

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA'	REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 1 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

PROGETTO DEFINITIVO

RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE

1° Tr.: Campofranco-Aragona

DN 300 (12"), DP 24 bar

E OPERE CONNESSE

Paratia di pali trivellati (V48 – V49)

Relazione tecnica generale e di calcolo strutturale

1	Aggiornamento AU 327 per prescrizioni VIA	Aureli	Costigliola	Olivi	Gen. '25
0	Emissione per Permessi	Aureli	Costigliola	Olivi	Set. '23
Rev.	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato	Data

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 2 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

I N D I C E

1	PREMESSA	3
1.1	Scopo del documento	3
1.2	Elaborati di progetto	3
1.3	Normativa di riferimento	4
1.4	Sistema di qualità	4
2	VITA NOMINALE E CLASSE D'USO	5
3	CRITERI DI CALCOLO	7
3.1	Schemi di analisi e stati limite	7
3.2	Combinazioni di calcolo	8
3.3	Spostamento limite	9
3.4	Criteri di modellazione degli elementi strutturali	11
3.5	Criteri di modellazione geotecnica	11
3.6	Modellazione dell'azione sismica	13
4	DATI GEOTECNICI E STRUTTURALI	15
4.1	Modellazione geotecnica	15
4.2	Verifica a liquefazione	18
4.3	Caratteristiche dei materiali strutturali	18
4.4	Condizioni ambientali	19
4.5	Azione sismica di progetto	20
5	DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DELLE OPERE	21
5.1	Caratteristiche geometriche e strutturali dell'opera	21
5.2	Fasi e modelli di calcolo	21
5.3	Risultati delle verifiche	29
5.4	Determinazione esecutiva delle armature	31
6	VALUTAZIONE DELL'ANALISI STRUTTURALE	33
6.1	Affidabilità e validazione del codice di calcolo	33
6.2	Giudizio sull'elaborazione	34
	APPENDICE - PRINCIPI DEL CODICE DI CALCOLO AUTOMATICO	36

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 3 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

1 PREMESSA

1.1 Scopo del documento

Oggetto della presente relazione e degli elaborati ad essa correlati è la progettazione esecutiva di una paratia di pali trivellati, prevista in corrispondenza dei capisaldi V48 - V49 del tracciato del metanodotto di progetto "Rifacimento Derivazione per Porto Empedocle DN 300 (12") - DP 24 bar ed opere connesse".

Il sito di esecuzione nel Comune di Campofranco (CL), circa 2 km a SO del capoluogo comunale, lungo un versante mediamente acclive, in sponda destra del torrente Gallodoro.

Si tratta della sistemazione, a seguito dei lavori di posa della condotta sul versante, in corrispondenza di un tracciato stradale, al quale garantire condizioni di stabilità, mediante l'esecuzione di opere di sostegno a valle.

Nella presente relazione sono riportati i criteri, i metodi e i risultati delle analisi eseguite per il dimensionamento e la verifica della paratia, con il seguente dettaglio:

- descrizione dei presupposti di progetto e dei criteri di analisi adottati, in conformità alla normativa vigente;
- caratterizzazione geotecnica delle interazioni terreni-paratia;
- illustrazione degli schemi rappresentativi, concepiti per valutare il comportamento dell'opera prima, durante e dopo il terremoto di progetto;
- descrizione dei principi di modellazione ai fini di calcolo e verifica, in termini strutturali e di stabilità globale;
- presentazione ed analisi dei risultati.

In appendice sono esposte le procedure e i processi di calcolo adottati per la determinazione delle spinte e il metodo numerico agli elementi finiti in base al quale è ricercata la soluzione dell'equilibrio per la paratia, in termini di spostamenti nodali, tramite funzioni di forma.

1.2 Elaborati di progetto

Per quanto riguarda la caratterizzazione topografica del sito di esecuzione, le caratteristiche progettuali relative ai materiali di costruzione, le procedure di manutenzione della parte strutturale dei manufatti, le condizioni geologiche influenti sugli elementi tipologici e dimensionali dell'intervento, il dettaglio dei calcoli di verifica strutturale e geotecnica, nonché per la rappresentazione grafica dell'opera in progetto si fa riferimento ai seguenti elaborati:

NQR20133-REL-GEO-E-10303, "Rifacimento derivazione per Porto Empedocle, DN 300 (12") - DP 24 bar ed opere connesse. Paratia di pali trivellati (V48 – V49). Relazione geologica e sismica".

NQR20133-LB-B- 11070, "Rifacimento derivazione per Porto Empedocle per Porto Empedocle, DN 300 (12") - DP 24 bar ed opere connesse. Paratia di pali trivellati (V48 – V49). Planimetria, profilo e sezioni tipo";

NQR20133-LC-B- 11075, "Rifacimento derivazione per Porto Empedocle per Porto Empedocle, DN 300 (12") - DP 24 bar ed opere connesse. Paratia di pali trivellati (V48

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 4 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

– V49). Sezioni trasversali”.

Alla presente relazione sono allegati documenti complementari, atti a illustrare il dettaglio tecnico-progettuale di dimensionamento e verifica, e necessari a definire compiutamente le opere, sia in fase costruttiva sia nel loro mantenimento entro l'arco temporale della vita utile prevista:

- All. 1 Relazione sui materiali da impiegare;
- All. 2 Piano di manutenzione della parte strutturale dell'opera;
- All. 3 Fascicolo dei calcoli.

Agli elaborati in precedenza elencati si rimanda per quanto non espressamente descritto nella presente relazione e per ogni correlato approfondimento.

1.3 Normativa di riferimento

Il progetto di cui alla presente relazione è redatto in conformità alle disposizioni delle nuove Norme Tecniche per le costruzioni (di seguito “NTC18”), emesse con Decreto Ministro delle Infrastrutture del 17 gennaio 2018. Inoltre, il progetto ha riferimento, sia in linea generale sia nel dettaglio, ove specificato, nei seguenti strumenti di normazione e documenti tecnici:

Circolare Ministero delle Infrastrutture e Trasporti, 21 gennaio 2019, n. 7, recante “Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018” (di seguito “Istruzioni”);

Associazione Geotecnica Italiana, “Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica: Linee guida”, 2005;

UNI EN 1997-1:2013, Eurocodice 7 - Progettazione geotecnica - Parte 1: Regole generali.

Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, “Linee guida per la messa in opera e la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito”, Decreto del Presidente n. 361 del 26 settembre 2017.

1.4 Sistema di qualità

Le attività relative al presente progetto sono sviluppate seguendo quanto stabilito dalle procedure ed istruzioni di lavoro applicabili nell'ambito del sistema di qualità aziendale SAIPEM S.p.A., certificato dal TUV NORD ai sensi UNI EN ISO 9001:2015 (Certificate No: 44 100 16410143-002 – Original approval: 08/12/1994).

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 5 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

2 VITA NOMINALE E CLASSE D'USO

L'opera di stabilizzazione in progetto consiste in una paratia di pali trivellati, collegati in testa da cordolo in c.a., avente sezione rettangolare, che, a lavori ultimati, risulterà completamente interrato.

Per quanto attiene alle condizioni che hanno effetto sulla durabilità dell'opera o che da essa discendono, e in considerazione delle analisi che implicano la modellazione di azioni sismiche, sono pre-determinate la vita nominale V_N e la classe d'uso C_U , da associare alla paratia. Conseguentemente viene identificato un periodo di riferimento V_R , che si ricava moltiplicando la vita nominale per il coefficiente d'uso C_U .

La vita nominale è intesa come "il parametro convenzionale correlato alla durata dell'opera alla quale viene fatto riferimento in sede progettuale per le verifiche dei fenomeni dipendenti dal tempo, (ad esempio: fatica, durabilità, ecc.), rispettivamente attraverso la scelta ed il dimensionamento dei particolari costruttivi, dei materiali e delle eventuali applicazioni di misure protettive per garantire il mantenimento dei livelli di affidabilità, funzionalità e durabilità richiesti" (Istruzioni, § C2.4.1). "È un'ipotesi della progettazione che la durabilità di una struttura o parte di essa nel suo ambiente sia tale che essa rimanga idonea all'uso durante la vita utile di progetto con un'appropriata manutenzione (...) in modo tale che deteriorazioni non debbano diminuire la durabilità e le prestazioni della struttura avendo il dovuto riguardo al livello previsto di manutenzione" (Eurocodice 1, parte 1, 2.5). Le NTC18 associano a tipi di costruzione un valore minimo della vita nominale espresso in anni; in particolare, come riportato nella tabella 2.4.I delle suddette norme, per le costruzioni con livelli di prestazioni ordinari, si prevede un valore minimo della vita nominale pari a 50 anni. Tale concetto è svincolato da quello di "strategicità", come specificato nelle "Istruzioni", ove si chiarisce che, "ai sensi e per gli effetti del Decreto del Capo Dipartimento della Protezione Civile n. 3685 del 21 ottobre 2003, il carattere strategico di un'opera o la sua rilevanza per le conseguenze di un eventuale collasso, sono definiti dalla classe d'uso" (§ C2.4.1). Ne segue che la vita nominale è scelta in funzione del numero di anni di vita utile previsto per la struttura senza che si debba ricorrere ad interventi di manutenzione straordinaria. Coerentemente con tali indicazioni, la vita nominale del manufatto trova quindi riferimento nelle scelte progettuali che sono descritte nella presente relazione, nel Piano di manutenzione della parte strutturale dell'opera e nella Relazione sui materiali.

La classe d'uso discende, invece, da considerazione che tengono conto di quanto può accadere "in presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso" (NTC18 2.4.2); inoltre, sull'assegnazione della classe d'uso intervengono criteri di qualificazione non solo tecnica ma anche "amministrativa" (finalità di protezione civile, competenza statale, appartenenza del metanodotto alla rete di distribuzione locale o nazionale del gas). Il manufatto in progetto è finalizzato ad evitare eventuali rischi che possano compromettere la continuità di servizio del metanodotto; la struttura in progetto è un'opera accessoria, il cui eventuale danneggiamento non compromette direttamente la stabilità del gasdotto, ma è atta a mantenerne le condizioni di funzionalità, anche in caso di crisi locale, con riferimento a situazioni di possibile instabilità di alcuni strati del pendio, in corrispondenza del quale è prevista la posa della tubazione. Nel caso specifico, costituisce quindi una specifica scelta "progettuale", tesa a conseguire maggiori condizioni di sicurezza, l'assegnazione di classe d'uso IV, corrispondente al

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 6 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

caso di opere strutturali di importanza strategica.

Alla luce di tali considerazioni, si è motivatamente assunta per l'opera la seguente combinazione di V_N e C_U , conseguentemente determinando il periodo di riferimento "di progetto":

- V_N , vita nominale della costruzione, 50 anni;
- C_U , coefficiente d'uso (classe IV), 2,0;
- V_R , periodo di riferimento per l'opera, 100 anni.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 7 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

3 CRITERI DI CALCOLO

I metodi di calcolo per l'analisi delle paratie si distinguono essenzialmente in due tipi: metodi dell'equilibrio limite e metodi numerici. I primi assumono ipotesi semplificative (ad esempio paratia infinitamente rigida) e ricercano quella profondità di infissione tale da garantire l'equilibrio alla traslazione ed alla rotazione (equilibrio di corpo rigido). I secondi, invece, permettono di schematizzare la paratia con la sua effettiva rigidezza e di fornire informazioni più dettagliate riguardo gli spostamenti, le sollecitazioni e le pressioni del terreno. Per il presente progetto è stato adottato quest'ultimo approccio, utilizzando (previa impostazione con procedure di progettazione autonomamente prodotte) un codice di calcolo commerciale, capace di risolvere il sistema di equazioni che governa lo studio geotecnico e strutturale, mediante i metodi agli elementi finiti, ricorrendo a calcoli non lineari. Il problema viene trattato in ipotesi di stato piano di deformazione (condizioni 2D).

L'analisi in condizioni sismiche, è stata basata su procedure di verifica mediante metodo pseudo-statico, considerando i fattori che possono influenzare significativamente il comportamento dell'opera: effetti inerziali nel terreno; comportamento anelastico e non lineare del terreno; influenza degli spostamenti dell'opera sulla mobilitazione delle condizioni di equilibrio limite, come previsto in NTC18, punto 7.11.6.3.1.

Come già esposto, in appendice sono illustrate le procedure e i processi di calcolo propri del software utilizzato. La valutazione dell'analisi strutturale e geotecnica condotta è riportata in apposita parte della presente relazione (→ 6.), in cui sono descritti anche i controlli di validazione eseguiti autonomamente.

3.1 Schemi di analisi e stati limite

Il dimensionamento dell'opera è stato effettuato considerando preliminarmente molteplici sezioni trasversali, tracciate secondo perpendicolari all'asse della paratia, identificando le direttrici di massima pendenza in relazione alla morfologia di valle e ai carichi di monte. L'analisi delle condizioni di equilibrio è stata eseguita mediante un procedimento speditivo, che ha permesso di determinare le trasversali a cui sono associabili le condizioni di stabilità potenzialmente più gravose e conseguentemente la sezione di maggiore sollecitazione da sottoporre a successiva verifica. L'adozione, per l'intero sviluppo della paratia, dei risultati di dimensionamento geotecnico e strutturale, relativi a tale sezione comporta, nelle altre porzioni dell'opera, la sussistenza di migliori condizioni di sicurezza.

Sono state eseguite analisi e verifiche per tre distinti fasi di vita dell'opera, in coerenza con uno specifico modello concettuale. La sicurezza delle opere di sostegno deve, infatti, essere garantita prima, durante e dopo il terremoto di progetto (§ 7.11.6.1, NTC 2018); pertanto, la modellazione è condotta in relazione a fasi che si differenziano in funzione delle azioni esterne considerate e per le condizioni geometriche del profilo del terreno. In particolare, la variazione della geometria è stata utilizzata al fine di rappresentare le differenze prevedibili in termini di spinte e di caratteristiche di resistenza dei terreni coinvolti.

Le fasi di verifica considerate sono:

- Fase 1, paratia in esercizio durante i lavori di costruzione del metanodotto; condizione temporanea;

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 8 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

- Fase 2, condizione di normale operatività; paratia e metanodotto in esercizio, sottoposti a sisma di progetto;
- Fase 3, paratia in condizioni statiche post-sismiche; condizione temporanea che precede il ripristino alla normale operatività.

Nella Fase 3, ossia nella condizione statica post-sismica, la specifica modellazione geometrica è finalizzata a rappresentare la riduzione dei parametri di resistenza a taglio dei terreni indotta dall'evento di scuotimento dinamico. Si evidenzia che le condizioni post-sismiche, delineate mediante tale specifico modello geometrico, costituiscono una condizione solo "concettuale", atta a simulare, in circostanze più che cautelative, il decadimento delle caratteristiche resistive del terreno, mediante un rilevante scalzamento di valle. Come precisato nel "Piano di manutenzione", il verificarsi di uno scalzamento implica un intervento immediato, tendente al recupero delle condizioni di stabilità preesistenti per l'opera; da ciò deriva l'assunzione di considerare la Fase 3 come una condizione a carattere temporaneo.

In ciascuna fase, le verifiche di sicurezza sono eseguite nei confronti dei seguenti Stati Limite Ultimi:

- collasso per rotazione intorno a un punto dell'opera (GEO);
- collasso per carico limite verticale (GEO);
- instabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno (GEO);
- raggiungimento della resistenza strutturale della paratia (STR).

Per ciò che concerne le verifiche in condizioni sismiche, si fa riferimento alla condizione di Stato Limite di salvaguardia della Vita e allo Stato Limite di Danno.

Apposite verifiche agli Stati Limite di Esercizio, statici e dinamici, sono volte alla determinazione dello spostamento massimo della paratia. Nel caso specifico di progetto, la valutazione di compatibilità degli spostamenti con manufatti in adiacenza è riferita al solo metanodotto ($\rightarrow$ 3.3); fermo restando che la struttura in progetto è un'opera il cui eventuale danneggiamento non compromette direttamente la stabilità del gasdotto ma è atta a mantenerne le condizioni di funzionalità, anche in caso di crisi locale. Con riferimento, quindi, a situazioni del tutto ipotetiche, la verifica di spostamento è condotta, oltre che in fase di esercizio, anche in base a condizioni SLU e SLV.

Sono inoltre indagate le circostanze che riguardano il mantenimento di adeguate condizioni di sicurezza rispetto a stati limite di fessurazione e tensioni di esercizio.

3.2 Combinazioni di calcolo

In accordo con quanto indicato al § 6.2.4.1 delle NTC 2018, le verifiche nei confronti degli Stati Limite Ultimi sono condotte impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente per le azioni ($A1$ e $A2$), per i parametri geotecnici ($M1$ e $M2$) e per le resistenze ($R1$, $R2$, $R3$). I diversi gruppi di coefficienti di sicurezza parziali sono scelti nell'ambito di due approcci progettuali distinti e alternativi (Approccio 1 e Approccio 2).

La verifica di stabilità globale del complesso opera di sostegno-terreno è stata effettuata secondo la Combinazione 2 ($A2+M2+R2$) dell'Approccio 1, tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I delle NTC 2018.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 9 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

Le rimanenti verifiche sono state svolte secondo l'Approccio 1 considerando le due combinazioni di coefficienti:

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

In particolare, nelle verifiche nei confronti di Stati Limite Ultimi geotecnici (GEO) le analisi sono state effettuate con la Combinazione 2 (A2+M2+R1), nella quale i parametri di resistenza del terreno sono ridotti tramite i coefficienti parziali del gruppo M2, i coefficienti γ_R sulla resistenza globale (R1) sono unitari e le sole azioni variabili sono amplificate con i coefficienti del gruppo A2. I valori dei parametri di resistenza di progetto sono perciò inferiori a quelli caratteristici; di conseguenza il valore di progetto della spinta attiva è maggiore e il valore della resistenza passiva è minore dei corrispondenti valori che deriverebbero dai parametri di resistenza caratteristici.

Nelle verifiche nei confronti di Stati Limite per raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali (STR), l'analisi è stata svolta utilizzando la Combinazione 1 (A1+M1+R1), nella quale i coefficienti sui parametri di resistenza del terreno (M1) e sulla resistenza globale del sistema (R1) sono unitari, mentre le azioni permanenti e variabili sono amplificate mediante i coefficienti parziali del gruppo A1.

Le verifiche in condizioni sismiche (SLV, SLD) sono effettuate ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici di progetto (§ 7.11.1, NTC 2018), impiegando le resistenze di progetto con i coefficienti parziali γ_R stabiliti.

3.3 Spostamento limite

Il metodo di calcolo utilizzato mira anche a determinare gli spostamenti dell'opera, per cui risulta opportuno definirne il valore limite accettabile. Il modello di Newmark¹ prevede che a seguito del cinematismo nel terreno di monte, che dà origine alla spinta attiva sulla paratia, la condotta tenda a muoversi solidalmente, non interagendo significativamente con il suolo e quindi subendo integralmente il cinematismo del cuneo di spinta (il modello più generale prevede che tale condizione si verifichi anche in assenza di veri e propri cinematismi ma in associazione alla propagazione di onde sismiche). In queste condizioni, il metanodotto, estendendosi per rilevante lunghezza, sarebbe soggetto ad un moto del suolo non coerente, che comporterebbe l'insorgere di deformazioni e tensioni concentrate imprevedibili.

Per tale tronco, l'interazione tra fenomeni geotecnici e meccanismi resistivi (e deformativi) della condotta determina le condizioni limite di crisi da non superare, associate ad un valore massimo ammissibile allo spostamento dell'opera di sostegno alla quota dell'asse della tubazione: ipotizzando che il cuneo di terreno di monte possa seguire, più o meno rigidamente, la deformazione della paratia, risulta infatti porsi un limite allo spostamento in corrispondenza della condotta, giacché ad esso è associabile un valore tollerabile di deformazione, intesa come spostamento trasversale dall'asse di posa, in condizioni di riposo del terreno (ad equilibrio raggiunto) e quindi in assenza di sollecitazioni orizzontali estranee al meccanismo geotecnico descritto.

Il criterio deformativo esposto corrisponde, molto sommariamente, ad una situazione

¹ Newmark N. M., "Problems in wave propagation in soil and rock", International symposium on wave propagation and dynamic properties of earth materials, University of New Mexico Press, 1967.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 10 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

che può essere modellata come scoscendimento del materiale instabilizzato, lungo la linea di rottura che si origina in corrispondenza del cuneo di spinta attiva.

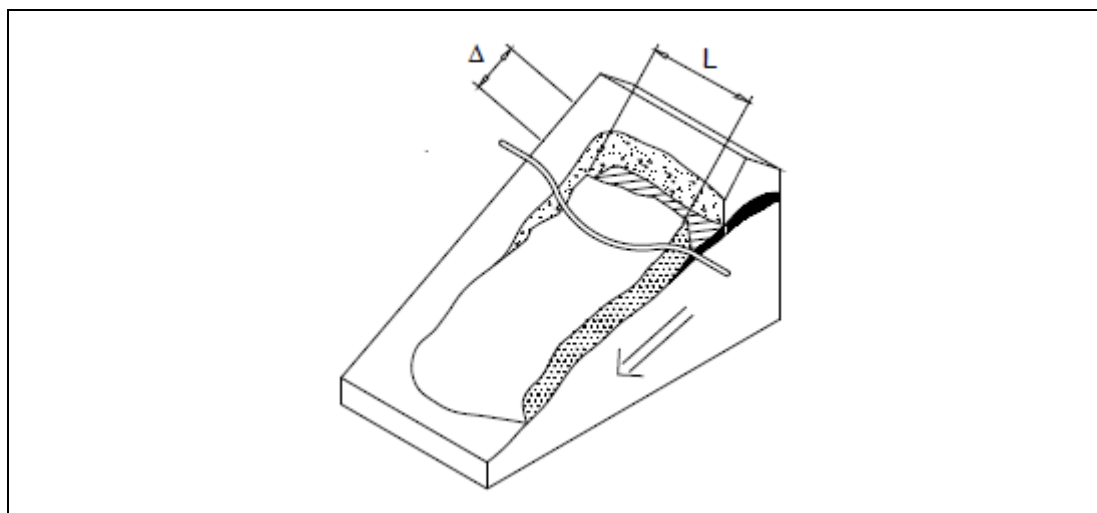
La deformata della condotta in senso trasversale può essere assunta pari a

$$w(x) = \Delta[1-k(x)]e^{-k(x)},$$

con

- $k(x) = [C(x/L-0,5)]^4$,
- x , distanza della generica sezione dell'opera da un estremo del fronte di scoscendimento,
- Δ , massimo spostamento trasversale alla quota della condotta,
- L , larghezza del fenomeno indagato,
- C , costante di modello, che può essere assunta pari a 1,5².

Con questa ipotesi, la massima curvatura della condotta vale $\kappa=2\pi^2\Delta/L^2$ e si riscontra nelle sezioni ad $x=0,2\cdot L$ e $x=0,8\cdot L$ del tronco ideale di analisi.



Modello ideale di deformazione della condotta per cinematisimo del cuneo di spinta attiva

Ai fini pratici, trattandosi di una paratia libera, lo spostamento massimo può riferirsi alla sua sommità, in quanto costituisce un utile dato di riferimento e di più immediata determinazione, oltre che un parametro di più comoda stima, nel quadro del piano dei controlli previsto per le operazioni di manutenzione strutturale dell'opera. Tale spostamento trasversale massimo, tenuto conto della rigidità della tubazione in opera, della distanza tra la condotta e la paratia, e della lunghezza del tratto soggetto al fenomeno di instabilità, può porsi prudenzialmente pari a circa 0,15 m ÷ 0,20 m, al variare del diametro della tubazione. Valori maggiori dello spostamento, se corrispondenti a condizioni di stato limite ultimo, sarebbero in contrasto con gli obiettivi progettuali, in quanto ad essi potrebbe corrispondere la perdita teorica di funzionalità dell'opera, quale elemento di protezione del metanodotto, pur mantenendosi uno stato

² Valore specificamente indicato per condotte in aree di frana, in "Proposta di linee guida per la verifica sismica di strutture interrato destinate alla sistemazione di impianti tecnologici", Rapporto Tecnico SSN/RT/00/05, Servizio Sismico nazionale, Settembre 2000.

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 11 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

ammissibile di resistenza della struttura.

Per lo spostamento dell'intera paratia (da cui deriva concettualmente il valore di progetto u_s), si pone comunque un limite pari al 25% del valore massimo precedentemente stimato, pari quindi a 0,05 m. Tale valore si assegna prudenzialmente allo spostamento risultante dalla deformazione elastica SLU/SLV, in sommità dell'opera, e dalla traslazione rigida della paratia, risultando così assolute, del tutto prudenzialmente, le verifiche in esercizio.

In base alle analisi e alle valutazioni esposte, segue che:

- in fase di determinazione dell'azione sismica, si è posto unitario il valore del coefficiente β , funzione della capacità dell'opera di subire spostamenti senza cadute di resistenza, dipendente dallo spostamento rigido post-sismico ammissibile u_s (NTC18 § 7.11.6.3.1);
- la verifica di idoneità per lo spostamento è stata associata al valore di deformazione elastica massima pari a 0,025 m, in sommità di paratia.

3.4 Criteri di modellazione degli elementi strutturali

Per l'applicazione del modello di calcolo, la paratia è considerata come una struttura a prevalente sviluppo lineare (si fa riferimento ad un metro di larghezza), con comportamento a trave. Come caratteristiche geometriche della sezione si sono assunte il momento d'inerzia I e l'area A , per metro lineare di larghezza della paratia. Il modulo elastico E è quello del materiale utilizzato per la paratia.

La struttura è discretizzata in elementi di lunghezza pari a 5 cm. In linea generale, ulteriori nodi di riferimento nel dominio di calcolo vengono introdotti in corrispondenza di eventuali tiranti, vincoli e carichi, che, nel caso in progetto, sono assenti.

I carichi possono essere sia distribuiti (spinta della terra, diagramma aggiuntivo di carico, spinta della falda, diagramma di spinta sismica) sia concentrati. Nel primo caso, essi sono riportati sempre come carichi concentrati nei nodi (sotto forma di reazioni di incastro perfetto cambiate di segno).

Per il calcolo delle sollecitazioni nel cordolo si utilizza uno schema semplificato, supponendo che si muova rigidamente con la testa dei pali, come trave su due appoggi, di lunghezza pari a due volte l'interasse dei pali, con carico concentrato in mezzzeria dato dalla spinta agente su un tratto pari alla lunghezza stessa.

Ulteriori indicazioni sul modello strutturale e le relative procedure di calcolo sono riportate in appendice alla presente relazione.

3.5 Criteri di modellazione geotecnica

3.5.1 Comportamento del terreno

Il comportamento meccanico del terreno è descritto mediante il modello di Winkler. Esso caratterizza il sottosuolo come un insieme di molle indipendenti fra loro reagenti solo a sforzo assiale di compressione. La rigidezza della singola molla è legata alla costante di sottofondo (*costante di Winkler, K*). Quest'ultima è definita come la pressione che occorre applicare per ottenere uno spostamento unitario; dimensionalmente è espressa quindi come rapporto tra una tensione e uno spostamento $[F/L^3]$.

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA'	REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 12 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

Per ciò che concerne il legame costitutivo delle molle si fa riferimento ad un comportamento di tipo elasto-plastico perfetto, a cui si associa uno specifico criterio di plasticizzazione. In linea generale, si può fare riferimento ad un criterio di tipo cinematico, nel quale la resistenza della molla cresce con la deformazione fino a quando lo spostamento non raggiunge il valore X_{max} ; in tal caso, una volta superato tale spostamento limite non si ha più incremento di resistenza all'aumentare degli spostamenti. Un altro criterio possibile è, invece, di tipo statico: si assume che la molla abbia una resistenza crescente fino al raggiungimento di una pressione p_{max} ; tale pressione può essere posta pari al valore della pressione passiva in corrispondenza della quota della molla stessa. Un ulteriore criterio si può ottenere dalla combinazione dei due descritti precedentemente: la plasticizzazione avviene per il meccanismo più debole tra il raggiungimento dello spostamento limite ed il raggiungimento della resistenza passiva.

Nelle analisi svolte è stato considerato il criterio statico, per cui la plasticizzazione avviene per raggiungimento della resistenza passiva. I valori della costante di sottofondo sono determinati in funzione delle caratteristiche stratigrafiche e geotecniche del sito di esecuzione (→ 4.1.3).

3.5.2 Inclinazione delle spinte

Per quanto attiene agli effetti dell'attrito tra manufatti in progetto e terreni, prudenzialmente si assume che la distribuzione delle pressioni statiche e dinamiche agisca con un'inclinazione rispetto al normale dell'opera non superiore a $\delta = \frac{1}{2} \cdot \varphi'$, per lo stato di spinta attiva, ed eguale a zero per lo stato di spinta passiva, non esplicando alcuna influenza su di questa.

Tali condizioni fanno sì che, ai fini della valutazione della resistenza passiva agente sulle paratie, non sia necessario tener conto della non planarità delle superfici di scorrimento, conformemente a quanto prescritto al §7.11.6.3.1. delle NTC 2018.

Il valore di δ , ove non considerato nullo, è stato imposto per ciascun strato di terreno identificato e il suo effetto sulla spinta attiva è stato considerato diversamente secondo le varie fasi di modellazione.

3.5.3 Deformabilità dei terreni

Per quanto attiene alla caratterizzazione elastica del terreno, la modellazione condotta si rifà al classico schema di Winkler, secondo il quale esso è rappresentato come un insieme di molle indipendenti fra loro, reagenti a solo sforzo assiale di compressione. La rigidità della singola molla è legata al modulo di reazione orizzontale del terreno K_h , definito come la pressione che occorre applicare per ottenere uno spostamento unitario. Essendo i pali strutture di relativa snellezza, in termini di modello di Winkler, essi risultano "infinitamente lunghi", inoltre, i carichi applicati sono azioni concentrate all'estremità, pertanto in tali condizioni il modello fornisce risultati senz'altro accettabili.

Poiché è stato identificato un numero limitato di strati di terreno aventi specifiche caratteristiche, il modello di calcolo di seguito descritto assegna a ciascuno di essi un unico valore per il modulo di reazione orizzontale. Tale ipotesi è senz'altro coerente con le caratteristiche del sito, per quanto riguarda gli strati di limitato spessore; invece, per i terreni che costituiscono parte prevalente del volume significativo per l'opera, il modulo di Winkler potrebbe considerarsi variabile con una legge quasi lineare con la

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA'	REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 13 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

profondità; tale circostanza è, tuttavia, considerata per via indiretta.

Il calcolo del modulo elastico orizzontale è eseguito rapportandolo alla pressione stimabile a data profondità, in base ad uno spostamento convenzionale (Bowles 1968); in particolare il codice di calcolo utilizzato procede ad una prima determinazione del modulo K_h adottando la differenza fra pressione passiva di valle e pressione attiva di monte e come spostamento convenzionale il valore 1,5 cm. I valori così calcolati sono mediati con gli esiti di modelli basati su dati sperimentali, riportati in letteratura per ciascuna tipologia di terreno e con altre specifiche formulazioni.

Poiché il valore della costante di Winkler orizzontale dipende oltre che dalla profondità anche dalla rigidezza della struttura da analizzare, si ricorre alla stima di tale parametro effettuata sulla base dell'espressione di Reese e Matlock³,

$$K_h = n_h \cdot \frac{z}{d}$$

dove d è il diametro dei pali, z la profondità, n_h un fattore sperimentale, dipendente dallo stato di addensamento e dalla presenza o meno di falda. Per strati coesivi non influenzati da effetti di preconsolidazione, per strati incoerenti non addensati e in genere per terreni non essenzialmente coesivi, n_h è stimabile in base a

$$n_h = \frac{A \cdot \gamma}{1,35}$$

dove per il termine A possono adottarsi valori derivanti da indicazioni sperimentali e/o di letteratura tecnica⁴.

3.6 Modellazione dell'azione sismica

Le analisi in condizioni sismiche sono eseguite con un metodo pseudo-statico. L'azione sismica è definita mediante un'accelerazione equivalente, costante nel tempo e nello spazio. La componente orizzontale dell'accelerazione equivalente a_h è espressa, in funzione dell'accelerazione di picco a_{max} , attesa nel volume di terreno significativo per l'opera, mediante la relazione

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

dove g è l'accelerazione di gravità, k_h è il coefficiente sismico in direzione orizzontale, $\alpha \leq 1$ è il coefficiente che tiene conto della deformabilità dei terreni interagenti con l'opera e $\beta \leq 1$ è il coefficiente funzione della capacità dell'opera di subire spostamenti senza cadute di resistenza.

L'accelerazione di picco, a_{max} , in assenza di analisi specifiche della risposta sismica locale, è valutata come

$$a_{max} = S \cdot a_g = S_S \cdot S_T \cdot a_g,$$

dove S è il coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica (S_S) e dell'amplificazione topografica (S_T), e a_g è l'accelerazione orizzontale massima attesa

³ Matlock H., Reese L.C., Generalized solutions for laterally loaded piles – Journ. Soil Mech. Found. Div. - Proc. ASCE, 1960.

⁴ Tra cui Davissos (1970), Peck (1970) e Altri, riportati in C.Viggiani, Fondazioni, Hevelius Ed., Benevento (IT), 1999.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 14 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

su sito di riferimento rigido.

Il valore del coefficiente α , per la valutazione della spinta nelle condizioni di equilibrio limite passivo, si è posto $\alpha = 1$.

Il valore del coefficiente β , pur sussistendo ampi margini di spostamento ammissibili ($\rightarrow 3.3$), si è posto per scelta progettuale $\beta = 1$, potendosi così trascurare lo sviluppo di meccanismi duttili nel sistema.

In base a quanto previsto dalle NTC18, sono trascurati gli effetti inerziali sulle masse che costituiscono la paratia.

Per l'opera in progetto (come per quasi tutte le costruzioni ordinarie) per la componente verticale dell'azione sismica potrebbe porsi $a_v = 0$; prudenzialmente tale componente è stata, invece, considerata non nulla e agente sia verso l'alto sia verso il basso, a comporre le varie combinazioni di carico, al fine di determinare gli effetti più sfavorevoli. Come indicato dalle NTC18, in assenza di studi specifici, il rapporto tra il coefficiente sismico verticale e quello orizzontale si è posto $k_v / k_h = 0,50$. I due coefficienti sono stati considerati costanti lungo l'altezza dell'opera.

Nelle verifiche di stabilità del complesso paratia-terreno, eseguite ai sensi del § 7.11.4 delle NTC 2018, l'azione sismica è stata rappresentata da un'azione statica equivalente proporzionale al peso, W , del volume di terreno potenzialmente instabile. Tale forza è definita dalle componenti:

$$F_h = k'_h \cdot W, F_v = k'_v \cdot W$$

con k'_h e k'_v specifici valori per i coefficienti sismici orizzontale e verticale:

$$k'_h = \beta_s \cdot a_{\max}/g, k'_v = \pm 0,5 \cdot k'_h.$$

Il valore del coefficiente β_s è stato fissato in conformità a quanto previsto in § 7.11.4 delle NTC 2018, in funzione dello Stato Limite considerato.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 15 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

4 DATI GEOTECNICI E STRUTTURALI

4.1 Modellazione geotecnica

Ai fini della progettazione degli interventi, sono state svolte indagini geognostiche e geofisiche, i cui risultati hanno permesso di definire il modello geotecnico di sottosuolo e le relative soluzioni progettuali.

4.1.1 Caratteristiche stratigrafiche

Come riportato nella Relazione geologica e sismica, il pendio di esecuzione è caratterizzato da uno strato di materiale superficiale derivante dalle pratiche agrarie, al di sotto del quale affiorano litotipi limoso-argillosi, sovrastanti argilla marnosa. Con riferimento al piano di campagna, la colonna stratigrafica rappresentativa dell'area interessata dall'intervento è caratterizzata quindi da:

- Terreno 1 (materiale di riporto e terreno agrario), fino a circa 1,8 metri dal p.d.c.;
- Terreno 2 (Limo argilloso), da circa 1,8 metri a circa 8,0 metri dal p.d.c.;
- Terreno 3 (Argilla marnosa), oltre la profondità di circa 8 metri dal p.d.c.

Le condizioni geomorfologiche dell'area d'intervento (zona di crinale) e le circostanze riscontrate in fase di sondaggio consentono di escludere la presenza di una superficie piezometrica continua posta nella porzione di terreno interessata dai lavori.

4.1.2 Stratigrafia di progetto e parametri geotecnici

La stratigrafia utilizzata per il progetto, oltre che essere desunta dall'esame delle indagini geognostiche, tiene conto dell'effetto dovuto alle fasi di lavoro sulle caratteristiche dei terreni in situ (apertura della trincea, rinterri e ripristini morfologici, ecc.). Inoltre, il modello geotecnico è stato reso coerente con le condizioni cautelative che sono il presupposto di ciascuna delle fasi di analisi dell'opera, come in precedenza descritto (→ 3.1).

Per ciascuna fase di calcolo, lo strato sommitale di rinterro (Terreno 0) è stato considerato in modo da rappresentare le previste procedure di esecuzione (Fase 1, rinterro a tergo del cordolo; Fase 2 e Fase 3, rinterro degli scavi fino alla profondità di posa del metanodotto (-2,0 m rispetto alla testa della paratia), è stato considerato con caratteristiche geomeccaniche proprie di un terreno alterato.

Per quanto attiene alle condizioni post-opera, è evidente che tale assunzione riguarda solo le aree effettivamente interessate dai lavori; tuttavia, a fini conservativi, si è rappresentata l'intera porzione del versante a monte della paratia, a quota superiore a quella di posa della tubazione, sulla base di parametri di resistenza propri di un materiale rimaneggiato (Terreno 0), derivante dalla movimentazione (scavo e rinterro) del Terreno 2. In tal modo si è certi che, nella modellazione di qualunque condizione e fase di vita dell'opera, la porzione superiore del cuneo di spinta attiva corrisponda alla caratterizzazione di uno strato di minori caratteristiche resistive, rispetto alle condizioni originarie inalterate.

Le condizioni geometriche delle stratigrafie di modello sono condizionate a valle dal fatto che si considera il cordolo di paratia totalmente o parzialmente scoperto a valle. Considerato, inoltre, che la stratigrafia di calcolo ha origine dalla testa della paratia (0,30 metri rispetto al p.d.c.), si determina il seguente quadro di modellazione

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 16 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

geotecnica.

Tabella 4.1: Spessori della stratigrafia di modellazione in asse opera di sostegno

Fase 1			
	monte		valle
Terreno 0	1,00 m	Terreno 1	1,00 m
Terreno 1	1,80-0,30-1,00 = 0,50 m		
Terreno 2	8,00-0,30-1,50 = 6,20 m		
Terreno 3	10,00 m		

Fase 2 e Fase 3			
	monte		valle (*)
Terreno 0	2,00 m	Terreno 0	1,00 m
		Terreno 1	0,50 m
Terreno 2	5,70 m	Terreno 2	6,20 m
Terreno 3	10,00 m		

(*) ove presente, secondo modellazione geometrica

Tabella 4.2: Parametri geotecnici di modellazione per l'opera di sostegno

Strato	Parametri geotecnici (valori caratteristici)		
	γ_k [kN/m ³]	ϕ'_k [°]	c'_k [kPa]
Terreno 0	19,0	20	0,0
Terreno 1	18,0	20	0,0
Terreno 2	20,0	25	14,0
Terreno 3	20,5	24	30,0

L'inclinazione degli strati è stata considerata corrispondere alla pendenza media del versante nella sezione di calcolo.

Come previsto dalle NTC18 (§ 6.5.2.2), il modello geometrico di calcolo tiene conto delle possibili variazioni del profilo del terreno: la quota di valle è diminuita di una quantità pari al valore minore tra

- 10% dell'altezza di terreno da sostenere, nel caso di opere a sbalzo,
- 0,5 m.

Ai fini del calcolo delle spinte e delle resistenze di progetto, i valori riportati sono considerati come "caratteristici" delle principali proprietà meccaniche dei terreni. Per la rappresentazione delle condizioni di resistenza, occorre specificare, inoltre, quanto segue:

- la profondità dello schema rappresentativo comprende i volumi di terreno direttamente od indirettamente coinvolti dai potenziali fenomeni di instabilità;
- la situazione stratigrafica e geotecnica descritta è congruente con l'analisi dei possibili movimenti attesi;

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 17 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

- i parametri geotecnici descritti sono da ritenersi relativi a livelli tensionali compatibili con quelli indotti dall'opera, con cui i terreni stessi sono destinati ad interagire, e possono essere ritenuti costanti nell'intervallo tensionale nel quale sono stati determinati;
- in coincidenza con l'azione sismica, possono essere usati i parametri di resistenza considerati, in quanto riferibili a condizioni inalterate da potenziali pressioni interstiziali generate da carico ciclico.

4.1.3 Deformabilità di calcolo dei terreni

Una apposita analisi preliminare è stata condotta per la determinazione dei parametri elastici dei terreni, utili a schematizzare il comportamento discreto di reazione, a cui si è fatto ricorso al fine di verificare le stime operate dal codice di calcolo, in merito ai parametri rappresentativi della deformabilità dei terreni, adeguandoli secondo i criteri in precedenza riportati (→ 3.5.3).

In base alle caratteristiche geotecniche dei terreni, possono adottarsi per il termine A valori che ricadono nel campo $A = 100\div300$.

Trascurando la variabilità continua con la profondità del modulo di reazione, assumendo per ciascuno strato il valore relativo alla media della relativa profondità, in base alla stratigrafia di progetto della paratia, fino alla profondità di interesse, si è stimato conseguentemente quanto riportato nella seguente tabella.

Tabella 4.3: Sintesi dei parametri di deformabilità dei terreni di calcolo

γ [N/cm ³]	A	n_h [N/cm ³]	n_h/DN [N/cm ³ /m]	altezza strato [m]	K_h max [N/cm ³]	K_h min [N/cm ³]	K_h medio [N/cm ³]	K_h medio [daN/cm ² /cm]
0,019	100	1,4	2,3	1,00	2,3	0,0	1,2	0,12
0,018	100	1,3	2,2	0,50	3,3	2,2	2,8	0,28
0,020	150	2,2	3,7	6,20	28,5	5,6	17,0	1,70
0,021	200	3,0	5,1	1,30	45,6	39,0	42,3	4,23

I valori così determinati sono risultati del tutto coerenti con le stime eseguite dal codice di calcolo (scarti inferiori al 2%), in base alle pressioni agenti sulla paratia, e sono stati pertanto assunti come significativi. Al variare delle condizioni geometriche con cui sono rappresentate le varie fasi di calcolo della paratia (→ 5.2), il valore del modulo viene adeguato in base alla differenza fra pressione passiva di valle e pressione attiva di monte. Il codice di calcolo utilizzato, inoltre, introduce appropriati valori mediati del modulo K_h nella transizione tra strati.

Il parametro di deformabilità ha influenza sul modello di rottura del terreno, che è basato sul concetto di plasticizzazione delle molle, per pressione passiva (→ 3.5.1); la rigidità delle molle che schematizzano il terreno è infatti legata alla costante di sottofondo orizzontale. L'ipotesi di assumere unico parametro di sottofondo per ciascuno strato del volume significativo, determinato sulla base del valore relativo alla profondità media, costituisce, di norma, una sovrastima delle sollecitazioni ed un dimensionamento strutturale di assoluta garanzia in specie nei confronti degli Stati Limite Ultimi.

I risultati delle elaborazioni condotte forniscono anche la percentuale delle molle che

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 18 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

arrivano eventualmente a plasticizzazione, oltre che i valori delle pressioni e degli spostamenti per ciascuna "mesh" di calcolo, consentendo un controllo di efficienza del modello, nel quadro delle verifiche necessarie per determinare l'affidabilità dei risultati stessi (NTC18, §10.2).

4.2 Verifica a liquefazione

Secondo quanto riportato al § 7.11.3.4.1 delle NTC 2018, il sito di esecuzione del manufatto deve essere stabile nei confronti della liquefazione. Qualora il terreno risultasse suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti apparissero tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorrerebbe procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili al fenomeno.

La norma prescrive i casi in cui è possibile omettere l'esecuzione della verifica a liquefazione. Sulla base delle indicazioni contenute nella Relazione geologica e sismica, ed in accordo con quanto indicato al § 7.11.3.4.2 delle NTC 2018, si dimostra non pertinente procedere a verifica nei confronti dei fenomeni di liquefazione per il sito in esame. In particolare, sulla base dei dati raccolti in fase di analisi geologica ed in considerazione delle caratteristiche litologiche del pendio, non risulta che alcuna superficie o discontinuità piezometrica possa interferire con la struttura in progetto, né che sussistano condizioni per cui risulti necessaria un'attenta valutazione delle sollecitazioni indotte nei pali, prodotte dalla perdita di confinamento laterale a seguito di fenomeni di liquefazione.

4.3 Caratteristiche dei materiali strutturali

4.3.1 Calcestruzzo

La paratia sarà realizzata in cemento armato gettato in opera. Si adotterà un conglomerato cementizio del tipo C25/30 (→ 4.4). Le resistenze caratteristiche sono determinate secondo quanto riportato al § 11.2.10 delle NTC 2018.

La resistenza a compressione vale:

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa}; \quad R_{ck} = 30 \text{ MPa}; \quad f_{cm} = f_{ck} + 8 = 25 + 8 = 33 \text{ MPa}.$$

Le resistenze a trazione semplice ed a flessione valgono rispettivamente:

$$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} = 2.56 \text{ MPa}; \quad f_{ctf} = 1.2 \cdot f_{ctm} = 3.07 \text{ MPa}.$$

Il modulo elastico si è assunto pari a:

$$E_{cm} = 22000 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3} \approx 31500 \text{ MPa}$$

Per le verifiche degli stati limite, la resistenza di calcolo a compressione e quella a trazione valgono, infine:

$$f_{cd} = 0.85 \cdot \frac{f_{ck}}{1.5} = 14.17 \text{ MPa}; \quad f_{ctd} = \frac{f_{ctm}}{1.5} = 1.71 \text{ MPa}.$$

Il diagramma di progetto tensione-deformazione adottato è quello previsto al § 4.1.2.1.2.1 delle NTC 2018.

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA'	REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 19 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

Per gli stati limite di esercizio, si sono considerate le indicazioni e le prescrizioni di cui al § 4.1.2.2 delle stesse NTC 2018.

4.3.2 Acciaio

L'acciaio utilizzato per le armature sarà del tipo B450C. Le resistenze caratteristiche sono determinate secondo quanto riportato al § 11.3.2.1 delle NTC 2018.

Il valore nominale della tensione di snervamento è pari a:

$$f_{yk} = 450 \text{ MPa}.$$

Il modulo elastico si assume pari a:

$$E_s = 210000 \text{ MPa}.$$

Per le verifiche degli stati limite, quale resistenza di calcolo, si assume:

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1.15} = 391.30 \text{ MPa}.$$

Il diagramma di progetto tensione-deformazione adottato è quello previsto al § 4.1.2.1.2.2 delle NTC 2018.

Per gli stati limite di esercizio, si sono considerate le indicazioni e le prescrizioni di cui al § 4.1.2.2 delle norme tecniche.

4.4 Condizioni ambientali

È previsto che l'armatura resistente delle strutture in cemento armato sia protetta da un adeguato ricoprimento di calcestruzzo; il copriferro è quindi qui inteso come distanza tra la superficie esterna di qualsiasi armatura (inclusi collegamenti e staffe) e la superficie esterna di calcestruzzo più vicina (UNI ENV, Eurocodice 2, parte 1-1). Lo spessore di tale strato di ricoprimento è progettualmente dimensionato in funzione dell'aggressività dell'ambiente e della sensibilità delle armature alla corrosione.

Secondo la casistica delle condizioni ambientali, espressa nelle NTC18 dalle tabelle 4.1.III e 4.1.IV, con riferimento alle definizioni date nelle "Linee guida per il calcestruzzo strutturale" del C.S.LL.PP., nonché nella UNI 11104 e UNI EN 206:2016, per le parti strutturali interrate, si hanno condizioni ambientali di progetto ordinarie e classe di esposizione XC2. Tale classificazione corrisponde alla condizione di "strutture interrate, in ambiente bagnato e raramente secco, fondazioni" ed è caratteristica per pali, diaframmi e fondazioni realizzati in terreno non aggressivi. In tali condizioni la classe del calcestruzzo C25/30 risulta idonea.

Poiché si è previsto per la struttura, coerentemente con il piano di manutenzione della parte strutturale dell'opera, vita nominale di 50 anni ($\rightarrow 2$), l'entità minima del copriferro è conseguentemente definita nelle "Istruzioni" (tab. C4.1.IV), in funzione della classe di resistenza del calcestruzzo C25/30 considerata ai fini di calcolo; pertanto si è posto⁵:

⁵ Nella implementazione del codice di calcolo utilizzato, il copriferro è inserito incrementandolo dello spessore delle staffe, secondo il valore progettualmente definito, in quanto il software considera tale dato di input relativamente al lembo esterno delle barre longitudinali del cordolo. Inoltre si inserisce così un margine di tolleranza sulla staffatura dei pali.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 20 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

- per i pali, copriferro (copristaffa) pari a 2,5 cm;
- per il cordolo sommitale, copriferro (copristaffa) pari a 2,5 cm.

Gli elementi strutturali sono stati verificati allo stato limite di fessurazione ($\rightarrow$ 3.1), con le procedure definite nelle NTC18 (§ 4.1.2.2.4), in funzione delle condizioni ambientali e della suscettibilità delle armature alla corrosione. In questo caso, si è imposta in progetto la condizione ordinaria e reale che l'acciaio per armature corrisponda al tipo "poco sensibile".

4.5 Azione sismica di progetto

Le tabelle seguenti forniscono i parametri sismici che caratterizzano il sito in esame, rispettivamente in corrispondenza del substrato rigido e al suolo, in funzione di quanto posto in termini di periodo di riferimento per l'opera ($\rightarrow$ 2) e considerate le indicazioni specifiche fornite nella Relazione geologica e sismica.

Tabella 4.4: Parametri sismici del sito in esame (substrato rigido)

Long. (ED50)	Lat. (ED50)	Stato limite	T_R [anni]	a_g [g]	F_0	T_C^*
13.705434	37.496484	SLD	101	0,040	2,481	0,301
		SLV	949	0,080	2,658	0,434

Tabella 4.5: Parametri sismici del sito in esame (suolo)

Stato limite	S_T	S_S	S	a_{max} [g]	k_h (%)	k_v (%)
SLD	1,00	1,200	1,200	0,048	4.762	2,381
SLV	1,00	1,200	1,200	0,096	9,576	4,788

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 21 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

5 DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DELLE OPERE

5.1 Caratteristiche geometriche e strutturali dell'opera

L'opera, identificata planimetricamente con l'asse del cordolo superiore, si svilupperà in due tronchi adiacenti, separati da un giunto di divisione (che potrà anche essere colmato in calcestruzzo o con materiale resiliente, come dettagliato nella Relazione sui materiali → All. 3), in modo da conformare due distinte inclinazioni, conformemente all'andamento medio del piano di campagna. I due tronchi avranno rispettivamente lunghezza 19,90 metri e 16,30 metri. Ciascun tronco di paratia sarà così composto:

- pali verticali trivellati, disposti lungo unica fila, in asse al cordolo superiore, interasse 1,80 m (0,55 pali per metro di lunghezza); realizzati con perforazioni del diametro nominale 600 mm, con getto di calcestruzzo di cemento, di resistenza C25/30, eseguito mediante tubo convogliatore; armatura longitudinale e staffa elicoidale in acciaio B450C;
- cordolo in conglomerato di cemento armato, a sezione rettangolare 80 cm di base, 100 cm in altezza, realizzato in opera, con calcestruzzo di cemento di resistenza C25/30; con ferri di armatura longitudinali e staffe B450C.

L'altezza totale della paratia sarà pari a 9,00 m.

5.2 Fasi e modelli di calcolo

Conformemente a quanto in precedenza esposto, sono state eseguite tre distinte modellazioni, al fine di verificare in quale misura il dimensionamento della paratia corrispondesse alle condizioni di sicurezza ricercate, sia prima, sia durante e sia dopo il terremoto di progetto. Pertanto le verifiche sono state eseguite relativamente a tre differenti fasi, a cui corrispondono altrettanti modelli concettuali, di seguito descritti.

Come già espresso, le analisi sono condotte relativamente alla sezione di calcolo di maggiore sollecitazione (quale sezione caratteristica di calcolo è stata assunta la sezione 1 relativa al tronco di paratia più lungo). I criteri di calcolo adottati (→ 3) e i dati di base assunti (→ 4) sono stati commisurati al livello di rappresentatività dei tre modelli e ai corrispondenti scenari di rischio.

Il sistema è costituito dall'opera di sostegno, da un cuneo di terreno dietro la struttura, che si suppone in stato di equilibrio limite attivo, soggetto alla sollecitazione sismica (Fase 2), e da una massa di terreno a valle dell'opera, in stato di equilibrio limite passivo ($\alpha = 1$). Come descritto, il sisma è stato simulato mediante analisi pseudo-statica: l'azione è rappresentata da un insieme di forze statiche orizzontali e verticali, date dal prodotto delle forze di gravità per il coefficiente sismico. L'equilibrio è assicurato dal bilanciamento fra la spinta attiva agente da monte sulla parte fuori terra, la resistenza passiva, che si sviluppa, da valle verso monte, nella zona interrata, e la contropinta, che agisce da monte verso valle, nella zona interrata, sotto il centro di rotazione.

Una volta esaurita la modellazione del sistema (geometria, azioni, ecc.) nelle tre fasi di verifica, la procedura di calcolo adottata è stata la seguente:

- determinazione delle spinte, effettuato mediante il metodo di Culmann;
- determinazione dell'incremento di spinta sismica, basata sul metodo di Mononobe-Okabe (Fase 2);

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 22 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

- modellazione del terreno, effettuata mediante schema di Winkler, a letto di molle indipendenti fra loro, aventi rigidezza flessionale e tagliante nulla;
- determinazione della matrice di rigidezza di tutto il sistema paratia-terreno per assemblaggio delle matrici di rigidezza degli elementi della paratia (elementi a rigidezza flessionale, tagliante ed assiale) e delle molle (reagenti solo a sforzo assiale di compressione);
- analisi del comportamento elasto-plastico del terreno, effettuata mediante progressiva verifica della plasticizzazione delle molle (calcolo non lineare);
- calcolo delle sollecitazioni interne per metro di sviluppo delle paratie e relativamente a ciascun componente del manufatto, esecuzione delle verifiche agli stati limite e della stabilità globale dell'insieme paratia-pendio;
- progetto delle armature del cordolo e dei pali, con il metodo degli stati limiti relativo alla resistenza dei materiali in condizioni ultime e di esercizio,

Per la verifica della stabilità globale terreno-opera, si è adottato il metodo di Bishop, che presuppone la potenziale superficie di scorrimento di forma circolare. Sono stati esaminati, per ogni possibile centro, tre cerchi differenti: un cerchio passante per la linea di fondo scavo, un cerchio passante per il piede della paratia ed un cerchio passante per il punto medio della parte interrata. Il minimo coefficiente di sicurezza è determinato su una maglia di centri, posta in prossimità della sommità della paratia.

Nelle fasi 2 e 3 è considerato il carico stradale variabile, associato alla strada a monte del tracciato di posa del metanodotto e quindi a monte della paratia.

5.2.1 Fase 1: paratia in esercizio durante i lavori di costruzione del metanodotto; condizione temporanea

Geometria

- Cordolo sommitale appena costruito, considerato emergente a valle e non contrastato, fino ad intersezione tra il pendio e il piano di realizzazione del cordolo stesso; a monte, terreno di rinterro per conformare la pista di lavoro fino alle quote previste per i successivi scavi di posa della condotta.
- Area immediatamente a monte della paratia occupata da parte della pista di servizio per la realizzazione del gasdotto, sottoposta al relativo sovraccarico distribuito (carico temporaneo di esecuzione).
- Il modello geometrico di calcolo tiene conto delle possibili variazioni del profilo del terreno, a monte e a valle dell'opera, rispetto ai valori nominali, nei modi previsti dalle NTC18 (§ 6.5.2.2).

Azioni

- Sovraccarico sull'area piana (pista di servizio) a monte della paratia, dovuto al carico di esecuzione, considerato pari a 40 kN/m^2 (da 0,90 metri a 8,64 metri, rispetto all'asse cordolo), considerato azione permanente. Tale carico, oltre che corrispondere a circostanze note ed oggettive di impegno della pista, deriva dalla seguente ipotesi normativa: azione relativa ai ponti di 2ª Categoria, prevista dalle NTC18, data da carico tandem $Q_k = 240 \text{ kN}$ per asse, oltre a carico distribuito $q_k = 7,2 \text{ kN/m}^2$; agendo sul terreno, il carico $2 \cdot Q_k = 480 \text{ kN}$ si considera prudenzialmente ripartito su una superficie di sosta di ampiezza pari alla pista e

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 23 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

lunghezza 2,20 m (per analogia con "Circolare" § 5.1.3.3.5.1), quindi gravante coma azione media permanente sull'intera pista, pari a non meno di $33,1 \text{ kN/m}^2 + 7,2 \text{ kN/m}^2 \approx 40 \text{ kN/m}^2$. Il carico è considerato permanente, con applicazione dei relativi coefficienti parziali amplificativi⁶.

- Assenza di azioni sismiche in accordo con le NTC18, in quanto le verifiche sismiche di strutture in fase costruttiva possono omettersi quando le relative durate previste in progetto siano inferiori a 2 anni (§ 2.4.1).

Aspetti specifici di modellazione

- Nessuna riduzione della componente orizzontale della spinta, corrispondente ad interazione tra terreno e paratia non ancora attivata, simulata considerando angolo di attrito tra terreno e manufatto, $\delta = 0^\circ$, per tutti gli strati di terreno (ai fini della valutazione della resistenza passiva, non è necessario tener conto della non planarità delle superfici di scorrimento, conformemente a quanto previsto dalle NTC18).

Verifiche Fase 1: combinazioni di carico

- Combinazione 1, caso A1-M1
 Spinta terreno ($\gamma = 1,30$)
 Sisma H, sisma V
 Carico sulla paratia
 Carico permanente sul profilo ($\gamma = 1,35$)
 assente
 assente
 40 kN/m²
- Combinazione 2, caso A2-M2
 Spinta terreno ($\gamma = 1,00$)
 Sisma H, sisma V
 Carico sulla paratia
 Carico permanente sul profilo ($\gamma = 1,15$)
 assente
 assente
 40 kN/m²
- Combinazione 3, SLE - Rara
 Spinta terreno ($\gamma = 1,0$)
 Sisma H, sisma V
 Carico sulla paratia
 Carico permanente sul profilo ($\gamma = 1,00$)
 assente
 assente
 40 kN/m²
- Combinazione 4, SLE - Frequente
 Spinta terreno ($\gamma = 1,0$)
 Sisma H, sisma V
 Carico sulla paratia
 Carico permanente sul profilo ($\gamma = 1,00$)
 assente
 assente
 40 kN/m²
- Combinazione 5, SLE - Quasi permanente
 Spinta terreno ($\gamma = 1,00$)
 Sisma H, sisma V
 Carico sulla paratia
 Carico permanente sul profilo ($\gamma = 1,00$)
 assente
 assente
 40 kN/m²

⁶ I carichi non strutturali considerati in Fase 1 sono considerati "compiutamente definiti" in quanto più che prudenziali e noti, pertanto si potrebbe ricorrere alla possibilità concessa dalle NTC18 (nota alla tabella 6.2.I), adottando per essi lo stesso coefficiente parziale dei carichi permanenti strutturali, equiparandoli esattamente a tale tipologia

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 24 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

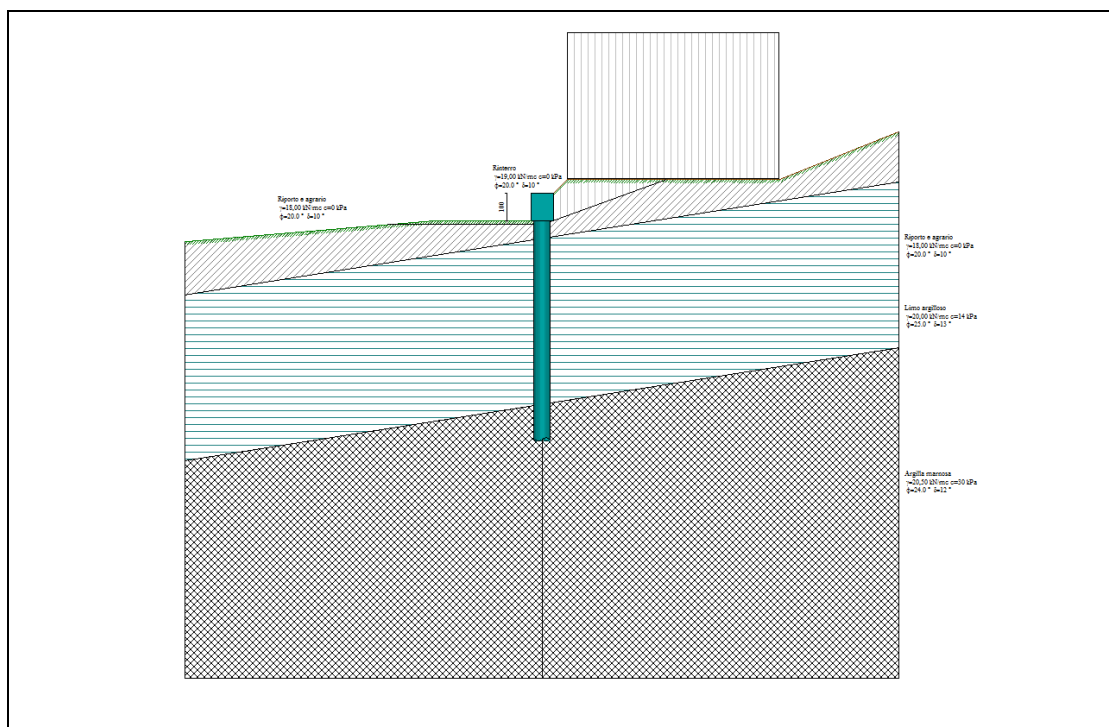


Figura 5.1: Fase 1 - Modello di calcolo.

5.2.2 Fase 2: condizione di normale operatività; paratia e metanodotto in esercizio, sottoposti a sisma di progetto

Geometria

- Profilo di valle ottenuto raccordando il terreno alla quota del piano di esecuzione del cordolo, con questo emergente 0,69 m (corrispondente a cinematismo o perdita di resistenza degli spessori più superficiali, livello determinato dalla inclinazione media del piano di campagna); effetto stabilizzante del terreno soprastante il cordolo sommitale, previsto in progetto come riprofilatura del pendio originale, parzialmente ignorato (anch'esso concettualmente considerato soggetto a cinematismo).
- Profilo di monte secondo conformazione originale, nel rispetto del progetto di ripristino, a partire da scarpa determinata in base al profilo di raccordo al cordolo, considerato con materiale di rinterro fino alla quota di lavoro per la posa della tubazione (generatrice superiore a 1,50 metri dalla sommità di paratia, oltre a diametro e letto di posa, per un totale pari a 2,00 metri).
- Il modello geometrico di calcolo tiene conto delle possibili variazioni del profilo del terreno, a monte e a valle dell'opera, rispetto ai valori nominali, nei modi previsti dalle NTC18 (§ 6.5.2.2).

Azioni

- Assenza di carichi di lavoro, di azioni esterne variabili o accidentali sulla paratia, dovute alla fase costruttiva del metanodotto (considerate nella Fase 1).
- Sovraccarico sul profilo a monte della paratia, in corrispondenza del tracciato

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 25 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

stradale (da 0,70 m a 4,20 m), considerato azione variabile stradale pari a 10 kN/m²; tale posizione deriva dalla ipotesi di azione assimilata prudenzialmente ai ponti di 1^a Categoria, prevista dalle NTC18, data da carico distribuito non inferiore a $q_k = 9,0 \text{ kN/m}^2$; si assumono coefficienti di partecipazione cautelativamente unitari.

- Condizioni dinamiche dovute a sisma di progetto, con componente verticale dell'azione considerata agente sia verso l'alto sia verso il basso, a comporre varie combinazioni di carico, al fine di determinare gli effetti più sfavorevoli; il coefficiente di intensità sismica verticale è assunto $k_v = 0,5 \cdot k_h$ (condizione cautelativa rispetto a quanto previsto al punto 7.11.6.3.1 delle NTC18). Il calcolo è eseguito per lo stato limite SLV e per lo stato limite SLD, anche per verificare eventuali condizioni di spostamento permanente.
- Influenza del sisma considerata relativamente alla sola spinta attiva di monte; il diagramma di incremento sismico è assunto omomorfo al diagramma statico (variabile linearmente lungo l'altezza di sviluppo dell'opera).
- Coefficiente di spostamento β , riduttivo dell'azione sismica, posto unitario ($\rightarrow 3.6$).

Aspetti specifici di modellazione

- Strato sommitale del pendio di valle corrisponde al terreno rimaneggiato, fino alla quota di imposta del cordolo, a rappresentare le condizioni di rinterro.
- Per ciascuno strato di terreno, si tiene conto dell'angolo di attrito tra terreno e manufatto $\delta = \frac{1}{2} \cdot \phi'$; tale fattore è considerato sia nell'espressione di calcolo del coefficiente di spinta attiva sia nell'inclinazione della spinta sulla paratia; δ non è considerato nella spinta passiva (ai fini della valutazione della resistenza, non è quindi necessario tener conto della non planarità delle superfici di scorrimento, conformemente a quanto previsto dalle NTC18).
- In aggiunta all'analisi della sicurezza nei confronti degli stati limite ultimi strutturali e geotecnici, è condotta la verifica di spostamento limite (somma della deformazione elastica e della eventuale traslazione della paratia) in condizioni sismiche, per accertare che esso risulti compatibile con la funzionalità dell'opera da proteggere ($\rightarrow 3.3$).

Verifiche Fase 2: Combinazioni di carico⁷

- Combinazione 1, caso A1-M1

Spinta terreno ($\gamma = 1,30$)	
Carico stradale ($\gamma = 1,35$)	10 kN/m ²
Carico sulla paratia	assente
Carico sul profilo	assente
- Combinazione 2, caso A2-M2

Spinta terreno ($\gamma = 1,00$)	
Carico stradale ($\gamma = 1,15$)	10 kN/m ²
Carico sulla paratia	assente
Carico sul profilo	assente

⁷ Vengono cautelativamente eseguite anche verifiche statiche, con incremento del carico stradale, che concettualmente non corrispondono alle finalità del modello in Fase 2.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 26 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

- Combinazione 3, caso A2-M2
 Spinta terreno ($\gamma = 1,00$)
 Sisma SLV H, sisma SLV V+
 Carico stradale ($\gamma = 1,00$)
 Carico sulla paratia
 Carico sul profilo
 10 kN/m²
 assente
 assente
- Combinazione 4, caso A2-M2
 Spinta terreno ($\gamma = 1,00$)
 Sisma SLV H, sisma SLV V-
 Carico stradale ($\gamma = 1,00$)
 Carico sulla paratia
 Carico sul profilo
 10 kN/m²
 assente
 assente
- Combinazione 5, SLE - Quasi permanente
 Spinta terreno ($\gamma = 1,00$)
 Sisma SLD H, sisma SLD V+
 Carico stradale ($\gamma = 1,00$)
 Carico sulla paratia
 Carico sul profilo
 10 kN/m²
 assente
 assente
- Combinazione 6, SLE - Quasi permanente
 Spinta terreno ($\gamma = 1,0$)
 Sisma SLD H, sisma SLD V-
 Carico stradale ($\gamma = 1,00$)
 Carico sulla paratia
 Carico sul profilo
 10 kN/m²
 assente
 assente

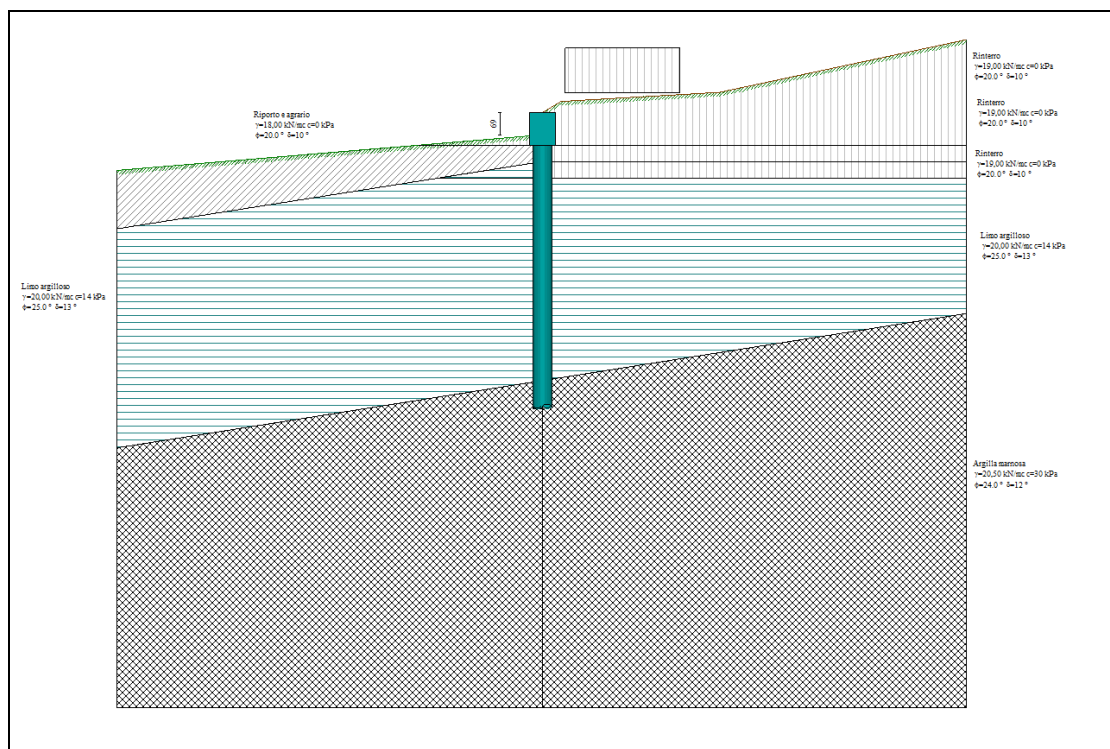


Figura 5.2: Fase 2 - Modello di calcolo.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 27 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

5.2.3 *Fase 3: paratia in condizioni statiche post-sismiche; condizione temporanea che precede il ripristino alla normale operatività*

Geometria

- Cordolo sommitale emergente a valle, non contrastato (modello equivalente a decadimento post-sismico delle caratteristiche di resistenza del terreno, come previsto al punto 7.11.2 delle NTC18)⁸ fino alla quota corrispondente al caso più gravoso tra
 - a) mobilizzazione di spessori di terreno a valle della paratia, in quanto soggetti a disturbo e/o rimaneggiamento (in fase di costruzione del cordolo sommitale) fino a 50 cm sotto il livello di esecuzione di questo (nella fattispecie, 1,50 metri),
 - b) mobilizzazione di interi strati litologici superficiali, a valle della paratia, che sono stati geologicamente accertati come potenzialmente instabili e/o sensibilmente alterati (nella fattispecie, rimozione dello strato di terreno agrario spessore 1,80 – 0,30 m = 1,50 m dalla testa paratia),
 - c) mobilizzazione concettuale di spessori di terreno, a valle della paratia, fino al livello del baricentro della tubazione, quale forma di ulteriore tutela progettuale, a salvaguardia della condotta (nella fattispecie, circa 1,25 metri dalla testa della paratia).

Nessun contributo resistente da parte del materiale sovrastante il piano orizzontale determinato come descritto (a rappresentare terreno mobilitato per cinematismo).

- Profilo di monte secondo conformazione originale, a partire da scarpa determinata in base al relativo profilo di raccordo al cordolo.
- Il modello geometrico di calcolo tiene conto delle possibili variazioni del profilo del terreno, a monte e a valle dell'opera, rispetto ai valori nominali, nei modi previsti dalle NTC18 (§ 6.5.2.2).

Azioni

- Assenza di carichi di lavoro, di azioni esterne variabili o accidentali sulla paratia.
- Sovraccarico sul profilo a monte della paratia, in corrispondenza del tracciato stradale come in Fase 2.

Aspetti specifici di modellazione

- Per ciascuno strato di terreno, si tiene conto dell'angolo di attrito tra terreno e manufatto $\delta = \frac{1}{2} \cdot \varphi'$; tale fattore è considerato solo nell'espressione di calcolo del coefficiente di spinta attiva non nell'inclinazione della spinta, a rappresentare la movimentazione post-sisma del terreno (corrispondente ad interazione tra terreno e paratia non più attivata e nessuna riduzione delle componenti orizzontale della

⁸ Per scelta progettuale, in ciascuna delle tre fasi di verifica, l'intero strato sommitale a monte della paratia, fino alla profondità di posa del metanodotto, è considerato in base a caratteristiche geomeccaniche proprie di un terreno alterato (→ 4.1.2); non si impone, pertanto, una ulteriore riduzione delle caratteristiche di resistenza per decadimento post-sismico, a monte.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 28 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

spinta stessa, con un residuo effetto sulla sua entità); δ non è considerato nella spinta passiva (ai fini della valutazione della resistenza non è quindi necessario tener conto della non planarità delle superfici di scorrimento, conformemente a quanto previsto dalle NTC18).

- In aggiunta all'analisi della sicurezza nei confronti degli stati limite ultimi strutturali e geotecnici, è condotta la verifica di spostamento limite (somma della deformazione elastica e della eventuale traslazione della paratia) in condizioni SLU post-sismiche, per accertare che esso risulti compatibile con la funzionalità dell'opera ($\rightarrow$ 3.3).

Verifiche Fase 3: Combinazioni di carico

- Combinazione 1, caso A1-M1
 - Spinta terreno ($\gamma = 1,30$)
 - Sisma H, sisma V assente
 - Carico stradale ($\gamma = 1,35$) 10 kN/m²
 - Carico sulla paratia assente
 - Carico sul profilo assente
- Combinazione 2, caso A2-M2
 - Spinta terreno ($\gamma = 1,00$)
 - Sisma H, sisma V assente
 - Carico stradale ($\gamma = 1,15$) 10 kN/m²
 - Carico sulla paratia assente
 - Carico sul profilo assente
- Combinazione 3, SLE - Rara
 - Spinta terreno ($\gamma = 1,00$)
 - Sisma H, sisma V assente
 - Carico stradale ($\gamma = 1,00$) 10 kN/m²
 - Carico sulla paratia assente
 - Carico sul profilo assente
- Combinazione 4, SLE - Frequente
 - Spinta terreno ($\gamma = 1,0$)
 - Sisma H, sisma V assente
 - Carico stradale ($\gamma = 1,00$) 10 kN/m²
 - Carico sulla paratia assente
 - Carico sul profilo assente
- Combinazione 5, SLE – Quasi Permanente
 - Spinta terreno ($\gamma = 1,0$)
 - Sisma H, sisma V assente
 - Carico stradale ($\gamma = 1,00$) 10 kN/m²
 - Carico sulla paratia assente
 - Carico sul profilo assente

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA'	REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 29 di 42	Rev. 1	

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

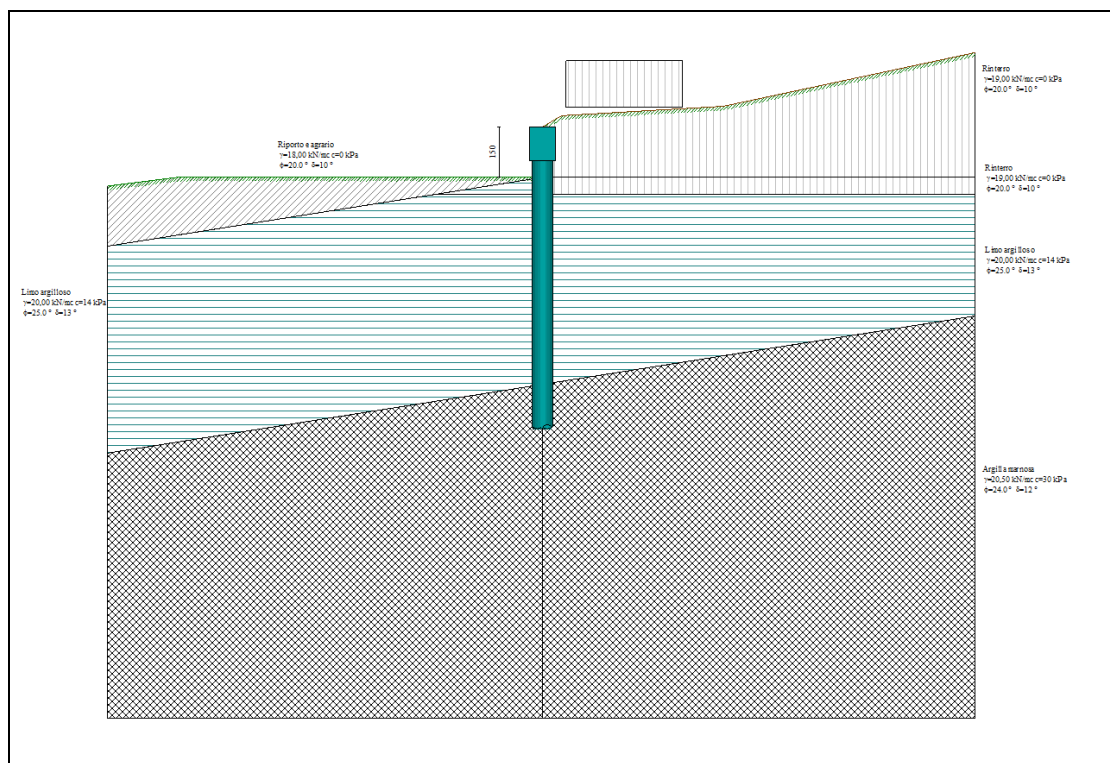


Figura 5.3: Fase 3 - modello di calcolo.

5.3 Risultati delle verifiche

La configurazione geometrica di progetto della paratia (lunghezza, pali per metro, interasse tra gli elementi, diametro pali, lunghezza di infissione, dimensioni del cordolo sommitale di collegamento) e le condizioni di resistenza dei materiali progettualmente definiti risultano idonei per le finalità di stabilizzazione prefissate.

È parimenti verificata la condizione di stabilità globale terreno-paratia.

Non si determinano spostamenti incompatibili con la funzionalità del tronco di gasdotto a monte dell'opera.

Nella seguente tabella si riportano sinteticamente i risultati delle verifiche svolte, relativi alla combinazione dimostratasi più gravosa per ciascuna fase di modellazione.

Tabella 5.1: Sintesi degli esiti di calcolo

Spostamento	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Combinazione	2	2	1
Spostamento orizzontale massimo u (cm)	0,54	0,21	0,38

Stabilità globale	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Combinazione	2	2	2
Minimo coefficiente di sicurezza stabilità globale	3,72	4,81	4,63

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 30 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

Verifiche di corpo rigido	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Combinazione	2	2	2
Minimo fattore di sicurezza al ribaltamento	2,65	4,07	3,55
Minimo fattore di sicurezza a scorrimento	3,37	4,90	4,61

Verifiche strutturali a flessione M/N pali	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Combinazione	2	2	1
Ordinata rispetto alla testa della paratia (m)	2,75	2,75	2,91
Coefficiente di sicurezza minimo (sollecitazioni ultime/calcolo)	1,82	4,99	2,80

Verifiche strutturali a taglio pali	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Combinazione	1	2	1
Ordinata rispetto alla testa della paratia (m)	1,45	1,45	1,50
Coefficiente di sicurezza minimo (V_{Rd}/V_{Ed})	6,10	18,23	9,79

Verifiche strutturali cordolo	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Coefficiente di sicurezza minimo a flessione	3,15	9,40	5,05
Coefficiente di sicurezza minimo al taglio	14,74	13,63	13,63

Dal punto di vista strutturale, la fase di maggiore sollecitazione risulta quella corrispondente alla Fase 1, combinazione 2. Anche le minori condizioni di stabilità globale si determinano in corrispondenza della Fase 1, con coefficiente di sicurezza minimo pari a 3,72.

Lo spostamento massimo si presenta per la paratia in fase di costruzione della linea (Fase 1), per la combinazione 2, caso A2-M2, in condizioni di stato limite ultimo. Essendo il risultato derivante da sola deformazione elastica e di entità minima, sono così determinate condizioni di idoneità anche per gli spostamenti in esercizio, per tutti gli stati limite, statici e dinamici, giacché per questi lo spostamento risulta costantemente inferiori. Sono quindi esclusi effetti sul mantenimento delle condizioni di funzionalità del gasdotto.

I presupposti e le ipotesi del modello di calcolo sono riportati in appendice. Il dettaglio delle elaborazioni è illustrato in apposito allegato, contenente l'intero Fascicolo dei calcoli (All. 2).

Il Fascicolo dei calcoli costituisce l'illustrazione dei risultati numerici, fornendo per ogni elaborazione (fase e combinazione) il dettaglio numerico relativo. In particolare, sono descritti tutti i dati di input della modellazione strutturale, le caratteristiche dei materiali, i parametri ed i coefficienti parziali previsti dalle NTC18, le modalità di applicazione dei carichi, coerentemente con quanto contenuto nella presente relazione. Sono anche riportati i valori di sollecitazione e di spostamento necessari a rappresentare il comportamento complessivo della struttura, in relazione allo stato limite di verifica, per ciascuna elaborazione eseguita (fase e combinazione).

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA'	REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 31 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

Le convenzioni sui segni, le unità di misura, e le legende dei simboli utilizzati sono indicati nello stesso Fascicolo dei calcoli, ove vengono esposti, in forma tabellare:

- risultati delle spinte, relativi a sezioni di discretizzazione della paratia;
- valori delle pressioni, relativi a sezioni di discretizzazione della paratia;
- valori massimi e minimi delle sollecitazioni;
- valori massimi e minimi degli spostamenti;
- risultato della verifica di stabilità globale per la combinazione critica.

Come in precedenza descritto, i risultati numerici testimoniano la compiuta definizione della risposta strutturale, che risulta adeguata, sia nel suo complesso, sia per ciascuno degli aspetti di verifica che sono stati presi in considerazione, nel rispetto di quanto contemplato dalle norme tecniche vigenti.

L'esito delle elaborazioni è rappresentato negli schemi grafici riportati in appendice alla presente relazione, che forniscono anche immediato riscontro di quanto previsto al punto 10.2 delle NTC18. Anche mediante tali rappresentazioni, sono stati analizzati nel dettaglio i risultati di calcolo, in particolare in relazione ai seguenti effetti:

- sollecitazioni per metro di paratia, per la fase e la combinazione più gravosa;
- spostamenti orizzontali della paratia, per la fase e la combinazione più gravosa;
- minima condizione di stabilità globale, per la fase e la combinazione più gravosa;
- dominio di resistenza M/N pali, per la fase e la combinazione più gravosa.

5.4 Determinazione esecutiva delle armature

Una volta determinata la condizione di progetto che implica le maggiori sollecitazioni sugli elementi di paratia, le armature sono state conseguentemente identificate, per la sezione di verifica. Dette armature sono state assegnate a tutti i segmenti dell'opera, in quanto caratterizzati dalle medesime caratteristiche geometriche, con pali al medesimo interasse e medesima lunghezza.

L'opera, così individuata dal punto di vista strutturale, può considerarsi compiutamente definita.

L'adozione, per l'intero sviluppo della paratia, dei risultati di dimensionamento basati su tale caso, relativo alla sezione di massima sollecitazione e alla fase più gravosa, comporta nelle varie altre porzioni dell'opera e per tutta la vita utile la sussistenza di maggiori condizioni di sicurezza, nei confronti degli stati limite considerati. Le condizioni di modellazione corrispondenti alle maggiori criticità possibili risultano di ampia sicurezza per le possibili situazioni intermedie non direttamente analizzate.

Tabella 5.2: Armatura pali

PALI						
			barre		staffa elicoidale	
D [mm]	copristaffa [cm]	copriferro [cm]	Φ [mm]	n	passo [cm]	Φ [mm]
600	2,5	3,5	16	9	15,0	10

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA'	REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 32 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

Tabella 5.3: Armatura cordolo

CORDOLO									
				barre				staffe	
H [mm]	B [mm]	coprstaffa [cm]	copriferro [cm]	Φ [mm]	n	n _v (per lato)	n _h (per lato)	passo [cm]	Φ [mm]
1000	800	2,5	3,5	16	22	7	4	20,0	10

La conformazione esecutiva delle armature per c.a. è stata basata sulle indicazioni delle NTC18. In particolare, per quanto riguarda la posizione nel cordolo e nei pali di paratia, sono stati impostati i valori di copriferro, il diametro delle armature resistenti, la lunghezza minima di ancoraggio. Per quanto attiene alla percentuale minima di armatura in zona tesa (rispetto all'area della sezione) ed alla percentuale minima di armatura in zona compressa (rispetto all'area della sezione), si è tenuto conto della specificità degli elementi componenti le paratie (in particolare per il cordolo), rispetto ai requisiti previsti per elementi analoghi, quali le fondazioni, non potendosi applicare minimi standard non applicabili al caso delle opere geotecniche.

Per i pali, la verifica agli stati limite ultimi per flessione è riportata nel diagramma del dominio resistente M-N della sezione trasversale. Gli assi del diagramma vengono suddivisi a tratti costanti; sull'asse delle ascisse è riportato il valore dello sforzo normale crescente fino al valore ultimo e sull'asse delle ordinate il valore del momento crescente fino al valore ultimo della sezione. I valori ultimi dipendono, ovviamente, dalle caratteristiche geometriche della sezione, dalle caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti e dalla posizione e sezione dell'armatura. Poiché sezione ed armature sono costanti, la frontiera del dominio di resistenza risulta identica per l'intero sviluppo degli elementi. Il valore dello sforzo normale agente, alle varie profondità, risulta estremamente ridotto in relazione al valore limite. I punti dati dalle combinazioni N (ascisse) e M (ordinate) agenti, risultano ampiamente entro il dominio di resistenza. La verifica è sintetizzata nel coefficiente di sicurezza, dato dal reciproco del rapporto tra la lunghezza del segmento identificativo del punto delle sollecitazioni agenti nel dominio M/N e quello del segmento proiettato fino alla frontiera limite. I valori minimi riscontrati, esposti in precedenza (tabella 5.1), risultano nei limiti di norma.

Per quanto riguarda la sollecitazione di taglio nei pali, la verifica è determinata dal coefficiente di sicurezza dato dal rapporto tra il taglio resistente espresso dalla sezione (costante lungo lo sviluppo verticale dell'elemento) e la sollecitazione agente.

La staffatura dei pali è prevista a spirale, secondo le esigenze minime di diametro e di passo determinate per il caso più gravoso; si è imposto diametro superiore ad 1/3 del diametro massimo delle barre verticali. Per le barre longitudinali dei pali è prevista piena lunghezza di ancoraggio nel cordolo sommitale; la lunghezza di sovrapposizione nel tratto rettilineo, ove prevista, è posta non minore di 40 volte il diametro della barra; la distanza mutua (interferro) nella sovrapposizione non superiore a 4 volte il diametro. I pali, in ragione della rigidità del cordolo sommitale, si considerano, ai fini di calcolo, non soggetti a sforzi torsionali.

L'armatura del cordolo, costituita da ferri longitudinali ai lembi orizzontali e di parete, oltre a staffe a braccia chiuse, con ganci a 135° prolungati per almeno 10 diametri alle due estremità e assicurati alle barre longitudinali.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 33 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

6 VALUTAZIONE DELL'ANALISI STRUTTURALE

6.1 Affidabilità e validazione del codice di calcolo

L'opera è stata dimensionata in base a modellazioni e analisi autonomamente sviluppate; successivamente la struttura è stata sottoposta a verifica con software commerciale di uso corrente, al fine di consentire la possibilità di riprodurre la relativa elaborazione all'esterno dell'Organismo di progettazione. Pertanto i risultati ottenuti mediante l'utilizzo di software commerciale di uso corrente non costituiscono l'unico supporto utilizzato ma, in primo luogo, uno strumento di comparazione intrinseco all'attività di progettazione e, in secondo luogo, una elaborazione utile alla esposizione a tutti i Soggetti interessati (Cliente, Enti di controllo, Operatori preposti all'esecuzione dell'opera); ciò al fine di consentire la possibilità di riprodurre la relativa elaborazione all'esterno dell'Organismo di progettazione.

In tale ottica, la determinazione di quanto fin qui esposto (entità delle spinte, delle sollecitazioni interne nonché dello stato di deformazione e di tensione nei materiali componenti la paratia) è stata ottenuta con l'ausilio di un programma di calcolo (denominato "PAC 16.0 – Analisi e calcolo paratie", vers. 16.02 C, 2023, prodotto e commercializzato dalla "Aztec Informatica")⁹, che esegue un'analisi agli elementi finiti, ricorrendo a calcoli non lineari. Il programma è dotato di un manuale tecnico ed operativo; consente la stampa di tutti i dati di input, dei dati del modello strutturale utilizzato, dei risultati del calcolo e delle verifiche dei diagrammi delle sollecitazioni e delle deformate. L'assistenza è effettuata direttamente dalla casa produttrice, mediante linea telefonica o e-mail.

Come previsto in § 10.2 delle NTC 2018, l'affidabilità del codice utilizzato è stata verificata sia effettuando il raffronto tra casi prova di cui si conoscono i risultati esatti, sia esaminando le indicazioni, la documentazione ed i test forniti dal produttore. In particolare, è stata valutata la relazione sugli esempi di validazione fornita dalla Aztec Informatica. S.r.l., che contiene un insieme di test il cui obiettivo è di verificare l'affidabilità e l'applicabilità del solutore agli elementi finiti utilizzato dal programma. Al fine di raggiungere l'obiettivo di verifica, gli esempi riportati nelle pagine di tale documento riguardano differenti analisi di calcolo e/o condizioni al contorno, provenienti da autorevoli testi ingegneristici, e fanno riferimento a problemi la cui soluzione teorica, essendo nota, può essere confrontata con quella fornita dal programma al termine dell'elaborazione. Per ogni test svolto viene citata la specifica fonte del riferimento e vengono forniti tutti i dati necessari per riprodurre i risultati ottenuti.

I documenti di validazione forniti dal produttore del software sono annessi al Fascicolo dei calcoli allegato (All. 2).

L'affidabilità del software è stata sottoposta a verifica anche mediante confronto tra i risultati di strutture campione e gli esiti di numerose analoghe applicazioni già condotte nel corso degli anni dall'Organismo di progettazione, per mezzo di altri strumenti. Oltre a tale fase preliminare, il codice di calcolo utilizzato è stato esaminato durante la fase di elaborazione, essendo questo dotato di filtri e controlli di autodiagnostica, che agiscono a vari livelli, sia nella definizione del modello, sia nel calcolo vero e proprio. I controlli vengono visualizzati, sotto forma di tabulati, di videate a colori o finestre di messaggi; tutti i risultati progressivi sono verificati, oltre

⁹ Software concesso in licenza d'uso a "Saipem S.p.A. * Licenza AIU3619H6".

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 34 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

che in formato numerico, anche in formato grafico, permettendo così di evidenziare agevolmente eventuali incongruenze.

Considerata la tipologia dell'intervento, riconducibile senza dubbio ad opera geotecnica ordinaria, non si rende necessaria una validazione indipendente del calcolo strutturale o un controllo incrociato sui risultati delle elaborazioni ottenute, se non attraverso opportune verifiche sugli elementi più sollecitati. Pertanto, con riferimento al paragrafo 10.2 delle NTC18, il Progettista

dichiara

di aver esaminato preliminarmente la documentazione a corredo del software, per valutarne l'affidabilità e soprattutto l'idoneità al caso specifico; detta documentazione, fornita dal produttore o dal distributore del software, contenendo una esauriente descrizione delle basi teoriche e degli algoritmi impiegati, ha permesso di individuarne il campo d'impiego e analizzarne i casi-prova interamente risolti e commentati, per i quali sono forniti i file di input necessari a riprodurre l'elaborazione; le verifiche condotte consentono di validare l'applicabilità del codice di calcolo al caso in progetto.

6.2 Giudizio sull'elaborazione

In base a quanto già illustrato, i risultati delle elaborazioni sono stati sottoposti a controlli che ne hanno comprovato l'attendibilità: nel caso specifico dell'opera in progetto, il giudizio sull'elaborazione è stato basato sul confronto con i risultati della procedura di calcolo adottata in fase di primo dimensionamento. In base a tali comparazioni, le deformate della struttura sono risultate coerenti con le ipotesi effettuate e con le direzioni di carico: in particolare, sono stati raffrontati, per prassi consolidata di progettazione:

- lo stato di equilibrio in Fase 3 e la relativa distribuzione delle pressioni;
- la risultante della spinta attiva e della spinta passiva, in Fase 1.

Sulla base di considerazioni riguardanti gli stati tensionali e deformativi, si è valutata la consistenza delle scelte operate in sede di schematizzazione e di modellazione della struttura e delle azioni. Si è inoltre controllato che le sollecitazioni derivanti dai calcoli dessero valori in equilibrio con i carichi applicati; in particolare, per i valori delle spinte associate alle azioni sismiche, si è provveduto a confronto con valori ottenuti da appositi schemi semplificati, appositamente predisposti. Il ricorso a più modelli di analisi relativi a diverse fasi di sollecitazione ha consentito inoltre un'immediata verifica incrociata della attendibilità degli esiti di calcolo.

Si è anche potuto verificare che non sussistono particolarità della struttura progettata tali da indurre, nei risultati conseguiti dal codice di calcolo, differenze sensibili tra quanto deriva dalle procedure di discretizzazione che esso applica, rispetto a quanto deriverebbe da una analisi basata su grandezze e fenomeni rappresentabili "in continuo", limitatamente a quanto applicabile. In particolare, nel rispetto dello spirito delle indicazioni di cui al citato § 10.2 delle NTC08, in ragione della logica e delle procedure di modellazione condotte, il controllo del calcolo automatico è stato basato sostanzialmente sulle verifiche di quanto potrebbe essere indotto nei risultati (come componente attribuibile esclusivamente alle modalità calcolo) dalla discretizzazione FEM. A tal proposito, non si sono registrati risultati anomali che si possano far dipendere da effettive e conosciute lacune di schematizzazione, proprie del software, anche ai fini di riproducibilità dell'iter di calcolo. Le opzioni di analisi impostate

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 35 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

(lunghezza elemento 5 cm, tolleranza sulla soluzione 0,00001, numero di loop 250, ampiezza passo 0,01, moltiplicatore carichi 20) sono risultate adeguate.

Le funzioni di visualizzazione e di interrogazione dei modelli implementati, offerte dal programma di calcolo, hanno permesso di controllare sia la coerenza geometrica, sia gli effetti delle azioni, con riferimento alla realtà fisica che i modelli stessi vogliono prudenzialmente rappresentare. Durante le fasi di elaborazione, si è inoltre verificato che tutte le funzioni di controllo ed autodiagnostica del software utilizzato abbiano dato esito positivo: l'elaborazione è risultata corretta e il comportamento del processo di calcolo adeguato al problema impostato. I risultati dei calcoli di verifica sono stati analizzati altresì controllando l'eventuale plasticizzazione percentuale delle molle che simulano il terreno, consentendo un controllo di efficienza del processo FEM, anche per comparazione tra gli esiti delle varie fasi oggetto di modellazione.

Corrispondentemente allo spirito ed alla lettera delle NTC18, sulla base delle procedure di calcolo autonomamente sviluppate, si sono accettati i risultati, verificando che non differissero oltre il 6%, in termini di sollecitazione massima, rispetto a quanto considerato valido in fase di dimensionamento dell'opera e di controllo del codice di calcolo. È conclusione ormai consolidata nella dottrina progettuale che ogni ulteriore comparazione tra i risultati derivanti dal calcolo automatico e quelli scaturenti dall'analisi di sollecitazioni o deformazioni in singole porzioni strutturali, mediante schemi semplificati e parziali (con formulazioni affette da propri limiti di applicabilità e la cui esibizione non è, peraltro, prescritta), avrebbe unicamente finalità formali o puramente esornative. Alla luce di quanto esposto e in base alle descritte valutazioni numeriche di validazione, si assolve pienamente a quanto richiesto della Norme tecniche vigenti, emanate con Decreto Ministeriale, e, in subordine, dai regolamenti regionali, non essendo richiesto da detti dispositivi di esporre il dettaglio del complesso di procedure di controllo e sviluppo proprie dell'ambito progettuale, essendo queste implicitamente ammesse nella espressione del giudizio di accettabilità che compete al Progettista, e che, pertanto, viene qui espresso.

Sulla base dei raffronti eseguiti, si conclude in merito alla piena accettabilità dei risultati derivanti dal codice di calcolo, che sono quindi stati adottati per l'elaborazione dei disegni esecutivi. In essi, i particolari costruttivi e la conformazione e la posizione delle barre di armatura sono stati ulteriormente verificati e rielaborati, introducendo tutti gli accorgimenti necessari a garantire effettive condizioni di agevole messa in opera, sulla base di considerazioni proprie della pratica costruttiva e della regola dell'arte.

Pertanto, con riferimento al paragrafo 10.2 delle NTC18, il Progettista

dichiara

di aver sottoposto i risultati delle elaborazioni a controlli che ne comprovano l'attendibilità; che tali valutazioni sono consistite nel confronto con i risultati di calcolazioni condotte in base ad algoritmi autonomamente sviluppati, adottati in fase di dimensionamento dell'opera; che, sulla base di considerazioni riguardanti gli stati tensionali e deformativi, ha valutato la correttezza delle scelte operate in sede di schematizzazione e di modellazione della struttura e delle azioni; che i controlli svolti sono quelli in precedenza sinteticamente illustrati e che la comparazione tra i risultati derivanti dal codice di calcolo e quelli discendenti dalle valutazioni autonomamente condotte hanno fornito esito positivo.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 36 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

APPENDICE - PRINCIPI DEL CODICE DI CALCOLO AUTOMATICO

Schematizzazione della paratia

Nel caso generale, l'equilibrio della paratia è assicurato dal bilanciamento fra la spinta attiva agente da monte sulla parte fuori terra, la resistenza passiva che si sviluppa da valle verso monte nella zona interrata e la contropinta che agisce da monte verso valle nella zona interrata, sotto il centro di rotazione.

Nell'approccio classico di schematizzazione dell'equilibrio, detta H l'altezza fuori terra della paratia, d la profondità di infissione e y_t la posizione del tirante rispetto alla sommità della paratia, l'equilibrio alla rotazione viene espresso dalla relazione:

$$R_{pv} \left(H + \frac{2}{3}d - y_t \right) = S_a \left[\frac{2}{3}(H + d) - y_t \right]$$

dove R_{pv} (resistenza passiva a valle) e S_a (spinta attiva da monte) si esprimono come:

$$R_{pv} = \frac{1}{2} \gamma d^2 K_p \quad S_a = \frac{1}{2} \gamma (H + d) K_a$$

Sostituendo queste espressioni e semplificando si ottiene:

$$2(K_p - K_a)d^3 + [3K_p(H - y_t) - 3K_a(2H - y_t)]d^2 - 6HK_a(H - y_t) - H^2K_a(2H - 3y_t) = 0$$

Tale equazione di terzo grado in d va risolta per tentativi. Noto d è possibile ricavare la resistenza passiva, R_{pv} , e la spinta attiva S_a . Il tiro nel tirante si ricava dall'equilibrio alla traslazione $T = S_a - R_{pv}$.

Partendo da tale condizione generale di progetto, si ricorre all'analisi mediante elementi finiti, che consente quanto segue:

- possibilità di considerare la paratia con la sua effettiva rigidezza;
- possibilità di schematizzare i tiranti con l'effettiva rigidezza (ed eventualmente di inserirne più file);
- possibilità di schematizzare il comportamento del terreno in modo più aderente alla realtà;
- informazioni dettagliate sugli spostamenti e sulle sollecitazioni;
- diagramma effettivo delle pressioni sul terreno.

Il metodo degli elementi finiti (FEM) è il metodo numerico attualmente più diffuso nello studio di problematiche sia di meccanica dei solidi sia di altre discipline (trasmissione del calore, fluidodinamica, ecc.). Ogni schematizzazione numerica discende da un principio variazionale. In funzione del principio variazionale adottato si hanno diverse modellazioni. In particolare, dal "principio di minimo dell'energia potenziale totale" discendono i cosiddetti elementi compatibili.

In questo tipo di modelli vengono ritenute soddisfatte le equazioni del legame elastico e la congruenza degli spostamenti. Deve essere quindi trovata la soluzione equilibrata. Si dimostra che questa soluzione, in termini di spostamenti, è quella che rende minimo il funzionale energia potenziale totale:

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 37 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

$$\Pi(u) = \frac{1}{2} \int_V \varepsilon^T D \varepsilon dV - \int_V u^T b dV - \int_S u^T \bar{f} dS$$

dove

ε è il vettore deformazioni

u è il vettore spostamento

b è il vettore delle forze di volume

D è la matrice che lega le tensioni alle deformazioni.

Deve risultare soddisfatta la condizione di minimo:

$$\partial \Pi(u) = 0$$

Nel metodo degli elementi finiti, il continuo da analizzare viene discretizzato in elementi che sono interconnessi fra di loro in corrispondenza dei nodi. La soluzione viene quindi ricercata in termini di spostamenti nodali. Lo spostamento di un generico punto dell'elemento viene ottenuta dagli spostamenti nodali tramite funzioni di forma. La relazione fra spostamenti nodali e spostamento in un generico punto dell'elemento è esprimibile in termini matriciali come:

$$u = \Phi u_e$$

Le deformazioni sono legate agli spostamenti da un operatore lineare alle derivate parziali L :

$$\varepsilon = L u = L \Phi u_e = B u_e$$

Tenendo conto di queste relazioni, sostituendole nella espressione dell'energia potenziale, e trasformando gli integrali in sommatorie, segue:

$$\Pi(U) = \sum_1^{ne} \left(\frac{1}{2} u_e^T K_e u_e - u_e^T p_e \right)$$

dove:

$$K_e = \int_{V_e} B^T D B dV$$

è la matrice di rigidezza dell'elemento e p_e rappresenta il vettore dei carichi nodali dell'elemento. Indicando con K la matrice di rigidezza globale, P il vettore dei carichi nodali di tutta la struttura e con U il vettore degli spostamenti globali (ottenuti come assemblaggio delle relative grandezze dell'elemento) la condizione di minimo si scrive come:

$$K U = P$$

Da questo sistema (incogniti gli spostamenti e con termine noto i carichi), si ricavano gli spostamenti nodali della struttura mediante la:

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 38 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

$$U = K^{-1} P$$

L'assemblaggio della matrice di rigidezza globale, del vettore dei carichi e del vettore degli spostamenti necessita di un opportuno operatore di rotazione, che permette di riportare le grandezze dal sistema di riferimento dell'elemento al sistema di riferimento globale. Una volta risolto il sistema e ricavato il vettore degli spostamenti globali U è possibile ricavare il vettore degli spostamenti dell'elemento e le sollecitazioni.

Per l'applicazione del metodo, la paratia è considerata come una struttura a prevalente sviluppo lineare (si fa riferimento ad un metro di larghezza) con comportamento a trave. Come caratteristiche geometriche della sezione si assume il momento d'inerzia I e l'area A , per metro lineare di larghezza della paratia. Il modulo elastico è quello del materiale utilizzato per la paratia.

La parte fuori terra della paratia è suddivisa in elementi di lunghezza pari a circa 5 centimetri e più o meno costante per tutti gli elementi. La suddivisione è suggerita anche dalla eventuale presenza di tiranti, carichi e vincoli. Infatti, questi elementi devono capitare in corrispondenza di un nodo.

La parte interrata della paratia è suddivisa in elementi di lunghezza, come visto sopra, pari a circa 5 centimetri.

I carichi agenti possono essere di tipo distribuito (spinta della terra, diagramma aggiuntivo di carico, spinta della falda, diagramma di spinta sismica) oppure concentrati. I carichi distribuiti sono riportati sempre come carichi concentrati nei nodi (sotto forma di reazioni di incastro perfetto cambiate di segno).

Schematizzazione del terreno

La modellazione del terreno si rifà al classico schema di Winkler. Esso è visto come un letto di molle indipendenti fra di loro reagenti solo a sforzo assiale di compressione. La rigidezza della singola molla è legata alla costante di sottofondo del terreno (*costante di Winkler*). La costante di sottofondo, k , è definita come la tensione che occorre applicare per ottenere uno spostamento unitario. Dimensionalmente è espressa quindi come rapporto fra una tensione ed uno spostamento $[F/L^3]$.

È evidente che i risultati sono migliori quanto più è elevato il numero delle molle che schematizzano il terreno. Se m è l'interasse fra le molle (in cm) e b è la larghezza della paratia in direzione longitudinale ($b=100$ cm), occorre ricavare l'area equivalente, A_m , della molla (a cui si assegna una lunghezza pari a 100 cm). Indicato con E_m il modulo elastico del materiale costituente la paratia (in Kg/cm^2), l'equivalenza, in termini di rigidezza, si esprime come

$$A_m = 10000 \cdot \frac{k \cdot \Delta m}{E_m}$$

Per le molle di estremità, in corrispondenza della linea di fondo scavo ed in corrispondenza dell'estremità inferiore della paratia, si assume una area equivalente dimezzata. Inoltre, tutte le molle hanno, ovviamente, rigidezza flessionale e tagliante nulla e sono vincolate all'estremità alla traslazione. Quindi la matrice di rigidezza di tutto il sistema paratia-terreno sarà data dall'assemblaggio delle matrici di rigidezza degli elementi della paratia (elementi a rigidezza flessionale, tagliante ed assiale) e delle molle (rigidezza assiale).

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 39 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

Modalità di analisi e comportamento elasto-plastico del terreno

A differenza di altri problemi di ingegneria geotecnica, nel caso delle paratie, considerare il terreno con un comportamento elastico lineare costituisce una eccessiva approssimazione.

Fra le varie soluzioni possibili per migliorare la soluzione, una delle più praticabili e che fornisce risultati soddisfacenti è quella di considerare il terreno con comportamento elasto-plastico perfetto. Si assume cioè che la curva sforzi-deformazioni del terreno abbia andamento bilatero. A tali fine, occorre scegliere il criterio di plasticizzazione del terreno (molle). Si può fare riferimento ad un criterio di tipo cinematico: la resistenza della molla cresce con la deformazione fino a quando lo spostamento non raggiunge il valore X_{max} ; una volta superato tale spostamento limite non si ha più incremento di resistenza all'aumentare degli spostamenti. Un altro criterio può essere di tipo statico: si assume che la molla abbia una resistenza crescente fino al raggiungimento di una pressione p_{max} . Tale pressione può essere imposta pari al valore della pressione passiva in corrispondenza della quota della molla. Un ulteriore criterio si può ottenere dalla combinazione dei due descritti precedentemente: plasticizzazione o per raggiungimento dello spostamento limite o per raggiungimento della pressione passiva.

Dal punto di vista strettamente numerico, l'introduzione di criteri di plasticizzazione conduce ad una analisi di tipo non lineare (non linearità meccaniche), che comporta un aggravio computazionale non indifferente. L'entità di tale aggravio dipende dalla particolare tecnica adottata per la soluzione. Nel caso di analisi elastica lineare il problema si risolverebbe con la soluzione del sistema fondamentale già introdotto

$$K U = P$$

Un sistema non lineare, invece, deve essere risolto mediante un'analisi al passo, per tener conto della plasticizzazione delle molle. Quindi si procede per passi di carico, a partire da un carico iniziale p_0 , fino a raggiungere il carico totale p . Ogni volta che si incrementa il carico si controllano eventuali plasticizzazioni delle molle.

Se si hanno nuove plasticizzazioni la matrice globale viene riassemblata, escludendo il contributo delle molle plasticizzate. Il procedimento descritto se fosse applicato in questo modo sarebbe particolarmente gravoso (la fase di decomposizione della matrice di rigidità è particolarmente onerosa). Si ricorre pertanto a soluzioni che escludono il riassettaggio e la decomposizione della matrice, ma usano la matrice elastica iniziale (*metodo di Riks*). Si tratta di un metodo di Newton-Raphson modificato e ottimizzato.

L'analisi condotta secondo questa tecnica offre dei vantaggi immediati: essa restituisce l'effettiva deformazione della paratia e le relative sollecitazioni; inoltre fornisce informazioni dettagliate circa la deformazione e la pressione sul terreno. Infatti, la deformazione è direttamente leggibile, mentre la pressione viene data dallo sforzo nella molla diviso per l'area di influenza della molla stessa. Si determina quindi quale è la zona di terreno effettivamente plasticizzato. Inoltre, dalle deformazioni si ottengono informazioni sul possibile meccanismo di rottura del terreno.

Calcolo della spinta - metodo di Culmann

Il metodo di Culmann adotta le stesse ipotesi di base del metodo di Coulomb: cuneo di spinta a monte della parete, che si muove rigidamente lungo una superficie di

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 40 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

rottura rettilinea o spezzata (nel caso di terreno stratificato).

La differenza sostanziale è che mentre Coulomb considera un terrapieno con superficie a pendenza costante e carico uniformemente distribuito (il che permette di ottenere una espressione in forma chiusa per il valore della spinta), il metodo di Culmann consente di analizzare situazioni con profilo di forma generica e carichi sia concentrati sia distribuiti comunque disposti. Inoltre, rispetto al metodo di Coulomb, risulta più immediato e lineare tener conto della coesione del masso spingente. Il metodo di Culmann, nato come metodo essenzialmente grafico, si è evoluto per essere trattato mediante analisi numerica (noto in questa forma come metodo del cuneo di tentativo).

I passi del procedimento risolutivo sono i seguenti:

- si impone una superficie di rottura (angolo di inclinazione ρ rispetto all'orizzontale) e si considera il cuneo di spinta delimitato dalla superficie di rottura stessa, dalla parete su cui si calcola la spinta e dal profilo del terreno;
- si valutano tutte le forze agenti sul cuneo di spinta e cioè peso proprio (W), carichi sul terrapieno, resistenza per attrito e per coesione lungo la superficie di rottura (R e C) e resistenza per coesione lungo la parete (A);
- dalle equazioni di equilibrio si ricava il valore della spinta S sulla parete.

Questo processo viene iterato fino a trovare l'angolo di rottura, per cui la spinta risulta massima nel caso di spinta attiva e minima nel caso di spinta passiva.

Le pressioni sulla parete di spinta si ricavano derivando l'espressione della spinta S rispetto all'ordinata z . Noto il diagramma delle pressioni si ricava il punto di applicazione della spinta.

La spinta attiva viene considerata agente dalla testa della paratia fino alla linea di fondo scavo. Inoltre, nel tratto compreso fra la linea di fondo scavo ed il punto di nullo del diagramma agirà una spinta, pari alla differenza fra la spinta attiva di monte e la spinta passiva da valle (pressione efficace).

Il valore totale della spinta agente sulla paratia non coinciderà necessariamente con questo valore: infatti, nel caso in cui la paratia tende a spostarsi verso monte, il terreno a monte reagirà a questo spostamento fornendo un incremento di spinta che, in alcuni casi, può superare di molto la spinta attiva. In sostanza la forma ed il valore della spinta vengono alterati dall'interazione terreno struttura.

Spinta in presenza di sisma

Per tenere conto dell'incremento di spinta dovuta al sisma si fa riferimento al metodo di Mononobe-Okabe.

Detta ε l'inclinazione del terrapieno rispetto all'orizzontale e β l'inclinazione della parete rispetto alla verticale, si calcola la spinta S' considerando un'inclinazione del terrapieno e della parete pari a

$$\varepsilon' = \varepsilon + \theta$$

$$\beta' = \beta + \theta$$

dove $\theta = \arctg(C)$ essendo C il coefficiente di intensità sismica.

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA'	REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 41 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

Detta S la spinta calcolata in condizioni statiche, l'incremento di spinta da applicare è espresso da:

$$\Delta S = A S' - S$$

dove il coefficiente A vale

$$A = \frac{\cos^2(\beta + \theta)}{\cos^2 \beta \cdot \cos \theta}$$

Tale incremento di spinta deve essere applicato ad una distanza dalla base pari a $2/3$ dell'altezza della parete stessa.

Oltre a questo incremento bisogna tenere conto delle forze d'inerzia orizzontali che si destano per effetto del sisma. Tale forza è valutata come

$$F_i = C \cdot W$$

dove W è il peso della paratia e va applicata nel baricentro dei pesi.

Verifica della stabilità globale

Per la determinazione del valore di confronto rispetto al coefficiente di sicurezza di Legge, è usata la tecnica della suddivisione a strisce della superficie di scorrimento da analizzare.

La superficie di scorrimento è supposta circolare. In particolare, si esaminano, per un dato centro, 3 cerchi differenti: un cerchio passante per la linea di fondo scavo, un cerchio passante per il piede della paratia ed un cerchio passante per il punto medio della parte interrata.

Si determina il minimo coefficiente di sicurezza su una maglia di centri, posta in prossimità della sommità della paratia. Il numero di strisce è pari a 50.

Si adotta per la verifica di stabilità globale il metodo di Bishop. Il coefficiente di sicurezza nel metodo di Bishop si esprime secondo la seguente formula:

$$\eta = \frac{\sum_i \left(\frac{c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan \phi_i}{m} \right)}{\sum_i W_i \sin \alpha_i}$$

dove il termine m è espresso da

$$m = \left(1 + \frac{\tan \phi_i \tan \alpha_i}{\eta} \right) \cos \alpha_i$$

dove

- n è il numero delle strisce considerate,
- b_i e α_i sono la larghezza e l'inclinazione della base della striscia i esima rispetto all'orizzontale,

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-CIV-E-10500	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 42 di 42	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80500

- W_i è il peso della striscia i -esima,
- c_i e ϕ_i sono le caratteristiche del terreno (coesione ed angolo di attrito) lungo la base della striscia.

Inoltre, u_i rappresenta la pressione neutra lungo la base della striscia.

Quindi, assunto un cerchio di tentativo si suddivide in n strisce e dalla formula precedente si ricava η , per successive approssimazioni, assumendo un valore iniziale da inserire nell'espressione di m ed iterare fin quando il valore calcolato coincide con il valore assunto.

Questo procedimento è eseguito per il numero di centri prefissato ed è assunto, come coefficiente di sicurezza del pendio, il minimo dei coefficienti così determinati.