

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 1 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

PROGETTO DEFINITIVO

RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE
2° Tr.: Aragona-Joppolo Giancaxio
DN 300 (12"), DP 24 bar
E OPERE CONNESSE

Attraversamento S.P.N.C. N.11 Aragona montagna Mintini
progr. km 0+435

Relazione tecnica attraversamento stradale
e verifica tubo di protezione in acciaio

1	Aggiornamento AU 327 per prescrizioni VIA	Barbaraci	Olivi	Mattei	Gen. '25
0	Emissione per Autorizzazione Unica	Costigliola	Olivi	Mattei	Giu. '24
Rev.	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato	Data

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 2 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
1.1 <i>Oggetto della relazione</i>	3
1.2 <i>Riferimenti normativi e tecnici</i>	3
1.3 <i>Elaborati progettuali di riferimento</i>	4
1.4 <i>Simboli utilizzati</i>	4
2. DATI DI BASE DELL'ATTRAVERSAMENTO	6
2.1 <i>Caratteristiche generali delle tubazioni</i>	6
2.2 <i>Caratteristiche meccaniche del tubo di protezione</i>	6
2.3 <i>Tubi portacavi</i>	7
2.4 <i>Protezione contro la corrosione</i>	7
3. MODALITÀ ESECUTIVE	8
4. GEOMETRIA DELL'ATTRAVERSAMENTO	9
5. CARATTERIZZAZIONE DEL TERRENO	11
6. VERIFICA SPESSORE DELLA TUBAZIONE DI LINEA	13
7. VERIFICA DEL TUBO DI PROTEZIONE IN FASE DI POSA	14
8. CALCOLO DEI CARICHI SUL TUBO DI PROTEZIONE IN ESERCIZIO	15
8.1 <i>Condizioni di carico</i>	15
8.2 <i>Combinazioni di carico</i>	17
9. STATO TENSO-DEFORMATIVO DEL TUBO DI PROTEZIONE IN OPERA	18
9.1 <i>Deformazione per ovalizzazione e stato tensionale anulare</i>	18
9.2 <i>Instabilità elastica della sezione</i>	19
10. RISULTATI DELLE VERIFICHE	20
10.1 <i>Carichi agenti sul tubo di protezione in opera</i>	20
10.1.1 <i>Modello di calcolo per copertura massima</i>	20
10.1.2 <i>Modello di calcolo per copertura minima</i>	23
10.2 <i>Verifiche tensionali e di deformazione per il tubo di protezione in opera</i>	26
10.2.1 <i>Modello di calcolo per copertura massima</i>	26
10.2.2 <i>Modello di calcolo per copertura minima</i>	27
11. CONCLUSIONI	29

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 3 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

1. INTRODUZIONE

1.1 Oggetto della relazione

La presente relazione ha lo scopo illustrare gli esiti di calcolo relativi alle verifiche del tubo di protezione in acciaio da porre in opera per l'attraversamento di una infrastruttura viaria, nel quadro del progetto di posa della tubazione di linea per trasporto del gas naturale con densità non superiore a 0,8.

In particolare, si tratta del progetto Rifacimento Metanodotto Derivazione per Porto Empedocle, nell'ambito del quale è prevista la posa della tubazione in attraversamento della S.P.N.C. N.11 Aragona montagna Mintini. L'attraversamento stradale ricade nel territorio del Comune di Aragona, nella Provincia di Agrigento.

Il progetto prevede la posa di manufatto di protezione chiuso, costituito da tubo in acciaio, in grado di contenere completamente la tubazione di linea e avente funzione di protezione meccanica nei confronti dei carichi esterni (in conformità a quanto stabilito al paragrafo 2.8 del D.M. 17.04.2008). Il tubo di protezione sarà posto in opera con tecnologia trenchless, mediante trivella spingitubo.

Le procedure di verifica ed i relativi presupposti teorici, le ipotesi semplificative operate e l'intera metodologia di calcolo sono illustrate in apposito distinto documento, al quale si rimanda per ogni approfondimento. Nella presente relazione vengono descritte: la configurazione geometrica di progetto, le caratteristiche dei materiali previsti ed i risultati delle verifiche di resistenza e di deformazione del tubo di protezione, in relazione alla tipologia ed alla profondità di posa, ai carichi mobili in superficie e alle relative sollecitazioni indotte.

1.2 Riferimenti normativi e tecnici

Decreto Ministeriale 17 Aprile 2008; "Regola tecnica per la progettazione, costruzione, collaudo, esercizio e sorveglianza delle opere e degli impianti di trasporto di gas naturale con densità non superiore a 0,8".

La regola tecnica emanata con tale provvedimento detta i criteri di progettazione e specifica le modalità esecutive dell'attraversamento stradale. Tutti i relativi aspetti costruttivi, conseguentemente adottati in fase di elaborazione progettuale, sono illustrati in appositi documenti; per quanto di diretta applicabilità per lo sviluppo dei temi oggetto della presente relazione, la regola tecnica impone che *"i manufatti di protezione (...) devono essere dimensionati in relazione ai carichi a cui saranno sottoposti in opera"*.

Decreto Ministro delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17 gennaio 2018, di concerto con il Ministro dell'interno e con il Capo del Dipartimento della Protezione Civile; Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le costruzioni", emesse ai sensi delle leggi 05/11/1971, n. 1086, e 02/02/1974, n. 64, così come riunite nel "Testo Unico per l'Edilizia" di cui al D.P.R. 06/06/2001, n. 380, e dell'art. 5 del Decreto Legge 28/05/2004, n. 136, convertito in legge, con modificazioni, dall'art. 1 della legge 27/07/2004, n. 186 e ss.mm.ii. e qui di seguito denominato NTC18.

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".

La regola tecnica emanata con il provvedimento citato e le relative istruzioni, per quanto di diretta applicabilità per lo sviluppo dei temi oggetto della presente relazione, forniscono:

- i criteri generali per la determinazione delle azioni e per la loro combinazione, ai fini dei calcoli di dimensionamento e verifica del manufatto di protezione;
- il dettaglio operativo necessario alla stima dei carichi variabili indotti dal traffico veicolare, mutuato dalle indicazioni tecniche per la progettazione dei ponti stradali;

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 4 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

- i criteri per la valutazione della sicurezza, per l'analisi strutturale e per le modalità di verifica di manufatti di acciaio per le quali non esista una regolamentazione apposita, a carattere particolare.

Altre normative applicabili al caso in esame, a vario titolo correlate o richiamate nelle citate regole tecniche, per quanto in esse non espressamente previsto o per quanto maggiormente dettagliato, sono:

UNI EN 1594, "Trasporto e distribuzione di gas - Condotte per pressione massima di esercizio maggiore di 16 bar - Requisiti funzionali";

UNI EN ISO 3183, "Industrie del petrolio e del gas naturale - Tubi di acciaio per i sistemi di trasporto per mezzo di condotte".

Ulteriori norme o standard internazionali così come la letteratura tecnica di riferimento, in base alle cui indicazioni sono eseguiti aspetti specifici del dimensionamento e della verifica, sono richiamati nel documento che illustra le procedure di verifica ed i relativi presupposti teorici, le ipotesi semplificative operate e l'intera metodologia di calcolo.

1.3 Elaborati progettuali di riferimento

Per l'illustrazione delle metodologie di calcolo nonché per le caratteristiche progettuali dell'attraversamento, comprendenti le specifiche geometriche dell'interferenza stradale, il profilo di posa della tubazione e del manufatto di protezione, nonché gli elementi di dettaglio costruttivo dell'intervento, la presente relazione fa rispettivamente riferimento ai seguenti elaborati:

Ref./1/ REL-CIV-E-10501

Ref./2/ Dis. AT-12E-01212

1.4 Simboli utilizzati

caratteristiche generali delle tubazioni

DN diametro nominale del tubo

D_i diametro interno del tubo

D_e diametro esterno del tubo

t spessore del tubo

D diametro medio del tubo

A_b area della sezione anulare del tubo

P (peso) peso del tubo nudo

caratteristiche meccaniche del tubo di protezione

f_{yk} tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio

f_{yd} tensione limite di calcolo per l'acciaio

E_t modulo di elasticità longitudinale dell'acciaio

ε^2 parametro comparativo per la classe delle sezioni in acciaio in base a D_e/t , dato da $\varepsilon^2 = 235 / f_{yk}$

J_f momento di inerzia della sezione trasversale del tubo, dato da $J_f = \pi/64 \cdot (D_e^4 - D_i^4)$

J_t momento di inerzia centrale della sezione tubolare per unità di lunghezza, dato da $J_t = t^3/12$

W'_b modulo di rigidezza flessionale elastica della parete del tubo per unità di lunghezza, dato da $W'_b = t^2/6 \cdot 1000$

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 5 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

caratterizzazione del terreno

γ_{gt} peso specifico del terreno costituente il sottofondo stradale e la sede di posa

E_s modulo di reazione elastica del terreno, considerato semispazio omogeneo e isotropo

SN rigidezza anulare della sezione trasversale, data da $SN = E_t \cdot J_t / D^3$

R_s coefficiente di rigidezza in sito (*stiffness ratio*) del tubo, funzione di SN e di E_s

k_W modulo di reazione verticale del terreno alla Winkler

risultati delle verifiche

x ascissa della sezione trasversale oggetto di verifica relativa all'asse del tubo

W_{Ed} risultante del sistema di forze indotto dall'effetto dei carichi alla profondità del tubo in opera, per unità di lunghezza, determinata mediante discretizzazione

$|T|$ valore assoluto della sollecitazione di taglio relativa alla inflessione del tubo lungo il proprio asse

$|M|$ valore assoluto del momento flettente relativo alla inflessione del tubo lungo il proprio asse

U spostamento assoluto del tubo rispetto alla quota di posa

$\sigma_{x,Ed}$ valore di calcolo della massima tensione normale dovuta al momento flettente M

τ_{Ed} valore di calcolo della tensione tangenziale dovuta al taglio T

$\sigma_{z,Ed}$ valore di calcolo della massima tensione normale interna alla parete, dovuta ai carichi che la circondano e correlabile alla deformazione della sezione

σ_{tot} valore di calcolo della tensione totale in campo elastico, per gli stati di sforzo piani

Δ deformazione anulare del tubo per ovalizzazione, corrispondente a riduzione del diametro a causa della deflessione indotta dalle pressioni lungo la circonferenza

Δ_{amm} massimo valore ammissibile della deformazione anulare, determinata in base a specifico coefficiente di sicurezza

$W_{Ed \text{ Max}}$ pressione massima agente sul tubo in opera, indotta dall'effetto dei carichi in profondità

p_a pressione limite di buckling, determinata in base a specifico coefficiente di sicurezza

δ ovalizzazione del tubo rispetto alla configurazione indeformata, data da $\delta = \Delta / D$

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 6 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

2. DATI DI BASE DELL'ATTRAVERSAMENTO

2.1 Caratteristiche generali delle tubazioni

TUBAZIONE DI LINEA

La tubazione di linea è costituita da barre di acciaio, le cui estremità risultano calibrate e smussate in modo da consentire l'unione mediante saldatura elettrica di testa ad arco sommerso.

Di seguito si riportano le caratteristiche geometriche di progetto della tubazione di linea:

diametro nominale	300	mm
spessore tubo	7.1	mm

TUBO DI PROTEZIONE

Il diametro del tubo di protezione è tale da formare, con la tubazione di linea, un'intercapedine lasciata libera (punto 2.8 del D.M. 17.04.2008), al fine di evitare che lo stato tensionale del manufatto di protezione, sotto l'effetto dei carichi esterni, possa trasmettersi per contatto alla tubazione di trasporto del gas.

All'interno del tubo di protezione, allo scopo di mantenere la condotta di linea centrata ed isolata (e di evitare possibili danneggiamenti al rivestimento), si prevede siano installati appositi collari distanziatori isolanti in PEAD, con fissaggio ad incastro, posti ad un interasse non superiore a 1,00 m.

Il tubo di protezione verrà chiuso alle estremità con fasce termorestringenti in modo da assicurare la perfetta tenuta del sistema costituito dalla tubazione di linea e dallo stesso tubo di protezione. Su ognuna delle due estremità del manufatto di protezione sarà installato un tubo di sfiato, di diametro e caratteristiche adeguate, posizionato in modo da evitare la formazione di sacche di gas.

Di seguito si riportano le caratteristiche geometriche e meccaniche del tubo di protezione di progetto.

DN mm	D _i mm	D _e mm	t mm	D mm	A _b mm ²	P (peso) daN/m	acciaio
450	434.8	457.0	11.1	445.90	15549.3	122.1	EN-L 415MB

2.2 Caratteristiche meccaniche del tubo di protezione

Di seguito si riportano le caratteristiche meccaniche di progetto del tubo di protezione, sottoposto alle verifiche.

f _{yk} N/mm ²	f _{yd} N/mm ²	E _t N/mm ²	g ²	classe sezione	J _f mm ⁴	J _t mm ⁴ /mm	W _b mm ³ /mm
415.0	394.3	210000	0.57	3	3.87E+08	113.97	20535

La tensione limite di calcolo f_{yd} è determinata in base a un fattore di sicurezza applicato sul valore caratteristico di snervamento f_{yk}, assunto al valore nominale, in funzione delle specifiche dell'acciaio costituente. In conformità alle prescrizioni delle NTC18 (§ 4.2.4.1.2), tale fattore è non inferiore a 1/1,05.

Questa condizione, unitamente ad altri presupposti di calcolo, consente di eseguire, secondo Eurocodici e le stesse NTC18, la verifica del tubo di protezione allo stato limite ultimo in campo elastico, in base al criterio di Von Mises/Huber Hencky.

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA'	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 7 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

2.3 Tubi portacavi

In affiancamento al tubo di protezione saranno posti in opera tre tubi portacavi in acciaio DN 100 (4"), di spessore pari a 4,00 mm, al cui interno verranno alloggiati eventuali linee, a sussidio delle procedure di controllo e funzionalità del gasdotto.

2.4 Protezione contro la corrosione

Al fine di garantire il completo isolamento elettrico e l'integrità dell'acciaio nel tempo, la tubazione di linea sarà dotata dei seguenti sistemi di protezione contro la corrosione:

protezione passiva, costituita da rivestimento esterno in polietilene dello spessore minimo di 2.5 mm;

protezione attiva (catodica), costituita da un sistema a corrente elettrica impressa.

Il tubo di protezione verrà anch'esso protetto contro la corrosione, per mezzo di protezione passiva con verniciatura o rivestimento, come da disegno (Ref./2/).

Sono inoltre previsti periodici controlli dello stato elettrico di entrambe le tubazioni, mediante prese di potenziale predisposte in prossimità dell'attraversamento.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 8 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

3. MODALITÀ ESECUTIVE

L'attraversamento verrà realizzato con un cantiere di limitata estensione, operante contemporaneamente a quello principale di linea.

La posa del manufatto di protezione mediante trivella spingi-tubo avverrà in base alle seguenti fasi operative:

- apertura della pista di lavoro;
- trasporto a pie d'opera delle attrezzature, delle barre di tubo di linea e di protezione necessarie;
- esecuzione degli scavi e delle protezioni necessarie all'alloggiamento della trivella (buca di spinta) ed alla sua fuoriuscita (buca di ricezione);
- messa in opera del tubo di protezione;
- preparazione, fuori opera, della colonna d'attraversamento (sigaro) costituita dalle barre di tubo di linea, saldate di testa; controllo delle saldature con metodo non distruttivo e successivo precollauda idraulico;
- infilaggio del "sigaro" all'interno del tubo di protezione e successivo collegamento ai tratti di linea a monte e a valle dell'attraversamento;
- rinterro e ripristino dell'area interessata dai lavori nel rispetto della situazione originale.

La modalità di posa in opera del tubo di protezione previste in progetto, per mezzo di trivella spingitubo, trova riscontro nelle prescrizioni di cui al testo vigente del D.P.R. 16 dicembre 1992, n. 495 ("Regolamento di esecuzione e di attuazione del nuovo codice della strada), Articolo 66, c. 1.: "Gli attraversamenti trasversali in sotterraneo sono posizionati in appositi manufatti o in cunicoli e pozzetti, sono realizzati, ove possibile, con sistema a spinta degli stessi nel corpo stradale e devono essere idonei a proteggere gli impianti in essi collocati ed assorbire le sollecitazioni derivanti dalla circolazione stradale".

Come descritto nel documento che illustra l'intera metodologia di calcolo, ai fini di dimensionamento e verifica del tubo di protezione (in conformità alle disposizioni normative ed a tutela della integrità della tubazione di linea), le condizioni di posa in opera hanno influenza sui seguenti aspetti:

- modalità di calcolo del carico verticale superiormente agente sul tubo di protezione, dovuto alla colonna di terreno sovrastante;
- modalità di calcolo degli effetti deformativi del tubo di protezione, in relazione alle condizioni di rigidità relativa con riferimento al terreno che lo circonda.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 9 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

4. GEOMETRIA DELL'ATTRAVERSAMENTO

La geometria dell'attraversamento è determinata in base alla sezione trasversale ove giace l'asse del tubo di protezione e non della sezione ortogonale all'asse dell'infrastruttura stradale.

Tale assunzione, laddove l'asse del tubo di protezione non è ortogonale all'asse stradale, oltre che permettere un'analisi accurata del comportamento tenso-deformativo del tubo, comporta molteplici condizioni a vantaggio di sicurezza, tra cui la maggiore lunghezza di calcolo della carreggiata con relativa amplificazione dei carichi veicolari.

La configurazione geometrica di progetto prevede una profondità minima di interrimento della tubazione, per tutto lo sviluppo dell'attraversamento (carreggiata e fasce di pertinenza), come fissato dal D.M. 17/04/2008 (2.4, punto d). In particolare, la profondità minima, riferita alla generatrice superiore del tubo di protezione (copertura), corrisponde a 1,50 m dal piano di rotolamento.

Il manufatto di protezione sarà caratterizzato da un'estensione longitudinale tale da coprire l'intera sede stradale attraversata e tale, inoltre, che la distanza tra le estremità e i bordi della carreggiata, siano, per entrambi i lati, non inferiori a quanto prescritto dalle normative vigenti (paragrafo 2.7 del citato Decreto Ministeriale) e/o da specifiche indicazioni dell'Ente gestore.

Per il dettaglio delle caratteristiche geometriche di progetto dell'attraversamento stradale si rimanda al citato elaborato grafico Dis. AT-12E-01212 (Ref./2/).

Come descritto nel documento Ref./1/ che illustra le procedure di verifica e l'intera metodologia di calcolo, a cui si rimanda per approfondimenti, l'analisi è effettuata per due distinte quote di calcolo del tubo di protezione (con tali presupposti il manufatto è verificato in funzione delle più conservative condizioni di carico, permanenti e variabili); con riferimento alla geometria di calcolo del piano di campagna, la profondità della generatrice superiore del tubo è considerata costante e pari:

- alla massima profondità nel tratto interno ai limiti della infrastruttura stradale,
- alla minima profondità nel tratto interno ai limiti della infrastruttura stradale.

La geometria di modello, è strutturata in modo da corrispondere a quanto disposto dalle NTC18, ai fini di combinazione delle azioni variabili da traffico veicolare. Ciò prescinde dalla effettiva suddivisione interna della carreggiata stradale (numero di corsie, presenza di spartitraffico, ecc.).

La larghezza L della carreggiata è conseguentemente divisa in corsie convenzionali e aree rimanenti. Alle corsie convenzionali vengono associate colonne di carichi mobili aventi larghezza di ingombro pari a 3,0 metri (in conformità a NTC18, § 5.1.3.3).

Ne segue che, data la lunghezza della carreggiata, si prevede un numero di corsie convenzionali $n = \text{INT} (L/3,0 \text{ m})$; gli spazi rimanenti, intermedi e laterali, che separano tra loro le corsie e le delimitano all'esterno, hanno larghezza in metri l, costante per ciascuno: $l = [L - (n \cdot 3,0 \text{ m})]/(n+1)$.

Si espongono i valori determinati per le grandezze necessarie a rappresentare la geometria di calcolo dell'attraversamento:

- lunghezza del tubo di protezione 38.00 m;
- numero corsie di calcolo sede carrabile 3;

modello di calcolo per copertura minima (massimizzazione carichi veicolari nel tratto interno ai limiti della infrastruttura stradale)

- profondità di calcolo (copertura) in corrispondenza della sede carrabile 2.23 m;
- profondità massima di calcolo (copertura) del tubo di protezione 5.35 m;

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 10 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

- profondità minima di calcolo (copertura) del tubo di protezione 1.24 m;
- profondità media di calcolo (copertura) del tubo di protezione 2.87 m;

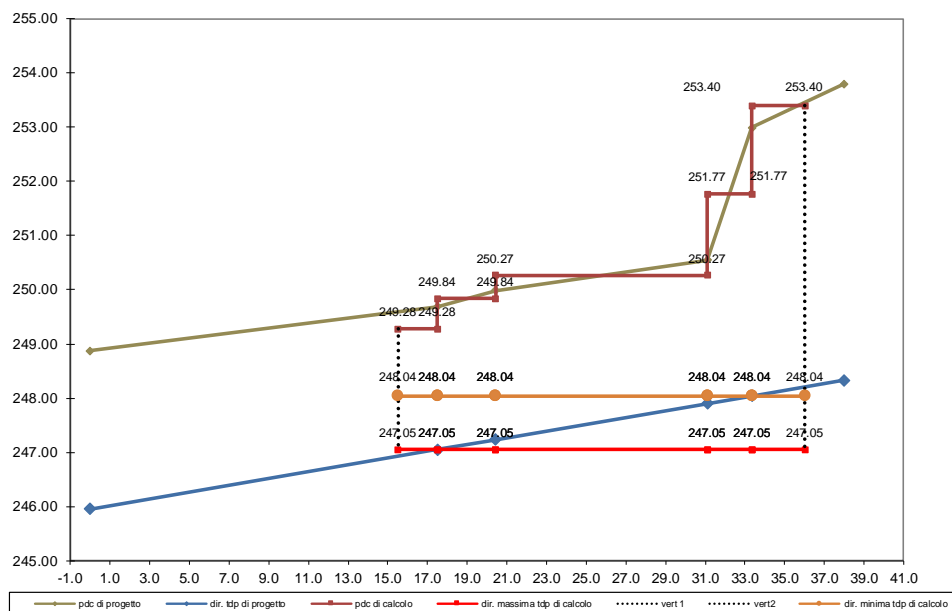
modello di calcolo per copertura massima (massimizzazione carichi geostatici nel tratto interno ai limiti della infrastruttura stradale)

- profondità di calcolo (copertura) in corrispondenza della sede carrabile 3.22 m;
- profondità massima di calcolo (copertura) del tubo di protezione 6.35 m;
- profondità minima di calcolo (copertura) del tubo di protezione 2.23 m;
- profondità media di calcolo (copertura) del tubo di protezione 3.86 m.

La profondità media di calcolo costituisce il parametro atto a determinare la sussistenza di effetti riduttivi del carico geostatico sul tubo di protezione [→ 8.1].

Ove necessario, la presenza di punti aventi copertura di progetto superiore a quella massima considerata nel tronco corrispondente alla lunghezza di calcolo, dà luogo ad una verifica locale apposita, atta a determinare le condizioni di resistenza e deformazione in detti punti, in relazione al carico (di norma solo geostatico) ivi agente.

Il grafico di seguito riportato permette l'immediata comprensione della geometria di calcolo, in riferimento alla sezione trasversale di progetto.



	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 11 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

5. CARATTERIZZAZIONE DEL TERRENO

Alla base della procedura di verifica sono poste alcune ipotesi, atte a rappresentare i possibili meccanismi deformativi e a determinare le più appropriate procedure di calcolo del sistema tensionale indotto nel tubo di protezione. L'influenza delle caratteristiche del terreno riguardano essenzialmente il carico geostatico, il meccanismo di distribuzione in profondità dei carichi esterni (permanenti e veicolari), la reazione del piano di posa, le condizioni di deformabilità del sistema terreno-tubo di protezione. Queste ultime sono influenzate da tre fattori:

- proprietà elastiche del tubo di protezione ;
- proprietà elastiche del terreno;
- modalità esecutiva (trincea, trenchless).

Nel dettaglio, la procedura di calcolo sviluppata risulta sostanzialmente svincolata dalla compiuta conoscenza delle caratteristiche del terreno, in modo da consentire la verifica indipendentemente da dati di dettaglio di natura geotecnica. Ciò è correlato alle seguenti condizioni ed ai seguenti presupposti:

- omogeneità e uniformità delle condizioni geotecniche e geomeccaniche lungo tutto lo sviluppo del tubo di protezione ;
- assenza di sollecitazioni e deformazioni residue nel tubo di protezione a seguito delle operazioni di posa in opera;
- ammissibilità delle approssimazioni di calcolo a vantaggio di sicurezza, specificatamente indicate e argomentate (si veda in proposito il documento che descrive l'impostazione ed i criteri di verifica).

Tali presupposti permettono di caratterizzare il terreno mediante tre grandezze di base:

- peso specifico terreno γ_{gt} ;
- modulo di reazione elastica E_s ;
- modulo di Poisson μ .

Sulla base di quanto dettagliatamente argomentato nel documento che illustra le procedure di verifica e l'intera metodologia adottata (Ref./1/), il calcolo è effettuato sulla base di due scenari, che assegnano al modulo di reazione elastica del terreno E_s e al modulo di Poisson μ i valori limite dell'intervallo ordinariamente corrispondente alla esecuzione dei sottofondi stradali e corrispondente a specifiche normative di settore¹. Tali valori influiscono oltre che sulla determinazione degli effetti flessionali lungo l'asse del tubo di protezione anche sull'attribuzione delle caratteristiche corrispondenti a comportamento rigido o flessibile del tubo stesso.

Assegnato un valore a E_s , esso è associato all'intero spessore di interesse (nel caso di posa in trincea, appoggio, rinfilanco, riempimento propriamente detto, terreno in sito; nel caso di posa trenchless, il modulo di reazione elastica può considerarsi, per semplicità, immutato rispetto alla condizione precedente alla trivellazione).

Per quanto attiene ai criteri con cui avviene la distribuzione dei carichi e la diffusione degli sforzi che il tubo di protezione subisce (effetti delle azioni) alla profondità di posa, il terreno, sulla base delle ipotesi semplificative presentate, è considerato come un semispazio omogeneo, isotropo, elastico lineare; ciò corrisponde a quanto indicato nella norma UNI EN 1295-1², per cui la pressione esercitata sulle

¹ Gli scenari relativi al valore di E_s discendono dalle caratteristiche del corpo stradale, che possono considerarsi corrispondenti alla classifica delle terre prevista dalla norma UNI EN 11531-1 (che sostituisce la CNR-UNI 10006), tenuto conto delle specificità di costruzione della strada (rilevato, trincea, ecc.), della tipologia di traffico attesa e della relativa classificazione secondo Codice della Strada (tracciati extraurbani, primari e secondari, strade locali, ecc.) e quindi del presumibile grado di compattamento del sottofondo (come proposto, ad esempio, in UNI 11149 o in AWWA Manual M11).

² UNI, Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI EN 1295-1, "Progetto strutturale di tubazioni interrato sottoposte a differenti condizioni di carico. Requisiti generali"; norma Europea vers. It. Milano, Italia, 1999.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 12 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

tubazioni interrato da sovraccarichi superficiali, quali, per esempio, quelli dovuti ad veicoli, deve essere calcolata conformemente al metodo basato su tale teoria. Ne segue che l'analisi delle modalità con cui le azioni direttamente agenti sulla superficie si possano trasmettere in profondità deriva dalla soluzione analitica, in termini di tensioni e deformazioni indotte, proposta da Boussinesq e dalle successive elaborazioni.

La caratterizzazione del terreno, ai fini di calcolo, comprende anche la stima del modulo di reazione del terreno alla Winkler k_w , necessario per modellare la deformazione di inflessione del tubo di protezione lungo il proprio asse.

γ_{gt} interviene nel calcolo delle tensioni indotte sul tubo di protezione a causa del terreno ad esso sovrastante, alla profondità della direttrice superiore. Anch'esso può essere determinato per rappresentare l'intervallo medio dipendente dalle condizioni di costipamento e addensamento, corrispondenti al modulo di reazione elastica, al netto dei trattamenti di formazione del cassonetto stradale e dei leganti bituminosi, atti a comporre la pavimentazione.

Si riportano i valori assunti e determinati per le grandezze necessarie a rappresentare il sistema terreno-tubo di protezione e le relative condizioni di deformabilità per il caso in progetto.

PRIMO SCENARIO

γ_{gt} daN/m ³	E_s N/mm ²	μ	SN N/mm ²	R_s	k_w N/mm ³
2000	2.80	0.15	0.27	10.37	0.0072

SECONDO SCENARIO

γ_{gt} daN/m ³	E_s N/mm ²	μ	SN N/mm ²	R_s	k_w N/mm ³
2000	20.70	0.30	0.27	76.68	0.0575

In relazione ai dati qui proposti, come illustrato nel documento che descrive i criteri e le procedure di verifica, l'approccio mediante due scenari distinti, corrispondenti a casi limite entro cui si attende che si attestino le caratteristiche meccaniche ed elastiche del terreno, si applica qualora non si disponga di dati noti e si voglia procedere mediante analisi prudenziale, atta ad analizzare un ampio spettro di possibili comportamenti del sistema terreno-tubo di protezione. Ciò consegue alla difficoltà di determinare con esattezza, le caratteristiche del sottofondo stradale e dell'ammasso sottostante, a causa di una serie di condizionamenti oggettivi che ne impediscono una compiuta valutazione.

Nel caso siano disponibili valori specifici, derivanti da indagini o attestazioni, γ_{gt} , E_s e μ sono assegnati e i due scenari risultano coincidenti.

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 13 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

6. VERIFICA SPESSORE DELLA TUBAZIONE DI LINEA

Congruentemente con quanto previsto al punto 2.1 del D.M. 17.04.2008, lo spessore minimo del tubo di linea, inteso come spessore nominale al netto delle tolleranze negative di fabbricazione, è stato calcolato utilizzando la seguente formula:

$$t_{\min} = (DP \times D_e) / (20 \times S_p);$$

dove S_p , sollecitazione circonferenziale ammissibile, espressa in MPa (ovvero N/mm²).

Deve risultare $S_p \leq f \cdot R_{t0,5}$,

con

- f grado di utilizzazione;
- $R_{t0,5}$ carico unitario di snervamento minimo garantito, associato ad una deformazione plastica irreversibile del 0,5%, espresso in MPa (ovvero N/mm²)³.

Il progetto prevede l'uso di tubo a spessore Non maggiorato.

Il grado di utilizzazione f , ai fini del calcolo dello spessore, è assegnato in funzione della specie della condotta (tenuto conto delle distanze di sicurezza, per quelle di prima specie).

Si riportano i dati relativi alla tubazione di linea e i conseguenti esiti di calcolo.

$f =$	0.3
$R_{t0,5} =$	360.00 N/mm ²
$S_p =$	108.00 N/mm ²
$DP =$	24.00 bar
$D_e =$	323.90 mm
$t_{\min} =$	3.60 mm
$t_{\min}^n =$	3.50 mm

Lo spessore della tubazione di linea previsto in progetto [→ 2.1] risulta dunque superiore sia allo spessore minimo di calcolo t_{\min} , sia al valore t_{\min}^n , indicato come minimo ammissibile nel citato punto del D.M. 17/04/2008 (a prescindere dagli esiti di calcolo) e determinato in funzione del diametro esterno della tubazione.

³ In luogo di $R_{t0,5}$ è possibile e prudente assumere la tensione caratteristica di snervamento f_{yk} , associata ad una deformazione plastica irreversibile del 0,2% e quindi inferiore.

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 14 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

7. VERIFICA DEL TUBO DI PROTEZIONE IN FASE DI POSA

Il tubo di protezione, posto in opera mediante trivella spingi-tubo, viene verificato assialmente per determinare la pressione massima di spinta N_k che durante le operazioni di infilaggio la macchina può trasmettere in condizioni di sicurezza sulla sezione d'acciaio del tubo.

Il criterio finale di verifica è dato dalla forza di compressione di calcolo N_{Ed} che deve rispettare la condizione

$$N_{Ed} / N_{c,Rd} \leq 1$$

dove la resistenza di calcolo a compressione della sezione $N_{c,Rd}$ vale:

$$N_{c,Rd} = A \cdot f_{yd},$$

con A , area di acciaio della sezione trasversale del tubo di protezione, pari al valore base A_b , per le sezioni di classe 1, 2 e 3 e, nel caso di sezioni di classe 4 (sezioni snelle, che potrebbero non sviluppare la resistenza allo snervamento), pari al corrispondente valore efficace $A_{b(eff)}$.

La forza di compressione di calcolo N_{Ed} è pari alla pressione di spinta massima trasmessa dalla trivella, in condizioni di equilibrio della resistenza (concettualmente dovuto all'arresto temporaneo dell'avanzamento oppure allo spunto d'avvio delle operazioni, sia esso relativo all'inizio della esecuzione o in fase intermedia). Tale condizioni limite permette di trascurare la coesistenza delle tensioni dovute ai carichi verticali e all'eventuale contemporaneo svilupparsi del processo deformativo di ovalizzazione della sezione (comunque sottoposto a verifica, con apposita procedura [→ 9.2]).

Poiché l'azione è l'unica che si esplica, in base alle ipotesi operate (trascurando il peso proprio del tubo di protezione ed ogni effetto d'attrito), N_{Ed} si considera carico permanente compiutamente definito, comprensivo dei fattori di amplificazione previsti dalle NTC18 per tale specifico caso; per cui si applica sul valore nominale della spinta esercitata ordinariamente dalla macchina N_k il coefficiente $\gamma_{G2} = 1,3$, assumendo come N_k il valore massimo ammissibile dalla condotta in oggetto.

Ne segue:

classe sezione	3
N_k (kN)	4500
$N_{c,Rd}$ (kN) =	6130
N_{Ed} (kN) =	5850
$N_{Ed}/N_{c,Rd}$	0.95

Risultano così positivi gli esiti di calcolo relativi alla verifica di resistenza del tubo di protezione in fase di posa, per l'attraversamento in oggetto.

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 15 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

8. CALCOLO DEI CARICHI SUL TUBO DI PROTEZIONE IN ESERCIZIO

8.1 Condizioni di carico

Carichi permanenti

I carichi propri del tubo di protezione coincidono sostanzialmente con il relativo peso in opera, per la determinazione del quale si assume il valore derivante dalle informazioni tecnologiche di produzione. Considerando anche il contributo della protezione esterna contro la corrosione e di eventuali altri dispositivi, con approssimazione ritenuta cautelativa, il peso del tubo nudo P viene incrementato del 5%. Si ammette, in via semplificativa, che il tubo di linea non dia luogo ad alcuna azione gravitativa sul tubo di protezione. L'azione è quindi data da:

- peso per unità di lunghezza del tubo di protezione, $G_{1k} = 1,05 P [F/L]$.

I carichi permanenti non strutturali che agiscono sul manufatto sono rappresentati dal peso del terreno e della sovrastruttura stradale. Secondo le caratteristiche geometriche assunte per rappresentare l'attraversamento [→ 4.], la sovrastruttura stradale agisce sulla lunghezza L_2 . Il relativo carico agente può essere rappresentato mediante le caratteristiche medie dei cassonetti di pavimentazione per strade extraurbane secondarie (Consiglio Nazionale delle Ricerche, "Catalogo delle pavimentazioni stradali", B.U. n. 178, 1995), costituiti da strato di fondazione, strato di base e manti bitumati, spessore complessivo 50 cm; l'azione elementare, di cui occorre determinare gli effetti sul tubo di protezione, è quindi data da:

- carico distribuito $G_{2k} [F/L^2]$, dato da $G_{2k} = 22,0 \text{ kN/m}^3 \times 0,50 \text{ m} \approx 11,0 \text{ kN/m}^2$.

Il carico determinato in base a condizioni ottimali di esecuzione rientra nella casistica delle azioni "compiutamente definite" (cui applicare specifici fattori di amplificazione mediante coefficienti parziali, per la determinazione degli effetti nelle verifiche agli stati limite ultimi, di cui alle NTC18, 2.6.1, comunque a tutela delle relative incertezze).

Sul tubo di protezione, per l'intera lunghezza L_T , si esplica l'azione dovuta al peso specifico γ_{gt} del terreno sovrastante, in base alla profondità di posa H (depurata da pavimentazione e cassonetto stradale, nel tratto ove sono presenti). L'azione elementare, di cui occorre determinare gli effetti sul tubo di protezione, è quindi data da:

- carico dovuto al terreno per unità di lunghezza e larghezza del tubo di protezione, $G_{3k} [F/L^2]$.

L'azione G_{3k} è determinata per tratti, lungo lo sviluppo della lunghezza di calcolo del tubo di protezione.

Effetto del peso del terreno

Per la condizione esecutiva di posa trenchless, nella valutazione degli effetti corrispondentemente dovuti al terreno soprastante al tubo in esercizio, si può fare riferimento alle ipotesi secondo le quali lo stato di stress indotto in profondità può essere determinato con un appropriato modello di calcolo, secondo cui il carico reale sopportato dal manufatto è minore di quello geostatico, in virtù dell'effetto arco, il cui esplicarsi può supporre coerente per le caratteristiche di un ammasso ben costipato, quale il sottofondo di una sede stradale, attraversato con tecniche di trivellazione, se la copertura media H sul diametro esterno D_e del tubo di protezione è superiore ad un dato valore, assunto pari a $H > 1,5 \cdot D_e$. In tali condizioni, la tensione verticale σ_v che deriva da G_{3k} , agente sul tubo di protezione di diametro esterno D_e , può quindi essere espressa con l'introduzione di un appropriato coefficiente C_d (trascurando, a vantaggio di sicurezza, il contributo della coesione del terreno):

$$\sigma_v = C_d \cdot (\gamma_{gt} \cdot D_e).$$

Nella fattispecie, con riferimento ai due modelli di calcolo basati sulla quota di posa del tubo di protezione nel tratto interno ai limiti della infrastruttura stradale [→ 4.], si determina

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 16 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

- modello di calcolo per copertura massima, $C_d/H = 0.79$;
- modello di calcolo per copertura minima, $C_d/H = 0.98$.

Carichi variabili verticali

Con modalità di distribuzione in profondità che dipendono dalle caratteristiche del terreno, il tubo di protezione è interessato da azioni connesse a carichi variabili legati alla specifica collocazione in attraversamento stradale. Al fine di identificare una significativa distribuzione delle azioni variabili da traffico sulla carreggiata stradale, come già descritto in merito alla geometria di calcolo [→ 4.], si fa riferimento a quanto previsto dalle NTC18 (§ 5.1.3.3), relativamente alle azioni su ponti stradali di prima categoria, adattando le prescrizioni ivi contenute per renderle aderenti al caso in studio.

La larghezza della carreggiata è divisa in corsie convenzionali e aree rimanenti. Le corsie di percorrenza veicolare convenzionali hanno larghezza prefissata, cosicché il numero delle colonne di carichi mobili n_l considerato è quello massimo compatibile con la larghezza della sede stradale di calcolo.

Lo schema di carico è conseguentemente costituito dalle azioni verticali corrispondenti a:

- due assi in tandem, che danno luogo ad un carico doppio Q_{ik} , ripartito su impronte di pneumatico di forma quadrata;
- carichi verticali uniformemente distribuiti q_{ik} , differenziati sulle corsie.

I nodi centrali delle impronte di carico Q_{ik} , agenti in ciascuna corsia, sono distanziati di 2,0 m trasversalmente alla carreggiata e di 1,2 m in direzione longitudinale. Si considera un solo carico di assi tandem per corsia, viaggiante secondo l'asse longitudinale della carreggiata e disposto in mediana, ripartito su una superficie determinata secondo le indicazioni di norma. Per tener conto del fenomeno di diffusione attraverso la pavimentazione, che si considera avvenire secondo un angolo di 45° , e in conformità alle "istruzioni" per l'applicazione delle NTC18 (Circolare, § 5.1.3.3.7.1), tali carichi verticali concentrati da traffico, per quanto riguarda il contatto con il terreno, sono sostituiti da carichi uniformemente distribuiti equivalenti, applicati su una superficie rettangolare, assunta cautelativamente 3,0 m x 2,0 m.

Le corsie convenzionali corrispondenti alle colonne di carico sono disposte in modo da non essere attigue l'une alle altre; gli spazi rimanenti che le separano e le delimitano all'esterno sono considerati di egual larghezza e caricati in maniera uniforme.

La disposizione dei carichi nelle corsie è determinata in modo da indurre le più sfavorevoli condizioni, secondo due distinti schemi di carico: schema di carico A e B.

Effetto dei carichi sul tubo di protezione

Il calcolo delle sovrappressioni indotte dai carichi alla profondità corrispondente alla direttrice superiore del tubo di protezione, alla quota di calcolo deriva dall'integrazione delle equazioni di Boussinesq. Sfruttando il principio di sovrapposizione degli effetti, è possibile di calcolare le sovrappressioni indotte in qualunque punto del semispazio, mediante composizione di aree rettangoli di carico (anche fittizie). Le soluzioni delle equazioni (sviluppate a partire dall'originale forma dovuta a Newmark), sono espresse mediante il fattore di influenza I_q , determinato per le varie profondità e al variare della distanza dall'area di applicazione.

Gli effetti prodotti dai carichi superficiali sul tubo sono identificati in base ad una discretizzazione della lunghezza del manufatto (in nodi e conci di calcolo).

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 17 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

8.2 Combinazioni di carico

Le azioni, considerate direttamente applicate sul tubo di protezione nei nodi o nei conci di discretizzazione, sono:

- V_{G1k} , sistema di forze permanente strutturali, relativo al peso proprio del tubo di protezione G_{1k} , dipendente dalle caratteristiche tecnologiche del manufatto;
- carico permanente non strutturale

V_{G2k} , sistema di forze relativo alla sovrappressione verticale $p_{z(G2k)}$, indotta nel terreno alla profondità di calcolo dal peso della sovrastruttura stradale G_{2k} ,

V_{G3k} , sistema di forze relativo alla pressione verticale corrispondente al peso del terreno soprastante il tubo di protezione alla profondità di calcolo, G_{3k} ;

- carico variabile

V_{qrk} , sistema di forze relativo alla sovrappressione verticale $p_{z(qrk)}$, indotta nel terreno alla profondità di calcolo dall'azione superficiale q_{rk} ,

V_{Qk} , V_{q1k} sistema di forze relativo alle sovrappressioni verticali $p_{z(Qik)}$, $p_{z(q1k)}$, indotte nel terreno alla profondità di calcolo dallo schema di carico dato dalla disposizione più sfavorevole delle azioni superficiali Q_{ik} .

Si determina la combinazione di calcolo SLU (il simbolo + vuol dire *combinato con*), con azioni amplificate dai relativi coefficienti parziali di sicurezza e introdotti i pertinenti coefficienti di combinazione

$$\gamma_{Gp} \cdot V_{G1k} + \gamma_{Gn} \cdot V_{G2k} + \gamma_{Gn} \cdot V_{G3k} + \gamma_Q \cdot \psi_{0q} \cdot V_{qrk} + \gamma_Q \cdot \psi_{0Q} \cdot V_{q1k} + \gamma_Q \cdot V_{Qk}.$$

Concordemente con NTC18 (§ 2.6.1 e § 5.1.3.12 e relative tabelle), si pongono: $\gamma_{Gp} = 1,30$; $\gamma_{Gn} = 1,35$; $\gamma_Q = 1,35$, con coefficienti di combinazione $\psi_{0q} = 0,40$; $\psi_{0Q} = 0,75$. I carichi permanenti non strutturali G_{2k} (sovrastruttura stradale) e G_{3k} (terreno) si considerano compiutamente definiti e si adottano gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

In base a semplici considerazioni in merito alla entità dei carichi e alla deformabilità flessionale del tubo di protezione lungo il suo sviluppo, tale combinazione risulta essere la più gravosa e quindi dimensionante, con il sistema di forze V_{Qrk} considerato azione variabile dominante.

Per quanto attiene allo schema di carico veicolare cui associare la sovrappressione verticale composta $f(p_{z(Qik)}, p_{z(q1k)})$, con riferimento alla geometria assunta per rappresentare le condizioni di posa del tubo di protezione in attraversamento stradale [→ 4.], occorre definire la disposizione dei carichi variabili $q(Q_{ik})$ nelle corsie. Pertanto, nell'ambito della procedura di calcolo, anche sulla base di considerazioni proprie della teoria delle travi su suolo elastico di Winkler-Zimmermann (al fine di evitare una eccessiva uniformità dei carichi superficiali), si assumono i due schemi di carico in precedenza elencati (in funzione del numero delle corsie convenzionali). Come dimostrato nel documento che illustra le procedure di verifica e l'intera metodologia di calcolo, ogni altro caso risulta così considerato.

Per una dettagliata illustrazione dei procedimenti, delle ipotesi e dei riferimenti teorici alla base del calcolo si rimanda al documento citato. Di seguito [→ 10.], si riportano alcuni diagrammi rappresentativi delle azioni e dei relativi effetti, nonché gli esiti della verifica del tubo di protezione per l'attraversamento in oggetto.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 18 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

9. STATO TENSO-DEFORMATIVO DEL TUBO DI PROTEZIONE IN OPERA

9.1 Deformazione per ovalizzazione e stato tensionale anulare

Secondo i principi generali posti a base delle normative richiamate ed, in particolare, dell'Eurocodice, occorre determinare le condizioni per cui il manufatto con appropriati gradi di affidabilità, sopporti tutte le azioni e le altre influenze suscettibili di verificarsi durante l'esecuzione e l'utilizzo. La verifica consiste nell'accertare che i carichi agenti provochino stati tensionali e deformazioni ammissibili. In base a tali indicazioni, segue che il tubo di protezione, non essendo direttamente coinvolto nel trasporto del gas e relative potenziali conseguenze in caso di crisi della condotta, può essere dimensionato e verificato in base ad appropriati livelli di affidabilità progettuale, con grado di precisione condizionato, purché cautelativo e idoneo al caso. In particolare, i fattori su cui si esercitano adeguati livelli di approssimazione cautelativa, in fase di analisi, riguardano essenzialmente le proprietà e l'influenza del terreno. Essi sono compensati mediante l'adozione di distinti scenari di verifica e di adeguati parametri di sicurezza, che intervengono sulle verifiche degli stati tensionali, sulle verifiche del comportamento deformativo del tubo di protezione, sulle verifiche delle potenziali condizioni di instabilità elastica.

La verifica della tubazione è condotta allo stato limite ultimo in campo elastico, in base alle tensioni dovute alla flessione del tubo di protezione protezione lungo il proprio asse di posa ed alle tensioni anulari, che si sviluppano nello spessore. Queste ultime sono legate alla deformazione della sezione, in ragione dei carichi che agiscono direttamente sul tubo (superiori, laterali, inferiore).

Gli effetti tensionali dovuti all'inflessione del tubo di protezione sul piano di appoggio sono così determinati:

- calcolo delle forze sul tubo alla profondità di posa, mediante discretizzazione in nodi, ove si considera applicata la risultante di tutti i carichi verticali agenti;
- caratterizzazione del terreno mediante modulo di reazione del terreno alla Winkler k_w ;
- determinazione nei nodi delle sollecitazioni di taglio T e momento flettente M, indotte dal sistema di forze in essi contemporaneamente applicato.

La deformabilità del sistema terreno-tubo costituisce il fattore condizionante per lo sviluppo dell'analisi e si concretizza in una distinzione operativa tra i possibili approcci teorici di verifica di una tubazione interrata. La procedura di calcolo si distingue, pertanto, in base alla seguente classificazione:

- comportamento rigido del tubo di protezione ;
- comportamento flessibile del tubo di protezione .

Il comportamento deformativo della sezione trasversale del manufatto, condizionato dall'interazione con il terreno e dipendente dalla deformabilità relativa dei due elementi, è determinato in base al coefficiente di elasticità (o di rigidezza) in sito R_s (*stiffness ratio*), in cui intervengono la rigidezza circonferenziale del tubo ed il modulo di reazione elastica del terreno. Se il tubo di protezione non ha comportamento flessibile in relazione al sito, ne segue che la verifica statica risulta soddisfatta quando lo stato di sollecitazione interno è compatibile con la condizione SLU di resistenza: ovvero la resistenza massima sotto carico è limitata da uno stato limite ultimo di rottura senza deformazione significativa della sezione. Se la struttura ha comportamento flessibile, in relazione al sito, è sempre necessario controllare che la deflessione diametrale sia compatibile con i vincoli di funzionalità e con la condizione SLU di deformazione; se però la deformazione è limitata in un adeguato campo occorre comunque procedere a verifica di resistenza, in base allo stato di sollecitazione. Se la struttura ha comportamento flessibile, per calcolare lo stato tensionale anulare si procede, quindi, ad analisi deformativa della sezione, risolvendo contemporaneamente le verifiche SLU di resistenza e di ovalizzazione della sezione, per verificare le potenziali condizioni di crisi, controllando che risulti limitato entro valori ammissibili l'eccesso di distorsione trasversale.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 19 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

Tale controllo del grado di deformazione è dato dal rapporto (δ) tra il diametro conseguente allo spostamento elastico massimo della fibra media e il diametro nella configurazione indeformata, ed è eseguito tenendo conto della necessaria differenziazione tra comportamento a tubo rigido e comportamento a tubo flessibile. Secondo l'impostazione di Eurocodice 3, e in accordo con il fattore di sicurezza più restrittivo indicato in API 1102⁴, la deflessione ammissibile ($\Delta = \delta \cdot D$) è imposta, ai fini di verifica,

$$\Delta \leq \Delta_{amm} = 0,03 \cdot D_e.$$

Il modulo orizzontale di reazione del terreno è influente sul fenomeno di ovalizzazione, pertanto, in ciascuno degli scenari rappresentativi delle caratteristiche del terreno (e tenuto conto del comportamento di mutua deformabilità tra tubo di protezione e terreno circostante) si introduce un fattore riduttivo ν , a rappresentare variazioni locali dell'effetto di confinamento laterale rispetto alla caratteristica elastica media (E_s) dell'ammasso. Tale fattore riduttivo massimizza la stima della deflessione e dello stato tensionale.

Noto lo sforzo di deformazione, si determinano le sollecitazioni anulari di flessione M e sforzo normale N ed il relativo stato tensionale composto.

La conoscenza dello stato tensionale indotto nella sezione trasversale dalla inflessione del tubo di protezione lungo il proprio asse e nello spessore anulare dallo sforzo di deformazione locale permette la verifica del tubo di protezione allo stato limite ultimo in campo elastico, in base al criterio di Von Mises/Huber Hencky.

Per una dettagliata illustrazione dei procedimenti, delle ipotesi e dei riferimenti teorici di analisi si rimanda al documento che illustra le procedure di verifica e l'intera metodologia di calcolo. Di seguito [→ 10.], si riportano gli esiti di calcolo relativi alla verifica del tubo di protezione per l'attraversamento in oggetto.

9.2 Instabilità elastica della sezione

Sulla base della possibilità di condurre analisi globali in parte o del tutto fondate sulla configurazione indeformata della tubo di protezione, sollecitata da forze radiali, uniformemente distribuite e dirette verso il centro, è opportuno procedere anche a determinare il carico critico di deformazione per imbozzamento ("buckling"). Tale verifica permette di eseguire un controllo in funzione di specifici coefficienti di sicurezza, diversi da quelli previsti per le verifiche tensionali. Difatti, al crescere dei carichi applicati, aumentano l'ovalizzazione del tubo ed i momenti lungo la circonferenza; nella situazione limite è ipotizzabile l'innescare di cerniere plastiche nei punti maggiormente sollecitati (sezione di parete verticale inferiore, sezione di parete verticale superiore, sezione di parete orizzontale mediana).

La verifica consiste nel confronto tra la massima pressione verticale $W_{Ed\ Max}$, agente sul tubo di protezione di calcolo, alla profondità corrispondente alla copertura massima, e la pressione ultima p_{lim} , per la quale si ritiene si possa innescare il descritto meccanismo critico deformativo. In tal caso è previsto un fattore di sicurezza ($FS = 3$) estremamente conservativo. Ne segue che deve risultare:

$$W_{Ed\ Max} \leq p_a = p_{lim}/3.$$

⁴ American Petroleum Institute, Standard: API RP 1102, "Steel Pipelines Crossing Railroads and Highways", Ed. 2012.

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITA 000
	LOCALITA'	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 20 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

10. RISULTATI DELLE VERIFICHE

10.1 Carichi agenti sul tubo di protezione in opera

10.1.1 Modello di calcolo per copertura massima

Nella seguente tabella si forniscono i risultati dell'effetto dei carichi sul tubo di protezione di calcolo, come definiti ai precedenti paragrafi 8.1 e 8.2, determinati nei nodi di discretizzazione.

Valori associati al primo schema di carico Q_{ik} (schema A).

$V_{G1k} \times \gamma_{Gp}$ daN	$V_{G2k} \times \gamma_{Gn}$ daN	$V_{G3k} \times \gamma_{Gn}$ daN	$V_{qrk} \times \gamma_{Qx} \times \gamma_{Qy}$ daN	$V_{q1k} \times \gamma_{Qx} \times \gamma_{Qy}$ daN	$V_{Q1k} \times \gamma_{Qy}$ daN	$V_{Q2k} \times \gamma_{Qy}$ daN	$V_{Q3k} \times \gamma_{Qy}$ daN	$W_{Ed} (\Sigma)$ daN	X m
41.65	7.06	548.68	0.64	0.99	8.06	0.84	0.10	608.02	0.000
83.30	16.12	1098.77	1.47	2.27	19.22	1.90	0.23	1223.27	0.500
83.30	20.83	1105.51	1.89	2.96	26.82	2.43	0.27	1244.01	1.000
83.30	27.22	1139.29	2.47	3.91	37.96	3.13	0.33	1297.62	1.500
83.30	35.95	1237.04	3.27	5.22	54.40	4.09	0.40	1423.67	2.000
83.30	47.82	1332.12	4.35	7.03	78.67	5.41	0.50	1559.19	2.500
83.30	63.76	1362.68	5.80	9.50	114.18	7.25	0.62	1647.08	3.000
83.30	84.57	1368.38	7.69	12.82	164.88	9.86	0.77	1732.26	3.500
83.30	110.52	1367.95	10.05	17.09	234.11	13.59	0.98	1837.59	4.000
83.30	140.84	1362.02	12.80	22.27	322.17	19.01	1.25	1963.65	4.500
83.30	173.47	1355.50	15.77	28.00	423.40	26.97	1.61	2108.01	5.000
83.30	205.55	1349.66	18.69	33.60	524.92	38.71	2.11	2256.53	5.500
83.30	234.41	1345.09	21.31	38.19	609.32	56.05	2.79	2390.46	6.000
83.30	258.41	1344.85	23.49	40.94	660.34	81.33	3.75	2496.41	6.500
83.30	277.16	1346.07	25.20	41.35	667.90	117.23	5.11	2563.31	7.000
83.30	291.16	1347.99	26.47	39.33	630.51	165.76	7.07	2591.59	7.500
83.30	301.25	1350.51	27.39	35.27	555.54	226.61	9.91	2589.78	8.000
83.30	308.30	1353.71	28.03	29.90	457.67	295.18	14.09	2570.17	8.500
83.30	313.01	1357.75	28.46	24.13	354.61	362.14	20.26	2543.65	9.000
83.30	315.89	1362.91	28.72	18.71	261.22	415.67	29.35	2515.77	9.500
83.30	317.25	1369.55	28.84	14.12	185.57	445.37	42.58	2486.59	10.000
83.30	317.25	1378.22	28.84	10.50	129.03	445.37	61.24	2453.75	10.500
83.30	315.89	1389.69	28.72	7.76	88.95	415.67	86.20	2416.19	11.000
83.30	313.01	1405.11	28.46	5.76	61.39	362.14	117.02	2376.18	11.500
83.30	308.30	1426.20	28.03	4.30	42.69	295.18	151.03	2339.03	12.000
83.30	301.25	1455.52	27.39	3.24	30.03	226.61	183.33	2310.67	12.500
83.30	291.16	1496.86	26.47	2.47	21.42	165.76	208.07	2295.50	13.000
83.30	277.16	1555.53	25.20	1.91	15.50	117.23	220.41	2296.23	13.500
83.30	258.41	1638.04	23.49	1.49	11.38	81.33	217.91	2315.34	14.000
83.30	234.41	1749.06	21.31	1.18	8.47	56.05	201.08	2354.84	14.500
83.30	205.55	1877.00	18.69	0.94	6.39	38.71	173.22	2403.80	15.000
83.30	173.47	1964.29	15.77	0.76	4.89	26.97	139.72	2409.16	15.500
83.30	140.84	2035.21	12.80	0.62	3.78	19.01	106.32	2401.88	16.000
83.30	110.52	2135.96	10.05	0.51	2.96	13.59	77.26	2434.14	16.500
83.30	84.57	2214.59	7.69	0.42	2.34	9.86	54.41	2457.17	17.000
83.30	63.76	2240.51	5.80	0.35	1.86	7.25	37.68	2440.52	17.500
83.30	47.82	2219.67	4.35	0.30	1.50	5.41	25.96	2388.31	18.000
83.30	35.95	2168.33	3.27	0.25	1.22	4.09	17.95	2314.36	18.500
83.30	27.22	2100.02	2.47	0.21	1.00	3.13	12.53	2229.89	19.000
83.30	20.83	2019.92	1.89	0.18	0.82	2.43	8.85	2138.22	19.500
83.30	16.12	1928.41	1.47	0.16	0.68	1.90	6.34	2038.38	20.000
41.65	7.06	939.88	0.64	0.07	0.31	0.84	2.66	993.12	20.500

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITA 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 21 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

Nella seguente tabella si forniscono i risultati dell'effetto dei carichi sul tubo di protezione di calcolo, come definiti ai precedenti paragrafi 8.1 e 8.2, determinati nei nodi di discretizzazione.

Valori associati al secondo schema di carico Q_{ik} (schema B).

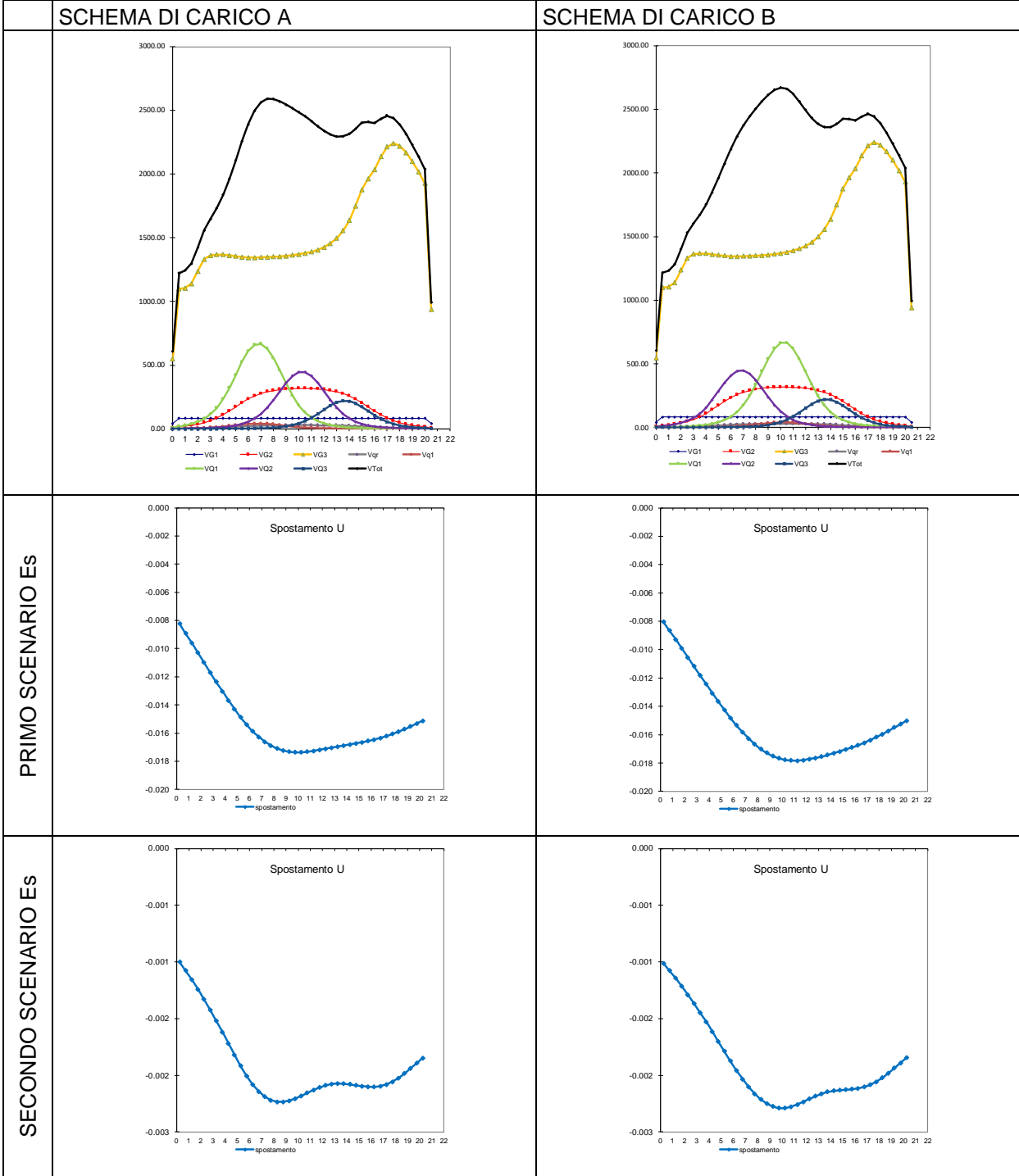
$V_{G1k} X \gamma_{Gp}$ daN	$V_{G2k} X \gamma_{Gn}$ daN	$V_{G3k} X \gamma_{Gn}$ daN	$V_{q1k} X \gamma_{Qx} \psi_{0q}$ daN	$V_{q2k} X \gamma_{Qy} \psi_{0q}$ daN	$V_{Q1k} X \gamma_Q$ daN	$V_{Q2k} X \gamma_Q$ daN	$V_{Q3k} X \gamma_Q$ daN	$W_{Ed} (\Sigma)$ daN	X m
41.65	7.06	548.68	0.64	0.22	1.25	5.40	0.10	605.01	0.000
83.30	16.12	1098.77	1.47	0.49	2.84	12.88	0.23	1216.09	0.500
83.30	20.83	1105.51	1.89	0.60	3.63	17.97	0.27	1234.00	1.000
83.30	27.22	1139.29	2.47	0.73	4.68	25.43	0.33	1283.46	1.500
83.30	35.95	1237.04	3.27	0.91	6.11	36.45	0.40	1403.42	2.000
83.30	47.82	1332.12	4.35	1.13	8.08	52.71	0.50	1530.00	2.500
83.30	63.76	1362.68	5.80	1.43	10.82	76.50	0.62	1604.91	3.000
83.30	84.57	1368.38	7.69	1.83	14.71	110.47	0.77	1671.72	3.500
83.30	110.52	1367.95	10.05	2.37	20.28	156.85	0.98	1752.30	4.000
83.30	140.84	1362.02	12.80	3.10	28.38	215.85	1.25	1847.53	4.500
83.30	173.47	1355.50	15.77	4.10	40.25	283.68	1.61	1957.67	5.000
83.30	205.55	1349.66	18.69	5.48	57.78	351.69	2.11	2074.26	5.500
83.30	234.41	1345.09	21.31	7.39	83.65	408.25	2.79	2186.18	6.000
83.30	258.41	1344.85	23.49	9.99	121.39	442.43	3.75	2287.61	6.500
83.30	277.16	1346.07	25.20	13.46	174.96	447.49	5.11	2372.75	7.000
83.30	291.16	1347.99	26.47	17.89	247.41	422.44	7.07	2443.72	7.500
83.30	301.25	1350.51	27.39	23.19	338.23	372.21	9.91	2505.99	8.000
83.30	308.30	1353.71	28.03	28.96	440.56	306.64	14.09	2563.58	8.500
83.30	313.01	1357.75	28.46	34.45	540.50	237.59	20.26	2615.32	9.000
83.30	315.89	1362.91	28.72	38.79	620.41	175.02	29.35	2654.38	9.500
83.30	317.25	1369.55	28.84	41.18	664.73	124.33	42.58	2671.77	10.000
83.30	317.25	1378.22	28.84	41.18	664.73	86.45	61.24	2661.21	10.500
83.30	315.89	1389.69	28.72	38.79	620.41	59.60	86.20	2622.59	11.000
83.30	313.01	1405.11	28.46	34.45	540.50	41.13	117.02	2562.99	11.500
83.30	308.30	1426.20	28.03	28.96	440.56	28.60	151.03	2494.98	12.000
83.30	301.25	1455.52	27.39	23.19	338.23	20.12	183.33	2432.32	12.500
83.30	291.16	1496.86	26.47	17.89	247.41	14.35	208.07	2385.49	13.000
83.30	277.16	1555.53	25.20	13.46	174.96	10.38	220.41	2360.40	13.500
83.30	258.41	1638.04	23.49	9.99	121.39	7.62	217.91	2360.14	14.000
83.30	234.41	1749.06	21.31	7.39	83.65	5.67	201.08	2385.86	14.500
83.30	205.55	1877.00	18.69	5.48	57.78	4.28	173.22	2425.30	15.000
83.30	173.47	1964.29	15.77	4.10	40.25	3.27	139.72	2424.17	15.500
83.30	140.84	2035.21	12.80	3.10	28.38	2.53	106.32	2412.47	16.000
83.30	110.52	2135.96	10.05	2.37	20.28	1.98	77.26	2441.71	16.500
83.30	84.57	2214.59	7.69	1.83	14.71	1.57	54.41	2462.67	17.000
83.30	63.76	2240.51	5.80	1.43	10.82	1.25	37.68	2444.56	17.500
83.30	47.82	2219.67	4.35	1.13	8.08	1.01	25.96	2391.32	18.000
83.30	35.95	2168.33	3.27	0.91	6.11	0.82	17.95	2316.63	18.500
83.30	27.22	2100.02	2.47	0.73	4.68	0.67	12.53	2231.62	19.000
83.30	20.83	2019.92	1.89	0.60	3.63	0.55	8.85	2139.56	19.500
83.30	16.12	1928.41	1.47	0.49	2.84	0.46	6.34	2039.43	20.000
41.65	7.06	939.88	0.64	0.22	1.25	0.21	2.66	993.58	20.500

I seguenti grafici descrivono:

- l'effetto dei carichi sul tubo di protezione di calcolo, determinati nei nodi di discretizzazione;
- l'andamento della inflessione del tubo di protezione di calcolo in virtù dei carichi e della cedevolezza elastica del piano di posa (scenario relativo alle caratteristiche del terreno), a cui sono associate le sollecitazioni di momento e taglio agenti nel piano della sezione trasversale.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 22 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505



	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITA 000
	LOCALITA'	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 23 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

10.1.2 Modello di calcolo per copertura minima

Nella seguente tabella si forniscono i risultati dell'effetto dei carichi sul tubo di protezione di calcolo, come definiti ai precedenti paragrafi 8.1 e 8.2, determinati nei nodi di discretizzazione.

Valori associati al primo schema di carico Q_{ik} (schema A).

$V_{G1k} \times \gamma_{Gp}$ daN	$V_{G2k} \times \gamma_{Gn}$ daN	$V_{G3k} \times \gamma_{Gn}$ daN	$V_{qrk} \times \gamma_{Qx} / V_{0q}$ daN	$V_{q1k} \times \gamma_{Qx} / V_{0q}$ daN	$V_{Q1k} \times \gamma_Q$ daN	$V_{Q2k} \times \gamma_Q$ daN	$V_{Q3k} \times \gamma_Q$ daN	$W_{Ed} (\Sigma)$ daN	X m
41.65	2.96	483.57	0.27	0.42	3.64	0.32	0.04	532.86	0.000
83.30	6.92	967.26	0.63	0.98	8.92	0.73	0.08	1068.82	0.500
83.30	9.36	967.64	0.85	1.34	13.17	0.95	0.10	1076.70	1.000
83.30	12.98	971.65	1.18	1.86	19.96	1.24	0.12	1092.30	1.500
83.30	18.46	1027.82	1.68	2.66	31.16	1.66	0.15	1166.89	2.000
83.30	26.93	1083.21	2.45	3.90	50.08	2.26	0.18	1252.30	2.500
83.30	40.14	1086.47	3.65	5.84	82.67	3.12	0.23	1305.42	3.000
83.30	60.54	1086.98	5.50	8.90	138.99	4.40	0.29	1388.91	3.500
83.30	90.56	1087.23	8.23	13.65	233.74	6.36	0.37	1523.45	4.000
83.30	130.70	1082.72	11.88	20.54	381.66	9.43	0.49	1720.72	4.500
83.30	177.04	1063.90	16.09	29.46	583.01	14.36	0.64	1967.82	5.000
83.30	221.99	1048.75	20.18	39.12	807.48	22.53	0.86	2244.21	5.500
83.30	258.82	1048.24	23.53	47.37	1001.17	36.38	1.17	2499.99	6.000
83.30	285.28	1049.18	25.93	52.34	1117.33	60.29	1.62	2675.27	6.500
83.30	302.80	1050.43	27.53	53.07	1134.31	101.53	2.30	2755.26	7.000
83.30	313.98	1051.98	28.54	49.44	1049.65	170.31	3.34	2750.55	7.500
83.30	321.03	1053.92	29.18	42.11	877.54	275.76	4.97	2687.81	8.000
83.30	325.45	1056.35	29.59	32.66	656.94	415.23	7.61	2607.13	8.500
83.30	328.18	1059.43	29.83	23.30	442.98	564.86	11.99	2543.87	9.000
83.30	329.76	1063.37	29.98	15.67	276.18	687.80	19.45	2505.50	9.500
83.30	330.49	1068.49	30.04	10.25	165.20	755.23	32.34	2475.34	10.000
83.30	330.49	1075.25	30.04	6.70	98.00	755.23	54.52	2433.53	10.500
83.30	329.76	1084.33	29.98	4.44	58.93	687.80	91.14	2369.68	11.000
83.30	328.18	1096.77	29.83	3.01	36.32	564.86	146.18	2288.46	11.500
83.30	325.45	1114.18	29.59	2.09	23.05	415.23	216.79	2209.68	12.000
83.30	321.03	1139.16	29.18	1.49	15.06	275.76	289.59	2154.57	12.500
83.30	313.98	1175.85	28.54	1.08	10.12	170.31	346.38	2129.57	13.000
83.30	302.80	1230.89	27.53	0.81	6.97	101.53	374.32	2128.15	13.500
83.30	285.28	1314.10	25.93	0.61	4.92	60.29	368.72	2143.15	14.000
83.30	258.82	1437.36	23.53	0.47	3.55	36.38	330.39	2173.80	14.500
83.30	221.99	1607.76	20.18	0.37	2.60	22.53	266.47	2225.20	15.000
83.30	177.04	1780.27	16.09	0.29	1.95	14.36	192.39	2265.70	15.500
83.30	130.70	1955.83	11.88	0.23	1.48	9.43	125.95	2318.80	16.000
83.30	90.56	2129.67	8.23	0.19	1.14	6.36	77.13	2396.59	16.500
83.30	60.54	2238.83	5.50	0.16	0.89	4.40	45.87	2439.48	17.000
83.30	40.14	2274.24	3.65	0.13	0.70	3.12	27.28	2432.56	17.500
83.30	26.93	2250.33	2.45	0.11	0.56	2.26	16.53	2382.45	18.000
83.30	18.46	2192.43	1.68	0.09	0.45	1.66	10.28	2308.35	18.500
83.30	12.98	2117.72	1.18	0.08	0.36	1.24	6.59	2223.45	19.000
83.30	9.36	2027.47	0.85	0.07	0.30	0.95	4.34	2126.63	19.500
83.30	6.92	1917.38	0.63	0.06	0.25	0.73	2.94	2012.20	20.000
41.65	2.96	928.50	0.27	0.03	0.11	0.32	1.20	975.03	20.500

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITA 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 24 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

Valori associati al secondo schema di carico Q_{ik} (schema B).

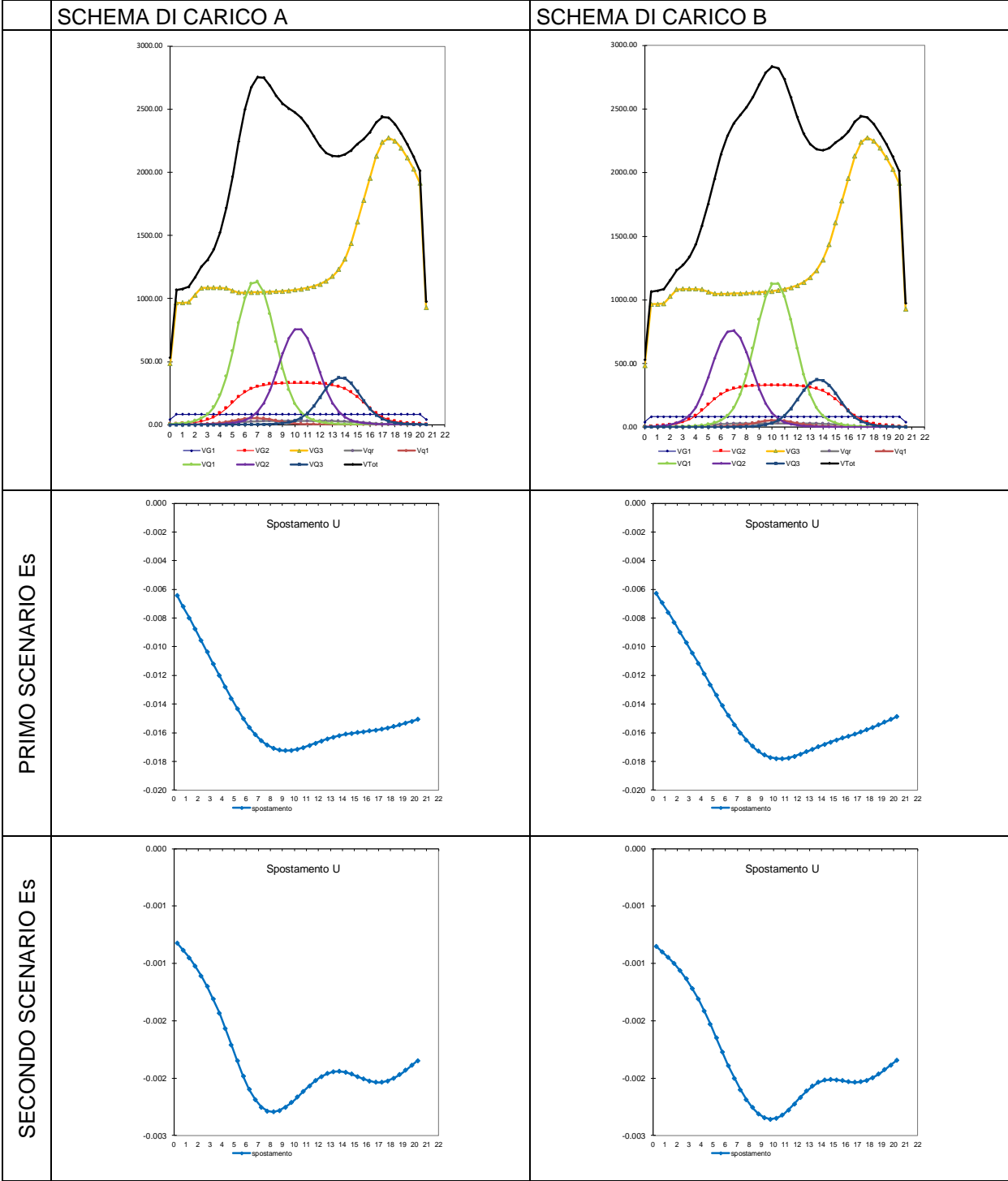
$V_{G1k} \times \gamma_{Gp}$	$V_{G2k} \times \gamma_{Gn}$	$V_{G3k} \times \gamma_{Gn}$	$V_{q1k} \times \gamma_{Qx} \times \psi_{0q}$	$V_{q1k} \times \gamma_{Qx} \times \psi_{0q}$	$V_{Q1k} \times \gamma_Q$	$V_{Q2k} \times \gamma_Q$	$V_{Q3k} \times \gamma_Q$	$W_{Ed} (\Sigma)$	X
daN	daN	daN	daN	daN	daN	daN	daN	daN	m
41.65	2.96	483.57	0.27	0.08	0.48	2.44	0.04	531.49	0.000
83.30	6.92	967.26	0.63	0.18	1.09	5.98	0.08	1065.44	0.500
83.30	9.36	967.64	0.85	0.23	1.41	8.82	0.10	1071.71	1.000
83.30	12.98	971.65	1.18	0.28	1.86	13.37	0.12	1084.74	1.500
83.30	18.46	1027.82	1.68	0.35	2.48	20.87	0.15	1155.11	2.000
83.30	26.93	1083.21	2.45	0.45	3.37	33.55	0.18	1233.44	2.500
83.30	40.14	1086.47	3.65	0.58	4.66	55.39	0.23	1274.42	3.000
83.30	60.54	1086.98	5.50	0.77	6.57	93.13	0.29	1337.08	3.500
83.30	90.56	1087.23	8.23	1.03	9.50	156.61	0.37	1436.84	4.000
83.30	130.70	1082.72	11.88	1.41	14.07	255.71	0.49	1580.29	4.500
83.30	177.04	1063.90	16.09	1.97	21.44	390.62	0.64	1755.01	5.000
83.30	221.99	1048.75	20.18	2.83	33.63	541.01	0.86	1952.55	5.500
83.30	258.82	1048.24	23.53	4.16	54.30	670.78	1.17	2144.31	6.000
83.30	285.28	1049.18	25.93	6.25	89.99	748.61	1.62	2290.16	6.500
83.30	302.80	1050.43	27.53	9.55	151.54	759.99	2.30	2387.43	7.000
83.30	313.98	1051.98	28.54	14.63	254.20	703.26	3.34	2453.23	7.500
83.30	321.03	1053.92	29.18	21.89	411.59	587.95	4.97	2513.84	8.000
83.30	325.45	1056.35	29.59	31.06	619.75	440.15	7.61	2593.25	8.500
83.30	328.18	1059.43	29.83	40.64	843.07	296.80	11.99	2693.23	9.000
83.30	329.76	1063.37	29.98	48.46	1026.57	185.04	19.45	2785.92	9.500
83.30	330.49	1068.49	30.04	52.76	1127.21	110.68	32.34	2835.32	10.000
83.30	330.49	1075.25	30.04	52.76	1127.21	65.66	54.52	2819.23	10.500
83.30	329.76	1084.33	29.98	48.46	1026.57	39.48	91.14	2733.02	11.000
83.30	328.18	1096.77	29.83	40.64	843.07	24.34	146.18	2592.31	11.500
83.30	325.45	1114.18	29.59	31.06	619.75	15.44	216.79	2435.56	12.000
83.30	321.03	1139.16	29.18	21.89	411.59	10.09	289.59	2305.83	12.500
83.30	313.98	1175.85	28.54	14.63	254.20	6.78	346.38	2223.66	13.000
83.30	302.80	1230.89	27.53	9.55	151.54	4.67	374.32	2184.61	13.500
83.30	285.28	1314.10	25.93	6.25	89.99	3.30	368.72	2176.87	14.000
83.30	258.82	1437.36	23.53	4.16	54.30	2.38	330.39	2194.24	14.500
83.30	221.99	1607.76	20.18	2.83	33.63	1.75	266.47	2237.90	15.000
83.30	177.04	1780.27	16.09	1.97	21.44	1.30	192.39	2273.82	15.500
83.30	130.70	1955.83	11.88	1.41	14.07	0.99	125.95	2324.13	16.000
83.30	90.56	2129.67	8.23	1.03	9.50	0.76	77.13	2400.19	16.500
83.30	60.54	2238.83	5.50	0.77	6.57	0.59	45.87	2441.97	17.000
83.30	40.14	2274.24	3.65	0.58	4.66	0.47	27.28	2434.32	17.500
83.30	26.93	2250.33	2.45	0.45	3.37	0.37	16.53	2383.72	18.000
83.30	18.46	2192.43	1.68	0.35	2.48	0.30	10.28	2309.29	18.500
83.30	12.98	2117.72	1.18	0.28	1.86	0.24	6.59	2224.15	19.000
83.30	9.36	2027.47	0.85	0.23	1.41	0.20	4.34	2127.16	19.500
83.30	6.92	1917.38	0.63	0.18	1.09	0.16	2.94	2012.61	20.000
41.65	2.96	928.50	0.27	0.08	0.48	0.07	1.20	975.21	20.500

I seguenti grafici descrivono:

- l'effetto dei carichi sul tubo di protezione di calcolo, determinati nei nodi di discretizzazione;
- l'andamento della inflessione del tubo di protezione di calcolo in virtù dei carichi e della cedevolezza elastica del piano di posa (scenario relativo alle caratteristiche del terreno), a cui sono associate le sollecitazioni di momento e taglio agenti nel piano della sezione trasversale.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITA 000
	LOCALITA' REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 25 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505



	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 26 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

10.2 Verifiche tensionali e di deformazione per il tubo di protezione in opera

Nella seguente tabella (in base a quanto descritto al precedente paragrafo 9.1) si forniscono i risultati delle verifiche per lo stato tensionale, relativo alle sezioni ove si presentano le massime pressioni verticali (W_{Ed}), le massime sollecitazioni nella sezione trasversale (M e T) e i massimi spostamenti per inflessione (U), determinati nei conci di discretizzazione del tubo di protezione di calcolo.

I dati di base relativi alle verifiche sono illustrati ai precedenti capitoli 2., 4. e 5.

10.2.1 Modello di calcolo per copertura massima

Primo scenario $E_s = 2.80 \text{ N/mm}^2$ – verifica stato tensionale											
comportamento rigido del tdp ($\nu = 0.00$)											
schema di carico	x m	W_{Ed} kN	$ T $ kN	$ M $ kN·m	U m	$\sigma_{x,Ed}$ N/mm ²	τ_{Ed} N/mm ²	$\sigma_{z,Ed}$ N/mm ²	σ_{tot} N/mm ²	f_{yd}/σ_{tot}	
A	4.75	20.36	6.29	12.23	-0.014	7.23	0.81	102.91	99.51	3.96	verificato
A	7.75	25.91	2.16	21.41	-0.017	12.65	0.28	130.96	125.12	3.15	verificato
A	7.25	25.77	0.26	22.03	-0.017	13.02	0.03	130.29	124.30	3.17	verificato
B	11.75	25.29	5.43	9.33	-0.018	5.52	0.70	127.84	125.18	3.15	verificato
B	10.25	26.66	3.52	16.55	-0.018	9.78	0.45	134.79	130.18	3.03	verificato
B	8.75	25.89	0.36	18.89	-0.017	11.16	0.05	130.90	125.69	3.14	verificato

Secondo scenario $E_s = 20.70 \text{ N/mm}^2$ – verifica stato tensionale											
comportamento rigido del tdp ($\nu = 0.00$)											
schema di carico	x m	W_{Ed} kN	$ T $ kN	$ M $ kN·m	U m	$\sigma_{x,Ed}$ N/mm ²	τ_{Ed} N/mm ²	$\sigma_{z,Ed}$ N/mm ²	σ_{tot} N/mm ²	f_{yd}/σ_{tot}	
A	5.25	21.82	2.56	2.08	-0.002	1.23	0.33	110.32	109.71	3.59	verificato
A	7.75	25.91	1.04	4.56	-0.002	2.69	0.13	130.96	129.64	3.04	verificato
A	7.25	25.77	0.22	4.89	-0.002	2.89	0.03	130.29	128.87	3.06	verificato
B	11.75	25.29	2.33	0.08	-0.002	0.05	0.30	127.84	127.82	3.08	verificato
B	10.25	26.66	1.23	3.01	-0.002	1.78	0.16	134.79	133.91	2.94	verificato
B	9.25	26.35	0.02	3.60	-0.002	2.13	0.00	133.19	132.14	2.98	verificato

Nella seguente tabella si forniscono i risultati delle analisi di deformazione, in base ai valori massimi calcolati relativamente alle sezioni di maggiore pressione locale, determinate in base alla discretizzazione del tubo di protezione di calcolo, e i risultati delle verifiche di instabilità locale.

Per ciascuna delle verifiche descritte al precedente paragrafo 9.2, si fornisce il riscontro e l'esito sintetico dei calcoli.

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 27 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

Verifiche deformazione anulare e instabilità

ovalizzazione massima	$\Delta =$	1.9	mm	verificato
deflessione limite	$\Delta_{amm} =$	13.7	mm	
pressione massima locale	$W_{Ed}^{q} \text{ Max}$	0.110	N/mm ²	verificato
pressione limite (buckling) Scenario 1	p_a	0.876	N/mm ²	

La sussistenza di punti del p.d.c. in corrispondenza dei quali il tubo di protezione di progetto presenta eventuale carico geostatico massimo, che non risulta considerato nel modello sottoposto alle verifiche [→ 4.], è così analizzata:

massima copertura di calcolo 6.35 m

massima profondità di progetto 5.47 m

esigenza verifica separata per carico geostatico NO

10.2.2 Modello di calcolo per copertura minima

Primo scenario $E_s = 2.80 \text{ N/mm}^2$ – verifica stato tensionale
comportamento rigido del tdp ($\nu = 0.00$)

schema di carico	x m	W_{Ed} kN	$ T $ kN	$ M $ kN·m	U m	$\sigma_{x,Ed}$ N/mm ²	τ_{Ed} N/mm ²	$\sigma_{z,Ed}$ N/mm ²	σ_{tot} N/mm ²	f_{yd}/σ_{tot}	
A	5.25	21.06	12.28	18.66	-0.014	11.02	1.58	106.46	101.44	3.89	verificato
A	7.25	27.53	0.32	32.76	-0.017	19.36	0.04	139.16	130.56	3.02	verificato
A	7.25	27.53	0.32	32.76	-0.017	19.36	0.04	139.16	130.56	3.02	verificato
B	11.75	25.14	10.74	11.70	-0.018	6.91	1.38	127.08	123.79	3.18	verificato
B	10.25	28.27	5.68	25.06	-0.018	14.81	0.73	142.92	136.13	2.90	verificato
B	9.25	27.40	0.19	27.93	-0.018	16.50	0.02	138.49	131.02	3.01	verificato

	PROGETTISTA		COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ	REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO	RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 28 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

Secondo scenario $E_s = 20.70 \text{ N/mm}^2$ – verifica stato tensionale
comportamento rigido del tdp ($\nu = 0.00$)

schema di carico	x m	W_{Ed} kN	$ T $ kN	$ M $ kN·m	U m	$\sigma_{x,Ed}$ N/mm ²	τ_{Ed} N/mm ²	$\sigma_{z,Ed}$ N/mm ²	σ_{tot} N/mm ²	f_{yd}/σ_{tot}	
A	5.25	21.06	6.06	2.42	-0.002	1.43	0.78	106.46	105.76	3.73	verificato
A	7.25	27.53	0.91	8.75	-0.002	5.17	0.12	139.16	136.65	2.89	verificato
A	7.25	27.53	0.91	8.75	-0.002	5.17	0.12	139.16	136.65	2.89	verificato
B	11.75	25.14	4.80	0.47	-0.002	0.28	0.62	127.08	126.95	3.11	verificato
B	10.25	28.27	1.73	5.95	-0.002	3.52	0.22	142.92	141.20	2.79	verificato
B	9.75	28.11	0.17	6.42	-0.002	3.80	0.02	142.08	140.22	2.81	verificato

Nella seguente tabella si forniscono i risultati delle analisi di deformazione, in base ai valori massimi calcolati relativamente alle sezioni di maggiore pressione locale, determinate in base alla discretizzazione del tubo di protezione di calcolo, e i risultati delle verifiche di instabilità locale.

Per ciascuna delle verifiche descritte al precedente paragrafo 9.2, si fornisce il riscontro e l'esito sintetico dei calcoli.

Verifiche deformazione anulare e instabilità		
ovalizzazione massima	$\Delta = 2.0 \text{ mm}$	verificato
deflessione limite	$\Delta_{amm} = 13.7 \text{ mm}$	
pressione massima locale	$W_{Ed \text{ Max}}^q = 0.117 \text{ N/mm}^2$	verificato
pressione limite (buckling) Scenario 1	$p_a = 0.876 \text{ N/mm}^2$	

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R20133	UNITÀ 000
	LOCALITÀ REGIONE SICILIA	REL-PERM-E-10505	
	PROGETTO RIFACIMENTO DERIVAZIONE PER PORTO EMPEDOCLE DN 300 (12"), DP 24 bar E OPERE CONNESSE	Pag. 29 di 29	Rev. 1

Rif. SAIPEM 023113-105-LA-E-80505

11. CONCLUSIONI

L'attraversamento in oggetto risulta progettato conformemente a quanto previsto dal DM 17/04/2008 e, in particolare, per quanto concerne le scelte progettuali dei materiali e delle modalità di posa in opera delle tubazioni, è tale da garantire la sicurezza nei confronti delle condizioni di esercizio dell'infrastruttura viaria attraversata.

Per una dettagliata illustrazione dei procedimenti, delle ipotesi e dei riferimenti teorici di analisi si rimanda al documento che illustra le procedure di verifica e l'intera metodologia di calcolo.