lo stato limite: SLC

### Spettro di risposta di Progetto

Per la determinazione delle azioni sismiche in base alle quali valutare il rispetto degli stati limite ultimi al fine del progetto o della verifica di una struttura, il fattore di struttura( $q$ ) è un fattore di riduzione che permettere di ottenere gli spettri di progetto (riferiti ad un oscillatore elementare a comportamento anelastico) da quelli degli spettri di risposta elastici (riferiti ad un oscillatore elementare a comportamento elastico lineare).

Il fattore di struttura definisce quindi lo spettro di progetto a partire dallo spettro di risposta elastica (con l'eccezione del primo tratto ad andamento lineare, lo spettro di progetto è ottenuto da quello di risposta elastica mediante divisione per il fattore di struttura).

Per la valutazione del fattore di struttura occorre per prima cosa determinare la classe di duttilità. Nel caso la struttura abbia comportamento strutturale dissipativo, si distinguono due livelli di Capacità Dissipativa o Classi di Duttilità (CD):

- Classe di duttilità alta (CD"A");
- Classe di duttilità bassa (CD"B").

Nel caso in esame si è deciso di progettare la struttura in CD"B".

Il valore del fattore di struttura  $q$  da utilizzare per, dipende dalla tipologia strutturale, dal suo grado di iperstaticità e dai criteri di progettazione adottati e prende in conto le non linearità di materiale. Esso può essere calcolato tramite la seguente espressione:

$$q = q_0 \times K_r$$

Dove  $q_0$  è il valore massimo del fattore di struttura che dipende dal livello di duttilità attesa, dalla tipologia strutturale e dal rapporto  $\alpha_u/\alpha_1$  tra il valore dell'azione sismica per il quale si verifica la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere la struttura labile e quello per il quale il primo elemento strutturale raggiunge la plasticizzazione a flessione; mentre  $K_r$  rappresenta un fattore riduttivo che dipende dalle caratteristiche di regolarità in altezza della costruzione, con valore pari ad 1 per costruzioni regolari in altezza e pari a 0,8 per costruzioni non regolari in altezza.

Il valore di  $q_0$  assunto è pari a 2 come riportato nella tabella seguente:

Tipologia strutturale	$q_0$	
	CD"A"	CD"B"
<b>Costruzioni d'acciaio (§ 7.5.2.2) e composte di acciaio-calcestruzzo (§ 7.6.2.2)</b>		
Strutture intelaiate		
Strutture con controventi eccentrici	$5,0 \alpha_u/\alpha_1$	4,0
Strutture con controventi concentrici a diagonale tesa attiva	4,0	4,0
Strutture con controventi concentrici a V	2,5	2,0
Strutture a mensola o a pendolo inverso	$2,0 \alpha_u/\alpha_1$	2,0
Strutture intelaiate con controventi concentrici	$4,0 \alpha_u/\alpha_1$	4,0
Strutture intelaiate con tamponature in murature	2,0	2,0

Tabella 3.18 – Valori massimi del valore di base  $q_0$  (Tab. 7.3.II da NTC18)

La struttura è stata valutata come regolare in altezza, quindi il fattore  $K_r$  è stato assunto pari a 1.0.

Il fattore di struttura è:

$$q = 2 \times 1.0 = 2$$



lo spettro di risposta di progetto è il seguente:

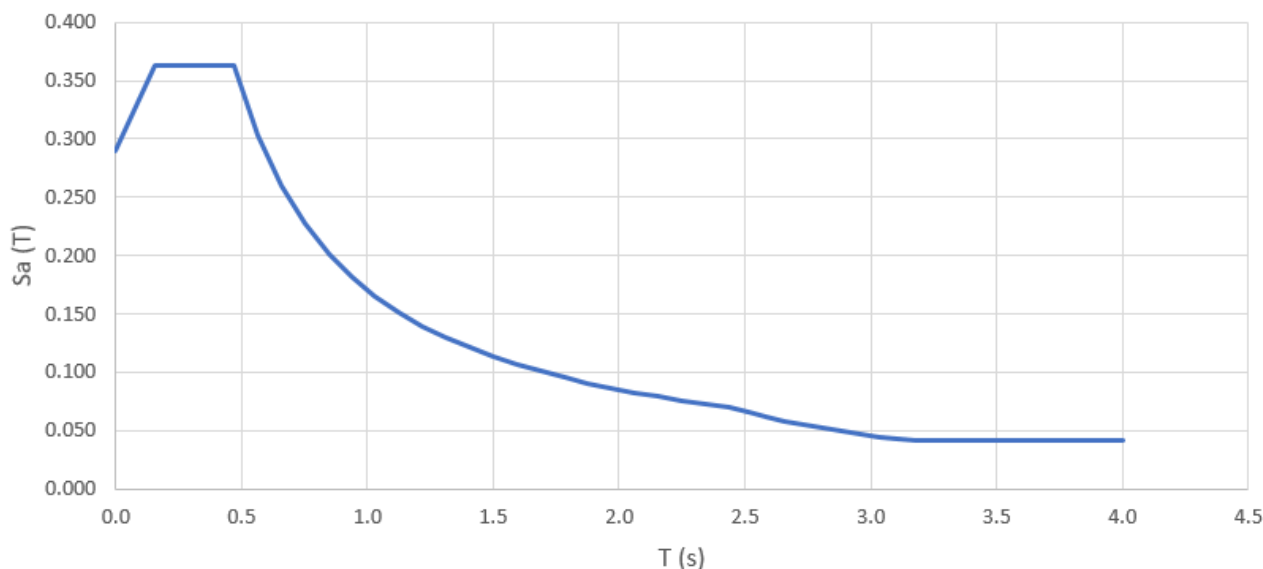


Tabella 3.19 – Spettro di progetto orizzontale per lo stato limite: SLC

### 3.7.1.2 Spettro sismico piattaforma

I parametri necessari alla valutazione dello spettro sismico sono di seguito riportati:

- ubicazione opera: zona di mare antistante la costa tra Rimini e Cattolica.
- categoria di sottosuolo: C
- categoria topografica: T1.

La descrizione di tali categorie è illustrata qui nel seguito.

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi 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.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, 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.</i>
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti 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.</i>
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, 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.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Tabella 3.20 – Categorie di sottosuolo che permettono l’utilizzo dell’approccio semplificato

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Tabella 3.21 – Categorie topografiche

Tali dati vengono inseriti nel programma "Spettri NTC" per l'elaborazione dell'azione sismica



Figura 3.5 – Software "Spettri NTC"

Nella fase iniziale, tramite le coordinate in ED50, viene individuata la pericolosità del sito. Le azioni sismiche vengono successivamente calcolate in relazione ad un periodo di riferimento  $V_R$  che si ricava, per ciascun tipo di costruzione, moltiplicandone la vita nominale  $V_N$  per il coefficiente d'uso  $C_U$ :

$$V_r = C_u \times V_n$$

$C_u$  è pari a 0.7 per classe d'uso pari a I, mentre  $V_n$  viene assunto invece pari a 50 anni.

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di $V_N$ (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

Tabella 3.22 – Valori minimi della Vita nominale  $V_N$  di progetto per i diversi tipi di costruzioni

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE $C_U$	0,7	1,0	1,5	2,0

Tabella 3.23 – Valori del coefficiente d'uso  $C_U$

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ , cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono fissati dalla Normativa e indipendenti dal periodo di riferimento  $V_R$ . Nel caso in esame, come si osserva dalla seguente tabella, la probabilità di superamento nel periodo di riferimento SLC (stato limite di collasso) è del 5%.

Stati Limite	$P_{VR}$ : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento $V_R$	
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Tabella 3.24 – Probabilità di superamento  $P_{VR}$  in funzione dello stato limite considerato

Il periodo di ritorno del sisma si può ottenere dalla relazione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1-P_{VR})} = -\frac{C_U V_N}{\ln(1-P_{VR})}$$

### Spettro di risposta Elastico

lo spettro di risposta elastico è il seguente:

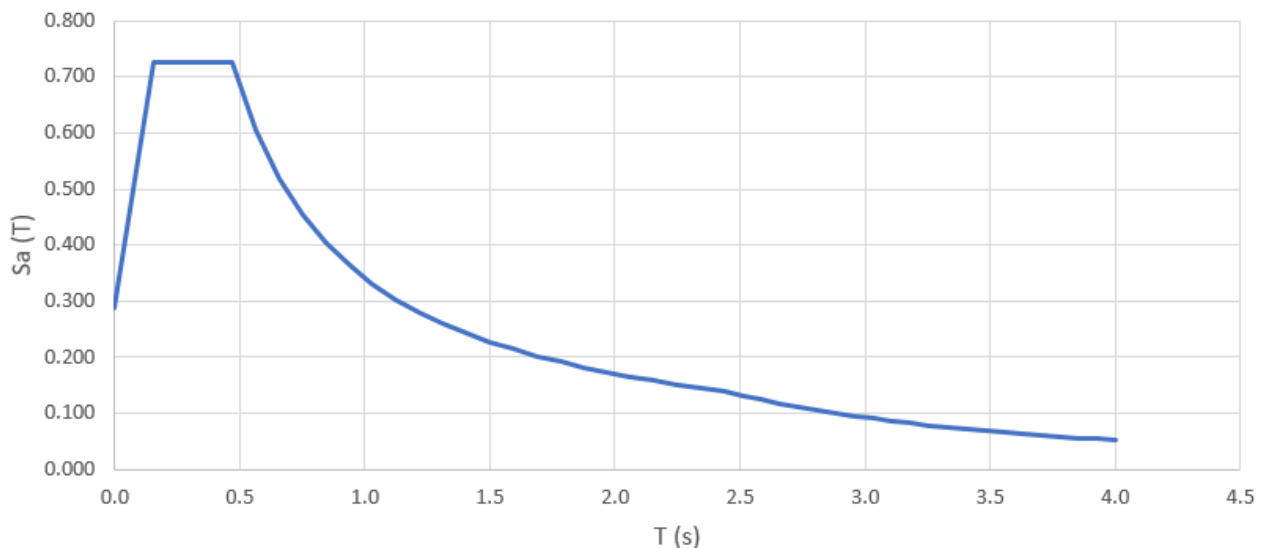


Tabella 3.25 – Spettro elastico orizzontale per lo stato limite: SLC

### Spettro di risposta di Progetto

Per la determinazione delle azioni sismiche in base alle quali valutare il rispetto degli stati limite ultimi al fine del progetto o della verifica di una struttura, il fattore di struttura ( $q$ ) è un fattore di riduzione che permette di ottenere gli spettri di progetto (riferiti ad un oscillatore elementare a comportamento anelastico) da quelli degli spettri di risposta elastici (riferiti ad un oscillatore elementare a comportamento elastico lineare).

Il fattore di struttura definisce quindi lo spettro di progetto a partire dallo spettro di risposta elastica (con l'eccezione del primo tratto ad andamento lineare, lo spettro di progetto è ottenuto da quello di risposta elastica mediante divisione per il fattore di struttura).

Per la valutazione del fattore di struttura occorre per prima cosa determinare la classe di duttilità. Nel caso la struttura abbia comportamento strutturale dissipativo, si distinguono due livelli di Capacità Dissipativa o Classi di Duttilità (CD):

- Classe di duttilità alta (CD"A");
- Classe di duttilità bassa (CD"B").

Nel caso in esame si è deciso di progettare la struttura in CD"B".

Il valore del fattore di struttura  $q$  da utilizzare per, dipende dalla tipologia strutturale, dal suo grado di iperstaticità e dai criteri di progettazione adottati e prende in conto le non linearità di materiale. Esso può essere calcolato tramite la seguente espressione:

$$q = q_0 \times K_r$$

Dove  $q_0$  è il valore massimo del fattore di struttura che dipende dal livello di duttilità attesa, dalla tipologia strutturale e dal rapporto  $\alpha_u/\alpha_1$  tra il valore dell'azione sismica per il quale si verifica la formazione di un numero di cerniere plastiche tali da rendere la struttura labile e quello per il quale il primo elemento strutturale raggiunge la plasticizzazione a flessione; mentre  $K_r$  rappresenta un fattore riduttivo che dipende dalle caratteristiche di regolarità in altezza della costruzione, con valore pari ad 1 per costruzioni regolari in altezza e pari a 0,8 per costruzioni non regolari in altezza.

Il valore di  $q_0$  assunto è pari a 4 come riportato nella tabella seguente:

Tipologia strutturale	$q_0$	
	CD"A"	CD"B"
<b>Costruzioni d'acciaio (§ 7.5.2.2) e composte di acciaio-calcestruzzo (§ 7.6.2.2)</b>		
Strutture intelaiate		4,0
Strutture con controventi eccentrici	$5,0 \alpha_u/\alpha_1$	4,0
Strutture con controventi concentrici a diagonale tesa attiva	4,0	4,0
Strutture con controventi concentrici a V	2,5	2,0
Strutture a mensola o a pendolo inverso	$2,0 \alpha_u/\alpha_1$	2,0
Strutture intelaiate con controventi concentrici	$4,0 \alpha_u/\alpha_1$	4,0
Strutture intelaiate con tamponature in murature	2,0	2,0

Tabella 3.26 – Valori massimi del valore di base  $q_0$  (Tab. 7.3.11 da NTC18)

La struttura è stata valutata come non regolare in altezza, quindi il fattore  $K_r$  è stato assunto pari a 0.8.

Il fattore di struttura è:

$$q = 4 \times 0.8 = 3.2$$

lo spettro di risposta di progetto è il seguente:

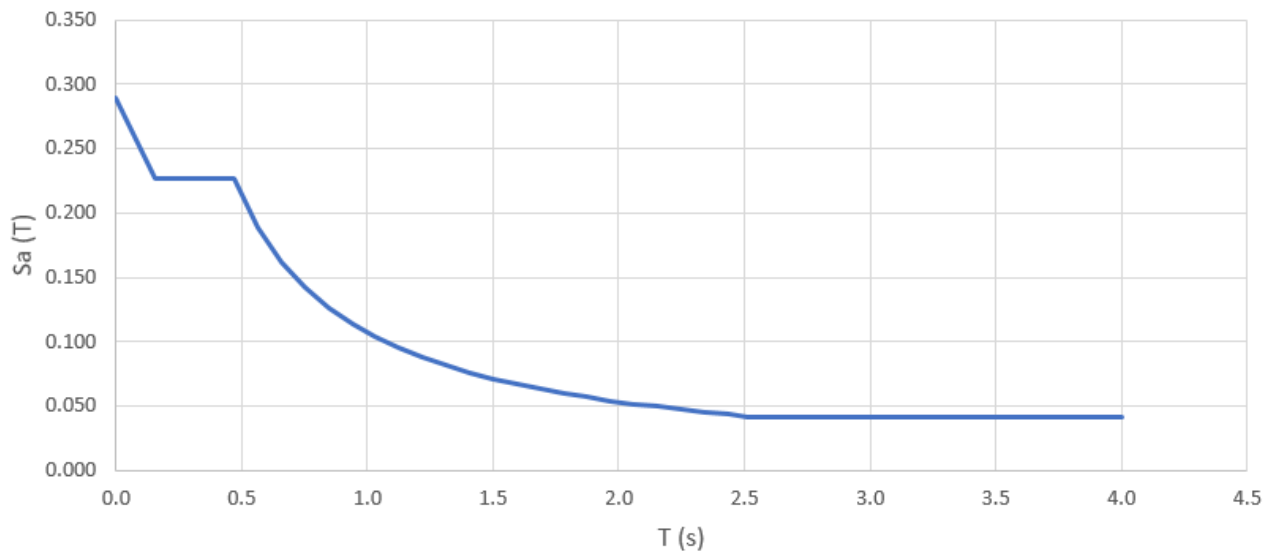


Figura 3.6 – Spettro di progetto orizzontale per lo stato limite: SLC

### 3.7.2 Spettro sismico secondo ISO

Lo spettro sismico è stato ricavato mediante la "Simplified seismic action procedure" secondo le norme ISO ([Ref. 7])

Per la valutazione dell'accelerazione spettrale è necessario valutare i parametri sismici a partire dalla conoscenza della categoria di rischio sismico (SRC), dalla categoria di sottosuolo e dalla tipologia di fondazione.

La zona sismica del sito in questione è stata identificata usando le mappe sismiche generiche delle accelerazioni spettrali per le aree offshore del mondo che sono presentate nell'allegato B delle ISO 19901-2 [Ref. 7]. I parametri relativi all'area in questione sono i seguenti:

$$S_{a,map}(0.2 \text{ s}) = 0.25 \text{ g}$$

$$S_{a,map}(1.0 \text{ s}) = 0.10 \text{ g}$$

I valori di accelerazione sono espressi in g e corrispondono ad accelerazioni spettrali smorzate del 5% su affioramento roccioso, definite come classe di sito A/B nella Tabella 3.30. Queste accelerazioni hanno un periodo di ritorno medio di 1 000 anni.

La zona sismica del sito è la 1 come riportato dalla seguente Tabella 3.27:

$S_{a,map}(1,0)$	<0,03 g	0,03 g to 0,10 g	0,11 g to 0,25 g	0,26 g to 0,45 g	>0,45 g
Seismic zone	0	1	2	3	4

Tabella 3.27 – Zona sismica del sito

#### 3.7.2.1 Spettro sismico Aerogeneratore

Il livello di esposizione della Piattaforma è L2, poiché la struttura offshore è presidiata per il minor tempo possibile. Le probabilità annuale target di guasto associate al livello di esposizione L2 è riportato nella seguente Tabella 3.34:

Exposure level	$P_f$
L1	$4 \times 10^{-4} = 1/2\ 500$
L2	$1 \times 10^{-3} = 1/1\ 000$
L3	$2,5 \times 10^{-3} = 1/400$

Tabella 3.28 – Probabilità annua target di guasto,  $P_f$

La categoria di rischio sismico della struttura è la SRC2, determinata in base al livello di esposizione e alla zona sismica del sito secondo la seguente Tabella 3.35

Site seismic zone	Exposure level		
	L1	L2	L3
0	SRC 1	SRC 1	SRC 1
1	SRC 3	SRC 2	SRC 2
2	SRC 4	SRC 2	SRC 2
3	SRC 4	SRC 3	SRC 2
4	SRC 4	SRC 4	SRC 3

Tabella 3.29 – Categoria di rischio sismico, SRC

I parametri necessari alla valutazione dello spettro sismico sono di seguito riportati:

- categoria di sottosuolo: D
- tipologia fondazione: pali profondi ( $C_a = 1.0$  ;  $C_v = 1.2$ )

La descrizione di tali categorie è illustrata qui nel seguito.

Site class	Soil profile name	Average properties in the effective seabed		
		Soil shear wave velocity $\bar{V}_s$ m/s	Cohesionless: normalized cone penetration resistance $\bar{q}_{cl}^a$	Cohesive: soil undrained shear strength $\bar{s}_u$ kPa
A/B	Hard rock/rock, thickness of soft sediments <5 m	$\bar{V}_s > 750$	Not applicable	Not applicable
C	Very dense hard soil and soft rock	$350 < \bar{V}_s \leq 750$	$\bar{q}_{cl} \geq 200$	$\bar{s}_u \geq 200$
D	Stiff to very stiff soil	$180 < \bar{V}_s \leq 350$	$80 \leq \bar{q}_{cl} < 200$	$80 \leq \bar{s}_u < 200$
E	Soft to firm soil	$120 < \bar{V}_s \leq 180$	$\bar{q}_{cl} < 80$	$\bar{s}_u < 80$
F	—	Any profile, including those otherwise classified as A to E, containing soils having one or more of the following characteristics: $\bar{V}_s \leq 120$ ; soils vulnerable to potential failure or collapse under seismic actions such as liquefiable soils, highly sensitive clays, collapsible weakly cemented soils; ooze <sup>b</sup> with a thickness of more than 10 m; soil layers with high gas content or ambient excess pore pressure greater than 30 % of <i>in situ</i> effective overburden; layers greater than 2 m thick with sharp contrast in shear wave velocity (greater than $\pm 30$ %) and/or undrained shear strength (greater than $\pm 50$ %) compared to adjacent layers.		

Tabella 3.30 – Categorie di sottosuolo

Site class	$C_a$	$C_v$
A/B	1,0	0,8
C	1,0	1,0
D	1,0	1,2
E	1,0	1,8
F	a	a

Tabella 3.31 – Valori di  $C_a$  e  $C_v$  per fondazioni su pali profondi

### Spettro di risposta ALE

Per ogni periodo dell'oscillatore, T, le accelerazioni spettrali orizzontali ALE sono ottenute dai corrispondenti valori dell'accelerazione spettrale del sito di 1000 anni moltiplicati per il fattore di scala ( $N_{ALE}$ ) che dipende dal livello di esposizione della struttura (vedi Tabella 3.38)

Exposure level	ALE scale factor
	$N_{ALE}$
L1	1,60
L2	1,15
L3	0,85

Tabella 3.32 – Fattore di scala per spettro ALE ( $N_{ALE}$ )

lo spettro di risposta ALE è il seguente:

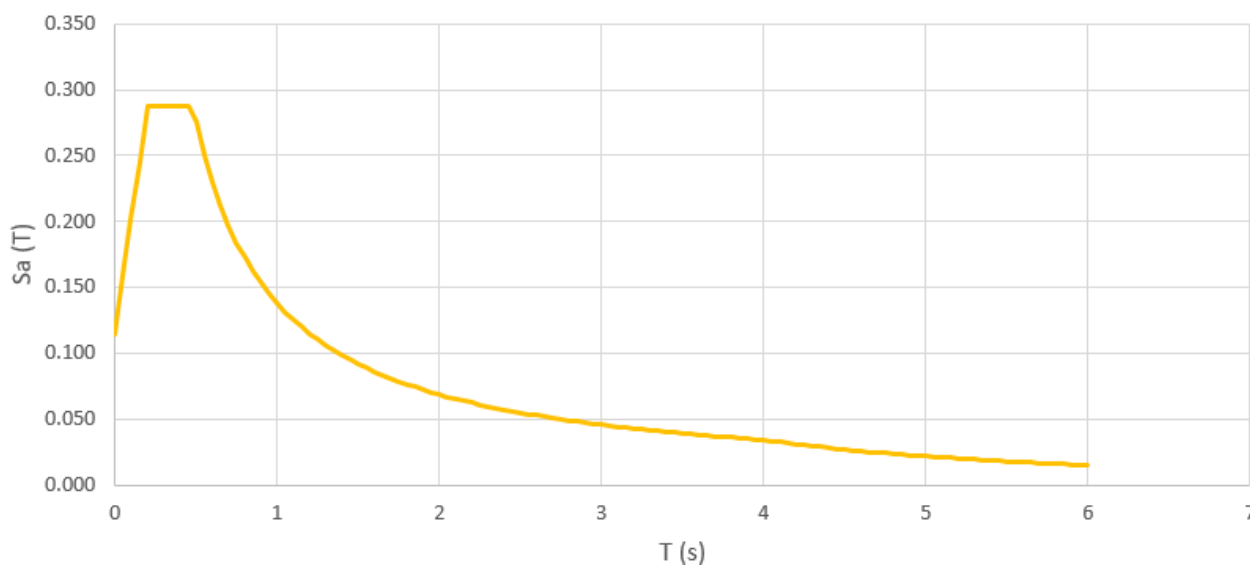


Figura 3.7 – Spettro ALE orizzontale per 5 % damping



**Spettro di risposta ELE**

Le accelerazioni spettrali orizzontali ELE al periodo dell'oscillatore, T, possono essere ottenute dividendo lo spettro ALE per il fattore di capacità di riserva sismica per il sistema strutturale  $C_r$  (vedi Tabella 3.39)

Characteristics of structure design	$C_r$
The recommendations for ductile design according to 11.4 are followed and a non-linear static pushover analysis according to 11.6.3 is performed to verify the global performance of the structure under ALE conditions.	2,80
The recommendations for ductile design according to 11.4 are followed, but a non-linear static pushover analysis to verify ALE performance is not performed.	2,00
The structure has a minimum of three legs and a bracing pattern consisting of leg-to-leg diagonals with horizontals, or X-braces without horizontals. The slenderness ratio ( $K \cdot L/r$ ) of primary bracing in vertical frames is limited to no more than 80 [with the corresponding column slenderness parameter $\lambda$ not exceeding $80/\pi \times \sqrt{f_{yc}/E}$ , see Clause 13] and $f_y D/E t \leq 0,069$ . For X-bracing in vertical frames the same restrictions apply, where the length $L$ to be used depends on the loading pattern of the X-bracing. A non-linear analysis to verify ALE performance is not performed.	1,40
If none of the above characterizations apply.	1,10

Tabella 3.33 – Fattore di capacità di riserva sismica per il sistema strutturale  $C_r$

lo spettro di risposta ELE è il seguente:

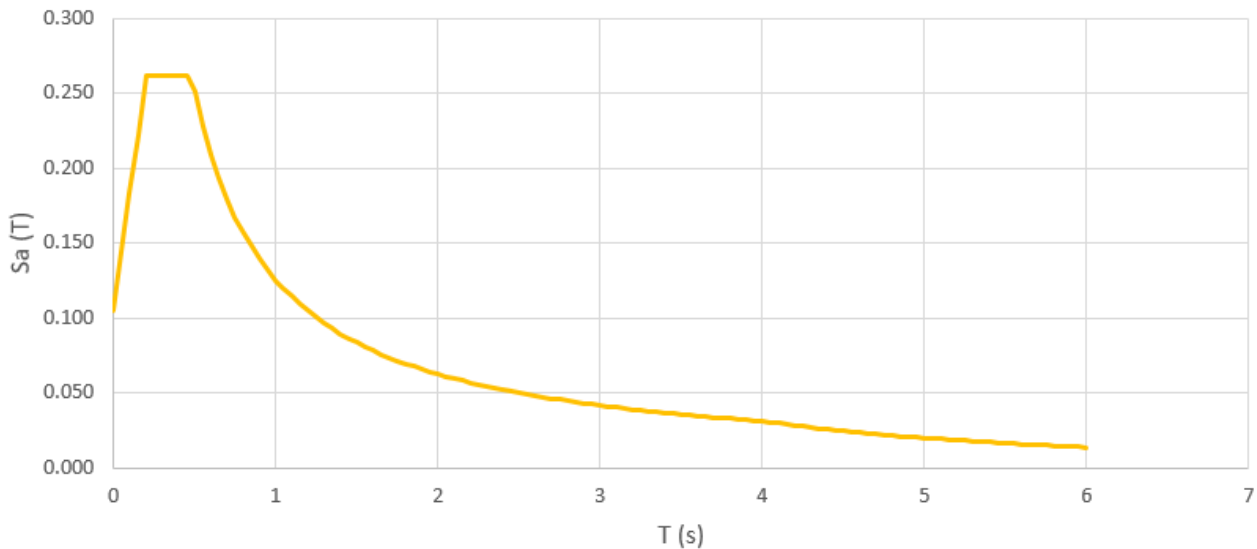


Figura 3.8 – Spettro ELE orizzontale per 5 % damping

### 3.7.2.2 Spettro sismico Piattaforma

Il livello di esposizione della Piattaforma è L1, poiché tutte le strutture offshore presidiate devono essere classificate come tali per le azioni sismiche. Le probabilità annuali target di guasto associate al livello di esposizione L1 è riportato nella seguente Tabella 3.34:

Exposure level	$P_f$
L1	$4 \times 10^{-4} = 1/2\ 500$
L2	$1 \times 10^{-3} = 1/1\ 000$
L3	$2,5 \times 10^{-3} = 1/400$

Tabella 3.34 – Probabilità annua target di guasto,  $P_f$

La categoria di rischio sismico della struttura è la SRC3, determinata in base al livello di esposizione e alla zona sismica del sito secondo la seguente Tabella 3.35

Site seismic zone	Exposure level		
	L1	L2	L3
0	SRC 1	SRC 1	SRC 1
1	SRC 3	SRC 2	SRC 2
2	SRC 4	SRC 2	SRC 2
3	SRC 4	SRC 3	SRC 2
4	SRC 4	SRC 4	SRC 3

Tabella 3.35 – Categoria di rischio sismico, SRC

I parametri necessari alla valutazione dello spettro sismico sono di seguito riportati:

- categoria di sottosuolo: D
- tipologia fondazione: pali profondi ( $C_a = 1.0$  ;  $C_v = 1.2$ )

La descrizione di tali categorie è illustrata qui nel seguito.

Site class	Soil profile name	Average properties in the effective seabed		
		Soil shear wave velocity $\bar{V}_s$ m/s	Cohesionless: normalized cone penetration resistance $\bar{q}_{cl}^a$	Cohesive: soil undrained shear strength $\bar{s}_u$ kPa
A/B	Hard rock/rock, thickness of soft sediments <5 m	$\bar{V}_s > 750$	Not applicable	Not applicable
C	Very dense hard soil and soft rock	$350 < \bar{V}_s \leq 750$	$\bar{q}_{cl} \geq 200$	$\bar{s}_u \geq 200$
D	Stiff to very stiff soil	$180 < \bar{V}_s \leq 350$	$80 \leq \bar{q}_{cl} < 200$	$80 \leq \bar{s}_u < 200$
E	Soft to firm soil	$120 < \bar{V}_s \leq 180$	$\bar{q}_{cl} < 80$	$\bar{s}_u < 80$
F	—	Any profile, including those otherwise classified as A to E, containing soils having one or more of the following characteristics: $\bar{V}_s \leq 120$ ; soils vulnerable to potential failure or collapse under seismic actions such as liquefiable soils, highly sensitive clays, collapsible weakly cemented soils; ooze <sup>b</sup> with a thickness of more than 10 m; soil layers with high gas content or ambient excess pore pressure greater than 30 % of <i>in situ</i> effective overburden; layers greater than 2 m thick with sharp contrast in shear wave velocity (greater than $\pm 30$ %) and/or undrained shear strength (greater than $\pm 50$ %) compared to adjacent layers.		

Tabella 3.36 – Categorie di sottosuolo

Site class	$C_a$	$C_v$
A/B	1,0	0,8
C	1,0	1,0
D	1,0	1,2
E	1,0	1,8
F	a	a

Tabella 3.37 – Valori di  $C_a$  e  $C_v$  per fondazioni su pali profondi

### Spettro di risposta ALE

Per ogni periodo dell'oscillatore, T, le accelerazioni spettrali orizzontali ALE sono ottenute dai corrispondenti valori dell'accelerazione spettrale del sito di 1000 anni moltiplicati per il fattore di scala ( $N_{ALE}$ ) che dipende dal livello di esposizione della struttura (vedi Tabella 3.38)

Exposure level	ALE scale factor $N_{ALE}$
L1	1,60
L2	1,15
L3	0,85

Tabella 3.38 – Fattore di scala per spettro ALE ( $N_{ALE}$ )

lo spettro di risposta ALE è il seguente:

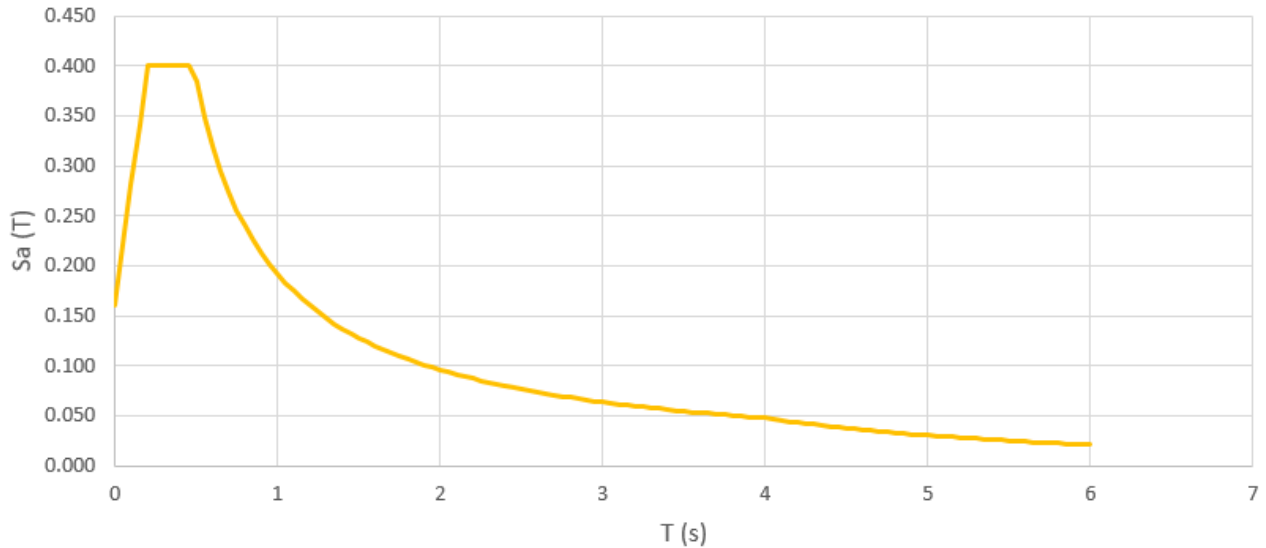


Figura 3.9 – Spettro ALE orizzontale per 5 % damping

I punti dello spettro ALE orizzontale sono tabellati nella loro totalità nella tabella a seguire:

Spettro di risposta ELE

Le accelerazioni spettrali orizzontali ELE al periodo dell'oscillatore, T, possono essere ottenute dividendo lo spettro ALE per il fattore di capacità di riserva sismica per il sistema strutturale  $C_r$  (vedi Tabella 3.39)

Characteristics of structure design	$C_r$
The recommendations for ductile design according to 11.4 are followed and a non-linear static pushover analysis according to 11.6.3 is performed to verify the global performance of the structure under ALE conditions.	2,80
The recommendations for ductile design according to 11.4 are followed, but a non-linear static pushover analysis to verify ALE performance is not performed.	2,00
The structure has a minimum of three legs and a bracing pattern consisting of leg-to-leg diagonals with horizontals, or X-braces without horizontals. The slenderness ratio ( $K \cdot L / b$ ) of primary bracing in vertical frames is limited to no more than 80 [with the corresponding column slenderness parameter $\lambda$ not exceeding $80 / \pi \times \sqrt{f_{yc} / E}$ , see Clause 13] and $f_y D / E t \leq 0,069$ . For X-bracing in vertical frames the same restrictions apply, where the length L to be used depends on the loading pattern of the X-bracing. A non-linear analysis to verify ALE performance is not performed.	1,40
If none of the above characterizations apply.	1,10

Tabella 3.39 – Fattore di capacità di riserva sismica per il sistema strutturale  $C_r$

lo spettro di risposta ELE è il seguente:

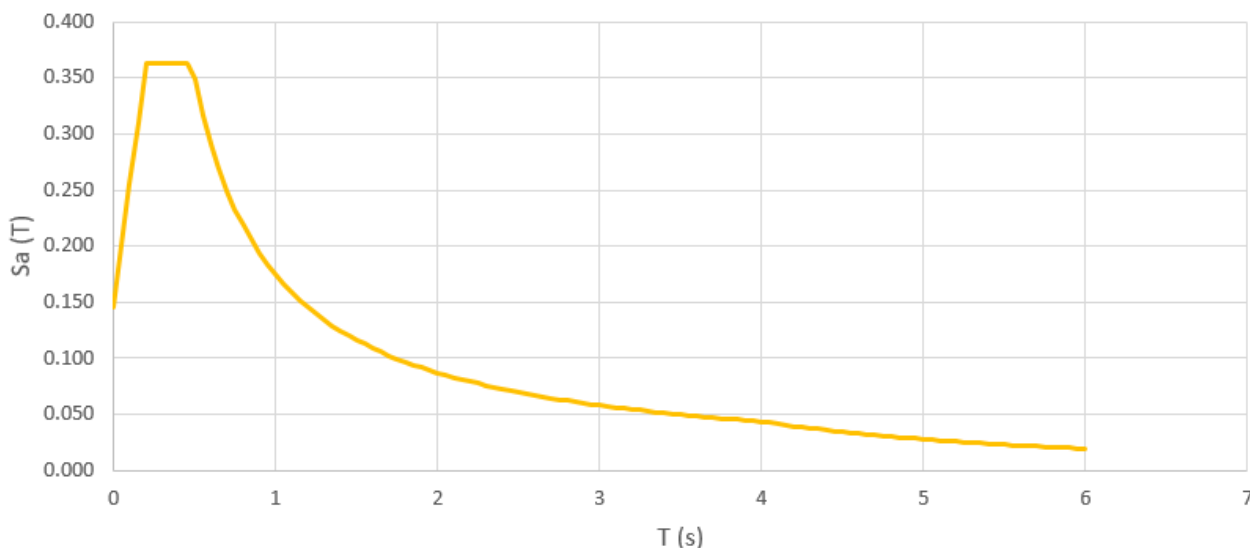


Figura 3.10 – Spettro ELE orizzontale per 5 % damping

I punti dello spettro ELE orizzontale sono tabellati nella loro totalità nella tabella a seguire:

### 3.7.3 Spettri sismici impiegati

#### Aerogeneratore

Il grafico seguente mette a confronto lo spettro di progetto ricavato dalla NTC18 ([Ref. 1]) con lo spettro ELE ricavato dalle ISO ([Ref. 7]):

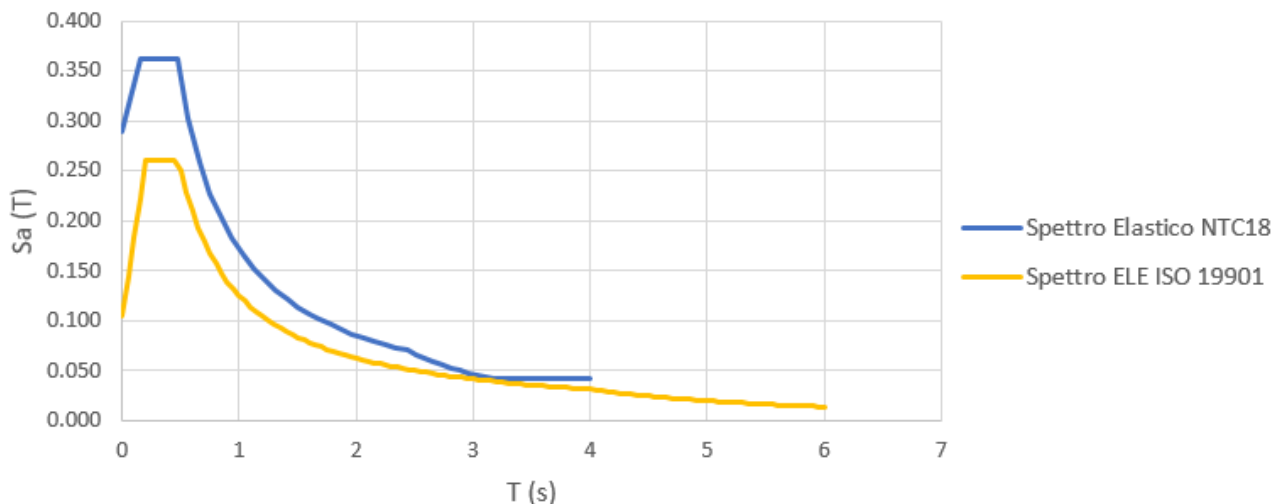


Figura 3.11 – Confronto fra spettro di progetto NTC18 E spettro ELE ISO 19901

Dalle analisi svolte è stato riscontrato che lo spettro sismico ricavato dalle NTC18 è più cautelativo. Per tale motivo la progettazione sismica dell'Aerogeneratore è stata svolta con lo spettro di progetto ricavato dall'NTC18.

#### Piattaforma

Il grafico seguente mette a confronto lo spettro di progetto ricavato dalla NTC18 ([Ref. 1]) con lo spettro ELE ricavato dalle ISO ([Ref. 7]):

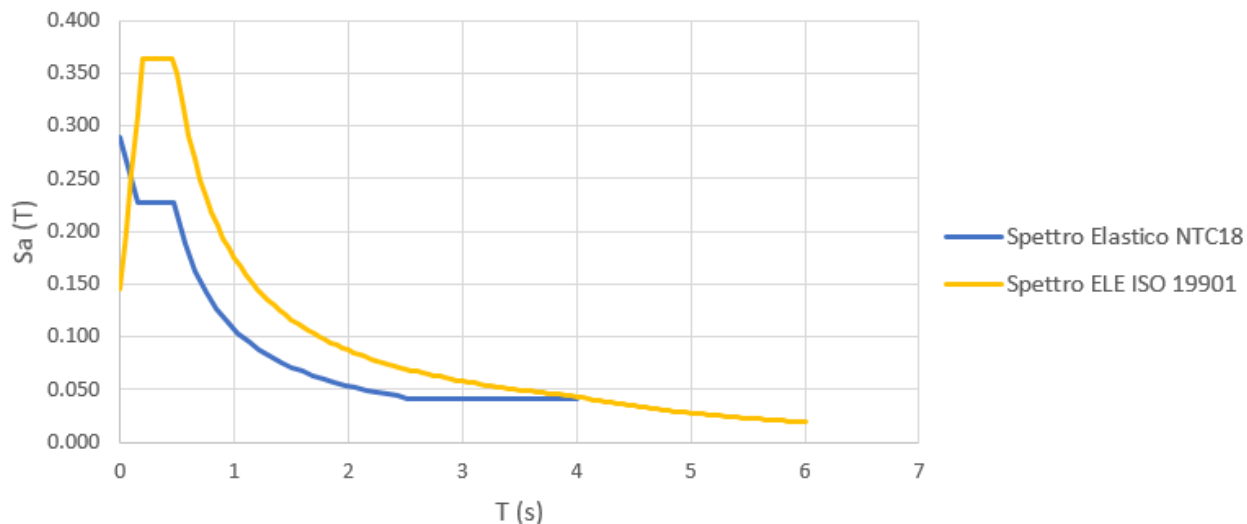


Figura 3.12 – Confronto fra spettro di progetto NTC18 E spettro ELE ISO 19901

Dalle analisi svolte è stato riscontrato che lo spettro sismico ricavato dalle ISO è più cautelativo. Per tale motivo la progettazione sismica della piattaforma è stata svolta con lo spettro ELE ricavato dalle ISO.

## 4 CRITERI DI PROGETTO

Il progetto della fondazione su monopalo delle turbine eoliche e della piattaforma della sottostazione elettrica è stato redatto in accordo al [Ref. 1] and [Ref. 2].

La verifica è condotta nel rispetto del metodo agli stati limite ultimi. In questo metodo, la sicurezza strutturale nei confronti dei stati limite ultimi deve essere verificata confrontando la capacità di progetto  $R_d$ , in termini di resistenza, duttilità e/o spostamento della struttura o membratura strutturale, con il corrispondente valore di progetto della domanda  $E_d$ .

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

$$R_d \geq E_d$$

La resistenza di progetto delle membrature  $R_d$  si pone nella forma

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M}$$

Dove:

$R_k$  è il valore caratteristico della resistenza della membratura;

$\gamma_M$  è il fattore parziale globale relativo al modello di resistenza adottato.

Resistenza delle Sezioni di Classe 1-2-3-4	$\gamma_{M0} = 1,05$
Resistenza all'instabilità delle membrature	$\gamma_{M1} = 1,05$
Resistenza all'instabilità delle membrature di ponti stradali e ferroviari	$\gamma_{M1} = 1,10$
Resistenza, nei riguardi della frattura, delle sezioni tese (indebolite dai fori)	$\gamma_{M2} = 1,25$

Tabella 4.1 – Coefficienti di sicurezza per la resistenza delle membrature e la stabilità

## 5 METODOLOGIA DI CALCOLO

### 5.1 Fondazione monopalo aerogeneratori

#### 5.1.1 Dimensionamento preliminare palo di fondazione

Il calcolo dei parametri geometrici della sottostruttura degli aerogeneratori è stata eseguito facendo un dimensionamento preliminare analitico, successivamente raffinato e verificato con software agli elementi finiti in cui l'interazione completa struttura – carichi ambientali (vento, onda e corrente marina) è stata modellata.

Nota la sollecitazione massima per i diversi scenari proposti dalla normativa (si veda [Ref. 3]) è stato possibile stimare il diametro minimo del palo di fondazione ( $D_p$ , si veda /A5/ ):

$$D_p = 4 \cdot \left( \frac{E_p I_p}{n_h} \right)$$

dove:

- $E_p$  è il modulo di Young del palo;
- $I_p$  è il momento d'inerzia del palo;
- $n_h$  è il fattore di incremento della costante di Winkler con la profondità

Stimato il diametro iniziale è stato possibile calcolare lo spessore del palo, secondo [Ref. 6]:

$$t_p = 6.35 + \frac{D_p}{100}$$

La lunghezza preliminare del palo infissa nel terreno è stata calcolata secondo quanto indicato nella /A5/ :

$$L_p = 4 \cdot \left( \frac{E_p I_p}{n_h} \right)^{\frac{1}{5}}$$

Nel modello agli elementi finiti sono stati modellati i carichi in accordo alle sezioni dalla 5.1.3 alla 5.1.5 combinati come riportato in 5.1.6.

Nella Figura 5.1 si riporta uno schema esemplificativo della geometria della turbina eolica per una profondità del mare ( $WD_d$ ) di 14 m e di 44 m.



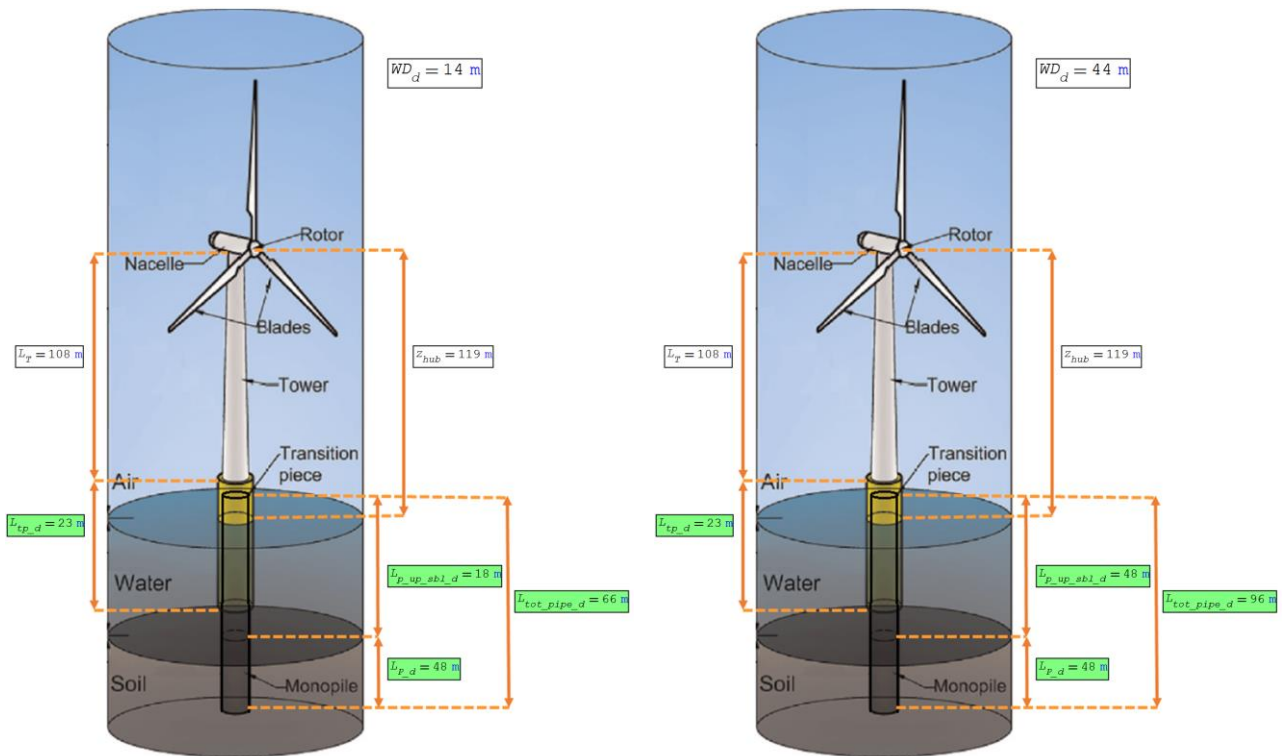


Figura 5.1 – Schema esemplificativo preliminare di un aereogeneratore con WD 14m e WD 44m.

Nella figura soprastante oltre alla lunghezza iniziale del palo infissa nel terreno ( $L_{p\_d}$ ), sono stati riportati i seguenti parametri:

- $L_T$ : altezza della torre;
- $z_{hub}$ : altezza dell'hub;
- $L_{tp\_d}$ : lunghezza del transition piece;
- $L_{p\_up\_sbl\_d}$ : lunghezza del monopalo al di sopra del livello del mare;
- $L_{tot\_pipe\_d}$ : lunghezza totale del monopalo.

### 5.1.2 Modello SACS

La turbina eolica è stata modellata per mezzo del software SACS vers. 1.3. La parte del rotore è stata modellata in termini di peso e forza vento sullo stesso. La torre, l'elemento di transizione e la parte di fondazione al di sopra del fondale marino sono stati modellati per mezzo di elementi conici e cilindrici. L'elemento utilizzato per modellare l'elemento di transizione tiene conto del riempimento in calcestruzzo.

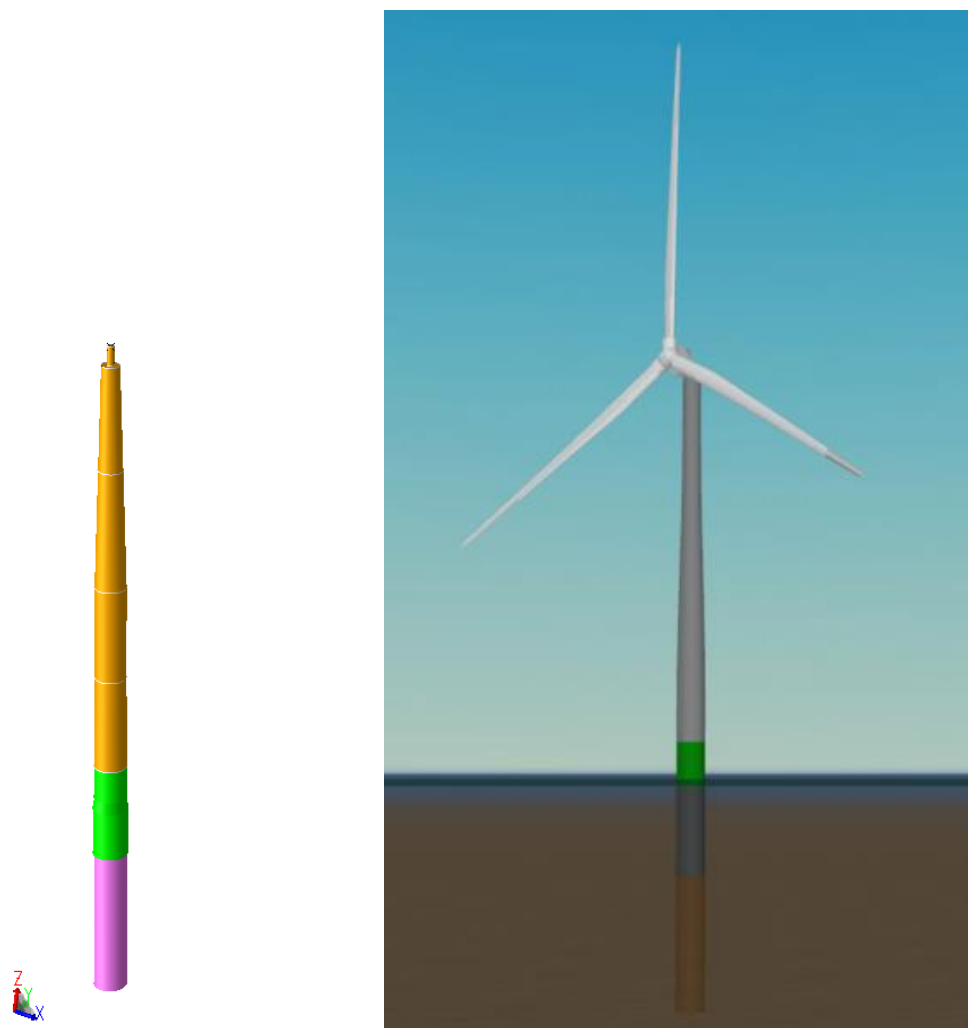


Figura 5.2 – Modello SACS turbina + elemento di transizione + monopalo (al di sopra del fondale)

Il palo così modellato è stato vincolato alla base per mezzo del vincolo "Pilehead" tramite il quale, attraverso il modulo PSI/SACS, viene assegnata la fondazione su monopalo al modello e delle proprietà geotecniche al terreno in accordo alla Tabella 3.5.

Il modulo PSI/SACS consente di ricavare a partire dalla stratigrafia assegnata le curve P-y, Q-z e T-z attraverso le quali è stata studiata l'interazione palo-terreno.

Per il palo di fondazione sono state considerate per la verifica le seguenti dimensioni in accordo al dimensionamento preliminare riportato al paragrafo 5.1.1.

ITEM	OD [m]	WT [mm]	Total Length [m]
Palo di fondazione	7.5	82	66 (WDmin 14m) 96 (WDmax 44m)

Tabella 5.1 – Palo di fondazione

Per il fondale marino sono state considerate due profondità (minima e massima), rispettivamente pari a 14m e 40m.

In accordo al paragrafo 3.4, sono stati analizzati entrambe le tipologie di suolo di fondazione (argilloso e sabbioso).

Il modello della turbina utilizza i seguenti gruppi:

ID	Descrizione	OD_1 [mm]	WT [mm]	OD_2 [mm]	OD_ext [mm]	OD_int [mm]	WT_ext [mm]	WT_int [mm]	L [m]
T01	Torre	4050	50	5425					25.05
T02		5425	60	7000					28.70
T03		7000	60	7000					22.80
T04		7000	72	7350					22.95
TR2	Elemento di transizione	7350	72	7350					8.00
TR3	Elemento di transizione	7500	72	7860					3.00
TRJ <sup>(1)</sup> /TRW <sub>(1)</sub>	Elemento di transizione (con palo all'interno)				7860	7500	72	82	12.0
PIL <sup>(2)</sup>	Palo di Fondazione (parte non infissa)	7500	82						6 (WDmin) 36 (WDmax)

## Notes:

1. Elemento concentrico dove tra il cilindro esterno e quello interno è considerate un riempimento con del calcestruzzo di densità pari a 2400 kg/m<sup>3</sup>.
2. Le dimensioni del palo di fondazione sono in accordo al para. 5.1.1. La parte del palo infissa nel suolo è stata modellata insieme alla stratigrafia tramite un modulo aggiuntivo del software SACS.

Tabella 5.2 – Gruppi modello SACS

### 5.1.3 Carichi permanenti e carichi variabili

I carichi agenti sul modello SACS possono essere suddivisi in carichi permanenti (G) e carichi variabili (Q).

Fra i primi rientrano il peso proprio della torre e dell'elemento di transizione (DEAD), il peso della turbina comprensiva di rotore e nacelle (WGTH) ed il peso del monopalo.

Load Case	Descrizione	Peso [tons]
WGTH	Peso turbina (rotore + nacelle)	431
DEAD	Peso proprio torre	929
	Elemento di transizione (comprensivo di riempimento in calcestruzzo)	384
	Palo di fondazione	990 (WDmin 14m) 1440 (WDmax 44m)

Tabella 5.3 – Carichi permanenti (G)

Load Case	Descrizione		
ENV1	Onda	U100 (H <sub>max</sub> )	
	Corrente	U <sub>c_100</sub>	
	Vento su torre	U <sub>wind_100</sub>	
	Vento su turbina	T <sub>100</sub>	
ENV2	Onda	U100 (H <sub>max</sub> )	
	Corrente	U <sub>c_100</sub>	
	Vento	U <sub>wind_max</sub>	
	Vento su turbina	T <sub>max</sub>	
ENV3	Onda	U1 (H <sub>max</sub> )	
	Corrente	U <sub>c_1</sub>	
	Vento	U <sub>wind_rated</sub>	
	Vento su turbina	T <sub>max_ope</sub>	
Combinazioni ambientali in accordo alle IEC	ENV4	Onda	U1 (H <sub>s</sub> )
		Corrente	U <sub>c_1</sub>
		Vento su torre	U <sub>wind_rated</sub>
		Vento su turbina	T <sub>U1</sub>
	ENV5	Onda	U50 (H <sub>max</sub> )
		Corrente	U <sub>c_50</sub>
		Vento su torre	U <sub>wind_rated</sub>
		Vento su turbina	T <sub>U2</sub>
	ENV6	Onda	U1 (H <sub>max</sub> )
		Corrente	U <sub>c_1</sub>
		Vento su torre	U <sub>wind_rated</sub>
		Vento su turbina	T <sub>U3</sub>
ENV7	Onda	U50 (H <sub>max</sub> )	
	Corrente	U <sub>c_50</sub>	
	Vento su torre	U <sub>wind_cut-out</sub>	
	Vento su turbina	T <sub>U4</sub>	
ENV8	Onda	U50 (H <sub>max</sub> )	

	Corrente	$U_{c\_50}$
	Vento su torre	$U_{wind\_rated}$
	Vento su turbina	$T_{U2}$

Tabella 5.4 – Condizioni di carico ambientale (carichi variabili Q)

I carichi da vento agenti sulla turbina sono descritti in dettaglio nel paragrafo 5.1.4. Tali forze sono state applicate in corrispondenza dell'asse del rotore.

L'azione complessiva di onda, vento e corrente sulla torre è stata valutata mediante il software SACS.

#### 5.1.4 Carico da vento su turbina

Il carico da vento agente sulla turbina è stato calcolato tenendo conto delle velocità operative della stessa nonché dei venti massimi agenti nella zona, considerando quindi sia il caso di pale ferme che funzionanti.

In aggiunta sono state calcolate ulteriori forze di thrust in accordo al /A3/ e alle normative IEC ([Ref. 3], [Ref. 4] and [Ref. 5]), in quanto normative di riferimento per il progetto di turbine eoliche.

La seguente tabella riporta i valori considerati nelle analisi:

Tag	Descrizione	Valore (kN)	Condizione pale	
$T_{100}$	Forza di drag in corrispondenza di $U_{wind\_100}$	524	Pale ferme	
$T_{max}$	Forza di drag in corrispondenza di $U_{wind\_max}$	2161		
$T_{max\_ope}$	Forza di thrust in corrispondenza di $U_{wind\_rated}$	100	Pale rotanti	
Casi IEC	$T_{U-1}$	Normal turbulence scenario (NTM)		1038
	$T_{U-2}$	Extreme turbulence scenario (ETM)		1239
	$T_{U-3}$	Extreme gust at rated wind speed scenario		2250
	$T_{U-4}$	Extreme gust at cut-out scenario	313	

Tabella 5.5 – Carichi vento su turbina

La forza di thrust/drag è calcolata in accordo alla seguente formula

$$Th = \frac{1}{2} * \rho_a * A_R * C_T * U^2$$

dove:

$\rho_a$  è la densità dell'aria pari a 1.225 kg/m<sup>3</sup>

$A_R$  è la "swept area" del rotore, nel caso di pala in movimento (pari a 24884 m<sup>2</sup>) o l'area delle pale (stimata pari a 744 m<sup>2</sup>) nel caso di pale ferme

$C_T$  è il coefficiente di thrust (nel caso di pale in movimento) o di trascinamento (nel caso di pale ferme). Questi valori sono rispettivamente pari a 0.645 (per pale in movimento in corrispondenza della velocità per cui si ha il massimo valore di forza di thrust) e 0.8 (per pale ferme).

$U$  è la velocità del vento

### 5.1.5 Azione sismica monopalo

L'azione sismica sul monopalo è stata valutata considerando lo spettro sismico ricavato in accordo alle NTC 2018 ([Ref. 1]), come riportato al paragrafo 3.7.3.

L'analisi sismica vera e propria è stata preceduta in primo luogo da una linearizzazione della fondazione e successivamente dall'analisi modale, con la quale sono stati estratti i modi di vibrare caratteristici della struttura. Il peso degli elementi e le forze verticali presenti nel modello sono state convertite automaticamente da SACS in masse equivalenti.

Le risposte modali nelle tre direzioni principali sono state combinate usando una combinazione quadratica completa (CQC) e successivamente le risposte direzionali sono state combinate usando la radice quadrata della somma dei quadrati (SRSS) al fine di ottenere il carico sismico (EQK).

FORCES AND MOMENTS SUMMARY						
*** MOMENTS SUMMED ABOUT ORIGIN ***						
LOAD CASE	***** KN *****	***** KN *****	***** KN *****	***** KN-M *****	***** KN-M *****	***** KN-M *****
	FORCE (X)	FORCE (Y)	FORCE (Z)	MOMENT (X)	MOMENT (Y)	MOMENT (Z)
1	-2513.019	-2512.680	-4701.012	-179696.688	41418.078	0.000

Tabella 5.6 – Carico sismico EQK

L'azione sismica (EQK) così calcolata è stata quindi combinata con il risultato dell'analisi statica (che considera solo carichi gravitazionali) usando il modulo di dinamica del SACS in accordo alla Tabella 5.7.

### 5.1.6 Combinazioni di carico

La turbina eolica è stata analizzata, in accordo al [Ref. 1] e [Ref. 2], sia per condizioni statiche (Stato Limite Ultimo e di Esercizio) sia per condizioni sismiche.

Di seguito sono riportate le combinazioni analizzate:

Analisi Statiche	SLU	STR1	1.3 *DEAD	1.3* WGTH	1.5* ENV1
		STR2	1.0 *DEAD	1.0* WGTH	1.0* ENV2
	SLE	STR3	1.0 *DEAD	1.0* WGTH	1.0* ENV3
		IEC1	1.0 *DEAD	1.0* WGTH	1.0* ENV4
		IEC2	1.0 *DEAD	1.0* WGTH	1.0* ENV5
		IEC3	1.0 *DEAD	1.0* WGTH	1.0* ENV6
		IEC4	1.0 *DEAD	1.0* WGTH	1.0* ENV7
		IEC5	1.0 *DEAD	1.0* WGTH	1.0* ENV8
Analisi sismiche	SLU		1.0 *DEAD	1.0* WGTH	1.0*EQK
NOTE:					
(1) Casi ambientali operativi IEC (/A3/ )					

Tabella 5.7 – Combinazioni di carico

## 5.2 Piattaforma

### 5.2.1 Modello SACS

#### 5.2.1.1 Generale

La Piattaforma che ospiterà la sottostazione elettrica è stata modellata utilizzando il software di analisi strutturale ad elementi finiti SACS versione 11.3 su un modello tridimensionale comprendente i pali di fondazione, il sistema di irrigidimento strutturale (jacket), la parte superiore della piattaforma (topside) ed i J-tube (che ospiteranno i cavi elettrici).

La piattaforma ha un'altezza complessiva di 52 m dal fondale marino ed essendo ubicata in zona con livello medio mare pari a 20 m l'altezza emergente della struttura è di 32 m.

La parte superiore della piattaforma (topside) è posizionata a 13.2 m dal livello medio mare e presenta una lunghezza e larghezza di 45 m ed un'altezza di 18.8 m.

Tutti i dati del modello vengono assegnati utilizzando il sistema di unità SI.

La Figura 5.3 mostra il modello FEM tridimensionale per l'analisi in sito.

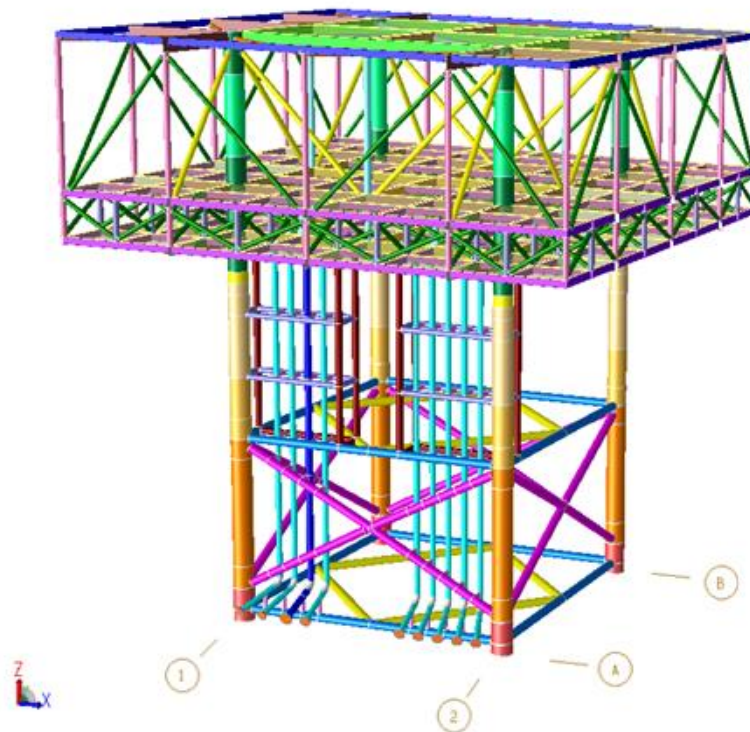


Figura 5.3 – Modello SACS sottostazione elettrica (al di sopra del fondale)

Tutti i principali componenti strutturali sono stati rappresentati in SACS da elementi beam, con proprietà di rigidità assiale e flessionale corrispondenti ai relativi elementi strutturali.

### 5.2.1.2 Pali di fondazione

I pali rappresentati nella Figura 5.4 sono la porzione emergente dal terreno. La porzione infissa nel terreno arriva fino ad una profondità di 80 m.

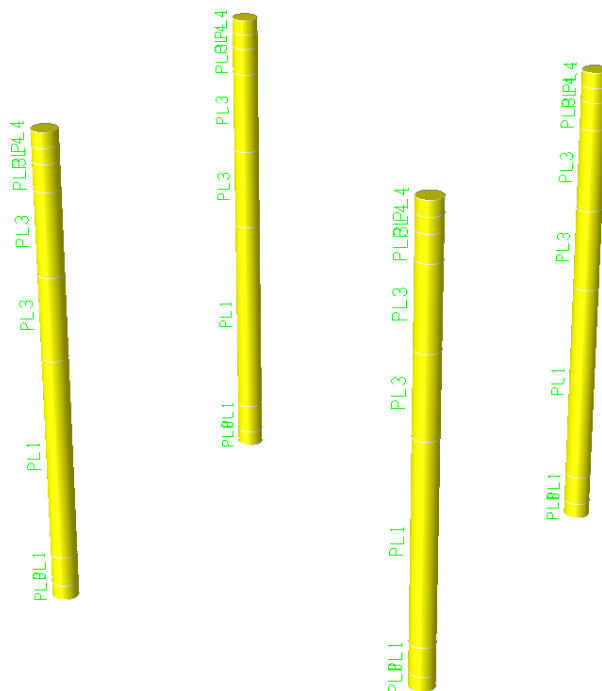


Figura 5.4 – Pali di fondazioni emergenti dal terreno

Le dimensioni delle sezioni tubolari dei pali sono riportate nella Tabella 5.8 qui sotto:

GROUP LABEL	DIMENSIONS		SECTIONS TYPE	MATERIAL DENSITY	Color ID
	OD	thk			
	cm	cm		T/m <sup>3</sup>	
PL0-PL1-PL3-PL4	167.5	4.4	TUB	7.849	

Tabella 5.8 – Dimensioni sezioni pali

La modellazione relativa alla sezione dei pali di fondazione sotto la linea del terreno è stata realizzata tramite il Modello PSI SACS. Il suolo è stato rappresentato con molle non lineari dal modulo PSI SACS per tenere conto dell'interazione struttura non lineare/soilo. In particolare, le curve di interazione palo-terreno (Q-z, P-y, T-z) sono come da [Ref. 6].



### 5.2.1.3 Telaio strutturale di irrigidimento (jacket)

La vista isometrica del sistema di irrigidimento strutturale (jacket) è mostrata in Figura 5.5

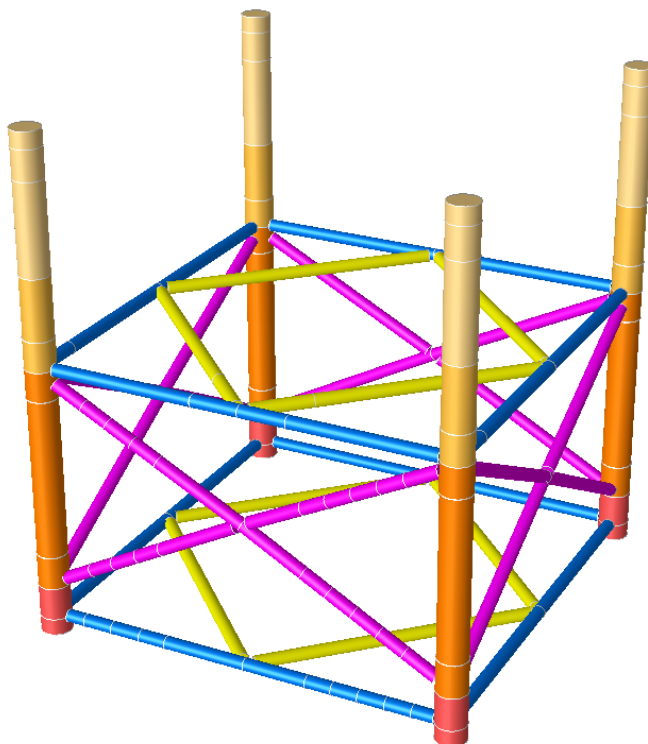


Figura 5.5 – Sistema di irrigidimento strutturale (jacket)

#### Gambe del jacket



Figura 5.6 – Gambe del jacket

Le dimensioni delle sezioni tubolari delle gambe del jacket sono riportate nella Tabella 5.9 qui sotto:

GROUP LABEL	PORZIONE	LUNGHEZZA	DIMENSIONS		SECTIONS TYPE	MATERIAL DENSITY	Color ID
			OD	thk			
			m	cm			
LG0	-	3.00	183.8	5.5	TUB	7.849	
LG1	1	2.02	183.8	5.5	TUB	7.849	
	2	9.78	178.8	3.0	TUB	7.849	
	3	1.80	183.8	5.5	TUB	7.849	
LG2	1	1.80	183.8	5.5	TUB	7.849	
	2	3.70	178.8	3.0	TUB	7.849	
LG3	-	8.30	178.8	3	TUB	7.849	

Tabella 5.9 – Dimensioni sezioni gambe del jacket

Elementi di irrigidimento jacket

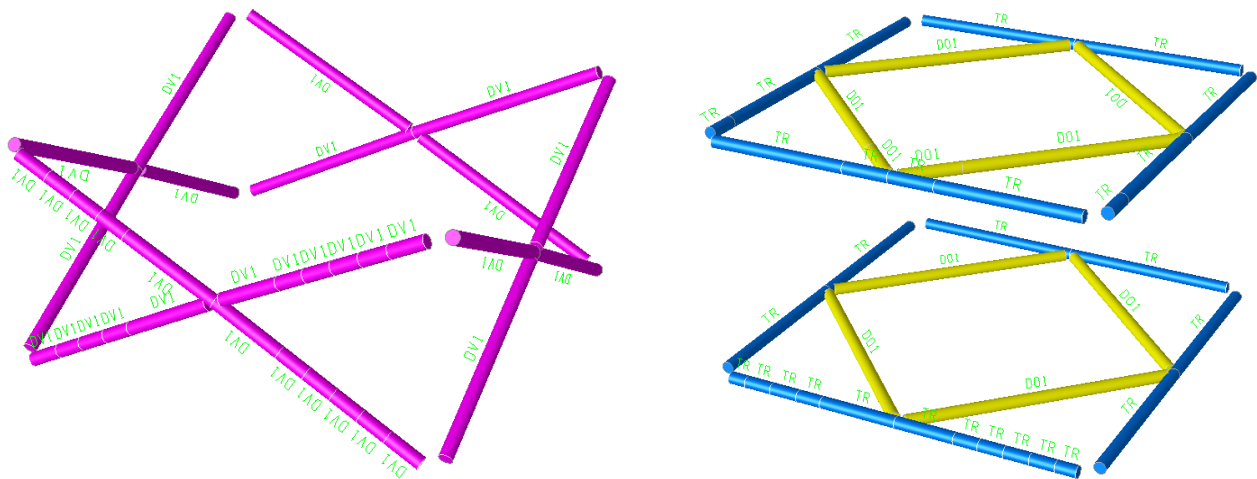


Figura 5.7 – Elementi di irrigidimento

Le dimensioni delle sezioni tubolari dell'irrigidimento del jacket sono riportate nella Tabella 5.10 qui sotto:

GROUP LABEL	DIMENSIONS		SECTIONS TYPE	MATERIAL DENSITY	Color ID
	OD	thk			
	cm	cm			
DV1	76.2	1.6	TUB	7.849	
DO1	76.2	1.6	TUB	7.849	
TR	76.2	1.6	TUB	7.849	

Tabella 5.10 – Dimensioni sezioni elementi di irrigidimento

#### 5.2.1.4 Topside

Le viste isometriche del topside sono mostrate in Figura 5.8

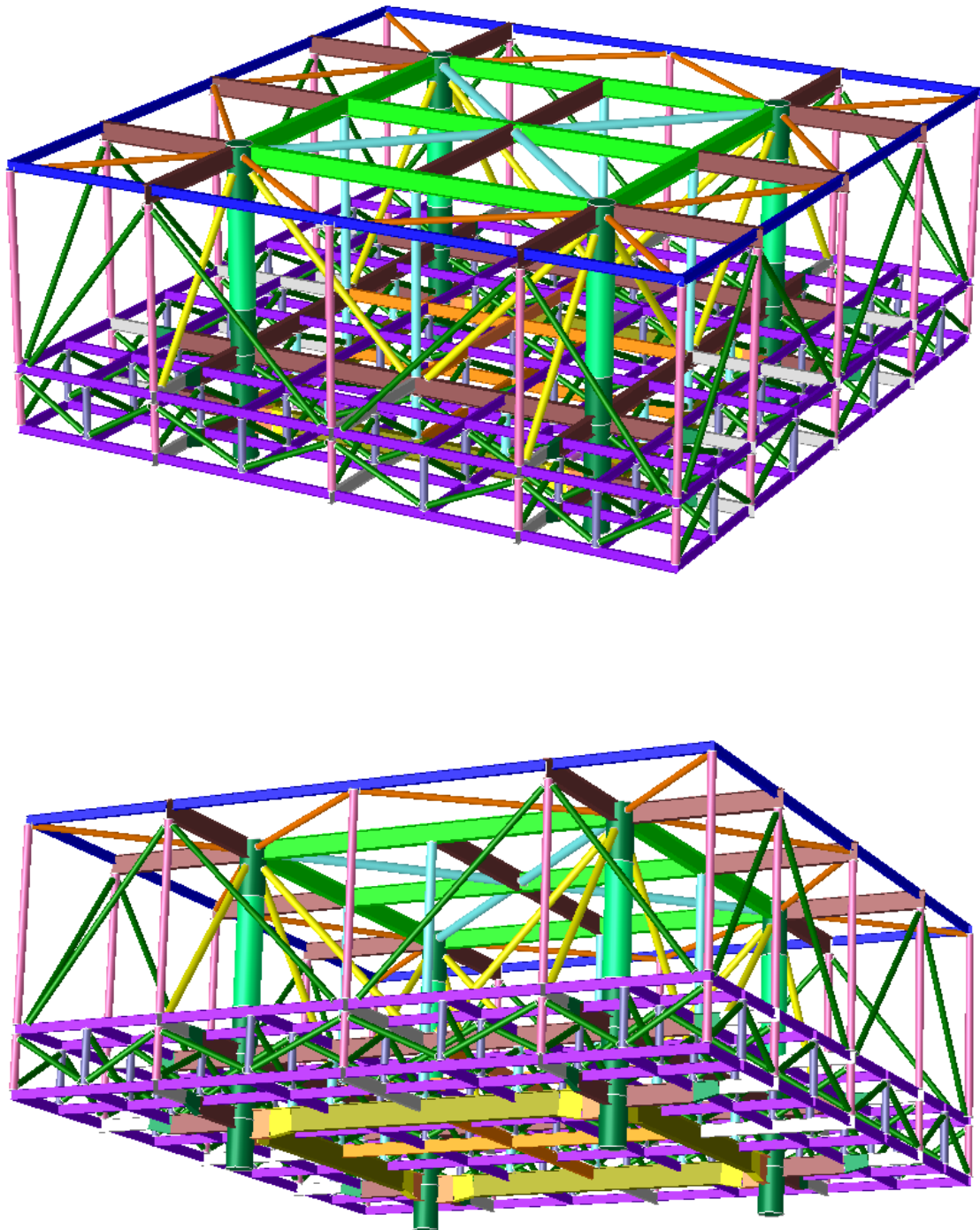


Figura 5.8 – Topside sottostazione elettrica

Elementi verticali a sezioni tubolare

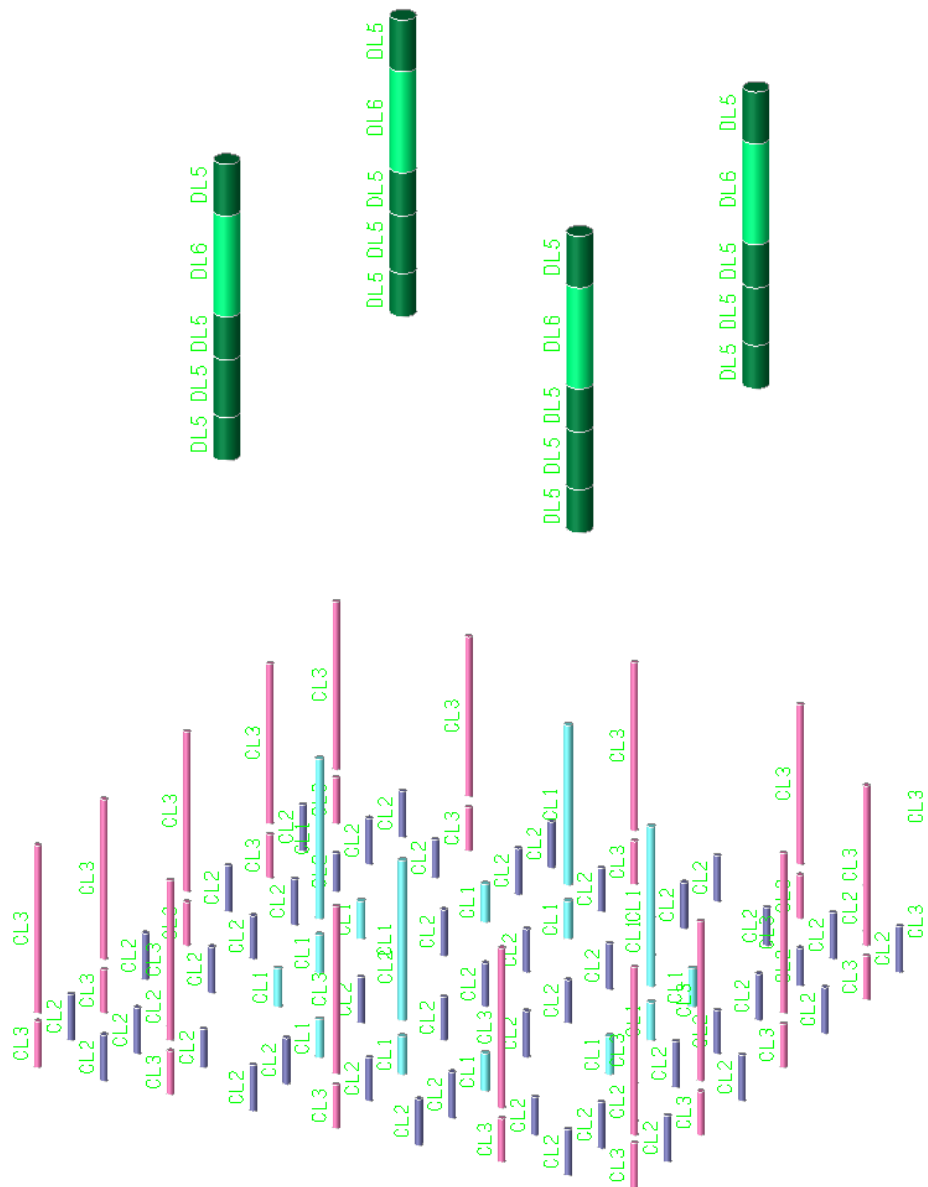


Figura 5.9 – Elementi verticali a sezione tubolare

Le dimensioni delle sezioni tubolari degli elementi verticali del topside sono riportate nella Tabella 5.11 qui sotto:



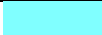


GROUP LABEL	DIMENSIONS		SECTIONS TYPE	MATERIAL DENSITY	Color ID
	OD	thk			
	cm	cm		T/m <sup>3</sup>	
DL4	167.5	5.0	TUB	7.849	
DL6	167.5	6.0	TUB	7.849	
CL1	61.0	2.0	TUB	7.849	
CL2	50.8	2.0	TUB	7.849	
CL3	50.8	2.0	TUB	7.849	

Tabella 5.11 – Dimensioni sezioni elementi verticali a sezione tubolare

Elementi orizzontali a sezioni aperte e boxate

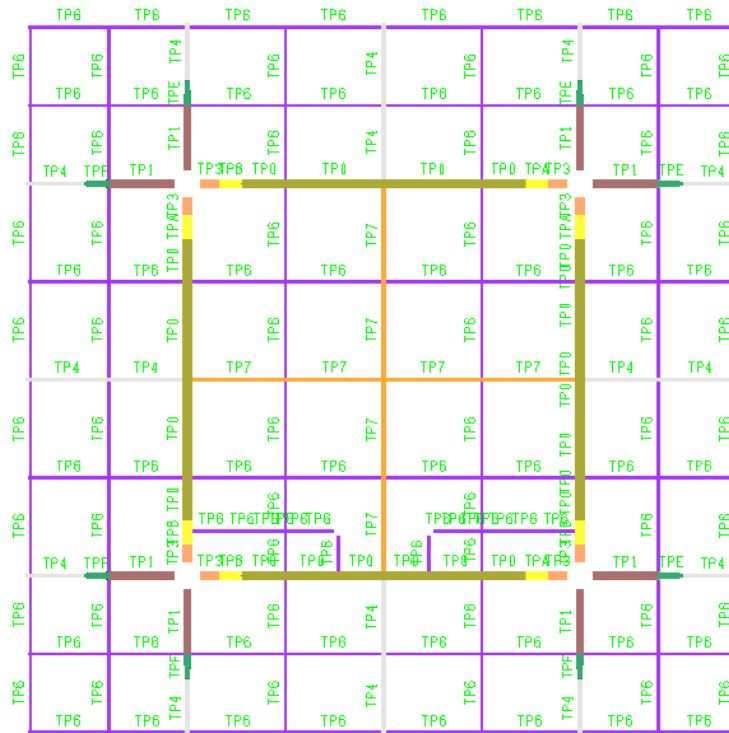


Figura 5.10 – Elementi orizzontali a sezione aperta - impalcato Quota 15 m

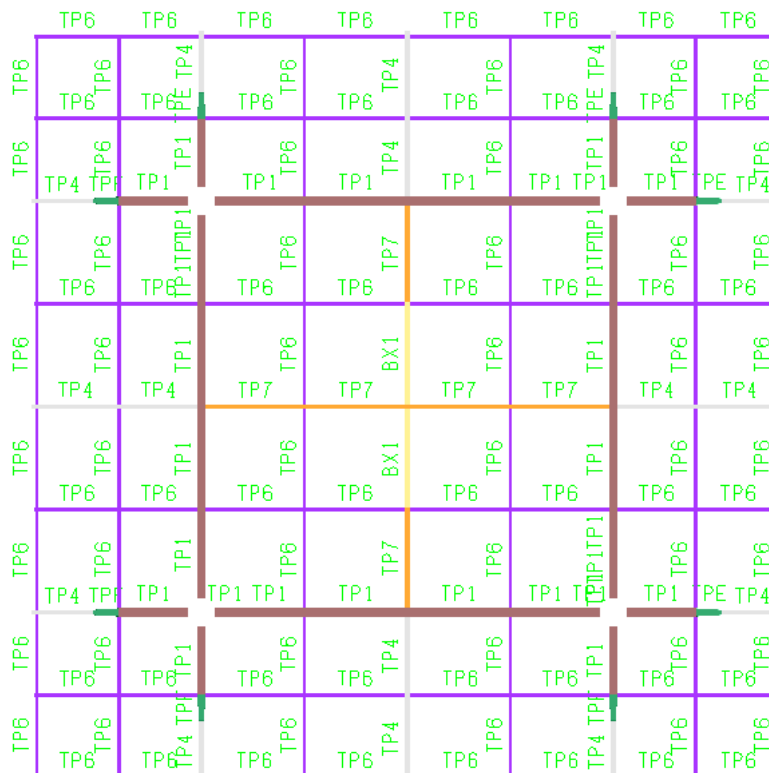


Figura 5.11 – Elementi orizzontali a sezione aperta - impalcato Quota 19 m

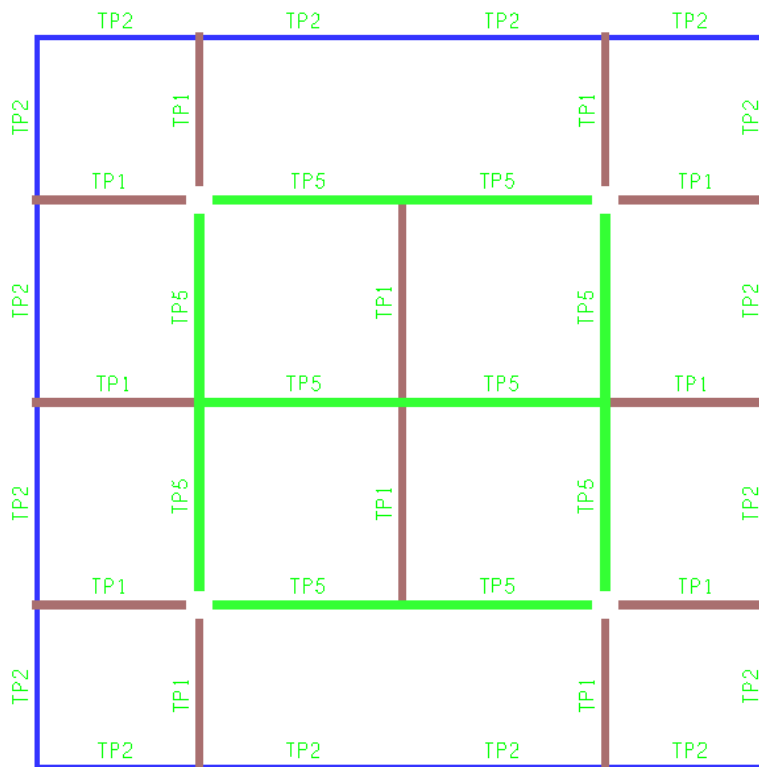


Figura 5.12 – Elementi orizzontali a sezione aperta e boxata - impalcato Quota 32 m (copertura)

Le dimensioni per ogni sezione aperta/scatola degli elementi orizzontali del topside sono riportate nella Tabella 5.12 qui sotto:

GROUP LABEL	SECTION LABEL	DIMENSIONS				SECTIONS TYPE	MATERIAL DENSITY (T/M*3)	Color ID
		Height	Width	Flange thk	Web thk			
		CM	CM	CM	CM			
TP0	PG0	150	60	5.00	3.00	PLG	7.849	
TP1	PG1	120	50	4.00	3.00	PLG	7.849	
TP2	PG2	60	30	3.00	2.00	PLG	7.849	
TP3	PG3	180	60	5.00	3.00	PLG	7.849	
TP4	PG4	80	30	3.00	2.00	PLG	7.849	
TP5	PG5	120	60	5.00	4.00	PLG	7.849	
TP6	IPE60	60	22	1.90	1.20	WF	7.849	
TP7	PG7	80	30	4.00	3.00	PLG	7.849	
TPA	PG0 from to PG3	-	-	-	-	PLG	7.849	
TPB	PG3 from to PG0	-	-	-	-	PLG	7.849	
TPE	PG1 from to PG4	-	-	-	-	PLG	7.849	
TPF	PG4 from to PG1	-	-	-	-	PLG	7.849	
BX1	BG7	80	30	4	3 x 1.5	PGB	7.849	

Tabella 5.12 – Dimensioni sezioni elementi orizzontali a sezione aperta e boxate

Elementi orizzontali a sezioni tubolare

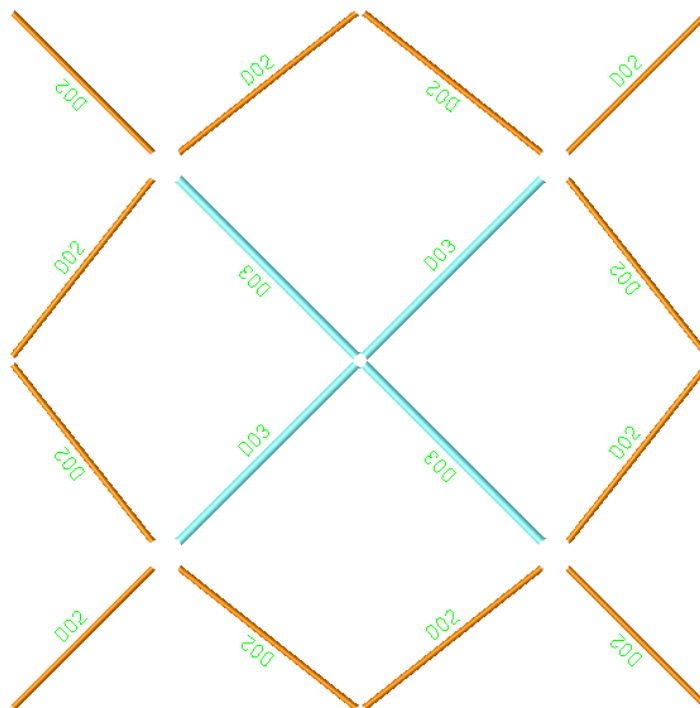


Figura 5.13 – Elementi orizzontali a sezione tubolare - impalcato Quota 32 m (copertura)

Le dimensioni delle sezioni tubolari degli elementi orizzontali del topside sono riportate nella Tabella 5.13 qui sotto:

GROUP LABEL	DIMENSIONS		SECTIONS TYPE	MATERIAL DENSITY	Color ID
	OD	thk			
	cm	cm		T/m <sup>3</sup>	
D02	61.0	2.0	TUB	7.849	
D03	40.64	1.6	TUB	7.849	

Tabella 5.13 – Dimensioni sezioni elementi orizzontali a sezione tubolare – impalcato Quota 32 m (copertura)

Elementi diagonali a sezione tubolare

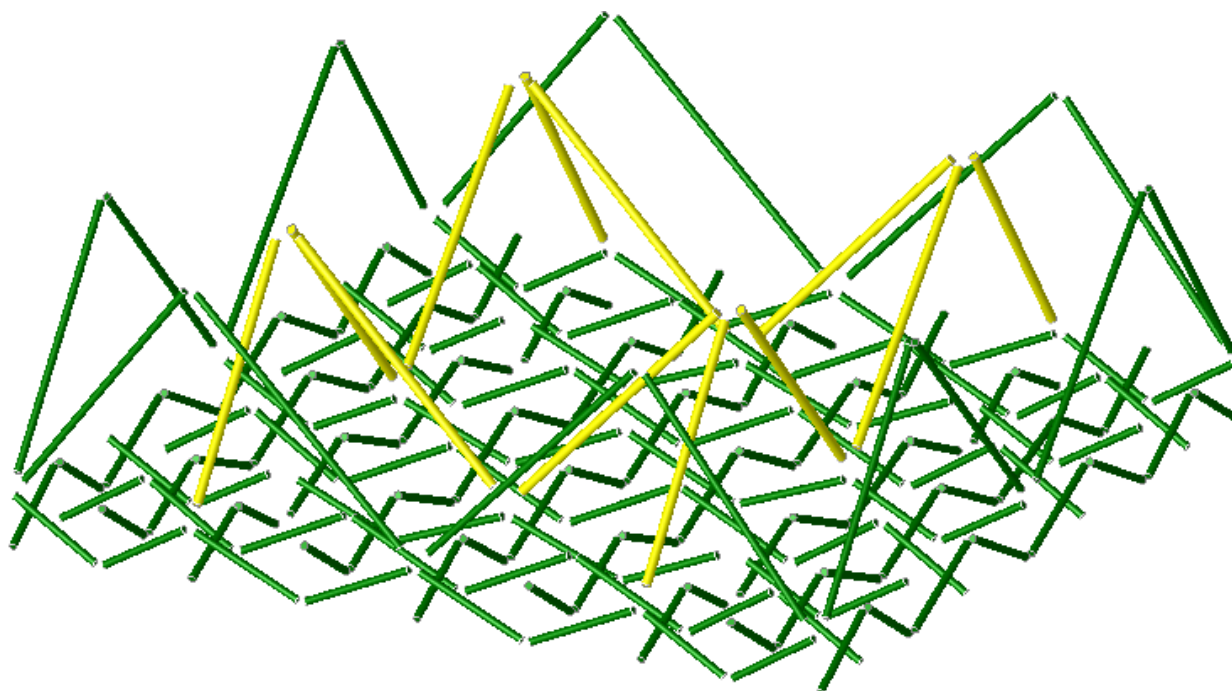


Figura 5.14 – Elementi diagonali a sezione tubolare

Le dimensioni delle sezioni tubolari degli elementi diagonali del topside sono riportate nella Tabella 5.14 qui sotto:

GROUP LABEL	DIMENSIONS		SECTIONS TYPE	MATERIAL DENSITY	Color ID
	OD	thk		T/m <sup>3</sup>	
	cm	cm			
DV2	50.8	2.0	TUB	7.849	
DV3	40.64	1.6	TUB	7.849	

Tabella 5.14 – Dimensioni sezioni elementi diagonali a sezione tubolare



### 5.2.1.5 J-tube e supporti

#### Supporti J-Tube

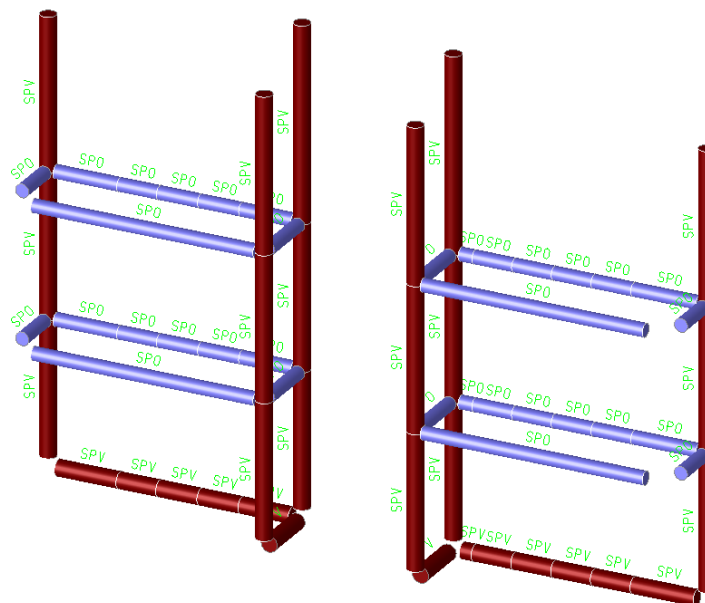


Figura 5.15 – Elementi tubolari del supporto per j-tube

Le dimensioni delle sezioni tubolari dei supporti dei j-tube sono riportate nella Tabella 5.15 qui sotto:

GROUP LABEL	DIMENSIONS		SECTIONS TYPE	MATERIAL DENSITY	Color ID
	OD	thk			
	cm	cm		T/m <sup>3</sup>	
PSV	61.0	2.0	TUB	7.849	
PSO	50.8	2.0	TUB	7.849	

Tabella 5.15 – Dimensioni sezioni elementi tubolari del supporto per j-tube

## J-Tube

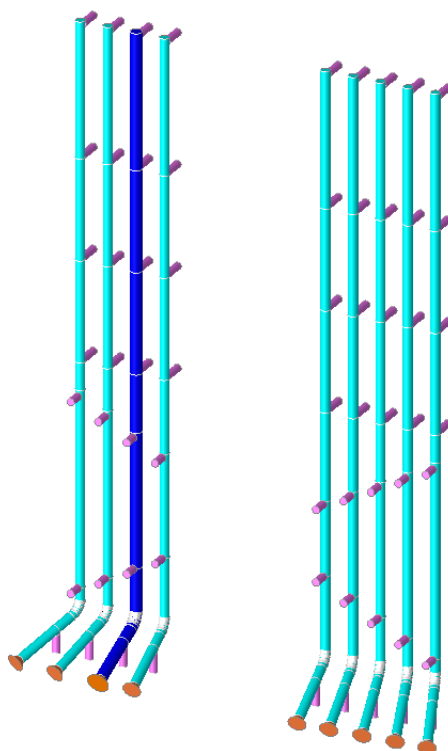


Figura 5.16 – Elementi tubolari j-tube e supporti

Le dimensioni delle sezioni tubolari dei j-tube sono riportate nella Tabella 5.16 qui sotto:

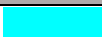


GROUP LABEL	DIMENSIONS		SECTIONS TYPE	MATERIAL DENSITY	Color ID
	OD	thk			
	cm	cm		T/m <sup>3</sup>	
CN1	50.8	1.6	TUB	7.849	
CN2	61.0	1.6	TUB	7.849	
S-J	40.64	1.2	TUB	7.849	

Tabella 5.16 – Dimensioni sezioni elementi tubolari j-tube e supporti

I J-tube modellati sono i seguenti:

- n.3 J- tubi d’ingresso più n.1 J- tubi d’uscita lungo l’asse A adiacenti alla gamba del jacket A1
- n.5 J- tubi d’ingresso lungo l’asse A adiacenti alla gamba del jacket A2

### 5.2.1.6 Sistema di riferimento globale

Il sistema di assi globali del modello è definito come segue (vedi Figura 5.17):

- L'asse X è positivo dalla riga 1 alla riga 2
- L'asse Y è positivo dalla riga A alla riga B
- L'asse Z è verticale, positivo verso l'alto.

L'origine è al centro della struttura della struttura, all'elevazione del livello medio mare.

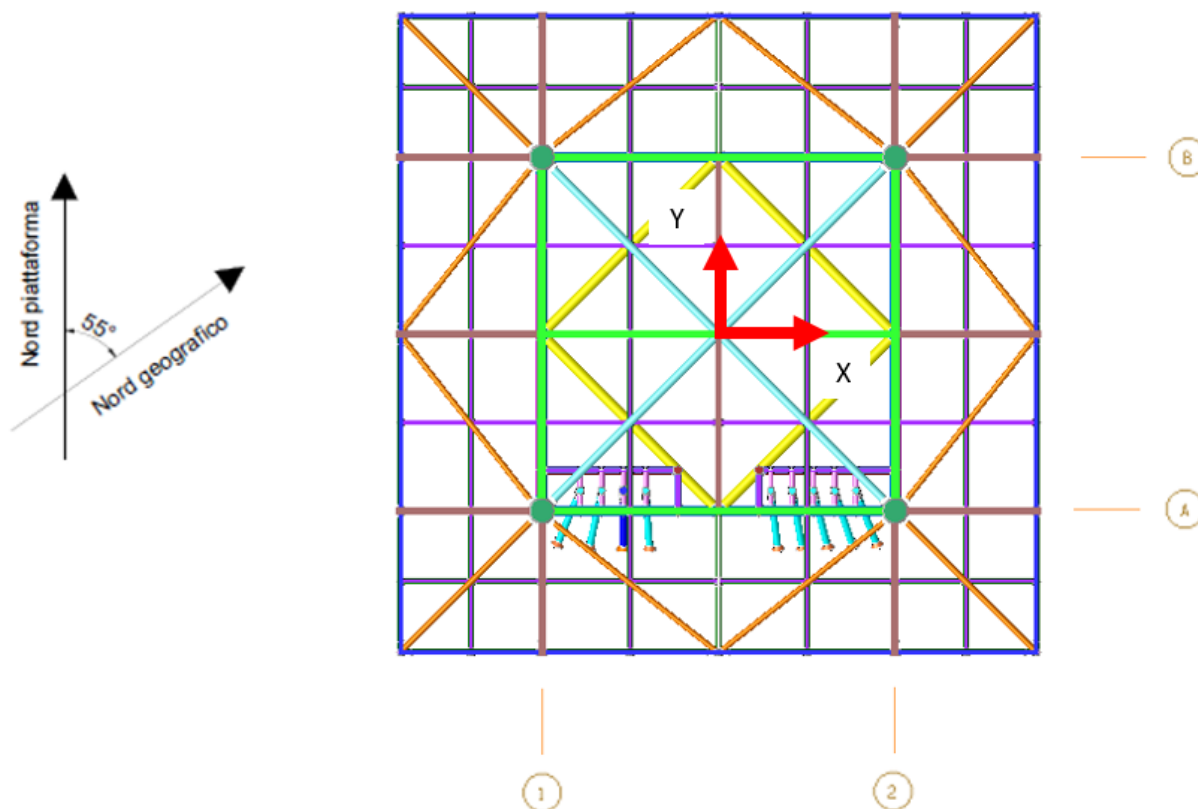


Figura 5.17 – Assi di riferimento globale

L'angolo tra il nord della piattaforma (asse Y) e il nord reale è pari a 55 gradi.

#### 5.2.1.7 Condizioni al contorno

Per i pali di fondazione, i nodi PILEHD coincidono con i giunti di sommità dei pali.

#### 5.2.1.8 Lunghezze effettive

Le lunghezze effettive delle aste sono definite in accordo alla normativa API RP2A-WSD ([Ref. 6])

### 5.2.1.9 Pali di fondazione

L'interazione pali-suolo è stata analizzata utilizzando il modulo PSI/SACS. I dati geotecnici sono riportati al paragrafo 3.4.

Per simulare il collegamento fra i pali fuori terra e le gamba del jacket (garantito dal calcestruzzo gettato nell'intercapedine fra la gamba del jacket e il palo) sono stati modellati dei collegamenti rigidi fittizi su più livelli (wishbond).

### 5.2.2 Carichi permanenti

Il peso dell'acciaio dei pali e del jacket è stato generato direttamente dal modello SACS in base alla densità degli elementi modellati. Gli elementi modellati dei pali e jacket hanno una densità di 7.849 t/m<sup>3</sup>.

Per tenere conto delle incertezze di peso relative alla progettazione e alla fabbricazione delle strutture, nelle analisi è stato considerato un fattore di contingenza di peso ( $\gamma_{wgt}$ ) di 1,20.

Nelle Tabella 5.17 e Tabella 5.18 sono riportati rispettivamente i pesi strutturali in aria e immersi:

Componenti Piattaforma	Peso Netto (kN)	20% Contingenza
		Peso Lordo (kN)
Jacket	6882.8	8259.4
Topside	13468.7	16162.4
<b>Peso Piattaforma</b>	<b>20351.5</b>	<b>24421.8</b>

Tabella 5.17 – Pesi strutturali in aria

Peso Piattaforma	24421.8
Spinta di Archimede (galleggiamento)	-3873.5
<b>Peso Totale</b>	<b>20548.4</b>

Tabella 5.18 – Pesi strutturali immersi

### 5.2.3 Carichi ambientali

I carichi ambientali utilizzati per i controlli strutturali della piattaforma si basano su periodi di ritorno di 10 anni (condizioni operative) e 100 anni (condizioni di tempesta estrema).

#### 5.2.3.1 Proprietà dell'acqua di mare

Sono state considerate le seguenti proprietà dell'acqua di mare:

- Densità: 1030 kg/m<sup>3</sup>
- Conducibilità termica: 0,59 W/m-K
- Resistività: 0,21 ohm-m
- Salinità di progetto: circa 3,4%
- Viscosità cinematica: 1,03x10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s (a 25°C)

#### 5.2.3.2 Crescita marina

Al fine di tenere in considerazione l'effetto previsto della crescita marina sulla struttura durante la sua vita utile di progetto, si considera una crescita marina di 50 mm sulla sezione trasversale dei componenti immersi in acqua dall'elevazione 21.00 m a 16.00 m dal fondo del mare.

La densità secca della crescita marina è di 1.360 kg/m<sup>3</sup>.

Nessuna crescita marina è stata applicata ai pali all'interno delle gambe del jacket.

#### 5.2.3.3 Coefficienti idrodinamici

Al fine di tenere in considerazione l'effetto della crescita marina sull'azione idrodinamica che la struttura può sperimentare durante la sua vita utile di progetto, sono stati considerati i coefficienti idrodinamici riportati al paragrafo 3.5.3. Questa influenza deriva da un aumento del coefficiente di resistenza dovuto alla rugosità, all'aumento del diametro e all'aggiunta di densità che variano con la profondità e con il tempo per tutta la vita utile di progetto della struttura.

#### 5.2.3.4 Carico da vento

I carichi del vento sono stati generati da SACS secondo API RP2A-WSD e applicati sia alle membrature principali sia sulle aree da vento coincidenti con le facce laterali dell'elemento solido che simula il topside, come pressione esercitata sulle aree investite utilizzando opportuni coefficienti del fattore di forma. Per ogni velocità del vento considerata, i carichi sono definiti per 8 direzioni, per ogni 45°. Il calcolo della forza del vento si basa su un tempo di raffica di 3 secondi a 100 m di altitudine sul livello del mare; i valori sono riportati nella Tabella 5.19 seguente per i diversi periodi di restituzione:

Tag	Descrizione	U <sub>wind</sub> (m/s)
U <sub>wind_10</sub>	Vento per condizioni operative con periodo di ritorno 10 anni	43
U <sub>wind_100</sub>	Vento per condizioni di tempesta estrema con periodo di ritorno 100 anni	50

Tabella 5.19 – Velocità del vento

### 5.2.3.5 Carichi d'onda e corrente

I carichi d'onda e di corrente adottati sono valori omnidirezionali applicati sulle 8 direzioni, ogni 45°.

Le altezze e i periodi delle onde sono gli stessi per tutte le intersezioni delle onde (valori omnidirezionali). L'effetto Doppler della corrente sul periodo dell'onda viene calcolato automaticamente dal programma di calcolo SACS.

I dati sono riassunti nelle seguenti tabelle:

Onde estreme (OMNI)			
Data Set	10 ANNI		
	Hs (m)	Tp(s)	H <sub>max</sub> (m)
WD>20m	5.76	9.9	10.2
Onde estreme (OMNI)			
Data Set	100 ANNI		
	Hs (m)	Tp(s)	H <sub>max</sub> (m)
WD>20m	7.17	10.7	12.6

Tabella 5.20 – Dati onda

Correnti (m/s) (OMNI)		
Data Set	10 ANNI	
	U <sub>sup</sub>	U <sub>bottom</sub> <sup>(1)</sup>
WD<20m	0.81	0.56
Correnti (m/s) (OMNI)		
Data Set	100 ANNI	
	U <sub>sup</sub>	U <sub>bottom</sub> <sup>(1)</sup>
WD<20m	0.90	0.62

Tabella 5.21 – Dati corrente

### 5.2.4 Dati Sismici

L'azione sismica impiegata per la progettazione della piattaforma è quella ricavata secondo le ISO ([Ref. 7]) come da paragrafo 3.7.2.2.

## 5.2.5 Combinazioni di carico

Di seguito sono riportate le combinazioni analizzate per l'analisi statica:

	Tag Combinazioni di carico	Descrizione	Weight	Carico da Vento, Corrente e Onda							
				N	NW	W	SW	S	SE	E	NE
SLU	CV	Solo carico gravitazionale	1.30	-	-	-	-	-	-	-	-
	U-S	Massima gravità - Condizioni di tempesta estrema (vento, Corrente e Onda da S)	1.30	-	-	-	-	1.50	-	-	-
	U-SE	Massima gravità - Condizioni di tempesta estrema (vento, Corrente e Onda da SE)	1.30	-	-	-	-	-	1.50	-	-
	U-E	Massima gravità - Condizioni di tempesta estrema (vento, Corrente e Onda da E)	1.30	-	-	-	-	-	-	1.50	-
	U-NE	Massima gravità - Condizioni di tempesta estrema (vento, Corrente e Onda da NE)	1.30	-	-	-	-	-	-	-	1.50
	U-N	Massima gravità - Condizioni di tempesta estrema (vento, Corrente e Onda da N)	1.30	1.50	-	-	-	-	-	-	-
	U-NW	Massima gravità - Condizioni di tempesta estrema (vento, Corrente e Onda da NW)	1.30	-	1.50	-	-	-	-	-	-
	U-W	Massima gravità - Condizioni di tempesta estrema (vento, Corrente e Onda da W)	1.30	-	-	1.50	-	-	-	-	-
	U-SW	Massima gravità - Condizioni di tempesta estrema (vento, Corrente e Onda da SW)	1.30	-	-	-	1.50	-	-	-	-
SLE	E-S	Massima gravità - Condizioni operative (vento, Corrente e Onda da S)	1.00	-	-	-	-	1.00	-	-	-
	E-SE	Massima gravità - Condizioni operative (vento, Corrente e Onda da SE)	1.00	-	-	-	-	-	1.00	-	-
	E-E	Massima gravità - Condizioni operative (vento, Corrente e Onda da E)	1.00	-	-	-	-	-	-	1.00	-
	E-NE	Massima gravità - Condizioni operative (vento, Corrente e Onda da NE)	1.00	-	-	-	-	-	-	-	1.00
	E-N	Massima gravità - Condizioni operative (vento, Corrente e Onda da N)	1.00	1.00	-	-	-	-	-	-	-
	E-NW	Massima gravità - Condizioni operative (vento, Corrente e Onda da NW)	1.00	-	1.00	-	-	-	-	-	-
	E-W	Massima gravità - Condizioni operative (vento, Corrente e Onda da W)	1.00	-	-	1.00	-	-	-	-	-
	E-SW	Massima gravità - Condizioni operative (vento, Corrente e Onda da SW)	1.00	-	-	-	1.00	-	-	-	-

Tabella 5.22 – Combinazioni di Carico – Analisi statica

Di seguito è riportata la combinazione analizzata per l'analisi sismica:

Tag Combinazioni di carico	Descrizione	Weight	Azione Sismica			Carico da Vento, Corrente e Onda							
			N/S	E/W	Z	N	NW	W	SW	S	SE	E	NE
SISM	Carico gravitazionale – Azione sismica	1.00	1.00	1.00	0.50	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabella 5.23 – Combinazioni di Carico – Analisi Sismica



## 5.3 Protezione dallo Scouring

La normativa di riferimento utilizzata per il studio del fenomeno dello Scouring è la DNVGL-ST-0126, la quale ci consente di capire se si verifica il fenomeno dell'erosione, di calcolare la sua profondità attorno al palo, il tempo per raggiungere tale profondità, permettendo in seguito di progettare una protezione per salvaguardare l'integrità della fondazione della turbina.

### 5.3.1 Introduzione

Un palo verticale immerso in flusso di onde e correnti, causerà la formazione di:

- "Lee-wake vortices" dietro il palo, alla base (tipico di onde)
- "Streamlines" di contrazione attorno al palo (tipico di correnti)
- "Horseshoe vortex" di fronte al palo, alla base (tipico sia di onde che di correnti)
- "Diffraction" delle onde

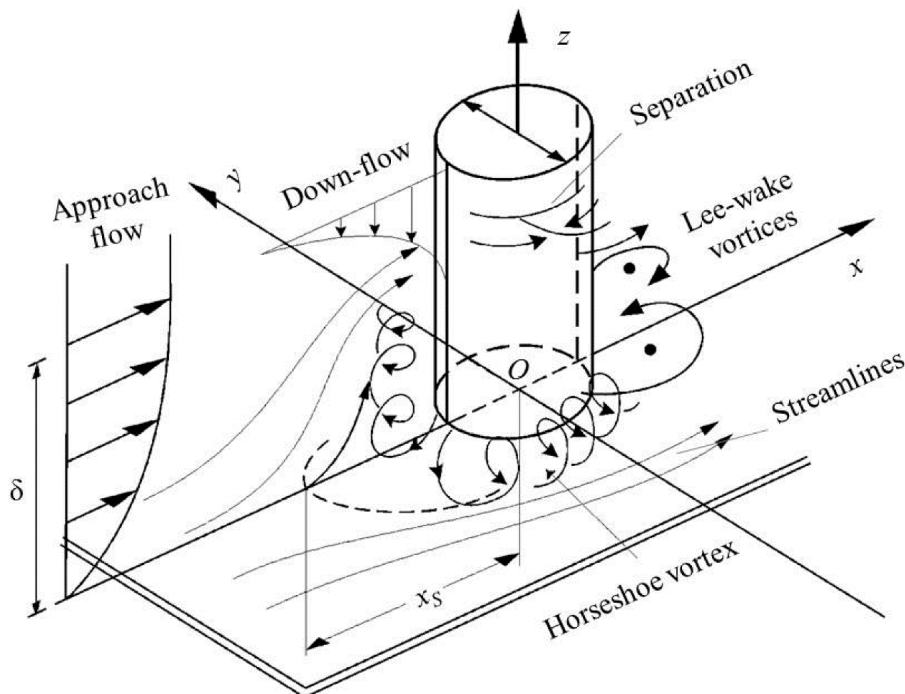


Figura 5.18 – Flusso attorno alla base di un palo verticale

Questi effetti portano all'aumento dello stress di taglio su fondale, che può essere espresso con un coefficiente di amplificazione  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\tau_{max}}{\tau_{undisturbed}}$$

$\tau_{max}$ =stress sul fondale in presenza del palo

$\tau_{undisturbed}$ =stress sul fondale indisturbato (senza palo)

La normativa indica per le correnti valori di  $\alpha$  pari a 7-11, mentre valori più bassi per le onde 5-6.

Dati input:

$D_{pile}$	Pile diameter
$S_{gsoil}$	Specific gravity of the sediment
WD	Water depth
$\rho_{sea}$	Water density
$F_{iwc}$	Angle between wave and current
$Z_{r\ curr}$	Current reference elevation above seabed
$U_{c\ zr\ curr}$	Current velocity at elevation $Z_{r\ curr}$ above seabed
$H_{mono}$	Wave height
$T_{mono}$	Associated period
$\rho_{stone}$	Stone density
$\alpha_{soil}$	Soil angle friction factor

Per definire la tipologia di flusso la norma introduce il parametro di  $U_{cw}$ .

$$U_{cw} = \frac{U_c(z_{calc})}{U_c(z_{calc}) + U_w}$$

$U_c$  è la velocità della corrente calcolata a  $z_{calc} = D_{pile}/2$

$U_w$  è la velocità orbitale delle onde al suolo

Dal valore di  $U_{cw}$  ottenuto posso dire:

- Se  $U_{cw}=0$  il fenomeno dello scouring è definito solo dalle onde (Waves)
- Se  $U_{cw}=1$  il fenomeno dello scouring è definito solo dalle correnti, per cui si avrà un flusso costante (Steady current)
- Se  $0 \leq U_{cw} \leq 1$  si avrà l'effetto combinato di onde e corrente (Combined wave and current)

## Corrente

Per definire  $U_{cw}$  serve calcolare la velocità di corrente  $U_c$ , nello specifico si calcola la velocità di corrente  $U_c(Z)$  ad una certa altezza  $Z$  e la velocità della corrente mediata  $U_{c\ ave}$  sulla profondità, utile al calcolo della velocità di taglio sul fondo:

$$U_c(z) = U_{c\ z_r\ curr} \left\{ \frac{\ln[(z + z_0)] - \ln(z_0)}{\ln[(z_r\ curr + z_0)] - \ln(z_0)} \right\} \sin \theta_{c\ rel}$$

$U_{c\ z_r\ curr}$  = velocità di corrente a  $Z_{r\ curr}$  dal fondale, che nel nostro caso è un dato.

$$U_{c\ ave} = \frac{\left( \int_{z_0}^{WD} U_c(x) dx \right)}{WD}$$

## Onde

La velocità massima orbitale delle onde sul fondo si può calcolare in diversi modi, nel nostro caso si è optato per la Teoria lineare delle onde monocromatiche:

$$U_w = \frac{n \times H_{mono} \cosh\{K_{wave} \times [(Z_{calc} - WD) + WD]\}}{T_{mono} \sinh(K_{wave} \times WD)} \cos(0) \sin(\theta_{w\ rel})$$

Con:

$$K_{wave} = \{K_w; 0; 1\} \quad \text{Wave vector}$$

$$\text{che ricavo dall'equazione} \quad K_w WD = \frac{[\omega_{calc}]^2 WD}{g} \coth(K_w WD)$$

$$\omega_{calc} = \frac{2\pi}{T_{mono}}$$

$\theta_{inf}$  rappresenta il parametro di Shields in condizioni ambientali indisturbate; per cui in presenza del monopalo dovremmo considerare il coefficiente di amplificazione, ottenendo  $\alpha\theta$ .

Il parametro di Shield  $\theta$  viene definito come:

$$\theta_{inf} = \frac{U_{f\ inf}^2}{g(S_{gsoil} - 1)d_{50soil}}$$

$U_{f\ inf}$  è la velocità di taglio sul fondale

Il denominatore contiene le caratteristiche stabilizzanti del terreno.

$S_{gsoil}$  peso specifico fondale

$d_{50\ soil}$  diametro medio dei grani sul fondale

Se in aggiunta al palo, si considera anche l'eventuale protezione avremmo  $\theta_{max}$ , calcolato sostituendo a  $d_{50soil}$  del suolo, il  $d_{50}$  relativo al armour di protezione.

Quando il parametro di Shields raggiunge il valore critico di 0.056, si ha l'inizio alla movimentazione dei sedimenti nel fondale, per cui l'erosione si ha al superamento di tale valore critico.

Lo sforzo di taglio massimo in regime combinato di onde e corrente oscilla tra un valore medio  $\tau_{mean}$  ed un valore massimo  $\tau_{max}$ . in caso di moto indisturbato si hanno le seguenti formule:

$$\tau_{mean\ inf} = \tau_{c\ inf} \left[ 1 + 1.2 \left( \frac{\tau_{w\ inf}}{\tau_{c\ inf} + \tau_{w\ inf}} \right)^{3.2} \right]$$

$$\tau_{max\ inf} = \sqrt{[\tau_{mean\ inf} + \tau_{w\ inf} \cos(Fi_{wc})]^2 + [\tau_{w\ inf} \sin(Fi_{wc})]^2}$$

$Fi_{wc}$  è l'angolo tra la direzione delle onde e delle correnti.

$$U_{f\ inf} = \sqrt{\frac{\tau_{max\ inf}}{\rho_{sea}}}$$

Dallo sforzo di taglio è possibile calcolare il parametro di Shields, che mi permette di capire se avverrà o meno lo scouring, e di conseguenza calcolarne la profondità.

### Scour depth

Esistono diverse formule per il calcolo della profondità di Scouring a seconda dei fenomeni presi in considerazione, per cui oltre alla DNV, che non considera pali di grandi dimensioni o la diffrazione delle onde, si possono utilizzare altre formule presenti in letteratura.

In primis per definire quale fenomeno avverrà intorno al palo, e quale formula utilizzare per il calcolo della profondità del scavo, bisogna definire il numero di Keulegan-Carpenter "KC", in funzione delle caratteristiche delle onde e del diametro del palo:

$$KC = \frac{U_w T_{mono}}{D_{pile}}$$

- $T_w$  periodo del picco d'onda
- $U_w$  deviazione standard della velocità sul fondale moltiplicata per 1.41
- $S$  profondità di scouring

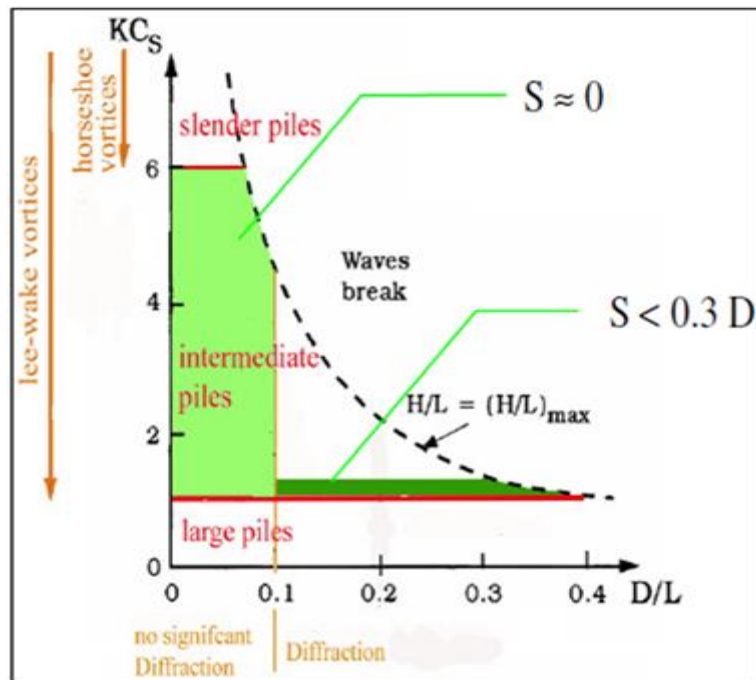


Figura 5.19 – Profondità di scouring in funzione del parametro KC

La DNV afferma che per  $KC < 6$  non avviene lo Scouring, trascurando alcuni fenomeni, per questo motivo sono state utilizzate altre formulazioni da letteratura, che per esempio tengono conto della diffrazione dell'onda, in funzione del rapporto tra il diametro del palo e la lunghezza d'onda e del fenomeno delle "breaking wave", che non può essere trascurato.

### 5.3.2 Protezione da Scouring

Questa parte della metodologia non rientra nella normativa DNV, ma deriva da letteratura, nei quali viene indicato di proteggere il fondale dall'erosione tramite rocce di opportuna dimensione, in grado di rimanere stabili sotto l'azione del flusso (protezione statica); più precisamente strati di massi di diverso diametro attorno la fondazione. Per cui si definisce il diametro dello strato "armour"  $D_{50}$

$$D_{50} = \frac{\tau_{max}}{\rho_{sea} g_e \left( \frac{\rho_{stone}}{\rho_{sea}} - 1 \right) \theta_{max}}$$

In letteratura esistono diverse formulazioni per il calcolo di  $D_{50}$ , che possono essere utilizzate come confronto.

$$D_{50range} = \frac{H_{mono}}{\left( \frac{\rho_{stone}}{\rho_{sea}} - 1 \right) H_{orange}}$$

$H_0$  è l'altezza d'onda adimensionale (6-15)

Ricavato  $D_{50}$  posso calcolare l'altezza dello strato del armour pari a 2.5-3 volte il  $D_{50}$

Infine si calcola l'estensione dello scouring e della relativa estensione di protezione.

- $L_{ext} = D_{pile} + 2(S_c \cot(\alpha_{up}))$

$\alpha_{up} = \alpha_{soil}$  Upstream angle of scour= Soil angle friction factor

$S_c$  profondità di scouring

- $L_{edge} = 3S_{armo}$

Con  $S_{armo} = 3D_{n50}$  Height of armour

$$D_{n50} = 0.84D_{50} \quad \text{Nominal diameter of armour}$$

- $S_{filt} = 0.5 \text{ m}$  Height of filter

## 5.4 Battitura Pali

In questa sezione viene riportata la modalità di verifica relativamente alla "pile drivability" ovvero la possibilità di un palo, sotto determinate condizioni, di essere battuto o infisso su un terreno tramite dei martelli idraulici o a vibrazione. Il programma GRLWEAP.

Il programma GRLWEAP simula il comportamento di un palo guidato da un martello a percussione o da un martello vibrante. Il programma si basa su modelli matematici, che descrivono il movimento e le forze del martello, il sistema di guida, il palo e il terreno sotto l'azione del martello. In determinate condizioni, i modelli approssimano solo in modo grossolano situazioni dinamiche, spesso complesse. La risposta del suolo e le prestazioni del martello devono essere verificate mediante prove e misurazioni statiche e/o dinamiche. Stime di flessione o altre sollecitazioni locali (ad es. contatto con casco o morsetto, superfici rocciose irregolari, ecc.) anche gli effetti di precompressione e altri devono essere tenuti in considerazione dall'utente.

Un'analisi di equazioni d'onda si basa generalmente su dati di input, che rappresentano situazioni normali. In particolare, il file dati martello fornito con il programma presuppone che il martello sia in buone condizioni di funzionamento. Benché i dati di input selezionati sono state le migliori informazioni disponibili nel momento in cui l'analisi viene eseguita tuttavia, i dati di input e quindi i risultati possono differire in modo significativo dalle condizioni reali del campo.

L'analisi è stata eseguita in accordo al modello matematico di seguito schematizzato

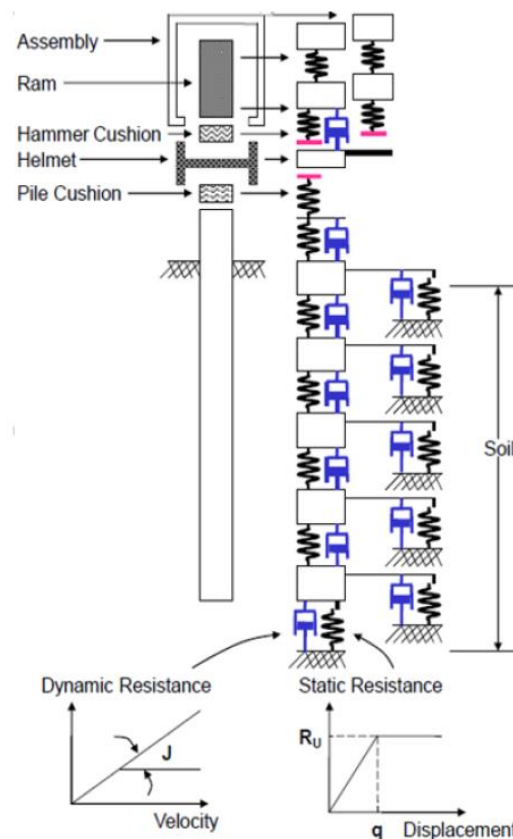


Figura 5.20 – Modello della battitura del palo

Sulla base delle caratteristiche terreno selezionato, della dimensione del palo, dei pesi e della lunghezza di infissione necessaria è stato

- selezionati i martelli;
- calcolato il tempo di battitura;
- verificato che il palo non ecceda lo stress durante la battitura;

Sono stati verificati nello specifico:

- il palo di fondazione dell'aerogeneratore;
- il palo di fondazione della SET (piattaforma sotto stazione elettrica a mare) per il terreno più severo calcolato con il monopalo dell'aerogeneratore;

Data la mancanza di campioni geotecnici specifici, che verranno fatte nella fase esecutiva, è stata eseguita una sensitivity in base ai parametri riportati nella relazione /A7/ .



## 6 RISULTATI

### 6.1 Fondazione monopalo aerogeneratori

#### 6.1.1 Analisi statiche

Di seguito si riportano i massimi valori di Unity Check, per gli elementi analizzati (turbina, palo di fondazione ed elemento di transizione), per le due tipologie di suolo (argilla / sabbia) e per le due profondità analizzate (14m / 44m).

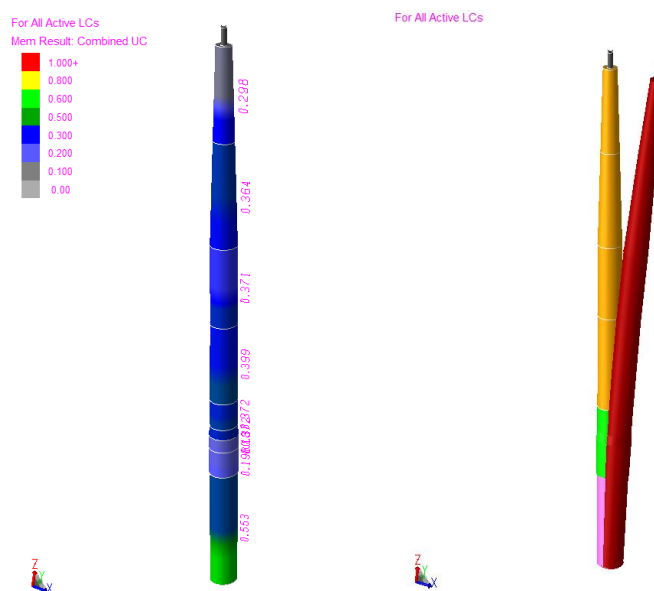


Figura 6.1 – UC massimi – elementi al di sopra del fondale (WD 44m/argilla)

Descrizione	WD <sub>min</sub> 14m		WD <sub>max</sub> 44m	
	Argilla	Sabbia	Argilla	Sabbia
Torre turbina	0.400	0.400	<b>0.400</b>	0.400
Elemento di transizione	0.370	0.370	<b>0.370</b>	0.370
Palo di fondazione (parte al di sopra del fondale marino)	0.420	0.420	<b>0.550</b>	0.550
Palo di fondazione (parte infissa nel suolo)	0.440	0.434	<b>0.575</b>	0.568

Tabella 6.1 – UC massimi

\*\*\* MEMBER GROUP SUMMARY \*\*\*  
 EUROCODE 3:2005/NORSOK (N-004)  
 (EN 1993-1-1:2005/NA NONE)

GRP ID	CRITICAL MEMBER	LOAD COND	MAX. UNITY CHECK	DIST FROM END M	* APPLIED STRESSES *			*** ALLOWABLE STRESSES ***				CRIT COND	EFFECTIVE LENGTHS		CM * VALUES *	
					AXIAL N/MM2	BEND-Y N/MM2	BEND-Z N/MM2	AXIAL N/MM2	EULER N/MM2	BEND-Y N/MM2	BEND-Z N/MM2		KLY M	KLZ M	Y	Z
T01	0008-0005	STR2	0.30	0.0	-6.7	0.0	59.0	282.0	9072.9	302.6	302.6	JUNYLD	25.05	25.05	0.85	0.85
T02	0007-0008	STR2	0.36	28.7	-5.6	0.0	49.4	.3E+03	.1E+05	.3E+03	.3E+03	JUNBUK	28.70	28.70	0.85	0.85
T03	0006-0007	STR2	0.37	5.7	-7.6	0.0	82.8	.3E+03	.2E+05	.3E+03	.3E+03	LOBU	22.80	22.80	0.85	0.85
T04	0004-0006	STR2	0.40	5.7	-7.8	0.0	87.9	.3E+03	.2E+05	.3E+03	.3E+03	LOBU	22.95	22.95	0.85	0.85
TR2	0010-0004	STR2	0.37	0.0	-8.7	0.0	101.5	.3E+03	.2E+06	.3E+03	.3E+03	ACBI	8.00	8.00	0.85	0.85
TR3	0009-0010	STR2	0.37	3.0	-8.7	0.0	101.5	.3E+03	.2E+07	.3E+03	.3E+03	ACBI	3.00	3.00	0.85	0.85
TRJ	0003-0009	STR2	0.18	0.0	-4.4	0.0	48.3	.3E+03	.9E+06	.3E+03	.3E+03	ACBI	4.00	4.00	0.85	0.85
TRW	0002-0003	STR2	0.20	0.0	-5.0	0.0	53.1	.3E+03	.2E+06	.3E+03	.3E+03	ACBI	8.00	8.00	0.85	0.85

Tabella 6.2 – UC massimi elementi al di sopra del fondale (WD 44m/argilla)

\*\*\* PILE MAXIMUM UNITY CHECK SUMMARY \*\*\*

PILE JT.	GRP CASE	***** PILEHEAD FORCES *****			* PILEHEAD DISPLACEMENTS *			***** STRESSES AT MAX. UNITY CHECK *****						
		AXIAL KN	LATERAL KN	MOMENT KN-M	AXIAL CM	LATERAL CM	ROTATION RAD	DEPTH M	AXIAL	FBY	FBZ	SHEAR	COMB.	UNITY CHECK
0000	PL1 IEC1	-23006.10	1283.18	178578.7	1.28	2.49	0.001818	3.2	-11.94	51.58	0.00	0.09	-63.52	0.220
	IEC2	-23006.10	2710.00	254128.7	1.28	4.19	0.002861	5.8	-11.86	74.84	0.00	0.16	-86.70	0.299
	IEC3	-23006.09	2852.57	389491.2	1.28	6.73	0.004467	5.4	-11.87	113.41	0.00	0.07	-125.29	0.431
	IEC4	-23006.10	1883.58	113501.0	1.28	1.76	0.001243	5.1	-11.88	33.86	0.00	0.17	-45.74	0.159
	IEC5	-23006.10	2691.12	252172.5	1.28	4.15	0.002835	5.8	-11.86	74.26	0.01	0.15	-86.12	0.297
	STR1	-29908.10	3654.37	255519.3	1.66	4.59	0.003041	7.7	-15.24	77.09	0.00	0.23	-92.34	0.319
	STR2	-23006.09	4922.20	525283.0	1.28	11.02	0.006710	8.0	-11.80	155.65	0.00	0.17	-167.45	0.575
	STR3	-23004.87	704.46	39244.9	1.28	0.61	0.000430	4.5	-11.90	11.71	0.00	0.12	-23.61	0.083

Tabella 6.3 – UC massimi palo di fondazione (WD 44m/argilla)

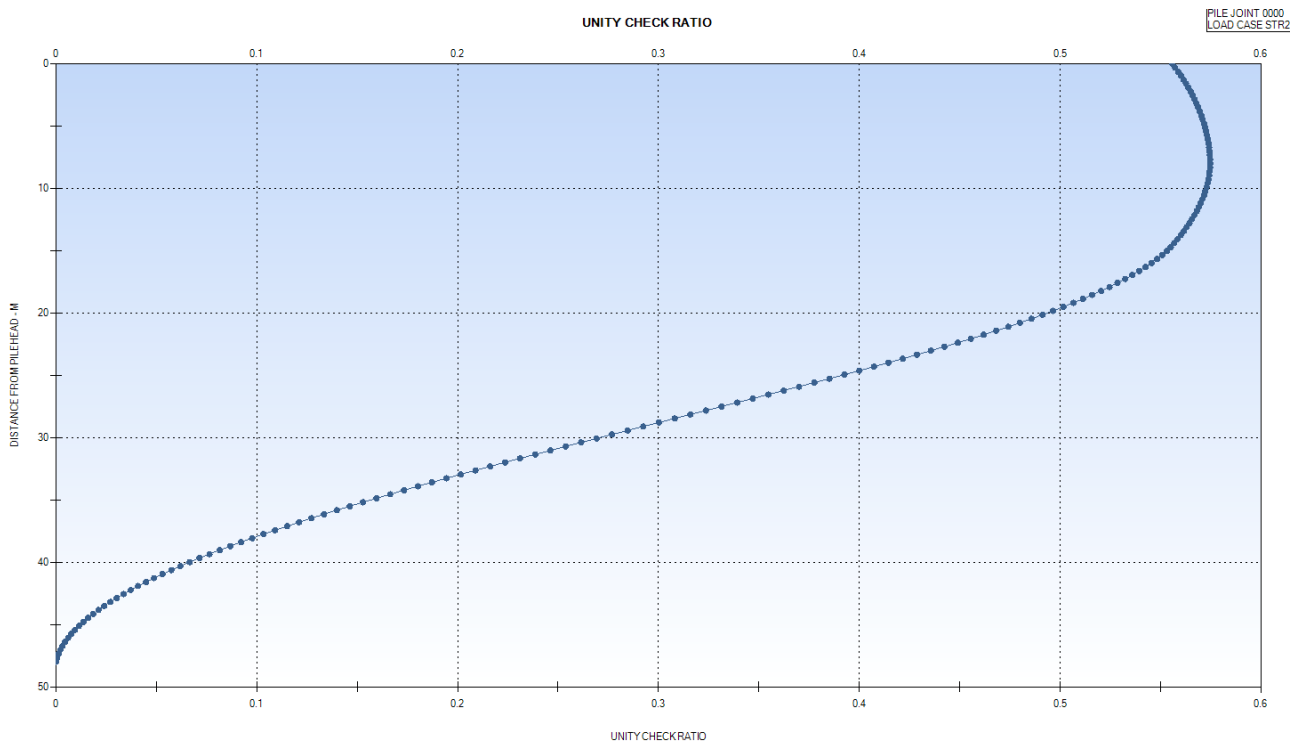


Figura 6.2 – UC massimi vs WD per il palo di fondazione (WD 44m/argilla)

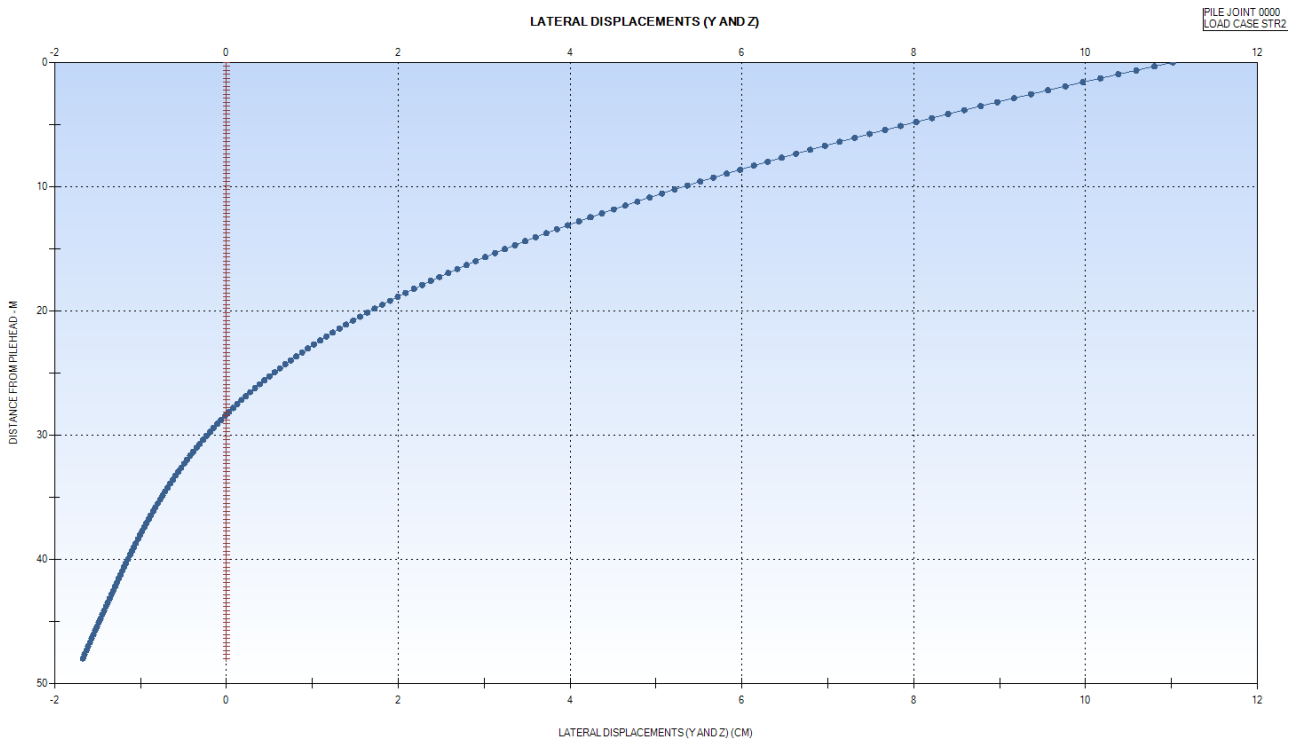


Figura 6.3 – Spostamento laterale palo di fondazione (WD 44m/argilla)

### 6.1.2 Analisi sismica

La turbina eolica è stata verificata nei riguardi dell'azione sismica. Lo spettro è in accordo al paragrafo 3.7.3.

In particolare si è analizzato il caso di WD massima (44m) e suolo tipo sabbioso.

Lo spettro sismico impiegato è quello ricavato secondo le NTC ([Ref. 1]) come da paragrafo 3.7.1.1.

Di seguito si riportano i valori massimi di Unity Check per gli elementi analizzati (turbina, elemento di transizione e palo di fondazione).

*** MEMBER GROUP SUMMARY ***																
EUROCODE 3:2005/NORSOK (N-004)																
(EN 1993-1-1:2005/NA NONE)																
GRUP ID	CRITICAL MEMBER	LOAD COND	MAX. UNITY CHECK	DIST FROM END M	* APPLIED STRESSES *			*** ALLOWABLE STRESSES ***				CRIT COND	EFFECTIVE LENGTHS		CM VALUES *	
					AXIAL N/MM2	BEND-Y N/MM2	BEND-Z N/MM2	AXIAL N/MM2	EULER N/MM2	BEND-Y N/MM2	BEND-Z N/MM2		KLY M	KLZ M	Y	Z
PIL	0000-0002	2	0.21	27.0	-15.0	33.1	33.1	.3E+03	.1E+05	.3E+03	.3E+03	ACBI	36.00	36.00	0.85	0.85
T01	0008-0005	2	0.25	18.8	-9.6	36.3	36.3	282.0	9072.9	302.6	302.6	LOBU	25.05	25.05	0.85	0.85
T02	0007-0008	2	0.20	21.5	-8.7	27.7	27.8	.3E+03	.1E+05	.3E+03	.3E+03	LOBU	28.70	28.70	0.85	0.85
T03	0006-0007	2	0.17	17.1	-9.3	22.5	22.5	.3E+03	.2E+05	.3E+03	.3E+03	LOBU	22.80	22.80	0.85	0.85
T04	0004-0006	2	0.17	17.2	-9.6	22.1	22.1	.3E+03	.2E+05	.3E+03	.3E+03	LOBU	22.95	22.95	0.85	0.85
TR2	0010-0004	2	0.13	6.0	-10.0	19.5	19.5	.3E+03	.2E+06	.3E+03	.3E+03	ACBI	8.00	8.00	0.85	0.85
TR3	0009-0010	2	0.12	3.0	-10.1	18.1	18.1	.3E+03	.7E+07	.3E+03	.3E+03	ACBI	3.00	3.00	0.85	0.85
TRJ	0003-0009	2	0.06	3.0	-5.5	8.8	8.8	.3E+03	.9E+06	.3E+03	.3E+03	ACBI	4.00	4.00	0.85	0.85
TRW	0002-0003	2	0.07	6.0	-6.3	9.9	9.9	.3E+03	.2E+06	.3E+03	.3E+03	ACBI	8.00	8.00	0.85	0.85

Tabella 6.4 – UC massimi elementi al di sopra del fondale (WD 44m/sabbia)

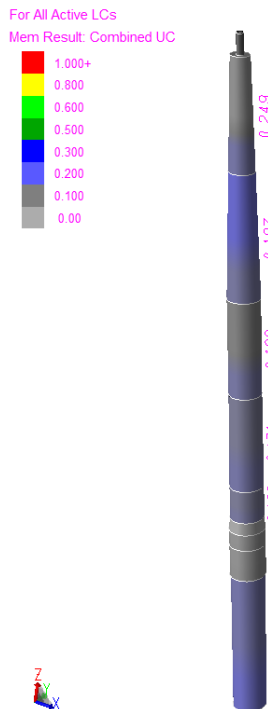


Figura 6.4 – UC massimi (WD 44m/sabbia)

Dai risultati emergono "Unity Check" inferiori all'unità; pertanto si può affermare che anche in condizioni sismiche la turbina eolica e la sua fondazione sono in grado di sostenere i carichi applicati.

### 6.1.3 Verifica geotecnica

La Tabella 6.5 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.) relativi alla capacità assiale del terreno rispettivamente di terreni argillosi e sabbiosi.

Descrizione	WD <sub>min</sub> 14m		WD <sub>max</sub> 44m	
	Argilla	Sabbia	Argilla	Sabbia
Portanza suolo	0.330	0.400	0.400	<b>0.470</b>

Tabella 6.5 – UC massimi capacità assiale terreno

```

*** SOIL MAXIMUM AXIAL CAPACITY SUMMARY ***

PILE GRP ***** PILE ***** COMPRESSION ***** TENSION *****
JT      PILEHEAD WEIGHT PEN. CAPACITY MAX. CRITICAL CONDITION CAPACITY MAX. CRITICAL CONDITION *MAXIMUM*
O.D. THK. (INCL. WT) LOAD LOAD SAFETY (INCL. WT) LOAD LOAD SAFETY UNITY LOAD
CM CM KN M KN KN KN CASE FACTOR KN KN KN CASE FACTOR CHECK CASE

0000 PL1 750.00 8.20 7861.3 48.0 -81894.0 -29776.3 -29776.3 STR1 2.75 95969.4 0.0 0.0 IEC1 100.00 0.47 STR1
    
```

Tabella 6.6 – Capacità portante massima palo di fondazione/ suolo e relativo UC (WD 44m/sabbia)

## 6.2 Piattaforma

### 6.2.1 Analisi statiche

Di seguito si riportano i massimi valori di Unity Check, per gli elementi analizzati, relative alle due tipologie stratigrafiche (argilla / sabbia) riportate alla tabella 3.4.

#### 6.2.1.1 Stato Limite Ultimo (SLU)

##### 6.2.1.1.1 Pali di fondazione emergenti dal terreno

La Tabella 6.7 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.5.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
PL0	092P-102P	U-W	0.68	092P-102P	U-W	0.68
PL1	102P-702P	U-W	0.68	102P-702P	U-W	0.68
PL3	202P-A02P	U-NW	0.51	202P-A02P	U-NW	0.51
PL4	402P-802P	U-NW	0.47	404P-804P	U-SW	0.47

Tabella 6.7 – UC massimi pali emergenti dal terreno

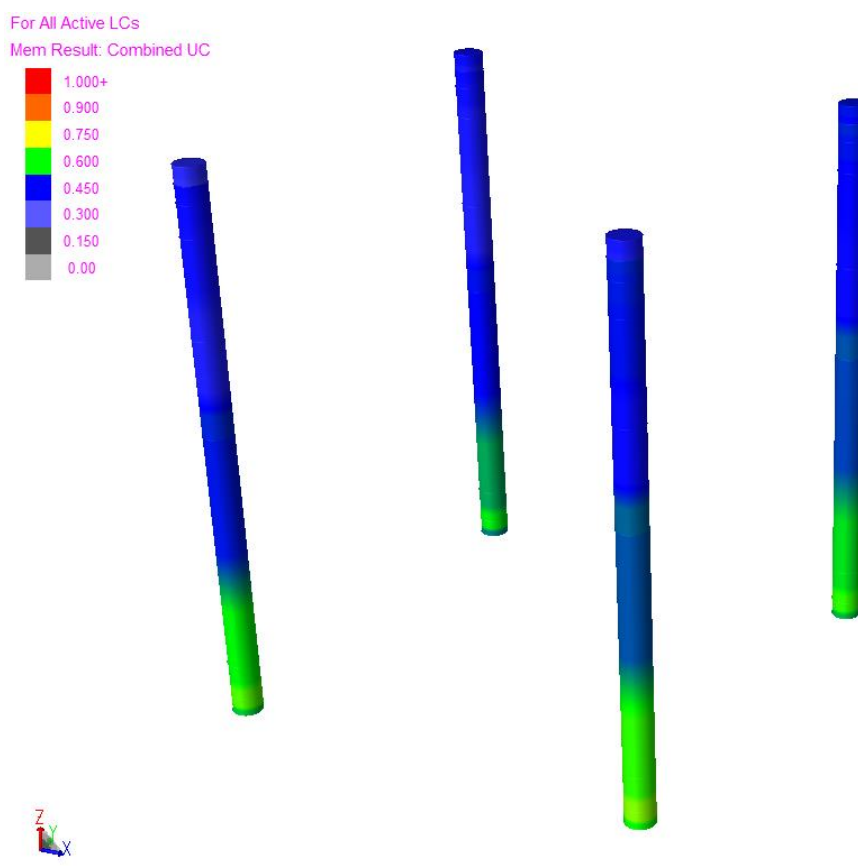


Figura 6.5 – UC massimi pali emergenti dal terreno

### 6.2.1.1.2 Telaio strutturale di irrigidimento (jacket)

#### Gambe del jacket

La Tabella 6.8 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.6.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
LG0	101L-701L	U-E	0.13	101L-701L	U-E	0.13
LG1	704L-204L	U-NE	0.2	704L-204L	U-NE	0.2
LG2	203L-A03L	U-NW	0.16	203L-A03L	U-NW	0.16
LG3	402L-802P	U-NW	0.15	402L-802P	U-NW	0.15

Tabella 6.8 – UC massimi gambe del jacket

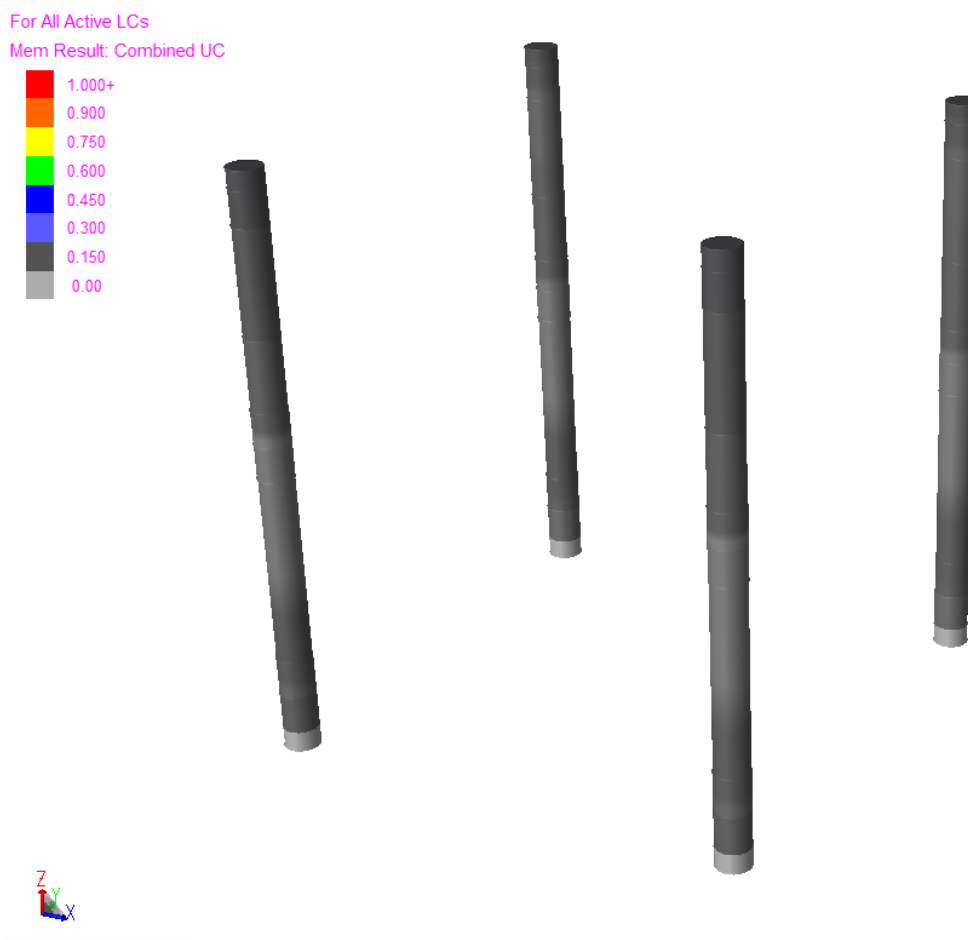


Figura 6.6 – UC massimi gambe del jacket

Elementi di irrigidimento jacket

La Tabella 6.9 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.7.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
DO1	0417-2443	U-N	0.3	0417-2443	U-N	0.3
DV1	701L-2040	U-E	0.66	701L-2040	U-E	0.65
TR	0053-102L	U-W	0.49	0053-102L	U-W	0.5

Tabella 6.9 – UC massimi elementi di irrigidimento jacket

For All Active LCs

Mem Result: Combined UC

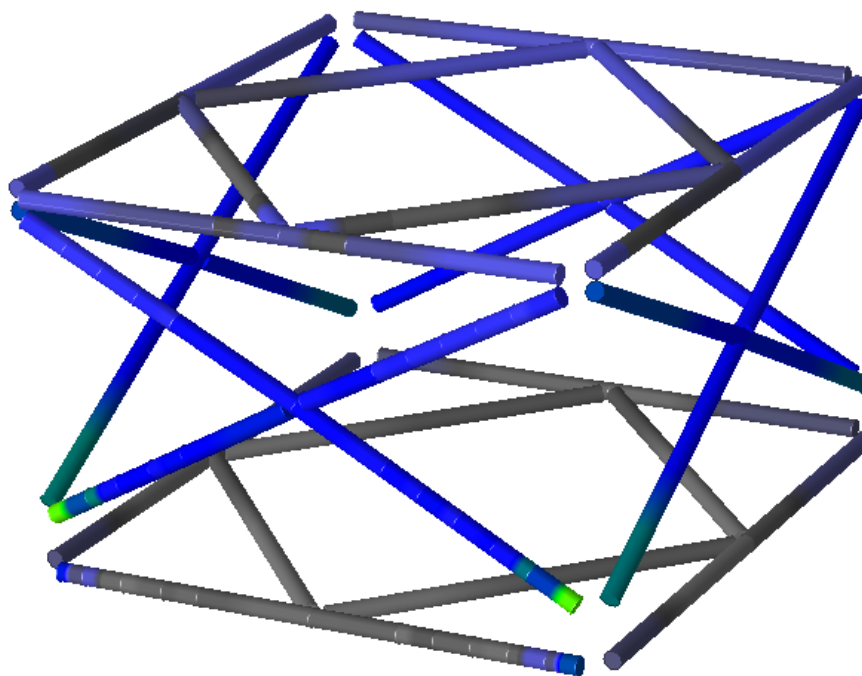
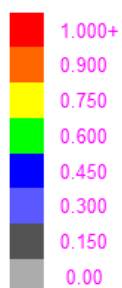


Figura 6.7 – UC massimi elementi di irrigidimento jacket



### 6.2.1.1.3 Topside

#### Elementi verticali a sezioni tubolare

La Tabella 6.10 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.8.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
DL4	0361-0054	U-SW	0.15	0361-0054	U-SW	0.15
DL6	504P-0009	U-S	0.38	504P-0009	U-S	0.38
CL1	0235-0155	U-W	0.42	0235-0155	U-W	0.42
CL2	0238-0158	U-SE	0.38	0238-0158	U-SE	0.38
CL3	0062-0094	U-W	0.28	0062-0094	U-W	0.28

Tabella 6.10 – UC massimi pilastri

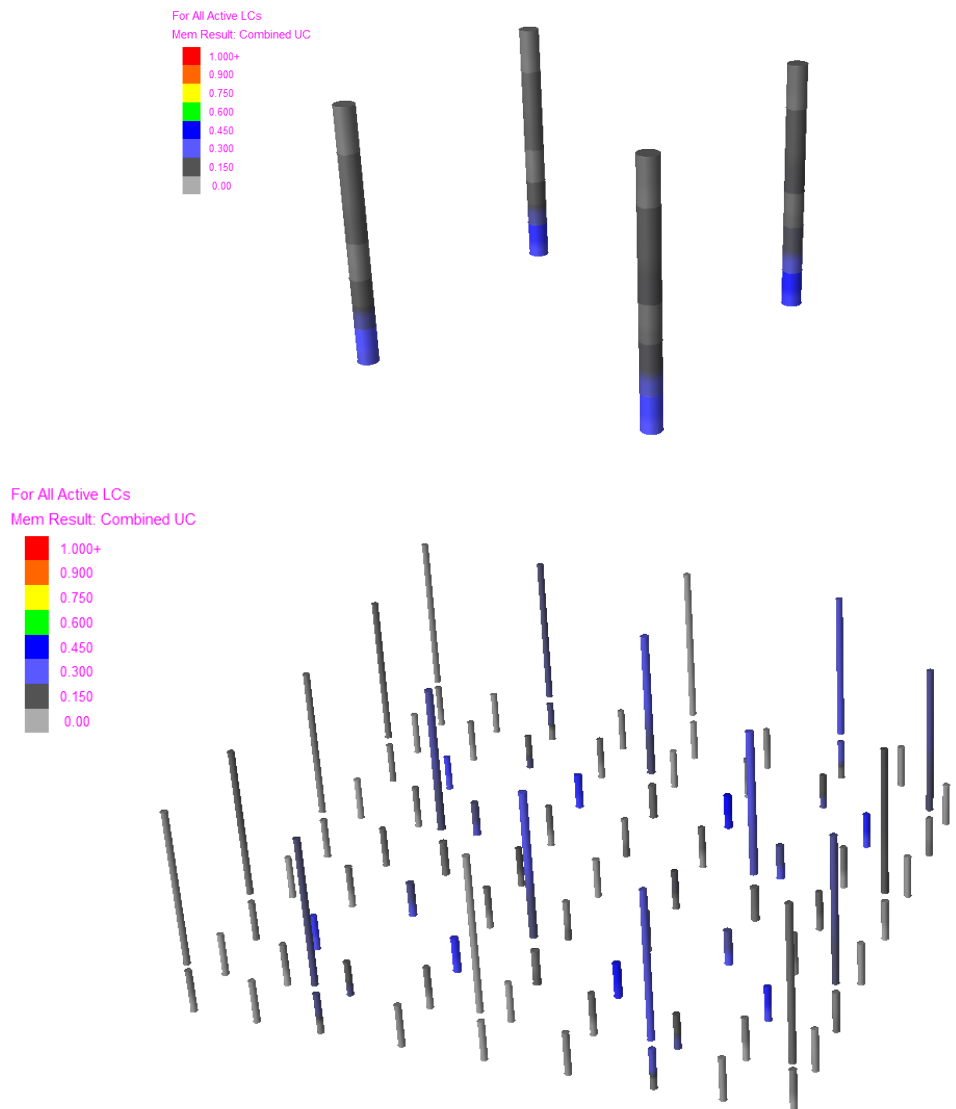


Figura 6.8 – UC massimi pilastri

Elementi orizzontali a sezione aperte e boxate

La Tabella 6.11 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.9, Figura 6.10 e Figura 6.11.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
TP0	0235-0366	U-W	0.55	0235-0366	U-W	0.55
TP1	0001-0236	U-N	0.66	0001-0236	U-N	0.66
TP2	0095-0027	U-S	0.49	0095-0027	U-S	0.49
TP3	0204-0009	U-W	0.57	0204-0009	U-W	0.57
TP4	0118-0237	U-W	0.45	0118-0237	U-W	0.45
TP5	0104-0068	U-E	0.38	0104-0068	U-E	0.38
TP6	0261-0235	U-SW	0.63	0261-0235	U-SW	0.63
TP7	0234-0118	U-NW	0.75	0234-0118	U-NW	0.75
TPA	0366-0204	U-W	0.49	0366-0204	U-W	0.49
TPB	0201-0200	U-N	0.42	0201-0200	U-N	0.42
TPE	0184-0373	U-NW	0.28	0184-0373	U-NW	0.28
TPF	0371-0165	U-SW	0.29	0371-0165	U-SW	0.29
BX1	0021-0185	U-SW	0.24	0021-0185	U-SW	0.24

Tabella 6.11 – UC massimi elementi orizzontali a sezione aperte e boxate

For All Active LCs  
 Mem Result: Combined UC

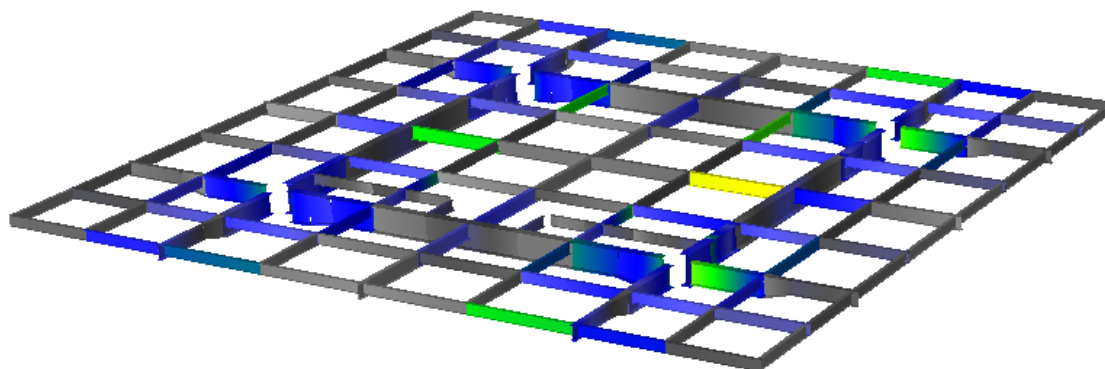
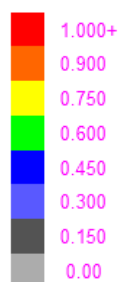


Figura 6.9 – UC massimi Elementi orizzontali a sezione aperta - impalcato Quota 15 m

For All Active LCs  
Mem Result: Combined UC

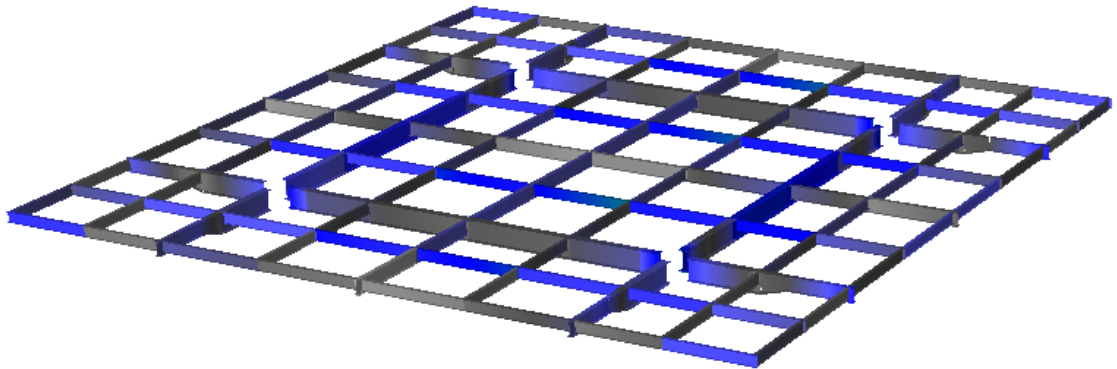


Figura 6.10 – Elementi orizzontali a sezione aperta - impalcato Quota 19 m

Mem Result: Combined UC

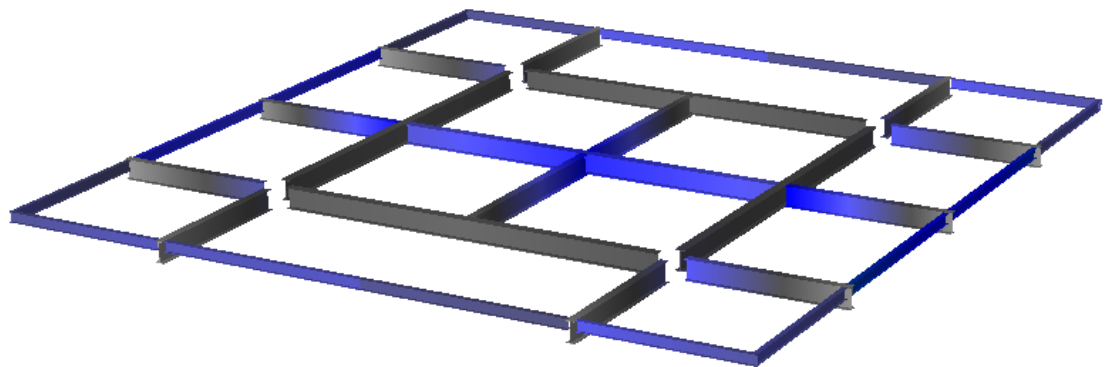
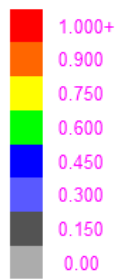


Figura 6.11 – Elementi orizzontali a sezione aperta e boxata - impalcato Quota 22 m (copertura)

Elementi orizzontali a sezioni tubolare

La Tabella 6.12 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.12.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
DO2	0066-0023	U-NW	0.15	0066-0023	U-NW	0.15
DO3	0065-0068	U-NE	0.21	0065-0068	U-NE	0.21

Tabella 6.12 – UC massimi elementi orizzontali a sezione tubolare

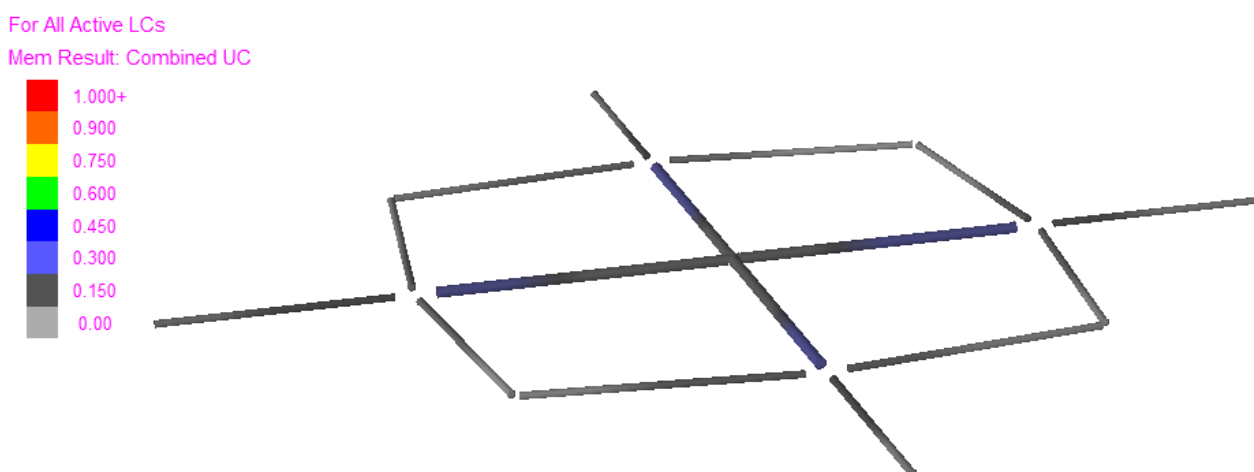


Figura 6.12 – UC massimi elementi orizzontali a sezione tubolare

Elementi diagonali a sezione tubolare

La Tabella 6.13 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.13.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
DV2	0100-0067	U-S	0.27	0100-0067	U-S	0.27
DV3	0009-0186	U-S	0.46	0009-0186	U-S	0.46

Tabella 6.13 – UC massimi elementi diagonali a sezione tubolare

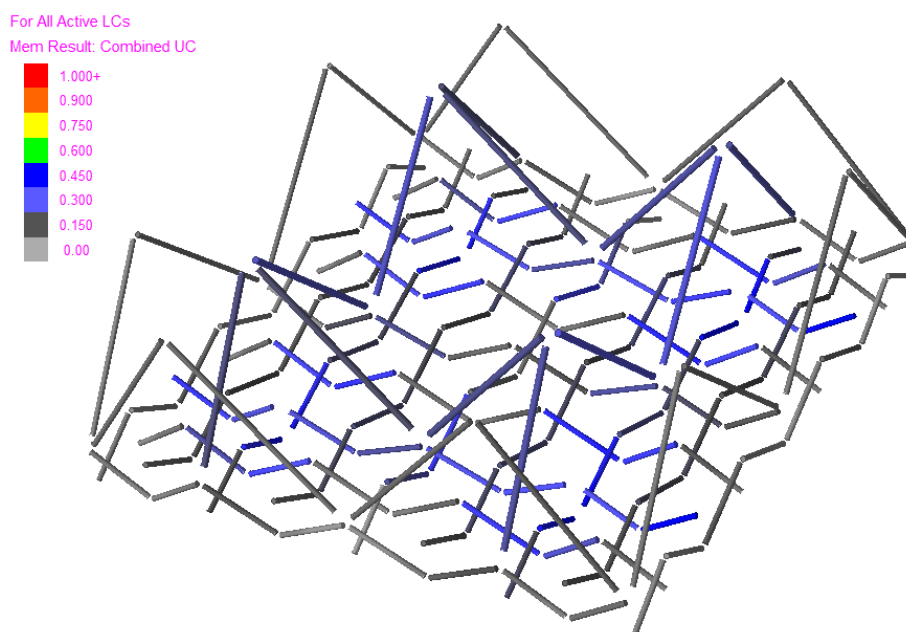


Figura 6.13 – UC massimi elementi diagonali a sezione tubolare

#### 6.2.1.1.4 J-tube e supporti

##### Supporti J-tube

La Tabella 6.14 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.14.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	MEMBRO CRITICO	COMBINAZIONE DI CARICO	MAX. UNITY CHECK	MEMBRO CRITICO	COMBINAZIONE DI CARICO	MAX. UNITY CHECK
SPV	2446-0200	U-N	0.47	2446-0200	U-N	0.47
SPO	B02L-2446	U-N	0.53	B02L-2446	U-N	0.53

Tabella 6.14 – UC massimi supporti j-tube

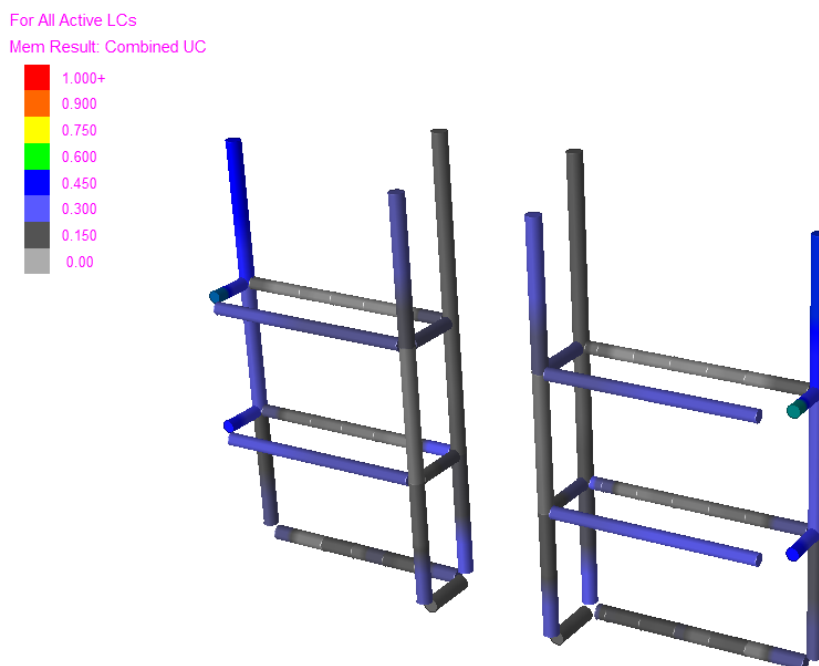


Figura 6.14 – UC massimi supporti j-tube

J-tube

La Tabella 6.15 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.15.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	MEMBRO CRITICO	COMBINAZIONE DI CARICO	MAX. UNITY CHECK	MEMBRO CRITICO	COMBINAZIONE DI CARICO	MAX. UNITY CHECK
CN1	2064-1336	U-E	0.16	2064-1336	U-E	0.16
CN2	2061-1013	U-W	0.13	2061-1013	U-W	0.13
S-J	0050-1284	U-W	0.36	0050-1284	U-W	0.36

Tabella 6.15 – UC massimi j-tube

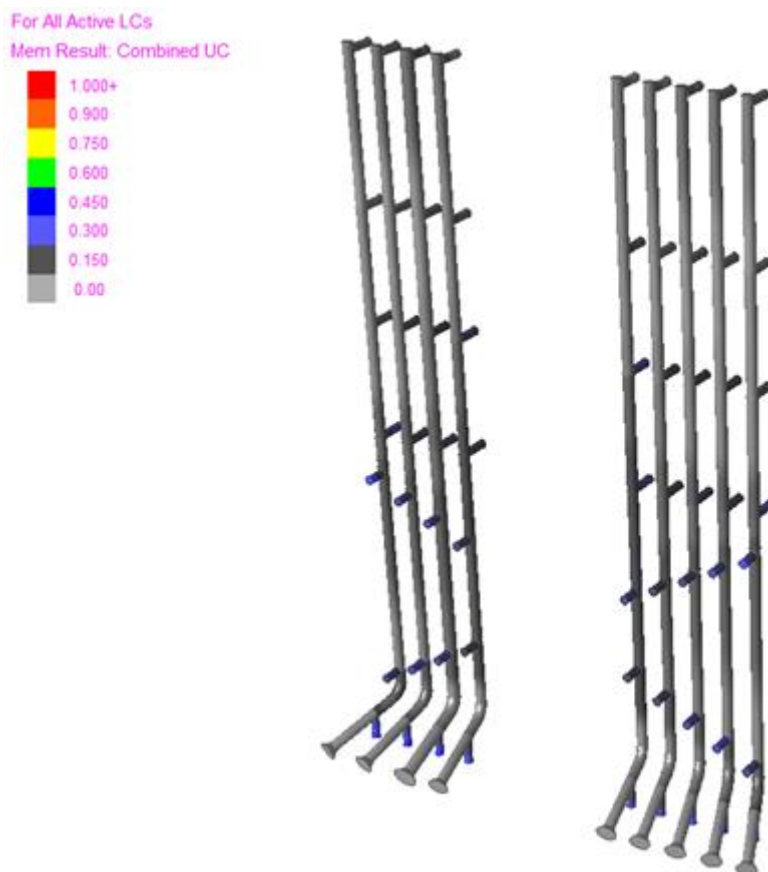


Figura 6.15 – UC massimi j-tube

### 6.2.1.1.5 Pali di fondazioni infissi nel terreno

I pali di fondazioni sono 4 e sono infissi nel terreno fino ad una profondità di 80 m. La stratigrafia del terreno e i relativi parametri meccanici sono riportati al paragrafo 3.4.

La Figura 6.16 e Figura 6.17 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di spostamento laterale dei pali di fondazione rispettivamente di terreni argillosi e sabbiosi.

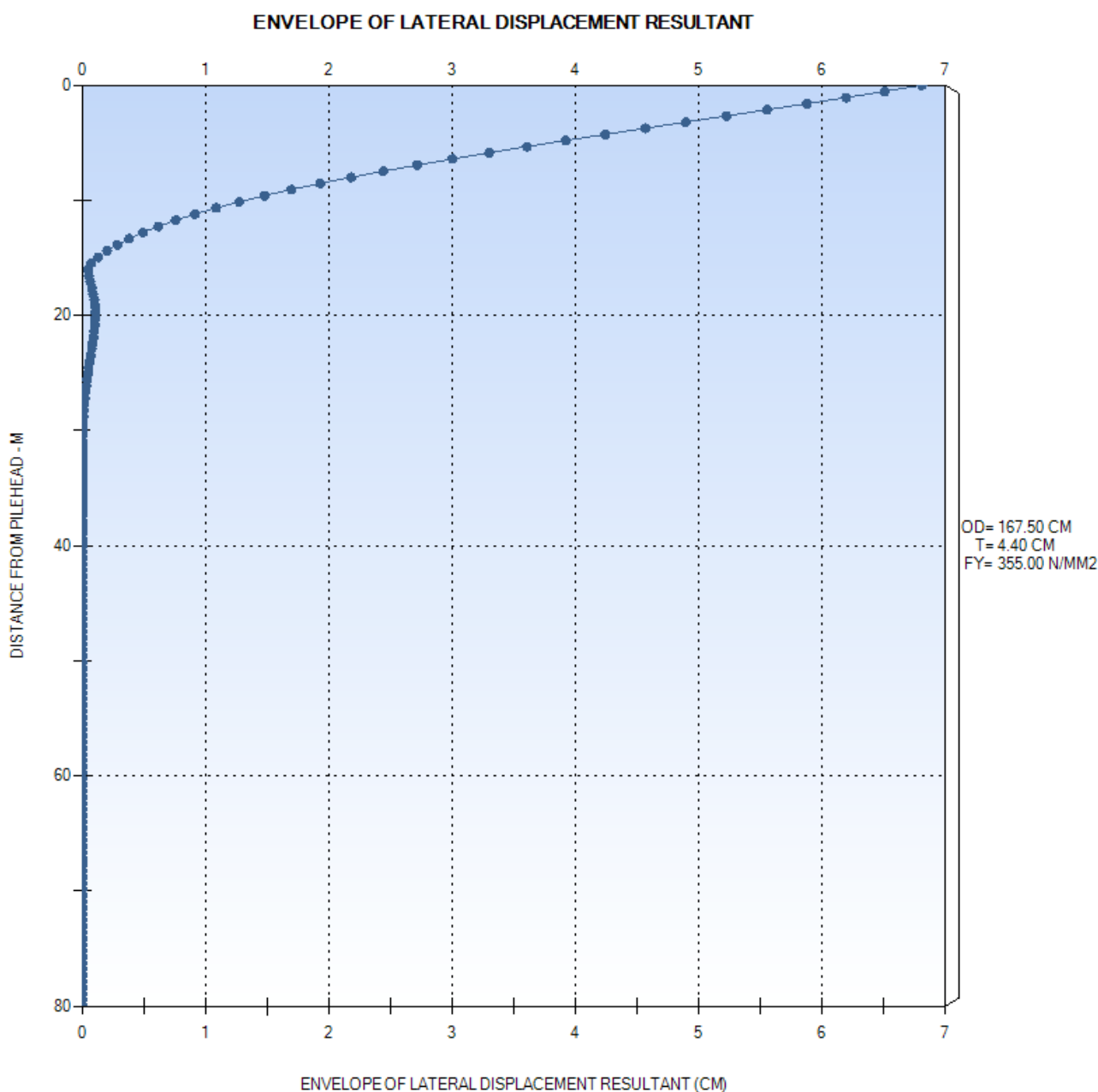


Figura 6.16 – Massimo spostamento laterale dei pali di fondazione in terreni argillosi



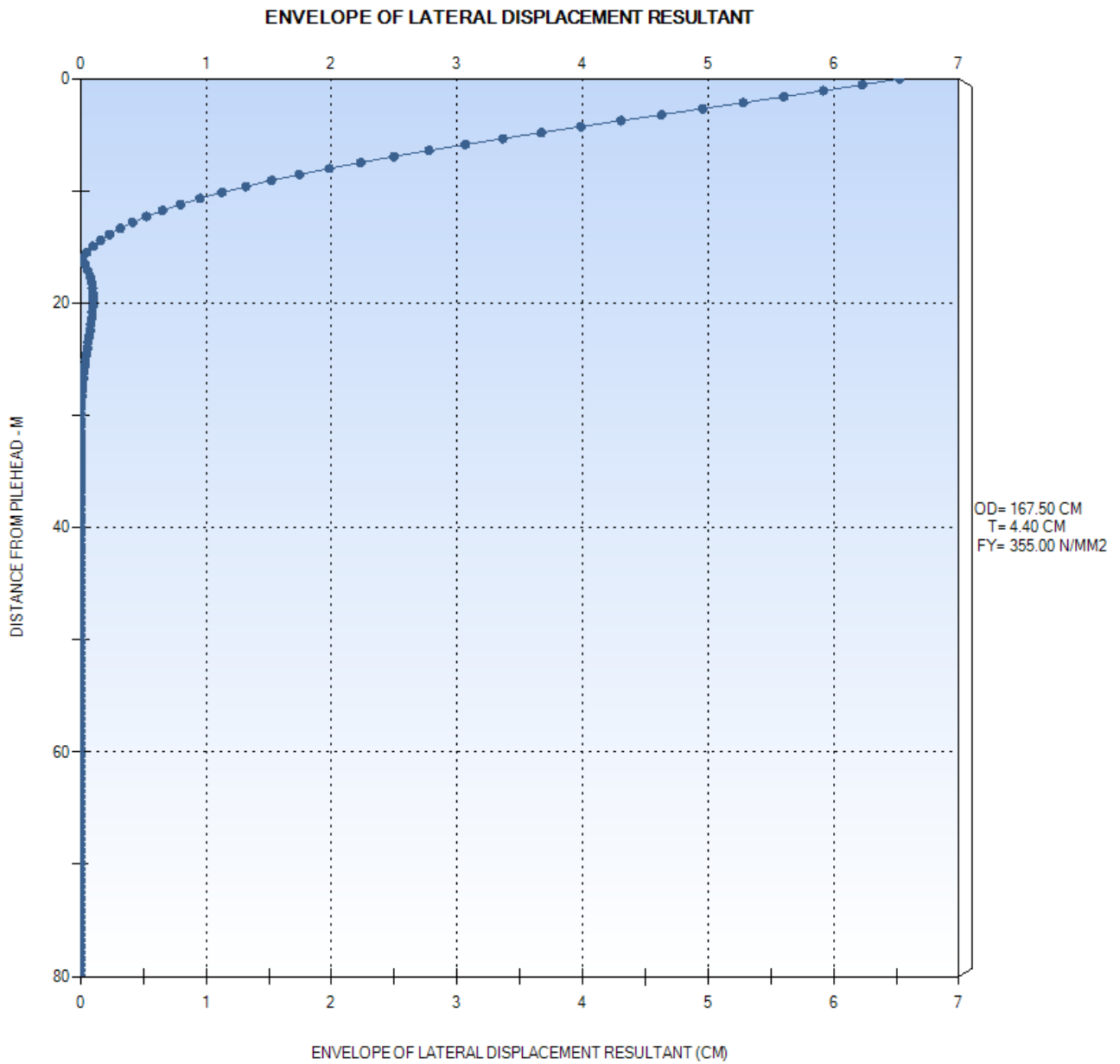


Figura 6.17 – Massimo spostamento laterale dei pali di fondazione in terreni sabbiosi

La Figura 6.18 e Figura 6.19 riassume rispettivamente i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.) dei pali di fondazione rispettivamente di terreni argillosi e sabbiosi.

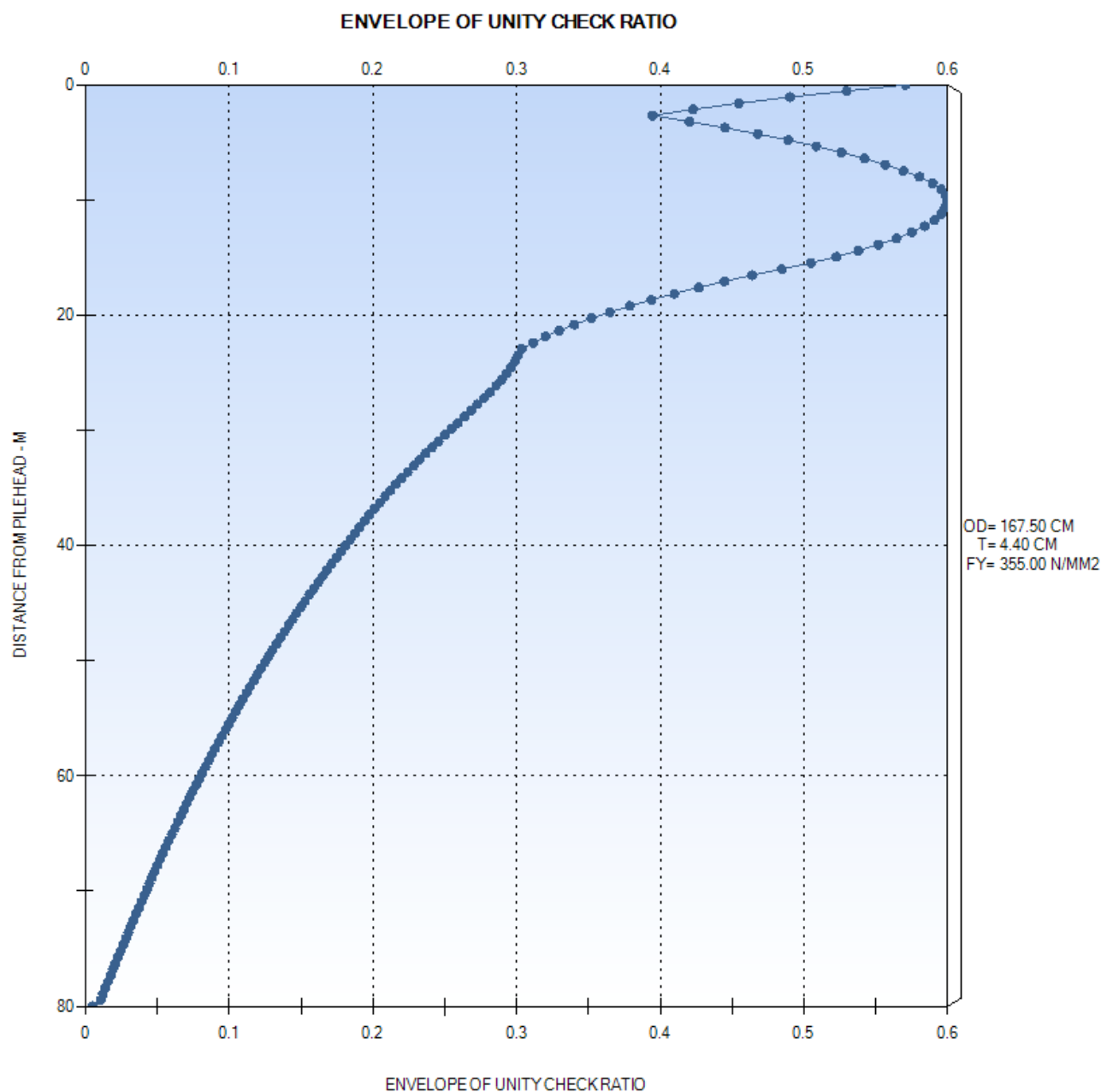


Figura 6.18 – UC massimi dei pali di fondazione in terreni argillosi

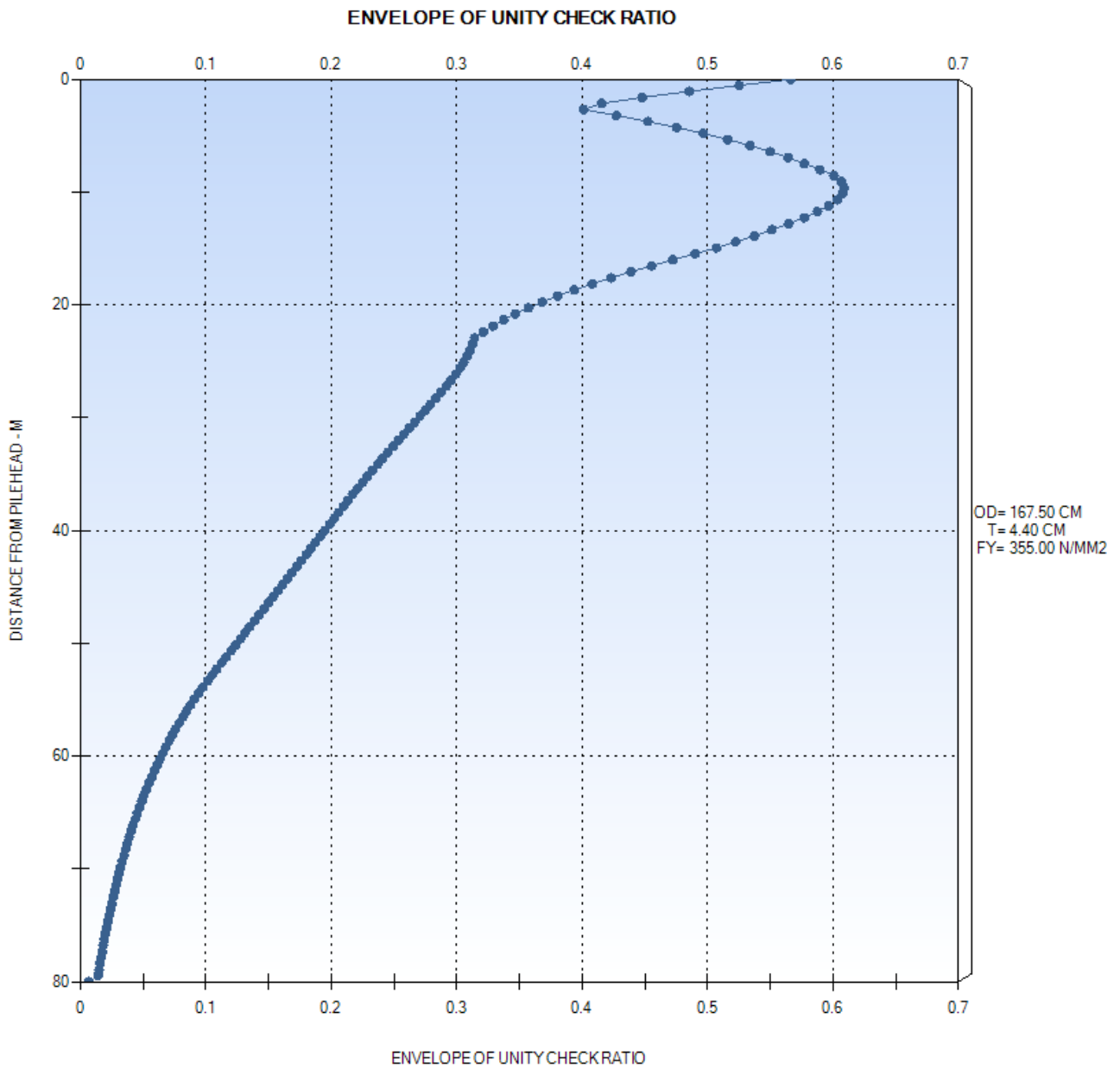


Figura 6.19 – UC massimi dei pali di fondazione in terreni sabbiosi

## 6.2.2 Analisi sismica

Di seguito si riportano i massimi valori di Unity Check, per gli elementi analizzati, per le due tipologie di suolo (argilla / sabbia)

### 6.2.2.1.1 Pali di fondazione emergenti dal terreno

La Tabella 6.16 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.20.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
PL0	092P-102P	SISM	0.49	092P-102P	SISM	0.49
PL1	704P-204P	SISM	0.49	704P-204P	SISM	0.49
PL3	204P-A04P	SISM	0.49	204P-A04P	SISM	0.49
PL4	804P-504P	SISM	0.63	804P-504P	SISM	0.63

Tabella 6.16 – UC massimi pali emergenti dal terreno

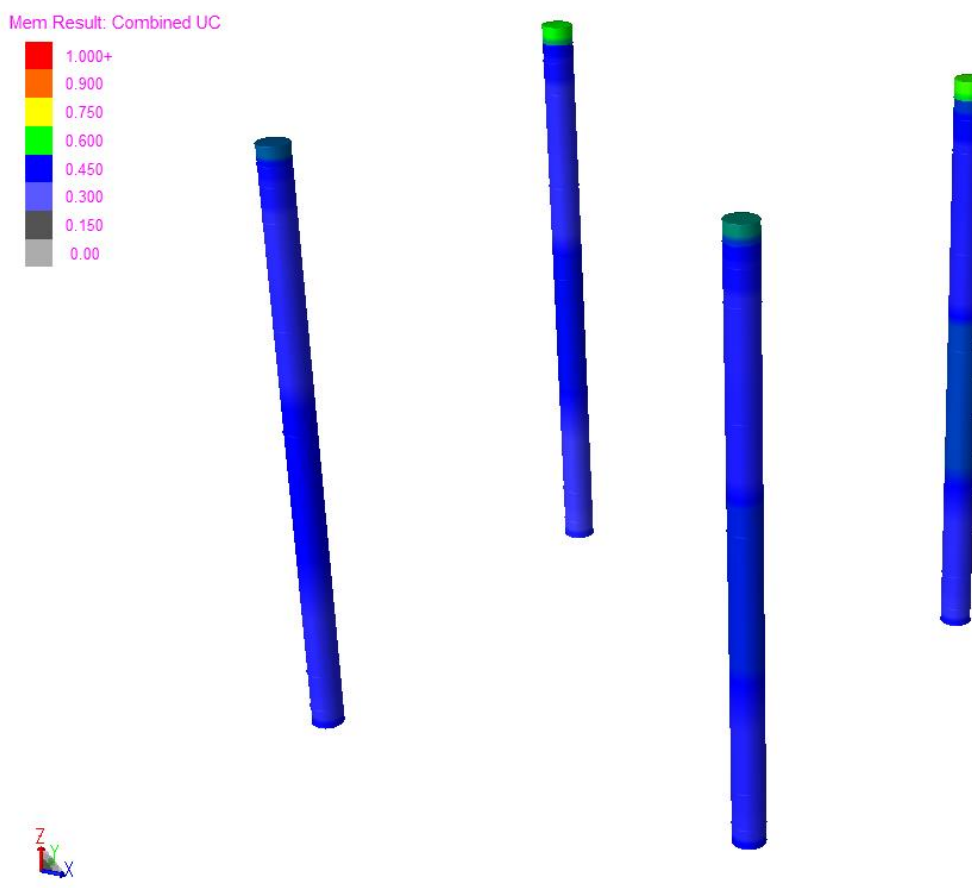


Figura 6.20 – UC massimi pali emergenti dal terreno

### 6.2.2.1.2 Telaio strutturale di irrigidimento (jacket)

#### Gambe del jacket

La Tabella 6.17 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.21.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
LG0	104L-704L	SISM	0.09	104L-704L	SISM	0.09
LG1	704L-204L	SISM	0.34	704L-204L	SISM	0.34
LG2	203L-A03L	SISM	0.49	203L-A03L	SISM	0.49
LG3	404L-804P	SISM	0.27	404L-804P	SISM	0.27

Tabella 6.17 – UC massimi gambe del jacket

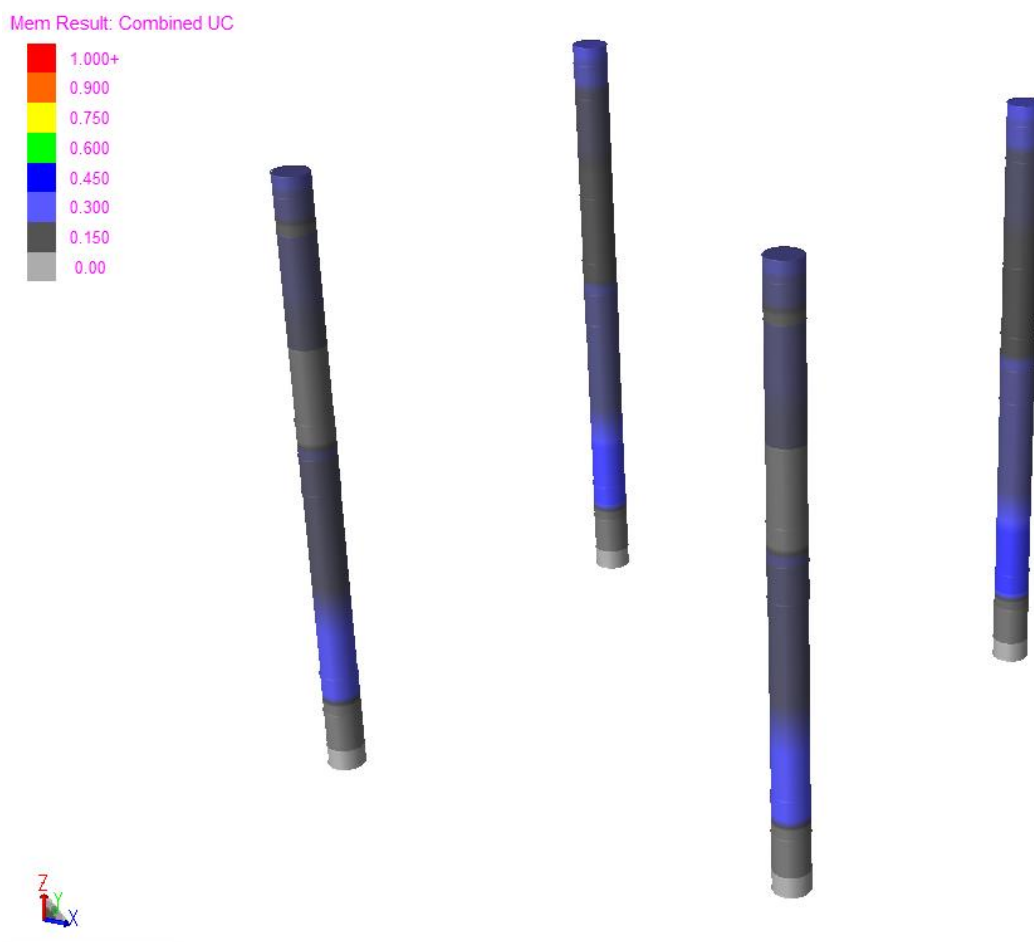


Figura 6.21 – UC massimi gambe del jacket

Elementi di irrigidimento jacket

La Tabella 6.18 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.22.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
DO1	2403-0417	SISM	0.17	2403-0417	SISM	0.17
DV1	7051-204L	SISM	0.58	7051-204L	SISM	0.58
TR	0414-203L	SISM	0.34	0414-203L	SISM	0.34

Tabella 6.18 – UC massimi elementi di irrigidimento jacket

Mem Result: Combined UC

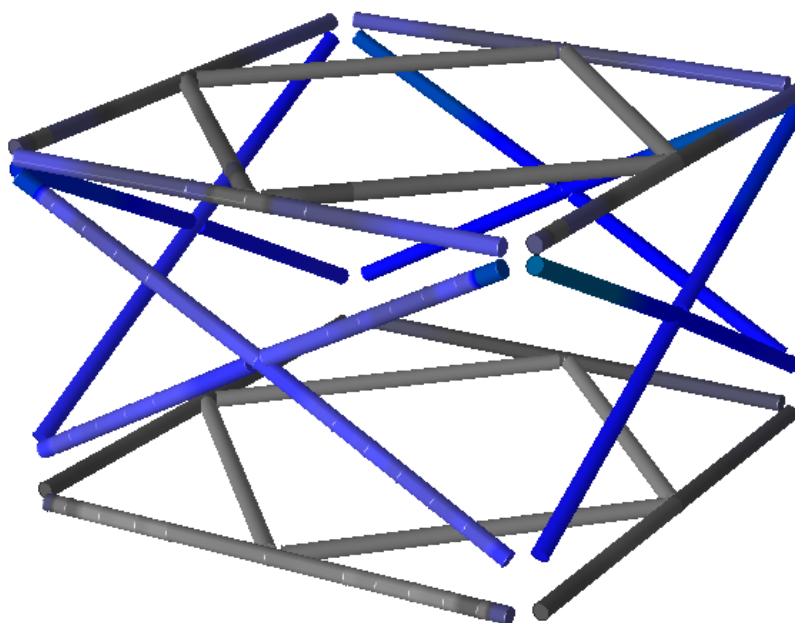
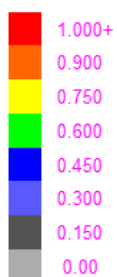


Figura 6.22 – UC massimi elementi di irrigidimento jacket

### 6.2.2.1.3 Topside

#### Elementi verticali a sezioni tubolare

La Tabella 6.19 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.23.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
DL4	0145-0035	SISM	0.14	0145-0035	SISM	0.14
DL6	504P-0009	SISM	0.58	504P-0009	SISM	0.58
CL1	0235-0155	SISM	0.39	0235-0155	SISM	0.39
CL2	0238-0158	SISM	0.32	0238-0158	SISM	0.32
CL3	0062-0094	SISM	0.22	0062-0094	SISM	0.22

Tabella 6.19 – UC massimi pilastri

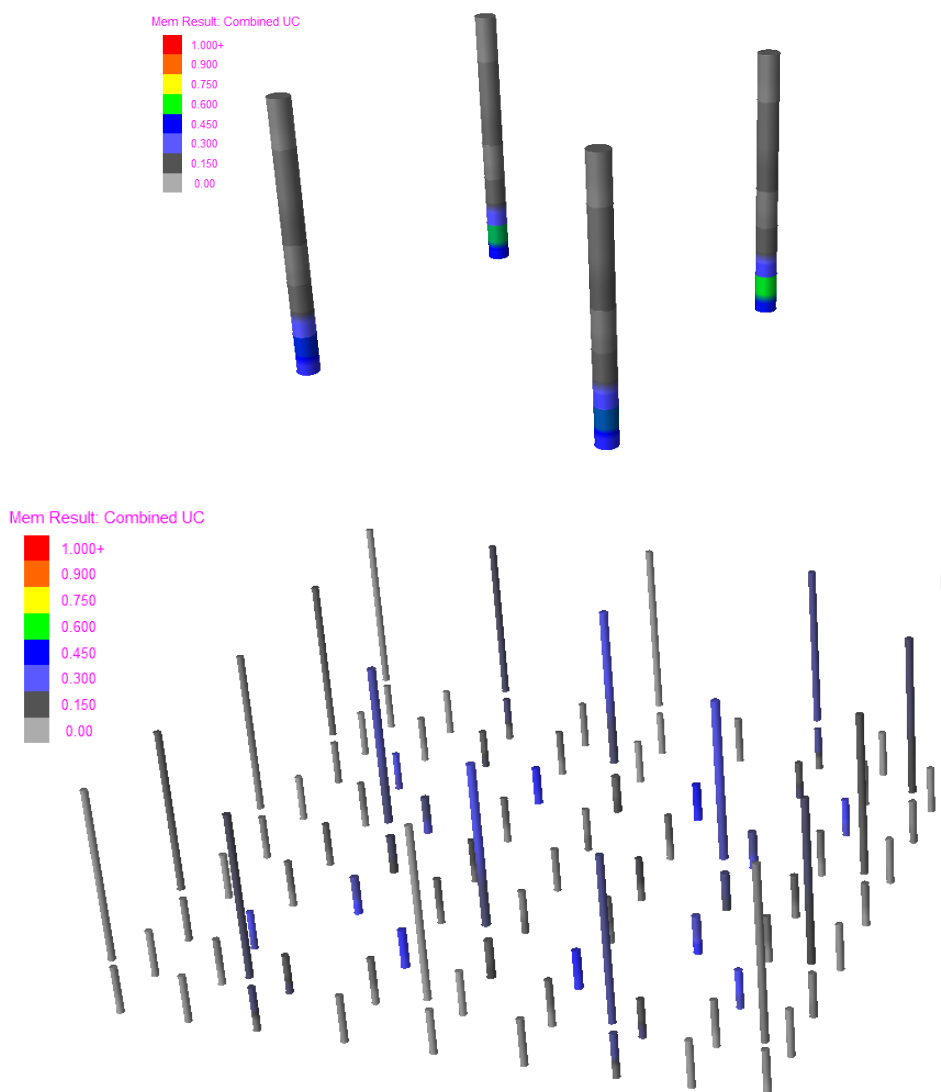


Figura 6.23 – UC massimi pilastri

Elementi orizzontali a sezione aperte e boxate

La Tabella 6.20 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.24, Figura 6.25 e Figura 6.26.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
TP0	0200-0394	SISM	0.77	0200-0394	SISM	0.77
TP1	0009-0238	SISM	0.57	0009-0238	SISM	0.57
TP2	0027-0092	SISM	0.39	0027-0092	SISM	0.39
TP3	0204-0009	SISM	0.63	0204-0009	SISM	0.63
TP4	0369-0106	SISM	0.39	0369-0106	SISM	0.39
TP5	0104-0068	SISM	0.42	0104-0068	SISM	0.42
TP6	0154-0172	SISM	0.66	0154-0172	SISM	0.66
TP7	0234-0118	SISM	0.63	0234-0118	SISM	0.63
TPA	0366-0204	SISM	0.52	0366-0204	SISM	0.52
TPB	0201-0200	SISM	0.53	0201-0200	SISM	0.53
TPE	0184-0373	SISM	0.25	0184-0373	SISM	0.25
TPF	0371-0165	SISM	0.24	0371-0165	SISM	0.24
BX1	0179-0021	SISM	0.21	0179-0021	SISM	0.21

Tabella 6.20 – UC massimi elementi orizzontali a sezione aperte e boxate

Mem Result: Combined UC

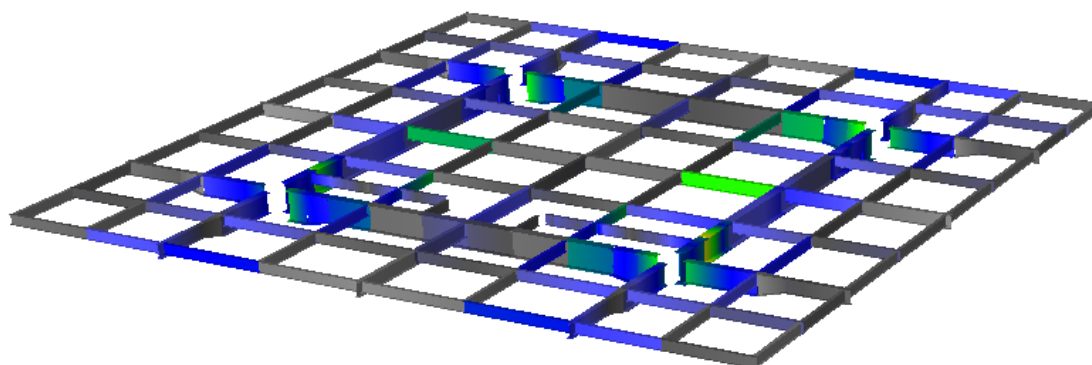
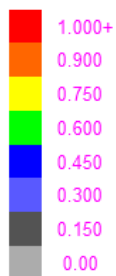


Figura 6.24 – UC massimi Elementi orizzontali a sezione aperta - impalcato Quota 15 m



Mem Result: Combined UC

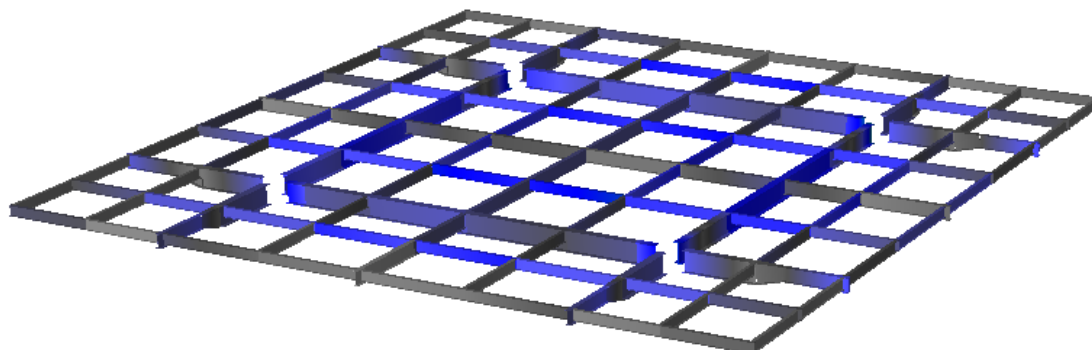
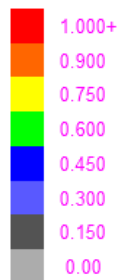


Figura 6.25 – Elementi orizzontali a sezione aperta - impalcato Quota 19 m

Mem Result: Combined UC

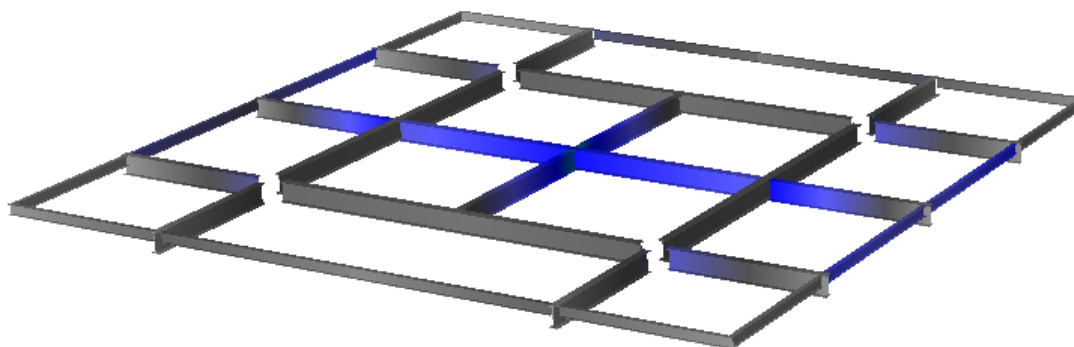


Figura 6.26 – Elementi orizzontali a sezione aperta e boxata - impalcato Quota 22 m (copertura)

Elementi orizzontali a sezioni tubolare

La Tabella 6.21 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.27.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
DO2	0067-0029	SISM	0.18	0067-0029	SISM	0.18
DO3	0065-0068	SISM	0.23	0065-0068	SISM	0.23

Tabella 6.21 – UC massimi elementi orizzontali a sezione tubolare

Mem Result: Combined UC

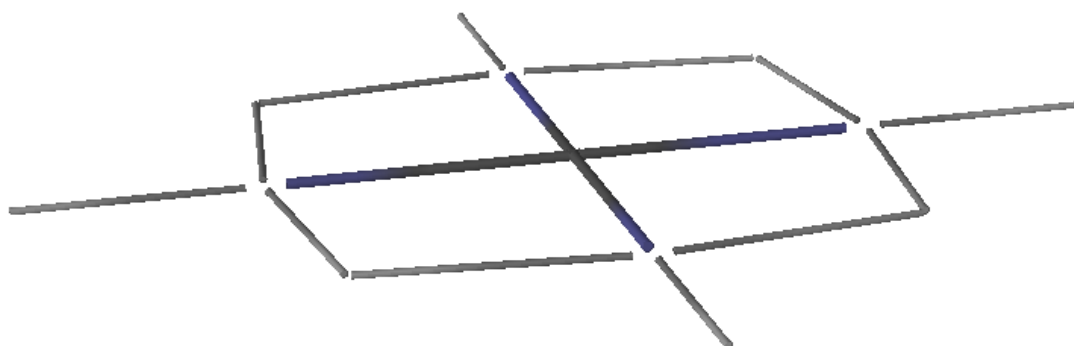


Figura 6.27 – UC massimi elementi orizzontali a sezione tubolare

### Elementi diagonali a sezione tubolare

La Tabella 6.22 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.28.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK	CRITICAL MEMBER	LOAD CONDITION	MAX. UNITY CHECK
DV2	0100-0067	SISM	0.25	0100-0067	SISM	0.25
DV3	0001-0165	SISM	0.41	0001-0165	SISM	0.41

Tabella 6.22 – UC massimi elementi diagonali a sezione tubolare

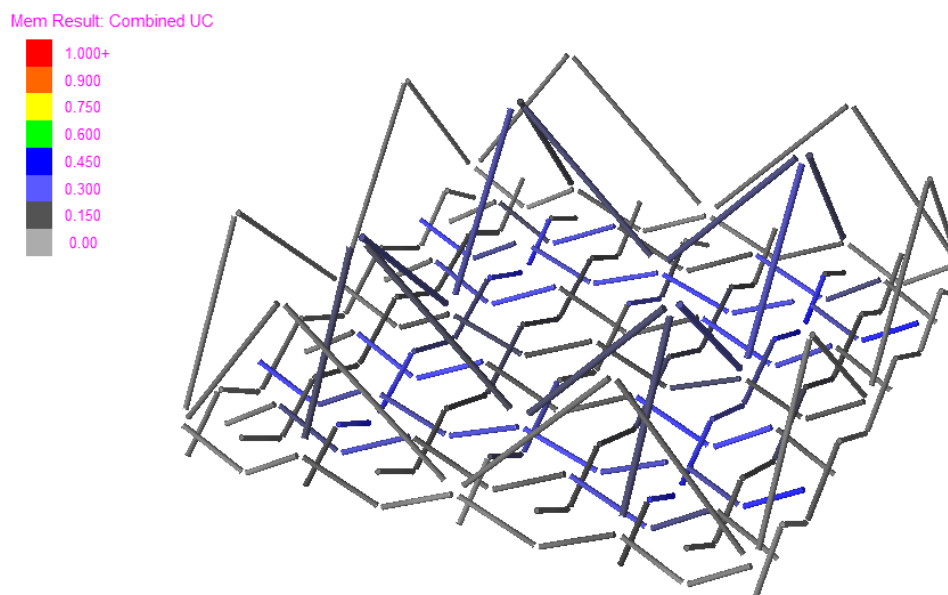


Figura 6.28 – UC massimi elementi diagonali a sezione tubolare

#### 6.2.2.1.4 J-tube e supporti

##### Supporti J-tube

La Tabella 6.23 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.29.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	MEMBRO CRITICO	COMBINAZIONE DI CARICO	MAX. UNITY CHECK	MEMBRO CRITICO	COMBINAZIONE DI CARICO	MAX. UNITY CHECK
SPV	2446-0200	SISM	0.76	2446-0200	SISM	0.76
SPO	B02L-2446	SISM	0.82	B02L-2446	SISM	0.82

Tabella 6.23 – UC massimi supporti j-tube

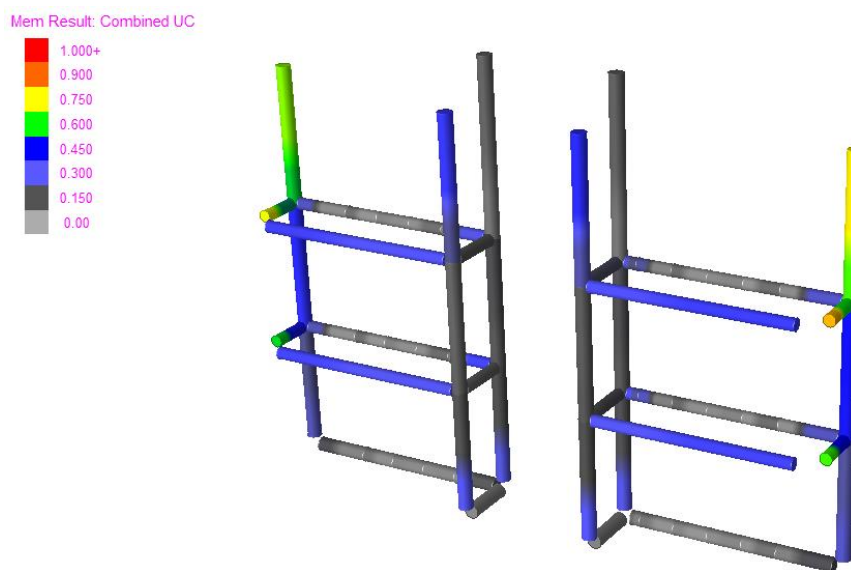


Figura 6.29 – UC massimi supporti j-tube

J-tube

La Tabella 6.24 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.).

I grafici delle U.C. sono riportati in Figura 6.30.

GRUPPO ID	TERRENO ARGILLOSO			TERRENO SABBIOSO		
	MEMBRO CRITICO	COMBINAZIONE DI CARICO	MAX. UNITY CHECK	MEMBRO CRITICO	COMBINAZIONE DI CARICO	MAX. UNITY CHECK
CN1	2064-1336	SISM	0.15	2064-1336	SISM	0.15
CN2	2085-1012	SISM	0.11	2085-1012	SISM	0.11
S-J	2040-2063	SISM	0.23	2040-2063	SISM	0.23

Tabella 6.24 – UC massimi j-tube

Mem Result: Combined UC

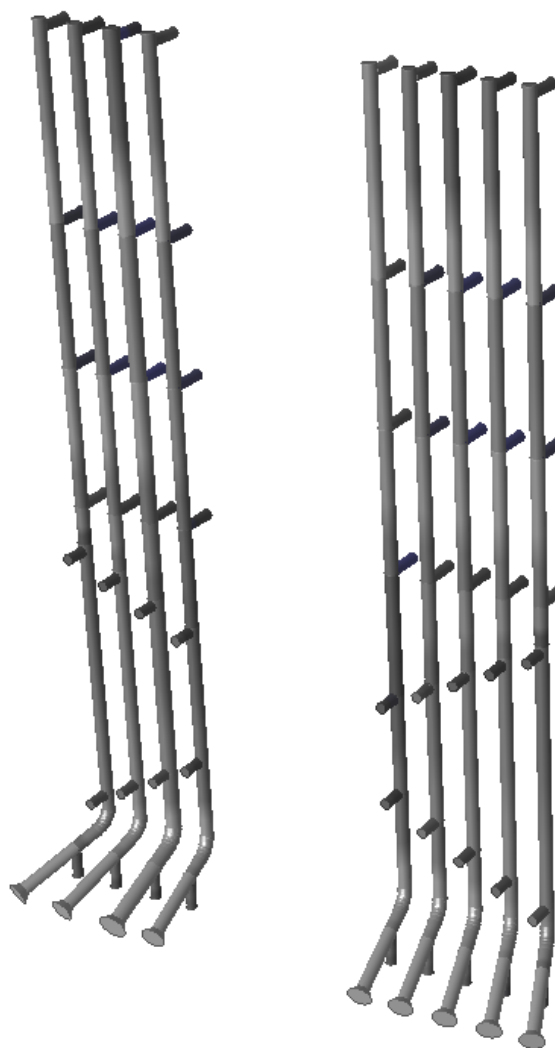


Figura 6.30 – UC massimi j-tube

### 6.2.3 Verifica geotecnica

La Tabella 6.25 e Tabella 6.26 riassume i principali risultati dell'analisi in termini di Unity Check (U.C.) relativi alla capacità assiale del terreno rispettivamente di terreni argillosi e sabbiosi.

\*\*\* SOIL MAXIMUM AXIAL CAPACITY SUMMARY \*\*\*

PILE GRP	***** PILE *****	***** COMPRESSION *****	***** TENSION *****
JT	PILEHEAD WEIGHT PEN. CAPACITY MAX. CRITICAL CONDITION	CAPACITY MAX. CRITICAL CONDITION	*MAXIMUM*
	O.D. THK. (INCL. WT) LOAD <u>LOAD</u> <u>LOAD</u> SAFETY (INCL. WT) LOAD <u>LOAD</u> <u>LOAD</u> SAFETY	UNITY LOAD	
	CM <u>CM</u> KN M KN <u>KN</u> <u>KN</u> CASE FACTOR KN <u>KN</u> <u>KN</u> CASE FACTOR CHECK CASE		
091P PL1	167.50 4.40 1390.2 80.0 -39442.1 -25263.4 -25263.4 U-NE 1.56 41232.0 0.0 0.0 CV 100.00 0.83 U-NE		
092P PL1	167.50 4.40 1390.2 80.0 -39442.1 -27583.7 -27583.7 U-NW 1.43 41232.0 0.0 0.0 CV 100.00 0.91 U-NW		
093P PL1	167.50 4.40 1390.2 80.0 -39442.1 -24019.9 -24019.9 U-SE 1.64 41232.0 0.0 0.0 CV 100.00 0.79 U-SE		
094P PL1	167.50 4.40 1390.2 80.0 -39442.1 -26543.3 -26543.3 U-SW 1.49 41232.0 0.0 0.0 CV 100.00 0.87 U-SW		

Tabella 6.25 – UC massimi capacità assiale terreno argilloso

\*\*\* SOIL MAXIMUM AXIAL CAPACITY SUMMARY \*\*\*

PILE GRP	***** PILE *****	***** COMPRESSION *****	***** TENSION *****
JT	PILEHEAD WEIGHT PEN. CAPACITY MAX. CRITICAL CONDITION	CAPACITY MAX. CRITICAL CONDITION	*MAXIMUM*
	O.D. THK. (INCL. WT) LOAD <u>LOAD</u> <u>LOAD</u> SAFETY (INCL. WT) LOAD <u>LOAD</u> <u>LOAD</u> SAFETY	UNITY LOAD	
	CM <u>CM</u> KN M KN <u>KN</u> <u>KN</u> CASE FACTOR KN <u>KN</u> <u>KN</u> CASE FACTOR CHECK CASE		
091P PL1	167.50 4.40 1390.2 80.0 -54488.6 -25201.0 -25201.0 U-NE 2.16 36163.8 0.0 0.0 CV 100.00 0.60 U-NE		
092P PL1	167.50 4.40 1390.2 80.0 -54488.6 -27475.3 -27475.3 U-NW 1.98 36163.8 0.0 0.0 CV 100.00 0.66 U-NW		
093P PL1	167.50 4.40 1390.2 80.0 -54488.6 -23975.5 -23975.5 U-SE 2.27 36163.8 0.0 0.0 CV 100.00 0.57 U-SE		
094P PL1	167.50 4.40 1390.2 80.0 -54488.6 -26467.4 -26467.4 U-SW 2.06 36163.8 0.0 0.0 CV 100.00 0.63 U-SW		

Tabella 6.26 – UC massimi capacità assiale terreno sabbioso

### 6.3 Protezione da Scouring

Di seguito sono riportati i risultati del dimensionamento della protezione contro il fenomeno dell'erosione, tenendo conto della Figura 6.31, vengono suddivisi in Tabella 6.27 e Tabella 6.28, che rispettivamente riportano i dati della protezione attorno ai monopali delle turbine ed ai monopali della piattaforma.

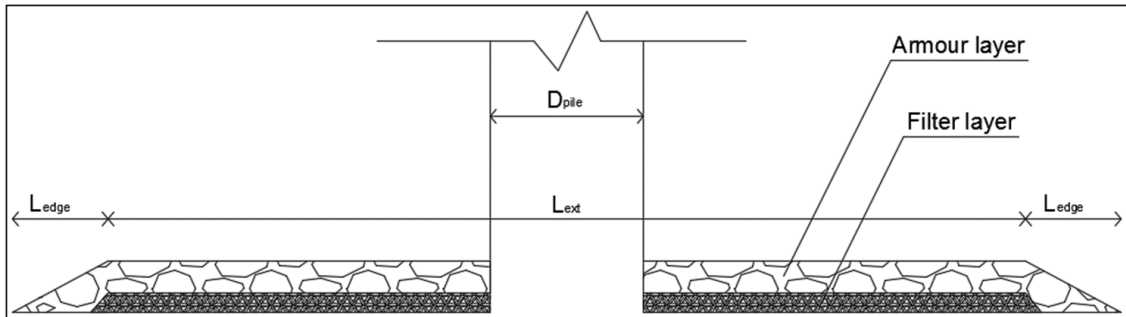


Figura 6.31 – Scour Protection Data

Dati	[m]	Descrizione
D <sub>50</sub>	0.34	Diametro grani strato Armour
D <sub>50_filt</sub>	0.17	Diametro grani strato Filter
L <sub>ext</sub>	44	Estensione della protezione
L <sub>edge</sub>	2.55	Estensione dell'angolo di protezione
S <sub>armo</sub>	0.85	Altezza strato Armour
S <sub>filt</sub>	0.5	Altezza strato Filter

Tabella 6.27 – Protezione Scouring Turbine.

Dati	[m]	Descrizione
D <sub>50</sub>	0.5	Diametro grani strato Armour
D <sub>50_filt</sub>	0.25	Diametro grani strato Filter
L <sub>ext</sub>	11	Estensione della protezione
L <sub>edge</sub>	4	Estensione dell'angolo di protezione
S <sub>armo</sub>	0.85	Altezza strato Armour
S <sub>filt</sub>	0.5	Altezza strato Filter

Tabella 6.28 – Protezione Scouring Piattaforma

## 6.4 Battitura Pali

In questa sezione vengono riportati i risultati relativamente alla "pile drivability" ovvero la possibilità di un palo, sotto determinate condizioni, di essere battuto o infisso su un terreno tramite dei martelli idraulici o a vibrazione. Il programma utilizzato è il GRLWEAP.

### 6.4.1 Aerogeneratore -Risultati in Terreno non drenante (argilloso)

Dati di input principali:

SOIL PROFILE						
Depth m	Soil Type -	Spec. Wt kN/m <sup>3</sup>	Su kPa	Phi °	Unit Rs kPa	Unit Rt kPa
0.0	Clay	18.3	68.7	17.9	44.67	617.85
8.0	Clay	18.3	68.7	17.9	44.67	617.85
8.0	Clay	18.8	78.5	17.9	50.05	706.05
15.0	Clay	18.8	78.5	17.9	50.05	706.05
15.0	Clay	21.7	157.0	17.9	34.70	1,413.00
60.0	Clay	21.7	157.0	17.9	34.70	1,413.00

PILE INPUT			
Uniform Pile		Pile Type:	Unknown
Pile Length: (m)	96.000	Pile Penetration: (m)	48.000
Pile Size: (m)	7.50	Toe Area: (cm <sup>2</sup> )	441,786.47

Pile Profile					
Lb Top m	X-Area cm <sup>2</sup>	E-Modulus MPa	Spec. Wt kN/m <sup>3</sup>	Perim. m	Crit. Index -
0.0	19,100.0	206,842.7	77.3	23.6	0
96.0	19,100.0	206,842.7	77.3	23.6	0

HAMMER INPUT			
ID	280	Made By:	MENCK
Model	MHU 2100	Type:	ECH

Hammer Data						
ID	Ram Wt kN	Ram L. mm	Ram Ar. cm <sup>2</sup>	Rtd. Stk m	Effic. -	Rtd. Energy kJ
280	1143.978	7750.0	19532.3	1.8	0.95	2099.2

DRIVE SYSTEM FOR MENCK MHU 2100-ECH						
Type	X-Area cm <sup>2</sup>	E-Modulus MPa	Thickness mm	COR	Round-out mm	Stiffness kN/mm
Hammer C.	0.000	0.000	0.000	0.000	3.048	0.000
Helmet Wt.	1789.790	kN				

Figura 6.32 – Dati principali di input per il calcolo



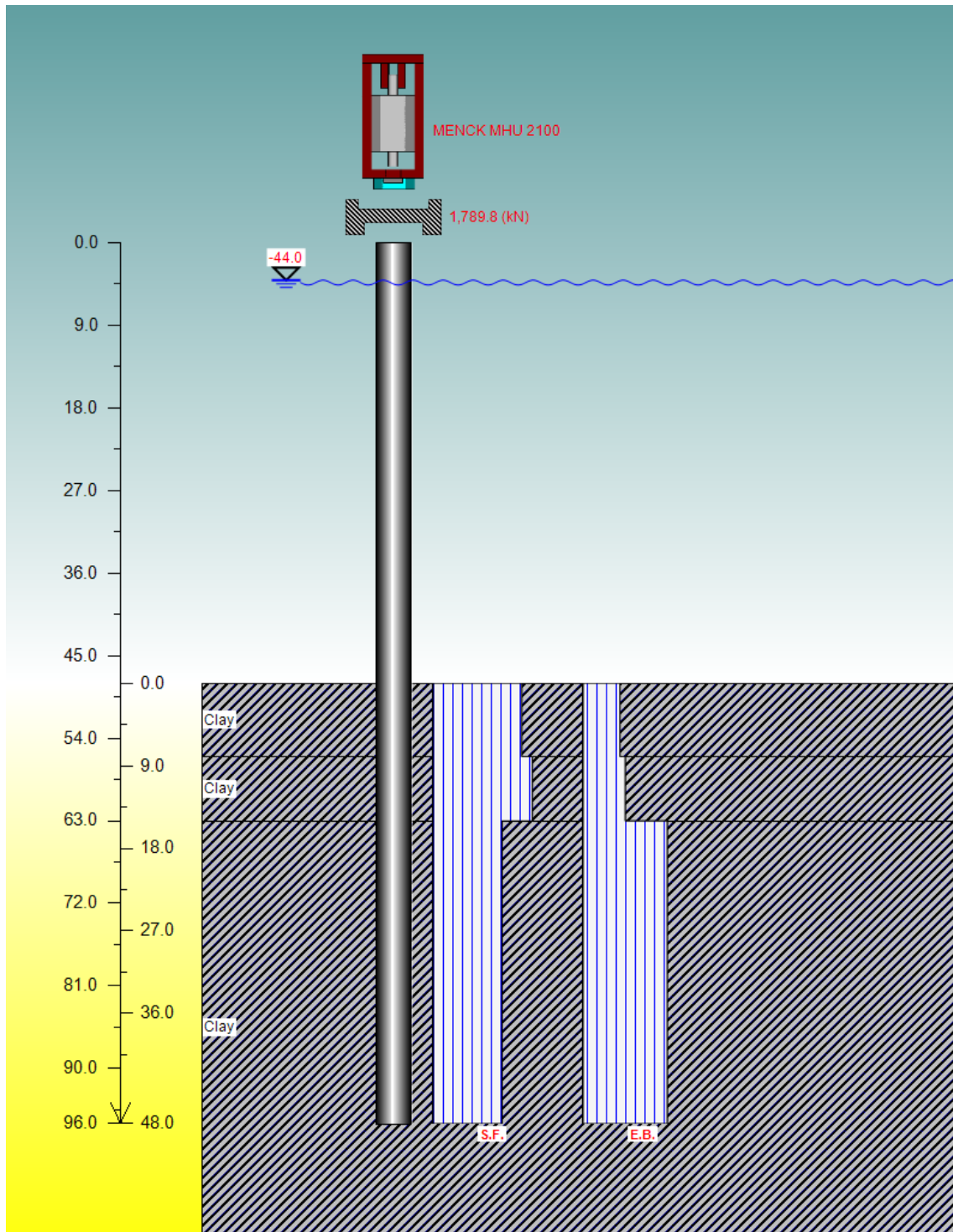


Figura 6.33 – Rappresentazione del palo

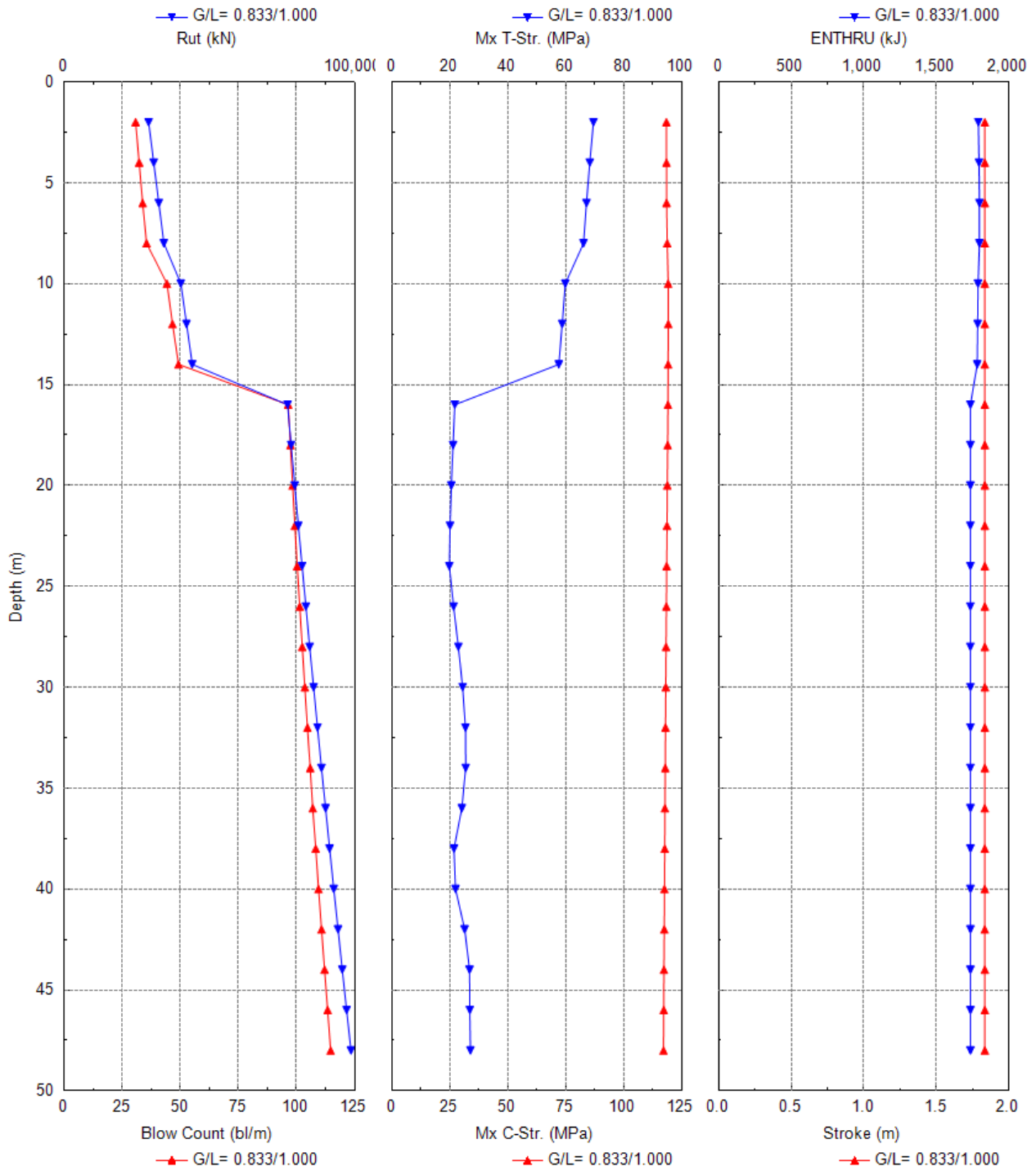


Figura 6.34 – Conteggio dei colpi ed energia di impatto

Gain/Loss 1 at Shaft and Toe 0.833/1.000

Depth m	Rut kN	Rshaft kN	Rtoe kN	Blow Ct bl/m	Mx C-Str. MPa	Mx T-Str. MPa	Stroke m	ENTHRU kJ	Hammer -
2.0	29,034.5	1,738.8	27,295.8	30.7	118.45	69.58	1.83	1,789.8	MHU 2100
4.0	30,782.5	3,486.8	27,295.8	32.2	118.46	68.35	1.83	1,794.8	MHU 2100
6.0	32,539.8	5,244.0	27,295.8	33.7	118.51	67.19	1.83	1,798.0	MHU 2100
8.0	34,306.2	7,010.5	27,295.8	35.4	118.77	66.19	1.83	1,798.0	MHU 2100
10.0	40,154.3	8,962.0	31,192.3	44.2	119.19	59.89	1.83	1,788.2	MHU 2100
12.0	42,115.4	10,923.1	31,192.3	46.6	119.27	58.82	1.83	1,785.7	MHU 2100
14.0	44,086.2	12,893.9	31,192.3	49.2	119.17	57.67	1.83	1,782.6	MHU 2100
16.0	76,913.0	14,488.6	62,424.4	96.4	119.09	21.83	1.83	1,735.8	MHU 2100
18.0	78,138.5	15,714.1	62,424.4	97.4	118.97	21.22	1.83	1,735.8	MHU 2100
20.0	79,382.8	16,958.3	62,424.4	98.3	118.81	20.62	1.83	1,735.8	MHU 2100
22.0	80,645.8	18,221.4	62,424.4	99.3	118.70	20.17	1.83	1,735.8	MHU 2100
24.0	81,927.5	19,503.1	62,424.4	100.3	118.55	19.94	1.83	1,735.8	MHU 2100
26.0	83,228.1	20,803.7	62,424.4	101.4	118.44	21.39	1.83	1,735.8	MHU 2100
28.0	84,547.4	22,123.0	62,424.4	102.5	118.30	23.04	1.83	1,735.8	MHU 2100
30.0	85,885.4	23,461.0	62,424.4	103.6	118.19	24.51	1.83	1,735.8	MHU 2100
32.0	87,242.3	24,817.8	62,424.4	104.7	118.05	25.48	1.83	1,735.8	MHU 2100
34.0	88,617.8	26,193.4	62,424.4	105.9	117.95	25.57	1.83	1,735.8	MHU 2100
36.0	90,012.2	27,587.8	62,424.4	107.0	117.82	24.24	1.83	1,735.8	MHU 2100
38.0	91,425.3	29,000.9	62,424.4	108.3	117.72	21.53	1.83	1,735.8	MHU 2100
40.0	92,857.2	30,432.8	62,424.4	109.5	117.60	22.06	1.83	1,735.8	MHU 2100
42.0	94,307.8	31,883.4	62,424.4	110.8	117.50	25.23	1.83	1,735.8	MHU 2100
44.0	95,777.2	33,352.8	62,424.4	112.1	117.39	26.90	1.83	1,735.8	MHU 2100
46.0	97,265.4	34,841.0	62,424.4	113.4	117.29	26.96	1.83	1,735.8	MHU 2100
48.0	98,772.3	36,347.9	62,424.4	114.7	117.19	27.19	1.83	1,735.8	MHU 2100

Total Number of Blows: 3969 (starting at penetration 2.0 m)

Driving Time(min): 132 99 79 66 56 49 44 39 36 33  
 @Blow Rate: 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120

Driving Time for continuously running hammer; any wait time not included.

Figura 6.35 – Conteggio dei colpi tempo di battitura

Dai risultati sopra riportati si evince che , con il martello scelto (2100 kJ) e considerando le caratteristiche geotecniche sopra riportate, sia possibile infiggere il palo in meno di 2 ore e lo stress del palo è accettabile.

## 6.4.2 Aerogeneratore - Risultati in Terreno drenante (sabbioso)

Dati di input principali:

## SOIL PROFILE

Depth m	Soil Type -	Spec. Wt kN/m <sup>3</sup>	Su kPa	Phi °	Unit Rs kPa	Unit Rt kPa
0.0	Sand	10.0	0.0	23.0	0.00	0.00
8.0	Sand	10.0	0.0	23.0	0.46	7.46
8.0	Sand	19.0	0.0	25.0	0.71	11.15
15.0	Sand	19.0	0.0	25.0	30.71	483.09
15.0	Sand	19.0	0.0	30.0	38.02	1,320.95
60.0	Sand	19.0	0.0	30.0	250.00	9,616.74

## PILE INPUT

Uniform Pile		Pile Type:	Unknown
Pile Length: (m)	96.000	Pile Penetration: (m)	48.000
Pile Size: (m)	7.50	Toe Area: (cm <sup>2</sup> )	441,786.47

## Pile Profile

Lb Top m	X-Area cm <sup>2</sup>	E-Modulus MPa	Spec. Wt kN/m <sup>3</sup>	Perim. m	Crit. Index -
0.0	19,100.0	206,842.7	77.3	23.6	0
96.0	19,100.0	206,842.7	77.3	23.6	0

## HAMMER INPUT

ID	1374	Made By:	IHC
Model	S-5500	Type:	ECH

## Hammer Data

ID	Ram Wt kN	Ram L. mm	Ram Ar. cm <sup>2</sup>	Rtd. Stk m	Effic. -	Rtd. Energy kJ
1374	2715.783	17600.0	10083.5	2.0	0.95	5499.5

## DRIVE SYSTEM FOR IHC S-5500-ECH

Type	X-Area cm <sup>2</sup>	E-Modulus MPa	Thickness mm	COR	Round-out mm	Stiffness kN/mm
Hammer C.	0.000	0.000	0.000	0.000	3.048	0.000
Helmet Wt.	1789.790	kN				

Figura 6.36 – Dati principali di input per il calcolo

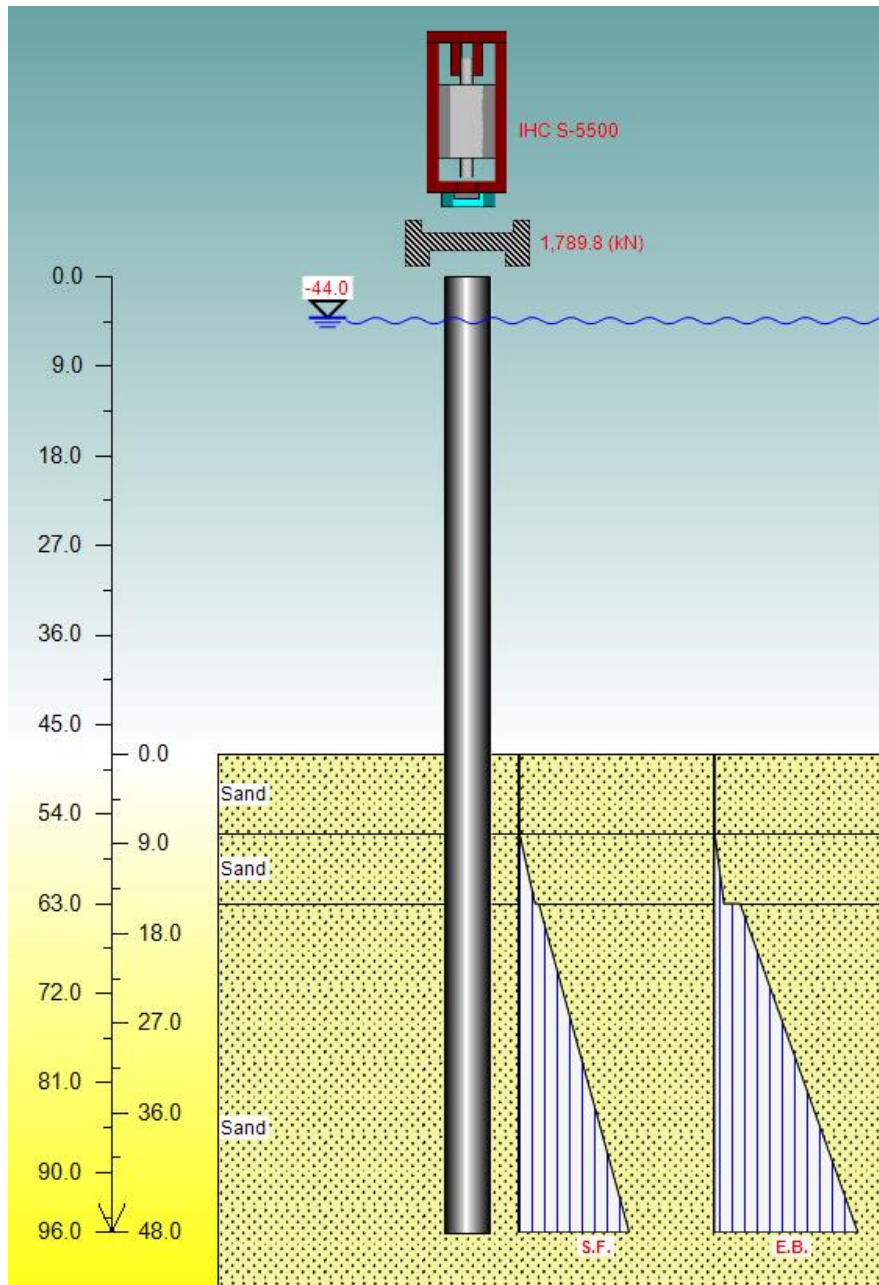


Figura 6.37 – Rappresentazione del palo

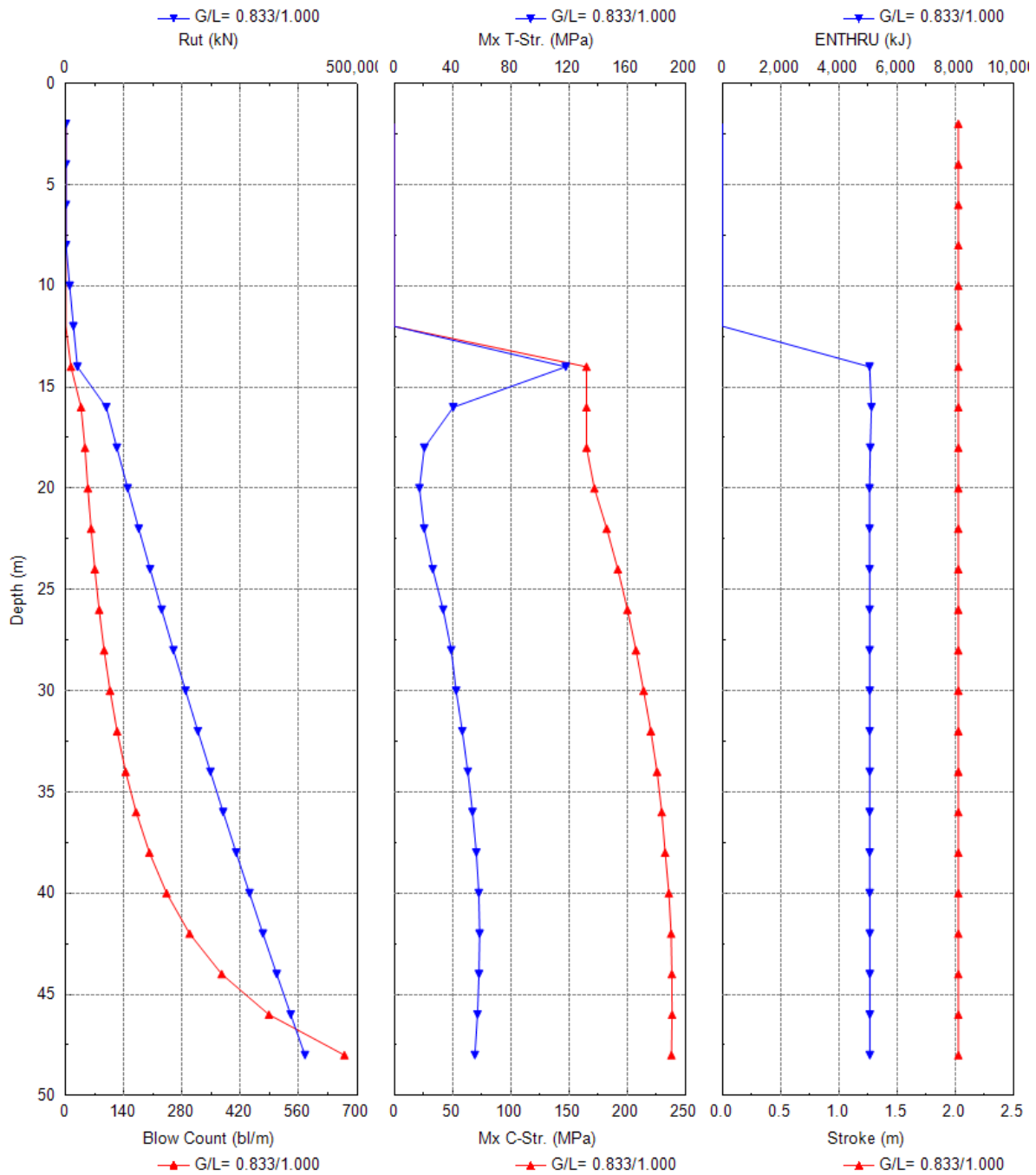


Figura 6.38 – Conteggio dei colpi ed energia di impatto

Gain/Loss 1 at Shaft and Toe 0.833/1.000

Depth m	Rut kN	Rshaft kN	Rtoe kN	Blow Ct bl/m	Mx C-Str. MPa	Mx T-Str. MPa	Stroke m	ENTHRU kJ	Hammer -
2.0	84.6	2.3	82.4	0.0	0.00	0.00	2.03	0.0	S-5500
4.0	173.8	9.1	164.7	0.0	0.00	0.00	2.03	0.0	S-5500
6.0	267.6	20.5	247.1	0.0	0.00	0.00	2.03	0.0	S-5500
8.0	365.9	36.4	329.4	0.0	0.00	0.00	2.03	0.0	S-5500
10.0	6,682.1	232.3	6,449.7	0.0	0.00	0.00	2.03	0.0	S-5500
12.0	13,171.3	764.6	12,406.8	0.0	0.00	0.00	2.03	0.0	S-5500
14.0	19,996.9	1,633.0	18,363.9	12.4	165.14	117.93	2.03	5,051.4	S-5500
16.0	69,493.3	2,991.2	66,502.1	36.7	165.14	40.63	2.03	5,115.7	S-5500
18.0	87,690.0	4,899.2	82,790.8	46.2	165.22	20.74	2.03	5,076.3	S-5500
20.0	106,303.1	7,223.5	99,079.6	53.1	171.89	17.37	2.03	5,050.1	S-5500
22.0	125,332.5	9,964.2	115,368.3	60.9	182.51	20.60	2.03	5,051.8	S-5500
24.0	144,778.3	13,121.2	131,657.1	69.8	192.02	26.50	2.03	5,052.1	S-5500
26.0	164,640.4	16,694.5	147,945.9	80.1	200.37	33.68	2.03	5,054.4	S-5500
28.0	184,918.8	20,684.2	164,234.6	92.1	207.64	39.21	2.03	5,054.6	S-5500
30.0	205,613.6	25,090.2	180,523.4	106.3	214.18	42.58	2.03	5,056.1	S-5500
32.0	226,724.7	29,912.6	196,812.1	123.3	220.42	46.82	2.03	5,055.6	S-5500
34.0	248,252.2	35,151.3	213,100.9	143.8	225.70	50.58	2.03	5,057.1	S-5500
36.0	270,196.0	40,806.4	229,389.6	169.1	229.76	53.84	2.03	5,056.9	S-5500
38.0	292,556.2	46,877.8	245,678.4	201.0	232.70	56.47	2.03	5,057.6	S-5500
40.0	315,332.7	53,365.5	261,967.2	242.3	235.89	58.17	2.03	5,058.3	S-5500
42.0	338,525.5	60,269.6	278,255.9	297.5	237.83	58.71	2.03	5,058.9	S-5500
44.0	362,134.7	67,590.0	294,544.7	374.7	238.39	58.24	2.03	5,058.3	S-5500
46.0	386,160.2	75,326.8	310,833.4	488.4	238.57	57.24	2.03	5,058.9	S-5500
48.0	410,602.1	83,479.9	327,122.2	669.7	238.05	55.43	2.03	5,059.4	S-5500

Total Number of Blows: 5865 (starting at penetration 2.0 m)

Driving Time(min): 195 146 117 97 83 73 65 58 53 48

@Blow Rate: 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120

Driving Time for continuously running hammer; any wait time not included.

Figura 6.39 – Conteggio dei colpi tempo di battitura

Dai risultati sopra riportati si evince che , con il martello scelto (5500 kJ) e considerando le caratteristiche geotecniche sopra riportate, sia possibile infiggere il palo in meno di 3 ore e lo stress del palo è accettabile.

### 6.4.3 Palo SET - Risultati in Terreno drenante (sabbioso)

Per le piattaforme SET è stato riportato solamente il caso più gravoso relativamente ai risultati di battitura effettuali per l'aerogeneratore.

Dati di input principali:

SOIL PROFILE						
Depth m	Soil Type -	Spec. Wt kN/m <sup>3</sup>	Su kPa	Phi °	Unit Rs kPa	Unit Rt kPa
0.0	Sand	10.0	0.0	23.0	0.00	0.00
8.0	Sand	10.0	0.0	23.0	0.46	7.46
8.0	Sand	19.0	0.0	25.0	0.71	11.15
15.0	Sand	19.0	0.0	25.0	30.71	483.09
15.0	Sand	19.0	0.0	30.0	35.79	1,320.95
90.0	Sand	19.0	0.0	30.0	250.00	15,147.27

PILE INPUT			
Uniform Pile		Pile Type:	Pipe
Pile Length: (m)	104.000	Pile Penetration: (m)	80.000
Pile Size: (m)	1.68	Toe Area: (cm <sup>2</sup> )	22,035.33

Pile Profile					
Lb Top m	X-Area cm <sup>2</sup>	E-Modulus MPa	Spec. Wt kN/m <sup>3</sup>	Perim. m	Crit. Index -
0.0	2,254.5	206,842.7	77.3	5.3	0
104.0	2,254.5	206,842.7	77.3	5.3	0

HAMMER INPUT			
ID	1374	Made By:	IHC
Model	S-5500	Type:	ECH

Hammer Data						
ID	Ram Wt kN	Ram L. mm	Ram Ar. cm <sup>2</sup>	Rtd. Stk m	Effic. -	Rtd. Energy kJ
1374	2715.783	17600.0	10083.5	2.0	0.95	5499.5

DRIVE SYSTEM FOR IHC S-5500-ECH						
Type -	X-Area cm <sup>2</sup>	E-Modulus MPa	Thickness mm	COR -	Round-out mm	Stiffness kN/mm
Hammer C.	0.000	0.000	0.000	0.800	3.048	0.000
Helmet Wt.	4.613	kN				

Figura 6.40 – Dati principali di input per il calcolo



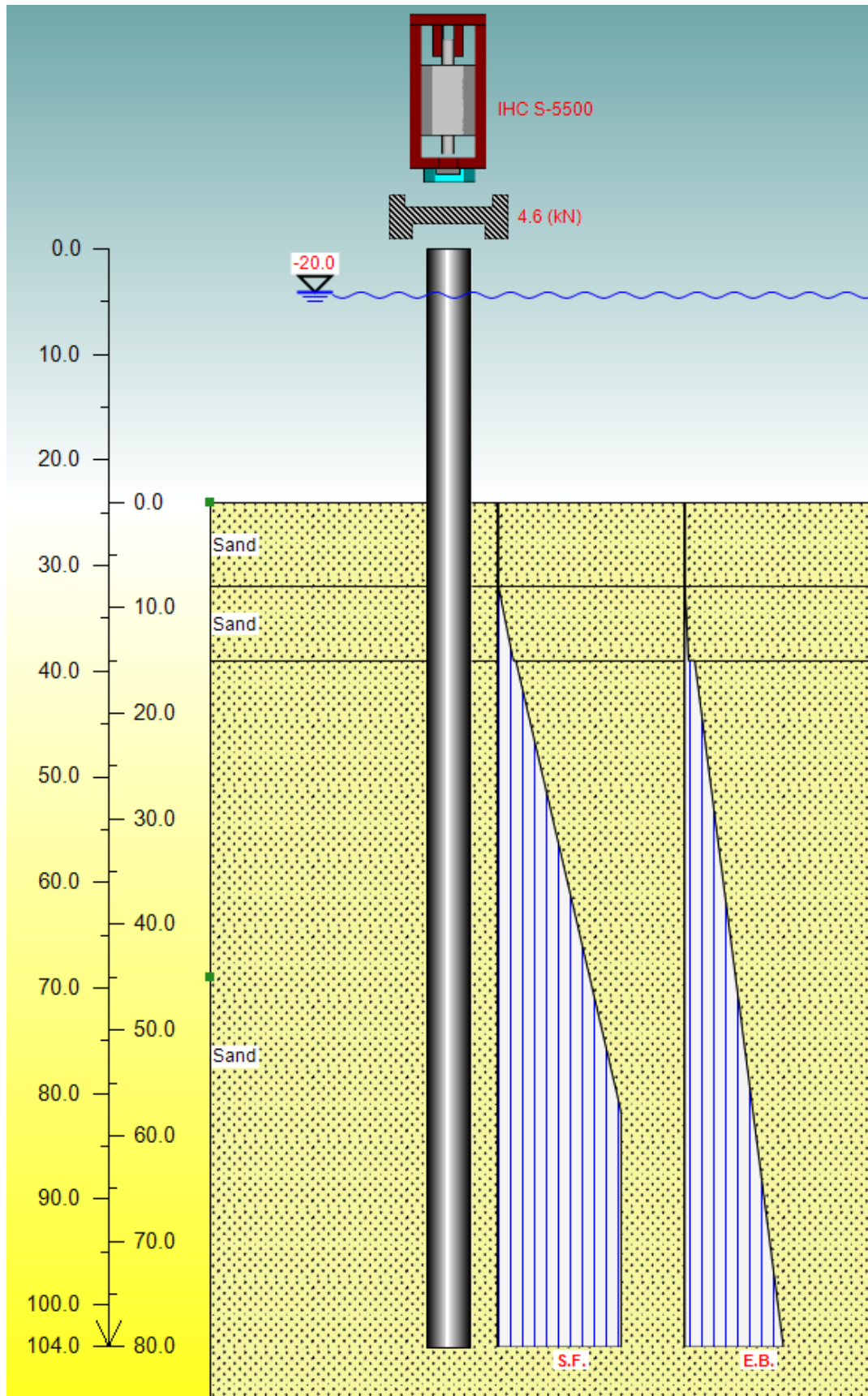


Figura 6.41 – Rappresentazione del palo

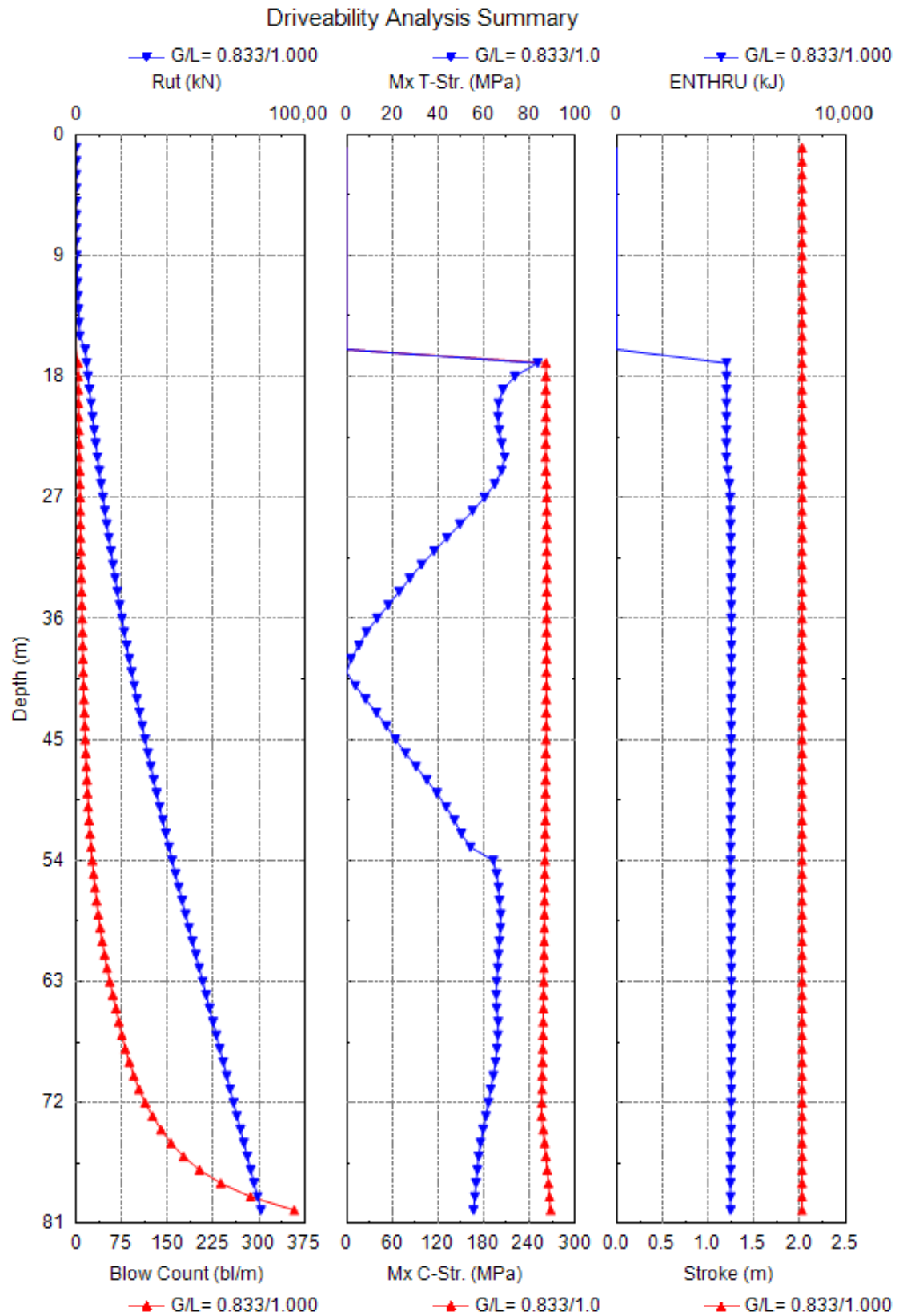


Figura 6.42 – Conteggio dei colpi ed energia di impatto

Depth m	Rut kN	Rshaft kN	Rtoe kN	Blow Ct bl/m	Mx C-Str. MPa	Mx T-Str. MPa	Stroke m	ENTHRU kJ	Hammer -
50.0	36,522.4	19,393.8	17,128.6	19.8	261.24	43.63	2.03	4,985.9	S-5500
51.0	37,862.9	20,328.1	17,534.8	21.2	261.08	47.11	2.03	4,982.8	S-5500
52.0	39,225.3	21,284.2	17,941.0	22.7	260.93	50.18	2.03	4,979.4	S-5500
53.0	40,609.5	22,262.3	18,347.2	24.4	260.78	54.16	2.03	4,976.0	S-5500
54.0	42,015.7	23,262.2	18,753.5	26.3	260.60	64.22	2.03	4,973.3	S-5500
55.0	43,443.8	24,284.1	19,159.7	28.5	260.43	65.61	2.03	4,979.1	S-5500
56.0	44,893.7	25,327.8	19,565.9	30.8	260.26	66.47	2.03	4,984.4	S-5500
57.0	46,365.6	26,393.5	19,972.1	33.4	260.06	66.91	2.03	4,989.2	S-5500
58.0	47,858.7	27,480.4	20,378.4	36.2	259.87	67.45	2.03	4,993.4	S-5500
59.0	49,360.8	28,576.2	20,784.6	39.4	259.67	67.34	2.03	4,997.2	S-5500
60.0	50,862.9	29,672.0	21,190.8	42.8	259.47	66.88	2.03	5,000.5	S-5500
61.0	52,364.9	30,767.9	21,597.0	46.6	259.25	66.42	2.03	5,003.2	S-5500
62.0	53,867.0	31,863.7	22,003.3	50.7	259.04	66.17	2.03	5,005.4	S-5500
63.0	55,369.1	32,959.6	22,409.5	55.3	258.81	65.63	2.03	5,007.2	S-5500
64.0	56,871.1	34,055.4	22,815.7	60.2	258.57	65.48	2.03	5,008.4	S-5500
65.0	58,373.2	35,151.3	23,221.9	65.5	258.34	65.68	2.03	5,009.1	S-5500
66.0	59,875.3	36,247.1	23,628.1	70.0	258.08	66.28	2.03	5,009.3	S-5500
67.0	61,377.3	37,343.0	24,034.4	75.1	257.82	66.18	2.03	5,009.0	S-5500
68.0	62,879.4	38,438.8	24,440.6	80.8	257.55	65.76	2.03	5,008.1	S-5500
69.0	64,381.5	39,534.7	24,846.8	87.3	257.25	65.16	2.03	5,006.8	S-5500
70.0	65,883.6	40,630.5	25,253.0	94.7	256.97	64.24	2.03	5,004.9	S-5500
71.0	67,385.6	41,726.4	25,659.3	103.3	256.66	63.02	2.03	5,002.5	S-5500
72.0	68,887.7	42,822.2	26,065.5	113.4	256.34	62.07	2.03	4,999.6	S-5500
73.0	70,389.8	43,918.1	26,471.7	125.3	256.24	60.92	2.03	4,996.2	S-5500
74.0	71,891.8	45,013.9	26,877.9	139.1	258.26	59.73	2.03	4,992.3	S-5500
75.0	73,393.9	46,109.7	27,284.2	155.5	260.06	58.64	2.03	4,987.9	S-5500
76.0	74,896.0	47,205.6	27,690.4	176.1	261.74	57.77	2.03	4,983.0	S-5500
77.0	76,398.0	48,301.4	28,096.6	202.4	263.40	57.21	2.03	4,977.8	S-5500
78.0	77,900.1	49,397.3	28,502.8	237.4	264.96	56.63	2.03	4,973.3	S-5500
79.0	79,402.2	50,493.1	28,909.1	286.1	266.40	56.14	2.03	4,972.6	S-5500
80.0	80,904.3	51,589.0	29,315.3	357.9	267.92	55.55	2.03	4,972.1	S-5500

Total Number of Blows: 3032 (starting at penetration 1.0 m)

Driving Time(min): 101 75 60 50 43 37 33 30 27 25  
@Blow Rate: 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120

Driving Time for continuously running hammer; any wait time not included.

Figura 6.43 – Conteggio dei colpi ed energia di impatto

Dai risultati sopra riportati si evince che , con il martello scelto (5500 kJ) e considerando le caratteristiche geotecniche sopra riportate, sia possibile infiggere il palo in meno di 3 ore e lo stress del palo è accettabile.

## 7 CONCLUSIONI

Sulla base dei risultati delle analisi presentate nei paragrafi precedenti, si possono evidenziare le seguenti conclusioni, rispettivamente per gli aerogeneratori e per la piattaforma della sottostazione elettrica.

Le analisi svolte dovranno essere rieseguite/confermate nella fase esecutiva utilizzando dati geotecnici più dettagliati a causa di nessun rilievo geologico-geotecnico eseguito in situ.

### 7.1 Fondazione monopalo aerogeneratore

L'impianto sarà costituito da 51 aerogeneratori. Per questi aerogeneratori è stata prevista la fondazione su monopalo in acciaio con le seguenti dimensioni caratteristiche.

ITEM	OD [m]	WT [mm]	Total Length [m]
Palo di fondazione	7.5	82	66 (WDmin 14m) 96 (WDmax 44m)

Tabella 7.1 – Palo di fondazione

Il palo di fondazione verrà collegato alla torre sovrastante per mezzo di un elemento di transizione di lunghezza complessiva pari a 23m. Il livello superiore dell'elemento di transizione si troverà ad una quota di 15m di altezza sul livello del mare.

Dai risultati delle analisi svolte emerge che la turbina e il relativo monopalo sono in grado di sostenere in sicurezza i carichi applicati (sia in condizioni statiche che sismiche). Di seguito sono riportati i massimi valori di Unity Check per la turbina.

Descrizione	UC massimi
Torre turbina	0.400
Elemento di transizione	0.370
Palo di fondazione (parte al di sopra del fondale marino)	0.550
Palo di fondazione (parte infissa nel suolo)	0.575
Portanza suolo	0.470

Tabella 7.2 – UC massimi

I pali risultano essere installabili dal punto di vista della battitura con un martello pari a 5500 kJ in un tempo inferiore alle 3 h.

## 7.2 Piattaforma

La sottostazione elettrica sarà costituita da due sistemi strutturali preassemblati a terra e trasportati in situ:

- Telaio strutturale di irrigidimento (jacket)
- Topside

La fondazione prevista sono quattro pali (battuti all'interno delle gambe del jacket) in acciaio con le seguenti dimensioni caratteristiche.

ITEM	OD [m]	WT [mm]	Total Length [m]
Pali di fondazione	1.675	44	80

Tabella 7.3 – Palo di fondazione

La procedura costruttiva della sottostazione elettrica prevede tre fasi con le relative analisi:

1. Analisi di trasporto
2. Analisi di sollevamento
3. Analisi in opera statica e sismica

Nel presente elaborato sono riportate le analisi in opera statiche e sismiche. Dai risultati delle analisi svolte emerge che la struttura è in grado di sostenere in sicurezza i carichi applicati sia in condizioni statiche che sismiche.

I pali risultano essere installabili dal punto di vista della battitura con un martello pari a 5500 kJ in un tempo inferiore alle 3 h.

## 8 RIFERIMENTI

/A1/ 20201110085734953 - MySE6.0MW Product Line

/A2/ Annex 2. -Technical Specification of MySE6.45-180

/A3/ Arany et al. "Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps"

/A4/ New European wind atlas NEWA

/A5/ Poulos H, Davis E (1980) Pile foundation analysis and design. Rainbow-Bridge Book Co.

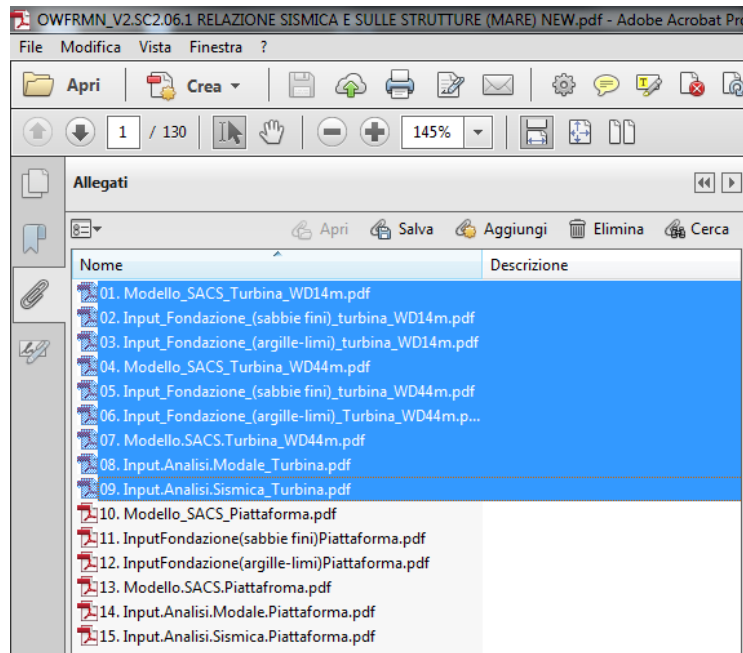
/A6/ OWFRMN\_V2.SC2.03 RELAZIONE GEOLOGICA (TERRA E MARE)

/A7/ OWFRMN\_V2.SC2.04 RELAZIONE GEOTECNICA (TERRA E MARE)

## 9 ALLEGATO A (Fondazione monopalo aerogeneratore)

Di seguito vengono riportati i modelli di calcolo relativamente alla turbina eolica comprensiva di fondazione

Gli allegati si trovano seguendo le istruzioni dell'immagine successiva:



### 9.1 Modelli Analisi statica



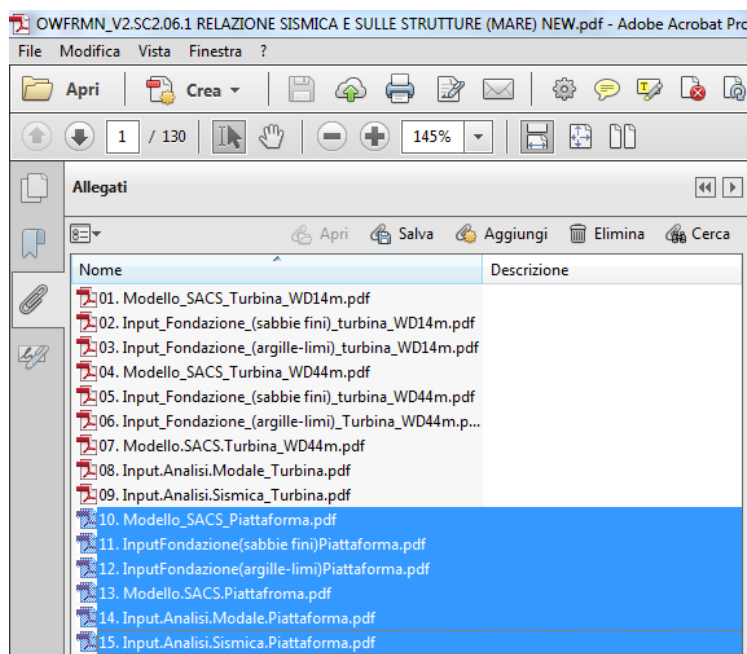
### 9.2 Modelli Analisi dinamica



## 10 ALLEGATO B (Piattaforma)

Di seguito vengono riportati i modelli di calcolo relativamente alla SET comprensiva di fondazione.

Gli allegati si trovano seguendo le istruzioni dell'immagine successiva:



### 10.1 Modelli Analisi statica



### 10.2 Modelli Analisi dinamica

