




2					
1					
0	28/02/2025	Enser N. Albani	F. Marchi	P. Malerba	Emissione Progetto Definitivo
REV.	DATA (DATE)	REDATTO (DRWN)	CONTROL. (CHCK'D)	APPROVATO (APPR'D)	DESCRIZIONE (DESCRIPTION)
FUNZIONE O SERVIZIO (DEPARTMENT)					
INGEGNERIA					
PROGETTAZIONE IMPIANTI ACQUA					
DENOMINAZIONE IMPIANTO O LAVORO (PLANT OR PROJECT DESCRIPTION)					
POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE					
IDENTIFICATIVO IMPIANTO (PLANT IDENTIFIER) H199H101			WBS R.2160.11.04.00090 - T.2160.11.04.00025 - T.2160.11.04.00019		CODICE CUP (CUP CODE)
 enser ENSER SRL www.enser.it www.enser.fr			CODICE DOCUMENTO (CODE) H199H101CX00RS0003		N° COMMESSA (JOB N.) 12400705873 - 12000367716
			ID DOCUMENTO (DOCUMENT ID)		NOME FILE (FILE NAME) -
 GRUPPO HERA HERA S.p.A. Holding Energia Risorse Ambiente Viale Carlo Berti Pichat 2/4 40127 Bologna tel. 051.287.111 fax 051.287.525 www.gruppohera.it		 HERAtech Società del Gruppo Hera HERAtech s.r.l. Viale Carlo Berti Pichat 2/4 40127 Bologna tel. 051.287.111 www.heratech.it		DENOMINAZIONE DOCUMENTO (DOCUMENT DESCRIPTION) RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DELLE OPERE CIVILI	
		SCALA (SCALE) --		N° FOGLIO (SHEET N°) 1	DI (LAST) 69


	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 2	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

INDICE

1	OGGETTO E SCOPO	4
2	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	5
3	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	6
4	MATERIALI.....	7
5	CONDIZIONI GEOTECNICHE E STRATIGRAFICHE	9
5.1	STRATIGRAFIA	9
5.2	CONDIZIONI IDROGEOLOGICHE	10
5.3	CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI TERRENI	10
5.4	PERMEABILITÀ DEI TERRENI.....	11
5.5	SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE	11
6	CRITERI DI DIMENSIONAMENTO E VERIFICA	13
6.1	COMBINAZIONE DELLE AZIONI AGLI STATI LIMITE	13
6.1.1	VERIFICHE DELLE PARATIE	13
6.1.2	VERIFICHE DEI PALI.....	14
6.1.3	VERIFICHE FONDAZIONI SUPERFICIALI	15
6.1.4	VERIFICHE DEI MURI DI SOSTEGNO	16
6.2	VERIFICHE DI RESISTENZA AGLI STATI LIMITE ULTIMI (SLU).....	17
6.3	VERIFICHE DI RESISTENZA AGLI STATI LIMITE DI SALVAGUARDIA DELLA VITA UMANA (SLV).....	21
6.3.1	OPERE INTERRATE SU DIAFRAMMI PERIMETRALI	21
6.3.2	OPERE IN ELEVAZIONE SU PALI DI FONDAZIONE	21
6.3.3	OPERE IN ELEVAZIONE SU FONDAZIONE SUPERFICIALE	21
6.4	VERIFICHE AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)	21
6.4.1	VERIFICA DELLE TENSIONI DI ESERCIZIO.....	21
6.4.2	VERIFICA DI FESSURAZIONE	22
6.5	VERIFICHE IDRAULICHE UPL.....	25
6.6	CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DEI CONNETTORI CONTROFODERA-DIAFRAMMA	25
6.7	DIMENSIONAMENTO DEI CONNETTORI PLATEA-DIAFRAMMA	27
6.8	VERIFICHE GEOTECNICHE DI FONDAZIONI SUPERFICIALI	27
6.8.1	CALCOLO DELLA CAPACITÀ PORTANTE DI PLATEE E PLINTI.....	27
6.8.2	CALCOLO DELLA RESISTENZA ALLO SCORRIMENTO ORIZZONTALE	29
6.9	VERIFICHE GEOTECNICHE DEI PALI DI FONDAZIONE (GEO)	30
6.9.1	CRITERI DI CALCOLO DELLA CAPACITÀ PORTANTE VERTICALE DI PALI TRIVELLATI CON BENTONITE.....	30

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 3	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

6.9.2	CRITERI DI CALCOLO DELLA CAPACITÀ PORTANTE ORIZZONTALE DEI PALI	32
7	METODOLOGIE E SOFTWARE DI CALCOLO	39
7.1	SOFTWARE PER L'ANALISI STRUTTURALE "SAP2000"	40
7.2	SOFTWARE PER L'ANALISI STRUTTURALE "MIDAS GEN"	42
7.3	SOFTWARE PER L'ANALISI STRUTTURALE "PROSAP"	44
7.4	SOFTWARE PER L'ANALISI STRUTTURALE "WINSTRAND"	47
7.5	SOFTWARE PER L'ANALISI DELL'INTERAZIONE TERRENO/STRUTTURA "PAR" (ANALISI DI OPERE FLESSIBILI DI SOSTEGNO DEL TERRENO)	53
7.5.1	DESCRIZIONE DEL METODO DI CALCOLO IMPLEMENTATO NEL SOFTWARE PAR	53
7.5.2	DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI CALCOLO.....	54
7.6	SOFTWARE PER L'ANALISI NON LINEARE DI PALI SOGGETTI A FORZE TRASVERSALI "LPILE"	61
7.7	SOFTWARE DI CALCOLO GEOTECNICO "GEOSTUDIO"	64
7.8	SOFTWARE IMPIEGATI PER LE VERIFICHE STRUTTURALI E GEOTECNICHE	65
8	DETERMINAZIONE DELL'AZIONE SISMICA	66
8.1	PREMESSA.....	66
8.2	PARAMETRI SISMICI	66
8.3	CATEGORIA DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE	67
8.4	FATTORI DI COMPORTAMENTO "q"	67
8.5	COEFFICIENTE DI SMORZAMENTO VISCOSO.....	67
8.6	SPETTRO DI RISPOSTA DELLE ACCELERAZIONI	68

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 4	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

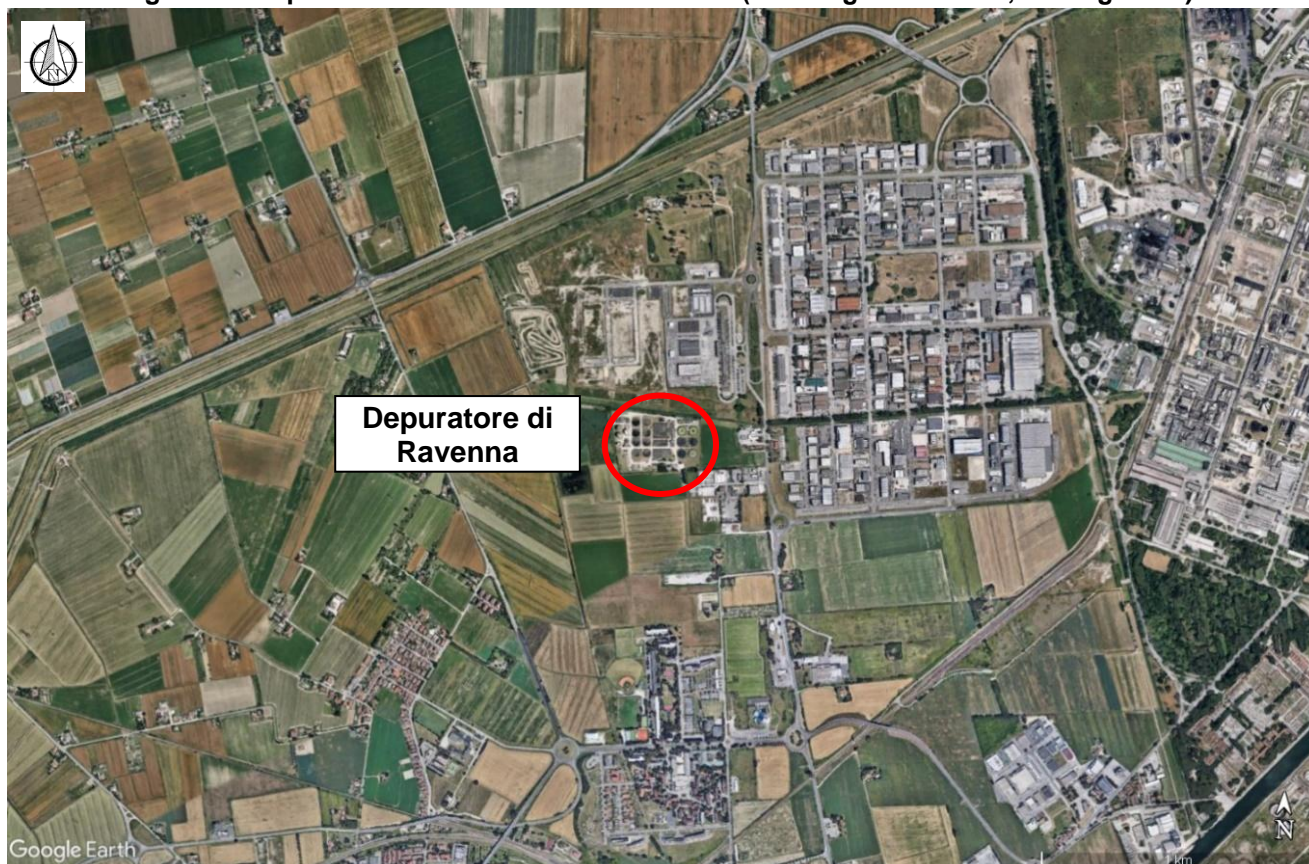
1 OGGETTO E SCOPO

Questa relazione è redatta nell'ambito della fase di progettazione definitiva del 2° stralcio dei lavori di potenziamento e revamping del depuratore di Ravenna (RA), sito in Via Romea Nord, 156/e, nell'area industriale di Ravenna Bassette. In particolare, questa relazione illustra i criteri generali di progettazione delle opere civili previste.

La presente relazione illustra:

- le basi della progettazione, tra cui:
 - i documenti generali di riferimento;
 - le caratteristiche dei materiali strutturali;
 - i parametri geotecnici impiegati;
- la definizione delle azioni;
- i criteri di dimensionamento e verifica delle opere civili (elevazioni, fondazioni superficiali e profonde);
- i criteri di determinazione della portanza delle fondazioni superficiali;
- i criteri di determinazione della portanza dei pali di fondazione;
- la descrizione dei software utilizzati nelle analisi strutturali e di interazione struttura-terreno.

Figura 1 – Inquadramento dell'Area di intervento (da Google Earth Pro, scala grafica)




	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 5	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

2 DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

Gli elaborati progettuali di riferimento sono:

- [Ref. 1] H199H101DG00RG0002 – Relazione geologica;
- [Ref. 2] H199H101CX00RC0001 – Relazione geotecnica;
- [Ref. 3] H199H101CX00RS0001 – Relazione di modellazione sismica;
- [Ref. 4] Elaborati grafici del Progetto Definitivo.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 6	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

3 NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Il riferimento normativo sul quale si basano le analisi e verifiche effettuate è costituito dalle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni:

- [Ref. 5] D.M. 17 Gennaio 2018 "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni";
 [Ref. 6] Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 17 gennaio 2018. Circolare 21 Gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP.

Per quanto non espressamente riportato nelle vigenti NTC si è fatto riferimento a:

- [Ref. 7] UNI EN 1992-1-1:2015 - Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici;
 [Ref. 8] UNI EN 1992-4:2018 - Eurocodice 2 - Progettazione delle strutture di calcestruzzo - Parte 4: Progettazione degli attacchi per utilizzo nel calcestruzzo;
 [Ref. 9] UNI EN 1997-1:2005 – Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali;
 [Ref. 10] UNI EN 206:2016 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità;
 [Ref. 11] UNI 11104:2016 Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità - Specificazioni complementari per l'applicazione della EN 206;
 [Ref. 12] UNI EN 1538:2015 - Esecuzione di lavori geotecnici speciali - Diaframmi.
 [Ref. 13] UNI EN 1998-4:2006: Eurocodice 8 – Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture - Parte 4: Silos, serbatoi e tubazioni;
 [Ref. 14] Indian Standard Seismic Code: IITK-GSDMA:2005 Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks;
 [Ref. 15] NZSEE 2009: Seismic Design of Storage Tanks. Recommendations of a Study Group of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering. 2009;
 [Ref. 16] UNI EN 1993-5:2007 - Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 5: Pali e palancole;
 [Ref. 17] NA to BS EN 1993-5:2007 – Annesso Nazionale del Regno Unito all'Eurocodice 3 Parte 5;
 [Ref. 18] D.M. 14 Gennaio 2008 " Approvazione delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni";
 [Ref. 19] Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008. Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 C.S.LL.PP.

Nei capitoli che seguono saranno opportunamente segnalati tutti gli eventuali riferimenti a testi o articoli di letteratura tecnica.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 7	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

4 MATERIALI

Di seguito sono elencate le prescrizioni sui materiali da costruzione per i vari elementi strutturali.

CALCESTRUZZO MAGRO PER SOTTOFONDAZIONI

(UNI EN 206 - UNI 11104)

Classe di esposizione X0

Classe di resistenza minima C12/15

CALCESTRUZZO DIAFRAMMI DI FONDAZIONE

(UNI EN 206 – UNI 11104 - UNI EN 1538)

Classe di esposizione XC2

Classe di resistenza minima C25/30

Aggregati $D_{upper} = 32 \text{ mm}$ – $D_{lower} = 25 \text{ mm}$

Classe di consistenza minima S4

Rapporto acqua/cemento < 0.60

Min. contenuto in cemento: 375 kg/m^3

CALCESTRUZZO PALI DI FONDAZIONE TRIVELLATI

(UNI EN 206 – UNI 11104 - UNI EN 1536)

Classe di esposizione XC2

Classe di resistenza minima C25/30

Aggregati $D_{upper} = 25 \text{ mm}$ – $D_{lower} = 15 \text{ mm}$

Classe di consistenza minima S4

Rapporto acqua/cemento < 0.60

Min. contenuto in cemento: 375 kg/m^3

CALCESTRUZZO PER ALTRE OPERE

(UNI EN 206 - UNI 11104)

Classe di esposizione XA2 per opere a contatto con i reflui

Classe di esposizione XC4 per opere a contatto con gli agenti atmosferici

Classe di esposizione XC2 per plinti e platee di fondazione (solo facce contro terra)

Classe di esposizione XC2 per opere in elevazione non esposte ad agenti atmosferici

Classe di resistenza minima C32/40

Classe di consistenza S4

Rapporto acqua/cemento < 0.50

Contenuto minimo in cemento: 340 kg/m^3

Per strutture in classe di esposizione XA2 utilizzare cemento ad alta resistenza ai solfati secondo UNI 9156

ACCIAIO IN BARRE PER C.A.

Acciaio tipo B450C secondo D.M. 17/01/2018

Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}=f_{y nom}=450 \text{ N/mm}^2$

Tensione caratteristica di rottura $f_{tk}=f_{t nom}=540 \text{ N/mm}^2$

Allungamento $(A_{gt})_k=7.5\%$ (frattile 10%)

PRESCRIZIONI PER LA MESSA IN OPERA DEL CLS:

- utilizzare aggregati non gelivi;
- verificare la corrispondenza al progetto della posizione delle casseforme e dei getti di armatura;
- verificare la posizione di eventuali inserti (giunti, water-stop, ecc.);

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV.	N° FG. (SH. N.)	DI (LAST)
			0	8	69
POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE					

- verificare la corretta organizzazione ad esecuzione delle opere di getto, di protezione, di stagionatura del calcestruzzo;
- l'uso di additivi e fluidificanti è consentito purché siano garantite le resistenze prescritte.

PRESCRIZIONI NEI CONFRONTI DEL RITIRO DEL CALCESTRUZZO:

Ritiro plastico (del getto a fine presa):

- bagnare fino a saturazione i casseri prima del getto;
- metodi di stagionatura del calcestruzzo da mettere in atto immediatamente dopo la compattazione del getto per almeno le 24

ore successive (i metodi seguenti sono in alternativa tra loro):

- 1) bagnatura di tutte le superfici esposte all'aria;
- 2) copertura delle superfici esposte con teli di plastica;
- 3) copertura delle superfici con teli tessuto non tessuto o juta, precedentemente bagnati e da mantenere sempre umidi;
- 4) applicazione di prodotti stagionanti che formano una membratura protettiva.

PRESCRIZIONI RIGUARDANTI IL RICOPRIMENTO DELLE BARRE DI ARMATURA

I seguenti valori di minimo ricoprimento delle barre sono adottati:

Diaframmi: c=75mm su tutte le facce; Pali: c=75mm; Controfodere: c=50mm per faccia lato interno vasche; Controfodere: c=30mm per faccia a contatto con diaframma; Opere in elevazione: c=40mm su tutte le facce; Altre strutture: c=50mm su tutte le facce.

ANCORANTE BICOMPONENTE PER INGHISAGGI BARRE

Ancorante bicomponente ad indurimento rapido ed elevata capacità di carico tipo Hilti HIT-RE500 V4 o similare di altro produttore con caratteristiche tecniche equivalenti per ancoraggio barre di connessione con platee e controfodere.

ACCIAIO PER CARPENTERIA METALLICA (puntelli e travi di coronamento provvisionali)

Acciaio tipo S275 secondo UNI EN 10025

Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}=275 \text{ N/mm}^2$

Tensione caratteristica di rottura $f_{tk}=430 \text{ N/mm}^2$

ACCIAIO PER PALANCOLE

Acciaio tipo S355GP secondo UNI EN 10248-1

Tensione caratteristica di snervamento $f_{yk}=355 \text{ N/mm}^2$

Tensione caratteristica di rottura $f_{tk}=510 \text{ N/mm}^2$

Saldature di prima classe

Saldature di prima classe.


I procedimenti di saldatura e i materiali di apporto devono essere conformi ai requisiti di cui al paragrafo 11.3.4.5 del D.M. 17/01/2018 "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni". Le caratteristiche dei materiali di apporto (tensione di snervamento, tensione di rottura, allungamento a rottura e resilienza) devono essere equivalenti o superiori alle corrispondenti caratteristiche delle parti collegate.

Viti classe 8.8 (UNI EN ISO 898-1:2013)

Dadi classe 8 (UNI EN ISO 898-2:2012)

Rosette in acciaio C50 (HRC 32-40) (UNI EN ISO 683-1:2018 – UNI EN ISO 683-2:2018 - UNI EN 14399-5:2015 - UNI EN 14399-6:2015)

All'interno delle relazioni di calcolo delle singole opere civili a progetto verranno ulteriormente dettagliate le caratteristiche meccaniche e prestazionali dei materiali impiegati.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 9	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

5 CONDIZIONI GEOTECNICHE E STRATIGRAFICHE

La stratigrafia di calcolo e la caratterizzazione geotecnica dei terreni sono determinati in relazione alla Relazione Geologica [Ref. 1] e alla Relazione Geotecnica [Ref. 2].

Nei paragrafi che seguono sono riportate le stratigrafie per le prove di riferimento e la caratterizzazione meccanica di calcolo delle varie unità.

5.1 STRATIGRAFIA

Le stratigrafie rappresentative per le singole prove di riferimento sono riportate in Tabella 1:

Tabella 1 – Successione stratigrafica (m da p.c.)

UNITÀ	CPTU 4	CPTU 5	CPTU 6	SCPTU 1	CPT 1
TV / 1A	0.00 – 1.80	0.00 – 2.20	0.00 – 1.80	0.00 – 3.00	0.00 – 7.80
1B	1.80 – 9.20	2.20 – 9.10	1.80 – 9.60	3.00 – 8.30	7.80 – 9.60
2	9.20 – 14.50	9.10 – 12.20	9.60 – 12.10	8.30 – 11.40	9.60 – 19.80
3		12.20 – 12.70	12.10 – 12.90	11.40 – 12.30	
2		12.70 – 14.70	12.90 – 15.30	12.30 – 14.90	
4	14.50 – 23.70	14.70 – 23.70	15.30 – 24.00	14.90 – 24.00	19.80 – 26.30
5	23.70 – 29.20	23.70 – 30.50	24.00 – 29.50?	24.00 – 29.40	26.30 – 31.70?
6	29.20 - ...	30.50 - ...	29.50? - ...	29.40 - ...	31.70? - ...

Dove:

- **Unità TV:** terreno vegetale costituito da limo e limo sabbioso deb. ghiaioso, di colore marrone-beige, da scarsamente a mediamente addensato.
- **Unità 1A:** argilla e limo argilloso, di colore da grigio-beige a nera, con resti vegetali e materiale organico, poco consistente.
- **Unità 1B:** limo sabbioso, di colore da grigio a nero, localmente con resti vegetali e materiale organico, da sciolto a scarsamente addensato.
- **Unità 2:** limo sabbioso, con livelli di sabbia limosa, di colore grigio, con frammenti di gusci di bivalvi, mediamente addensato.
- **Unità 3:** limo argilloso di colore grigio, poco consistente.
- **Unità 4:** limo argilloso di colore grigio, alternato a livelli decimetrici di limo sabbioso, con locali livelli centimetrici ricchi in sostanza organica, poco consistente.
- **Unità 5:** sabbia e sabbia limosa medio-fine di colore grigio-nocciola, mediamente addensata.
- **Unità 6:** argilla limosa di colore grigio chiaro, da poco a mediamente consistente.

Si rimanda alle relazioni di calcolo delle singole opere per la descrizione puntuale della verticale di indagine utilizzata e della conseguente stratigrafia adottata nei calcoli.

In generale, salvo diversa indicazione nelle relazioni di dettaglio per le singole opere, il piano di campagna (sia all'atto dell'esecuzione delle prove geotecniche sia per la costruzione delle opere) è considerato alla quota ± 0.00 m s.l.m.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 10	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

5.2 CONDIZIONI IDROGEOLOGICHE

Come da considerazioni riportate nella sintesi finale della Relazione Geologica [Ref. 1], si assume che il livello della falda freatica coincida con il piano di campagna.

5.3 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI TERRENI

Nella tabella seguente è riassunto il comportamento (drenato / non drenato) delle diverse unità geotecniche a breve e lungo termine.

Tabella 2 – Caratterizzazione meccanica dei terreni (parametri caratteristici)

Unità	Comportamento a breve termine	Comportamento a lungo termine
1A	Non drenato	Drenato
1B	Drenato	Drenato
2	Drenato	Drenato
3	Non drenato	Drenato
4	Non drenato	Drenato
5	Drenato	Drenato

Di seguito sono riportati gli elementi per la caratterizzazione meccanica dei terreni (parametri caratteristici).

Tabella 3 – Caratterizzazione meccanica (parametri caratteristici delle varie unità)

	Unità 1a	Unità 1b	Unità 2	Unità 3	Unità 4	Unità 5	Unità 6
γ [kN/m ³]	17.0	18.0	18.0	18.5	19.5	19.0	19.5
c_u [kPa]	25	-	-	30	50	-	80
ϕ' [deg]	23	31	33	25	25	34	27
Dr [%]	-	30÷60	40÷70	-	-	50÷70	-
c' [kPa]	5	0	0	0	0	0	0
OCR	1÷8	-	-	1	1	-	1
K [m/s]	1E-10 ÷ 1E-07	1E-07 ÷ 1E-05	1E-07 ÷ 1E-05	1E-10 ÷ 1E-07	1E-10 ÷ 1E-07	1E-07 ÷ 1E-05	1E-10 ÷ 1E-07
E_{oed} [kPa]	2.00	15.00	25.00	4.00	5.00.	40.00	8.00

Si rimanda alle relazioni di calcolo delle singole opere per la definizione puntuale dei parametri geotecnici e dei coefficienti di spinta statici e sismici per la progettazione delle paratie, ai sensi di quanto prescritto dalle NTC2018.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 11
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

5.4 PERMEABILITÀ DEI TERRENI

Sulla base della Relazione Geologica [Ref. 2] le unità 1A, 3 e 4 (argilla organica e limi argillosi) si possono considerare impermeabili limitatamente alla fase di esecuzione degli scavi e costruzione della vasca.

5.5 SUSCETTIBILITÀ ALLA LIQUEFAZIONE

Sulla base della analisi svolte e riassunte nella Relazione sulla modellazione sismica [Ref. 3] risulta che le unità geotecniche 1b e 2 possono essere soggette a fenomeni di liquefazione.

Per la resistenza a taglio residua si fa riferimento alla pubblicazione “Soil liquefaction during earthquake” di Idriss e Boulanger del 2008, dove viene fornita una correlazione fra:

- la resistenza non drenata a taglio residua, normalizzata secondo la pressione verticale efficace
- e
- il numero di colpi da SPT normalizzato alla pressione di 100kPa e corretto per la presenza di fini

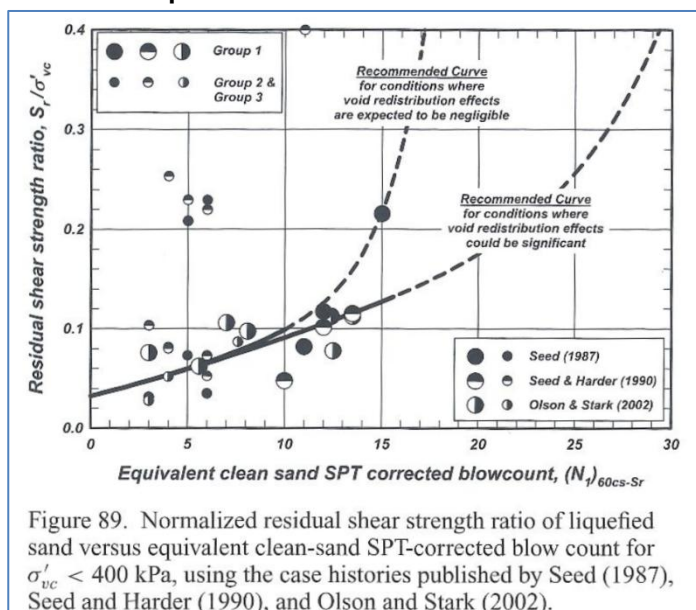
$$(N_1)_{60Cs-Sr} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60-Sr}$$

dove

Table 4 Values of $\Delta(N_1)_{60-Sr}$ recommended by Seed (1987).	
Fines content (% passing No. 200 sieve)	$\Delta(N_1)_{60-Sr}$
10	1
25	2
50	4
75	5

La correlazione è espressa nel grafico che segue.

Figura 2 – Correlazione per la determinazione della resistenza a taglio residua



	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 12	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Si può quindi dedurre che:

- è cautelativo, nonché più semplice, stimare la resistenza residua senza effettuare la correzione del valore di $(N_1)_{60}$ per via del contenuto di fini;
- per terreni con $(N_1)_{60} \geq 15$ (per le unità liquefacibili in questione si ha $(N_1)_{60} = 20 \div 59$) si può simulare la perdita di resistenza dovuta alla liquefazione assumendo un valore fittizio di coesione non drenata $c_u = 0.10 \cdot \sigma'_v$ in condizioni post liquefazione.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 13	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

6 CRITERI DI DIMENSIONAMENTO E VERIFICA

Le analisi strutturali e le verifiche sono state svolte in accordo a quanto prescritto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, considerando:

- per azioni statiche:
 - Stati Limite Ultimi (SLU)
 - Stati Limite di Esercizio (SLE)
- per azioni sismiche:
 - Stati Limite di salvaguardia della Vita umana (SLV)
 - Stati Limite di Danno (SLD – dove pertinenti)

6.1 COMBINAZIONE DELLE AZIONI AGLI STATI LIMITE

Ai fini delle verifiche agli Stati Limite si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni, in accordo alle NTC 2018 (par. 2.5.3):

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata agli Stati Limite Ultimi (SLU)

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

- Combinazione caratteristica (o rara) impiegata agli Stati Limite di Esercizio (SLE)

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

- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli SLE reversibili

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

- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine

$$G_1 + G_2 + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots$$

- Combinazione sismica impiegata agli Stati Limite Ultimi e di Esercizio connessi all'azione sismica "E"

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

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

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

6.1.1 VERIFICHE DELLE PARATIE

Per le verifiche nei confronti degli SLU strutturali (STR) e geotecnici (GEO) delle paratie si adotta l'Approccio 1. Nell'Approccio 1 si impiegano due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A), per la resistenza dei materiali (M) e, eventualmente, per la resistenza globale del sistema (R). Nella Combinazione 1 dell'Approccio 1, per le azioni si impiegano i coefficienti γ_F riportati nella colonna A1 della Tabella 4. Nella Combinazione 2 dell'Approccio 1, si impiegano invece i coefficienti γ_F riportati nella colonna A2.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 14	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Tabella 4 – Coefficienti parziali per le azioni per verifiche SLU strutturali (STR) e geotecniche (GEO)

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

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

I coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 5 – Coefficienti parziali γ_M sui parametri geotecnici

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_γ	γ_γ	1,0	1,0

I set di coefficienti parziali per le verifiche relative alle paratie sono:

- Combinazione 1 (A1+M1+R1);
- Combinazione 2 (A2+M2+R1);

dove i coefficienti γ_R relativi alla resistenza globale del sistema assumono valore unitario.

La Combinazione 2 è utilizzata solamente per la verifica di resistenza del cuneo passivo di terreno al di sotto del fondo (verifica di tipo "GEO").

Per la verifica di stabilità globale del complesso opera di sostegno / terreno, si utilizza la combinazione A2+M2+R2 con $\gamma_R=1.10$.

Per le verifiche di tipo UPL (sollevamento del fondo scavo e galleggiamento dell'opera completata) si rimanda al paragrafo 6.5.

6.1.2 VERIFICHE DEI PALI

Per le verifiche nei confronti degli SLU strutturali (STR) e geotecnici (GEO) dei pali si adotta l'Approccio 2. Nell'Approccio 2 si impiega una unica combinazione di coefficienti parziali, definiti per le azioni (A), per la resistenza dei materiali (M) ed, eventualmente, per la resistenza globale del

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 15	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

sistema (R). Nella Combinazione unica dell'Approccio 1, per le azioni si impiegano i coefficienti γ_F riportati nella colonna A1 della Tabella 4.

I coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno sono riportati nella Tabella 5.

I set di coefficienti parziali per le verifiche relative ai pali di fondazione sono:

- Combinazione unica (A1+M1+R3);

dove i coefficienti γ_R relativi alla resistenza di pali soggetti a carico assiale e a carico trasversale sono riportati rispettivamente in Tabella 6 e Tabella 7.

Tabella 6 – Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze a carico verticale dei pali

Resistenza	Simbolo	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
	γ_R	(R3)	(R3)	(R3)
Base	γ_b	1,15	1,35	1,3
Laterale in compressione	γ_s	1,15	1,15	1,15
Totale (*)	γ	1,15	1,30	1,25
Laterale in trazione	γ_{st}	1,25	1,25	1,25

(*) da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

Tabella 7 – Coefficiente parziale γ_T per le verifiche agli stati limite ultimi di pali soggetti a carichi trasversali

Coefficiente parziale (R3)
$\gamma_T = 1,3$

6.1.3 VERIFICHE FONDAZIONI SUPERFICIALI

Le verifiche nei confronti degli SLU strutturali (STR) e geotecnici (GEO) delle fondazioni superficiali sono:

SLU di tipo geotecnico (GEO)

- collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno;
- collasso per scorrimento sul piano di posa;
- stabilità globale.

SLU di tipo strutturale (STR)

- raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali.

Non essendo su un pendio o in sua prossimità, si può omettere la verifica SLU geotecnica (GEO) di stabilità locale, e si adotta quindi solo l'Approccio 2. Nell'Approccio 2 si impiega una unica combinazione di coefficienti parziali, definiti per le azioni (A), per la resistenza dei materiali (M) ed, eventualmente, per la resistenza globale del sistema (R).

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 16	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

I set di coefficienti parziali per le verifiche relative alle fondazioni superficiali sono quindi:

Combinazione unica (A1+M1+R3)

- i coefficienti parziali γ_F per le azioni sono riportati nella colonna A1 della Tabella 4;
- i coefficienti parziali γ_M per i parametri geotecnici sono riportati nella colonna M1 della Tabella 5;
- i coefficienti parziali γ_R relativi alla verifica GEO sono riportati nella colonna R3 della Tabella 8;
- i coefficienti parziali γ_R relativi alla verifica STR sono considerati unitari

Tabella 8 – Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stadi limite ultimi di fondazioni superficiali

Verifica	Coefficiente parziale (R3)
Carico limite	$\gamma_R = 2,3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$

6.1.4 VERIFICHE DEI MURI DI SOSTEGNO

Per le verifiche nei confronti degli SLU strutturali (STR) e geotecnici (GEO) dei muri di sostegno si adotta l'Approccio 2. Nell'Approccio 2 si impiega una unica combinazione di coefficienti parziali, definiti per le azioni (A), per la resistenza dei materiali (M) ed, eventualmente, per la resistenza globale del sistema (R). Nella Combinazione unica dell'Approccio 2, per le azioni si impiegano i coefficienti γ_F riportati nella colonna A1 della Tabella 4.

I coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno sono riportati nella Tabella 5.

I set di coefficienti parziali per le verifiche relative ai muri di sostegno sono:

- Combinazione unica (A1+M1+R3) sia statica che sismica, per valutare:
 - Resistenza strutturale del muro;
 - Capacità portante della fondazione;
 - Verifica a scorrimento;
 - Verifica a ribaltamento;

dove i coefficienti γ_R (R3) relativi alla resistenza dei muri di sostegno sono riportati rispettivamente in Tabella 9 e Tabella 10.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 17	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Tabella 9 – Coefficienti parziali γ_R da applicare agli SLU

Tab. 6.5.I - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi di muri di sostegno

Verifica	Coefficiente parziale (R3)
Capacità portante della fondazione	$\gamma_R = 1,4$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,1$
Ribaltamento	$\gamma_R = 1,15$
Resistenza del terreno a valle	$\gamma_R = 1,4$


Tabella 10 – Coefficiente parziale γ_T per le verifiche agli SLV

Tab. 7.11.III - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche degli stati limite (SLV) dei muri di sostegno.

Verifica	Coefficiente parziale γ_R
Carico limite	1.2
Scorrimento	1.0
Ribaltamento	1.0
Resistenza del terreno a valle	1.2

6.2 VERIFICHE DI RESISTENZA AGLI STATI LIMITE ULTIMI (SLU)

Di seguito sono riportate le caratteristiche meccaniche e i valori di calcolo per i calcestruzzi e le barre di armatura considerati per determinare la resistenza ultima delle sezioni in calcestruzzo armato.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 18	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Caratteristiche meccaniche dei materiali

CALCESTRUZZO PER DIAFRAMMI E PALI

classe **C25/30**

$f_{ck} =$	25.00 MPa	resistenza caratteristica cilindrica a compressione
$f_{ctk} =$	1.80 MPa	resistenza caratteristica a trazione
$\gamma_c =$	1.50	coefficiente parziale di sicurezza
$\alpha_{cc} =$	0.85	coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata
$f_{cd} =$	14.17 MPa	resistenza di calcolo a compressione
$f_{ctd} =$	1.20 MPa	resistenza di calcolo a trazione
$f_{cm} =$	33.00 MPa	resistenza media cilindrica a compressione
$f_{ctm} =$	2.56 MPa	resistenza media a trazione
$\sigma_t =$	2.14 MPa	trazione ammessa allo stato limite di formazione delle fessure
$\sigma_{c,max} =$	11.25 MPa	compressione ammessa in condizioni quasi permanenti
$\sigma_{c,max} =$	15.00 MPa	compressione ammessa in condizioni caratteristiche

CALCESTRUZZO PER ALTRE STRUTTURE

classe **C32/40**

$f_{ck} =$	32.00 MPa	resistenza caratteristica cilindrica a compressione
$f_{ctk} =$	2.12 MPa	resistenza caratteristica a trazione
$\gamma_c =$	1.50	coefficiente parziale di sicurezza
$\alpha_{cc} =$	0.85	coefficiente riduttivo per le resistenze di lunga durata
$f_{cd} =$	18.13 MPa	resistenza di calcolo a compressione
$f_{ctd} =$	1.41 MPa	resistenza di calcolo a trazione
$f_{cm} =$	40.00 MPa	resistenza media cilindrica a compressione
$f_{ctm} =$	3.02 MPa	resistenza media a trazione
$\sigma_t =$	2.52 MPa	trazione ammessa allo stato limite di formazione delle fessure
$\sigma_{c,max} =$	14.40 MPa	compressione ammessa in condizioni quasi permanenti
$\sigma_{c,max} =$	19.20 MPa	compressione ammessa in condizioni caratteristiche

ACCIAIO DI ARMATURA

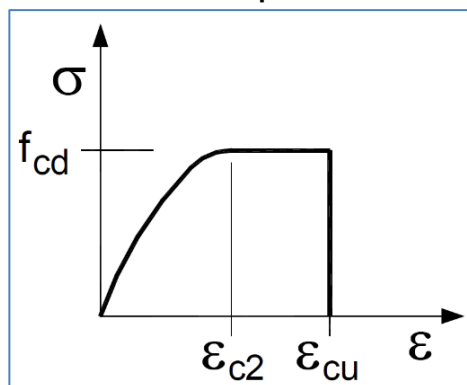
tipo **B450C**

$f_{tk} =$	540 MPa	tensione caratteristica a rottura
$f_{yk} =$	450 MPa	tensione caratteristica a snervamento
$\gamma_s =$	1.15	coefficiente parziale di sicurezza
$f_{yd} =$	391.30 MPa	resistenza di calcolo a trazione
$\sigma_{s,max} =$	360.00 MPa	tensione di trazione ammessa in condizioni caratteristiche

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 19
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

Per il calcestruzzo viene considerato il modello costitutivo “parabola – rettangolo”, riportato nell’immagine seguente.

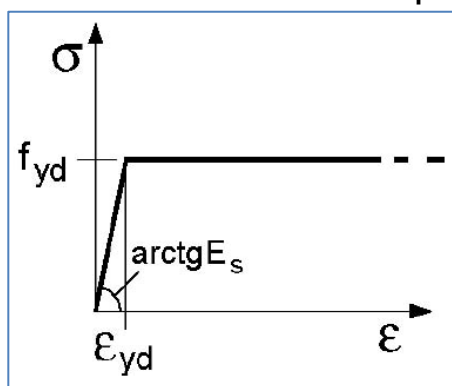
Figura 3 – Modello costitutivo “parabola – rettangolo”



Con riferimento all’immagine riportata sopra i seguenti valori di deformazione sono considerati per le verifiche: $\varepsilon_{c2} = 0.20\%$ e $\varepsilon_{cu} = 0.35\%$.

Per l’acciaio di armatura viene considerato il modello costitutivo elastoplastico, riportato nell’immagine seguente.

Figura 4 – Modello costitutivo elastoplastico



Con riferimento all’immagine riportata sopra i seguenti valori di deformazione sono considerati per le verifiche: $E_s = 200'000 \text{ MPa}$; $\varepsilon_{yd} = f_{yd} / E_s = 1.957\%$.

La deformazione di rottura è $\varepsilon_{ud} = 6.75\%$.

Per la verifica dei puntoni metallici provvisionali previsti per alcune delle opere con diaframmi si utilizzerà il Metodo A riportato al paragrafo C4.2.4.1.3.3.1 della Circolare C.S.LL.PP. Il puntello si considera soggetto al carico assiale trasferito dalla trave di coronamento del diaframma (schema di trave doppiamente appoggiata) e al momento flettente dovuto al proprio peso.

Il valore dello snervamento caratteristico per l’acciaio per carpenteria metallica S275 è $f_{yk} = 275 \text{ MPa}$. Il coefficiente di sicurezza per la verifica a stabilità γ_{M1} vale 1.05. Il coefficiente χ si valuta come riportato nel paragrafo 4.2.4.1.3.1 delle NTC, considerando un fattore di imperfezione $\alpha = 0.49$.


	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 20
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

Figura 5 – Metodo di verifica dei puntoni metallici provvisionali

C4.2.4.1.3.3.1. Metodo A

Nel caso di aste prismatiche soggette a compressione N_{Ed} e a momenti flettenti $M_{y,Ed}$ e $M_{z,Ed}$ agenti nei due piani principali di inerzia, in presenza di vincoli che impediscono gli spostamenti torsionali, si dovrà controllare che risulti:

$$\frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{min} \cdot f_{yk} \cdot A} + \frac{M_{y,eq,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{f_{yk} \cdot W_y \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)} + \frac{M_{z,eq,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{f_{yk} \cdot W_z \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} \leq 1 \quad [C4.2.32]$$

dove:

χ_{min} è il minimo fattore χ relativo all'inflessione intorno agli assi principali di inerzia;

W_y e W_z sono i moduli resistenti elastici per le sezioni di classe 3 e i moduli resistenti plastici per le sezioni di classe 1 e 2,

$N_{cr,y}$ e $N_{cr,z}$ sono i carichi critici euleriani relativi all'inflessione intorno agli assi principali di inerzia;

$M_{y,eq,Ed}$ e $M_{z,eq,Ed}$ sono i valori equivalenti dei momenti flettenti da considerare nella verifica.

Se il momento flettente varia lungo l'asta si assume, per ogni asse principale di inerzia,

$$M_{eq,Ed} = 1,3 \cdot M_{m,Ed} \quad [C4.2.33]$$

essendo $M_{m,Ed}$ il valor medio del momento flettente, con la limitazione

$$0,75 \cdot M_{max,Ed} \leq M_{eq,Ed} \leq M_{max,Ed} \quad [C4.2.34]$$

Nel caso di asta vincolata agli estremi, soggetta a momento flettente variabile linearmente tra i valori di estremità M_a e M_b , $|M_a| \geq |M_b|$, (Figura C4.2.11), si può assumere per $M_{eq,Ed}$ il seguente valore

$$M_{eq,Ed} = 0,6 \cdot M_a - 0,4 \cdot M_b \geq 0,4 \cdot M_a \quad [C4.2.35]$$

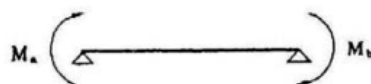


Figura C4.2.11 - Trave soggetta a momenti d'estremità

In presenza di fenomeni di instabilità flesso-torsionali bisogna verificare che sia:

$$\frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{min} \cdot f_{yk} \cdot A} + \frac{M_{y,eq,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot f_{yk} \cdot W_y \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}\right)} + \frac{M_{z,eq,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{f_{yk} \cdot W_z \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right)} \leq 1 \quad [C4.2.36]$$

dove χ_{LT} è il fattore di riduzione per l'instabilità flesso-torsionale, definito al § 4.2.4.1.3.2 delle NTC e z è l'asse debole.

I coefficienti χ dipendono dal tipo di sezione e dal tipo di acciaio impiegato; essi si desumono, in funzione di appropriati valori della snellezza normalizzata $\bar{\lambda}$, dalla seguente formula

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0 \quad [4.2.44]$$

dove $\Phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right]$, α è il fattore di imperfezione ricavato dalla Tab. 4.2.VIII e la snellezza normalizzata $\bar{\lambda}$ è pari a

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_{yk}}{N_{cr}}} \quad \text{per le sezioni di classe 1, 2 e 3, e a} \quad [4.2.45]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{yk}}{N_{cr}}} \quad \text{per le sezioni di classe 4.} \quad [4.2.46]$$

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 21	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

6.3 VERIFICHE DI RESISTENZA AGLI STATI LIMITE DI SALVAGUARDIA DELLA VITA UMANA (SLV)

6.3.1 OPERE INTERRATE SU DIAFRAMMI PERIMETRALI

In riferimento alle opere che prevedono la realizzazione di diaframmi perimetrali, dal momento che il comportamento strutturale in caso di sisma è considerato non dissipativo ($q=1.0$) è necessario che le verifiche strutturali siano effettuate con il riferimento al “campo sostanzialmente elastico”, come specificato al par. C7.4 della Circolare 21 Gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP. ([Ref. 6]). Per le verifiche delle strutture in c.a. ciò significa assumere per le verifiche di resistenza agli SLV:

- per il calcestruzzo $\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{cu} = 0.20\%$;
- per le armature $\varepsilon_{yd} = \varepsilon_{ud} = 1.957\%$.

6.3.2 OPERE IN ELEVAZIONE SU PALI DI FONDAZIONE

In riferimento alle opere che prevedono la realizzazione di pali di fondazione, dal momento che il comportamento strutturale in caso di sisma è considerato non dissipativo ($q=1.0$) è necessario che le verifiche strutturali siano effettuate con il riferimento al “campo sostanzialmente elastico”, come specificato al par. C7.4 della Circolare 21 Gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP. ([Ref. 6]). Per le verifiche delle strutture in c.a. ciò significa assumere per le verifiche di resistenza agli SLV:

- per il calcestruzzo $\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{cu} = 0.20\%$;
- per le armature $\varepsilon_{yd} = \varepsilon_{ud} = 1.957\%$.

6.3.3 OPERE IN ELEVAZIONE SU FONDAZIONE SUPERFICIALE

In riferimento alle opere che prevedono fondazioni superficiali, dal momento che il comportamento strutturale in caso di sisma è considerato non dissipativo ($q=1.0$) è necessario che le verifiche strutturali siano effettuate con il riferimento al “campo sostanzialmente elastico”, come specificato al par. C7.4 della Circolare 21 Gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP. ([Ref. 6]). Per le verifiche delle strutture in c.a. ciò significa assumere per le verifiche di resistenza agli SLV:

- per il calcestruzzo $\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{cu} = 0.20\%$;
- per le armature $\varepsilon_{yd} = \varepsilon_{ud} = 1.957\%$.

6.4 VERIFICHE AGLI STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)


6.4.1 VERIFICA DELLE TENSIONI DI ESERCIZIO

La massima tensione di compressione nel calcestruzzo σ_c deve rispettare le seguenti limitazioni:

- $\sigma_c < 0.60f_{ck}$ in combinazione caratteristica (rara);
- $\sigma_c < 0.45f_{ck}$ in combinazione quasi permanente.

La massima tensione di trazione nell'acciaio σ_s deve rispettare la seguente limitazione:

- $\sigma_s < 0.80f_{yk}$ in combinazione caratteristica (rara).

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 22	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Si rimanda alle relazioni di calcolo delle singole opere per i valori specifici delle tensioni limite di acciaio e calcestruzzo in combinazione caratteristica (rara) e quasi permanente.

Le tensioni nei materiali sono calcolate nelle ipotesi di comportamento elastico lineare dei materiali, trascurando la resistenza a trazione del calcestruzzo. Nei calcoli il coefficiente di omogeneizzazione “n” è posto uguale a 15.

6.4.2 VERIFICA DI FESSURAZIONE

Ove possibile la verifica di fessurazione è compiuta con riferimento allo stato limite di formazione delle fessure, nel quale, nella combinazione di carichi frequente e quasi permanente e considerando il calcestruzzo reagente anche a trazione, la tensione normale di trazione nella fibra più sollecitata è:

$$\sigma_t = \frac{f_{ctm}}{1.20}$$

Si rimanda alle relazioni di calcolo delle singole opere per i valori specifici della tensione limite del calcestruzzo in corrispondenza dello stato limite di formazione delle fessure.

Le tensioni nei materiali sono calcolate nelle ipotesi di comportamento elastico lineare dei materiali; nei calcoli il coefficiente di omogeneizzazione “n” è posto uguale a 15.

Il valore caratteristico di apertura delle fessure (w_k) non deve superare i valori nominali w_1 , w_2 , w_3 secondo quanto riportato nella Tab. 4.1.IV delle NTC2018. L'ampiezza caratteristica delle fessure w_k è calcolata secondo la formulazione 4.1.14 delle NTC2018 e le indicazioni riportate nella circolare esplicativa del C.S.LL.PP.

La verifica dell'ampiezza di fessurazione può anche essere condotta senza calcolo diretto, limitando la tensione di trazione nell'armatura, valutata nella sezione parzializzata per la combinazione di carico pertinente, ad un massimo correlato al diametro delle barre ed alla loro spaziatura

In particolare, la verifica dell'ampiezza delle fessure è condotta per via indiretta riferendosi ai limiti di tensione nell'acciaio definiti nelle Tabelle C.4.1.II e C.4.1.III della Circolare 21 Gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP., di seguito riportate.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 23	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Tabella 11 –Verifica a fessurazione senza calcolo diretto dell'ampiezza

Tabella C4.1.II - Diametri massimi delle barre per il controllo di fessurazione

Tensione nell'acciaio σ_s [MPa]	Diametro massimo ϕ delle barre (mm)		
	$w_3 = 0,4$ mm	$w_2 = 0,3$ mm	$w_1 = 0,2$ mm
160	40	32	25
200	32	25	16
240	20	16	12
280	16	12	8
320	12	10	6
360	10	8	-

Tabella C4.1.III - Spaziatura massima delle barre per il controllo di fessurazione

Tensione nell'acciaio σ_s [MPa]	Spaziatura massima s delle barre (mm)		
	$w_3 = 0,4$ mm	$w_2 = 0,3$ mm	$w_1 = 0,2$ mm
160	300	300	200
200	300	250	150
240	250	200	100
280	200	150	50
320	150	100	-
360	100	50	-

Con riferimento alla Tabella 4.1.III delle NTC2018, in funzione delle classi di esposizione, sono definite le condizioni ambientali.

Si rimanda alle relazioni di calcolo delle singole opere per l'individuazione delle condizioni ambientali di verifica di fessurazione, in funzione delle specifiche classi di esposizione, secondo quanto specificato nella seguente Tabella 4.1.III delle NTC2018.

Tabella 12 – Descrizione delle condizioni ambientali

Tab. 4.1.III – Descrizione delle condizioni ambientali

Condizioni ambientali	Classe di esposizione
Ordinarie	X0, XC1, XC2, XC3, XF1
Aggressive	XC4, XD1, XS1, XA1, XA2, XF2, XF3
Molto aggressive	XD2, XD3, XS2, XS3, XA3, XF4

Per quanto riguarda le armature, queste possono definirsi poco sensibili in quanto gli acciai ordinari previsti appartengono a tale categoria.

Con riferimento alle esigenze sopra riportate, nella seguente tabella tratta da NTC2018, sono indicati i criteri di scelta dello stato limite di fessurazione.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 24	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Tabella 13 – Valori limite per l'ampiezza delle fessure

Gruppi di Esigenze	Condizioni ambientali	Combinazione di azioni	Armatura			
			Sensibile		Poco sensibile	
			Stato limite	w_k	Stato limite	w_k
A	Ordinarie	frequente	apertura fessure	$\leq w_2$	apertura fessure	$\leq w_3$
		quasi permanente	apertura fessure	$\leq w_1$	apertura fessure	$\leq w_2$
B	Aggressive	frequente	apertura fessure	$\leq w_1$	apertura fessure	$\leq w_2$
		quasi permanente	decompressione	-	apertura fessure	$\leq w_1$
C	Molto aggressive	frequente	formazione fessure	-	apertura fessure	$\leq w_1$
		quasi permanente	decompressione	-	apertura fessure	$\leq w_1$

con $w_1 = 0.2 \text{ mm}$ $w_2 = 0.3 \text{ mm}$ e $w_3 = 0.4 \text{ mm}$.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 25	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

6.5 VERIFICHE IDRAULICHE UPL

Per la stabilità al sollevamento del fondo scavo e per la stabilità al galleggiamento dell'opera completata deve risultare che il valore di progetto dell'azione instabilizzante $V_{inst,d}$ sia non maggiore della combinazione dei valori di progetto delle azioni stabilizzanti $G_{stb,d}$ e delle resistenze R_d :

$$V_{inst,d} \leq G_{stb,d} + R_d$$

Il valore di progetto dell'azione instabilizzante è dato dalla somma delle azioni permanenti $G_{inst,d}$ e delle azioni variabili $Q_{inst,d}$.

La resistenza del terreno deve essere valutata tenendo in conto i coefficienti relativi ai parametri geotecnici M2.

I coefficienti parziali sulle azioni per la verifica di sollevamento del fondo scavo sono indicati nella tabella seguente.

Tabella 14 – Coefficienti parziali sulle azioni per la verifica di sollevamento del fondo scavo

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	Sollevamento (UPL)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9
	Sfavorevole		1,1
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8
	Sfavorevole		1,5
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_{Qi}	0,0
	Sfavorevole		1,5

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

6.6 CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DEI CONNETTORI CONTROFODERADIAFRAMMA

Nelle opere civili con diaframmi perimetrali è prevista la realizzazione di controfodere tra diaframmi e interno vasca.

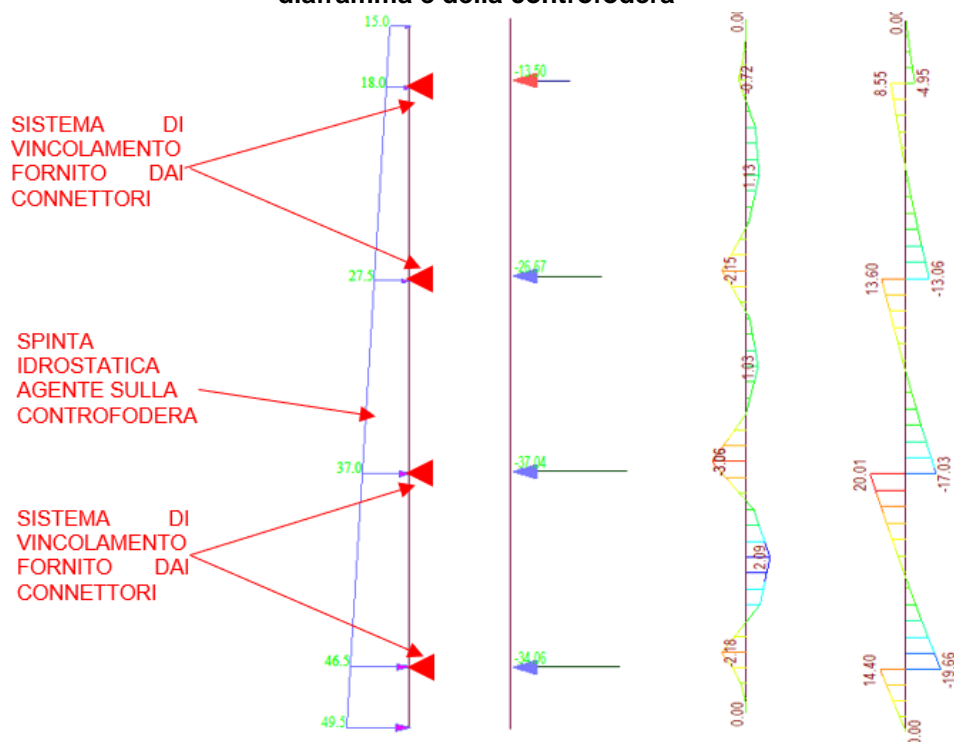
Le controfodere, che hanno la funzione di garantire l'impermeabilità delle pareti perimetrali, saranno gettate a contatto con la parete interna dei diaframmi e connesse ad essa mediante inghisaggi di barre metalliche con resine.

Il calcolo della tensione dei connettori e delle sollecitazioni della controfodera si effettua considerando come sollecitazione di progetto quella derivante dallo schema di calcolo a trave continua, dove gli appoggi sono costituiti dai connettori, e l'azione di progetto è data dalla spinta idrostatica agente sulla controfodera, con andamento a trapezio (minimo in testa e massimo alla base).

A titolo di esempio si riporta nella seguente Figura 6 lo schema di calcolo e l'andamento tipico delle sollecitazioni sulla controfodera e delle tensioni sui connettori:

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 26	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Figura 6 – Esempio di modello di calcolo per il dimensionamento dei connettori controfoderia-diaframma e della controfoderia



La resistenza di progetto a trazione dei connettori vale:

$$N_{Rd} = \min (N_{Rd,s}; N_{Rd,cls})$$

dove:

- $N_{Rd,s}$ è la resistenza a trazione lato acciaio;
- $N_{Rd,cls}$ è la resistenza a trazione lato calcestruzzo;

La resistenza del calcestruzzo è calcolata in accordo alla UNI EN 1992-4:2018.

Le seguenti ipotesi sono fatte per il calcolo della resistenza del calcestruzzo:

- calcestruzzo fessurato C25/30;
- nessun effetto di bordo;
- nessuna interferenza mutua fra i connettori, dal momento che la distanza fra essi è superiore a 3 volte la profondità di ancoraggio $h_{ef} = 300$ mm.

La resistenza caratteristica lato calcestruzzo è la minima fra:


- resistenza all'estrazione dell'ancoraggio $N_{Rk,p}$:

$$N_{Rk,p} = N_{Rk,p}^0 = \pi \cdot d \cdot h_{ef} \cdot \tau_{Rk}$$

dove $\tau_{Rk} = 7$ MPa è l'adesione caratteristica nel calcestruzzo fessurato C25/30 secondo il Benestare Tecnico Europeo ETA-11/0493.

- resistenza alla rottura del cono di calcestruzzo $N_{Rk,c}$:

$$N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 = 7.2 \cdot \sqrt{R_{ck}} \cdot (h_{ef})^{1.5}$$

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 27	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

6.7 DIMENSIONAMENTO DEI CONNETTORI PLATEA-DIAFRAMMA

Nelle opere civili con diaframmi perimetrali, la platea in c.a. viene resa solidale alle pareti diaframmate mediante spinotti a taglio post installati e inghisati con resine chimiche, tipo Hilti o equivalenti.

Il calcolo dei connettori si effettua considerando come sollecitazione di progetto la massima tra:

- la reazione verticale massima dei vincoli al contorno della platea, determinata tramite lo specifico modello di calcolo agli elementi finiti;
- 1.50 volte la reazione verticale media (totale del carico verticale diviso per il perimetro della platea).

Il calcolo della resistenza a taglio-tranciamento dei connettori viene effettuato secondo la trattazione di Boverket (2004).

Facendo l'assunzione che la reazione massima del calcestruzzo sia pari a 3 volte il valore della resistenza di progetto a compressione f_{cd} , e assumendo una eccentricità del carico nulla, la resistenza a taglio tranciamento dei connettori è determinata dalla seguente formula, che offre un valore di resistenza inferiore rispetto alla resistenza del connettore a taglio puro:

$$V_{Rd} = \emptyset^2 \cdot \sqrt{f_{cd} \cdot f_{yd}}$$

Dove:

- \emptyset è il diametro del connettore;
- f_{cd} è la resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo;
- f_{yd} è la resistenza di calcolo a trazione dell'acciaio.

6.8 VERIFICHE GEOTECNICHE DI FONDAZIONI SUPERFICIALI

Per le fondazioni superficiali (platee e plinti) vengono effettuate le verifiche geotecniche secondo le NTC 2018. Le verifiche di interesse per questo tipo di fondazioni superficiali sono:

- verifica di capacità portante;
- verifica di resistenza allo scorrimento orizzontale.

Tali verifiche sono svolte sia allo SLU con carichi statici, sia allo SLV con carichi statici e sismici.

Le verifiche sono svolte secondo l'Approccio 2 previsto dalle NTC 2018; secondo tale approccio sono utilizzati gli stessi coefficienti parziali per i carichi utilizzati per le verifiche strutturali.

La resistenza viene determinata sulla base dei parametri caratteristici del terreno. Ai valori di resistenza così determinati vengono applicati i seguenti coefficienti parziali:

- $\gamma_R = 2.30$ per la capacità portante;
- $\gamma_R = 1.10$ per la resistenza allo scorrimento orizzontale.

6.8.1 **CALCOLO DELLA CAPACITÀ PORTANTE DI PLATEE E PLINTI**

La fondazione è schematizzata come una fondazione rettangolare; la dimensione corta è indicata con B mentre la dimensione lunga è indicata con L.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 28
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

Per il calcolo della capacità portante ultima si utilizza l'equazione di capacità portante secondo Hansen, semplificata secondo le seguenti ipotesi:

- approfondimento della base della fondazione trascurabile;
- base non inclinata;
- nessuna scarpata a monte o a valle delle fondazioni.

Equazione di capacità portante:

$$q_{ult} = \frac{1}{2} B' \gamma N_{\gamma} s_{\gamma} i_{\gamma} + \bar{q} N_q s_q i_q + c N_c s_c i_c$$

Il significato dei termini presenti nell'equazione di capacità portante è spiegato di seguito.

N_{γ} , N_q , N_c sono i fattori di capacità portante. Per la verifica in condizioni drenate tali coefficienti sono valutati secondo la teoria di Vesić come segue:

$$N_{\gamma} = 2 \times (N_q + 1) \times tg(\phi')$$

$$N_q = e^{\pi \cdot tg(\phi')} \times tg^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right)$$

$$N_c = \frac{(N_q - 1)}{tg(\phi')} \text{ con } \phi' \neq 0^\circ$$

$$N_c = \pi + 2 \text{ con } \phi' = 0^\circ$$

s_{γ} , s_q , s_c sono i fattori di forma, valutati secondo la teoria di Vesić come segue:

$$s_{\gamma} = 1 - 0.4 \times \left(\frac{B}{L} \right)$$

$$s_q = 1 + \left(\frac{B}{L} \right) \times tg(\phi')$$

$$s_c = 1 + \frac{N_q}{N_c} \times \left(\frac{B}{L} \right)$$

i_{γ} , i_q , i_c sono i fattori di pendenza, valutati secondo la teoria di Vesić come segue:

$$i_{\gamma} = \left[1 - \frac{H}{V + A_f \times c_a \times \cot(\phi)} \right]^{m+1}$$


$$i_q = \left[1 - \frac{H}{V + A_f \times c_a \cot(\phi)} \right]^m$$

$$i_c = 1 - \frac{m \times H}{A_f \times c_a \times N_c} \quad (\phi' = 0^\circ) \quad i_c = i_q - \frac{1 - i_q}{N_q - 1} \quad (\phi' \neq 0^\circ)$$

con:

- c_a = adesione = $0.6 \times c$
- $A_f = B' \times L'$
- H = risultante forze orizzontali
- V = risultante forze verticali

In caso di:

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 29	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

- Forze orizzontali parallele a B: $m = m_B = \frac{2+B/L}{1+B/L}$;
- Forze orizzontali parallele a L: $m = m_L = \frac{2+L/B}{1+L/B}$;
- Forze inclinate: $m = m_L \times \cos^2(\theta) + m_B \times \sin^2(\theta)$ con θ = angolo formato dalla risultante della forza orizzontale rispetto a L.

B' rappresenta la larghezza della fondazione modificata per tenere in conto l'eventuale eccentricità del carico:

$$B' = B - 2e_B$$

dove e_B è l'eccentricità del carico nella direzione parallela a B.

Allo stesso modo L' rappresenta la lunghezza della fondazione modificata per tenere in conto l'eventuale eccentricità del carico:

$$L' = L - 2e_L$$

dove e_L è l'eccentricità del carico nella direzione parallela a L.

Nell'equazione di capacità portante γ rappresenta il peso per unità di volume del terreno di fondazione; qualora il terreno sia immerso in acqua si utilizza $\gamma' = \gamma - \gamma_{H_2O}$.

Una volta determinata la capacità portante ultima q_{ult} è possibile ottenere il valore di progetto applicando il coefficiente parziale $\gamma_R = 2.30$, cioè

$$q_{Rd} = \frac{q_{ult}}{\gamma_R} = \frac{q_{ult}}{2.30}$$

La sollecitazione di progetto q_{Ed} si calcola invece considerando le dimensioni della fondazione ridotte per via dell'eccentricità dei carichi:

$$q_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{B' \times L'}$$

6.8.2 CALCOLO DELLA RESISTENZA ALLO SCORRIMENTO ORIZZONTALE

Per un terreno con comportamento drenato la resistenza allo scorrimento orizzontale di una fondazione superficiale con base orizzontale si può calcolare come:

$$F = N_{Ed} \times \tan(\phi') + c' \times B \times L$$

dove

- N_{Ed} è il carico verticale trasmesso al terreno;
- c' è la coesione effettiva del terreno;
- ϕ' è l'angolo di resistenza al taglio del terreno.

Per un terreno con comportamento non drenato la resistenza allo scorrimento orizzontale di una fondazione superficiale con base orizzontale si può calcolare come:

$$F = 0.5 \times c_u \times B \times L$$

dove

- c_u è la coesione non drenata del terreno.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 30	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

A favore di sicurezza si è trascurato il contributo resistente del terreno a fianco della fondazione.

Una volta determinata la resistenza ultima allo scorrimento orizzontale è possibile ottenere il valore di progetto applicando il coefficiente parziale $\gamma_R = 1.10$, cioè

$$F_{Rd} = \frac{F}{\gamma_R} = \frac{F}{1.10}$$

6.9 VERIFICHE GEOTECNICHE DEI PALI DI FONDAZIONE (GEO)

6.9.1 CRITERI DI CALCOLO DELLA CAPACITÀ PORTANTE VERTICALE DI PALI TRIVELLATI CON BENTONITE

Adesione laterale ultima (τ_{ult}) in terreni coesivi → Unità TV/1a, Unità 3, Unità 4, Unità 6

$$\tau_{ult} = \alpha c_u \leq 100 kPa$$

Secondo le indicazioni AGI α può essere valutato come:

- $\alpha = 0.90$ con $c_u \leq 25 kPa$
- $\alpha = 0.80$ con $25 kPa \leq c_u \leq 50 kPa$
- $\alpha = 0.60$ con $50 kPa \leq c_u \leq 75 kPa$
- $\alpha = 0.40$ con $c_u \geq 75 kPa$

Portata di base ultima ($q_{b,ult}$) in terreni coesivi → Unità TV/1a, Unità 3, Unità 4, Unità 6

$$q_{b,ult} = 9c_u + \sigma_v \leq 2500 \div 3000 kPa$$

Adesione laterale ultima (τ_{ult}) in terreni granulari → Unità 1b, Unità 2, Unità 5

$$\tau_{ult} = \beta \sigma'_v = k \cdot tg \phi' \cdot \sigma'_v \leq 150 kPa$$

Con:

- $k = 0.40 \div 0.70$, valore assunto nei calcoli $k = 0.55$

Portata di base ultima ($q_{b,ult}$) in terreni granulari → Unità 1b, Unità 2, Unità 5

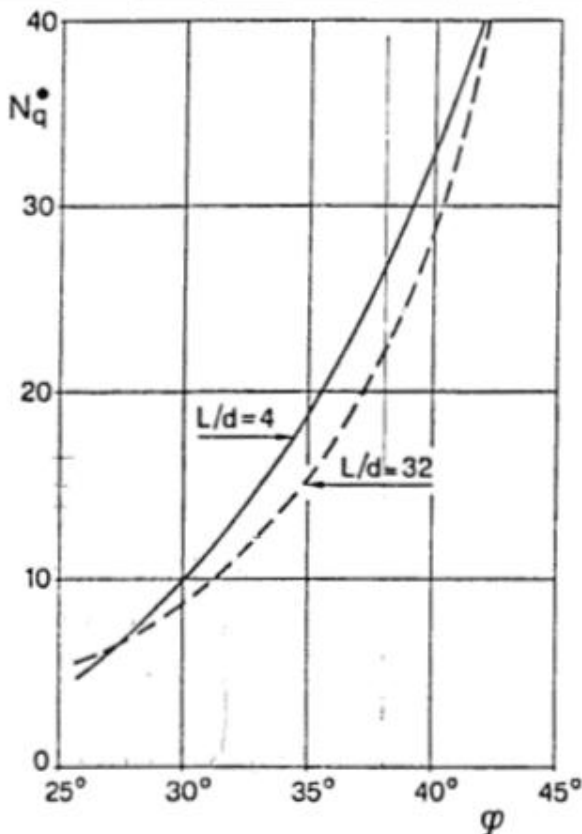
$$q_{b,ult} = \sigma'_v \cdot N_q^* \leq 2500 \div 3000 kPa$$

Con:

- N_q^* calcolato secondo Berezantzev (1963)

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 31
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

Figura 7 - Abaco di Berezantzev per la valutazione di N_q^*



Il valore di $q_{b,ult}$ così calcolato corrisponde a un cedimento della base del palo stimata dal 6% al 10% del diametro del palo.

Portata laterale ultima del palo singolo (pali compressi)

$$Q_{s,ultima} = Perimetro \cdot \int_0^L \tau_{ult} dx$$

Portata laterale ultima del palo singolo (pali tesi)

Si utilizza la stessa relazione sopra riportata per pali compressi utilizzando un valore di adesione laterale ultima ridotto $\tau_{ult,traz} = \frac{2}{3} \cdot \tau_{ult}$.

Portata di base ultima del palo singolo

$$Q_{b,ultima} = Area\ di\ base \cdot q_{b,ult}$$

Si assume che il modello geotecnico sia definito attraverso i parametri medi desunti dalle prove geotecniche a disposizione.

Il seguente calcolo è svolto in accordo a NTC 2018, secondo la combinazione A1+M1+R3.

Il valore di progetto R_d della resistenza si ottiene a partire dal valore caratteristico R_k applicando i coefficienti parziali riportati in Tabella 15. Nel caso specifico si utilizzano i coefficienti di resistenza relativi ai pali trivellati.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 32	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Tabella 15 – Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche

Resistenza	Simbolo	Pali infissi	Pali trivellati	Pali ad elica continua
	γ_R	(R3)	(R3)	(R3)
Base	γ_b	1,15	1,35	1,3
Laterale in compressione	γ_s	1,15	1,15	1,15
Totale ^{*)}	γ	1,15	1,30	1,25
Laterale in trazione	γ_{st}	1,25	1,25	1,25

^{*)} da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

Inoltre se la portanza del palo viene ricavata attraverso correlazioni empiriche che prevedono l'utilizzo di parametri geotecnici o risultati di prove in sito, il valore caratteristico della resistenza $R_{c,k}$ (o $R_{t,k}$) sarà dato dal minore dei valori ottenuti applicando alle resistenze calcolate $R_{c,cal}$ (o $R_{t,cal}$) i fattori di correzione (ξ) riportati nella Tabella 16 in funzione del numero di verticali d'indagine.

Tabella 16 – Fattori di correlazione ξ per la determinazione della resistenza caratteristica in funzione del numero di verticali d'indagine

Numero di verticali indagate	1	2	3	4	5	7	≥ 10
ξ_3	1,70	1,65	1,60	1,55	1,50	1,45	1,40
ξ_4	1,70	1,55	1,48	1,42	1,34	1,28	1,21

Calcolo della portata caratteristica

$$Q_{s,caratteristico} = \frac{Q_{s,ultima}}{\xi_3}$$

$$Q_{b,caratteristico} = \frac{Q_{b,ultima}}{\xi_3}$$

Calcolo della portata ultima di progetto a compressione

$$Q_{Rd} = \frac{Q_{s,caratteristico}}{\gamma_s = 1.15} + \frac{Q_{b,caratteristico}}{\gamma_s = 1.35} - Wp \cdot \gamma_G$$

$$\gamma_G = 1.30 (SLU) \text{ e } 1.00 (SLV)$$

Calcolo della portata ultima di progetto a trazione

$$Q_{Rd} = \frac{Q_{s,caratteristico}}{\gamma_s = 1.25} + Wp \cdot 1.00$$

Calcolo della portata per carichi di esercizio (limitazione dei cedimenti)

$$Q_{s,cesercizio} = \frac{Q_{s,ultima}}{\gamma_{es} = 1.50} - Wp \cdot 1.00$$

6.9.2 CRITERI DI CALCOLO DELLA CAPACITÀ PORTANTE ORIZZONTALE DEI PALI

Quando un palo è caricato da un'azione orizzontale in testa, sia essa una forza o una coppia, le tensioni normali poste di fronte al palo aumentano ed il terreno tende ad allontanarsi dal palo in direzione radiale. Le tensioni normali poste a tergo del palo diminuiscono, mentre il terreno tende a spostarsi verso il palo, ancora lungo una direzione radiale (Figura 8). Ad un certo livello di carico, in prossimità del piano campagna, il terreno posto a tergo del palo tende a distaccarsi dallo stesso; il

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 33	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

terreno posto di fronte al palo raggiungerà il collasso in seguito alla formazione di un cuneo di rottura (Figura 9). A profondità maggiori, il meccanismo di collasso del terreno prevede che lo stesso scorra defluendo lungo il bordo del palo, senza un distacco relativo terreno – palo a tergo dello stesso. Questi due differenti meccanismi di rottura condizionano la distribuzione con la profondità delle pressioni limite p_u che il terreno esercita sul palo.

Figura 8 – Stato tensionale del terreno nell'intorno di un palo caricato da azioni orizzontali

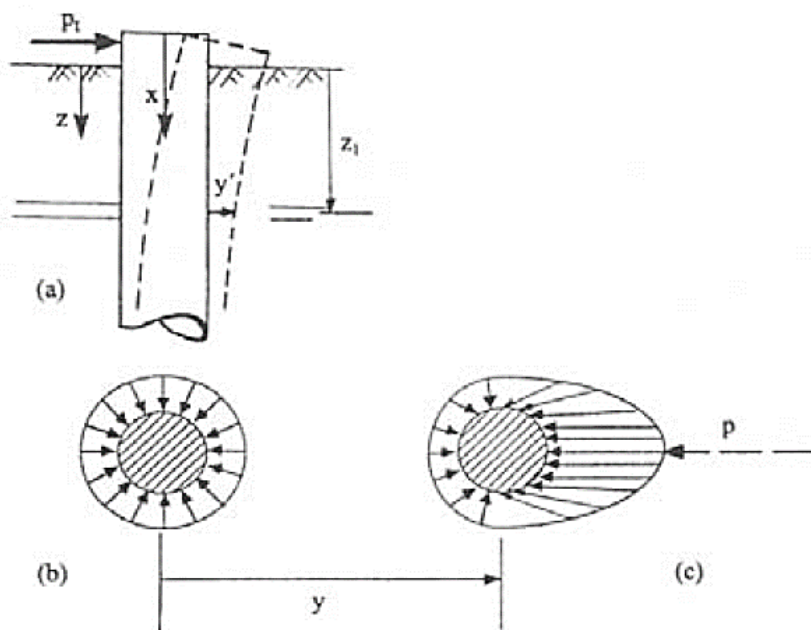
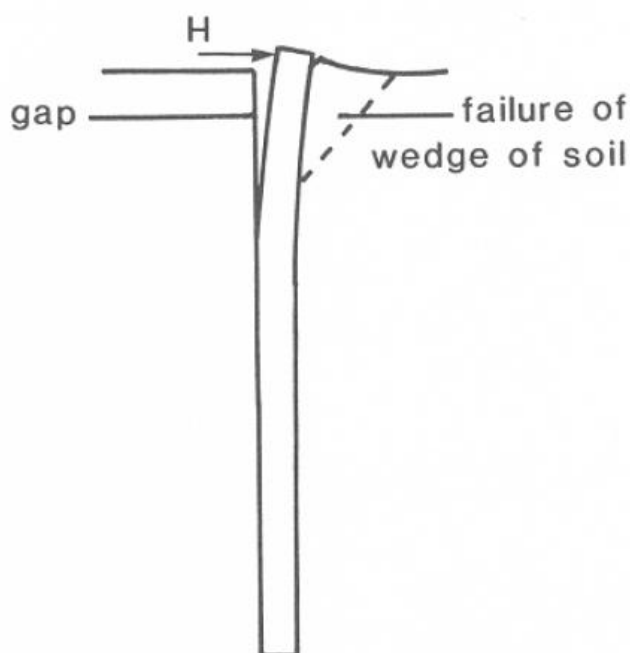


Figura 9 – Cuneo di rottura del terreno soggetto a carichi orizzontali (da Fleming et al., 1985)

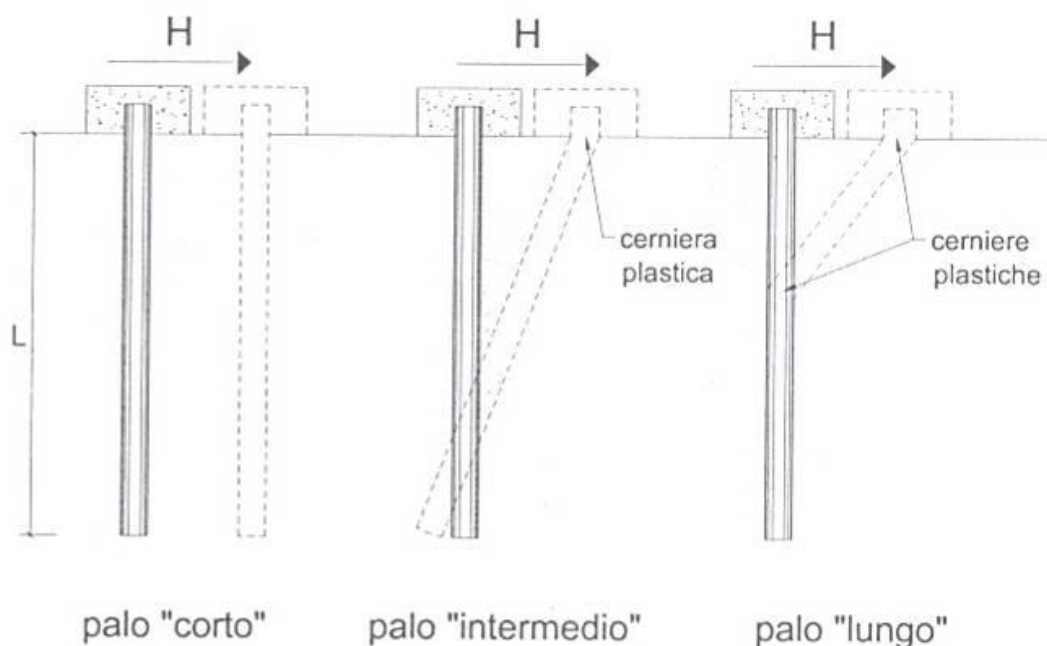


	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 34	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Quando il palo è soggetto ad azioni orizzontali, considerate le sollecitazioni di momento e taglio che si generano nelle varie sezioni, la rottura può verificarsi per raggiungimento dello stato limite ultimo sia del terreno che del palo.

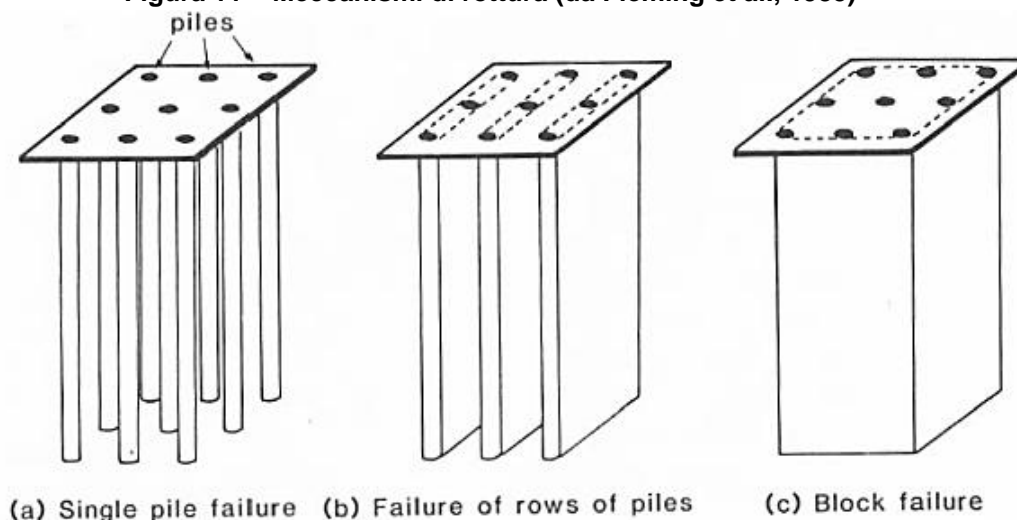
I possibili meccanismi di rottura possono essere indicati come rottura a palo “corto”, “intermedio” e “lungo”, come riportato nella figura seguente.

Figura 10 – Meccanismi di rottura



Se i pali sono parte di un gruppo possono indursi meccanismi di rottura come illustrato in Figura 11.

Figura 11 – Meccanismi di rottura (da Fleming et al., 1985)



Il comportamento di un palo soggetto ad azioni orizzontali all'interno di un gruppo differisce da quello di un palo singolo ed isolato.

I principali fattori che influenzano la risposta di un gruppo di pali, e di ciascun singolo palo all'interno del gruppo, sono i seguenti:

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 35	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

- interazione reciproca palo-terreno-palo;
- interazione struttura di collegamento-terreno;
- caratteristiche di rigidità della struttura di collegamento.

Nel caso di un gruppo di pali soggetto a carichi orizzontali la rigidità della struttura di collegamento, caricata nel proprio piano, risulta notevolmente superiore a quella tagliente e flessionale dei pali, che si oppongono a spostamenti aventi direzione ortogonale al proprio asse. Con ottima approssimazione, sotto carichi orizzontali, si può ritenere la struttura di collegamento un elemento infinitamente rigido, e assumere che lo spostamento delle teste dei pali, vincolati nella piastra, siano tutti uguali tra loro. Eterogenea, viceversa, risulta la distribuzione dei carichi sui singoli pali del gruppo. Le prove di carico condotte su gruppi di pali pubblicate in letteratura confermano, senza eccezioni, la validità di tale assunzione.

In un gruppo di pali caricato da azioni orizzontali i fenomeni di interazione reciproca palo – terreno – palo determinano, complessivamente, una diminuzione della rigidità del sistema. In generale, a parità di carico medio per palo, lo spostamento in testa del gruppo di pali è maggiore dello spostamento di un palo isolato; allo stesso modo, a parità di spostamento in testa, il carico sopportato dal palo isolato è superiore al carico medio sopportato dal palo del gruppo.

Quantitativamente, l'intensità dell'interazione viene rappresentata definendo l'efficienza η di un gruppo di n pali; tale parametro indica il rapporto, a parità di spostamento in testa, tra il carico medio H_g/n agente su un palo del gruppo (H_g è il carico totale agente sul gruppo) ed il carico H_s agente su un palo singolo ed isolato, identico per caratteristiche a quelli del gruppo:

$$\eta = \frac{H_g}{n \cdot H_s}$$

I fenomeni di interazione divengono più rilevanti quanto più l'interasse tra i pali del gruppo è ridotto. Viceversa, l'interazione tende ad estinguersi al crescere della distanza tra i pali. Le evidenze sperimentali mostrano come gli effetti di interazione si attenuino notevolmente ad interassi di 5D (McVAY ET AL., 1995) e possano ritenersi nulli per interassi superiori a 6D (COX ET AL., 1984) (D = diametro del palo). In tal caso, ciascun palo del gruppo si comporta secondo modalità di palo singolo.


Per effetto delle interazioni reciproche che si verificano in un gruppo, i cui pali sono connessi da una struttura di collegamento infinitamente rigida non a contatto con il terreno, ciascun palo si comporta in maniera differente dagli altri. La diversità di comportamento si manifesta mediante un differente valore dello sforzo di taglio agente in testa a ciascun palo, differenti valori di momento flettente, diversa ubicazione del valore massimo di momento al variare della profondità (nell'ipotesi in cui il vincolo in testa al palo non sia un incastro). La modalità di risposta di ciascun palo è funzione essenzialmente dalla posizione geometrica che questo occupa all'interno del gruppo. Precisamente, la risposta del singolo palo all'interno del gruppo è condizionata:

- dalla fila di appartenenza all'interno del gruppo (effetto ombra o shadowing);
- dalla posizione all'interno della singola fila (effetto di bordo).

Il primo dei due fenomeni assume rilevanza maggiore. Principalmente, si osserva una notevole differenza nelle modalità di risposta della prima fila, che risulta più rigida, rispetto alle successive, che risultano più cedevoli. La prima fila (o fila frontale) è la prima nella direzione di avanzamento del gruppo ed è quella che spinge nel terreno indisturbato.

Il secondo dei due fenomeni induce, all'interno di una stessa fila, una concentrazione dei carichi sui pali di estremità, che risultano più caricati rispetto ai pali posti al centro.

In un gruppo di pali, il contemporaneo verificarsi di fenomeni di interazione sotto forma di effetto ombra (differente risposta dei pali a seconda della fila di appartenenza) e di effetto di bordo

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 36
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

(differente risposta dei pali a seconda della posizione nella fila) fa sì che, complessivamente, il gruppo di pali risulti più cedevole del corrispondente palo singolo. Il parametro che quantifica la riduzione della rigidezza del sistema è la già definita efficienza del gruppo η . Il valore assunto da tale parametro è, per pali disposti ad interasse ridotto, inferiore ad uno. Al crescere dell'interasse tra i pali l'efficienza tende al valore unitario, fino a divenire esattamente pari ad uno quando le distanze relative tra i pali sono tali da annullare ogni fenomeno di interazione.

Figura 12 – Fattori di riduzione per pali in linea “side by side effect”

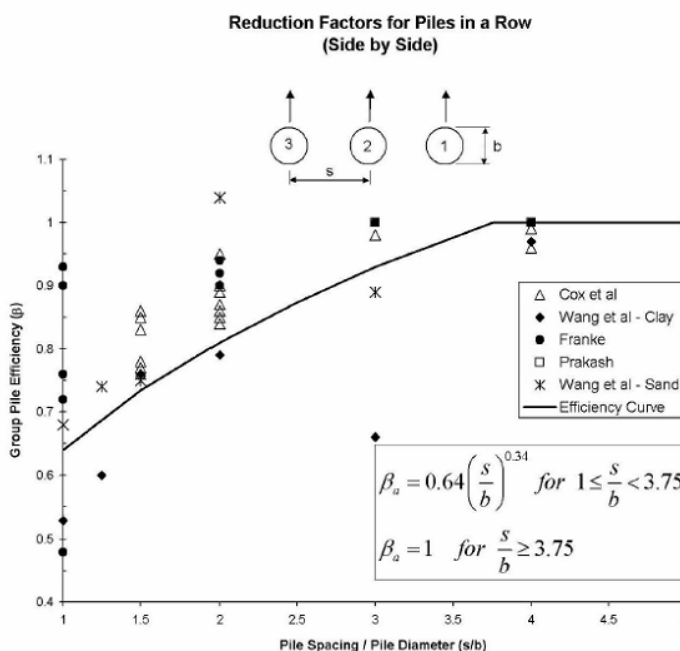
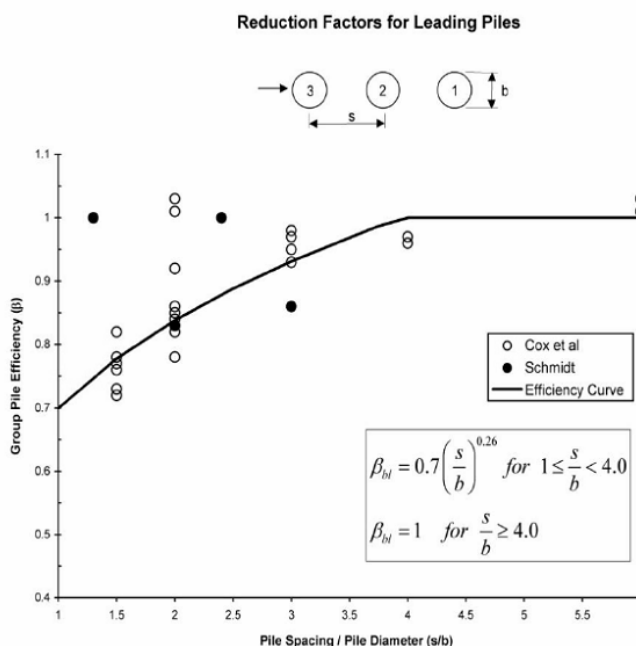


Figura 13 – Fattori di riduzione per pali in linea “leading effect”



	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 37
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

Figura 14 – Fattori di riduzione per pali in linea “side by side effect”

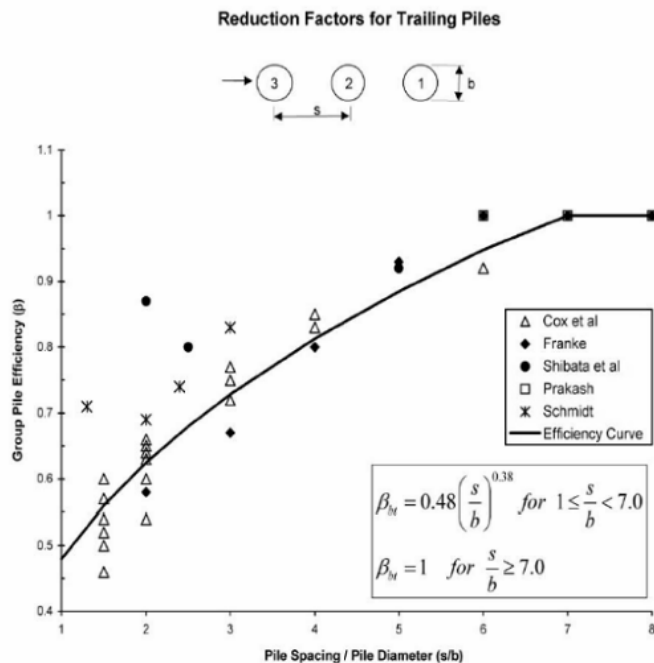
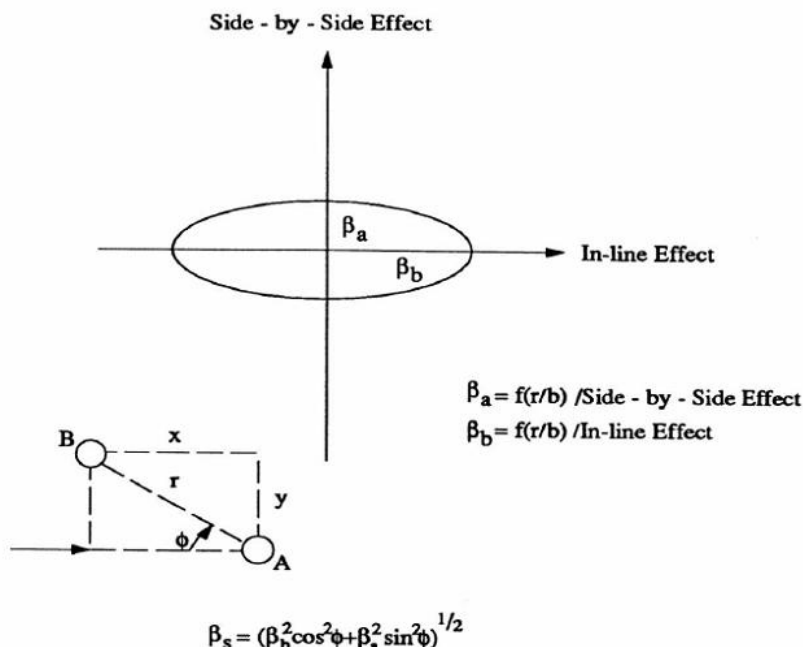


Figura 15 – Fattori di riduzione per pali in linea “Skewed effect”



La capacità portante orizzontale del gruppo di pali viene valutata con una analisi mediante il software L-pile (descritto al par. 7.6).

Per la determinazione del valore di progetto della resistenza dei pali soggetti a carichi trasversali valgono le indicazioni generali per i pali soggetti a carichi assiali applicando i coefficienti parziali γ_T di cui al prospetto seguente.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 38	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Tabella 17 – Coefficiente parziale γ_T per le verifiche agli stati limite ultimi di pali soggetti a carichi trasversali (NTC 2018, Tabella 6.4.VI)

Coefficiente parziale (R3)
$\gamma_T = 1,3$

La resistenza di progetto è data dalla seguente relazione:

$$R_{tr,d} = \frac{R_{tr,k}}{\gamma_T} = \frac{R_{tr,cal}}{\xi_3 \cdot \gamma_T}$$

Ai fini della verifica di tipo GEO della capacità portante orizzontale del gruppo di pali, la resistenza di calcolo orizzontale del gruppo di pali viene determinata da una analisi con L-pile in cui le curve p-y sono ridotte del fattore $\xi_3 \cdot \gamma_T$ e si tiene conto dell'interazione fra i pali (effetto ombra) mediante un coefficiente η (determinato come da Figura 14).

L'analisi viene svolta considerando come azione sollecitante la risultante dei tagli nelle due direzioni e considerando un vincolo di incastro alla testa del palo. Si controlla che il momento sollecitante sui pali ($M_{max,palo}$) sia inferiore al momento resistente MRd calcolato con l'effettivo sforzo normale agente.

Il valore del taglio resistente della palifica $R_{gruppo,tr,y}$ o $R_{gruppo,tr,z}$ è quello che porta al raggiungimento di MRd sul palo più sollecitato.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 39	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

7 METODOLOGIE E SOFTWARE DI CALCOLO

Le analisi strutturali e le verifiche sono state svolte in accordo a quanto prescritto dalle Norme Tecniche per le Costruzioni, considerando:

- per azioni statiche:
 - Stati Limite Ultimi (SLU)
 - Stati Limite di Esercizio (SLE)
- per azioni sismiche:
 - Stati Limite di salvaguardia della Vita umana (SLV)
 - Stati Limite di Danno (SLD – dove pertinenti)

Nell'analisi strutturale gli elementi strutturali sono considerati in regime elastico lineare.

Per l'analisi dell'interazione terreno struttura delle strutture di sostegno degli scavi, il comportamento del terreno viene schematizzato con modelli non lineari (si veda a tale proposito il par. 7.5.1).

Nei paragrafi seguenti sono descritti i principali software di calcolo utilizzati per l'analisi strutturale e geotecnica.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 40
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

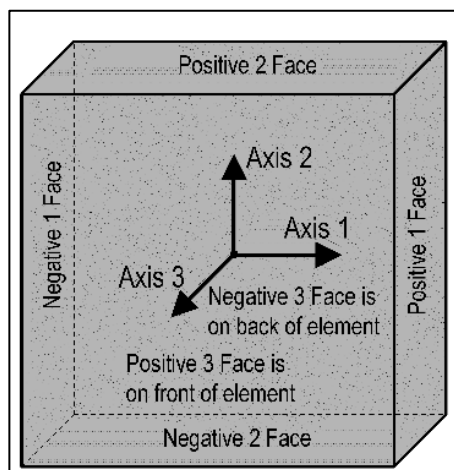
7.1 SOFTWARE PER L'ANALISI STRUTTURALE "SAP2000"

L'analisi dello stato tensionale e di deformazione nelle opportune combinazioni di carico è stato analizzato tramite modelli agli elementi finiti realizzati con il software di calcolo *SAP 2000 Advanced Vers.24.1.0* della "Computers & Structures Inc.", Berkeley – California (USA).

In generale per le opere interrato gli elementi strutturali solette e pareti verticali in calcestruzzo sono state modellati con l'impiego di elementi finiti bidimensionali di tipo "Shell".

Ogni elemento *shell* si articola in sei facce, visibili unitamente al sistema di riferimento locale in cui sono espresse le sollecitazioni interne nella prossima figura.

Figura 16 - Sistema di riferimento locale e indicazione delle facce in cui è articolato l'elemento *shell*



Le componenti di sollecitazione interna che insorgono negli elementi *shell* variamente caricati sono denominate: F_{11} , F_{22} , F_{12} , M_{11} , M_{22} , M_{12} , V_{12} e V_{23} e sono rappresentate graficamente nella seguente figura.


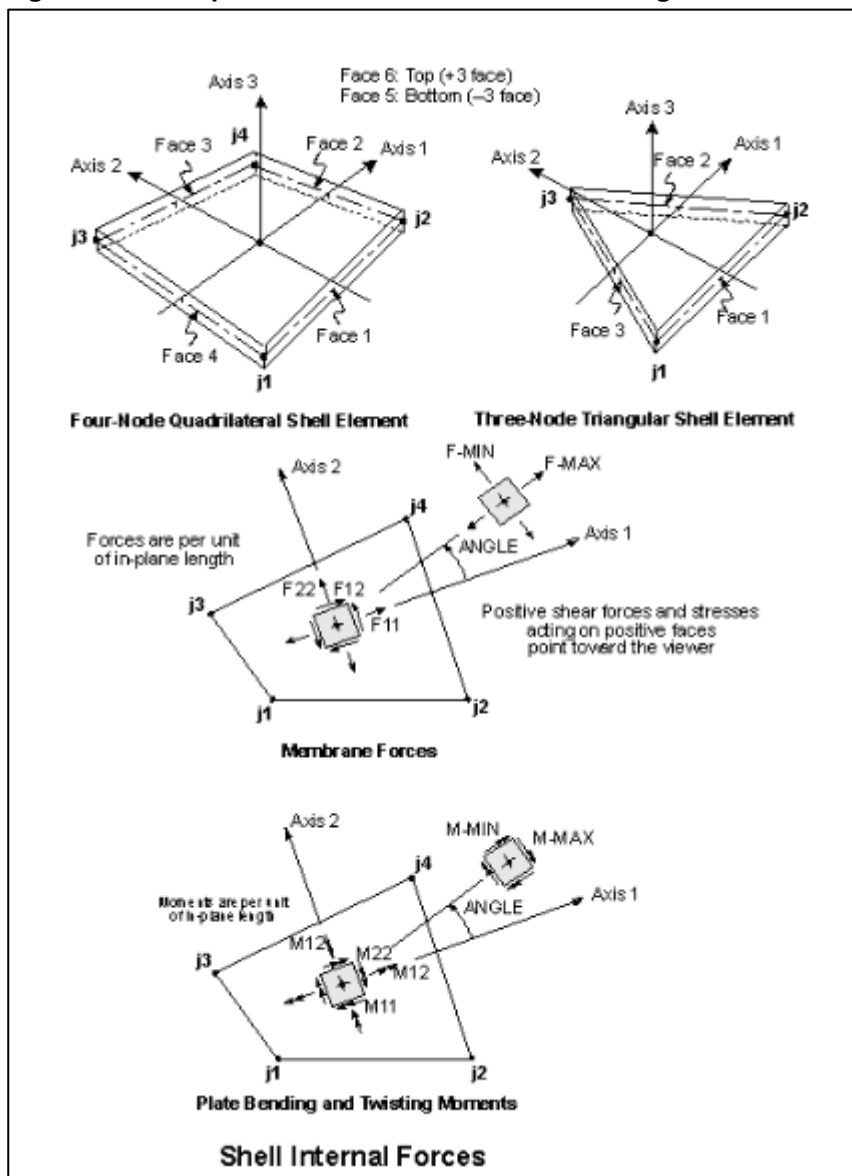
	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 41
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

Figura 17 – Componenti di sollecitazione interna negli elementi *shell*



Le componenti di sollecitazione interna sono:

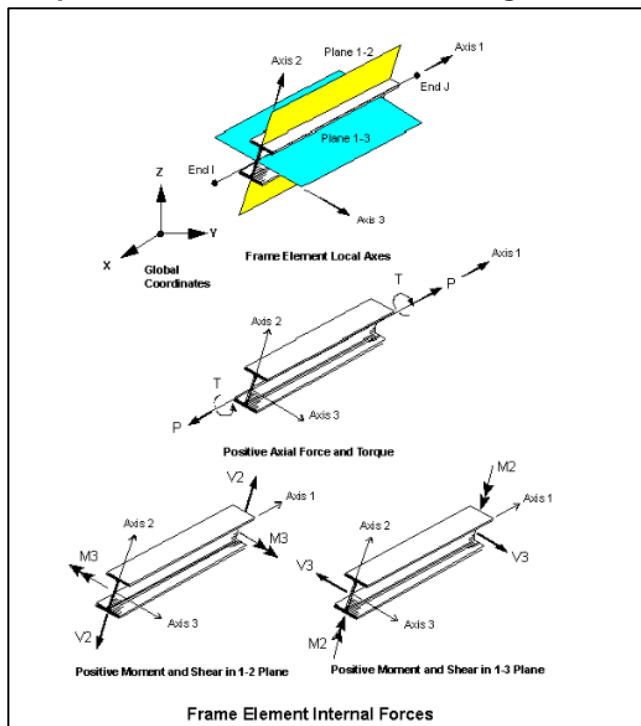
- F_{11} azione membranale diretta lungo l'asse 1 (positiva se di trazione) ;
- F_{22} azione membranale diretta lungo l'asse 2 (positiva se di trazione) ;
- M_{11} momento flettente di asse vettore 2 (positivo se comprime le fibre posizionate sulla faccia positiva dell'elemento, cioè la faccia nel verso dell'asse 3) ;
- M_{22} momento flettente di asse vettore 1 (positivo se comprime le fibre posizionate sulla faccia positiva dell'elemento, cioè la faccia nel verso dell'asse 3) ;
- $M_{12} = M_{21}$ momento torcente nel piano 1-2;
- V_{13} azione tagliante agente nel piano 1-3 ;
- V_{23} azione tagliante agente nel piano 2-3 .

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 42
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

La modellazione di strutture metalliche provvisionali, travi di coronamento e puntelli in c.a. definitivi di alcune opere interrato è stata eseguita mediante elementi finiti monodimensionali di tipo “frame”.

Le componenti di sollecitazione interna che insorgono negli elementi *frame* variamente caricati sono denominate: P, V₂, V₃, M₂, M₃, T e sono visibili nella seguente figura:

Figura 18 – Componenti di sollecitazione interna negli elementi *frame*



Brevemente si riporta a seguire il significato delle varie componenti di sollecitazione interna:

- P sforzo normale diretto lungo l’asse 1 (positivo se di trazione) ;
- V₂ azione tagliente diretta lungo l’asse 2 (piano 1-2);
- V₃ azione tagliente diretta lungo l’asse 3 (piano 1-3);
- M₂ momento flettente di asse vettore 2 (piano 1-3);
- M₃ momento flettente di asse vettore 3 (piano 1-2);
- T momento torcente di asse vettore 1.

7.2 SOFTWARE PER L’ANALISI STRUTTURALE “MIDAS GEN”

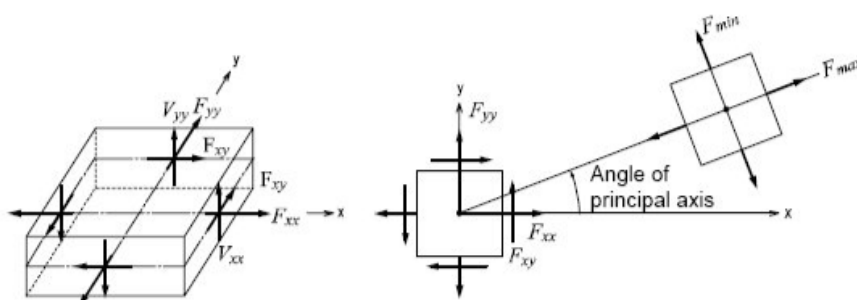
L’analisi dello stato tensionale e di deformazione di alcune opere interrato nelle opportune combinazioni di carico è stato analizzato tramite modelli agli elementi finiti realizzati con il software di calcolo *Midas Gen 2022 Vers.2.1* della “MIDAS Information Technology Co.,Ltd.

Per gli elementi strutturali platee e pareti verticali in calcestruzzo sono state modellati con l’impiego di elementi finiti bidimensionali di tipo “Plate”.

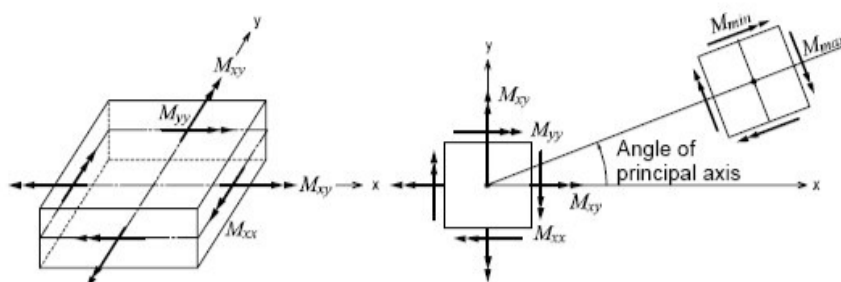
	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 43
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

Le componenti di sollecitazione interna che insorgono negli elementi *plate* variamente caricati sono denominate: F_{xx} , F_{yy} , F_{xy} , M_{xx} , M_{yy} , M_{xy} , V_{xx} e V_{yy} e sono rappresentate graficamente nella seguente figura.

Figura 19 – Componenti di sollecitazione interna negli elementi *plate*



(a) Force per unit length due to in-plane actions at the output locations



(b) Moments per unit length due to out-of plane bending actions at the output locations

Le componenti di sollecitazione interna sono:

- F_{xx} azione assiale per unità di larghezza nella direzione x locale(perpendicolare all' asse locale y-z);
- F_{yy} azione assiale per unità di larghezza nella direzione y locale(perpendicolare all' asse locale x-z);
- M_{xx} Momento flettente per unità di larghezza nella direzione dell'asse x locale (momento fuori piano rispetto all'asse y locale);
- M_{yy} Momento flettente per unità di larghezza nella direzione dell'asse y locale (momento fuori piano rispetto all'asse x locale);
- $M_{xy} = M_{21}$ momento torcente nel piano x-y;
- V_{xx} azione tagliante per unità di larghezza in direzione dello spessore lungo il piano y-z locale;
- V_{yy} azione tagliante per unità di larghezza in direzione dello spessore lungo il piano x-z locale;

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 44	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

7.3 SOFTWARE PER L'ANALISI STRUTTURALE "PROSAP"

L'analisi dello stato tensionale e di deformazione nelle opportune combinazioni di carico è stato analizzato tramite modelli agli elementi finiti realizzati con il software di calcolo "PRO_SAP PROfessional Structural Analysis Program" Vers. 22.5.2 della 2S.I. Software e Servizi per l'Ingegneria s.r.l. – Ferrara.

Gli elementi strutturali solette e pareti verticali in calcestruzzo armato sono state modellati con l'impiego di elementi finiti bidimensionali di tipo "Shell" (D3).

Gli elementi bidimensionali (shell / D3) sono definiti da tre o quattro nodi e formulati nello spazio. Per questi tipi di elementi sono definiti sei gradi di libertà: tre traslazioni e tre rotazioni. Sono definite le rigidità nel piano (membranal) e fuori dal piano (flessionali). Possono essere applicate variazioni termiche, carichi inerziali e carichi di pressione. PRO_SAP utilizza elementi Shell con 6 gradi di libertà per nodo che risolvono automaticamente il problema del drilling.

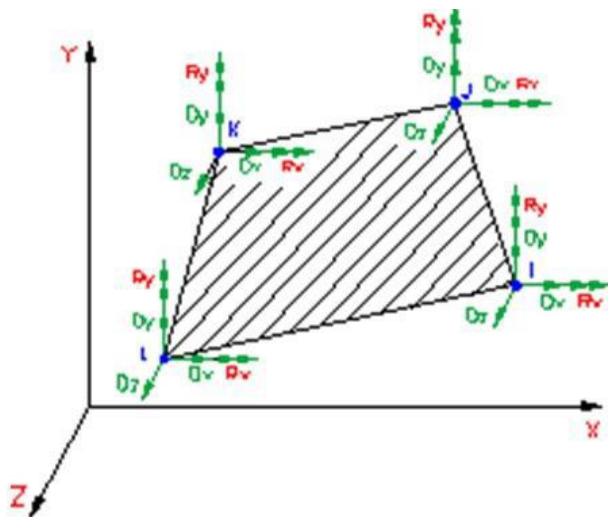


Fig. 8

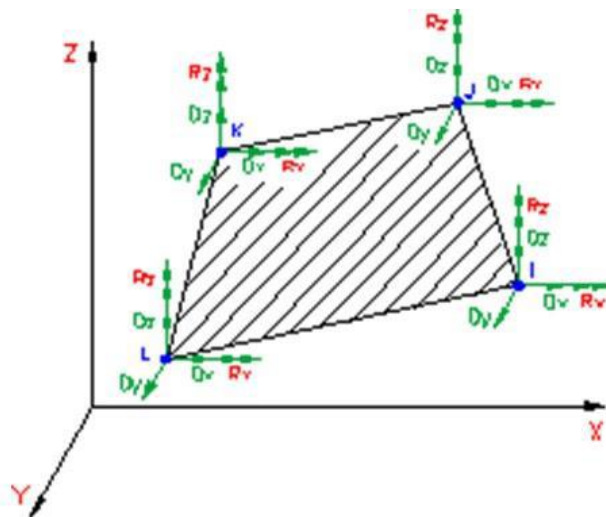


Fig. 9

Ogni elemento D3 è individuato da tre o quattro nodi (denominati in seguito I, J, K, L).

Le proprietà essenziali di un elemento D3 sono le seguenti:

- Tipo di elemento D3
- Spessore
- Materiale Direzione
- Criterio di progetto
- Layer
- Svincolo
- Filo fisso
- Pretensione
- Interazione terreno

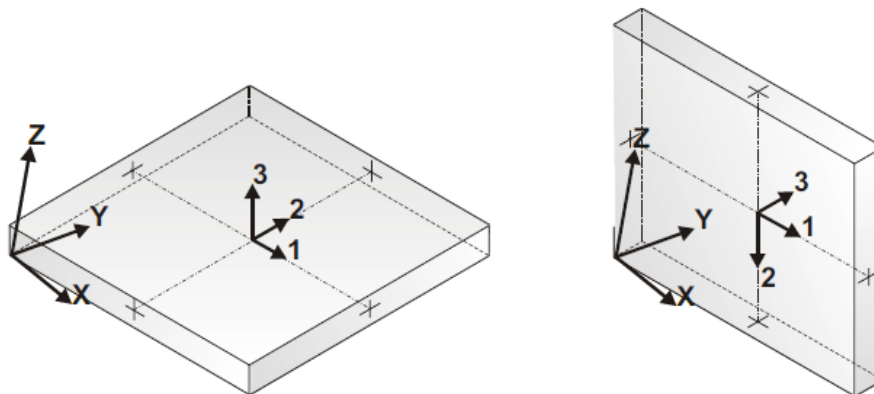
Sono previsti tre tipi di comportamento per gli elementi D3:

- Elemento a tre gradi di libertà per nodo (denominato Membrana)
- Elemento a cinque gradi di libertà per nodo (denominato Shell);
- Elemento a cinque gradi di libertà per nodo su suolo elastico alla Winkler (denominato

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 45	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Shell di fondazione)

Ad ogni elemento D3 è associato un sistema di riferimento locale destrogiro 1, 2, 3.



Il programma provvede automaticamente alla definizione ed all'orientamento del sistema. Gli assi 1 e 2 sono contenuti nel piano dell'elemento, l'asse 3 è ortogonale all'elemento. Il programma di norma dispone il sistema in modo che l'asse 3 sia diretto secondo l'asse globale Z positivo per gli elementi non verticali, e secondo l'asse globale X o Y positivo per gli elementi verticali.

Il posizionamento dell'elemento viene corretto fornendo un codice di filo fisso all'elemento.

Il programma segnala come avvertimento la presenza di nodi intermedi tra i nodi dell'elemento.

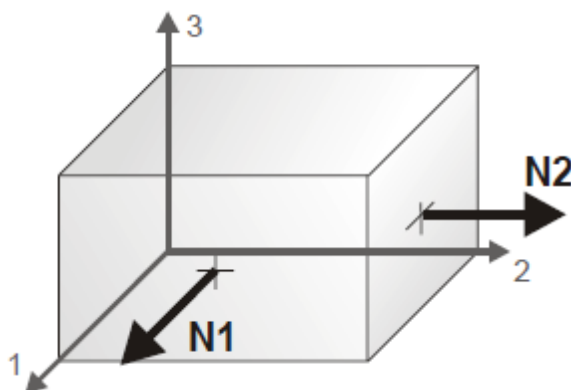
Il programma segnala come errore la coincidenza di due o più elementi D3.

Per effettuare la visualizzazione dei risultati relativi ad un singolo elemento D3 è necessario attivare i comandi sopra definiti, validi per qualsiasi tipologia di elemento, nella Finestra di controllo generale visualizzata sono riportati i seguenti risultati relativi all'elemento D3:

- Azioni D3

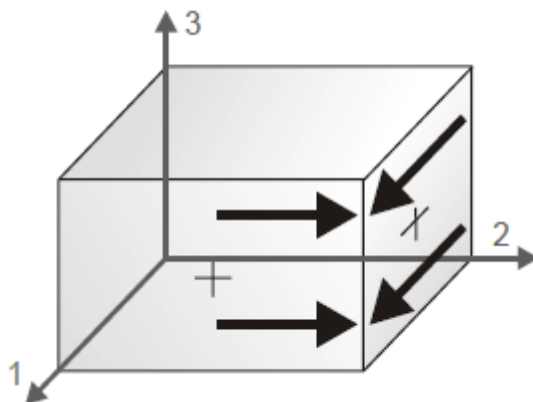
N 11: azioni che generano tensioni di compressione o trazione in direzione locale 1-1, il segno è positivo per tensioni di trazione

N 22: azioni che generano tensioni di compressione o trazione in direzione locale 2-2, il segno è positivo per tensioni di trazione



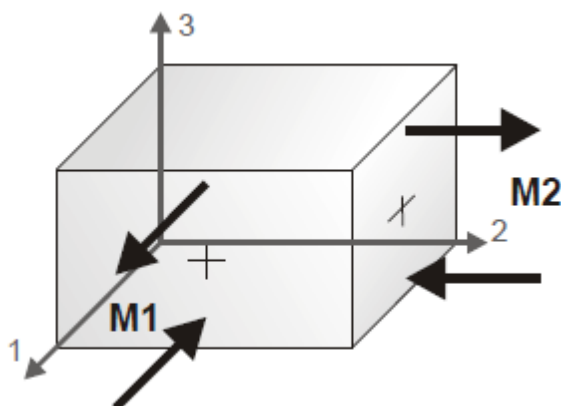
N 12: azioni tangenziali relative agli assi 1-2, il segno è positivo se sulla faccia 1 (faccia perpendicolare all'asse 1) dell'elemento, l'azione tangenziale è parallela ed equiversa all'asse 2

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 46	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

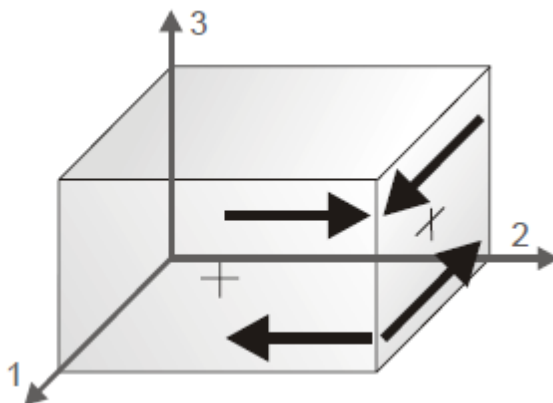


M 11: azioni di flessione che generano tensioni di compressione o trazione in direzione locale 1-1. Il segno è positivo se sono tese le fibre poste sulla faccia 3+ dell'elemento (faccia traslata del semi-spessore in direzione 3 positiva)

M 22: azioni di flessione che generano tensioni di compressione o trazione in direzione locale 2-2. Il segno è positivo se sono tese le fibre poste sulla faccia 3+ dell'elemento (faccia traslata del semi-spessore in direzione 3 positiva)



M 12: azioni di flessione che generano tensioni tangenziali relative agli assi 1-2. Il segno è positivo se sulla faccia 1 (faccia perpendicolare all'asse 1) dell'elemento, la tensione tangenziale delle fibre poste sulla faccia 3+ è parallela ed equiversa all'asse 2



	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 47	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

V1-3: azione di taglio in direzione 3 relativa alla faccia 1 (faccia perpendicolare all'asse 1) dell'elemento. Il segno è positivo se l'azione tagliante è parallela ed equiversa all'asse 3

V2-3: azione di taglio in direzione 3 relativa alla faccia 2 (faccia perpendicolare all'asse 2) dell'elemento. Il segno è positivo se l'azione tagliante è parallela ed equiversa all'asse 3.

7.4 SOFTWARE PER L'ANALISI STRUTTURALE "WINSTRAND"

L'analisi statica e dinamica dello stato tensionale e di deformazione nelle opportune combinazioni di carico delle strutture in elevazione è stato analizzato tramite modelli agli elementi finiti realizzati con il software di calcolo *WinStrand* della "En.Ex.Sys. s.r.l.", Via Tizzano 46/2 - Casalecchio di Reno (Bologna).

In generale per le opere in elevazione gli elementi strutturali finiti implementati, sono:


- Truss.
- Beam (Modellazione di Travi e Pilastri).
- Travi su suolo elastico alla Winckler.
- Plinti su suolo elastico alla Winckler.
- Elementi Shear Wall per la modellazione di pareti di taglio.
- Elementi shell (lastra/piastra) equivalenti.
- Elementi Isoparametrici a 8 Nodi Shell (lastra/piastra).

Gli schemi di carico implementati, sono:

- Carichi nodali concentrati.
- Carichi applicati direttamente agli elementi.
- Carichi Superficiali.

Tipo di Risoluzione implementati, sono:

- Analisi statica e/o dinamica in campo lineare con il metodo dell'equilibrio.
- Fattorizzazione LDL^T.
- Analisi Statica:
 - a. modellazione generale 6 gradi di libertà per nodo.
 - b. ipotesi di solai infinitamente rigidi nel proprio piano (3 gradi di libertà per nodo + 3 per impalcato).
- Analisi dinamica. (Nel caso di analisi modale gli autovettori ed autovalori possono essere calcolati mediante *subspace iteration* oppure tramite il *metodo dei vettori di Ritz*):
 - a. Via statica equivalente.
 - b. Modale con il metodo dello spettro di risposta.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 48
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

Per quanto riguarda i dati relativi ai nodi della struttura, le convenzioni adottate sono:

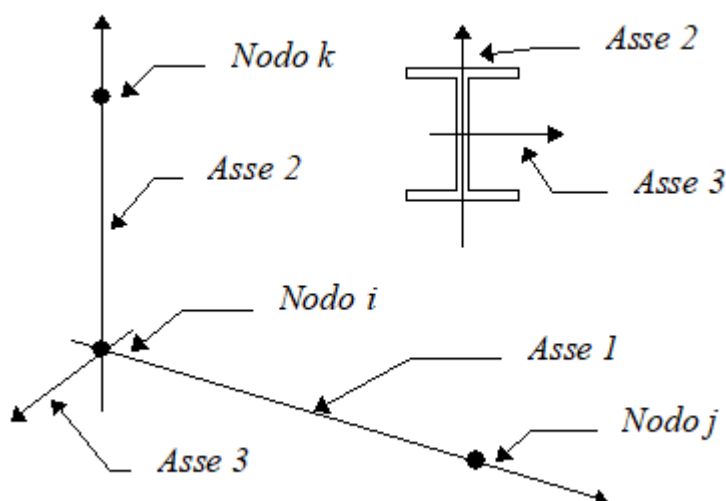
- La terna di riferimento generale è destrorsa.
- I nodi vengono numerati, con riferimento a una sezione orizzontale, da sinistra a destra, dal basso verso l'alto e per quote crescenti.
- L'impalcato di appartenenza di un nodo è definito, in generale, dalla prima delle tre cifre che ne definiscono il numero, possono tuttavia presentarsi casi in cui si hanno più di 100 nodi per solaio nel qual caso il solaio di appartenenza è specificato dall'ultimo valore stampato nella riga dei dati relativi al nodo.
- La maschera dei vincoli è costituita dai valori 0 e 1. Il valore 1 indica che per il nodo in riferimento il grado di libertà correlativo è soppresso mentre il valore 0 indica che è libero.
- Nel caso di edifici civili multipiano l'asse z generale coincide con l'asse verticale rivolto verso l'alto.

Per gli elementi tipo trave, le convenzioni adottate sono:

Ogni elemento tipo trave viene identificato da:

- Il nodo iniziale **i**;
- Il nodo finale **j**;
- Il nodo **k** che definisce l'orientamento nello spazio della terna riferimento locale dell'elemento.

La terna di riferimento locale della trave risulta essere così disposta:



Vengono riportati i valori di efficacia dei vincoli alle estremità dello elemento (variabili fra 0 e 100%), nei due piani 1-2 e 1-3 della trave in corrispondenza dei nodi, dando quindi la possibilità di considerare aste non perfettamente incastrate (coefficienti V_{i12} , V_{j12} , V_{i13} , V_{j13}).

Per le condizioni e le combinazioni di carico, le convenzioni adottate sono:

- Per quanto riguarda le condizioni di carico dinamiche, il programma assimila ogni direzione di ingresso del sisma, definita dal progettista, ad una condizione di carico.

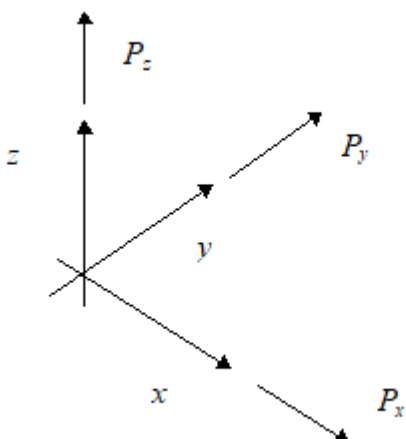
	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 49
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

Pertanto qualora agiscano sulla struttura **n** condizioni di carico statiche e il progettista abbia supposto che la struttura venga sollecitata da un sisma entrante in **m** direzioni, la struttura stessa viene considerata del programma come soggetta ad **n + m** condizioni di carico.

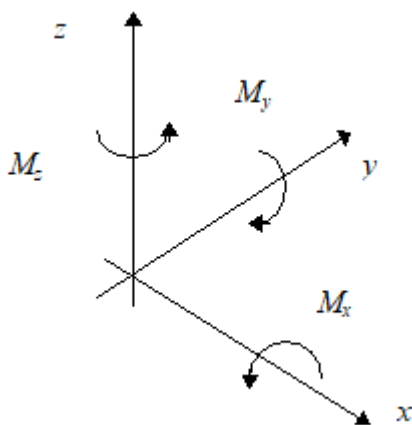
- Le combinazioni di carico, definite dal progettista, combinano fra loro le **n + m** condizioni di carico ognuna partecipante alla combinazione **i-esima** secondo i fattori di partecipazione. N.B.: se la condizione **j-esima** ha fattore di partecipazione unitario, allora partecipa per intero alla combinazione **i-esima**.
- Le prime **n** condizioni sono sempre statiche mentre sono di origine dinamica le (eventuali) condizioni da **n + 1** a **n + m**.

Per i carichi e coppie applicati ai nodi, le convenzioni adottate sono:

- La terna di riferimento generale è destrorsa per cui si hanno i seguenti segni positivi per i carichi o per le coppie direttamente applicati ai nodi:



- Versi positivi delle forze concentrate applicate ai nodi.



- Versi positivi delle coppie concentrate applicate ai nodi.
- per ogni nodo, su cui agiscono carichi concentrati, vengono denominate le componenti del carico (**P_x, P_y, P_z, M_x, M_y, M_z**) e la condizione di carico cui esse fanno riferimento.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 50	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Per i carichi applicati agli elementi, le convenzioni adottate sono:

- I carichi applicati si intendono applicati nel sistema di riferimento locale dell'elemento.

Per la lettura si definiscono:

Nodol, NodoJ

- I nodi iniziale/finale dell'asta o lato dell'elemento cui afferisce il carico

L

- La distanza fra i suddetti nodi.

qxi, ..., qzj

- Le componenti di un carico distribuito costante o variabile linearmente iniziali (indice i) e finale (indice j).

xi, xj

- Le distanze, misurate a partire dal Nodol, dei punti di applicazione dei carichi qxi..qzj relativi a carichi distribuiti applicati su porzioni di un'asta.

Px, ..., Pz xApp

- Le componenti di un Carico Concentrato applicato a distanza xApp dal Nodol.

Mx, ..., Mz xApp

- Le componenti di una Coppia Concentrata applicata a distanza xApp dal Nodol.

Var Termica Assiale, ..., Var Termica Farfalla 13

- Le variazioni termiche (Assiali ed a Farfalla) misurate in gradi Celsius.

mxi, ..., mzj

- Le componenti di coppie distribuite costanti o variabili linearmente iniziali (indice i) e finale (indice j).

qS_x, qS_y, qS_z

- carichi, per unità di superficie, applicati su elementi superficiali o facce di elementi solidi

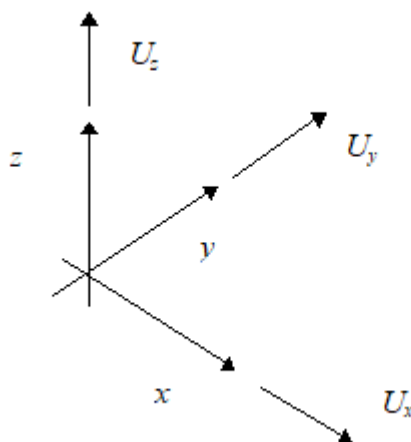
Peso Proprio

- Il valore del carico derivante dal peso proprio dell'elemento

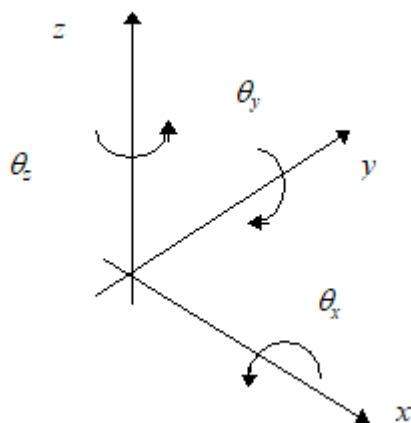
Per quanto riguarda gli spostamenti nodali, le convenzioni adottate sono:

- La terna di riferimento generale è destrorsa per cui si hanno i seguenti segni positivi per le componenti di spostamento nodale:

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 51
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

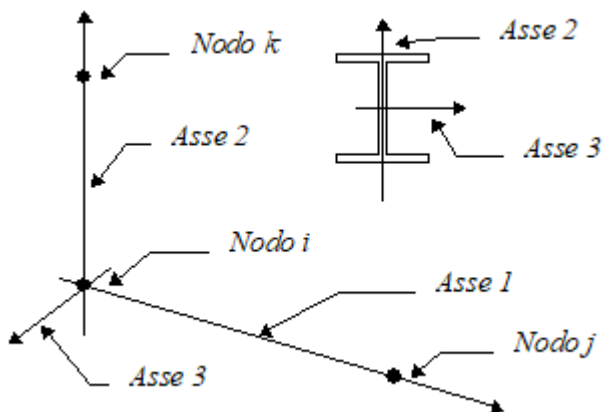


- e per quanto riguarda le rotazioni:



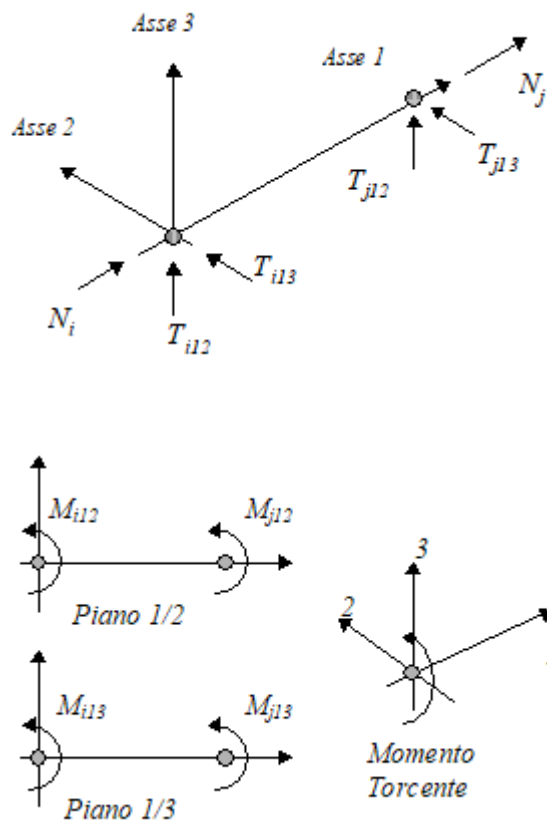
Per le sollecitazioni nelle travi, le convenzioni adottate sono:

- Le sollecitazioni nelle travi sono da intendersi nel sistema di riferimento locale dell'elemento, e si riferiscono all'asta. L'orientamento della trave nello spazio è definito a mezzo del nodo K .
- La terna di riferimento locale dell'asta è così disposta:



	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 52
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

- Per quanto concerne i segni positivi assunti per le varie componenti di sollecitazione si assumono come positivi i versi e le sollecitazioni se così diretti:



	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 53	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

7.5 SOFTWARE PER L'ANALISI DELL'INTERAZIONE TERRENO/STRUTTURA "PAR" (ANALISI DI OPERE FLESSIBILI DI SOSTEGNO DEL TERRENO)

7.5.1 DESCRIZIONE DEL METODO DI CALCOLO IMPLEMENTATO NEL SOFTWARE PAR

Al fine di rappresentare il comportamento dell'opera di sostegno durante le varie fasi di lavoro (scavo, inserimento tiranti ed eventuali riempimenti) è opportuno l'impiego di un metodo di calcolo iterativo atto a simulare l'interazione in fase elasto-plastica terreno-paratia.

Tra i possibili modelli di comportamento, è assai adatto alla rappresentazione analitica, ed alla successiva organizzazione nell'ambito di un programma di calcolo automatico, quello suggerito da M. Bertero e R. Lancellotta "Metodi di calcolo basati sul comportamento elasto-plastico del terreno-Torino 1979"; J. Balay - F. Harfouche "Programme pour le calcul des suotenements par la methode des modules de reaction (Denebola)".

Lo studio del comportamento di un elemento di paratia inserito nel terreno viene effettuato tenendo conto della deformabilità dell'elemento stesso, considerato in regime elastico, e soggetto alle azioni derivanti dalla spinta dei terreni, dalle differenze di pressione idrostatiche, dalle spinte dovute ai sovraccarichi esterni e dalla presenza degli ancoraggi.

La paratia viene discretizzata con elementi finiti monodimensionali a due gradi di libertà per nodo (spostamento orizzontale e rotazione).

Il terreno viene schematizzato secondo un modello elasto-plastico; esso reagisce elasticamente, con modulo di reazione E_s , sino a valori limite dello spostamento, raggiunti i quali la reazione corrisponde, a seconda del segno dello stesso spostamento, ai valori limite della pressione attiva o passiva.

Nella Figura 20 seguente si mostrano le relazioni costitutive per il terreno e per gli elementi di ancoraggio.

Si intende che gli spostamenti vengono computati a partire dalla situazione di spinta "a riposo".

Nella valutazione delle spinte si può tener conto dell'attrito terreno-paratia, o della coesione di adesione; non si prendono in considerazioni componenti di carico o di reazione verticali.

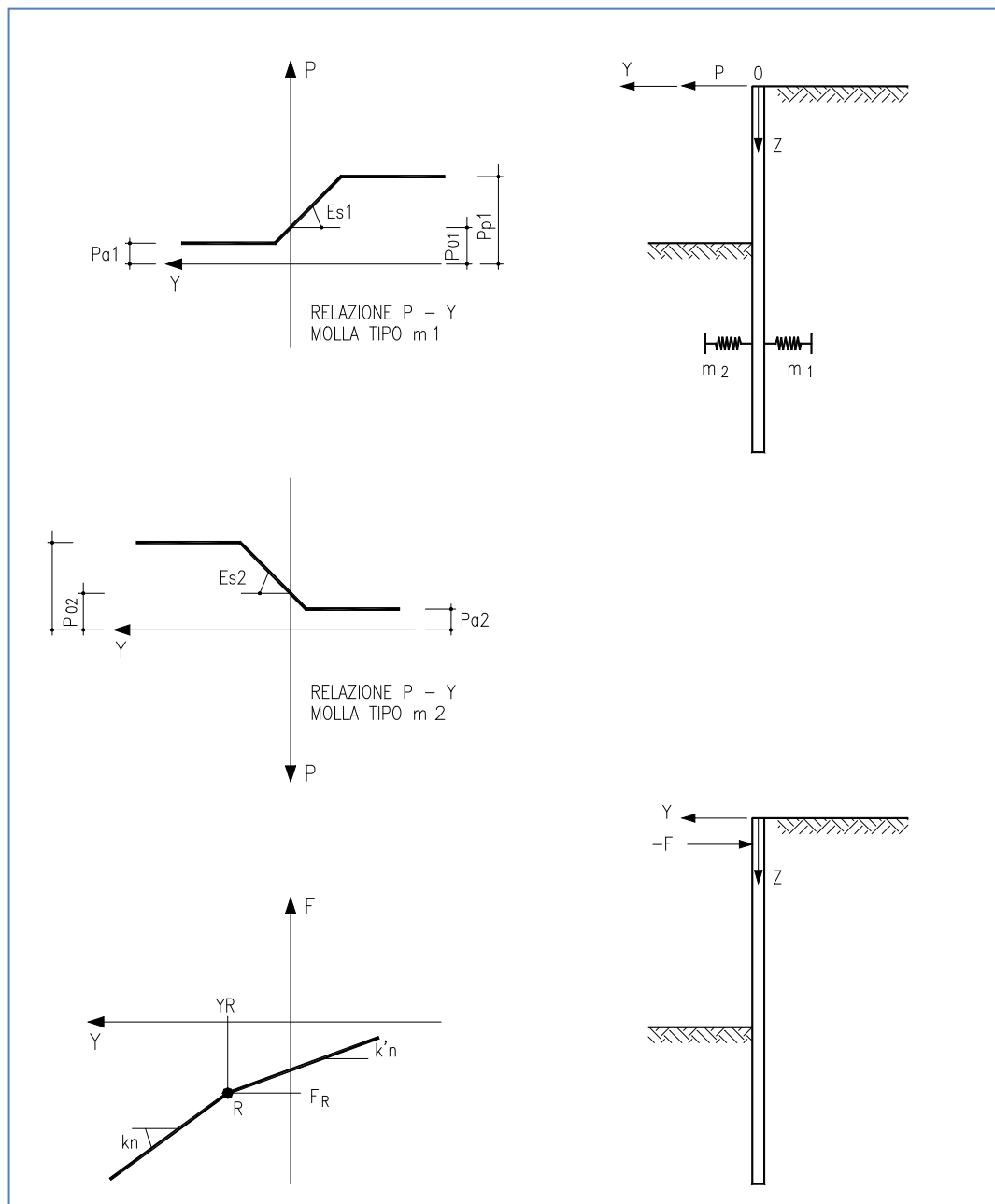
La relazione costitutiva è completa, cioè prevede cicli di carico e scarico, con variazioni dei parametri caratteristici, nel corso della esecuzione dell'opera.

Con tale metodo, si può quindi seguire analiticamente la successione delle fasi di costruzione, di carico e di ancoraggio consentendo, nei limiti della imperfetta conoscenza dei parametri, di fornire informazioni attendibili sull'entità delle deformazioni, e sugli effetti che esse inducono sul diagramma delle pressioni esercitate dal terreno sulla paratia.

L'impiego di tale approccio richiede la conoscenza, oltre che degli usuali parametri di spinta, anche di alcuni parametri caratteristici di tipo geotecnico definiti nel punto seguente.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 54	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Figura 20 – Relazioni costitutive per il terreno e per i contrasti



7.5.2 DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI CALCOLO

In base ai parametri geotecnici delle varie unità stratigrafiche, in accordo al metodo di calcolo discusso al punto precedente, si possono determinare:

- pressione attiva – condizioni drenate:

$$P_a = \sigma'_v \cdot k_a - c' \cdot k_{ac} \quad [F \cdot L^{-2}]$$

dove: σ'_v = tensione verticale efficace [F · L⁻²]

c' = coesione [F · L⁻²]

k_a, k_{ac} = coefficienti di spinta attiva valutati tenendo conto di un angolo di attrito terreno $\delta_a = (2/3)\phi'$.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 55	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

I coefficienti sono valutati k_a in condizioni di deformazione piana tenendo conto di superfici di rottura curvilinee (vedasi Figura 21 tratta da Caquot e Kerisel "Tables for the calculation of passive pressure, active pressure and bearing capacity of foundations" 1948 - NAVFAC DM 7.2 1971).

Il coefficiente k_{ac} (affidente ai termini coesivi) è valutato con l'espressione $k_{ac} = 2 \cdot (k_a)^{0.5}$.

- pressione attiva – condizioni non drenate:

$$P_a = \sigma'_v - c_u \cdot k_{ac} \quad [F \cdot L^{-2}]$$

dove: σ'_v = tensione verticale efficace [F · L⁻²]

c_u = coesione non drenata [F · L⁻²]

Il coefficiente k_{ac} (affidente ai termini coesivi) è valutato come:

– $k_{ac} = 2.40$ per $c_u \leq 80$ kPa

– $k_{ac} = 2.20$ per $c_u > 80$ kPa

tenendo in conto l'adesione terreno – paratia.

- pressioni orizzontali dovute ai carichi esterni:

$$P_q = q \cdot k_0 \quad [F \cdot L^{-2}]$$

dove: q = carico verticale uniformemente distribuito

deve risultare: $P_a + P_q \geq 0$.

- pressione passiva – condizioni drenate:

$$P_p = \sigma'_v \cdot k_p + c' \cdot k_{pc} \quad [F \cdot L^{-2}]$$

dove: k_p, k_{pc} = coefficienti di spinta passiva valutati tenendo conto di un angolo di attrito terreno paratia $\delta_p = \phi'/2 \leq 15^\circ$.

I coefficienti k_p sono valutati in condizioni di deformazione piana tenendo conto di superfici di rottura curvilinee (vedasi Figura 21 tratta da Caquot e Kerisel "Tables for the calculation of passive pressure, active pressure and bearing capacity of foundations" 1948 - NAVFAC DM 7.2 1971).

Il coefficiente k_{pc} (affidente ai termini coesivi) è valutato con l'espressione $k_{pc} = 2 \cdot (k_p)^{0.5}$.

- pressione passiva – condizioni non drenate:

$$P_a = \sigma'_v - c_u \cdot k_{ac} \quad [F \cdot L^{-2}]$$

dove: σ'_v = tensione verticale efficace [F · L⁻²]

c_u = coesione non drenata [F · L⁻²]

Il coefficiente k_{pc} (affidente ai termini coesivi) è valutato come:

– $k_{pc} = 2.40$ per $c_u \leq 50$ kPa

– $k_{pc} = 2.20$ per $c_u > 50$ kPa

tenendo in conto l'adesione terreno – paratia.

- pressione a riposo:

$$P_0 = \sigma'_v \cdot k_0$$

[F.L-2]

dove: k_0 = coefficiente di spinta a riposo.

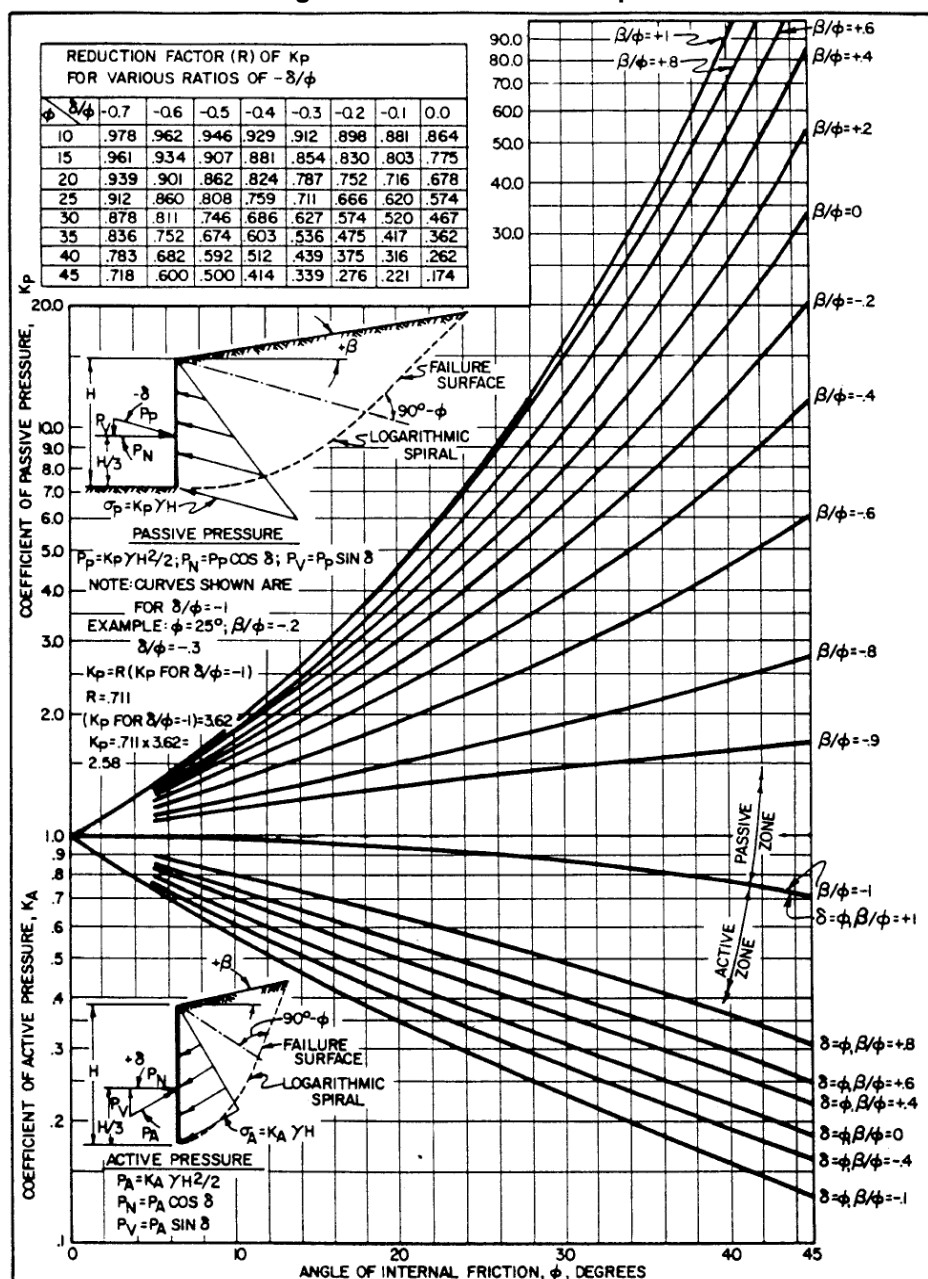
Gli effetti della sovraconsolidazione indotti dalle operazioni di scavo possono essere presi in considerazione facendo riferimento alla espressione seguente:

$$k_{0(\text{post})} = k_{0(\text{pre})} \cdot \text{OCR}^\beta = [1 - \sin(\phi')] \cdot \text{OCR}^\beta$$

dove: OCR = (Over Consolidation Ratio) = rapporto fra le tensioni verticali efficaci prima e dopo lo scavo;

β = esponente dipendente dal tipo di terreno.

Figura 21 – Coefficienti di spinta



	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 57	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

- moduli di reazione orizzontali del terreno:

Si può fare riferimento alla relazione proposta da Janbu (1972)

$$E_s = m \cdot P_r \cdot (P_0 / P_r)^\alpha \quad [F \cdot L^{-2}]$$

dove: m = coefficiente dipendente dal tipo e dalla compressibilità del terreno;

P_0 = pressione a riposo;

P_r = pressione di riferimento = 100 kPa;

α = esponente funzione del tipo di terreno.

Tabella 18 – Valori tipici dei coefficienti m , α e β

SABBIE		ARGILLE			α	β
ϕ	m	c_u	m	SABBIE	0.5	0.4
27	160	12.5	30	LIMI	0.70 - 0.80	0.40 - 0.45
29	185	25	40	ARGILLE	0.90 - 1.00	0.5
30	220	50	60			
32	250	100	105			
33	280	200	200			
35	310					
36	340					
38	380					

- azioni aggiuntive in presenza di sisma nell'ipotesi di opera flessibile (metodo dei coefficienti di spinta pseudostatici)

Le azioni indotte dal sisma sono state ottenute prevedendo un incremento dei coefficienti di spinta attiva e una riduzione di quelli di spinta passiva rispetto alle condizioni non sismiche (metodi pseudostatici).

In condizioni pseudostatiche, il terreno a tergo della parete è soggetto all'azione del peso dell'unità di volume γ' e delle forze di volume $(k_h \cdot \gamma')$ e $(k_v \cdot \gamma')$, che rappresentano le componenti orizzontale e verticale dell'azione statica equivalente al sisma. La forza di volume risultante è quindi inclinata rispetto alla verticale di un angolo

$$\theta = \arctan\left(\frac{k_h}{1 \pm k_v}\right)$$

Il problema pseudostatico può essere ricondotto ad un problema statico equivalente operando una rotazione θ del sistema di riferimento, in modo da far assumere alla forza di volume risultante la direzione verticale. Con questa trasformazione, ci si riconduce al problema della determinazione della spinta attiva o della resistenza passiva agenti su una parete scabra, inclinata sulla verticale di un angolo θ e interagente con un terreno delimitato da un piano campagna di inclinazione $(i + \theta)$, con θ positivo o negativo in dipendenza delle condizioni considerate (attive o passive) e i angolo di inclinazione reale del terrapieno.

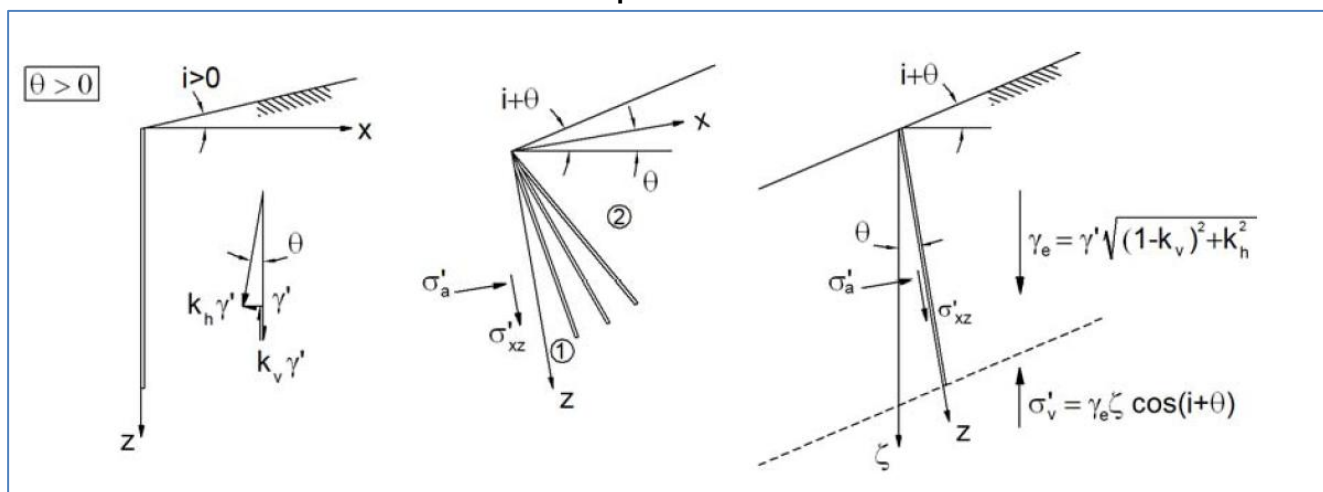
L'incremento di spinta attiva è valutato secondo la teoria di Mononobe-Okabe.

Viene considerato un angolo di attrito terreno / opera di sostegno pari a $\delta_a = (2/3)\phi'$.

Ulteriori dettagli riguardanti la trattazione della spinta attiva dei terreni soggetti ad accelerazioni sismiche secondo Mononobe-Okabe si può fare riferimento all'appendice E di UNI EN 1998-5:2005 (Eurocodice 8 parte 5).

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 58	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Figura 22 – Rotazione degli assi di riferimento per la valutazione del coefficiente di spinta attiva con il metodo pseudostatico

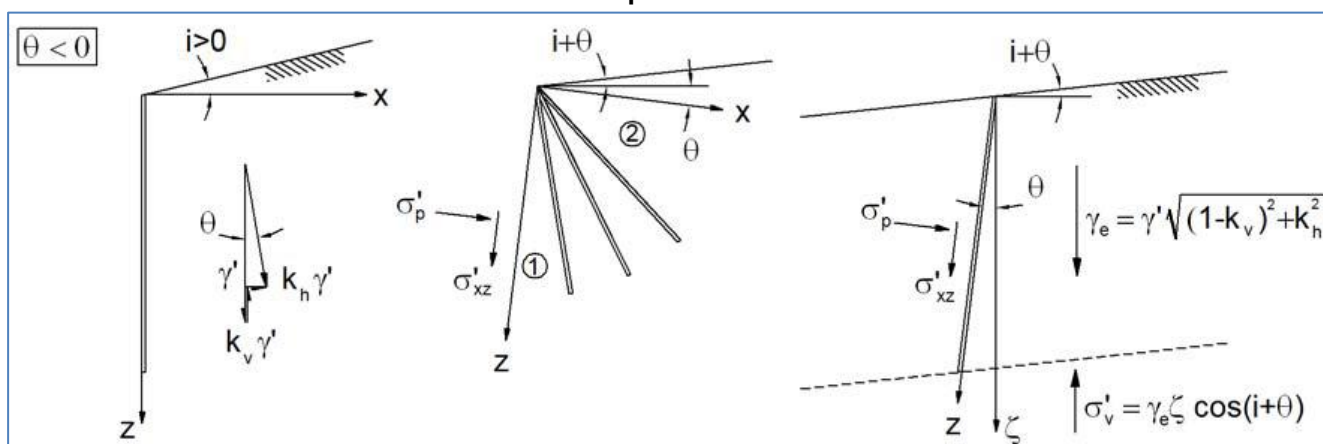


La riduzione della spinta passiva dovuta al sisma è valutata secondo la trattazione di R. Lancellotta del 2007 (“metodo dell’estremo inferiore”).

Viene considerato un angolo di attrito terreno / opera di sostegno pari a $\delta_p = (1/2)\phi' < 15^\circ$.

Ulteriori dettagli riguardanti la trattazione della spinta passiva dei terreni soggetti ad accelerazioni sismiche secondo il metodo di Lancellotta si possono trovare in “R. Lancellotta – Geotechnical Engineering”, seconda edizione, Taylor & Francis, 2009.

Figura 23 – Rotazione degli assi di riferimento per la valutazione del coefficiente di spinta passiva con il metodo pseudostatico



	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 59
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

In mancanza di studi specifici, a_h può essere legata all'accelerazione di picco a_{max} attesa nel volume di terreno significativo per l'opera mediante la relazione:

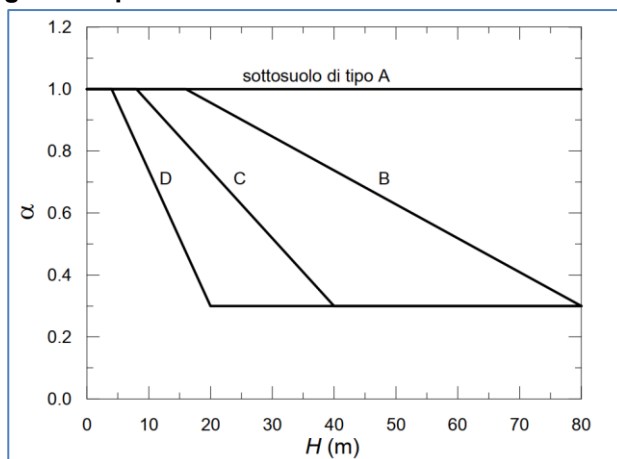
$$a_h = k_h \cdot g = \alpha \cdot \beta \cdot a_{max}$$

da cui:

$$k_h = \alpha \cdot \beta \cdot \frac{a_{max}}{g}$$

Il coefficiente $\alpha \leq 1.00$ è un coefficiente che tiene conto della deformabilità dei terreni interagenti con l'opera. Per le condizioni di spinta attiva il valore di α deriva dalla lunghezza totale della paratia H e dal tipo di sottosuolo secondo il grafico riportato di seguito (NTC2018, Fig. 7.11.2); per le condizioni di spinta passiva si adotta $\alpha=1.00$.

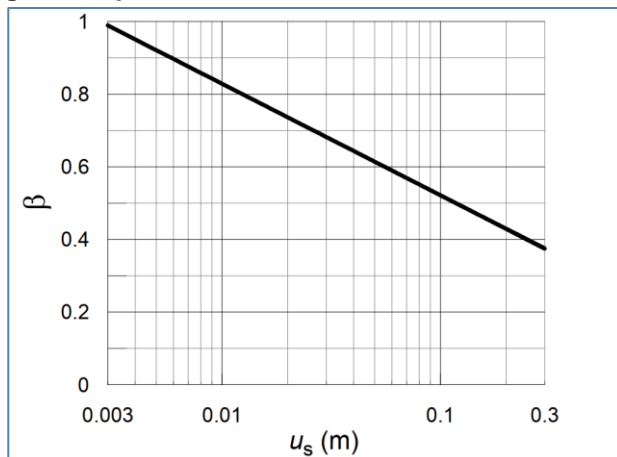
Figura 24 – Diagramma per la determinazione del coefficiente di deformabilità α




Il coefficiente $\beta \leq 1.00$ è funzione della capacità dell'opera di subire spostamenti senza subire cadute di resistenza. Il valore del coefficiente β può essere ricavato dal diagramma seguente (NTC2018, Fig. 7.11.3), in funzione del massimo spostamento permanente u_s che l'opera può tollerare, verificando l'effettivo sviluppo di meccanismi duttili nel sistema.

Per $u_s = 0$ si ha $\beta=1.00$. Deve comunque risultare $u_s \leq 0,005 \cdot H$.

Figura 25 – Diagramma per la determinazione del coefficiente di spostamento β



	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 60	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Indipendentemente dai valori assunti per i coefficienti α e β si deve assumere un valore minimo del coefficiente sismico orizzontale $k_h = 0.20 \cdot a_{max}$.

Per la determinazione dei valori di a_{max} si rimanda al paragrafo 8.6.

Il valore di a_v , ovvero k_v , è posto pari a zero, in accordo a quanto previsto per le paratie dalle Norme Tecniche per le Costruzioni.

Vengono trascurati gli effetti inerziali sulle masse che costituiscono la paratia, come previsto dalle attuali Norme Tecniche per le Costruzioni.

Sulla base di quanto riportato nelle NTC2008 [Ref. 18] è necessario considerare la spinta idrodinamica dell'acqua disaccoppiata rispetto alla spinta dello scheletro solido se la permeabilità dei terreni a monte delle opere di sostegno è inferiore a $5 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Figura 26 – Estratto dal paragrafo 7.11.6.2.1 delle NTC 2008

Per opere particolari con terrapieno in falda, quali le opere marittime, si devono distinguere due differenti condizioni:

- permeabilità del terreno bassa ($k < 5 \cdot 10^{-4}$ m/s), in cui l'acqua interstiziale si muove insieme allo scheletro solido;
- permeabilità del terreno elevata ($k > 5 \cdot 10^{-4}$ m/s), in cui l'acqua interstiziale si muove rispetto allo scheletro solido.

Nel primo caso, per la valutazione dell'azione inerziale il terreno può essere trattato come un mezzo monofase.

Nel secondo caso, gli effetti indotti dall'azione sismica sullo scheletro solido e sull'acqua devono essere valutati separatamente (analisi disaccoppiata).

- azioni aggiuntive in presenza di sisma nell'ipotesi di opera indeformabile (metodo di Wood)

Nell'ipotesi di opera indeformabile il sovraccarico dovuto all'azione sismica si può modellare, secondo la teoria di Wood, come una spinta aggiuntiva orizzontale che viene applicata nel tratto in luce del diaframma.

Il valore della spinta orizzontale vale:

$$\Delta q = k_h \cdot \gamma \cdot H$$

dove:

- $k_h = \frac{a_{max}}{g}$ avendo assunto $\alpha = 1.00$ e $\beta = 1.00$;
- γ è il peso per unità di volume del terreno;
- H è la luce libera dell'opera.

Sulla base delle considerazioni riportate in precedenza si trascura la componente verticale dell'azione sismica e gli effetti inerziali sulle masse che costituiscono la paratia.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 61	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

- modellazione del terreno a seguito di liquefazione

La liquefazione è un fenomeno che si manifesta in concomitanza di eventi sismici di una certa intensità e che interessa terreni sabbiosi sciolti posti al di sotto del livello di falda. A seguito del sisma si genera un incremento della pressione interstiziale tale da causare l'annullamento delle pressioni efficaci quindi, nell'assunzione di terreno con comportamento drenato, l'annullamento della resistenza al taglio.

Il terreno liquefatto diviene quindi schematizzabile come un terreno a comportamento prettamente non drenato dotato di una piccola resistenza residua.

I coefficienti di spinta assunti per modellare il comportamento del terreno liquefatto sono quindi:

- $k_0 = k_a = k_p = 1.00$;
- $k_{ac} = 2\sqrt{k_a} = 2.00$;
- $k_{pc} = 2\sqrt{k_p} = 2.00$.

Per la resistenza a taglio residua si fa riferimento a quanto indicato nel paragrafo 5.5.

7.6 SOFTWARE PER L'ANALISI NON LINEARE DI PALI SOGGETTI A FORZE TRASVERSALI "LPILE"

Per l'unica opera in elevazione fondata su pali trivellati prevista nell'impianto, viene eseguita l'analisi della fondazione su pali mediante il software L-Pile v.2019.11.09 (ENSOFT Inc.).

Le reazioni dedotte dal modello strutturale dell'elevazione vengono applicate in testa palo e tramite il software è possibile analizzare tensioni e deformazioni di un singolo palo sottoposto a carichi laterali e momenti flettenti.

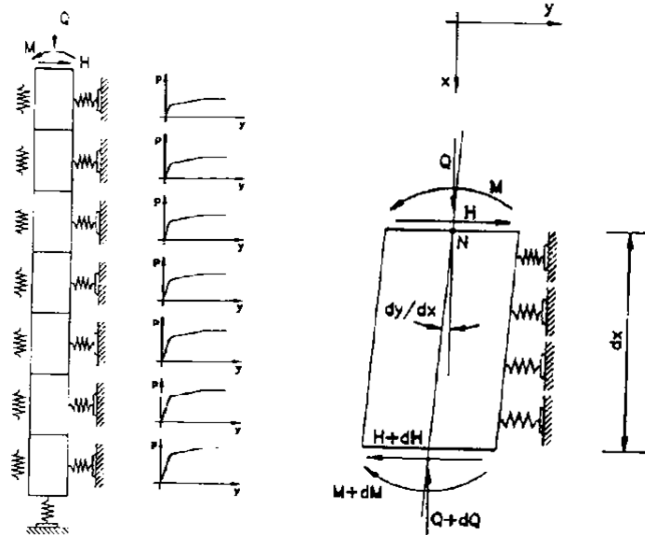
La valutazione delle sollecitazioni lungo il fusto del palo singolo soggetto a forze orizzontali (V) e momenti flettenti (M) applicati in testa al palo, viene condotta con il metodo alle differenze finite, impiegando un modello di interazione tra palo e terreno del tipo alla Winkler.

L'analisi del singolo palo viene effettuata secondo il metodo "p-y", risolvendo equazioni differenziali usando curve carico-spostamento, denominate curve p-y. Il programma di calcolo computa deformazioni, momenti flettenti, tagli e risposta del terreno lungo il fusto del palo, secondo la trattazione descritta nel seguito.

Il palo viene suddiviso in conci, ognuno di essi sottoposto ad uno schema di sforzi rappresentato nella successiva figura.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 62
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

Figura 27 – Modello di interazione palo-terreno e sollecitazioni agenti sul singolo concio



La reazione che il terreno oppone contro il palo lungo il suo sviluppo presenta una componente normale schematizzabile con una molla con caratteristiche di tipo elastico-non lineare-plastico (curve p-y).

Le equazioni di equilibrio che governano il problema sono le seguenti (per il significato dei simboli si rimanda alla Figura 27).

$$H - p \cdot dx - (H + dH) = 0 \quad (1)$$

$$M - (Q + dQ) \cdot dx \cdot \frac{dy}{dx} - (H + dH) \cdot dx - (M + dM) - p \cdot dx \cdot \frac{dx}{2} = 0 \quad (2)$$

Trascurando i termini di secondo ordine si ottiene:

$$dH = -p \cdot dx \quad (1b)$$

$$-Q \cdot dx \cdot \frac{dy}{dx} - H \cdot dx - dM = 0 \quad (2b)$$

La caratteristica meccanica delle molle non lineari che schematizzano la reazione del terreno ai carichi laterali è data dalla seguente espressione:

$$p = -E_s \cdot y \quad (3)$$

con:

$$E_s = \text{modulo di reazione orizzontale secante del terreno} \quad [\text{FL-2}]$$

$$y = \text{lo spostamento orizzontale} \quad [L]$$

Sostituendo l'espressione (3) nelle equazioni di equilibrio e differenziando la (1b) e (2b) rispetto a x si ottengono:

$$\frac{dH}{dx} = E_s \cdot y \quad (4)$$

$$\frac{dM}{dx} = -Q \cdot \frac{dy}{dx} - H \quad (5)$$

Differenziando ulteriormente la (5) si ottiene:

$$\frac{d^2M}{dx^2} = -\frac{d}{dx} Q \cdot \frac{dy}{dx} - E_s \cdot y \quad (6)$$

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 63	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

L'equazione della linea elastica è:

$$M = -E_p \cdot I_p \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} \quad (7)$$

con:

$$E_p = \text{modulo elastico del calcestruzzo} \quad (\text{FL-2})$$

$$I_p = \text{modulo di inerzia del palo} \quad (\text{L4})$$

Sostituendo la (7) nella (6) e trascurando i termini di secondo ordine si ottiene:

$$E_p \cdot I_p \cdot \frac{d^4 y}{dy^4} - Q \cdot \frac{d^2 y}{dx^2} - E_s \cdot y = 0 \quad (8)$$

La soluzione della (8) è la linea elastica del palo: considerando il comportamento non lineare di E_s (variabile in funzione dello stato tensionale), la soluzione viene dedotta attraverso il metodo delle differenze finite attraverso successive iterazioni.

Se Y_i è lo spostamento orizzontale del baricentro del singolo elemento di palo e h è la sua altezza, si ha:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{Y_{i+1} - Y_i}{h} \quad (9)$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \left(\frac{Y_{i+1} - Y_i}{h} - \frac{Y_i - Y_{i-1}}{h} \right) \cdot \frac{1}{h} = \frac{Y_{i+1} - 2 \cdot Y_i + Y_{i-1}}{h^2} \quad (10)$$

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = -E_p \cdot I_p \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} = \frac{M_{i+1} - 2 \cdot M_i + M_{i-1}}{h^2} \quad (11)$$

Sostituendo la (10) e la (11) nella (8), per gli n conci in cui è stato suddiviso il palo e per prefissati valori di modulo secante E_s , viene ottenuto un sistema di n equazioni lineari in n incognite, la cui soluzione costituisce la linea elastica del palo.

Il modulo secante del terreno E_s , assunto per il primo calcolo, costituisce la pendenza iniziale della curva carico-spostamento (curva p-y). Una volta determinato lo spostamento di ogni elemento di palo viene calcolato il nuovo modulo posizionandosi direttamente sulla specifica curva p-y. La procedura iterativa si conclude quando tra due successive iterazioni la differenza di risultato in termini di spostamento risulta sufficientemente piccola.

Una volta determinate le componenti di spostamento, note le condizioni al contorno e le reazioni del terreno, è possibile dedurre le sollecitazioni interne (momento M e taglio V) lungo il fusto del palo.

I parametri di input per il calcolo delle curve p-y in sabbia sono (API RP 2A-WSD, 2014):

ϕ' = [°] angolo di attrito interno alla generica profondità z ;

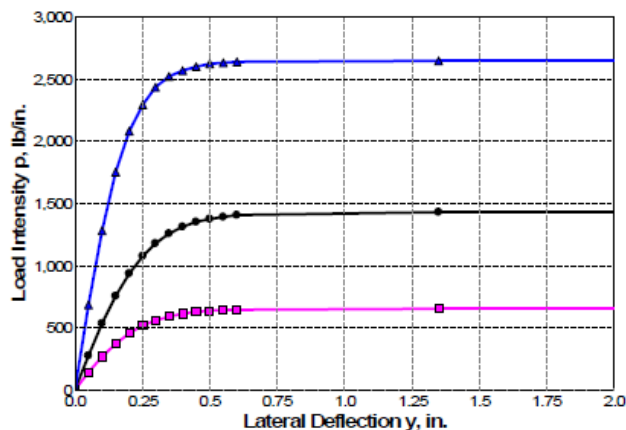
γ_t' = [kN/m³] peso specifico del terreno;

D = [m] diametro del palo;

k_i = [kN/m³] modulo di reazione orizzontale del terreno variabile con la profondità

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 64
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

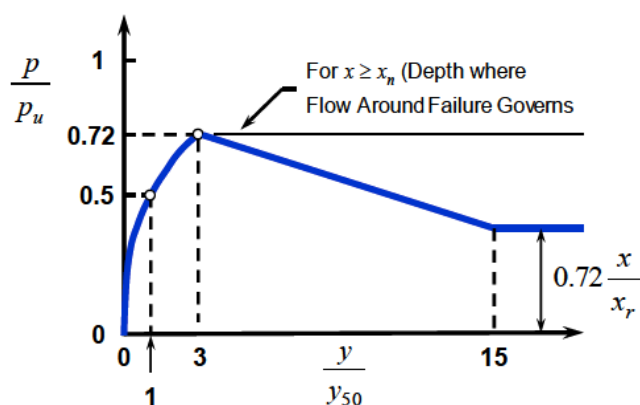
Figura 28 – Tipico andamento di curva p-y in sabbia (APRI RP 2A -WSD,2014)



I parametri di input per il calcolo delle curve p-y in argilla sono:

- γ_t' = [kN/m³] peso specifico del terreno;
- c_u = [kN/m²] coesione non drenata;
- ε_{50} = modulo di deformazione

Figura 29 – Tipico andamento di curva p-y in argilla (carico ciclico)



7.7 SOFTWARE DI CALCOLO GEOTECNICO “GEOSTUDIO”

La valutazione numerica del coefficiente di sicurezza nei confronti della crisi per instabilità dell’ammasso terreno struttura è stata svolta mediante il modulo "SlopeW" della suite software Geostudio 2021.

Tale programma permette di effettuare l’analisi di stabilità globale per diverse superfici di scorrimento, condizioni di falda, proprietà dei terreni, metodi di analisi, condizioni di carico, elementi di sostegno e di rinforzo del terreno. Attraverso metodi di equilibrio limite, il software può modellare terreni eterogenei, con condizioni stratigrafiche e geometriche complesse.

Il coefficiente di sicurezza è definito dal rapporto tra la resistenza unitaria al taglio disponibile lungo la superficie di scorrimento (esistente o potenziale) e lo sforzo di taglio mobilitato lungo di

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 65	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

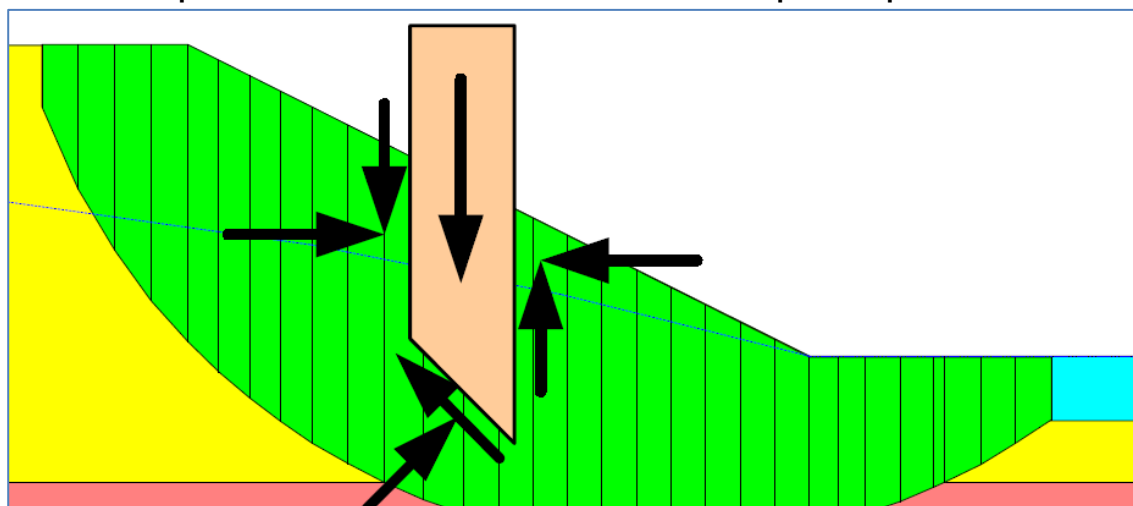
essa (secondo la definizione della Circolare 21 Gennaio 2019 n.7 C.S.LL.PP. [Ref. 6] al paragrafo C6.3.4).

La valutazione del coefficiente di sicurezza può essere svolta secondo diverse teorie; nel presente progetto è adottata la teoria di Morgenstern-Price. Tale metodo di calcolo si basa sulla suddivisione del terreno in diversi blocchi e sull'analisi delle forze di interazione fra i vari blocchi. I blocchi vengono creati dividendo l'ammasso di terreno sopra la superficie di scorrimento tramite piani verticali. Il metodo di calcolo di Morgenstern-Price impone l'equilibrio sui vari blocchi sia per quanto riguarda le forze sia per quanto riguarda i momenti.

I seguenti modelli costitutivi del terreno sono considerati nelle analisi di stabilità globale:

- Mohr – Coulomb (γ , ϕ' , c'): terreni granulari e terreni coesivi a lungo termine (condizioni drenate);
- Undrained (γ , $\phi = 0^\circ$, c_u): terreni coesivi a breve termine (condizioni non drenate).

Figura 30 – Esempio di discretizzazione in blocchi del terreno sopra la superficie di scivolamento



7.8 SOFTWARE IMPIEGATI PER LE VERIFICHE STRUTTURALI E GEOTECNICHE

Le verifiche degli elementi strutturali vengono effettuate con l'impiego dei seguenti software:

- VcaSlu – software freeware prodotto dal Prof. Piero Gelfi dell'Università di Brescia, per la verifica di sezioni in c.a. presso e tenso-inflesse;
- 1Camp – software freeware prodotto dal Prof. Piero Gelfi dell'Università di Brescia, per il calcolo di una trave ad una campata, comunque vincolata e caricata;
- RCSec di GeoStru – software per la verifica di sezioni in c.a. presso e tenso-inflesse;
- Fogli di calcolo excel validati e impiegati in fase di pre-dimensionamento e verifica di varie tipologie di opere (verifiche di portanza di pali trivellati, verifiche di profili in acciaio presso-inflessi etc.).

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 66	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

8 DETERMINAZIONE DELL'AZIONE SISMICA

8.1 PREMESSA

Nella presente relazione si descrivono i principi di determinazione dell'azione sismica.

Si rimanda alle relazioni di calcolo delle singole opere in progetto per il dettaglio delle specifiche analisi dei carichi eseguite.

Nel seguito si definiscono i parametri relativi al suolo relativo al sito sul quale sorge il depuratore di Ravenna (RA) utili per la definizione dell'azione sismica di progetto, in accordo a quanto riportato nella Relazione sulla modellazione sismica [Ref. 3]. Nelle future calcolazioni, l'azione sismica si intende applicata secondo una direzione d'ingresso in direzione orizzontale.

8.2 PARAMETRI SISMICI

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla pericolosità sismica di base del sito di costruzione. La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido (di categoria A) con superficie topografica orizzontale, nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $S_e(T)$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza p_{VR} nel periodo di riferimento V_R considerato. Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento p_{VR} , a partire dai valori dei seguenti parametri (dati di pericolosità sismica) su sito di riferimento rigido orizzontale:

- a_g : accelerazione orizzontale massima del terreno su sito di riferimento rigido orizzontale;
- F_o : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T^*_C : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

I valori di a_g , F_o , T^*_C sono forniti in allegato alle NTC in funzione delle coordinate geografiche (Longitudine e Latitudine) del sito in esame e del periodo di ritorno considerato T_R . L'azione sismica di norma è caratterizzata da tre componenti traslazionali, due orizzontali contrassegnate da X e Y ed una verticale contrassegnata da Z considerate tra di loro indipendenti.

Il sito di riferimento per la collocazione delle strutture in esame è individuato come segue:

	WGS84	ED50
Latitudine	44.44478771	44.446535
Longitudine	12.20634699	12.207152

Le mappe di pericolosità sismica di cui al D.M. 17/01/2018 consentono l'identificazione, per un determinato sito sul territorio nazionale, delle accelerazioni sismiche (orizzontali e verticali) corrispondenti a prefissate probabilità di superamento nell'arco temporale di riferimento, V_R .

Per i fabbricati oggetto del progetto definitivo si considera una vita nominale $V_N = 50$ anni.

I fabbricati in oggetto ricadono in Classe d'uso II, ma cautelativamente si considera per il calcolo una Classe d'uso III, a cui corrisponde con Coefficiente d'uso, $C_U = 1.5$. In accordo al §2.4.3 D.M. 17/01/2018, a tali valori corrisponde un periodo di riferimento per l'azione sismica V_R pari a:

$$V_R = V_N \cdot C_U = 75 \text{ anni}$$

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI				
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 67	DI (LAST) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE				

Tabella 19 – Parametri indipendenti per la definizione dell'azione sismica.

	Tempo di Ritorno – T_R [anni]	Accelerazione Orizzontale Massima al sito – a_g [g]	Fattore di Amplificazione Massima – F_0 [-]	Periodo di Inizio tratto a vel. costante - TC^* [s]
Stato Limite di Operatività (SLO)	45	0.055	2.483	0.274
Stato Limite di Danno (SLD)	75	0.069	2.482	0.284
Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV)	712	0.184	2.537	0.282
Stato Limite di Collasso (SLC)	1462	0.241	2.484	0.289

8.3 CATEGORIA DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

Gli spettri di accelerazione di progetto sono stati dedotti considerando un terreno appartenente alla categoria di sottosuolo C in accordo alla “Relazione sulla modellazione sismica” [Ref. 3]. Per quanto riguarda la condizione topografica si è assunta la categoria T1.

Nella Tabella seguente si riportano il valore del coefficiente $S=S_S \cdot S_T$ che comprende gli effetti delle amplificazioni stratigrafica. S_S e topografica S_T .

Tabella 20 – Parametri dipendenti per la definizione dell'azione sismica.

Stato limite	SLV
S_S	1.421
S_T	1.000
S	1.421
Stato limite	SLD
S_S	1.500
S_T	1.000
S	1.500

8.4 FATTORI DI COMPORTAMENTO “q”

Le strutture in elevazione sono state calcolate agli SLD con fattore di struttura pari a 1,50 con comportamento non dissipativo.

Per comportamento strutturale non dissipativo, nella valutazione della domanda tutte le membrature e i collegamenti rimangono in campo elastico o sostanzialmente elastico; la domanda derivante dall'azione sismica e dalle altre azioni è calcolata, in funzione dello stato limite cui ci si riferisce, ma indipendentemente dalla tipologia strutturale e senza tener conto delle non linearità di materiale, attraverso un modello elastico.

Si precisa a livello generale che tutte le strutture con fondazioni su diaframmi sono progettate per resistere all'azione sismica con un comportamento totalmente non dissipativo (fattore di comportamento $q=1.00$).

8.5 COEFFICIENTE DI SMORZAMENTO VISCOSO

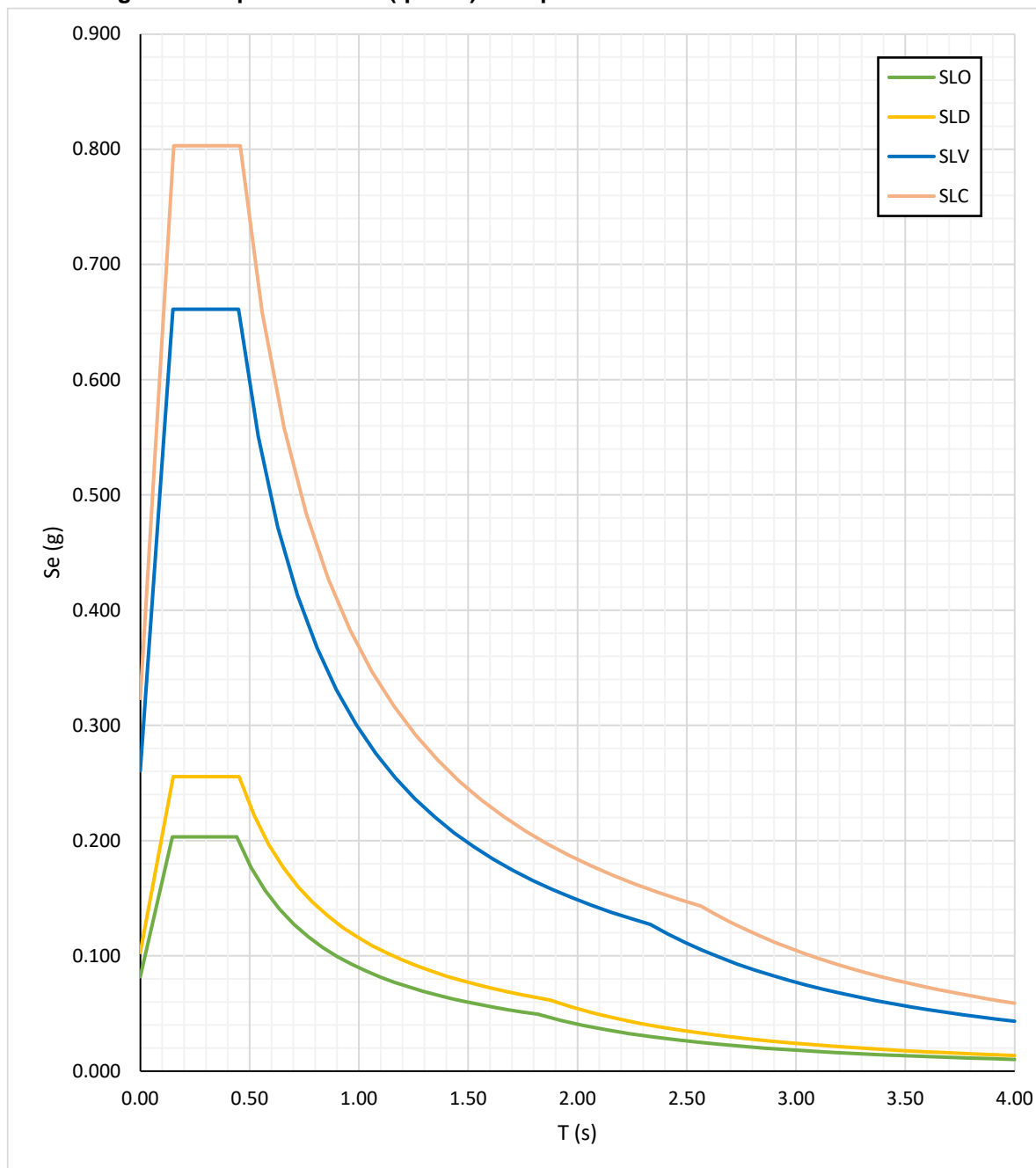
Per la definizione dell'accelerazione spettrale si è fatto riferimento ad uno spettro di risposta delle componenti orizzontale e verticale con smorzamento viscoso pari a $\xi=5\%$.

	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 68
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

8.6 SPETTRO DI RISPOSTA DELLE ACCELERAZIONI

Nel seguito si riporta lo spettro di risposta elastico per accelerazione orizzontale e verticale.

Figura 31 - Spettri elastici ($q=1.00$) di risposta dell'accelerazione orizzontale



Il valore dell'accelerazione di picco per periodo nullo ($T=0.00s$) agli SLV vale:

$$a_{max} = S_s \cdot S_T \cdot a_g = 0.262g$$


	RELAZIONE METODOLOGICA RELATIVA AI CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DELLE OPERE CIVILI			
	N° COMMESSA (JOB N°) 12400705873 - 12000367716	ID DOC. (DOC. ID)	REV. 0	N° FG. (SH. N.) 69
	POTENZIAMENTO DEPURATORE RAVENNA 2° STRALCIO: 1° LOTTO – 2° LOTTO – NUOVO IMPIANTO CADITOIE			

Figura 32 - Spettri elastici (q=1.00) di risposta dell'accelerazione verticale

