

ANAS S.p.A.

DIREZIONE CENTRALE PROGRAMMAZIONE PROGETTAZIONE

PA 12/09

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO - NORD EUROPA

ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA - A19

S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE"

AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001

Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19

PROGETTO ESECUTIVO

Contraente Generale:



OPERE D'ARTE MAGGIORI VIADOTTI

Viadotto Fosso Mumia

Relazione di calcolo Opere Provisionali

Codice Unico Progetto (CUP) : F91B09000070001

Codice Elaborato:

PA12_09 - E 1 4 6 V I 2 0 3 V I 0 3 2 C L 0 1 0 A - Scala:

F							
E							
D							
C							
B							
A	Aprile 2011	EMISSIONE	T. FASOLO	F. NIGRELLI	M. LITI	P. PAGLINI	
REV.	DATA	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	AUTORIZZATO	

Responsabile del procedimento: Ing. MAURIZIO ARAMINI

Il Progettista:



Il Consulente Specialista:

3TI ITALIA S.p.A.
DIRETTORE TECNICO
Ing. Stefano Luca Possati
Ordine degli Ingegneri
Provincia di Roma n. 20809

Il Geologo:



Il Coordinatore per la sicurezza
in fase di progetto:



Il Direttore dei lavori:



CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO-NORD EUROPA ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA-A19 S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE" AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001 Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19 Progetto Esecutivo	Opera: Viadotto Fosso Mumia
	Relazione di Calcolo opere provv.
	Pagina 1 di 20
	Nome file: V103-2-CL-010_A.00_relazione calcolo op-prov.doc

INDICE

1	PREMESSA	2
2	NORME E RIFERIMENTI.....	3
3	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI.....	3
4	DESCRIZIONE DELL'OPERA	4
5	INQUADRAMENTO GEOTECNICO	5
6	PROCEDURA DI CALCOLO AI SENSI DEL D.M. 14-01-2008	6
7	ANALISI DELL'INTERAZIONE OPERA-TERRENO E VERIFICHE.....	10
7.1	ANALISI DELL'INTERAZIONE OPERA-TERRENO E VERIFICHE.....	10
7.2	PARAMETRI DEL TERRENO	11
7.3	FASI DI CALCOLO	11
7.4	MODELLAZIONE PARATIA	11
7.5	RISULTATI DELL'ANALISI.....	12
8	VERIFICHE SLU.....	14
8.1	VERIFICHE STRUTTURALI DELLA PARATIA	14
9	VERIFICHE GEO DELL'INSIEME OPERA TERRENO	16
10	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	19

1 PREMESSA

Nella presente relazione si riportano le verifiche geotecnico-strutturali delle opere di sostegno necessarie per la realizzazione delle pile P07 di entrambe le carreggiate e della spalla spB carreggiata sinistra. Le opere consistono in una paratia di pali accostati di diametro 800mm.

La descrizione dettagliata delle opere è riportata al paragrafo 4.

L'interazione opera terreno è studiata con analisi numerica agli elementi finiti (FEM). Nel calcolo sono simulate le differenti fasi esecutive. Nelle fasi di calcolo non è simulata la presenza del sisma data la provvisorietà dell'opera (tempo inferiore a 2 anni). Le verifiche geotecniche-strutturali sono svolte in accordo al DM 14-01-2008.

Il rapporto opera terreni è ricostruito sulla base del profilo geotecnico a corredo del presente progetto. (cfr. paragrafo 5).

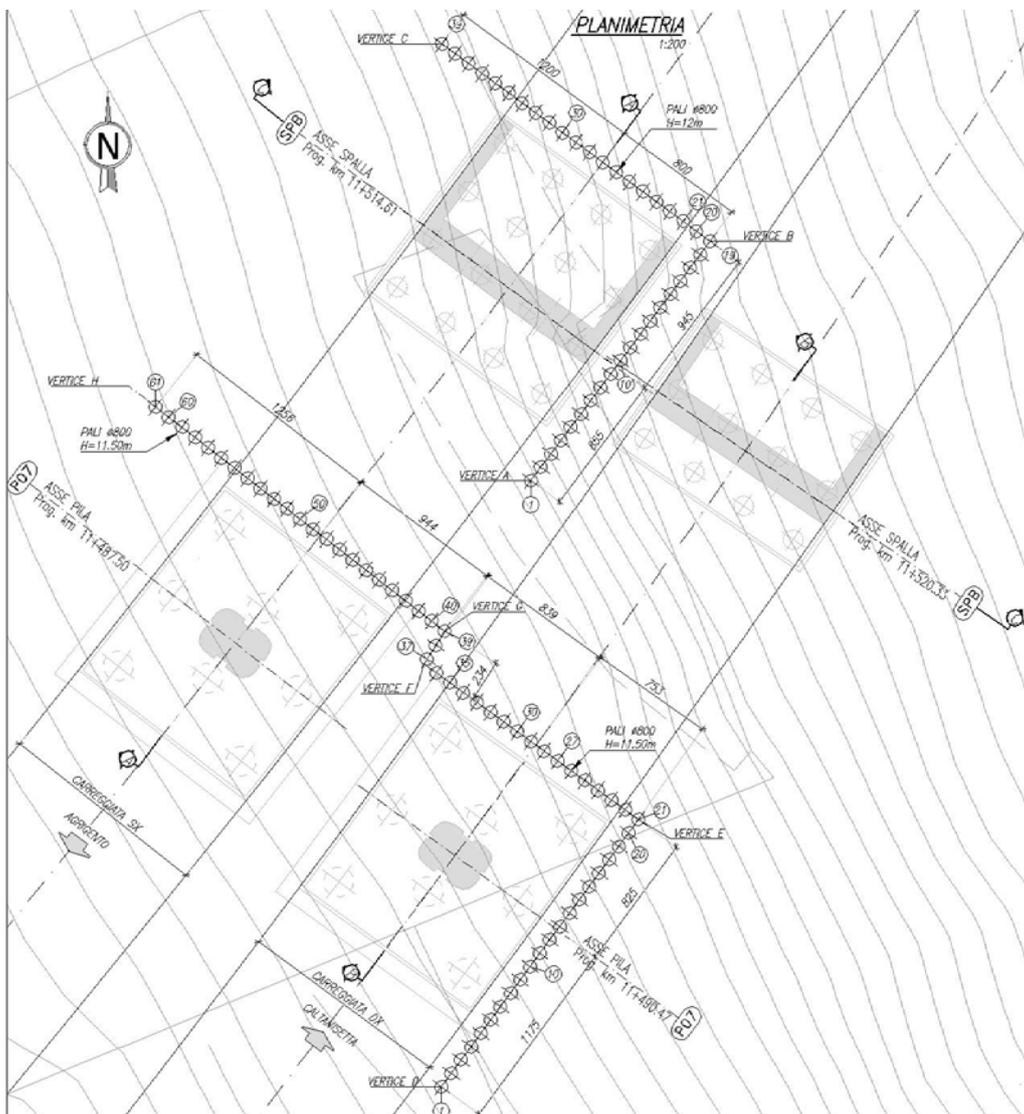


Figura 1 – Pianta.

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO-NORD EUROPA ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA-A19 S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE" AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001 Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19 Progetto Esecutivo	Opera: Viadotto Fosso Mumia
	Relazione di Calcolo opere provv.
	Pagina 3 di 20
	Nome file: V103-2-CL-010_A.00_relazione calcolo op-prov.doc

2 NORME E RIFERIMENTI

I calcoli sono svolti in conformità alle normative vigenti con particolare riferimento a:

1. D.M. 14 gennaio 2008 – “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni” – pubblicato sul S.O. n. 30 alla G.U. 4 febbraio 2008, n.29
2. Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 – Istruzioni per l’applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008
3. EUROCODICE 1 – UNI-ENV 1991-3 “Basi di calcolo ed azioni sulle strutture”;
4. EUROCODICE 7 – UNI-ENV 1997 “Progettazione geotecnica”;
5. D.M. 16 gennaio 1996 - “Norme tecniche relative ai Criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi”.
6. Circolare n° 156AA.GG./STC. del 04.07.1996 del Min. LL.PP. “Istruzioni per l’applicazione delle <<Norme Tecniche relative ai criteri generali per la verifica di sicurezza delle costruzioni e dei carichi e sovraccarichi>> di cui al D.M. 16/01/1996”.
7. D.M. 16 gennaio 1996 - “Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche”.
8. CIRC. LL. PP. 15 ottobre 1996 n. 252 - “Istruzioni per l’applicazione delle <<Norme tecniche per il calcolo, l’esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche>> di cui al D.M. 09/01/1996”.
9. D.M. LL. PP. 09 gennaio 1996 - “Norme tecniche per il calcolo, l’esecuzione ed il collaudo delle strutture in cemento armato, normale e precompresso e per le strutture metalliche”.
10. D. M. LL.PP. del 14 Febbraio 1992 – “Norme tecniche per l’esecuzione delle opere in cemento armato normale e precompresso e per le strutture metalliche.”
11. D.M. 11 marzo 1988 - “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l’esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”.

3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

CALCESTRUZZO

Classe di resistenza	C32/40		
Resistenza caratteristica cubica	R_{ck}	\geq	40.00 MPa
Resistenza caratteristica cilindrica a compressione	f_{ck}	=	33.20 MPa
coefficiente del materiale	γ_c	=	1.50
Modulo elastico (istantaneo)	E_{cm}	=	33 642.78 MPa
Coefficiente di Poisson	ν	=	0.20
Resistenza di calcolo a compressione	f_{ck}	=	18.81 MPa
Resistenza a trazione semplice (assiale)	f_{ctm}	=	3.10 MPa

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO-NORD EUROPA ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA-A19 S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE" AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001 Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19 Progetto Esecutivo	Opera: Viadotto Fosso Mumia
	Relazione di Calcolo opere provv.
	Pagina 4 di 20
	Nome file: VI03-2-CL-010_A.00_relazione calcolo op-prov.doc

Resistenza a trazione semplice (assiale) caratteristica	f_{ctk}	=	2.17 MPa
Resistenza (media) a trazione per flessione	f_{cfm}	=	3.72 MPa
Resistenza a trazione per flessione caratteristica	f_{ctk}	=	2.60 MPa

ACCIAIO PER ARMATURE C.A.

Acciaio	B450C		
tensione caratteristica di rottura	f_{tk}	≥	540.00 MPa
tensione caratteristica di snervamento	f_{yk}	≥	450.00 MPa
coefficiente del materiale	γ_s	=	1.15
tensione caratteristica di snervamento di calcolo	f_{yd}	≥	391.30 MPa
Modulo elastico	E_s	=	206 000.00 MPa

4 DESCRIZIONE DELL'OPERA

Per la realizzazione dei plinti delle pile P07 di entrambe le carreggiate e della spalla spB carreggiata sinistra, si prevede il sostegno degli scavi con paratie di pali. Il diametro di perforazione dei pali è 800mm e i pali hanno interasse 100cm.

La paratia ha massima altezza fuori terra di 5m. Il tratto di infissione dei pali è 6.5m.

I pali sono collegati in testa da un cordolo di c.a. avente sezione rettangolare 100x60cm.

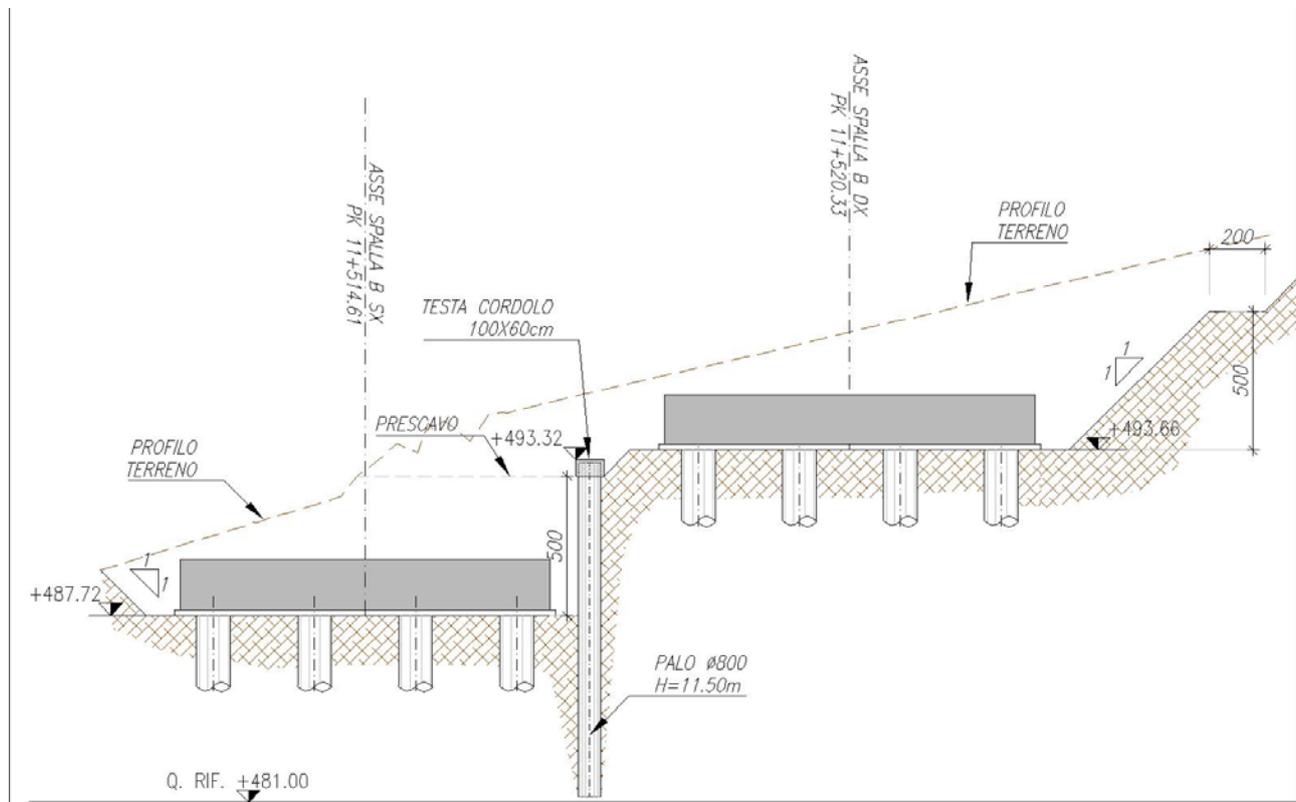


Figura 2 – Sezione trasversale tra le spalle B

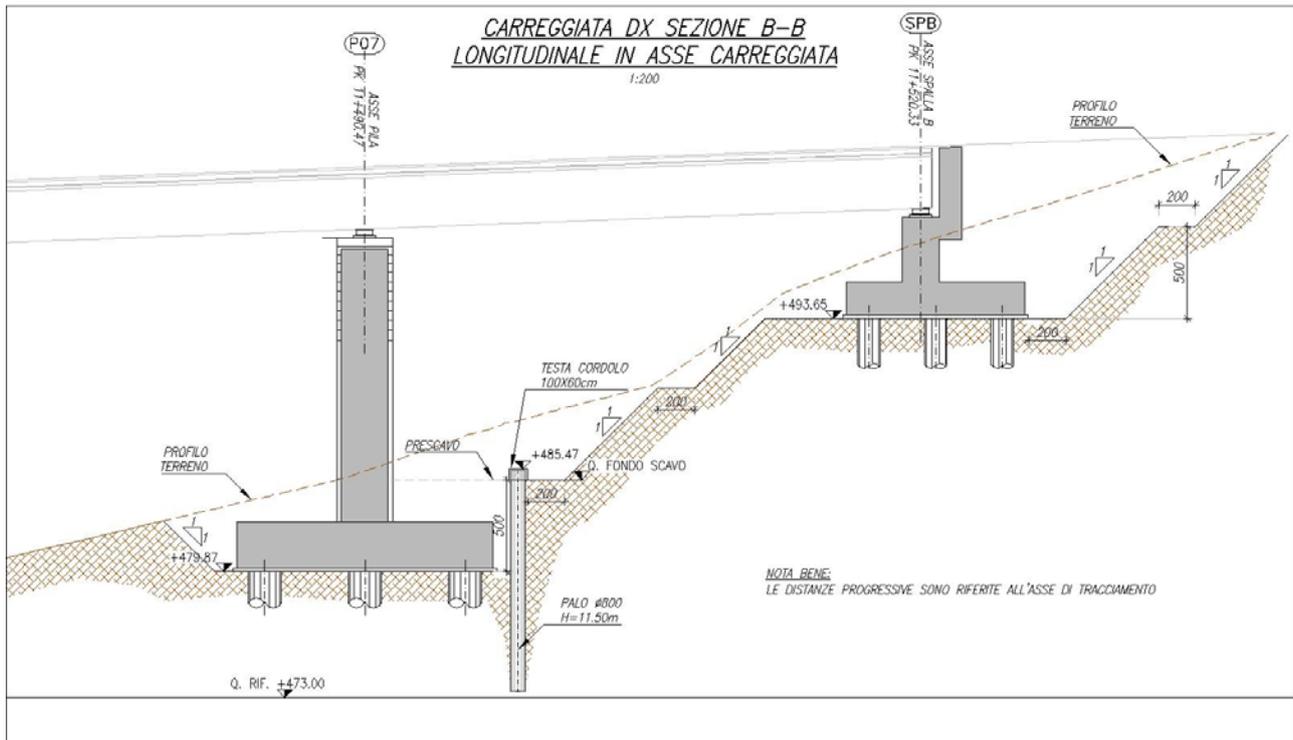


Figura 3 – Sezione longitudinale tra le spalle B

Nel seguito, l'analisi è condotta per la sezione più gravosa: sezione longitudinale in asse carreggiata destra (cfr. Figura 3).

5 INQUADRAMENTO GEOTECNICO

A partire dai profili geotecnici del viadotto Fosso Mumia allegati al presente progetto è stato definito il rapporto opera-terreni.

In particolare, lo scavo per la realizzazione delle pile P07 e delle spalla spB interessa dapprima lo strato superficiale costituito da sabbie e sabbie argillose (SLN), per un'altezza massima di 15m in corrispondenza della spalla B. I terreni sottostanti sono costituiti da argilla limosa con intercalazioni sabbiose (ENNa).

Il terreno superficiale tra la pila P06 e P07 (tratto centrale) è costituito da alluvioni terrazzate (TF) con spessori crescenti verso sud (massimo spessore 8m).

I parametri fisico-meccanici dei terreni sono riportati in Tabella 2.

In corrispondenza dell'opera in esame non si rileva la presenza di falda.

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO-NORD EUROPA ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA-A19 S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE" AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001 Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19 Progetto Esecutivo	Opera: Viadotto Fosso Mumia
	Relazione di Calcolo opere provv.
	Pagina 6 di 20
	Nome file: VI03-2-CL-010_A.00_relazione calcolo op-prov.doc

Settore centrale	
Profondità (m)	Litotipo
0.00 ÷ 9.00	<u>Alluvioni terrazzate:</u> limo argilloso, plastico con inclusi lapidei
9.00 ÷ in prof.	<u>Argille Plioceniche - ENNa:</u> argilla limosa con intercalazioni sabbiose a tratti scagliosa, consistente.

Spalla Nord	
Profondità (m)	Litotipo
0.00 ÷ 15.00	<u>Sabbie e Sabbie argillose SLN:</u> Sabbie giallastre con livelli costituiti da calcareniti e quarzareniti e intercalazioni di argille sabbiose con gusci fossili.
15.00 ÷ in prof.	<u>Argille Plioceniche - ENNa:</u> argilla limosa con intercalazioni sabbiose a tratti scagliosa, consistente.

Tabella 1 – Stratigrafia dei terreni

	peso nell'unità di volume	coesione drenata	angolo d'attrito	Modulo elastico
litotipo	γ [kN/m ³]	c' [kPa]	φ' [°]	E' [MPa]
SLN	22.6	23	20.45	15
ENNa	19.1	64	17.7	15
TF	20.3	43	17.1	15

Tabella 2 – Parametri fisico-meccanici dei terreni

6 PROCEDURA DI CALCOLO AI SENSI DEL D.M. 14-01-2008

Per la valutazione della sicurezza delle costruzioni, come prescritto dal DM 14/01/08, si sono adottati criteri probabilistici scientificamente comprovati in accordo al **metodo semiprobabilistico agli stati limite** basati sull'impiego dei coefficienti parziali di sicurezza.

Nel metodo semiprobabilistico agli stati limite, la sicurezza strutturale è verificata tramite il confronto tra la resistenza e l'effetto delle azioni. Per la sicurezza strutturale, la *resistenza* dei materiali e le *azioni* sono rappresentate dai valori caratteristici, R_{ki} e F_{kj} definiti, rispettivamente, come il frattile inferiore delle resistenze e il frattile (superiore o inferiore) delle azioni che minimizzano la sicurezza. I frattili sono stati assunti pari al 5%.

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO-NORD EUROPA ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA-A19 S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE" AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001 Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19 Progetto Esecutivo	Opera: Viadotto Fosso Mumia
	Relazione di Calcolo opere provv.
	Pagina 7 di 20
	Nome file: VI03-2-CL-010_A.00_relazione calcolo op-prov.doc

La verifica della sicurezza nei riguardi degli **stati limite di esercizio** è stata effettuata controllando gli aspetti di funzionalità e lo stato tensionale.

La verifica della sicurezza nei riguardi degli **stati limite ultimi** di resistenza è stata effettuata con il "metodo dei coefficienti parziali" di sicurezza espresso dalla equazione formale:

$$R_d \geq E_d$$

dove:

R_d è la resistenza di progetto, valutata in base ai valori di progetto della resistenza dei materiali e ai valori nominali delle grandezze geometriche interessate:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} R \left[\gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

Il coefficiente γ_R opera direttamente sulla resistenza del sistema. I coefficienti parziali di sicurezza, γ_{Mi} e γ_{Fj} , associati rispettivamente al materiale i-esimo e all'azione j-esima, tengono in conto la variabilità delle rispettive grandezze e le incertezze relative alle tolleranze geometriche e all'affidabilità del modello di calcolo.

E_d è il valore di progetto dell'effetto delle azioni, valutato in base ai valori di progetto $F_{dj} = F_{kj} \gamma_{Fj}$ delle azioni, dei parametri di progetto X_k/γ_M e della geometria di progetto a_d :

$$E_d = E \left[\gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

L'effetto delle azioni può anche essere valutato direttamente come $E_d = E_k \gamma_E$ con $\gamma_E = \gamma_F$:

$$E_d = \gamma_E \cdot E \left[F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

La verifica della relazione $R_d \geq E_d$ è stata effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1 e A2), per i parametri geotecnici (M1 e M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3).

I diversi gruppi di coefficienti di sicurezza parziali sono stati scelti nell'ambito dei due **approcci progettuali distinti e alternativi** consentiti dal DM 14/01/08 per la progettazione geotecnica.

Nel primo approccio progettuale (**Approccio 1**) sono previste due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti: la prima combinazione è generalmente più severa nei confronti del dimensionamento strutturale (STR) delle opere a contatto con il terreno, mentre la seconda combinazione è generalmente più severa nei riguardi del dimensionamento geotecnico (GEO).

Nel secondo approccio progettuale (**Approccio 2**) è prevista un'unica combinazione di gruppi di coefficienti, da adottare sia nelle verifiche strutturali sia nelle verifiche geotecniche.

L'analisi di interazione opera-terreno è stata eseguita modellando opportunamente l'articolata successione delle previste fasi esecutive attraverso un **codice di calcolo agli elementi finiti** nell'ipotesi di stato piano di deformazione. Per simulare le fasi esecutive, si sono adottate mesh a geometria e proprietà meccaniche

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO-NORD EUROPA ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA-A19 S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE" AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001 Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19 Progetto Esecutivo	Opera: Viadotto Fosso Mumia
	Relazione di Calcolo opere provv.
	Pagina 8 di 20
	Nome file: VI03-2-CL-010_A.00_relazione calcolo op-prov.doc

variabili, disattivando gli elementi finiti corrispondenti ai volumi scavati e attivando gli elementi finiti che modellano gli interventi di sostegno.

Le analisi FEM, le verifiche strutturali e geotecniche sono state effettuate sulla base del diagramma di flusso di Figura 4. Tale diagramma è coerente con le indicazioni riportate da Bauduin (2005) e Bauduin et Al (2005)¹ a proposito dell'applicazione dell'Eurocodice 7.

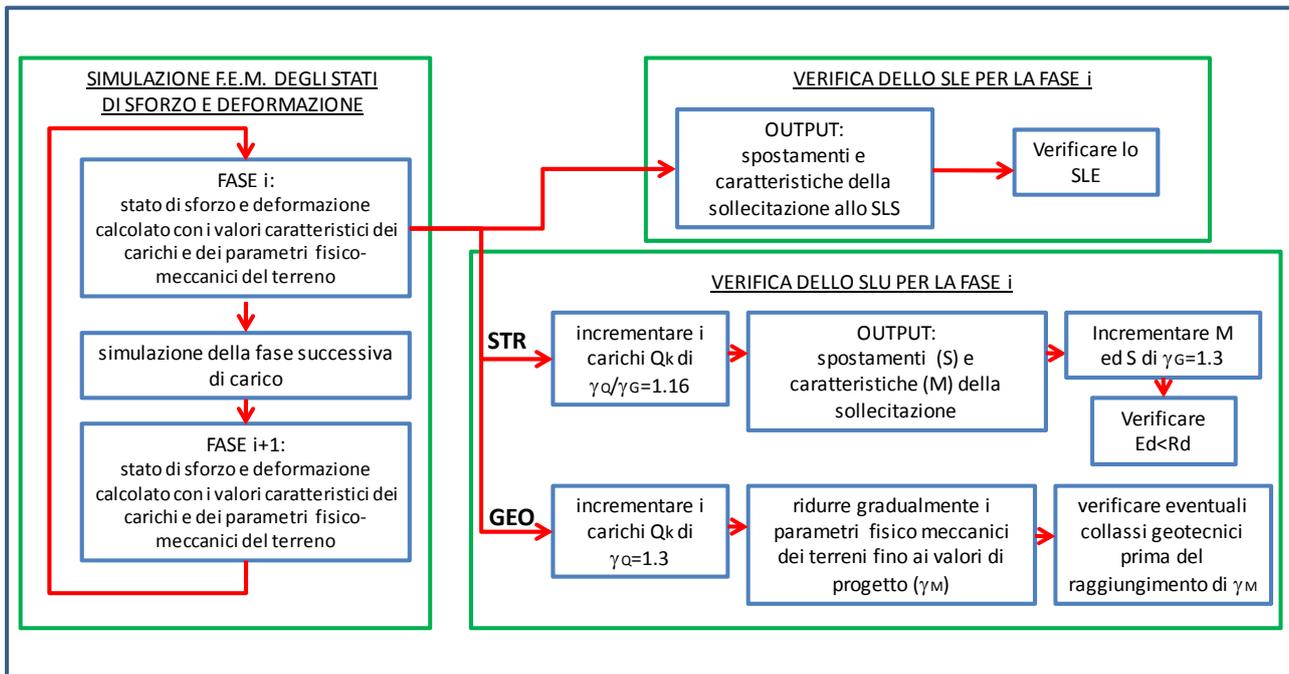


Figura 4 Diagramma di flusso per le analisi FEM d'interazione opera-terreno e per le verifiche strutturali e geotecniche

Gli stati di sforzo e deformazione derivanti dall'interazione opera-terreno sono stati calcolati considerando valori caratteristici per i carichi e per i parametri fisico-meccanici dei terreni. In tal modo si è modellato in maniera efficace e quanto più realisticamente possibile l'interazione opera-terreno durante le varie fasi esecutive.

Per ogni fase di calcolo si ottengono come output spostamenti e sollecitazioni allo **SLE** che sono stati confrontati con i limiti prestazionali indicati dal DM 14/01/08. In particolare si sono verificati i seguenti stati limite di servizio:

- Stati tensionali nei materiali;
- Spostamenti orizzontali dell'opera;
- spostamenti del piano campagna.

¹ Bauduin et Al (2005) Use of Finite Element Methods in Geotechnical Ultimate Limit State, *Design Proc XVI ICSMGE*, Osaka pp 2775-2779
Bauduin (2005), Possibilities yield by Eurocode 7 for design of geotechnical structures in urban areas

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO-NORD EUROPA ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA-A19 S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE" AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001 Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19 Progetto Esecutivo	Opera: Viadotto Fosso Mumia
	Relazione di Calcolo opere provv.
	Pagina 9 di 20
	Nome file: VI03-2-CL-010_A.00_relazione calcolo op-prov.doc

In definitiva, le **verifiche allo SLU** sono state effettuate secondo l'**Approccio Progettuale 1** illustrato in precedenza. Si sono considerati quindi due gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente per il dimensionamento degli elementi strutturali (STR) e per il dimensionamento geotecnico (GEO):

STR → A1; M1

GEO → A2; M2

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Permanenti non strutturali ⁽¹⁾	Favorevole	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Variabili	Favorevole	γ_{Q1}	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

(1) Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Tabella 3 Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni [DM 14/01/08]

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	γ_φ	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ	γ_r	1,0	1,0

Tabella 4 Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno [DM 14/01/08]

Le verifiche agli Stati limite ultimi degli elementi strutturali e della stabilità geotecnica del sistema opera-terreno sono state effettuate nelle fasi di costruzione dell'opera che determinano nei vari elementi lo stato di sollecitazione e di spostamento più gravosi. In particolare si è verificato, per ogni fase di scavo la resistenza dei materiali costituenti l'opera (STR) e la stabilità geotecnica del sistema opera-terreno (GEO)

Come illustrato in precedenza, le analisi FEM sono state condotte utilizzando valori caratteristici per carichi e parametri meccanici del terreno e solamente nelle fasi in cui si intende verificare uno SLU si sono introdotti i coefficienti parziali sui carichi, materiali e resistenze specificati nel DM 14/01/08.

In particolare, nella condizione STR (A1; M1) si è proceduto, nella fase relativa allo SLU di interesse, all'amplificazione dei carichi accidentali Q_k di $\gamma_Q / \gamma_G = 1.5 / 1.3 = 1.16$. I risultati del calcolo FEM (spostamenti e sollecitazioni) di questa fase sono stati poi amplificati di $\gamma_G = 1.3$ raggiungendo in tal modo i moltiplicatori prescritti nel DM 14/01/08 sia per i carichi permanenti $\gamma_G = 1.3$ che per i carichi accidentali $\gamma_Q = 1.5$. Le sollecitazioni e gli spostamenti (E_d) così ottenuti sono stati confrontati con i valori ultimi di resistenza e deformazione (R_d) secondo la relazione:

$$E_d \geq R_d$$

Nella condizione GEO (A2; M2) si è proceduto, nella fase relativa allo SLU di interesse, all'amplificazione dei carichi accidentali Q_k di $\gamma_Q = 1.3$. Successivamente si è proceduto alla riduzione dei parametri fisico-meccanici dei terreni applicando gradualmente i coefficienti parziali γ_M specificati nel DM 14/01/08 ai valori caratteristici di resistenza dei terreni. Si è infine verificato che in corrispondenza dei moltiplicatori finali γ_M sia garantita la stabilità del sistema geotecnico nei confronti di collassi sia locali che globali.

7 ANALISI DELL'INTERAZIONE OPERA-TERRENO E VERIFICHE

Lo studio dell'interazione opera-terreno è stata condotta con analisi numerica agli elementi finiti (FEM).

7.1 ANALISI DELL'INTERAZIONE OPERA-TERRENO E VERIFICHE

Per le sezioni di calcolo, il dominio d'interesse è stato discretizzato con elementi finiti isoparametrici triangolari a 6 nodi. Ai nodi alla base della mesh sono impediti gli spostamenti sia orizzontali che verticali; ai nodi sul contorno laterale del dominio sono impediti solo gli spostamenti orizzontali.

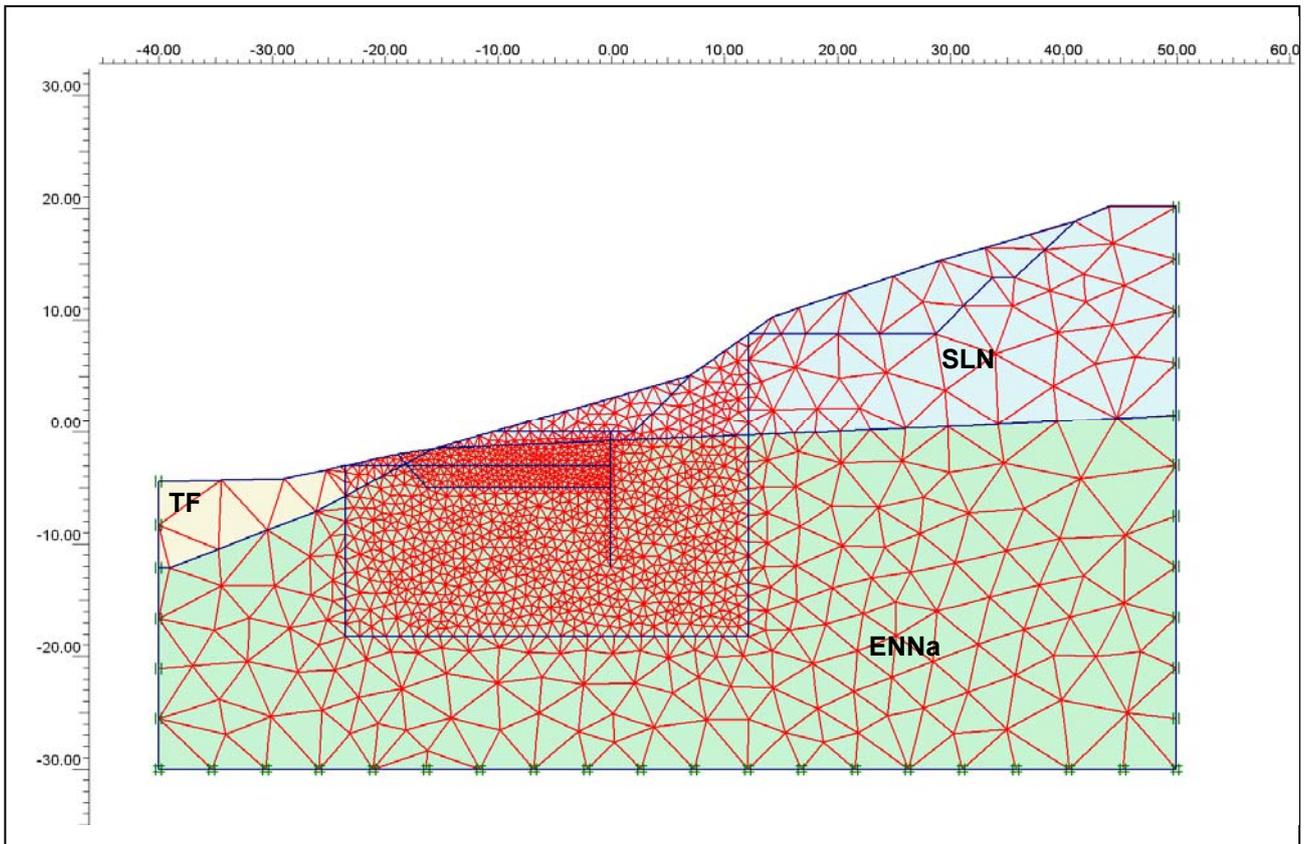


Figura 5 – Mesh e condizioni al contorno considerate nelle analisi numeriche

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO-NORD EUROPA ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA-A19 S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE" AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001 Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19 Progetto Esecutivo	Opera: Viadotto Fosso Mumia
	Relazione di Calcolo opere provv.
	Pagina 11 di 20
	Nome file: V103-2-CL-010_A.00_relazione calcolo op-prov.doc

7.2 PARAMETRI DEL TERRENO

I parametri fisico meccanici adottati nelle analisi per i terreni interessati dall'opera sono riportati in tabella sotto.

	peso nell'unità di volume	coesione drenata	angolo d'attrito	Modulo elastico
litotipo	γ [kN/m ³]	c' [kPa]	φ' [°]	E' [MPa]
SLN	22.6	23	20.45	15
ENNa	19.1	64	17.7	15
TF	20.3	43	17.1	15

Tabella 5 – Parametri geotecnici dei terreni

7.3 FASI DI CALCOLO

Per simulare le fasi esecutive, si analizza un dominio a geometria variabile, disattivando gli elementi finiti triangolari corrispondenti alle aree di scavo e attivando gli elementi finiti trave e asta che modellano i vari elementi strutturali.

In particolare le fasi considerate nel calcolo sono:

1. Generazione dello stato tensionale iniziale
2. prescavo sino a quota di imposta della spalla B;
3. attivazione del carico accidentale in corrispondenza della fondazione della spalla B, per tener conto dei mezzi di lavoro (10kPa);
4. prescavo sino alla quota di imposta della paratia;
5. scavo sino alla quota di imposta della fondazione della pila;

Le analisi sono state svolte nelle ipotesi di risposta drenata, assumendo l'opera sopra falda.

7.4 MODELLAZIONE PARATIA

La paratia è stata modellata con elementi finiti trave a comportamento elastico.

Le caratteristiche di rigidezza della paratia, relativamente all'estensione di un metro, sono:

peso palo /m	Area palo SxI m ²	Inerzia palo m ⁴	Rigidezza assiale EA kN	Rigidezza flessionale EI kNm ²
12.57	0.50	0.0201	16 910 704.51	676 428.18

7.5 RISULTATI DELL'ANALISI

Con riferimento alle fasi riepilogate al Paragrafo 7.3, i risultati più significativi dell'analisi sono presentati dalla Figura 6 alla Figura 7 in termini di distribuzioni di spostamenti orizzontali e verticali.

Al raggiungimento della quota di scavo finale lo spostamento orizzontale massimo della paratia è $u_h=2.5\text{cm}$, rilevato in testa alla paratia. Nella stessa fase il sollevamento massimo del fondo scavo è $u_v=12\text{cm}$.

In Tabella 6 sono riportati i principali risultati dell'analisi per la fase di calcolo più significativa: fine scavo. In tale tabella, si evidenzia che le sollecitazioni sugli elementi strutturali sono determinati per carichi variabili non amplificati, validi, pertanto per le verifiche allo SLE. In Figura 8 è riportata la distribuzione delle sollecitazioni sulla paratia per la fase di calcolo: scavo finale (con acc. amplificati di 1.16).

fasi	spostamento max orizzontale paratia	spostamento max verticale fondo scavo	Sollecitazioni massime (/m)		
	u_h (mm)	u_v (mm)	Nmax (kN)	Mmax (kNm)	Tmax (kN)
scavo finale	25	127	233	370	200

Tabella 6 – sintesi dei risultati dell'analisi

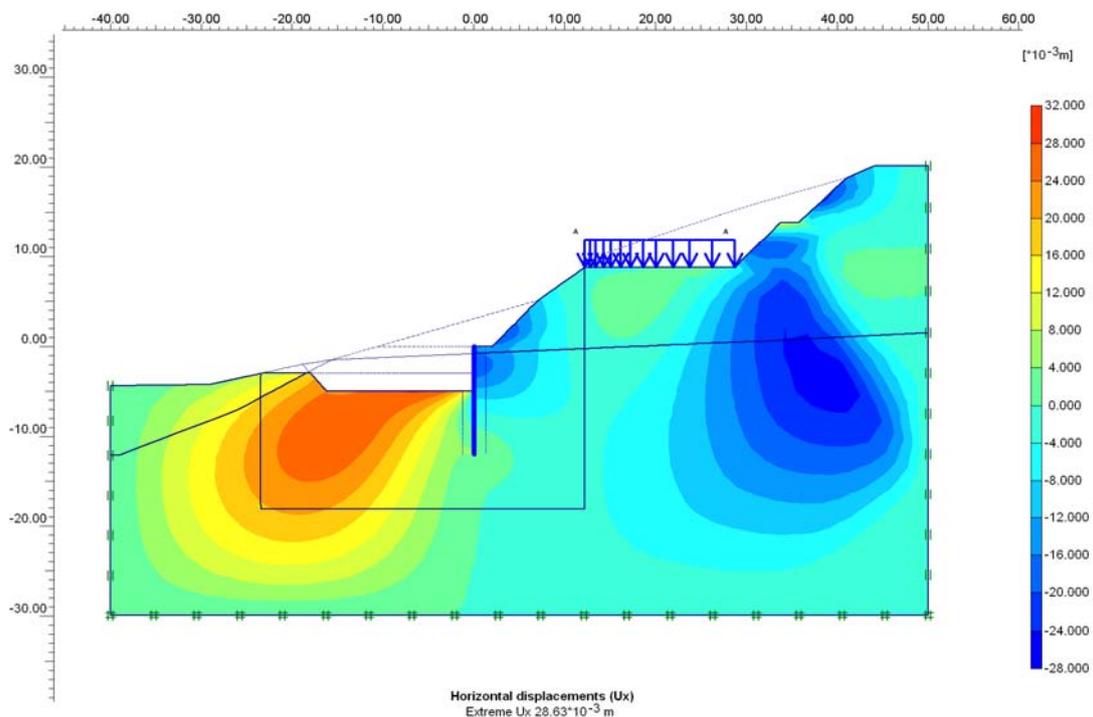


Figura 6 -- Distribuzione degli spostamenti orizzontali a fine scavo

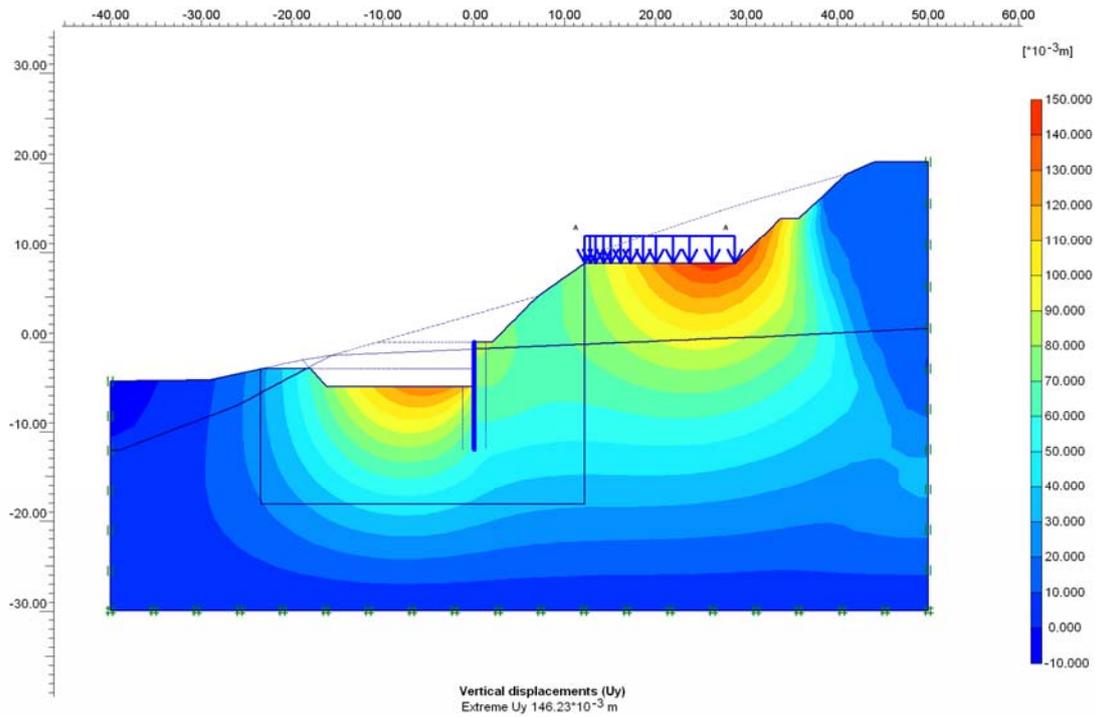


Figura 7 -- Distribuzione degli spostamenti verticali a fine scavo

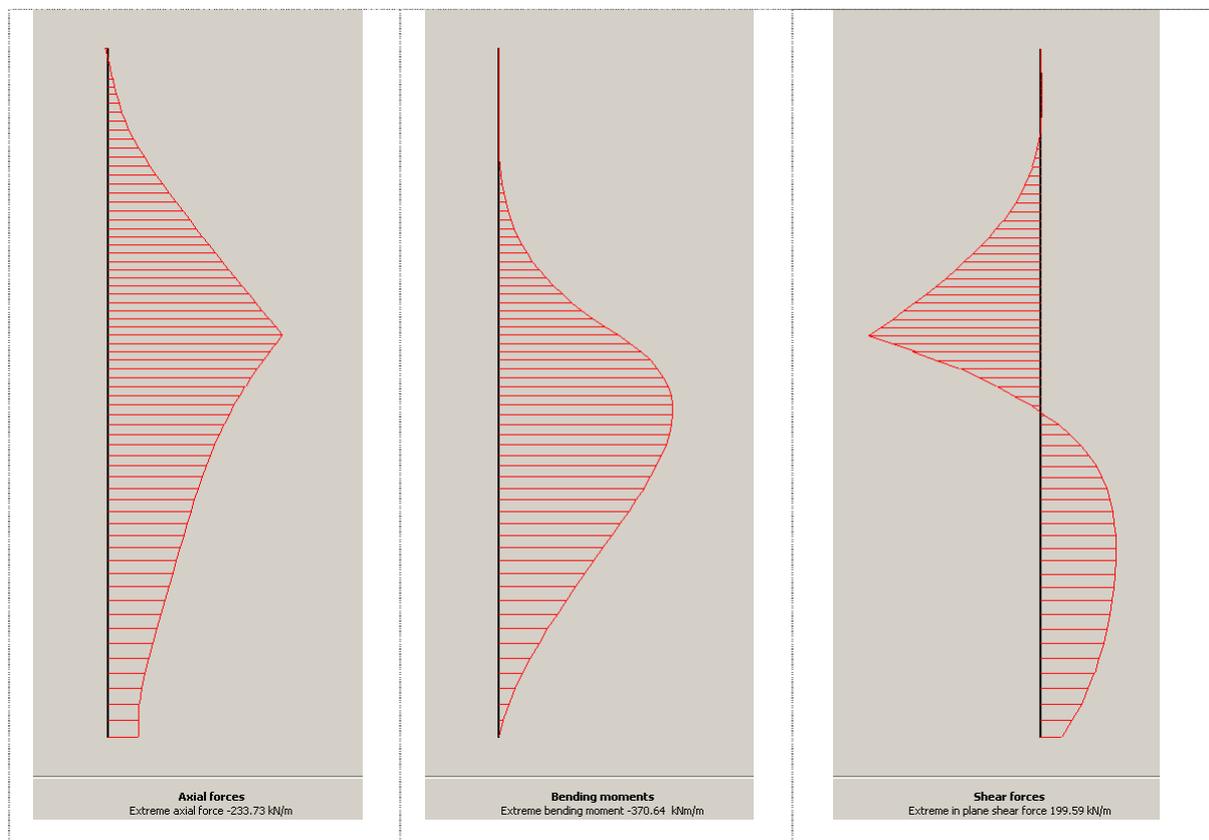


Figura 8 - Distribuzione delle sollecitazioni nella paratia a fine scavo

8 VERIFICHE SLU

Di seguito si riportano le verifiche allo SLU degli elementi strutturali per le fasi di calcolo più gravose.

8.1 VERIFICHE STRUTTURALI DELLA PARATIA

Per le verifiche strutturali della paratia si adotta il metodo semiprobabilistico agli stati limite. In particolare, si considerano valori caratteristici le sollecitazioni calcolate con le analisi numeriche di interazione ammasso-struttura descritte nei paragrafi precedenti. Nelle verifiche tali sollecitazioni sono amplificate mediante un coefficiente moltiplicativo di 1.3 (cfr paragrafo 6):

$$N_{ed} = 1.3 N$$

$$M_{ed} = 1.3 M$$

$$V_{ed} = 1.3 V$$

I punti rappresentativi dello stato di sollecitazione di calcolo (N_{ed} , M_{ed}) relativo a un elevato numero di sezioni dei sostegni sono riportati nel piano N , M per verificare che questi non siano esterni al dominio di resistenza che caratterizza la sezione strutturale.

Il dominio di resistenza dei pali della paratia è stato tracciato considerando il calcestruzzo $R_{ck}=40\text{MPa}$ e un'armatura longitudinale costituita da **16 ϕ 22**.

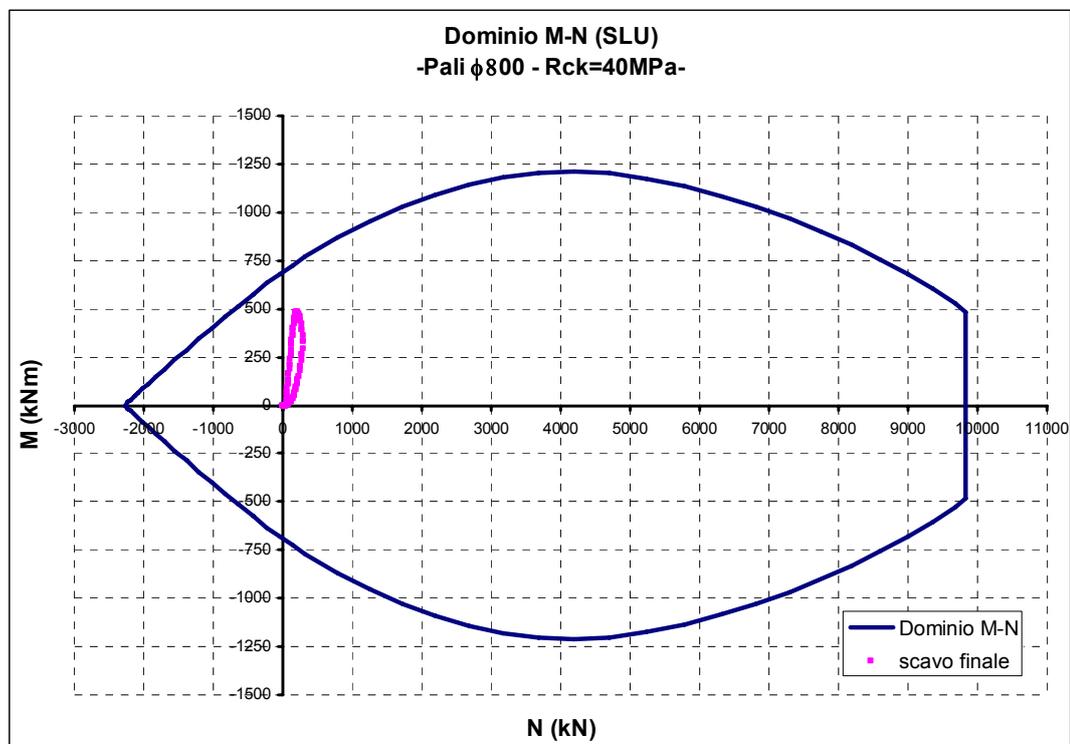


Figura 9. - Dominio di resistenza dei pali e punti rappresentativi delle sollecitazioni di calcolo (N_{ed} , M_{ed})

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO-NORD EUROPA ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA-A19 S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE" AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001 Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19 Progetto Esecutivo	Opera: Viadotto Fosso Mumia
	Relazione di Calcolo opere provv.
	Pagina 15 di 20
	Nome file: V103-2-CL-010_A.00_relazione calcolo op-prov.doc

Le verifiche a taglio sono condotte dapprima in assenza di specifica armatura. Si è proceduto, pertanto, a verificare che la sollecitazione di calcolo (V_{ed}) risultasse inferiore alla resistenza a taglio delle sezioni V_{rd} . In questo caso la resistenza a taglio della sezione in assenza di specifica armatura è stata calcolata con la relazione di seguito riportata:

$$V_{rd} = \left[0.18 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} / \gamma_c + 0.15 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b \cdot d \geq (v_{\min} + 0.15 \cdot \sigma_{cp}) \cdot b \cdot d$$

con

$$k = 1 + (200/d)^{1/2}$$

$$v_{\min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$$

e dove

d è l'altezza utile della sezione (in mm);

$\rho_l = A_{sl} / (b \cdot d)$ è il rapporto geometrico di armatura longitudinale ($\leq 0,02$);

$\sigma_{cp} = N_{ed} / A_c$ è la tensione media di compressione nella sezione ($\leq 0,2 f_{cd}$);

b è la larghezza minima della sezione (in mm)

Nel caso di necessità di armatura trasversale, si è verificato che la sollecitazione di calcolo (V_{ed}) fosse inferiore al minimo della resistenza della biella compressa e dell'armatura trasversale $V_{rd} = \min[V_{Rcd}, V_{Rsd}]$, queste ultime calcolate con le relazioni:

$$V_{Rcd} = 0,9 \cdot d \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot f'_{cd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) / (1 + \text{ctg}^2\theta)$$

$$V_{Rsd} = 0,9 \cdot d \cdot \frac{A_{sw}}{s} \cdot f_{yd} \cdot (\text{ctg}\alpha + \text{ctg}\theta) \cdot \sin\alpha$$

La verifica a taglio del palo è condotta equiparando la sezione circolare a una rettangolare di dimensioni $b_{eq} \times h_{eq}$, determinate con le relazioni:

$$b_{eq} = 0.9 \cdot \phi_{palo}$$

$$h_{eq} = 0.45 \cdot \phi_{palo} + 0.64 \cdot \left(\frac{\phi_{palo}}{2} - cp \right) + cp$$

Determinazione sezione equivalente			
Øpalo	d_p	800	mm
larghezza sez. ret. eq	b_{wq}	638	mm
altezza sez. ret. eq	H_{eq}	720	mm
area	$A=$	459072	mm ²
copriferro	$cp=$	60	mm
altezza utile sezione	$d=$	660	mm

In Figura 10 si riporta la distribuzione degli sforzi di taglio V_{ed} (in valore assoluto) e della resistenza a taglio della sezione rettangolare equivalente dei pali in assenza di specifica armatura a taglio (V_{rd}). Confrontando tali distribuzioni si evince $V_{ed} < V_{rd}$ per tutta la lunghezza dei pali, quindi, la verifica a taglio è soddisfatta.

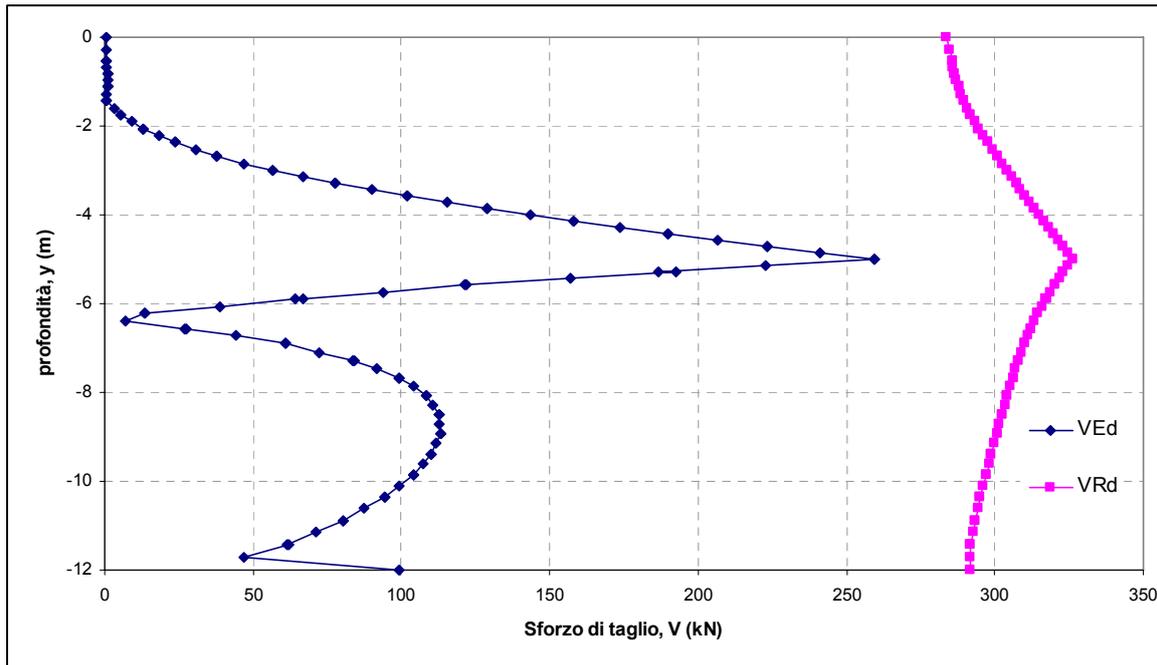


Figura 10 – Distribuzione degli sforzi di taglio di calcolo (V_{ed}) e della resistenza a taglio della sezione in assenza di specifica armatura a taglio (V_{rd})

9 VERIFICHE GEO DELL'INSIEME OPERA TERRENO

La stabilità globale del sistema opera-terreno è stata valutata mediante l'analisi numerica degli effetti della riduzione dei parametri di resistenza del terreno c' e $\tan\phi'$. In particolare, all'analisi sopra descritta è stata aggiunta un'ulteriore fase di calcolo a partire dalla condizione di scavo finale nella quale sono stati amplificati i carichi variabili di 1,3 (cfr. paragrafo 7.2). Tale step di calcolo è stato finalizzato alla determinazione del coefficiente di sicurezza parziale γ_{lim} corrispondente al collasso del sistema opera-terreno:

$$\gamma_{lim} = \frac{\text{parametro resistenza caratteristico}}{\text{parametro resistenza ultima}}$$

In termini di risultati numerici, il raggiungimento di un meccanismo di collasso è manifestato da grandi deformazioni e diffusa plasticizzazione. Si riportano nelle figure di seguito la distribuzione dei punti di plasticizzazione calcolata rispettivamente alla fine dello scavo (con valori caratteristici dei parametri) e al raggiungimento di condizioni di instabilità (con valori ridotti dei parametri). In particolare, il minimo del coefficiente di sicurezza parziale è $\gamma_{lim}=1.37$, maggiore quindi dei coefficienti parziali da applicare ai parametri meccanici del terreno per la valutazione della stabilità opera-terreno secondo la NTC2008:

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno γ_M

Parametro	(M2)
tangente dell'angolo d'attrito $\tan\phi'$	1,25

coesione drenata c'	1,25
coesione non drenata c_u	1,4
peso specifico γ	1

Le verifiche di stabilità sono quindi soddisfatte. Dalla Figura 12 si evince che il fenomeno di instabilità calcolato è un meccanismo di collasso locale che interessa il terreno superficiale a monte dell'opera.

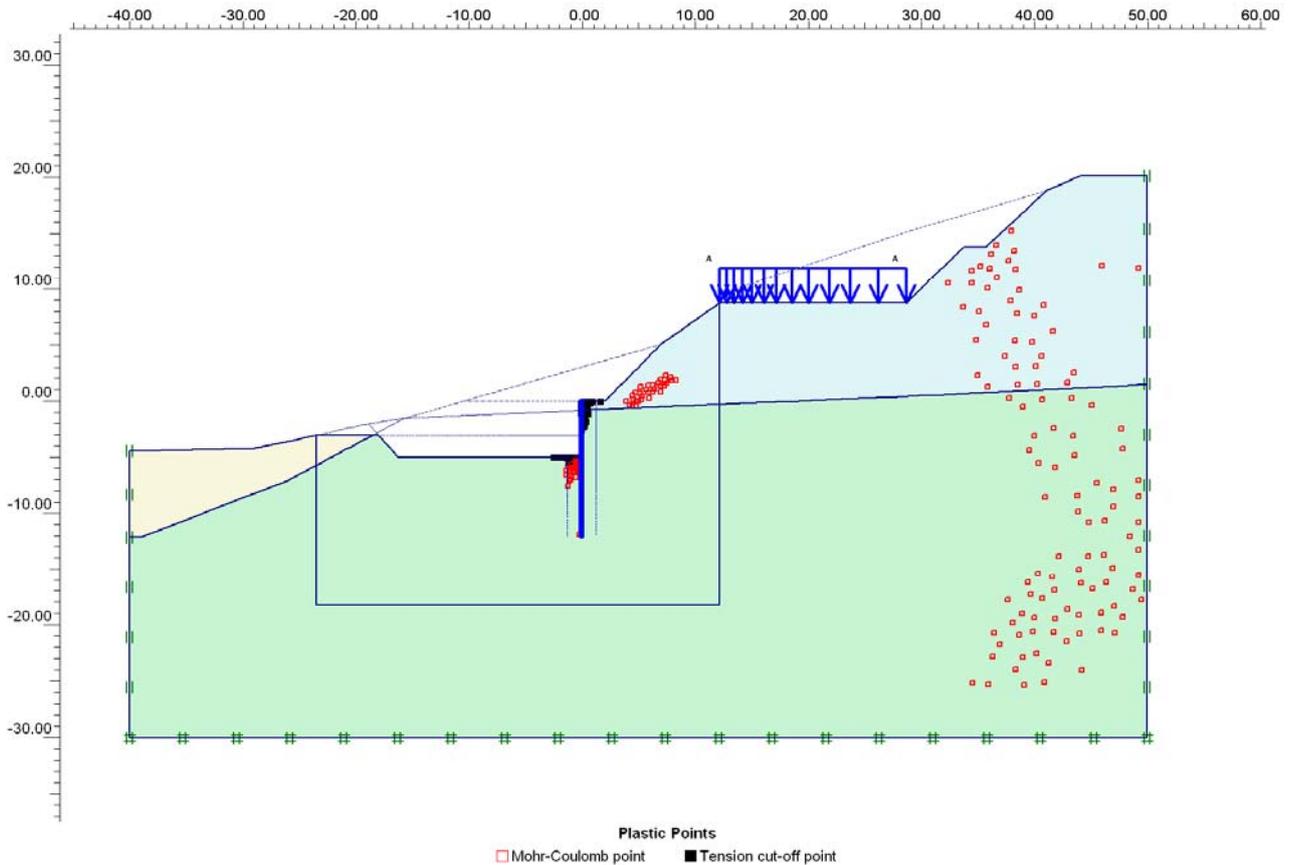


Figura 11 – Distribuzione dei punti di plasticizzazione nella fase di calcolo corrispondente allo scavo finale (valori caratteristici dei parametri di resistenza)

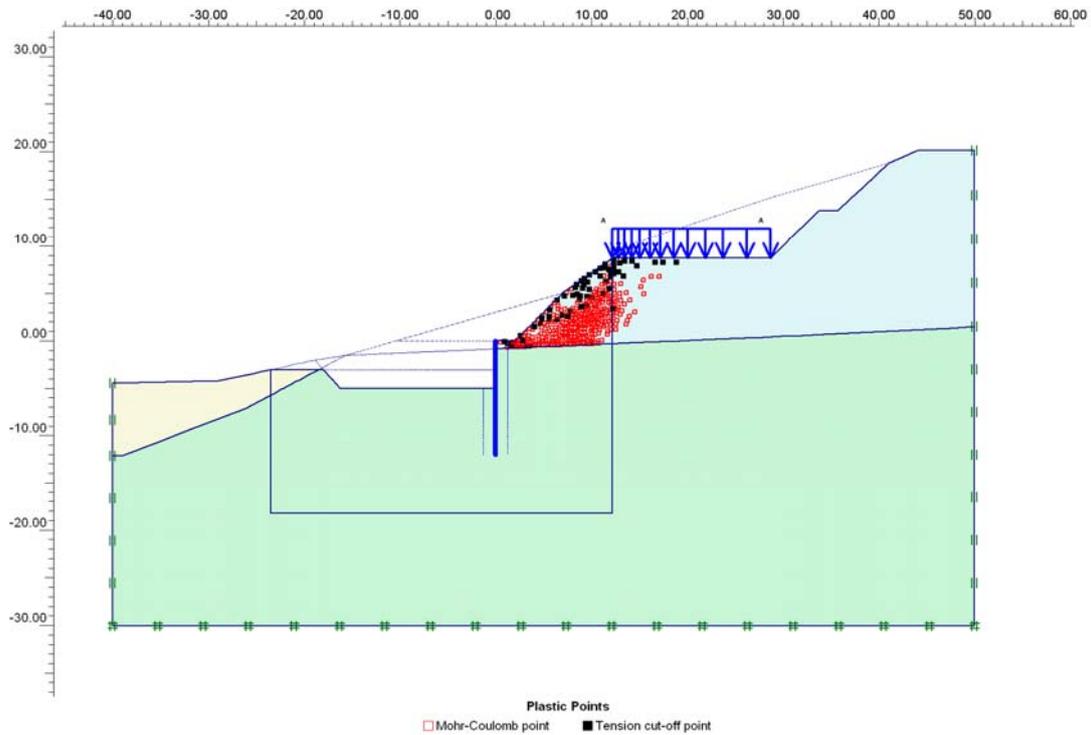


Figura 12 – Distribuzione dei punti di plasticizzazione a instabilità avvenuta (con valori ridotti dei parametri di resistenza), a seguito della fase di calcolo corrispondente allo scavo finale

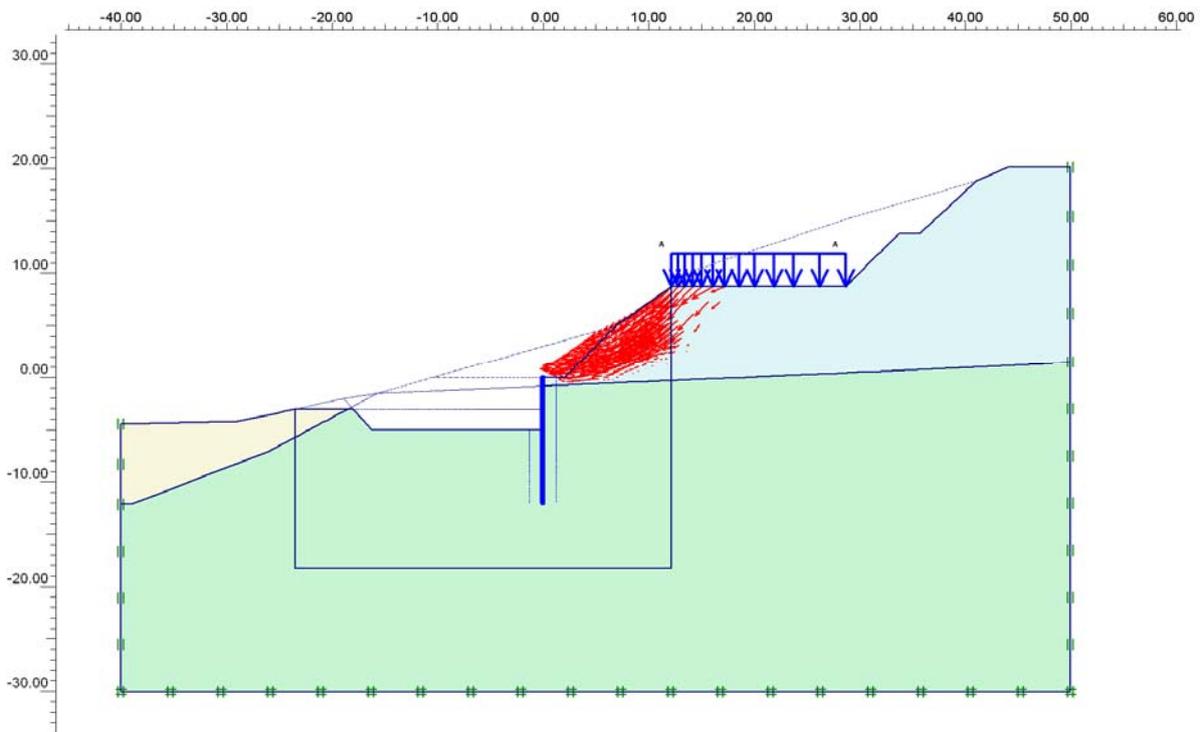


Figura 13 – Distribuzione dei vettori spostamento a instabilità avvenuta (con valori ridotti dei parametri di resistenza), a seguito della fase di calcolo corrispondente allo scavo finale

CORRIDOIO PLURIMODALE TIRRENICO-NORD EUROPA ITINERARIO AGRIGENTO - CALTANISSETTA-A19 S.S. N° 640 "DI PORTO EMPEDOCLE" AMMODERNAMENTO E ADEGUAMENTO ALLA CAT. B DEL D.M. 5.11.2001 Dal km 44+000 allo svincolo con l'A19 Progetto Esecutivo	Opera: Viadotto Fosso Mumia
	Relazione di Calcolo opere provv.
	Pagina 19 di 20
	Nome file: V103-2-CL-010_A.00_relazione calcolo op-prov.doc

10 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1]. AGI, (1997), *"Raccomandazioni sui pali di fondazione"*.
- [2]. Mancina M., Nori R., Iasiello P., (2007) *"Progetti e calcoli di geotecnica con Excel"*, Vol. II, DEI
- [3]. Lancellotta, R. (1987), *"Geotecnica"*, Zanichelli.
- [4]. Viggiani C. (1999), *"Fondazioni"*, Hedilius.
- [5]. Boweles, J. (1998), *"Fondazioni progetto e analisi"*, Mc Graww-Hill.
- [6]. Cestelli Guidi C. (1991), *"Geotecnica e tecnica delle fondazioni 2"*, ottava edizione, Hoepli.