



ANAS S.p.A.

DIREZIONE REGIONALE PER LA SICILIA

PA17/08

Affidamento a Contraente Generale dei "Lavori di ammodernamento del tratto Palermo - Lercara Friddi, lotto funzionale dal km 14,4 (km. 0,0 del Lotto 2) compreso il tratto di raccordo della rotatoria Bolognetta, al km 48,0 (km. 33,6 del Lotto 2 - Svincolo Manganaro incluso) compresi raccordi con le attuali SS n.189 e SS n.121

Bolognetta S.c.p.a.

Contraente Generale:
Ing. Pierfrancesco Paglini

Il Responsabile Ambientale:
Ing. Claudio Lamberti

- PERIZIA DI VARIANTE N.1 -

BOLOGNETTA S.c.p.a.

Titolo elaborato:

MODIFICA TECNICA N. 123

OPERE DI SOSTEGNO - ASSE PRINCIPALE - Lotto 2a OS 102- Paratia di pali sx dal km 13+139 al km 13+171 Relazione descrittiva e di calcolo

Codice Unico Progetto (CUP) : F41B03000230001

Codice elaborato:	OPERA	ARGOMENTO	DOC. E PROG.	FASE	REVISIONE
PA17/08	PE	OS102	RC01	5	1

CARTELLA:	FILE NAME:	NOTE:	PROT.	SCALA:	
0 7	PEOS102RC01_51_4137.dwg	1=1	4 1 3 7	Relazione	
5					
4					
3					
2					
1	REVISIONE A SEGUITO DI ISTRUTTORIA ANAS/D.L.		Febbraio 2016	M.Mancone S. Fortino D. Tironi	
0	PRIMA EMISSIONE		Novembre 2015	D.Storai S. Fortino D. Tironi	
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

A.T.I. Progettisti :

Capogruppo:

Mandante:

POLITECNICA

INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Viale Amendola, 6 - 50121 Firenze
tel 055/2001660 fax 055/2344856
e-mail poliff@politecnica.it

ACS ingegneri

Via Catani, 28/c - 59100 Prato
tel 0574.527864 fax 0574.568066
E-mail acs@acsingegneri.it

Il Progettista Responsabile
Ing. Alberto Antonelli



Il Geologo
dott. Pietro Accolti Gil



Il Coordinatore per la Sicurezza
in fase di esecuzione:
Ing. Francesco Cocciantè

Il Coordinatore per la sicurezza
in fase di Esecuzione
Ing. Francesco Cocciantè

Il Direttore dei Lavori:
Ing. Sandro Favero

Il Direttore dei Lavori
Ing. Sandro Favero

ANAS S.p.A.

DATA: _____ PROTOCOLLO: _____

VISTO: IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

CODICE PROGETTO **L O 4 1 0 C E 1 1 0 1**

Dott. Ing. Ettore de Cesbron de la Grennelais

INDICE

1	Introduzione	3
2	Normativa di riferimento	4
3	Elaborati di progetto di riferimento	5
4	Caratteristiche dei materiali.....	6
4.1	Acciaio	6
4.1.1	Acciaio per armatura strutture in c.a.	6
4.2	Calcestruzzo	6
4.2.1	Calcestruzzo per pali.....	6
4.2.2	Calcestruzzo per trave di coronamento	6
5	caratterizzazione geotecnica del sito	7
5.1	Livello della falda	8
6	Caratterizzazione sismica	9
7	Descrizione dell' opera di sostegno.....	10
7.1	Metodologie di calcolo	10
7.1.1	Pressione e resistenza statica delle terre e dell'acqua	11
7.1.2	Parametri geotecnici.....	14
7.1.3	Falda, carichi, sovraccarichi e combinazioni.....	15
8	Analisi dei carichi	17
8.1	Azioni permanenti.....	17
8.1.1	Peso proprio.....	17
8.1.2	Spinta delle terre	17
8.2	Azioni variabili.....	18
8.2.1	Sovraccarico uniforme indefinito	18
8.2.2	Azioni climatiche	19
9	Risultati delle analisi	20
9.1	Sezioni di verifica.....	20
9.2	Sezione 1.....	21
9.2.1	Sintesi dei risultati	21
9.2.2	Verifiche di stabilità globale del complesso opera di sostegno - terreno	24
9.2.3	Verifiche strutturali	25
9.3	Sezione 2.....	27
9.3.1	Sintesi dei risultati	27

Affidamento a Contraente Generale dei "Lavori di ammodernamento del tratto Palermo - Lercara Friddi, lotto funzionale dal km 14,4 (km. 0,0 del Lotto 2) compreso il tratto di raccordo della rotonda Bolognetta, al km 48,0 (km. 33,6 del Lotto 2 – Svincolo Manganaro incluso) compresi i raccordi con le attuali SS n.189 e SS n.121".

SOTTOVIA ESISTENTE ST05 AL KM 13+154,91 - Relazione Tecnica e di Calcolo

9.3.2	Verifiche di stabilità globale del complesso opera di sostegno - terreno	29
9.3.3	Verifiche strutturali	31

1 INTRODUZIONE

Nella presente relazione si riporta il dimensionamento dell'opera di sostegno degli scavi provvisori, da realizzarsi per l'allargamento dello scatolare esistente ST05 al km 13+154,91 presente dopo lo svincolo di Mezzojuso. L'opera di sostegno ha carattere provvisorio.

2 **NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

- [1] L. 5.11.1971, n° 1086 – “ *Norme per la disciplina delle opere in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso ed a struttura metallica*”.
- [2] D.M. 14.01.2008 – “ *Norme tecniche per le costruzioni*”.
- [3] 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*”
- [4] Eurocodice 8 “ *Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture – Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici*”, febbraio 1998.

3 ELABORATI DI PROGETTO DI RIFERIMENTO

[5]	Relazione geologica geomorfologica idrogeologica	PE_GE_RT01
[6]	Relazione geotecnica e sismica	PE_GT_RT01
[7]	Relazione geotecnica corpo stradale	PE_GT_RT02
[8]	Profilo geotecnico – Tav. 15	PE_GT_L015

4 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Il progetto strutturale prevede l'uso dei materiali con le caratteristiche meccaniche minime riportate nei paragrafi seguenti.

4.1 Acciaio

4.1.1 Acciaio per armatura strutture in c.a.

Barre ad aderenza migliorata, saldabile, tipo B450C dotato delle seguenti caratteristiche meccaniche:

tensione caratteristica di rottura	$f_{tk} \geq 540$ MPa
tensione caratteristica di snervamento	$f_{yk} \geq 450$ MPa
allungamento caratteristico	≥ 7.5 %
rapporto tensione di rottura/ tensione di snervamento:	$1.15 \leq f_{tk}/f_{yk} < 1.35$

4.2 Calcestruzzo

4.2.1 Calcestruzzo per pali

Classe di resistenza	C30/37
dimensione massima dell'inerte	$D_{max} = 32$ mm
classe di esposizione	XA1
classe di consistenza	S4
copriferro minimo	$c_{r,min} \geq 60$ mm

4.2.2 Calcestruzzo per trave di coronamento

Classe di resistenza	C25/30
dimensione massima dell'inerte	$D_{max} = 32$ mm
classe di esposizione	XC2
classe di consistenza	S4
copriferro minimo	$c_{r,min} \geq 40$ mm

5 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEL SITO

I parametri geotecnici sono stati desunti dalla Relazione Geotecnica di PEA [6.] In particolare i parametri fanno riferimento a quanto riportato al paragrafo 5 (p.290) della suddetta relazione ed al paragrafo 7.8 di cui si riporta stralcio testuale:

Stralcio Rel geotecnica di PEA pag. 290

"5 SINTESI PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO

Per le unità geotecniche individuate lungo il tracciato si assumeranno i seguenti parametri geotecnici di progetto:

Unità R – Rilevati esistenti, Terreno di riporto

$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$	<i>peso di volume naturale</i>
$\varphi' = 28 \div 33^\circ$	<i>angolo di resistenza al taglio per terreno di riporto</i>
$\varphi' = 35^\circ$	<i>angolo di resistenza al taglio per rilevato strad. esistente</i>
$c' = 0 \text{ kPa}$	<i>coesione drenata</i>
$E' = 15 \div 40 \text{ MPa}$	<i>modulo di deformazione elastico</i>

Omissis ..

Unità LSA – Limi sabbiosi argillosi

$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$	<i>peso di volume naturale</i>
$\varphi' = 22 \div 27^\circ$	<i>angolo di resistenza al taglio</i>
$c' = 5 \div 25 \text{ kPa}$	<i>coesione drenata</i>
$c_u = 50 \div 400 \text{ kPa}$	<i>resistenza al taglio in condizioni non drenate</i>
$E' = 15 \div 50 \text{ MPa}$	<i>modulo di deformazione elastico "</i>

Stralcio Rel geotecnica di PEA par.7.8 pag. 307

" 7.8 NUOVO PONTE SU TORRENTE FRATTINA-SVINCOLO MEZZOJUSO, PROGR.13+000

In corrispondenza dell'opera in oggetto, l'indagine più vicina è la prova penetrometrica statica CPT16; inoltre per la caratterizzazione geotecnica si fa riferimento al sondaggio SC4PZ. Quindi, con riferimento alle suddette indagini, si perviene alla seguente stratigrafia e parametri geotecnici di progetto.

UNITA' LSA da p.c. fino a 11.5 m

$\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$	<i>peso di volume naturale</i>
$\varphi' = 26^\circ$	<i>angolo di resistenza al taglio</i>

$c' = 0 \div 10 \text{ kPa}$	per $z < 7 \text{ m}$	coesione drenata
$c' = 15 \text{ kPa}$	per $z > 7 \text{ m}$	coesione drenata
$c_u = 75 \div 100 \text{ kPa}$	per $z < 7 \text{ m}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$c_u = 200 \text{ kPa}$	per $z > 7 \text{ m}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$E' = 15 \div 25 \text{ MPa}$	per $z < 7 \text{ m}$	modulo di deformazione elastico
$E' = 25 \text{ MPa}$	per $z > 7 \text{ m}$	modulo di deformazione elastico

Il livello della falda viene considerato a $-1,0$ da p.c. “

Pertanto in definitiva I parametri geotecnici assegnati alle formazioni ed utilizzati nel calcolo dell'opera in esame sono i seguenti :

Terreno	γ [kN/m ³]	c' [kPa]	ϕ' [°]	E'_{vc} [MPa]	E'_{ur} [MPa]
RIL	20	0	35	40	120
LSA	20	5	24	25	75

γ = peso di volume naturale del terreno
 c' = coesione
 ϕ' = angolo di resistenza al taglio
 E'_{vc} = modulo elastico in compressione vergine
 E'_{ur} = modulo elastico in condizioni di scarico-ricarico

5.1 Livello della falda

Come riportato nei sondaggi Sc4Pz e Sc9, e nella relazione geotecnica di PEA la falda si attesta ad -1.0 m da quota piano campagna originale.

Ai fini del calcolo dell'opera in esame , il livello di falda è stata posto a quota -7.50 m da piano viabile stradale. Essendo il tratto stradale in esame su cui si attesta l'opera in progetto in rilevato di altezza sui $6-7$ m da p.c., il livello assunto coincide appunto con un livello di falda a circa 1 m dal p.c. .

6 CARATTERIZZAZIONE SISMICA

Trattandosi di un'opera provvisoria con una durata in progetto inferiore a 2 anni, con riferimento a quanto prescritto al p.to 2.4.1 del DM 14.01.2008, le verifiche ad azioni sismiche vengono omesse.

7 DESCRIZIONE DELL' OPERA DI SOSTEGNO

Per sostenere in modo provvisorio il rilevato stradale e consentire la realizzazione dell'allargamento del sottopasso esistente ST05 con il traffico in esercizio, si prevede una paratia di pali costituita da pali $\phi = 1200$ mm posti ad interasse $i = 1.40$ m e collegati in testa da una trave di coronamento in c.a. avente altezza di 1.20 m e larghezza $B = 1.20$ m.

La paratia presenta uno sviluppo in pianta pari a circa 10,50 m per parte ed è prevista interamente a sbalzo. I pali presentano una lunghezza di 18.00 m in corrispondenza del massimo scavo pari a circa 7.50 m, per poi ridursi a 12.00 m e 5.00 m allontanandosi.

7.1 Metodologie di calcolo

Le modellazioni eseguite mirano ad analizzare i principali aspetti tenso-deformativi connessi con la realizzazione delle opere di sostegno provvisorie previste in progetto:

- determinazione delle massime sollecitazioni sugli elementi strutturali per il loro dimensionamento e verifica;
- analisi e verifica della stabilità geotecnica delle opere;

In relazione agli obiettivi sopra esposti si è scelto di operare con il programma Paratie 10.3.1.0 analisi FEM mono-dimensionale. L'analisi si basa su ipotesi semplificative generalmente a favore di sicurezza per le sollecitazioni di progetto.

In ogni caso tutte le analisi sono state condotte mediante modellazioni volte a rappresentare il sistema geotecnico struttura-terreno con la simulazione sequenziale delle principali fasi costruttive previste: prescavi, realizzazione dei micropali ed esecuzione delle varie fasi di scavo.

Nel seguito si descrivono le metodologie di calcolo implementate nei due programmi utilizzati. La descrizione ha carattere generale (soluzione numerica, legami costitutivi e significato dei parametri di input); nei successivi capitoli, esplicitamente dedicati alle modellazioni, verranno espresse le caratteristiche di dettaglio delle analisi svolte ed i parametri di input considerati.

Il calcolo "monodimensionale" verrà condotto con l'ausilio di un codice di calcolo automatico agli elementi finiti (Paratie v. 10.3.1.0) che, con l'impiego di un metodo di calcolo iterativo, consente di modellare l'interazione terreno-struttura nella successione delle fasi di scavo e di esercizio.

Infatti, in tale codice di calcolo, l'interazione fra la paratia e il terreno, è simulata modellando la prima con elementi finiti caratterizzati da una rigidità flessionale ed il secondo con molle elasto-plastiche connesse ai nodi della paratia di rigidità proporzionale al modulo di rigidità del terreno.

La legge costitutiva elasto-plastica del terreno è identificata dai parametri di spinta del terreno: il terreno reagisce in modo elastico sino ai valori limite dello spostamento raggiunti i quali, la reazione corrisponde, a seconda del segno dello spostamento, ai valori limite della pressione attiva o passiva. Si intende che gli spostamenti vengono computati a partire dalla situazione di terreno "in quiete". Questo modello, nella sua semplicità concettuale, derivato direttamente dal modello di Winkler, consente una simulazione del comportamento del terreno adeguata agli scopi progettuali. In particolare, vengono superate le limitazioni dei più tradizionali metodi dell'equilibrio limite, non idonei a seguire il comportamento della struttura al variare delle fasi esecutive. Il metodo di calcolo richiede la definizione di parametri di interazione struttura-terreno, valutati in funzione delle caratteristiche geotecniche e fisiche dei terreni e delle caratteristiche geometriche e strutturali dell'opera. Nei paragrafi seguenti si forniscono tutti i valori dei parametri assunti nella analisi. Tutti i calcoli verranno condotti con riferimento a condizioni di lungo termine (parametri del terreno "efficaci") che, nel caso di esecuzione di scavi (detensionamento del terreno), conducono a risultati cautelativi sul dimensionamento delle opere di sostegno.

7.1.1 Pressione e resistenza statica delle terre e dell'acqua

In generale, la pressione σ'_h che lo scheletro solido del terreno esercita su una struttura di sostegno dipende dagli spostamenti che essa subisce per effetto di σ'_h stessa ovvero dipende dall'interazione fra la struttura ed il terreno a tergo dell'opera. Nel caso in cui la struttura subisca uno spostamento verso valle (diminuzione della tensione orizzontale efficace rispetto alle condizioni geostatiche), la σ'_h sul paramento di monte può essere calcolata come:

$$\sigma'_h = k_a \sigma'_v - 2c' \sqrt{k_a} \quad \text{pressione attiva}$$

dove:

k_a	coefficiente di spinta attiva
σ'_v	tensione verticale efficace
c'	coesione efficace

In condizioni statiche, k_a è funzione dell'angolo di attrito efficace dello scheletro solido φ' , dell'angolo di attrito δ fra struttura e terreno (nelle analisi $\delta = 0^\circ$), dell'inclinazione ψ rispetto

all'orizzontale del paramento di monte della struttura di sostegno (nelle analisi $\psi = 90^\circ$) e dell'inclinazione β rispetto all'orizzontale del versante a tergo dell'opera. Fra le varie formulazioni proposte per il calcolo di k_a , nel caso di condizioni stratigrafiche omogenee e di cunei di spinta non influenzati dall'andamento della falda lungo il pendio, poiché formulazioni più complesse come ad esempio il modello a spirale logaritmica non portano a risultati più accurati, si farà riferimento a quella di [Coulomb, 1776] che considera una superficie di rottura piana:

$$k_a = \frac{[\sin(\psi + \varphi')]^2}{(\sin \psi)^2 \sin(\psi - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi' + \delta) \sin(\varphi' - \beta)}{\sin(\psi - \delta) \sin(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

Nel caso in cui la struttura subisca uno spostamento verso monte (aumento della tensione orizzontale efficace rispetto alle condizioni geostatiche), la σ'_h sul paramento di monte può essere calcolata come:

$$\sigma'_h = k_p \sigma'_v - 2c' \sqrt{k_p} \quad \text{pressione passiva}$$

dove:

- k_p coefficiente di spinta attiva
- σ'_v tensione verticale efficace
- c' coesione efficace

Analogamente al coefficiente di spinta attiva, in condizioni statiche si può porre $k_p = k_p(\varphi', \psi, \beta, \delta)$. Nelle analisi effettuate si è posto $\delta' = 0.50 \cdot \varphi'$, con $\delta' \leq 15^\circ$. Fra le varie formulazioni proposte per il calcolo di k_p , di seguito, si farà riferimento a quella di [Caquot-Kerisel, 1948] che, nel caso in cui sia $\delta > \varphi' / 3$ fornisce risultati più attendibili delle altre formulazioni. La superficie potenziale di scorrimento del terreno è assimilabile in questo caso ad un arco di spirale logaritmica e non più ad una superficie piana. Tale coefficiente viene determinato dall'interpolazione polinomiale delle spirali logaritmiche fornite sperimentalmente da [Caquot-Kerisel, 1948], riportate in *Figura 7.a*.

Pertanto, in generale, nel caso di strutture di sostegno flessibili, eventualmente contrastate da elementi strutturali attivi o passivi messi in opera in fasi successive, sul paramento di monte agirà la pressione attiva e su quello di valle la pressione passiva.

Nel caso di strutture molto rigide, incapaci di subire spostamenti sufficienti a mobilitare la pressione attiva o quella passiva, la pressione σ'_h esercitata dallo scheletro solido sull'opera di sostegno può essere calcolata come la pressione in condizioni geostatiche:

$$\sigma'_h = k_0 \sigma'_v \quad \text{pressione a riposo}$$

dove:

k_0 coefficiente di spinta a riposo;

σ'_v tensione verticale efficace.

Secondo la relazione di [Kulhawy et al., 1989] k_0 dipende dalla resistenza del terreno e dal rapporto di sovraconsolidazione del terreno O.C.R.:

$$k_0 = k_0^{nc} (OCR)^m$$

dove:

k_0^{nc} coefficiente di spinta a riposo per terreni normal consolidati che secondo [Jaky, 1936] può essere posto pari a $(1 - \text{sen } \varphi')$;

m parametro empirico, di solito compreso tra 0.4 e 0.7.

In generale, per strutture di sostegno impermeabili senza sistemi di drenaggio a monte, alla pressione esercitata dallo scheletro solido deve essere sommata la pressione esercitata dall'acqua.

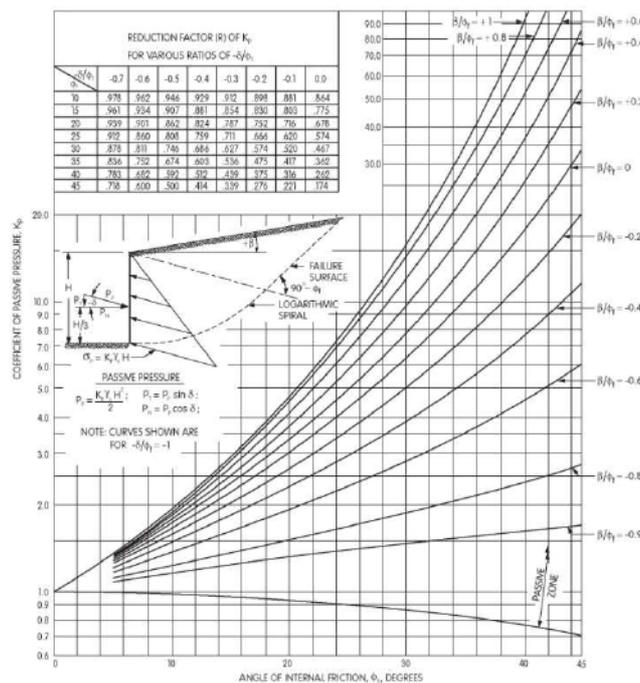


Figura 7.a – Calcolo dei coefficienti di spinta

In condizioni drenate (regime stazionario), che sono le condizioni a vantaggio di sicurezza nel caso di esecuzione di scavi (detensionamento del terreno), la pressione dell'acqua (pressione neutra) nei pori è indipendente dalla deformazione dello scheletro solido (disaccoppiamento meccanico-idraulico). Pertanto, nell'ipotesi semplificativa che il flusso nell'intorno della paratia si sviluppi prevalentemente in direzione verticale (certamente realistica in assenza di acquiferi confinati), il calcolo della pressione neutra p alla quota z può essere condotto considerando che il prodotto fra

permeabilità k e perdita di carico i è costante (principio di conservazione della massa applicato alla legge di Darcy) ovvero, che in ciascun tratto omogeneo (permeabilità k costante), di spessore $L = z - z_0$, la perdita di carico i è costante:

$$p = p_0 - \gamma_w (1+i)(z - z_0) \quad \text{pressione neutra}$$

dove:

p_0 pressione all'inizio di ciascun tratto omogeneo ovvero $p(z = z_0)$

γ_w peso specifico dell'acqua

i perdita di carico $i = \frac{-\Delta h}{L} = -\frac{[h(z) - h(z_0)]}{z - z_0}$

z quota, positiva verso l'alto, alla quale si calcola p

7.1.2 Parametri geotecnici

Nelle seguente *Tabella 7.a* sono riportati i parametri geotecnici utilizzati per la modellazione delle varie unità geotecniche.

	Unità	RIL	LSA
Peso di volume	γ [kN/m ³]	20	20
Coesione drenata	c' [kPa]	0	5
Angolo di resistenza al taglio	φ' [°]	35	24
Coefficiente di spinta a riposo	K_0	0.426	0.593
Coefficiente di spinta attiva	K_A	0.271	0.422
Coefficiente di resistenza passiva	K_P	3.69	2.371
Modulo elastico di primo carico	E_{vc} [MPa]	40	25
Modulo elastico in scarico-ricarico	E_{ur} [MPa]	120	75

Tabella 7.a – Paratie: parametri geotecnici dei terreni assunti nelle analisi

7.1.3 Falda, carichi, sovraccarichi e combinazioni

Le analisi sono state effettuate in conformità alla al DM 14 gennaio 2008 (Norme Tecniche per le Costruzioni). In particolare la norma prevede due condizioni di verifica distinte. La prima combinazione, indicata con la sigla **STRU**, è quella di riferimento per le verifiche di resistenza degli elementi strutturali. La terza, indicata con la sigla **GEO**, è di riferimento per le verifiche di stabilità geotecnica.

Per le verifiche di resistenza allo stato limite ultimo si adotta l'approccio 1 previsto dalla normativa. Nelle seguenti Tabella 7.b e Tabella 7.c si riportano i coefficienti parziali indicati dalla normativa (moltiplicativi per le azioni e riduttivi per i parametri di resistenza del terreno).

Azioni (γ_F)				Proprietà del terreno (γ_M)		
Permanenti		Variabili		tan φ'	c'	cu
sfavorevoli	favorevoli	sfavorevoli	favorevoli			
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabella 7.b – Combinazioni per analisi statiche in esercizio (SLE)

	Azioni (γ_F)				Proprietà del terreno (γ_M)		
	Permanenti		Variabili		tan φ'	c'	cu
	sfavorevoli	favorevoli	sfavorevoli	favorevoli			
EQU	1.1	0.90	1.50	0.00	/	/	/
STRU (A1 + M1)	1.30	1.00	1.50	0.00	1.00	1.00	1.00
GEO (A2 + M2)	1.00	1.00	1.30	0.00	1.25	1.25	1.40

Tabella 7.c – Combinazioni per analisi statiche SLU

Verifiche di esercizio (SLE)

I valori delle proprietà meccaniche da adoperare nell'analisi sono quelli caratteristici e i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri di resistenza sono sempre unitari. Tale combinazione è di riferimento per le verifiche tensionali sui materiali e le verifiche di fessurazione. E' inoltre rappresentativa delle condizioni di deformazione dell'opera e del terreno circostante.

Verifiche di resistenza degli elementi strutturali (SLU STR)

Si considerano gli stati limite ultimi per raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali. L'analisi può essere 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. In questo caso, i coefficienti parziali amplificativi delle azioni possono applicarsi direttamente alle sollecitazioni, calcolate con i valori caratteristici delle azioni e delle resistenze.

Verifiche stabilità geotecnica (SLU GEO)

Nelle verifiche agli stati limite ultimi per il dimensionamento geotecnico delle paratie (GEO), si considera lo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e, specificamente, dal raggiungimento delle condizioni di equilibrio limite nel terreno interagente con la paratia. L'analisi può essere condotta con la Combinazione 2 (A2+M2+R2), 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 parametri di resistenza di progetto sono perciò inferiori a quelli caratteristici e di conseguenza il valore di progetto della spinta attiva è maggiore, e quello della resistenza passiva è minore, dei corrispondenti valori caratteristici.

In definitiva le analisi contemplano le seguenti combinazioni di carico.

- **SLE** indicativa per le analisi di deformabilità.
- **SLU STRU** per le verifiche di resistenza degli elementi strutturali.
- **SLU GEO** per le verifiche di stabilità geotecnica del sistema opera-terreno.

8 ANALISI DEI CARICHI

Nel seguito si riassumono le condizioni di carico considerate nell'analisi di verifica delle strutture.

8.1 Azioni permanenti

8.1.1 Peso proprio

Il peso proprio per questo tipo di struttura può essere trascurato sia agli effetti delle azioni statiche che, come precisato dalla normativa vigente, ai fini della valutazione delle forze di inerzia sismiche.

8.1.2 Spinta delle terre

La spinta delle terre viene determinata con la seguente espressione:

$$p'_a(z) = [\sigma'_v(z) + q] \times K_a - 2c' \sqrt{K_a}$$

$\sigma'_v(z)$ = tensione verticale efficace alla generica quota z;

K_a = coefficiente di spinta attiva;

q = eventuale sovraccarico uniformemente distribuito.

Per il calcolo di K_a si utilizza la formula di Mueller-Breslau (1924), valida per superfici di rottura piane.

$$k_a = \frac{\text{sen}^2(\psi + \phi - \theta)}{\cos \theta \text{sen}^2 \psi \text{sen}(\phi + \theta - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi + \delta) \text{sen}(\phi - \beta - \theta)}{\text{sen}(\phi + \theta - \delta) \text{sen}(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

in cui:

ϕ = angolo di resistenza al taglio del terreno

β = inclinazione del terreno a monte della paratia rispetto all'orizzontale (positivo per terreno che sale allontanandosi dal muro)

ψ = inclinazione della paratia rispetto all'orizzontale (>90° per parete inclinata verso valle)

δ = angolo di attrito muro terreno

θ = angolo dipendente dalla accelerazione sismica, assunto pari a 0

La spinta attiva risultante P_a risulta inclinata dell'angolo δ sull'orizzontale. Pertanto il valore della spinta orizzontale P_{AH} è pari a:

$$P_{AH} = P_a \cdot \cos \delta$$

mentre la componente verticale P_{AV} risulta:

$$P_{AV} = P_A \cdot \sin \delta$$

Le componenti della spinta sono costituite in generale da due aliquote, l'una dovuta al peso proprio del terreno l'altra dovuta al sovraccarico, che avranno distribuzione diversa lungo l'altezza dell'opera: la prima di tipo triangolare l'altra di tipo rettangolare, se carico distribuito uniforme (permanente o accidentale che sia), o differente per aree di carico diverso (nastri-forme, ...).

Le diverse aliquote saranno considerate distintamente in fase di combinazione dei carichi a seconda che si tratti di azioni permanenti, strutturali o non strutturali, o variabili.

La spinta passiva viene valutata, ipotizzando la eventuale presenza della coesione, come:

$$p_p = \sigma'_v K_p + 2\sqrt{K_p c'}$$

Il coefficiente di spinta passiva K_p è stato valutato utilizzando le tabelle di Caquot e Kerisel, che fanno riferimento a superfici di rottura non piane.

Anche in questo caso la spinta agisce secondo una direzione inclinata di δ rispetto alla perpendicolare al paramento.

La spinta delle terre, sia quella dovuta al peso proprio che ai sovraccarichi accidentali, viene valutata con riferimento alla stratigrafia ed ai valori di progetto dei parametri geotecnici, peso di volume, angolo di attrito, coesione, attrito paratia-terreno, e dei sovraccarichi accidentali ottenuti abbattendo/amplificando i valori caratteristici mediante i coefficienti riduttivi o amplificativi specifici del tipo di verifica condotta.

Per tener conto nella valutazione della spinta la presenza del pendio a monte dell'opera, nel software "Paratie" è stato inserito l'andamento del pendio stesso ed il software ha provveduto al calcolo della spinta ricercando iterativamente il cuneo di spinta attiva che massimizza la spinta tramite il Metodo dei cunei.

8.2 Azioni variabili

8.2.1 Sovraccarico uniforme indefinito

Per le opere interferenti con la viabilità si terrà conto di un sovraccarico accidentale uniforme dovuto al traffico stradale pari a 20 kPa, che dà luogo ad un incremento di spinta attiva dovuta al solo peso proprio del terreno secondo quanto indicato nel paragrafo 8.1.2.

Affidamento a Contraente Generale dei “Lavori di ammodernamento del tratto Palermo - Lercara Friddi, lotto funzionale dal km 14,4 (km. 0,0 del Lotto 2) compreso il tratto di raccordo della rotonda Bolognetta, al km 48,0 (km. 33,6 del Lotto 2 – Svincolo Manganaro incluso) compresi i raccordi con le attuali SS n.189 e SS n.121”.

SOTTOVIA ESISTENTE ST05 AL KM 13+154,91 - Relazione Tecnica e di Calcolo

8.2.2 Azioni climatiche

Nel caso specifico non si hanno azioni climatiche.

9 RISULTATI DELLE ANALISI

9.1 Sezioni di verifica

Nelle tabelle seguenti, per le sezioni esaminate, sono fornite le principali caratteristiche geometriche e stratigrafiche utilizzate nelle verifiche. Sono state esaminate le sezioni ritenute più significative.

1. Sezione 1 – H = 7.50 m

Opera di sostegno	Paratia di pali Ø=1200 mm – interasse 1.40 m
Altezza totale paratia	H = 19.20 m (trave di coronamento 1.20 m+pali L=18.00 m)**
Stratigrafia di calcolo	RIL da 0.00 m t.c. fino a -6 m t.c.
	LSA da -6 m t.c. a fino al limite del modello
Fondo scavo	- 7.5 m da t.c.
Falda	- 7.5 m da t.c.
t.c. = quota di testa trave di coronamento ** con testa cordolo a quota -0.70m	

2. Sezione 2 – H = 5.50 m

Opera di sostegno	Paratia di pali Ø=1200 mm – interasse 1.40 m
Altezza totale paratia	H = 13.20 m (trave di coronamento 1.20 m+pali L=12.00 m)
Stratigrafia di calcolo	RIL da 0.00 m t.c. fino a -6 m t.c.
	LSA da -6 m t.c. a fino al limite del modello
Fondo scavo	- 5.5 m da t.c.
Falda	- 7.5 m da t.c.
t.c. = quota di testa trave di coronamento	

9.2 Sezione 1

9.2.1 Sintesi dei risultati

Nella tabella seguente vengono riportati i risultati delle analisi eseguite con riferimento alle combinazioni di carico precedentemente definite.

Si noti che il metodo di calcolo per l'analisi delle paratie, come già detto, segue il processo della costruzione, dalla realizzazione della paratia stessa allo scavo finale. I principali risultati ottenuti per le combinazioni di carichi sopra indicate.

	SLU GEO	SLU STR	SLE
	Statico	Statico	
Spostamento massimo (cm)	-	-	4.62
Momento massimo (kNm/m)	1585.5	1051.43	808.79
Taglio massimo (kN/m)	533.93	211.16	162.43
Spinta passiva mobilitata a valle (%)	80	-	-

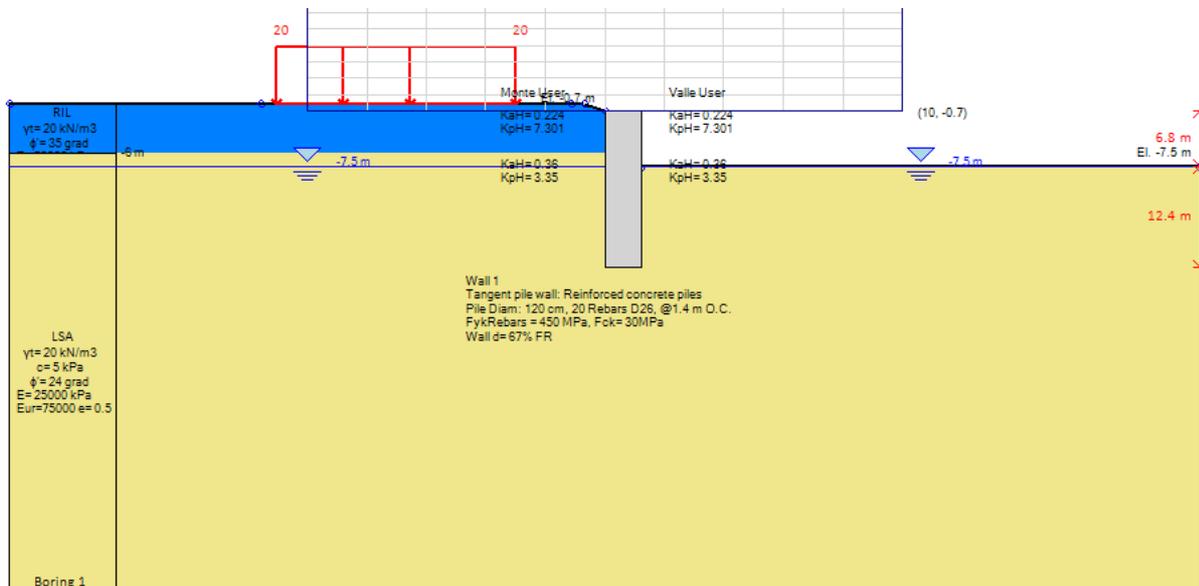


Figura 2 Modello di calcolo – step finale di calcolo

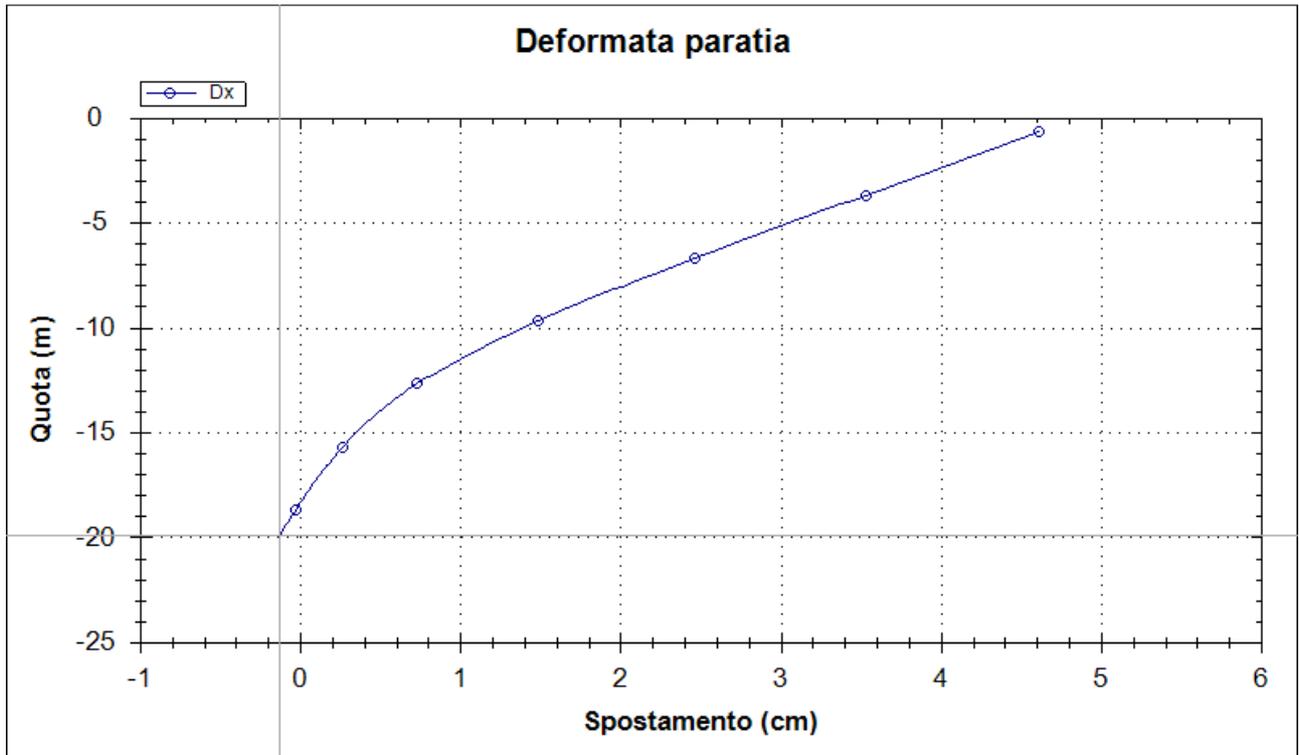


Figura 3 Spostamenti - profondità SLE

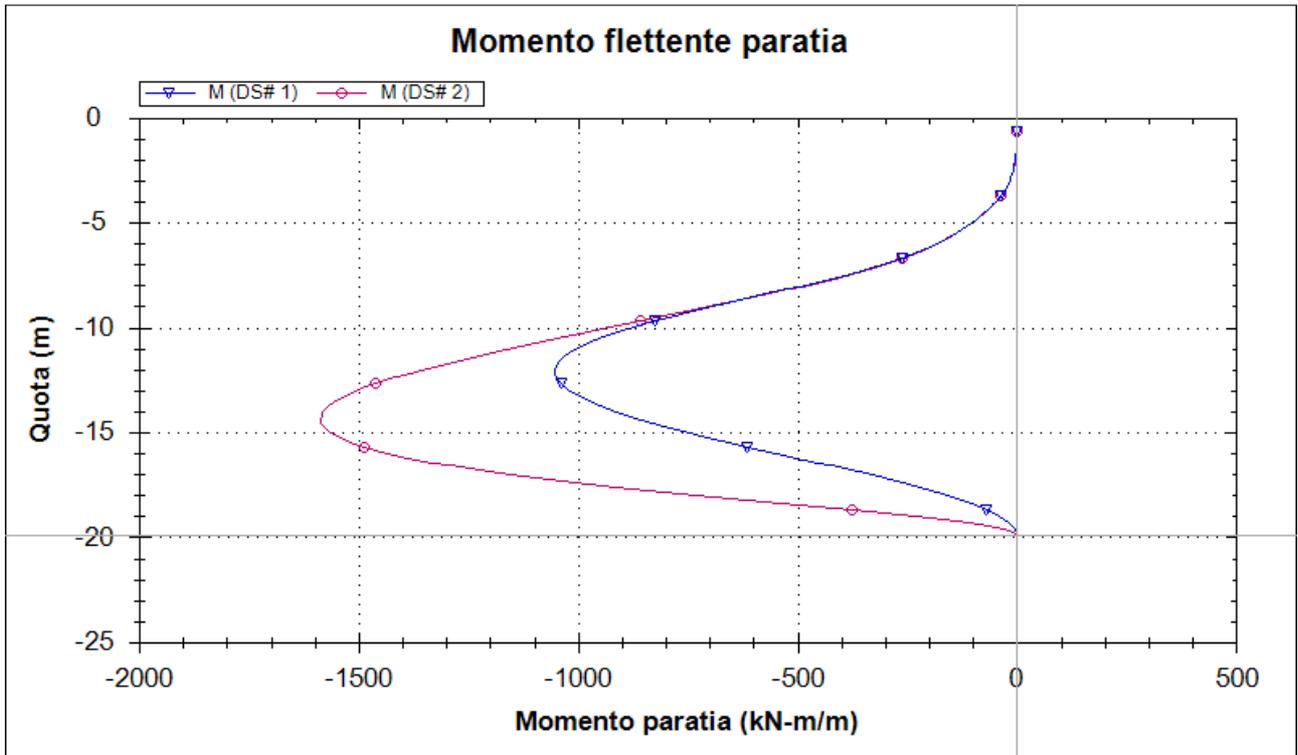


Figura 4 Momento-profondità SLU STR e SLU GEO

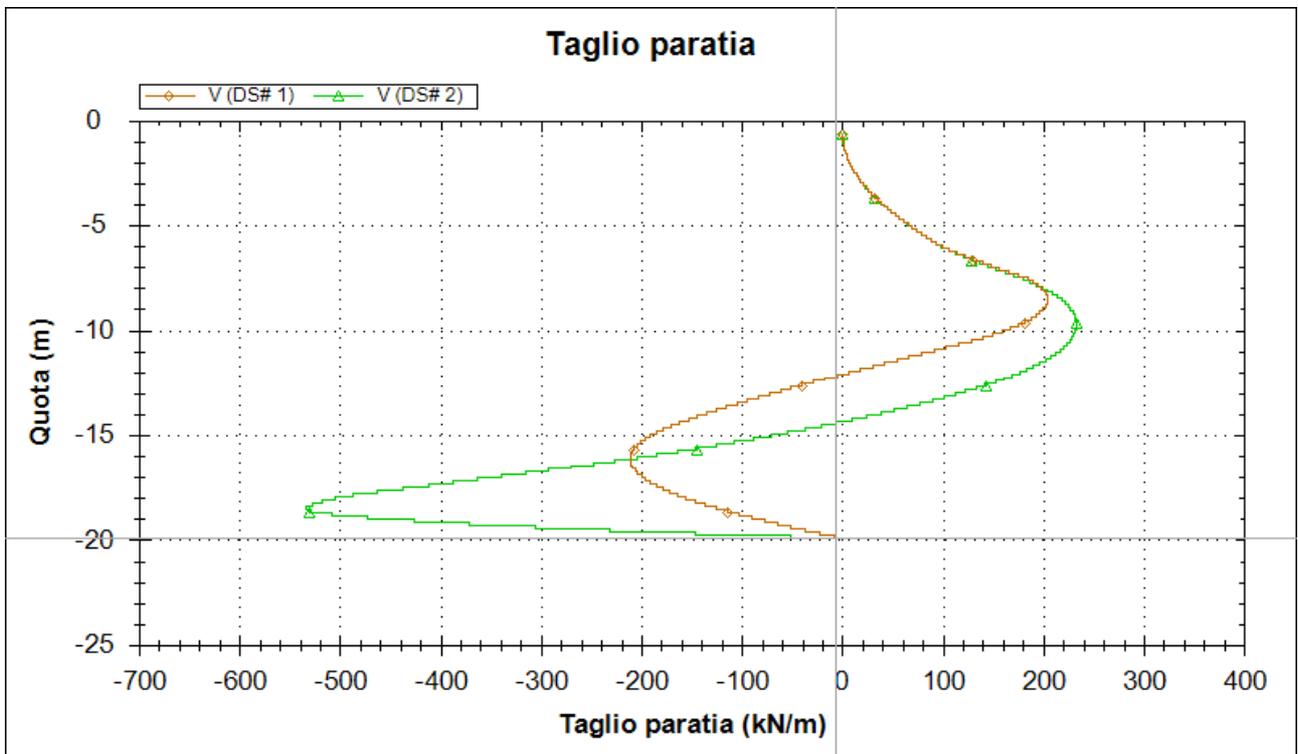


Figura 5 Taglio-profondità SLU STR e SLU GEO

9.2.2 Verifiche di stabilità globale del complesso opera di sostegno - terreno

Per le verifiche di stabilità globale sono stati utilizzati i medesimi parametri indicati nel paragrafo precedente. Per le verifiche si è utilizzato il modulo VSP di ParatiePlus. I coefficienti di sicurezza ottenuti sono riportati nella tabella seguente.

Tipo di verifica	Fs
Statica	1.86 > 1.10

Nelle figure seguenti è rappresentata la sezione presa in considerazione per le analisi con le superfici investigate ed evidenziata la superficie più critica.

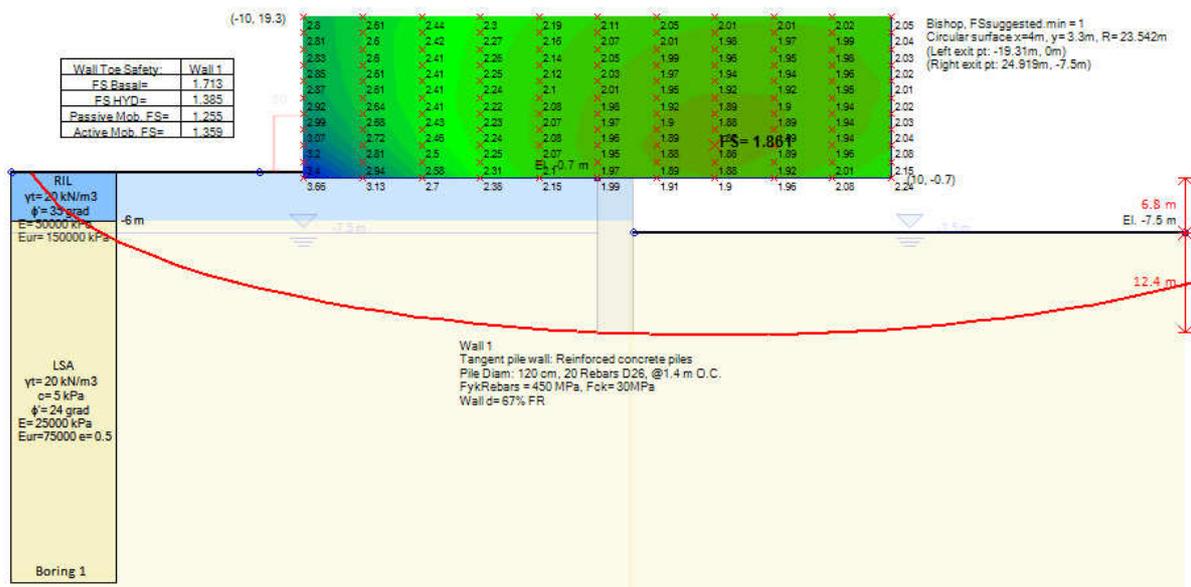


Figura 6 Verifica in condizione statica – superfici analizzate e superficie critica

9.2.3 Verifiche strutturali

PALO

Sezione: Circolare - Dati geometrici della sezione
Raggio <m> = 0.60

Simbologia

Caso = Caso di verifica
CC = Numero della combinazione delle condizioni di carico elementari
TCC = Tipo di combinazione di carico
SLU = Stato limite ultimo
SLU S = Stato limite ultimo (azione sismica)
SLE R = Stato limite d'esercizio, combinazione rara
SLE F = Stato limite d'esercizio, combinazione frequente
SLE Q = Stato limite d'esercizio, combinazione quasi permanente
SLD = Stato limite di danno
SLV = Stato limite di salvaguardia della vita
SLC = Stato limite di prevenzione del collasso
SLO = Stato limite di operatività
SLU I = Stato limite di resistenza al fuoco
N = Sforzo normale
My = Momento flettente intorno all'asse Y
Mz = Momento flettente intorno all'asse Z
Nu = Sforzo normale ultimo
Myu = Momento ultimo intorno all'asse Y
Mzu = Momento ultimo intorno all'asse Z
Rott. = Tipo di rottura
1-2 = Rott. acciaio: $\epsilon_Y = \epsilon_{Yd}$, $\epsilon_C < \epsilon_{Cu}$
2-3 = Rott. cls: $\epsilon_Y < \epsilon_{Yd}$, $\epsilon_C = \epsilon_{Cu}$
3-4 = Rott. cls: $\epsilon_{C0} < \epsilon_C < \epsilon_{Cu}$
 α = Angolo asse neutro a rottura
 ϵ_C = Deformazione nel calcestruzzo (*1000)
TS = Modalità di calcolo sicurezza
N/e = N costante ed eccentricità costante
My/e = My costante ed eccentricità costante
My/N = My e N costante
Mz/e = Mz costante ed eccentricità costante
Mz/N = Mz e N costante
Sic. = Sicurezza a rottura
Ty = Taglio in dir. Y
Tz = Taglio in dir. Z
bw = Larghezza membratura resistente al taglio
Asw = Area armatura trasversale
Vsdu = Taglio agente nella direzione del momento ultimo
VRcd = Taglio ultimo lato calcestruzzo
VRsd = Taglio ultimo lato armatura
Tipo = Tipo di verifica effettuata
Sez. = Numero della sezione
R = Raggio
Cf = Copriferro
Cls = Tipo di calcestruzzo
Fck = Resistenza caratteristica cilindrica a compressione del calcestruzzo
Fctk = Resistenza caratteristica a trazione del calcestruzzo
Fcd = Resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo
Fctd = Resistenza di calcolo a trazione del calcestruzzo
Acc. = Tipo di acciaio
Fyk = Tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio
Fyd = Resistenza di calcolo dell'acciaio

Caratteristiche delle sezioni e dei materiali utilizzati

Sez. Tipo	R <cm>	Cf <cm>	Cls	Fck <daN/cmq>	Fctk <daN/cmq>	Fcd <daN/cmq>	Fctd <daN/cmq>	Acc.	Fyk <daN/cmq>	Fyd <daN/cmq>
2 Cir.	60.00	10.70	C28/35	290.50	19.84	164.62	13.23	B450C	4500.00	3913.04

Affidamento a Contraente Generale dei "Lavori di ammodernamento del tratto Palermo - Lercara Friddi, lotto funzionale dal km 14,4 (km. 0,0 del Lotto 2) compreso il tratto di raccordo della rotonda Bolognetta, al km 48,0 (km. 33,6 del Lotto 2 – Svincolo Manganaro incluso) compresi i raccordi con le attuali SS n.189 e SS n.121".

SOTTOVIA ESISTENTE ST05 AL KM 13+154,91 - Relazione Tecnica e di Calcolo

Verifiche stato limite ultimo per tensioni normali

Caso	CC	TCC	N <daN>	My <daNm>	Mz <daNm>	Nu <daN>	Myu <daNm>	Mzu <daNm>	Rott.	α <grad>	ϵ_c	TS	Sic.
1		SLU	0.00	221970.00	0.00	0.00	250716.00	-6.23E-003	2-3	180.00	-3.50	N/e	1.130

Verifiche stato limite ultimo per sollecitazioni taglienti

Caso	Ty <daN>	Tz <daN>	bw <m>	Asw <cmq>	Vsdu <daN>	VRcd <daN>	VRsd <daN>
1	0.00	74750.00	1.20	20.27	74750.00	484147.00	77819.50

Verifiche principali

Caso	Tipo
1	SLU N cost - min. sic., SLU Taglio - min. sic. c.a., SLU Taglio - min. sic. acciaio

9.3 Sezione 2

9.3.1 Sintesi dei risultati

Nella tabella seguente vengono riportati i risultati delle analisi eseguite con riferimento alle combinazioni di carico precedentemente definite.

Si noti che il metodo di calcolo per l'analisi delle paratie, come già detto, segue il processo della costruzione, dalla realizzazione della paratia stessa allo scavo finale. I principali risultati ottenuti per le combinazioni di carichi sopra indicate.

	SLU GEO	SLU STR	SLE
	Statico	Statico	
Spostamento massimo (cm)	-	-	1.39
Momento massimo (kNm/m)	337.1	302.2	232.4
Taglio massimo (kN/m)	130.4	93.8	72.2
Spinta passiva mobilitata a valle (%)	42	-	-

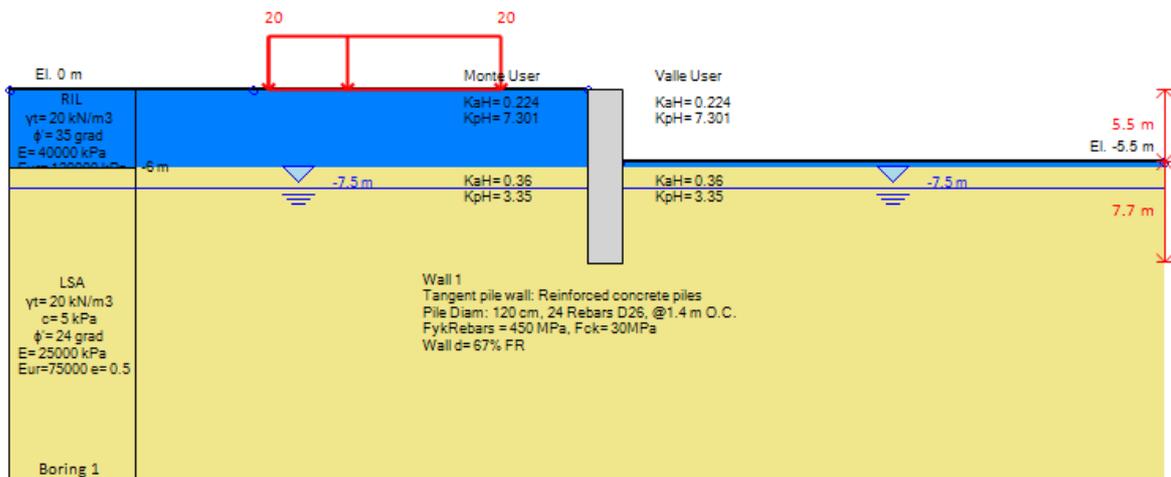


Figura 7 Modello di calcolo – step finale di calcolo

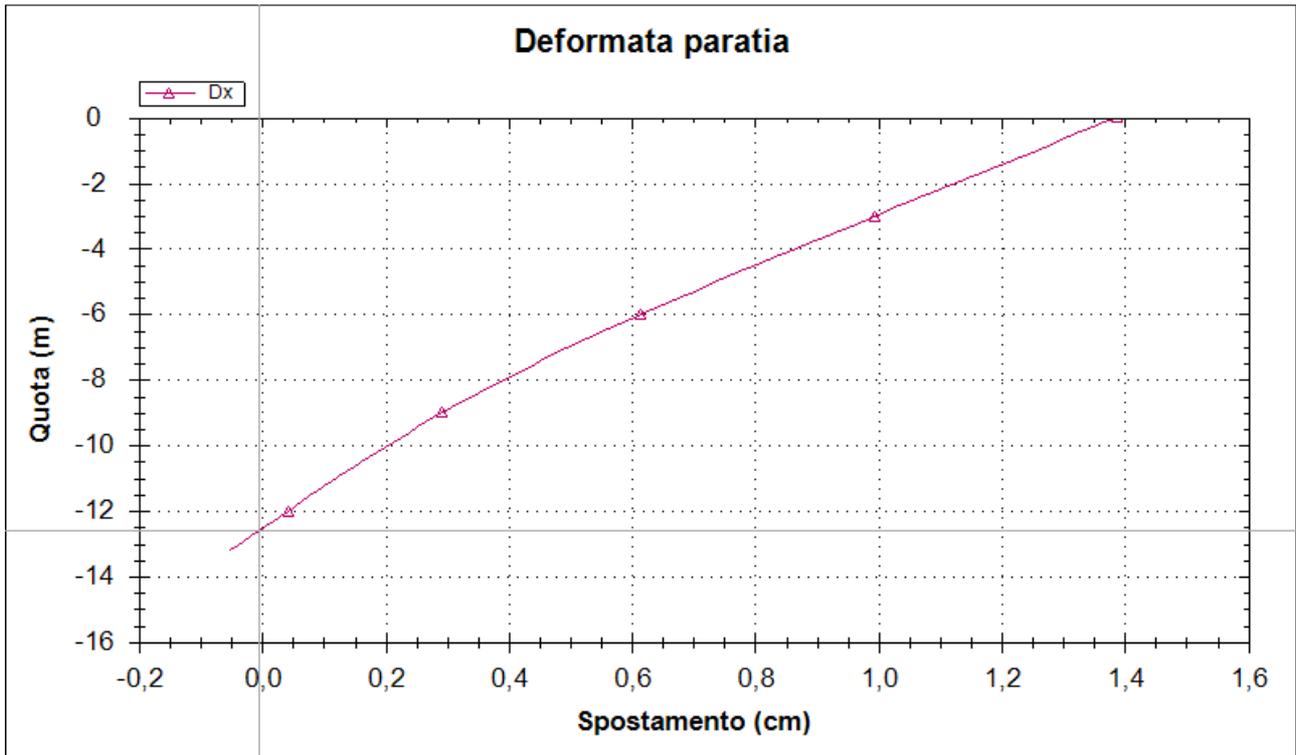


Figura 8 Spostamenti - profondità SLE

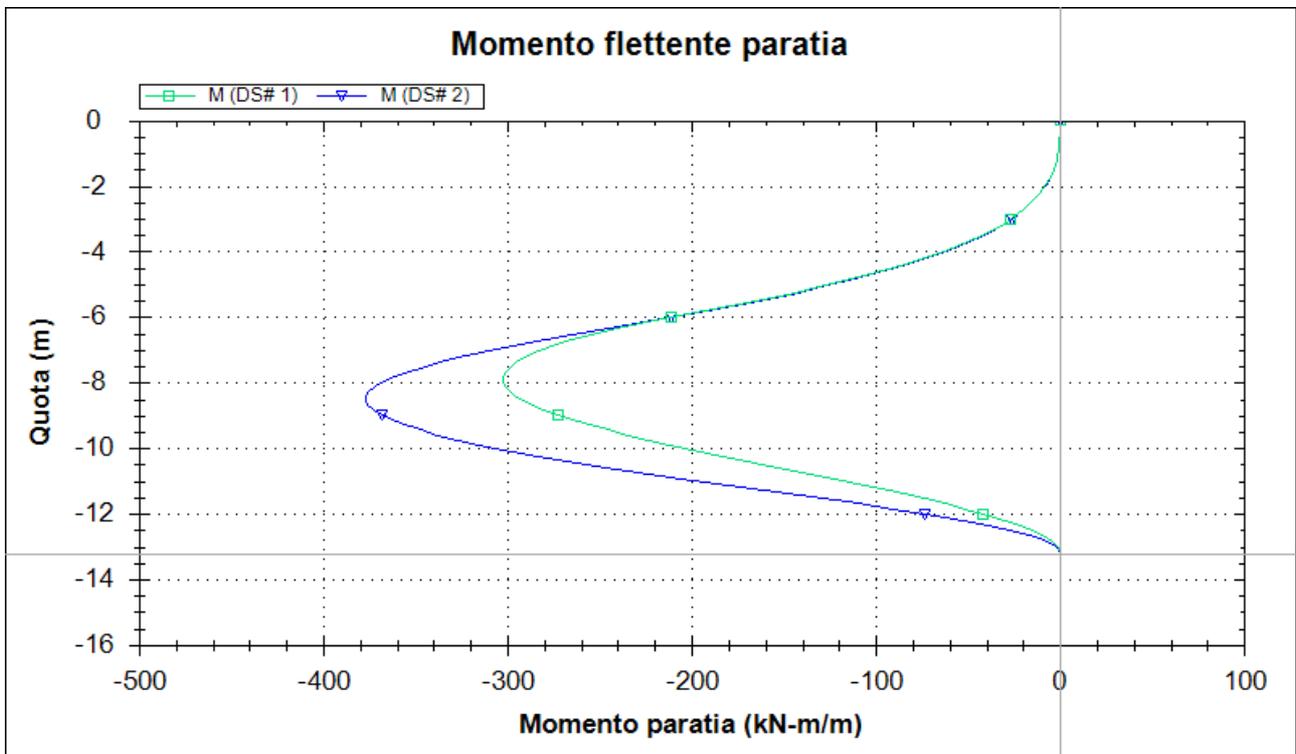


Figura 9 Momento-profondità SLU STR e SLU GEO

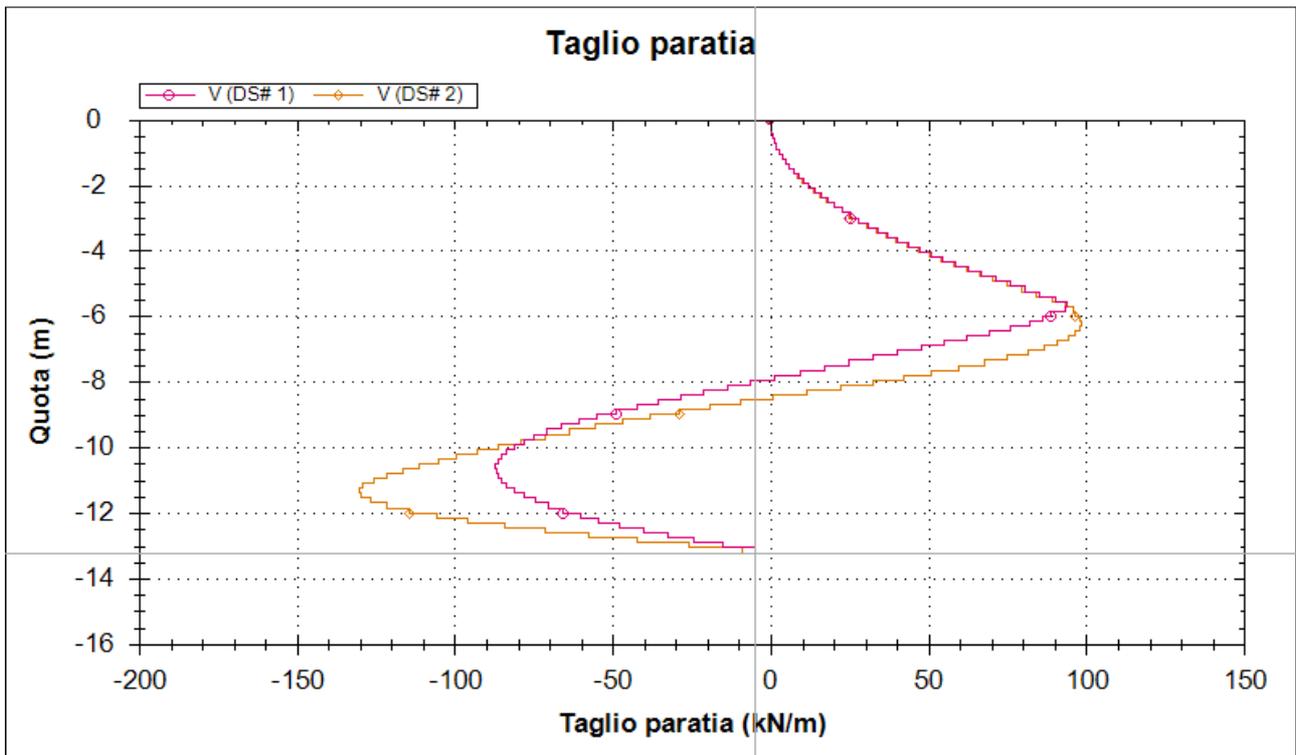


Figura 10 Taglio-profondità SLU STR e SLU GEO

9.3.2 Verifiche di stabilità globale del complesso opera di sostegno - terreno

Per le verifiche di stabilità globale sono stati utilizzati i medesimi parametri indicati nel paragrafo precedente. Per le verifiche si è utilizzato il modulo VSP di ParatiePlus. I coefficienti di sicurezza ottenuti sono riportati nella tabella seguente.

Tipo di verifica	Fs
Statica	1.975 > 1.10

Nelle figure seguenti è rappresentata la sezione presa in considerazione per le analisi con le superfici investigate ed evidenziata la superficie più critica.

Affidamento a Contraente Generale dei “Lavori di ammodernamento del tratto Palermo - Lercara Friddi, lotto funzionale dal km 14,4 (km. 0.0 del Lotto 2) compreso il tratto di raccordo della rotatoria Bolognetta, al km 48,0 (km. 33,6 del Lotto 2 – Svincolo Manganaro incluso) compresi i raccordi con le attuali SS n.189 e SS n.121”.

SOTTOVIA ESISTENTE ST05 AL KM 13+154,91 - Relazione Tecnica e di Calcolo

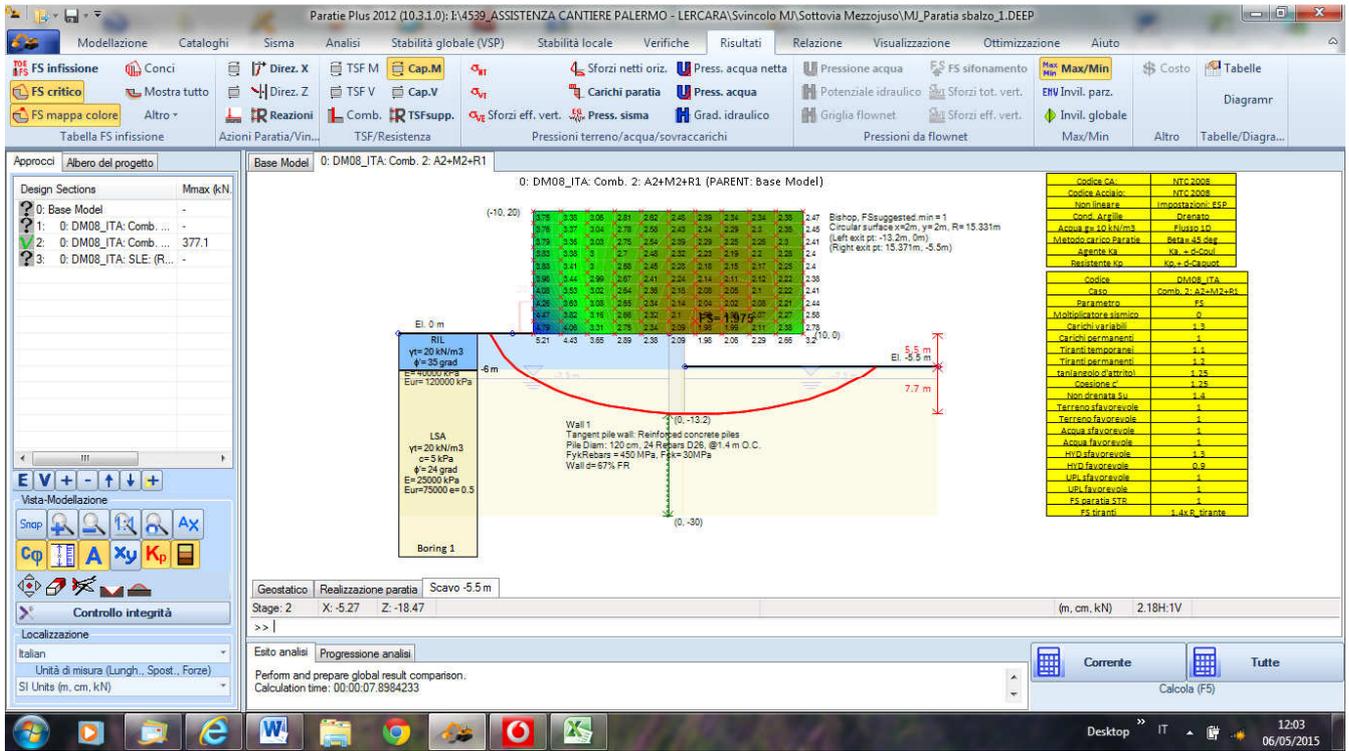


Figura 11 Verifica in condizione statica – superfici analizzate e superficie critica

9.3.3 Verifiche strutturali

PALO

Sezione: Circolare - Dati geometrici della sezione
Raggio <m> = 0.60

Simbologia

Caso = Caso di verifica
CC = Numero della combinazione delle condizioni di carico elementari
TCC = Tipo di combinazione di carico
SLU = Stato limite ultimo
SLU S = Stato limite ultimo (azione sismica)
SLE R = Stato limite d'esercizio, combinazione rara
SLE F = Stato limite d'esercizio, combinazione frequente
SLE Q = Stato limite d'esercizio, combinazione quasi permanente
SLD = Stato limite di danno
SLV = Stato limite di salvaguardia della vita
SLC = Stato limite di prevenzione del collasso
SLO = Stato limite di operatività
SLU I = Stato limite di resistenza al fuoco
N = Sforzo normale
My = Momento flettente intorno all'asse Y
Mz = Momento flettente intorno all'asse Z
Nu = Sforzo normale ultimo
Myu = Momento ultimo intorno all'asse Y
Mzu = Momento ultimo intorno all'asse Z
Rott. = Tipo di rottura
1-2 = Rott. acciaio: $\epsilon_Y < \epsilon_{Yd}$, $\epsilon_C < \epsilon_{Cu}$
2-3 = Rott. cls: $\epsilon_Y < \epsilon_{Yd}$, $\epsilon_C = \epsilon_{Cu}$
3-4 = Rott. cls: $\epsilon_{C0} < \epsilon_C < \epsilon_{Cu}$
 α = Angolo asse neutro a rottura
 ϵ_C = Deformazione nel calcestruzzo (*1000)
TS = Modalità di calcolo sicurezza
N/e = N costante ed eccentricità costante
My/e = My costante ed eccentricità costante
My/N = My e N costante
Mz/e = Mz costante ed eccentricità costante
Mz/N = Mz e N costante
Sic. = Sicurezza a rottura
Ty = Taglio in dir. Y
Tz = Taglio in dir. Z
bw = Larghezza membratura resistente al taglio
Asw = Area armatura trasversale
Vsdu = Taglio agente nella direzione del momento ultimo
VRcd = Taglio ultimo lato calcestruzzo
VRsd = Taglio ultimo lato armatura
Tipo = Tipo di verifica effettuata
Sez. = Numero della sezione
R = Raggio
Cf = Copriferro
Cls = Tipo di calcestruzzo
Fck = Resistenza caratteristica cilindrica a compressione del calcestruzzo
Fctk = Resistenza caratteristica a trazione del calcestruzzo
Fcd = Resistenza di calcolo a compressione del calcestruzzo
Fctd = Resistenza di calcolo a trazione del calcestruzzo
Acc. = Tipo di acciaio
Fyk = Tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio
Fyd = Resistenza di calcolo dell'acciaio

Caratteristiche delle sezioni e dei materiali utilizzati

Sez. Tipo	R	Cf	Cls	Fck	Fctk	Fcd	Fctd	Acc.	Fyk	Fyd
	<cm>	<cm>		<daN/cmq>	<daN/cmq>	<daN/cmq>	<daN/cmq>		<daN/cmq>	<daN/cmq>

Affidamento a Contraente Generale dei "Lavori di ammodernamento del tratto Palermo - Lercara Friddi, lotto funzionale dal km 14,4 (km. 0,0 del Lotto 2) compreso il tratto di raccordo della rotonda Bolognetta, al km 48,0 (km. 33,6 del Lotto 2 – Svincolo Manganaro incluso) compresi i raccordi con le attuali SS n.189 e SS n.121".

SOTTOVIA ESISTENTE ST05 AL KM 13+154,91 - Relazione Tecnica e di Calcolo

2 Cir. 60.00 10.40 C28/35 290.50 19.84 164.62 13.23 B450C 4500.00 3913.04

Verifiche stato limite ultimo per tensioni normali

Caso	CC	TCC	N <daN>	My <daNm>	Mz <daNm>	Nu <daN>	Myu <daNm>	Mzu <daNm>	Rott.	α <grad>	ϵ_c	TS	Sic.
1		SLU	0.00	47194.00	0.00	-3.91E-003	161825.00	-3.04E-003	2-3	180.00	-3.50	N/e	3.429

Verifiche stato limite ultimo per sollecitazioni taglianti

Caso	Ty <daN>	Tz <daN>	bw <m>	Asw <cmq>	Vsdu <daN>	VRcd <daN>	VRsd <daN>
1	0.00	18256.00	0.90	10.66	18256.00	363820.00	40931.70

Verifiche principali

Caso	Tipo
1	SLU N cost - min. sic., SLU Taglio - min. sic. c.a., SLU Taglio - min. sic. acciaio