



IDROELETTRICO PIOTTINO

VALUTAZIONE DELLO STATO DELLE CONDOTTE



Calcolo strutturale delle condotte forzate

7108.0-R-002A

 **Lombardi**

Locarno, Maggio 2020

| | | | |
|-----------------|-------------|----------------|-------------------|
| A | 11.05.2020 | M. Capalbo | S. Calvo |
| 0 | 29.11.2019 | M. Capalbo | S. Calvo |
| Versione | Data | Redatto | Verificato |

Lombardi SA Ingegneri Consulenti
 Via R. Simen 19, C.P. 97, CH-6648 Minusio
 Telefono +41(0)91 735 31 00, Fax +41 (0)91 743 97 37
www.lombardi.group, info@lombardi.ch

INDICE

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | INTRODUZIONE | 1 |
| 1.1 | Generalità e dati caratteristici dell'impianto | 1 |
| 1.2 | Pozzo piezometrico e cabina valvole | 2 |
| 1.3 | Condotte forzate | 2 |
| 1.4 | Centrale | 3 |
| 2. | NORMATIVE E TESTI DI RIFERIMENTO | 5 |
| 3. | CARATTERISTICHE DELLE CONDOTTE ESISTENTI | 6 |
| 3.1 | Costruzione | 6 |
| 3.2 | Installazione | 10 |
| 3.3 | Selle di appoggio e ancoraggi metallici | 10 |
| 3.3.1 | Condotte 1 e 2 | 11 |
| 3.3.2 | Condotta 3 | 12 |
| 4. | METODOLOGIA DI CALCOLO | 13 |
| 4.1 | Generalità | 13 |
| 4.2 | Vita di progetto dell'opera | 14 |
| 4.3 | Condizioni di carico | 14 |
| 4.4 | Procedimento di calcolo n° 1 | 14 |
| 4.5 | Procedimento di calcolo n° 2 | 16 |
| 4.6 | Verifiche di resistenza alle tensioni ammissibili | 16 |
| 4.6.1 | Coefficienti di sicurezza per le verifiche di resistenza alle tensioni ammissibili | 17 |
| 5. | ANALISI DEI CARICHI | 19 |
| 5.1 | Peso proprio della condotta | 19 |
| 5.2 | Peso proprio dell'acqua contenuta all'interno della condotta | 19 |
| 5.3 | Pressione idrostatica e colpo d'ariete | 20 |
| 5.4 | Azione della neve | 23 |
| 5.5 | Azione del vento | 27 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.6 | Effetti dovuti all'attrito | 31 |
| 6. | COMBINAZIONE DEI CARICHI | 32 |
| 6.1 | Metodi di verifica alle tensioni ammissibili | 32 |
| 6.1.1 | Condizione di carico normale | 32 |
| 6.1.2 | Condizione di carico saltuaria | 32 |
| 6.1.3 | Condizione di carico eccezionale | 33 |
| 7. | ANALISI STRUTTURALE DELLA CONDOTTA | 34 |
| 7.1 | Definizione delle sezioni di calcolo | 34 |
| 7.1 | Tubazione in campata | 34 |
| 7.1.1 | Efficienza dei giunti saldati | 34 |
| 7.1.2 | Tensioni circonferenziali | 35 |
| 7.1.3 | Tensioni longitudinali | 36 |
| 7.2 | Selle di appoggio e ancoraggi metallici con rinforzi | 38 |
| 7.2.1 | Selle di appoggio in calcestruzzo | 38 |
| 7.2.2 | Ancoraggi metallici con rinforzi | 40 |
| 8. | MODELLI DI CALCOLO | 43 |
| 8.1 | Premessa | 43 |
| 8.2 | Modellazione della condotta | 43 |
| 8.3 | Condotta 1 – Tratta 1 | 47 |
| 8.3.1 | Definizioni geometriche | 47 |
| 8.3.2 | Sollecitazioni risultanti | 48 |
| 8.4 | Condotta 1 – Tratta 2 | 50 |
| 8.4.1 | Definizioni geometriche | 50 |
| 8.4.2 | Sollecitazioni risultanti | 51 |
| 8.5 | Condotta 1 – Tratta 3 | 53 |
| 8.5.1 | Definizioni geometriche | 53 |
| 8.5.2 | Sollecitazioni risultanti | 55 |
| 8.6 | Condotta 1 – Tratta 4 | 57 |
| 8.6.1 | Definizioni geometriche | 57 |
| 8.6.2 | Sollecitazioni risultanti | 58 |
| 8.7 | Condotta 1 – Tratta 5 | 60 |

| | | |
|--------|---|----|
| 8.7.1 | Definizioni geometriche | 60 |
| 8.7.2 | Sollecitazioni risultanti | 61 |
| 8.8 | Condotta 1 – Tratta 6 | 63 |
| 8.8.1 | Definizioni geometriche | 63 |
| 8.8.2 | Sollecitazioni risultanti | 64 |
| 8.9 | Condotta 3 – Tratta 1 | 66 |
| 8.9.1 | Definizioni geometriche | 66 |
| 8.9.2 | Sollecitazioni risultanti | 67 |
| 8.10 | Condotta 3 – Tratta 2 | 69 |
| 8.10.1 | Definizioni geometriche | 69 |
| 8.10.2 | Sollecitazioni risultanti | 70 |
| 8.11 | Condotta 3 – Tratta 3 | 72 |
| 8.11.1 | Definizioni geometriche | 72 |
| 8.11.2 | Sollecitazioni risultanti | 74 |
| 8.12 | Condotta 3 – Tratta 4 | 76 |
| 8.12.1 | Definizioni geometriche | 76 |
| 8.12.2 | Sollecitazioni risultanti | 77 |
| 8.13 | Condotta 3 – Tratta 5 | 79 |
| 8.13.1 | Definizioni geometriche | 79 |
| 8.13.2 | Sollecitazioni risultanti | 80 |
| 8.14 | Condotta 3 – Tratta 6 | 82 |
| 8.14.1 | Definizioni geometriche | 82 |
| 8.14.2 | Sollecitazioni risultanti | 83 |
| 9. | ANALISI SISMICA | 85 |
| 9.1 | Tratta 1 | 86 |
| 9.2 | Valutazione incremento idrodinamico della pressione per effetto del sisma | 88 |
| 9.3 | Considerazioni | 89 |
| 10. | VERIFICA E DETERMINAZIONE DEGLI SPESSORI DI CALCOLO – METODO ALLE TENSIONI AMMISSIBILI – CONDOTTA 1 | 90 |
| 10.1 | Sezioni di verifica | 90 |
| 10.2 | Condizione di carico normale | 95 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 10.2.1 | Spinte idrauliche generate in corrispondenza dei cambi di pendenza e/o tratti in curva | 95 |
| 10.2.2 | Analisi tensionale | 97 |
| 10.3 | Condizione di carico saltuaria | 117 |
| 11. | VERIFICA E DETERMINAZIONE DEGLI SPESSORI DI CALCOLO – METODO ALLE TENSIONI AMMISSIBILI – CONDOTTA 3 | 120 |
| 11.1 | Sezioni di verifica | 120 |
| 11.2 | Condizione di carico normale | 125 |
| 11.2.1 | Spinte idrauliche generate in corrispondenza dei cambi di pendenza e/o tratti in curva | 125 |
| 11.2.2 | Analisi tensionale | 128 |
| 11.3 | Condizione di carico saltuaria | 145 |
| 12. | VERIFICHE DI STABILITÀ ELASTICA PER DEPRESSIONE ALL'INTERNO DELLA CONDOTTA | 148 |
| 12.1 | Condotta 1 | 149 |
| 12.2 | Condotta 3 | 150 |
| 13. | VERIFICHE DEI TRONCHETTI IN CENTRALE | 151 |
| 14. | ANALISI DI SENSITIVITÀ | 154 |
| 14.1 | Generalità | 154 |
| 14.2 | Situazione attuale | 155 |
| 14.2.1 | Condotte 1 e 2 | 155 |
| 14.2.2 | Condotta 3 | 157 |
| 14.2.3 | Tronchetti in centrale | 159 |
| 14.3 | Proiezione futura | 160 |
| 14.3.1 | Condotte 1 e 2 | 160 |
| 14.3.2 | Condotta 3 | 162 |
| 14.3.3 | Tronchetti in centrale | 163 |
| 14.4 | Situazione attuale – Colpo d'ariete incrementato | 164 |
| 14.4.1 | Condotte 1 e 2 | 164 |
| 14.4.2 | Condotta 3 | 166 |
| 14.4.3 | Tronchetti in centrale | 168 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 14.5 | Proiezione futura – Colpo d'ariete incrementato | 169 |
| 14.5.1 | Condotte 1 e 2 | 169 |
| 14.5.2 | Condotta 3 | 171 |
| 14.5.3 | Tronchetti in centrale | 172 |
| 15. | CONCLUSIONI | 174 |
| 15.1 | Condotte 1 e 2 | 175 |
| 15.2 | Condotta 3 | 176 |
| 15.3 | Raccomandazioni | 177 |
| 15.3.1 | Controlli a spot sulle saldature | 177 |
| 15.3.2 | Interventi sull'appoggio FP4a | 178 |
| 15.3.3 | Determinazione delle caratteristiche dei materiali | 178 |
| 15.3.4 | Valutazione di altri casi di carico eccezionale | 178 |

1. INTRODUZIONE

1.1 Generalità e dati caratteristici dell'impianto

L'Azienda Elettrica Ticinese (AET) sfrutta le acque del fiume Ticino e di alcuni affluenti laterali nella sponda destra della val Leventina, mediante 4 impianti idroelettrici: Stalvedro, Tremorgio, Piottino e Nuova Biaschina.

Il presente documento ha per oggetto la definizione degli spessori minimi ammissibili delle condotte forzate dell'impianto di Piottino (n. 3 condotte in acciaio, diam. $1550 \div 1300$ mm).

L'impianto di Piottino fu costruito negli anni 1928-1932 e fornisce una produzione media annua di 290 GWh, che corrisponde circa ad $1/3$ della produzione attuale dell'AET in Leventina. Le acque turbinate alla centrale sono immesse nella galleria di adduzione della Nuova Biaschina tramite il bacino di compenso di Nivo.

Trattasi di un impianto ad acqua fluente che sfrutta il salto del fiume Ticino da Rodi-Fiesso a NivoLavorgo. La potenza complessiva installata è di 72 MW, con 3 gruppi da 24 MW, ma la potenza utilizzabile è leggermente inferiore, 67 MW, a causa delle limitazioni insite nel sistema di adduzione.

Il bacino imbrifero sotteso è di 275 km^2 e la portata massima derivabile è pari a $24 \text{ m}^3/\text{s}$, che corrisponde alla portata totale dei tre gruppi di produzione. Il salto lordo massimo dell'impianto è di 341 m, ed è definito dalle quote di utilizzazione dei due bacini di compenso esistenti nel fondovalle, a Rodi ed a Nivo, a lato dell'alveo del fiume Ticino. Il coefficiente energetico dell'impianto è di 0.75 kWh/m^3 .

È da segnalare che alla data di costruzione dell'impianto l'opera di presa a Rodi era costituita da una diga di sbarramento, con massimo livello d'invaso pari a 935.50 m slm; essendo il bacino di restituzione a quota 604.35 m slm, il salto lordo massimo dell'impianto era pari a circa 330.65 m.

All'inizio degli anni '70 il sistema di adduzione è stato adeguato in seguito alla costruzione dell'autostrada, fatto che ha comportato lo spostamento verso monte della presa di Rodi, con quota massima pari a 945 m slm. Questo spostamento ha causato un incremento di 9.5 m del salto lordo massimo dell'impianto, che ora è perciò pari a circa 341 m.

L'impianto è stato potenziato nel 1958 con l'aggiunta del terzo gruppo.

L'impianto è stato oggetto nel tempo di sistematici interventi di manutenzione e di automazione sulle diverse parti funzionali, per cui è ad oggi ancora in piena efficienza anche se alcune parti sono in esercizio da circa 80 anni.

Il sistema di adduzione è costituito essenzialmente da una galleria di adduzione in pressione di diametro $2.90/3.00$ m di lunghezza complessiva pari a 10.26 km, alimentata anche da diverse prese laterali (Foch, Piumogna e Gribbiasca).

1.2 Pozzo piezometrico e cabina valvole

Il pozzo piezometrico è verticale, con diametro interno di 4.5m, e sale in sotterraneo fino alla quota 938m.s.l.m. ed all'aperto fino alla quota 948m.s.l.m.; comprende una vasca di espansione inferiore e una superiore.

Il tratto sotterraneo tra la base del pozzo piezometrico e la cabina delle valvole ha una lunghezza di ca. 100m e pendenza del 10%, e comprende la diramazione in sotterraneo delle tre condotte forzate.

La cabina valvole è localizzata all'aperto, tra la parete di roccia all'imbocco in sotterraneo ed il blocco di ancoraggio superiore della condotta forzata. Essa è accessibile tramite un breve sentiero dal piazzale all'imbocco della finestra 6, e contiene le tre valvole a farfalla, diametro 1550mm, situate alla testa di ciascuna delle 3 condotte forzate.

1.3 Condotte forzate

Ciascuno dei 3 gruppi della centrale è alimentato da una condotta forzata all'aperto, di lunghezza ca. 530m, di diametro variabile da 1550mm a 1300mm. All'ingresso in centrale è situato un tronco di raccordo alle valvole sferiche, di diametro 1300/1000mm.

Le condotte sono appoggiate su selle in calcestruzzo e, parzialmente, anche su selle in acciaio con travi ad anello (condotta più recente, nel tratto a pressione inferiore).

Le condotte sono vincolate al terreno da 6 blocchi di ancoraggio, che le ripartiscono nelle varie tratte elencate nella seguente tabella.

| Tratto | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------------------------|------|--------|--------|-------|------|-------------|
| Blocchi di ancoraggio (FP) | I-II | II-III | III-IV | IV-V | V-VI | VI-Centrale |
| Lunghezza [m] | 81 | 95 | 139 | 106 | 77 | 28 |
| Pendenza [%] | 42 | 93 | 165 | 61-48 | 15 | 24 |

Tabella 1 Dati geometrici delle condotte forzate

Il piano inclinato su cui corrono le tre condotte risulta ben incassato nella roccia, lungo un costone sporgente nel settore superiore e lungo una parete assai ripida nel settore intermedio.

A valle dei blocchi di ancoraggio sono posizionati i giunti di dilatazione.

Lungo il piano inclinato, a lato delle condotte, sono posati i binari di corsa del carrello di ispezione-montacarichi.

Il rifacimento del rivestimento protettivo delle condotte forzate è stato eseguito negli anni '80. In anni più recenti (2005) sono state risanate le selle di appoggio delle condotte, soggette a degrado e danni localizzati del calcestruzzo.



Figura 1 Condotte forzate

1.4 Centrale

La centrale elettrica di Lavorgo fu costruita negli anni 1928-1932. Le facciate, con grandi archi ogivali racchiusi fra i due corpi laterali leggermente aggettanti, furono disegnate dall'architetto milanese Greppi secondo lo stile industriale lombardo dell'epoca. La muratura è in pietra a vista, parzialmente intonacata. Il tetto a falde è coperto in coppi.

In centrale sono attualmente installate n. 3 turbine Francis ad asse verticale, con potenza unitaria all'asse pari a 24 MW, con un salto lordo di 341 m ed un salto netto pari a circa 324 m, portata pari a 8 m³/s, velocità di rotazione 750 rpm; il diametro di gola della girante è pari a 960 mm. La portata di progetto (al punto di massimo rendimento, BEP) è stata stimata in circa 6 m³/s.

Ciascuna turbina è dotata di una valvola di macchina sferica DN 1000.

Le turbine hanno un basso valore del numero caratteristico di giri n_q , pari a 24 rpm; le giranti, perciò, presentano un comportamento dinamico caratterizzato dal rifiuto di portata in caso di sovra-velocità, per diminuzione o distacco del carico dalla rete. Dal momento che il primo picco di sovrappressione di colpo d'ariete è causato dalla girante (indipendentemente dalla legge di chiusura del distributore), in ogni turbina è stato inserito uno scarico sincrono, che provvede a rilasciare la portata in caso di

brusche variazioni di carico ed a limitare, perciò i colpi d'ariete che si scaricano sulle condotte. In particolare, i tempi di manovra degli scarichi sincroni sono dell'ordine dei 9-30 (Opening-Close, gruppo 1) 10-25 (O-C, gruppo 2) e di 11-20 sec (O-C, gruppo 3), consentendo di limitare la pressione massima di colpo d'ariete per distacco di carico a circa 34.3 bar a partire da un carico statico di 32.9 bar (dati da test di regolazione Andritz del 2011); il valore massimo del colpo d'ariete è valutato perciò attorno al 4% circa della pressione statica, mentre l'ampiezza complessiva dell'onda ($p_{\max}-p_{\min}$) è circa il 10% della pressione statica.

L'esercizio della centrale, perciò il modo di sollecitare le condotte, è cambiato durante gli anni: si è passati da un esercizio sostanzialmente continuo (presumibilmente con pochi colpi d'ariete, dovuti essenzialmente a fermate per guasto o manutenzione) ad un esercizio di punta negli anni passati (perciò con 1 o 2 fermate al giorno) fino all'attuale esercizio di regolazione (perciò con sovrappressioni più frequenti nel tempo ma decisamente più limitate in ampiezza).

Secondo informazioni fornite da AET, le fermate dei gruppi sono realizzate in modo da non fare intervenire indebitamente lo scarico sincrono, portando la turbina a circa il 1% di potenza prima di aprire l'interruttore di macchina; in tale condizione, gli unici colpi d'ariete sono quelli dovuti a guasti interni o esterni (perciò non frequenti).

Attualmente, l'andamento delle pressioni in condotta forzata dovute all'esercizio regolante si mantiene molto costante, dipendente sostanzialmente dalla quota del bacino di presa; i picchi dovuti alla regolazione sono molto contenuti.

2. NORMATIVE E TESTI DI RIFERIMENTO

- [1] L'impianto di Piottino delle Officine Elettriche Ticinesi SA – Memoria pubblicata dalla Direzione Lavori Motor Columbus S.A. Baden nella “rivista Tecnica della Svizzera Italiana”, 1933
- [2] Documento del C.E.C.T. (Comité Européen de la Chadonnerie et de la Tolerie)
“Recommendations for the design, manufacture and erection of steel penstocks of welded construction for hydro-electric installations”, 1984
- [3] Documento ASCE Manual of Practice n° 79 “Steel Penstocks”, 2012
- [4] ASME - Boiler Pressure Vessels Code
- [5] Eurocode 3: Design of steel structures
- [6] Eurocode 1: Actions on structures
- [7] Bellometti – Condotte forzate idroelettriche metalliche, 1955
- [8] ILVA - Condotte in acciaio per grandi acquedotti – Progettazione di tubazioni saldate
- [9] Collapse by Instability of Thin Cylindrical Shells Under External Pressure – D. F. Windenburg e C. Trilling, 1934
- [10] Hydrodynamic pressure – International Water Power & Dam Construction – M. Wieland, Ottobre, 2005
- [11] Azioni sulle strutture portanti, Norma Svizzera SN 505 261, SIA 261:2003 Genio civile
- [12] Basi per la progettazione di strutture portanti, Norma Svizzera SN 505 260, SIA 260:2003 Costruzione

3. CARATTERISTICHE DELLE CONDOTTE ESISTENTI

3.1 Costruzione

Le condotte esistenti sono state costruite in anni differenti, perciò con differenti tipologie di materiali e di procedimenti; in particolare:

- le condotte 1 e 2 sono state realizzate tra il 1929 ed il 1932, a partire da lamiere di acciaio Siemens-Martin extradolce, con tensione di rottura $3400\div4200\text{ kg/cm}^2$, allungamento al 25%, tensione ammissibile 900 kg/cm^2 , con spessore variabile tra 8 e 25 mm. La composizione dei tubi è stata eseguita mediante saldature a processo ossiacetilenico fino allo spessore di 21 mm; oltre tale spessore, i documenti storici riportano un processo di saldatura ad ossidrogeno (o a gas d'acqua), mentre la saldatura effettivamente riscontrata in campo è per bollitura (saldatura autogena per pressione); probabilmente, l'ossidrogeno venne usato per scaldare le lamiere prima di pressarle. Le saldature al montaggio risultano eseguite elettricamente. Il coefficiente di efficienza delle saldature assunto fu pari a 0.85 (dati da ref. [1]).

Dal blocco di ancoraggio FP1 al blocco di ancoraggio FP4, i tubi sono composti da un numero di virole variabile tra 3 e 4 (lunghezze tra 11m e 9.5m) mentre, dal blocco di ancoraggio FP4 all'imbocco in centrale i tubi sono realizzati singolarmente con lunghezza di 8m. È interessante notare che il limite elastico per l'acciaio impiegato era circa $2'200\div2'600\text{ kg/cm}^2$, perciò il coefficiente di sicurezza della tensione ammissibile sul limite elastico risulta pari a circa 2.4, coerentemente con le assunzioni usuali all'epoca per le tensioni circonferenziali da pressione ($2.0 \div 2.5$).

- la condotta 3 è stata costruita sul finire del 1950, a partire da lamiere di acciaio di qualità UNION 24, 28 e 32 (con una tensione di snervamento rispettivamente pari a 235, 275 e 315 N/mm^2). Non sono noti i coefficienti di efficienza delle saldature assunti. Lo spessore varia tra 9 e 16 mm. Ciascun tubo è composto da un numero di virole variabile tra 4 e 5.

Le caratteristiche costruttive delle condotte sono riportate nelle seguenti tabelle.

| | | Condotta 1 | | | | | Condotta 2 | | | | |
|--------------|---------------------|------------|-----------|-------|--------|------|------------|-----------|-------|--------|------|
| Tr. | El. | Tubo n° | φ | Sp. | L | Mat. | Tubo n° | φ | Sp. | L | Mat. |
| [-] | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [m] | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [-] |
| Invaso - FP1 | Tubazioni inghisate | 1 | 1550 | 8 | 9.400 | S235 | 101 | 1550 | 8 | 9.400 | S235 |
| | | 2 | 1550 | 8 | 8.250 | S235 | 102 | 1550 | 8 | 8.250 | S235 |
| | | 3 | 1550 | 8 | 8.250 | S235 | 103 | 1550 | 8 | 8.250 | S235 |
| | | 4 | 1550 | 8 | 10.808 | S235 | 104 | 1550 | 8 | 10.808 | S235 |
| | Camera valvole | 5 | valvola | | 0.650 | S235 | 105 | valvola | | 0.650 | S235 |
| | | 6 | | | 1.800 | S235 | 106 | 0 | | 1.800 | S235 |
| | | 7 | valvola | | 0.650 | S235 | 107 | valvola | | 0.650 | S235 |
| | FP1 | 8 | 1550 | 8 | 10.130 | S235 | 108 | 1550 | 8 | 10.029 | S235 |
| FP1 - FP2 | Giunto Dilat. | 9 | 1550 | 8 | 4.493 | S235 | 109 | 1550 | 8 | 4.493 | S235 |
| | | 10 | 1550 | 8 | 11.000 | S235 | 110 | 1550 | 8 | 11.000 | S235 |
| | | 11 | 1550 | 8 | 11.000 | S235 | 111 | 1550 | 8 | 11.000 | S235 |
| | | 12 | 1550 | 8 | 11.000 | S235 | 112 | 1550 | 8 | 11.000 | S235 |
| | | 13 | 1550 | 8 | 11.000 | S235 | 113 | 1550 | 8 | 11.000 | S235 |
| | | 14 | 1550 | 8 | 11.000 | S235 | 114 | 1550 | 8 | 11.000 | S235 |
| | | 15 | 1550 | 8 | 11.000 | S235 | 115 | 1550 | 8 | 11.000 | S235 |
| | FP2 | 16 | 1550/1450 | 9 | 10.832 | S235 | 116 | 1550/1450 | 9 | 10.832 | S235 |
| FP2 - FP3 | Giunto Dilat. | 17 | 1450 | 9 | 10.601 | S235 | 117 | 1450 | 9 | 10.601 | S235 |
| | | 18 | 1450 | 9 | 11.900 | S235 | 118 | 1450 | 9 | 11.900 | S235 |
| | | 19 | 1450 | 10 | 9.500 | S235 | 119 | 1450 | 10 | 9.500 | S235 |
| | | 20 | 1450 | 10 | 9.500 | S235 | 120 | 1450 | 10 | 9.500 | S235 |
| | | 21 | 1450 | 11 | 9.500 | S235 | 121 | 1450 | 11 | 9.500 | S235 |
| | | 22 | 1450 | 11 | 9.500 | S235 | 122 | 1450 | 11 | 9.500 | S235 |
| | | 23 | 1450 | 12 | 9.500 | S235 | 123 | 1450 | 12 | 9.500 | S235 |
| | | 24 | 1450 | 12 | 9.500 | S235 | 124 | 1450 | 12 | 9.500 | S235 |
| | FP3 | 25 | 1450 | 13 | 9.209 | S235 | 125 | 1450 | 13/14 | 10.567 | S235 |
| | | 26 | 1450/1400 | 14 | 9.208 | S235 | 126 | 1450/1400 | 14 | 8.864 | S235 |
| FP3 - FP4 | Giunto Dilat. | 27 | 1400 | 14 | 10.172 | S235 | 127 | 1400 | 14 | 10.172 | S235 |
| | | 28 | 1400 | 15 | 9.500 | S235 | 128 | 1400 | 15 | 9.500 | S235 |
| | | 29 | 1400 | 15 | 9.500 | S235 | 129 | 1400 | 15 | 9.500 | S235 |
| | | 30 | 1400 | 16 | 9.500 | S235 | 130 | 1400 | 16 | 9.500 | S235 |
| | | 31 | 1400 | 17 | 9.500 | S235 | 131 | 1400 | 17 | 9.500 | S235 |
| | | 32 | 1400 | 17 | 9.500 | S235 | 132 | 1400 | 17 | 9.500 | S235 |
| | | 33 | 1400 | 17 | 9.500 | S235 | 133 | 1400 | 17 | 9.500 | S235 |
| | | 34 | 1400 | 18 | 9.500 | S235 | 134 | 1400 | 18 | 9.500 | S235 |
| | | 35 | 1400 | 19 | 9.500 | S235 | 135 | 1400 | 19 | 9.500 | S235 |
| | | 36 | 1400 | 19/20 | 9.500 | S235 | 136 | 1400 | 19/20 | 9.500 | S235 |
| | | 37 | 1400 | 20 | 9.500 | S235 | 137 | 1400 | 20 | 9.500 | S235 |
| | | 38 | 1400 | 20/21 | 9.500 | S235 | 138 | 1400 | 20/21 | 9.500 | S235 |
| | | 39 | 1400 | 21/22 | 9.500 | S235 | 139 | 1400 | 21/22 | 9.500 | S235 |
| | FP4 | 40 | 1400/1350 | 22 | 8.749 | S235 | 140 | 1400/1350 | 22 | 8.749 | S235 |

Tabella 2 Dati costruttivi delle condotte forzate 1 e 2 – 1

| | | Condotta 1 | | | | | Condotta 2 | | | | |
|-----------|---------------|------------|-----------|------|--------|------|------------|-----------|------|--------|------|
| Tr. | El. | Tubo n° | ϕ | Sp. | L | Mat. | Tubo n° | ϕ | Sp. | L | Mat. |
| [-] | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [m] | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [-] |
| FP4 - FP5 | Giunto Dilat. | 41 | 1350 | 22 | 6.659 | S235 | 141 | 1350 | 22 | 6.659 | S235 |
| | | 42 | 1350 | 22 | 8.000 | S235 | 142 | 1350 | 22 | 8.000 | S235 |
| | | 43 | 1350 | 22 | 8.000 | S235 | 143 | 1350 | 22 | 8.000 | S235 |
| | | 44 | 1350 | 22 | 8.000 | S235 | 144 | 1350 | 22 | 8.000 | S235 |
| | | 45 | 1350 | 23 | 8.000 | S235 | 145 | 1350 | 23 | 8.000 | S235 |
| | | 46 | 1350 | 23 | 8.000 | S235 | 146 | 1350 | 23 | 8.000 | S235 |
| | | 47 | 1350 | 23 | 8.000 | S235 | 147 | 1350 | 23 | 8.000 | S235 |
| | | 48 | 1350 | 24 | 10.191 | S235 | 148 | 1350 | 24 | 10.191 | S235 |
| | | 49 | 1350 | 24 | 8.000 | S235 | 149 | 1350 | 24 | 8.000 | S235 |
| | | 50 | 1350 | 24 | 8.000 | S235 | 150 | 1350 | 24 | 8.000 | S235 |
| | | 51 | 1350 | 24 | 8.000 | S235 | 151 | 1350 | 24 | 8.000 | S235 |
| | | 52 | 1350 | 25 | 8.000 | S235 | 152 | 1350 | 25 | 8.000 | S235 |
| | FP5 | 53 | 1350/1300 | 25 | 11.000 | S235 | 153 | 1350/1300 | 25 | 11.000 | S235 |
| FP5 - FP6 | Giunto Dilat. | 54 | 1300 | 24 | 9.694 | S235 | 154 | 1300 | 24 | 9.694 | S235 |
| | | 55 | 1300 | 24 | 8.000 | S235 | 155 | 1300 | 24 | 8.000 | S235 |
| | | 56 | 1300 | 24 | 8.000 | S235 | 156 | 1300 | 24 | 8.000 | S235 |
| | | 57 | 1300 | 25 | 8.000 | S235 | 157 | 1300 | 25 | 8.000 | S235 |
| | | 58 | 1300 | 25 | 8.000 | S235 | 158 | 1300 | 25 | 8.000 | S235 |
| | | 59 | 1300 | 25 | 8.000 | S235 | 159 | 1300 | 25 | 8.000 | S235 |
| | | 60 | 1300 | 25 | 8.000 | S235 | 160 | 1300 | 25 | 8.000 | S235 |
| | | 61 | 1300 | 25 | 8.000 | S235 | 161 | 1300 | 25 | 8.000 | S235 |
| | FP6 | 62 | 1300 | 25 | 10.000 | S235 | 162 | 1300 | 25 | 10.000 | S235 |
| FP6-C | Giunto Dilat. | 63 | 1300 | 25 | 6.587 | S235 | 163 | 1300 | 25 | 9.549 | S235 |
| | | 64 | 1300 | 25 | 8.000 | S235 | 164 | 1300 | 25 | 8.000 | S235 |
| | Centrale | 65 | 1300 | 25 | 4.000 | S235 | 165 | 1300 | 25 | 5.000 | S235 |

Tabella 3 Dati costruttivi delle condotte forzate 1 e 2 – 2

| | | Condotta 3 | | | | |
|-----|---------------|------------|-----------|------|--------|----------|
| Tr. | El. | Tubo n° | ϕ | Sp. | L | Mat. |
| [-] | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [m] | [-] |
| | Valvola monte | 1 | 1800/1500 | 9 | 2.746 | Union 24 |
| | FP1 | 2 | 1500/1550 | 9 | 9.952 | Union 24 |
| | Giunto Dilat. | 3 | 1550 | 9 | 4.553 | Union 24 |
| | | 4 | 1550 | 9 | 11.000 | Union 24 |
| | | 5 | 1550 | 9 | 11.000 | Union 24 |
| | | 6 | 1550 | 9 | 11.000 | Union 24 |
| | | 7 | 1550 | 9 | 11.000 | Union 24 |
| | | 8 | 1550 | 9 | 11.000 | Union 24 |
| | | 9 | 1550 | 9 | 11.000 | Union 24 |
| | FP2 | 10 | 1550/1450 | 9 | 11.000 | Union 24 |
| | Giunto Dilat. | 11 | 1450 | 9 | 10.661 | Union 24 |
| | | 12 | 1450 | 9 | 11.900 | Union 24 |
| | | 13 | 1450 | 9 | 9.500 | Union 24 |
| | | 14 | 1450 | 9 | 9.500 | Union 24 |
| | | 15 | 1450 | 9 | 9.500 | Union 24 |
| | | 16 | 1450 | 10 | 9.500 | Union 24 |
| | | 17 | 1450 | 10 | 9.500 | Union 24 |
| | | 18 | 1450 | 10 | 9.500 | Union 24 |
| | FP3 | 19 | 1450/1400 | 10 | 21.099 | Union 28 |
| | Giunto Dilat. | 20 | 1400 | 10 | 10.232 | Union 28 |
| | | 21 | 1400 | 10 | 9.500 | Union 28 |
| | | 22 | 1400 | 11 | 9.500 | Union 28 |
| | | 23 | 1400 | 11 | 9.500 | Union 28 |
| | | 24 | 1400 | 11 | 9.500 | Union 28 |
| | | 25 | 1400 | 12 | 9.500 | Union 28 |
| | | 26 | 1400 | 12 | 9.500 | Union 28 |
| | | 27 | 1400 | 13 | 9.500 | Union 28 |
| | | 28 | 1400 | 13 | 9.500 | Union 28 |
| | | 29 | 1400 | 13 | 9.500 | Union 28 |
| | | 30 | 1400 | 14 | 9.500 | Union 28 |
| | | 31 | 1400 | 14 | 9.500 | Union 28 |
| | | 32 | 1400 | 15 | 9.500 | Union 28 |
| | FP4 | 33 | 1400/1350 | 15 | 10.500 | Union 28 |

Tabella 4 Dati costruttivi della condotta forzata 3 – 1

| | | Condotta 3 | | | | |
|-----|---------------|------------|-----------|------|--------|----------|
| Tr. | El. | Tubo n° | ϕ | Sp. | L | Mat. |
| [-] | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [m] | [-] |
| | Giunto Dilat. | 34 | 1350 | 15 | 12.219 | Union 32 |
| | | 35 | 1350 | 14 | 12.000 | Union 32 |
| | | 36 | 1350 | 14 | 12.000 | Union 32 |
| | | 37 | 1350 | 14 | 12.000 | Union 32 |
| | | 38 | 1350 | 14 | 11.241 | Union 32 |
| | | 39 | 1350 | 15 | 12.000 | Union 32 |
| | | 40 | 1350 | 15 | 12.000 | Union 32 |
| | | 41 | 1350 | 15 | 12.000 | Union 32 |
| | FP5 | 42 | 1350/1300 | 15 | 11.000 | Union 32 |
| | Giunto Dilat. | 43 | 1300 | 15 | 6.064 | Union 32 |
| | | 44 | 1300 | 15 | 12.000 | Union 32 |
| | | 45 | 1300 | 15 | 12.000 | Union 32 |
| | | 46 | 1300 | 15 | 12.000 | Union 32 |
| | | 47 | 1300 | 15 | 12.000 | Union 32 |
| | | 48 | 1300 | 15 | 12.000 | Union 32 |
| | FP6 | 49 | 1300 | 16 | 9.500 | Union 32 |
| | Giunto Dilat. | 50 | 1300 | 16 | 11.129 | Union 32 |
| | | 51 | 1300 | 16 | 12.000 | Union 32 |
| | Centrale | 52 | 1300/1000 | 16 | 8.464 | Union 32 |

Tabella 5 Dati costruttivi della condotta forzata 3 – 2

3.2 Installazione

L'andamento altimetrico delle condotte esistenti è rappresentato nei disegni Sulzer 437901, 437902 (condotte 1 e 2) e 3203881, 3203882 (condotta 3).

Le condotte sono vincolate al terreno mediante 6 blocchi di ancoraggio (FP1÷6), a partire dall'uscita della camera valvole; a valle di ciascuno dei blocchi di ancoraggio è presente un giunto di dilatazione, per consentire le variazioni di lunghezza della tubazione causate dai gradienti termici.

Ai fini del calcolo, i blocchi di ancoraggio sono modellati come veri e propri incastri, tali da impedire le traslazioni e le rotazioni della condotta.

In corrispondenza dei punti fissi si hanno anche i cambi di diametro.

3.3 Selle di appoggio e ancoraggi metallici

Gli appoggi intermedi sono posizionati a distanza variabile, compresa tra 8 e 11 m; la tipologia di appoggio è variabile, come descritto di seguito.

Ai fini del calcolo, gli appoggi intermedi della condotta sono modellati come semplici appoggi, in grado di consentire alla condotta di traslare in senso longitudinale.

Gli ancoraggi metallici presenti nelle condotte in esame presentano anelli di irrigidimento aventi le seguenti dimensioni caratteristiche:

- $t = 30$ mm Spessore degli anelli;
- $h = 120$ mm Altezza degli anelli;
- $p = 330$ mm Passo tra gli anelli (distanza netta 300mm).

3.3.1 Condotte 1 e 2

Originariamente, le condotte 1 e 2 appoggiavano direttamente sulle selle in calcestruzzo. Successivamente, nella tratta compresa tra gli ancoraggi FP1 e FP2, le tubazioni vennero dotate di un dispositivo di appoggio tramite trave ad anello, dotata di piedini scorrevoli su un tratto di binario vincolato alla sella, secondo quanto rappresentato in Figura 2 (tratta dal disegno Motor-Columbus n. 36400). È presente anche un dispositivo di ingrassaggio per mantenere lubrificata la superficie di strisciamento.

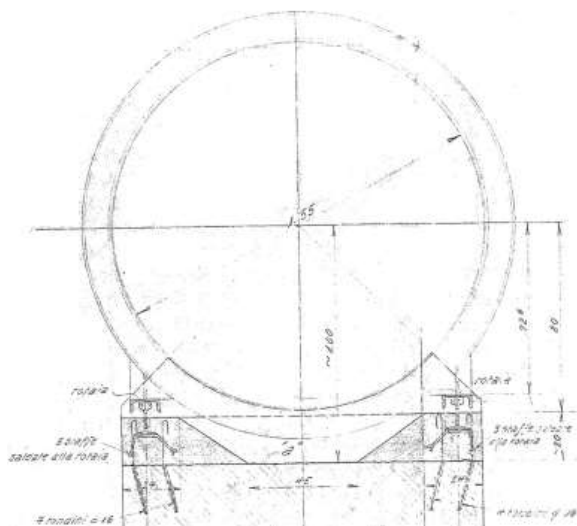


Figura 2 Schema ancoraggio metallico nel tratto compreso gli ancoraggi FP1 e FP2 – Condotte 1 e 2

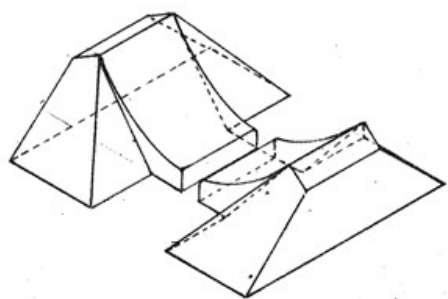


Figura 3 Schema delle selle di appoggio in calcestruzzo – Condotte 1 e 2

3.3.2 Condotta 3

Nei tratti compresi tra il FP1 ed il FP3, la condotta è sostenuta tramite ancoraggi metallici dotati di un rinforzo realizzato mediante due anelli, in lamiera di acciaio, ciascuno in due metà, collegati alla tubazione e uniti tra di loro mediante bulloni o saldatura; le travi ad anello così realizzate sono dotate di un alloggiamento per l'appoggio del supporto oscillante, incernierato alla base e dotato di testa curva, secondo quanto riportato in Figura 4 (tratta dal disegno Sulzer n. 3205043).

Al di sotto del blocco di ancoraggio FP3, la condotta appoggia su selle, analogamente a quanto avviene anche nelle condotte 1 e 2. In questo caso, però, è stato previsto uno spessore di rinforzo saldato alla condotta, per limitare le tensioni che si sviluppano in corrispondenza della sella; tale spessore risulta di 5 mm. Sulla sella è presente una lamiera di acciaio per l'appoggio della condotta, in maniera da realizzare uno strisciamento del tipo acciaio su acciaio. Per ridurre gli attriti dovuti a tale tipo di appoggio, sono stati previsti dei dispositivi di ingrassaggio, che consentono l'immissione del lubrificante nella zona di interfaccia tra la piastra mobile e quella fissa. Tutti gli appoggi su selle e i giunti di espansione sono mantenuti regolarmente lubrificati tramite ingrassaggio con cadenza semestrale.

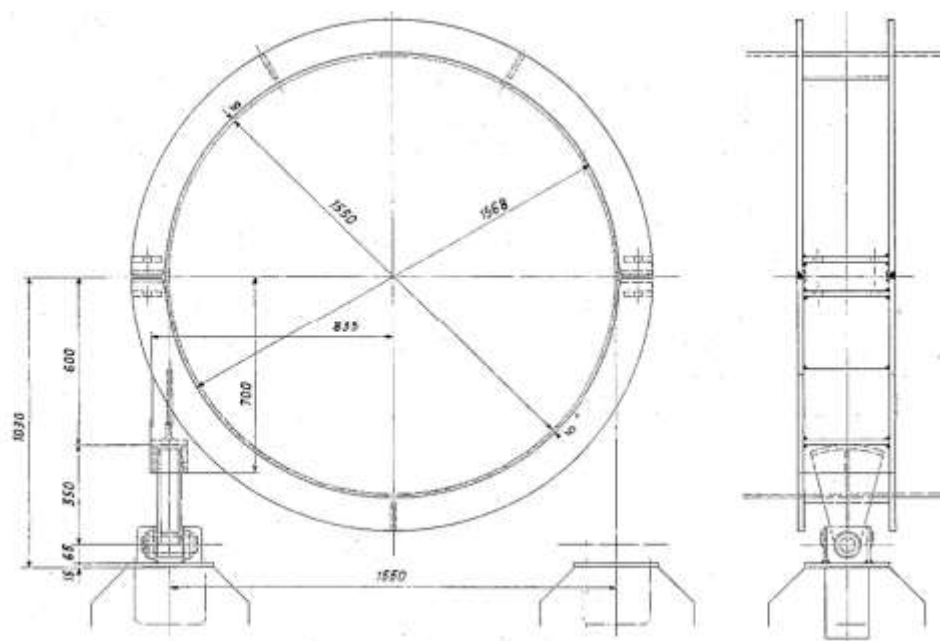


Figura 4 Schema ancoraggi metallici nei tratti compresi tra FP1 e FP3 – Condotta 3

Lo schema delle selle di appoggio in calcestruzzo è paragonabile a quello indicato in Figura 3.

4. METODOLOGIA DI CALCOLO

4.1 Generalità

Il calcolo strutturale della condotta viene eseguito al fine di determinare gli spessori minimi ammissibili della condotta con riferimento ai procedimenti di calcolo indicati nei documenti [2] e [3], inoltre, verrà eseguita un'analisi di sensitività tra i risultati ottenuti con i metodi citati.

Le condotte forzate verranno verificate, per ogni metodo di calcolo, nelle seguenti condizioni di sollecitazione:

Procedimento di calcolo n° 1

ASCE Manual n°79

- Condizione normale (tabella 3-1)

| | |
|-----------|---|
| Normal | 1 |
| Emergency | 2 |
- Condizione saltuaria (tabella 3-1)

| | |
|--------------|---|
| Intermittent | 6 |
| Intermittent | 8 |
- Condizione eccezionale (tabella 3-1)

| | |
|--------------|---|
| Intermittent | 1 |
| Exceptional | 2 |
| Intermittent | 4 |
| Exceptional | 1 |

Procedimento di calcolo n° 2

Documento del C.E.C.T.

- Carichi permanenti (permanent loads)

| | |
|--|--------|
| Tubi (Cylindrical pipes) | Caso 1 |
| Collettori e biforcati (Distributors or special pipes) | Caso 2 |
- Carichi saltuari (intermittent loads) par. 6.3

| | |
|---|--------|
| Riempimento e svuotamento (Filling of Emptying) | Caso 3 |
|---|--------|
- Carichi eccezionali (exceptional loads)

| | |
|---|---------|
| Colpo d'ariete (waterhammer effect) | Caso 8 |
| Depressione interna (Penstock subjected to absolute vacuum) | Caso 9 |
| Azione sismica | Caso 10 |

4.2 Vita di progetto dell'opera

La vita di progetto (design working life, D_{WL}) dell'opera in esame viene stabilita in accordo alle prescrizioni indicate al paragrafo 2.3 della Norma Svizzera SN 505 260:

- | | | | |
|--------------------------------------|----------|-----|------|
| ▪ Costruzioni di importanza maggiore | D_{WL} | 100 | anni |
|--------------------------------------|----------|-----|------|

4.3 Condizioni di carico

Le condizioni di carico di calcolo della condotta sono indicate nei documenti di riferimento per ciascun procedimento di calcolo. Al fine di rendere i due metodi di calcolo tra loro confrontabili, rendendo efficace l'analisi della sensitività tra essi, si valutano in accordo alla Norma Svizzera SN 505 261 l'entità delle seguenti azioni:

- | | |
|---|-------|
| ▪ Azione della neve SN 505 261 (par. 5) | Q_s |
| ▪ Azione del vento SN 505 261 (par. 6) | Q_w |
| ▪ Azione sismica SN 505 261 (par. 16) | E |

4.4 Procedimento di calcolo n° 1

Il manuale ASCE n°79, indica nel paragrafo 3.2 le azioni di calcolo e nel paragrafo 3.3 le combinazioni di carico da considerare in fase di progettazione strutturale delle condotte.

4.4.1.1 Azioni di progetto

Nell'analisi della condotta in esame verranno considerate le seguenti azioni di progetto:

- Azione del vento (Live Load LL1), definita secondo in accordo al par. 5 delle SN 505 261;
- Azione della neve (Live Load LL2), definita secondo in accordo al par. 6 delle SN 505 261;
- Azione sismica (Live Load EQ1), definita secondo in accordo al par. 16 delle SN 505 261;
- Peso della struttura e carichi permanenti (Dead Load DL1);
- Peso dell'acqua contenuta all'interno della condotta (Dead Load DL2);
- Pressione interna massima (Internal pressure load PN2), pari alla somma tra la massima pressione idrostatica (depurata dalle perdite di carico) e l'incremento di pressione determinato dagli effetti di colpo d'ariete (conseguenti all'interruzione del funzionamento dell'impianto dovuto ad esempio per la chiusura delle valvole in ingresso centrale);
- Azioni longitudinali derivanti dall'attrito in corrispondenza degli appoggi intermedi della condotta (Sliding or Friction at Supports SFL):

$$F_1 = f_1 P_{\text{tot,sella}}$$

dove:

f_1 coefficiente di attrito tra l'elemento dell'appoggio solidale alla condotta e il contropezzo solidale al terreno;

$P_{\text{tot,sella}}$ peso totale gravante sulla sella per effetto della massa del tubo, dell'acqua e del carico della neve.

- Azioni longitudinali derivanti dall'attrito in corrispondenza dei giunti di dilatazione (Friction at the Sliding Expansion Joints EJL):

$$F_2 = f_2 A_t p_g$$

dove:

A_t area della corona circolare ricavata nello spazio anulare del giunto;

p_g pressione statica agente sul giunto eventualmente corretta per tenere conto degli sforzi dovuti al premistoppa;

f_2 coefficiente di attrito sul giunto.

- Azioni longitudinali dovute alla spinta idrostatica dell'acqua in pressione sui due lati dello spazio anulare dei giunti di dilatazione.

4.4.1.2 Combinazione delle azioni

L'analisi strutturale della condotta deve essere effettuata considerando le condizioni di carico indicate nel paragrafo 3.3 del manuale ASCE n°79:

- Condizione di carico normale, le azioni considerate in questa condizione di carico sono quelle agenti durante il normale esercizio della condotta e precisamente:
 - peso della struttura e carichi permanenti;
 - peso dell'acqua contenuta all'interno della condotta;
 - pressione interna massima;
 - azioni longitudinali dovuti all'attrito;
 - azioni longitudinali dovute alla pressione agente nello spazio anulare dei giunti di dilatazione;
 - azione del vento;
 - azione della neve.

- Condizione di carico saltuaria (intermittent condition), le azioni comprese in questa condizione di carico sono quelle relative al riempimento e allo svuotamento della condotta e precisamente sono:
 - peso della struttura e carichi permanenti;
 - peso dell'acqua contenuta all'interno della condotta;
 - azioni longitudinali dovuti all'attrito;
 - azione del vento;
 - azione della neve.
- Condizione di carico eccezionale (exceptional condition), le azioni comprese in questa condizione di carico sono quelle agenti solo eccezionalmente:
 - azione sismica
 - peso della struttura e carichi permanenti;
 - peso dell'acqua contenuta all'interno della condotta;
 - azioni longitudinali dovuti all'attrito;
 - azione della neve.

4.5 Procedimento di calcolo n° 2

Il documento del C.E.C.T. "Recommendations for the design, manufacture and erection of steel penstocks of welded construction for hydro-electric installations", riporta nell'appendice II al paragrafo 2 le azioni di calcolo e le combinazioni di tali azioni da considerare per la progettazione strutturale.

Si osserva che le azioni e le combinazioni di carico indicate dalla normativa C.E.C.T. sono analoghe a quelle indicate dal manuale ASCE n°79.

4.6 Verifiche di resistenza alle tensioni ammissibili

In accordo al paragrafo 3.4.13 del manuale ASCE n°79 e, analogamente, al paragrafo 4 dell'appendice II della norma C.E.C.T., lo stato di sollecitazione, in ogni punto della condotta e per ciascuna condizioni di carico, deve essere definito mediante la determinazione della tensione equivalente coerentemente al criterio di resistenza di Hencky-Von Mises. In particolare, per la verifica della resistenza si calcola una tensione monoassiale equivalente da confrontare, attraverso un coefficiente di sicurezza, con il carico unitario di snervamento R_{eH} (o di scostamento dalla proporzionalità $R_{p0.2}$) del materiale. La tensione equivalente σ_E deve essere calcolata con la formula di Hencky Von Mises, che definisce il lavoro di cambiamento di forma a volume costante nel punto più sollecitato del materiale e, nel caso di stato di sforzo triassiale, considerando le tre tensioni principali σ_1 , σ_2 , e σ_3 , si ottiene:

$$\sigma_E = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_1 \sigma_3 + \sigma_2 \sigma_3)^{1/2}$$

Nei tubi dritti o con piccola curvatura si può ammettere che le tre sollecitazioni principali agiscano rispettivamente nelle direzioni circonferenziale, longitudinale e radiale.

Nel caso in cui lo spessore del tubo sia sufficientemente piccolo rispetto alle dimensioni (cioè il rapporto tra raggio interno e raggio esterno sia maggiore di 0,95), l'errore commesso considerando la tensione circonferenziale costante e pari alla tensione media, risulta inferiore al 2-3%. Pertanto, in tale situazione la sollecitazione radiale può essere trascurata e si possono quindi tenere in considerazione le sole tensioni circonferenziale (σ_C) e longitudinale (σ_L). In tal caso, la tensione equivalente σ_E si ricava quindi con la formula semplificata:

$$\sigma_E = (\sigma_C^2 + \sigma_L^2 - \sigma_C \sigma_L)^{1/2}$$

4.6.1 Coefficienti di sicurezza per le verifiche di resistenza alle tensioni ammissibili

La tensione equivalente σ_E deve risultare non superiore al minore dei seguenti valori:

$K \cdot S$, con $S = \min \{R_e / 1.5 ; R_m / 2.4\}$ (par. 3.5.3 ASCE Manual No. 79)

$\{R_e / C\}$ (appendix II D C.E.C.T.)

Il coefficiente di sicurezza per le verifiche di resistenza viene stabilito in funzione della condizione di carico (normale, saltuaria o eccezionale), dalle caratteristiche del materiale, dalla rigosità del metodo di calcolo assunto per la determinazione dello stato di sollecitazione e dal tipo di sollecitazione.

Nei punti in cui si abbiano sollecitazioni dovute a perturbazioni locali, il coefficiente di sicurezza, nella condizione di carico più sfavorevole, può assumere il valore limite inferiore pari a 1, al fine di consentire snervamenti localizzati che comportino la redistribuzione delle sollecitazioni.

4.6.1.1 Coefficienti di sicurezza relativi alla condizione di carico normale

In accordo alla tabella 3-5 del manuale di progettazione ASCE Manual No. 79, i fattori di incremento delle tensioni ammissibili (K) assumono i seguenti valori:

- "General Primary Membrane": $K = 1.0$

- "Local Primary Membrane": $K = 1.5$

In accordo alla tabella 1 dell'appendice II D del manuale di progettazione CECT Manual No. 79, i coefficienti di sicurezza (C) assumono i seguenti valori:

- "Penstock exposed or free in tunnel": $C = 1.7$

4.6.1.2 Coefficienti di sicurezza relativi alla condizione di carico saltuaria

In accordo alla tabella 3-5 del manuale di progettazione ASCE Manual No. 79, i fattori di incremento delle tensioni ammissibili (K) assumono i seguenti valori:

- “General Primary Membrane”: $K = 1.33$
- “Local Primary Membrane”: $K = 2.0$

In accordo alla tabella 1 dell'appendice II D del manuale di progettazione CECT Manual No. 79, il coefficiente di sicurezza (C) assume il seguente valore:

- “Penstock exposed or free in tunnel”: $C = 1.5$

4.6.1.3 Coefficienti di sicurezza relativi alla condizione di carico eccezionale

In accordo alla tabella 3-5 del manuale di progettazione ASCE Manual No. 79, i fattori di incremento delle tensioni ammissibili (K) assumono i seguenti valori:

- “General Primary Membrane”: $K = 2.5$
- “Local Primary Membrane”: $K = 2.5$

In accordo alla tabella 1 dell'appendice II D del manuale di progettazione CECT, il coefficiente di sicurezza (C), per la condizione sismica, assume il seguente valore:

- “Penstock exposed or free in tunnel”: $C = 1.2$

4.6.1.4 Verifiche di stabilità elastica (depressione interna)

In accordo al paragrafo 3.5.5 del manuale di progettazione ASCE Manual No. 79, il fattore di sicurezza assume il seguente valore:

- “Buckling factor of safety for a dewatered and empty tunnel line”: $k = P_{cr} / P_{atm} \geq 1.5$

In accordo alla tabella 1 dell'appendice II D del manuale di progettazione CECT Manual No. 79, il coefficiente di sicurezza (C) assume il seguente valore:

- “Penstock exposed or free in tunnel”: $k = P_{cr} / P_{atm} \geq 1.6$

5. ANALISI DEI CARICHI

5.1 Peso proprio della condotta

Le sollecitazioni dovute al peso proprio della condotta saranno calcolate automaticamente dal programma di calcolo nelle varie tratte analizzate sulla base della geometria in esame (diametro e spessore del tubo, angolo di inclinazione della condotta) e adottando un peso specifico dell'acciaio pari a $\gamma_s = 78.5 \text{ kN/m}^3$.

In virtù della pendenza longitudinale della condotta, il peso luogo darà luogo, oltre a momenti flettenti a sollecitazioni assiali di trazione e compressione.

5.2 Peso proprio dell'acqua contenuta all'interno della condotta

Il peso dell'acqua viene invece applicato come un carico distribuito uniforme agente in direzione ortogonale all'asse della condotta. In particolare, considerando il peso specifico dell'acqua pari a $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$, risulta:

| | | | | |
|--|-----------------|---|-------|---------------|
| ▪ Area sezione interna tubazione ($\phi = 1550\text{mm}$) | $A_{\phi 1550}$ | = | 1.89 | m^2 |
| ▪ Peso dell'acqua (carico uniformemente distribuito in direzione gravitazionale) | q | = | 18.51 | kN/m |
| ▪ Area sezione interna tubazione ($\phi = 1450\text{mm}$) | $A_{\phi 1450}$ | = | 1.65 | m^2 |
| ▪ Peso dell'acqua (carico uniformemente distribuito in direzione gravitazionale) | q | = | 16.20 | kN/m |
| ▪ Area sezione interna tubazione ($\phi = 1400\text{mm}$) | $A_{\phi 1400}$ | = | 1.54 | m^2 |
| ▪ Peso dell'acqua (carico uniformemente distribuito in direzione gravitazionale) | q | = | 15.10 | kN/m |
| ▪ Area sezione interna tubazione ($\phi = 1350\text{mm}$) | $A_{\phi 1350}$ | = | 1.43 | m^2 |
| ▪ Peso dell'acqua (carico uniformemente distribuito in direzione gravitazionale) | q | = | 14.04 | kN/m |
| ▪ Area sezione interna tubazione ($\phi = 1300\text{mm}$) | $A_{\phi 1300}$ | = | 1.33 | m^2 |
| ▪ Peso dell'acqua (carico uniformemente distribuito in direzione gravitazionale) | q | = | 13.02 | kN/m |

5.3 Pressione idrostatica e colpo d'ariete

La pressione idrostatica agente in corrispondenza della generica sezione ad ascissa x ($P_{hydro(x)}$), si valuta come segue:

$$P_{hydro(x)} = \gamma_w (Q_{p.c.i.} - Q_{(x)})$$

dove:

- γ_w Peso specifico dell'acqua (9.81 kN/m³);
- $Q_{p.c.i.}$ Quota del piano dei carichi idrostatici;
- $Q_{(x)}$ Quota altimetrica della generica sezione ad ascissa x della condotta.

Nella condotta in esame, il colpo d'ariete (C_A) determina una massima sovrappressione circa pari al 4% della pressione idrostatica massima (secondo le prove di stacco di carico effettuate da Andritz Hydro nel Settembre 2011, la massima pressione è risultata pari a 34.3 bar). Inoltre, la sovrappressione in corrispondenza di ciascuna sezione della condotta viene definita ipotizzando una distribuzione lineare della sovrappressione stessa, assumendo che il colpo d'ariete si azzeri nella sezione di imbocco della condotta e raggiunga il valore massimo nella sezione in corrispondenza dell'ingresso in centrale:

$$C_{A(x)} = C_{A,max} (x/L) = (4\% P_{hydro,max}) (x/L)$$

La pressione totale di calcolo è valutata sovrapponendo gli effetti della pressione idrostatica e della sovrappressione determinata dal colpo d'ariete $P_{tot(x)} = P_{hydro(x)} + C_{A(x)}$

| Tr. | Tipo | Sez. | α | Svil. | Progr. | Q | Q _{p.c.i.} | Q _{piezometrica} | P _{hydro} | C _A | P _{tot} |
|-----|-------|------|----------|-------|--------|------------|---------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [°] | [m] | [m] | [m.s.l.m.] | [m] | [m] | [kN/m ²] | [kN/m ²] | [kN/m ²] |
| | Anc. | FP1 | 22.8 | 45.0 | 44.7 | 888.05 | 945.0 | 56.9 | 558.7 | 13.2 | 571.9 |
| 1 | Camp. | 1 | 22.8 | 51.1 | 50.3 | 885.69 | 945.0 | 59.3 | 581.8 | 14.9 | 596.7 |
| | Camp. | 2 | 22.8 | 105.9 | 100.8 | 864.42 | 945.0 | 80.6 | 790.5 | 29.8 | 820.3 |
| | App. | 3 | 22.8 | 111.4 | 105.9 | 862.29 | 945.0 | 82.7 | 811.4 | 31.3 | 842.8 |
| | Anc. | FP2 | 22.8 | 126.1 | 119.4 | 856.60 | 945.0 | 88.4 | 867.3 | 35.3 | 902.6 |
| 2 | Camp. | 4 | 42.9 | 133.3 | 124.7 | 851.68 | 945.0 | 93.3 | 915.5 | 36.9 | 952.4 |
| | Camp. | 5 | 42.9 | 139.5 | 129.3 | 847.41 | 945.0 | 97.6 | 957.4 | 38.3 | 995.6 |
| | App. | 6 | 42.9 | 144.1 | 132.6 | 844.32 | 945.0 | 100.7 | 987.6 | 39.2 | 1026.9 |
| | Camp. | 7 | 42.9 | 160.6 | 144.7 | 833.06 | 945.0 | 111.9 | 1098.1 | 42.8 | 1140.9 |
| | App. | 8 | 42.9 | 165.4 | 148.3 | 829.79 | 945.0 | 115.2 | 1130.2 | 43.9 | 1174.1 |
| | Camp. | 9 | 42.9 | 179.6 | 158.7 | 820.11 | 945.0 | 124.9 | 1225.1 | 47.0 | 1272.1 |
| | App. | 10 | 42.9 | 184.5 | 162.2 | 816.84 | 945.0 | 128.2 | 1257.2 | 48.0 | 1305.2 |
| | Camp. | 11 | 42.9 | 198.7 | 172.7 | 807.11 | 945.0 | 137.9 | 1352.7 | 51.1 | 1403.8 |
| | App. | 12 | 42.9 | 203.5 | 176.1 | 803.88 | 945.0 | 141.1 | 1384.3 | 52.1 | 1436.5 |
| | Anc. | FP3 | 42.9 | 220.6 | 188.7 | 792.23 | 945.0 | 152.8 | 1498.7 | 55.8 | 1554.6 |
| 3 | Camp. | 13 | 58.8 | 231.0 | 194.1 | 783.31 | 945.0 | 161.7 | 1586.1 | 57.4 | 1643.6 |
| | Camp. | 14 | 58.8 | 238.7 | 198.1 | 776.72 | 945.0 | 168.3 | 1650.8 | 58.6 | 1709.4 |
| | App. | 15 | 58.8 | 241.9 | 199.7 | 774.04 | 945.0 | 171.0 | 1677.1 | 59.1 | 1736.2 |
| | Camp. | 16 | 58.8 | 256.2 | 207.1 | 761.82 | 945.0 | 183.2 | 1797.0 | 61.3 | 1858.3 |
| | App. | 17 | 58.8 | 261.0 | 209.6 | 757.71 | 945.0 | 187.3 | 1837.3 | 62.0 | 1899.3 |
| | Camp. | 18 | 58.8 | 265.7 | 212.1 | 753.65 | 945.0 | 191.3 | 1877.1 | 62.7 | 1939.8 |
| | App. | 19 | 58.8 | 270.5 | 214.5 | 749.60 | 945.0 | 195.4 | 1916.9 | 63.5 | 1980.4 |
| | Camp. | 20 | 58.8 | 284.8 | 222.0 | 737.33 | 945.0 | 207.7 | 2037.3 | 65.7 | 2102.9 |
| | App. | 21 | 58.8 | 289.5 | 224.4 | 733.27 | 945.0 | 211.7 | 2077.1 | 66.4 | 2143.5 |
| | Camp. | 22 | 58.8 | 294.3 | 226.9 | 729.17 | 945.0 | 215.8 | 2117.3 | 67.1 | 2184.4 |
| | App. | 23 | 58.8 | 299.1 | 229.4 | 725.07 | 945.0 | 219.9 | 2157.5 | 67.9 | 2225.4 |
| | Camp. | 24 | 58.8 | 313.5 | 236.8 | 712.79 | 945.0 | 232.2 | 2278.0 | 70.1 | 2348.1 |
| | App. | 25 | 58.8 | 318.3 | 239.3 | 708.66 | 945.0 | 236.3 | 2318.5 | 70.8 | 2389.3 |
| | Camp. | 26 | 58.8 | 332.5 | 246.7 | 696.53 | 945.0 | 248.5 | 2437.5 | 73.0 | 2510.5 |
| | App. | 27 | 58.8 | 337.2 | 249.1 | 692.47 | 945.0 | 252.5 | 2477.3 | 73.7 | 2551.0 |
| | Camp. | 28 | 58.8 | 342.1 | 251.6 | 688.33 | 945.0 | 256.7 | 2517.9 | 74.5 | 2592.3 |
| | App. | 29 | 58.8 | 346.9 | 254.1 | 684.20 | 945.0 | 260.8 | 2558.4 | 75.2 | 2633.6 |
| | Anc. | FP4 | 58.8 | 358.8 | 260.3 | 674.00 | 945.0 | 271.0 | 2658.5 | 77.0 | 2735.5 |
| 4 | Camp. | 30 | 31.7 | 365.7 | 266.2 | 670.40 | 945.0 | 274.6 | 2693.9 | 78.8 | 2772.6 |
| | Camp. | 31 | 31.7 | 383.8 | 281.5 | 660.92 | 945.0 | 284.1 | 2786.8 | 83.3 | 2870.1 |
| | App. | 32 | 31.7 | 387.7 | 284.9 | 658.85 | 945.0 | 286.1 | 2807.1 | 84.3 | 2891.4 |
| | Camp. | 33 | 31.7 | 407.7 | 301.9 | 648.37 | 945.0 | 296.6 | 2910.0 | 89.3 | 2999.3 |
| | App. | 34 | 31.7 | 411.7 | 305.3 | 646.26 | 945.0 | 298.7 | 2930.6 | 90.3 | 3020.9 |
| | Camp. | 35 | 31.7 | 422.1 | 314.1 | 640.80 | 945.0 | 304.2 | 2984.2 | 92.9 | 3077.2 |
| | App. | 36 | 25.6 | 423.7 | 315.6 | 640.08 | 945.0 | 304.9 | 2991.3 | 93.4 | 3084.7 |
| | Camp. | 37 | 25.6 | 442.3 | 332.4 | 632.03 | 945.0 | 313.0 | 3070.2 | 98.4 | 3168.6 |
| | App. | 38 | 25.6 | 446.4 | 336.1 | 630.28 | 945.0 | 314.7 | 3087.4 | 99.4 | 3186.8 |
| | Camp. | 39 | 25.6 | 452.4 | 341.5 | 627.68 | 945.0 | 317.3 | 3112.9 | 101.0 | 3213.9 |
| | App. | 40 | 25.6 | 454.4 | 343.3 | 626.83 | 945.0 | 318.2 | 3121.2 | 101.6 | 3222.8 |
| | Anc. | FP5 | 25.6 | 465.3 | 353.1 | 622.10 | 945.0 | 322.9 | 3167.6 | 104.5 | 3272.1 |
| 5 | Camp. | 41 | 8.3 | 471.3 | 359.1 | 621.23 | 945.0 | 323.8 | 3176.2 | 106.2 | 3282.4 |
| | Camp. | 42 | 8.3 | 487.1 | 374.7 | 618.94 | 945.0 | 326.1 | 3198.7 | 110.9 | 3309.5 |
| | App. | 43 | 8.3 | 491.1 | 378.6 | 618.36 | 945.0 | 326.6 | 3204.4 | 112.0 | 3316.4 |
| | Camp. | 44 | 8.3 | 527.0 | 414.2 | 613.14 | 945.0 | 331.9 | 3255.6 | 122.6 | 3378.1 |
| | App. | 45 | 8.3 | 531.1 | 418.2 | 612.56 | 945.0 | 332.4 | 3261.3 | 123.7 | 3385.0 |
| | Anc. | FP6 | 8.3 | 542.1 | 429.1 | 610.95 | 945.0 | 334.1 | 3277.0 | 127.0 | 3404.0 |
| 6 | Camp. | 46 | 16.4 | 547.1 | 433.9 | 609.54 | 945.0 | 335.5 | 3290.9 | 128.4 | 3419.3 |
| | Camp. | 47 | 16.4 | 555.2 | 441.6 | 607.27 | 945.0 | 337.7 | 3313.2 | 130.7 | 3443.9 |
| | App. | 48 | 16.4 | 559.1 | 445.4 | 606.15 | 945.0 | 338.9 | 3324.1 | 131.8 | 3455.9 |
| | Anc. | C | 16.4 | 565.8 | 451.9 | 604.26 | 945.0 | 340.7 | 3342.7 | 133.7 | 3476.4 |

Tabella 6 Pressione idrostatica e colpo d'ariete – condotta 1

| Tr. | Tipo | Sez. | α | Svil. | Progr. | Q | Q _{p.c.i.} | Q _{piezometrica} | P _{hydro} | C _A | P _{tot} |
|-----|-------|------|----------|-------|--------|------------|---------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [°] | [m] | [m] | [m.s.l.m.] | [m] | [m] | [kN/m ²] | [kN/m ²] | [kN/m ²] |
| | Anc. | FP1 | 22.8 | 45.0 | 44.7 | 888.05 | 945.0 | 56.9 | 558.7 | 13.0 | 571.6 |
| 1 | Camp. | 1 | 22.8 | 51.1 | 50.3 | 885.69 | 945.0 | 59.3 | 581.8 | 14.6 | 596.4 |
| | Camp. | 2 | 22.8 | 106.0 | 100.9 | 864.40 | 945.0 | 80.6 | 790.7 | 29.2 | 820.0 |
| | App. | 3 | 22.8 | 111.5 | 106.0 | 862.26 | 945.0 | 82.7 | 811.7 | 30.7 | 842.4 |
| | Anc. | FP2 | 22.8 | 126.1 | 119.4 | 856.60 | 945.0 | 88.4 | 867.3 | 34.6 | 901.9 |
| 2 | Camp. | 4 | 42.9 | 133.3 | 124.7 | 851.68 | 945.0 | 93.3 | 915.5 | 36.1 | 951.6 |
| | Camp. | 5 | 42.9 | 170.2 | 151.8 | 826.54 | 945.0 | 118.5 | 1162.0 | 44.0 | 1206.0 |
| | App. | 6 | 42.9 | 175.0 | 155.3 | 823.29 | 945.0 | 121.7 | 1193.9 | 45.0 | 1238.9 |
| | Camp. | 7 | 42.9 | 198.7 | 172.7 | 807.13 | 945.0 | 137.9 | 1352.5 | 50.0 | 1402.6 |
| | App. | 8 | 42.9 | 203.4 | 176.1 | 803.92 | 945.0 | 141.1 | 1384.0 | 51.0 | 1435.0 |
| | Anc. | FP3 | 42.9 | 220.6 | 188.7 | 792.23 | 945.0 | 152.8 | 1498.7 | 54.7 | 1553.4 |
| 3 | Camp. | 9 | 58.8 | 231.0 | 194.1 | 783.31 | 945.0 | 161.7 | 1586.1 | 56.2 | 1642.4 |
| | App. | 10 | 58.8 | 241.8 | 199.7 | 774.07 | 945.0 | 170.9 | 1676.9 | 57.9 | 1734.7 |
| | Camp. | 11 | 58.8 | 246.8 | 202.2 | 769.85 | 945.0 | 175.1 | 1718.2 | 58.6 | 1776.8 |
| | App. | 12 | 58.8 | 270.7 | 214.6 | 749.39 | 945.0 | 195.6 | 1918.9 | 62.2 | 1981.1 |
| | Camp. | 13 | 58.8 | 275.4 | 217.1 | 745.33 | 945.0 | 199.7 | 1958.8 | 62.9 | 2021.7 |
| | App. | 14 | 58.8 | 289.7 | 224.5 | 733.14 | 945.0 | 211.9 | 2078.3 | 65.0 | 2143.4 |
| | Camp. | 15 | 58.8 | 294.4 | 226.9 | 729.08 | 945.0 | 215.9 | 2118.2 | 65.8 | 2183.9 |
| | App. | 16 | 58.8 | 318.2 | 239.3 | 708.77 | 945.0 | 236.2 | 2317.5 | 69.3 | 2386.8 |
| | Camp. | 17 | 58.8 | 322.9 | 241.7 | 704.70 | 945.0 | 240.3 | 2357.3 | 70.0 | 2427.3 |
| | App. | 18 | 58.8 | 337.2 | 249.1 | 692.47 | 945.0 | 252.5 | 2477.3 | 72.2 | 2549.5 |
| | Camp. | 19 | 58.8 | 342.0 | 251.6 | 688.39 | 945.0 | 256.6 | 2517.3 | 72.9 | 2590.2 |
| | App. | 20 | 58.8 | 346.8 | 254.1 | 684.31 | 945.0 | 260.7 | 2557.4 | 73.6 | 2631.0 |
| | Anc. | FP4 | 58.8 | 358.8 | 260.3 | 674.00 | 945.0 | 271.0 | 2658.5 | 75.4 | 2733.9 |
| 4 | Camp. | 22 | 31.7 | 365.7 | 266.2 | 670.40 | 945.0 | 274.6 | 2693.9 | 77.1 | 2771.0 |
| | Camp. | 23 | 31.7 | 422.1 | 314.1 | 640.80 | 945.0 | 304.2 | 2984.2 | 91.0 | 3075.2 |
| | App. | 24 | 25.6 | 423.2 | 315.1 | 640.32 | 945.0 | 304.7 | 2988.9 | 91.3 | 3080.2 |
| | App. | 25 | 25.6 | 455.0 | 343.8 | 626.55 | 945.0 | 318.4 | 3124.0 | 99.6 | 3223.6 |
| | Camp. | 26 | 25.6 | 460.7 | 349.0 | 624.09 | 945.0 | 320.9 | 3148.1 | 101.1 | 3249.3 |
| | Anc. | FP5 | 25.6 | 465.3 | 353.1 | 622.10 | 945.0 | 322.9 | 3167.6 | 102.3 | 3270.0 |
| 5 | Camp. | 27 | 8.3 | 471.3 | 359.1 | 621.23 | 945.0 | 323.8 | 3176.2 | 104.0 | 3280.2 |
| | App. | 28 | 8.3 | 530.9 | 418.0 | 612.58 | 945.0 | 332.4 | 3261.1 | 121.1 | 3382.2 |
| | Camp. | 29 | 8.3 | 536.5 | 423.6 | 611.76 | 945.0 | 333.2 | 3269.0 | 122.7 | 3391.8 |
| | Anc. | FP6 | 8.3 | 542.1 | 429.1 | 610.95 | 945.0 | 334.0 | 3277.0 | 124.3 | 3401.4 |
| 6 | Camp. | 30 | 11.6 | 547.1 | 434.0 | 609.95 | 945.0 | 335.1 | 3286.9 | 125.8 | 3412.6 |
| | Camp. | 31 | 11.6 | 563.1 | 449.7 | 606.73 | 945.0 | 338.3 | 3318.4 | 130.3 | 3448.7 |
| | App. | 32 | 11.6 | 567.1 | 453.6 | 605.93 | 945.0 | 339.1 | 3326.3 | 131.4 | 3457.7 |
| | Anc. | C | 11.6 | 575.0 | 461.3 | 604.35 | 945.0 | 340.6 | 3341.8 | 133.7 | 3475.4 |

Tabella 7 Pressione idrostatica e colpo d'ariete – condotta 3

5.4 Azione della neve

La condotta è libera all'aperto, pertanto risulta sottoposta all'azione della neve. Il calcolo dell'azione della neve è eseguito secondo quanto riportato al par. 5 delle SN 505 261. In particolare, per il sito dove sorge l'opera in esame si assumono i seguenti parametri:

- Altezza di riferimento per il carico da neve (vedi fig. sottostante) $h_0 = 200 \text{ m}$
- Coefficiente di esposizione del sito (normale esposizione al vento) $C_e = 1$
- Coefficiente termico $C_T = 1$
- Valore caratteristico del carico da neve su terreno orizzontale ($\geq 0.9 \text{ kN/m}^2$) $s_k = 0.9 \text{ kN/m}^2$

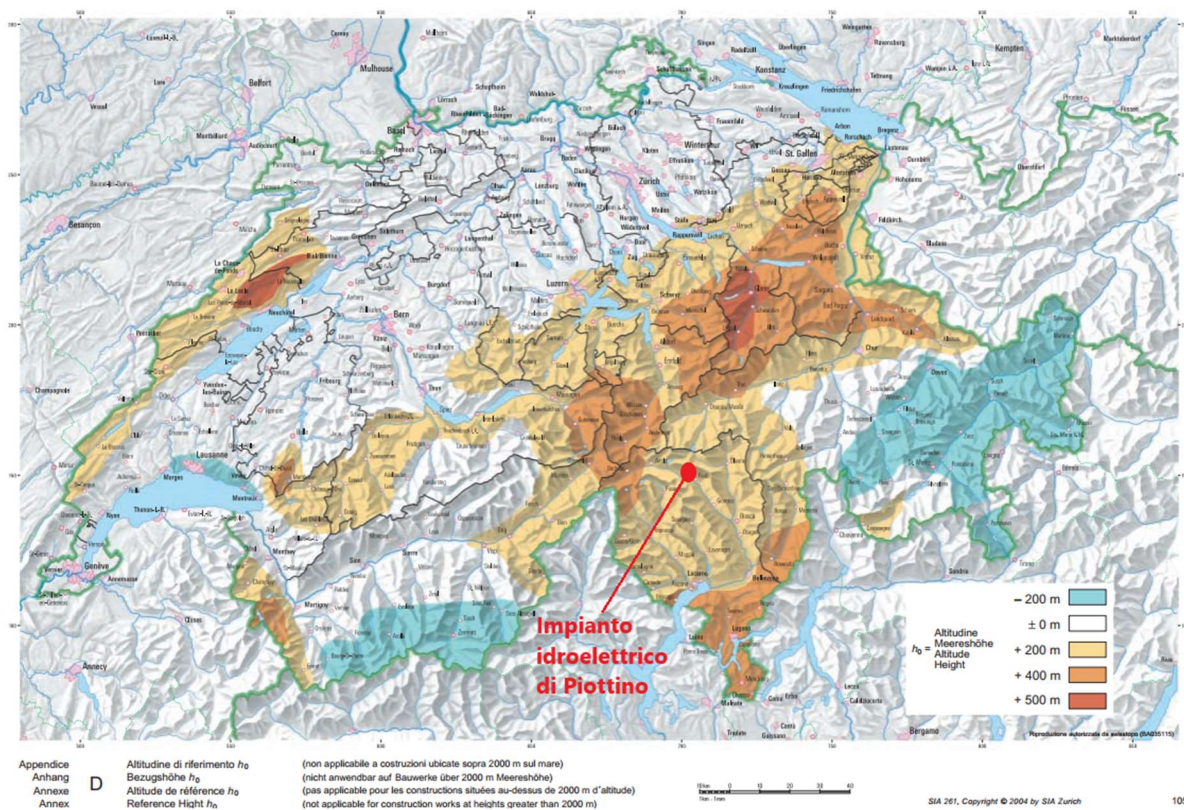


Figura 5 Altitudine di riferimento (h_0) – rif. Appendice D, SN 505 261

Per il calcolo dei coefficienti di forma della condotta (μ_i) è necessario considerare l'aspetto bidimensionale del problema; infatti, in direzione longitudinale la condotta può essere considerata come una copertura a una falda, mentre in direzione trasversale è analizzata come copertura di forma cilindrica.

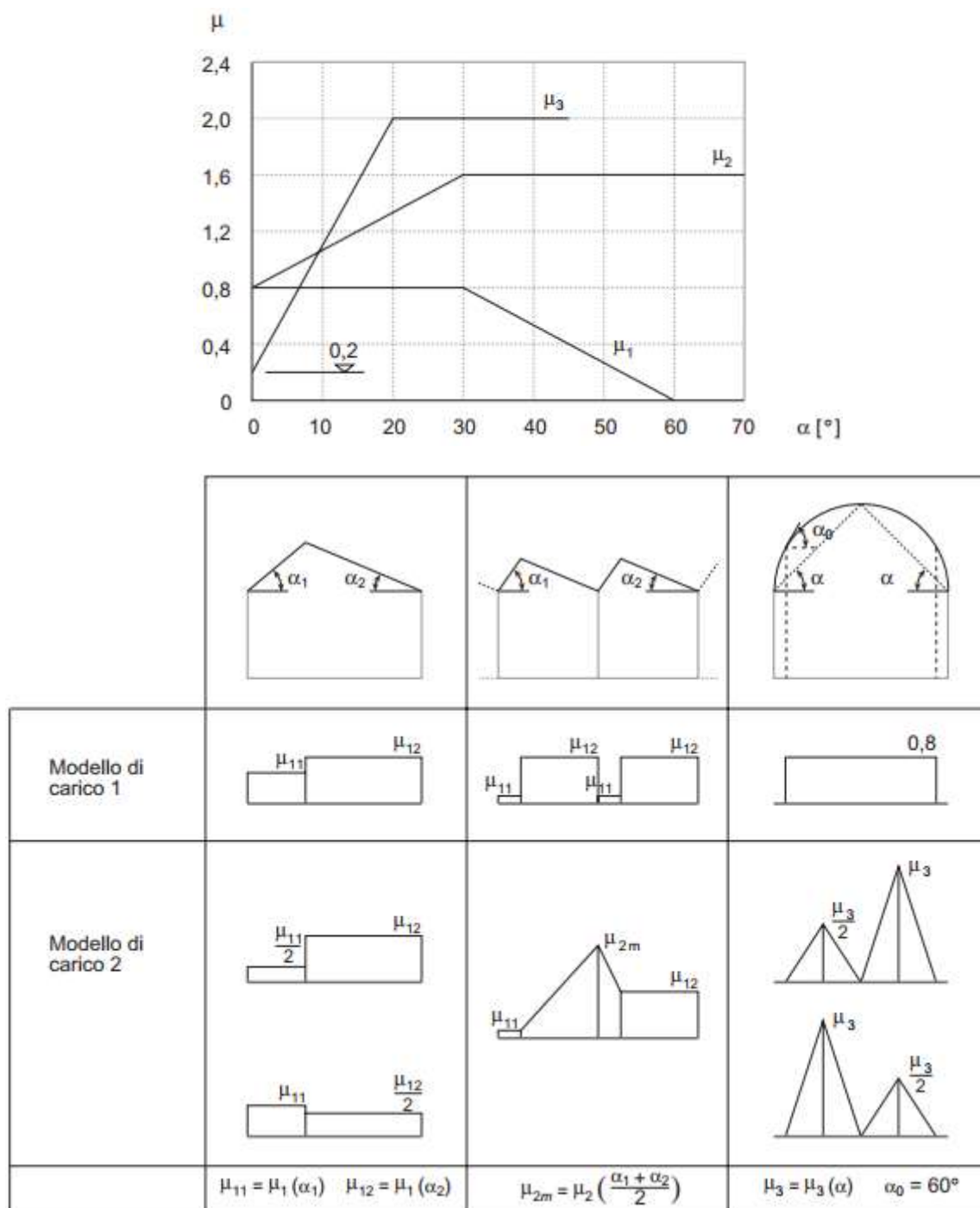


Figura 5.6: Coefficiente di forma– coperture a una falda (a) e cilindrica (b)

Nella valutazione del coefficiente di forma per coperture cilindriche si considera il modello di carico 1, relativo al caso della neve depositata in assenza di vento, poiché si ritiene improbabile che si possa istaurare la deposizione di neve in presenza di vento espressa dal modello di carico 2.

| Tr. | Tipo | Sez. | α | Svil. | Q | μ_1 | μ_3 | C_E | C_t | D_e | q_k | p_s |
|-----|-------|------|----------|-------|------------|---------|---------|-------|-------|-------|----------------------|--------|
| [-] | [-] | [-] | [°] | [m] | [m.s.l.m.] | [-] | [-] | [-] | [-] | [m] | [kN/m ²] | [kN/m] |
| 1 | Anc. | FP1 | 22.8 | 45.0 | 888.1 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.566 | 0.58 | 0.90 |
| | Camp. | 1 | 22.8 | 51.1 | 885.7 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.610 | 0.58 | 0.93 |
| | Camp. | 2 | 22.8 | 105.9 | 864.4 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.566 | 0.58 | 0.90 |
| | App. | 3 | 22.8 | 111.4 | 862.3 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.566 | 0.58 | 0.90 |
| 2 | Anc. | FP2 | 22.8 | 126.1 | 856.6 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.566 | 0.58 | 0.90 |
| | Camp. | 4 | 42.9 | 133.3 | 851.7 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.514 | 0.33 | 0.50 |
| | Camp. | 5 | 42.9 | 139.5 | 847.4 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.468 | 0.33 | 0.48 |
| | App. | 6 | 42.9 | 144.1 | 844.3 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.470 | 0.33 | 0.48 |
| | Camp. | 7 | 42.9 | 160.6 | 833.1 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.470 | 0.33 | 0.48 |
| | App. | 8 | 42.9 | 165.4 | 829.8 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.470 | 0.33 | 0.48 |
| | Camp. | 9 | 42.9 | 179.6 | 820.1 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.472 | 0.33 | 0.48 |
| | App. | 10 | 42.9 | 184.5 | 816.8 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.472 | 0.33 | 0.48 |
| | Camp. | 11 | 42.9 | 198.7 | 807.1 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.474 | 0.33 | 0.48 |
| 3 | App. | 12 | 42.9 | 203.5 | 803.9 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.474 | 0.33 | 0.48 |
| | Anc. | FP3 | 42.9 | 220.6 | 792.2 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.478 | 0.33 | 0.49 |
| | Camp. | 13 | 58.8 | 231.0 | 783.3 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.484 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 14 | 58.8 | 238.7 | 776.7 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.428 | 0.02 | 0.03 |
| | App. | 15 | 58.8 | 241.9 | 774.0 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.428 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 16 | 58.8 | 256.2 | 761.8 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.430 | 0.02 | 0.03 |
| | App. | 17 | 58.8 | 261.0 | 757.7 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.430 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 18 | 58.8 | 265.7 | 753.7 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.432 | 0.02 | 0.03 |
| | App. | 19 | 58.8 | 270.5 | 749.6 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.432 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 20 | 58.8 | 284.8 | 737.3 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.434 | 0.02 | 0.03 |
| | App. | 21 | 58.8 | 289.5 | 733.3 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.434 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 22 | 58.8 | 294.3 | 729.2 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.436 | 0.02 | 0.03 |
| | App. | 23 | 58.8 | 299.1 | 725.1 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.436 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 24 | 58.8 | 313.5 | 712.8 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.438 | 0.02 | 0.03 |
| | App. | 25 | 58.8 | 318.3 | 708.7 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.438 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 26 | 58.8 | 332.5 | 696.5 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.440 | 0.02 | 0.03 |
| | App. | 27 | 58.8 | 337.2 | 692.5 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.440 | 0.02 | 0.03 |
| 4 | Camp. | 28 | 58.8 | 342.1 | 688.3 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.442 | 0.02 | 0.03 |
| | App. | 29 | 58.8 | 346.9 | 684.2 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.442 | 0.02 | 0.03 |
| | Anc. | FP4 | 58.8 | 358.8 | 674.0 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.444 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 30 | 31.7 | 365.7 | 670.4 | 0.76 | 0.80 | 1 | 1 | 1.448 | 0.54 | 0.79 |
| | Camp. | 31 | 31.7 | 383.8 | 660.9 | 0.76 | 0.80 | 1 | 1 | 1.394 | 0.54 | 0.76 |
| | App. | 32 | 31.7 | 387.7 | 658.9 | 0.76 | 0.80 | 1 | 1 | 1.394 | 0.54 | 0.76 |
| | Camp. | 33 | 31.7 | 407.7 | 648.4 | 0.76 | 0.80 | 1 | 1 | 1.396 | 0.54 | 0.76 |
| | App. | 34 | 31.7 | 411.7 | 646.3 | 0.76 | 0.80 | 1 | 1 | 1.396 | 0.54 | 0.76 |
| | Camp. | 35 | 31.7 | 422.1 | 640.8 | 0.76 | 0.80 | 1 | 1 | 1.398 | 0.54 | 0.76 |
| | App. | 36 | 25.6 | 423.7 | 640.1 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.398 | 0.58 | 0.81 |
| | Camp. | 37 | 25.6 | 442.3 | 632.0 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.398 | 0.58 | 0.81 |
| | App. | 38 | 25.6 | 446.4 | 630.3 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.398 | 0.58 | 0.81 |
| 5 | Camp. | 39 | 25.6 | 452.4 | 627.7 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.400 | 0.58 | 0.81 |
| | App. | 40 | 25.6 | 454.4 | 626.8 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.400 | 0.58 | 0.81 |
| | Anc. | FP5 | 25.6 | 465.3 | 622.1 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.400 | 0.58 | 0.81 |
| | Camp. | 41 | 8.3 | 471.3 | 621.2 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.410 | 0.58 | 0.81 |
| | Camp. | 42 | 8.3 | 487.1 | 618.9 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.348 | 0.58 | 0.78 |
| | App. | 43 | 8.3 | 491.1 | 618.4 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.348 | 0.58 | 0.78 |
| | Camp. | 44 | 8.3 | 527.0 | 613.1 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.350 | 0.58 | 0.78 |
| | App. | 45 | 8.3 | 531.1 | 612.6 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.350 | 0.58 | 0.78 |
| 6 | Anc. | FP6 | 8.3 | 542.1 | 611.0 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.350 | 0.58 | 0.78 |
| | Camp. | 46 | 16.4 | 547.1 | 609.5 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.410 | 0.58 | 0.81 |
| | Camp. | 47 | 16.4 | 555.2 | 607.3 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.350 | 0.58 | 0.78 |
| | App. | 48 | 16.4 | 559.1 | 606.1 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.350 | 0.58 | 0.78 |
| | Anc. | C | 16.4 | 565.8 | 604.3 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.350 | 0.58 | 0.78 |

Tabella 8 Carico neve – condotta 1

| Tr. | Tipo | Sez. | α | Svil. | Q | μ_1 | μ_3 | C_E | C_t | D_e | q_k | p_s |
|-----|-------|------|----------|-------|------------|---------|---------|-------|-------|-------|----------------------|--------|
| [-] | [-] | [-] | [°] | [m] | [m.s.l.m.] | [-] | [-] | [-] | [-] | [m] | [kN/m ²] | [kN/m] |
| | Anc. | FP1 | 22.8 | 45.0 | 888.1 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.568 | 0.58 | 0.90 |
| 1 | Camp. | 1 | 22.8 | 51.1 | 885.7 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.606 | 0.58 | 0.93 |
| | Camp. | 2 | 22.8 | 106.0 | 864.4 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.568 | 0.58 | 0.90 |
| | App. | 3 | 22.8 | 111.5 | 862.3 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.568 | 0.58 | 0.90 |
| | Anc. | FP2 | 22.8 | 126.1 | 856.6 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.568 | 0.58 | 0.90 |
| 2 | Camp. | 4 | 42.9 | 133.3 | 851.7 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.506 | 0.33 | 0.49 |
| | Camp. | 5 | 42.9 | 170.2 | 826.5 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.468 | 0.33 | 0.48 |
| | App. | 6 | 42.9 | 175.0 | 823.3 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.468 | 0.33 | 0.48 |
| | Camp. | 7 | 42.9 | 198.7 | 807.1 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.470 | 0.33 | 0.48 |
| | App. | 8 | 42.9 | 203.4 | 803.9 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.470 | 0.33 | 0.48 |
| | Anc. | FP3 | 42.9 | 220.6 | 792.2 | 0.46 | 0.80 | 1 | 1 | 1.470 | 0.33 | 0.48 |
| 3 | Camp. | 9 | 58.8 | 231.0 | 783.3 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.474 | 0.02 | 0.03 |
| | App. | 10 | 58.8 | 241.8 | 774.1 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.420 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 11 | 58.8 | 246.8 | 769.9 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.420 | 0.02 | 0.03 |
| | App. | 12 | 58.8 | 270.7 | 749.4 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.422 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 13 | 58.8 | 275.4 | 745.3 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.422 | 0.02 | 0.03 |
| | App. | 14 | 58.8 | 289.7 | 733.1 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.424 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 15 | 58.8 | 294.4 | 729.1 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.424 | 0.02 | 0.03 |
| | App. | 16 | 58.8 | 318.2 | 708.8 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.426 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 17 | 58.8 | 322.9 | 704.7 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.426 | 0.02 | 0.03 |
| | App. | 18 | 58.8 | 337.2 | 692.5 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.428 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 19 | 58.8 | 342.0 | 688.4 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.428 | 0.02 | 0.03 |
| 4 | App. | 20 | 58.8 | 346.8 | 684.3 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.430 | 0.02 | 0.03 |
| | Camp. | 21 | 58.8 | 352.8 | 679.2 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.430 | 0.02 | 0.03 |
| | Anc. | FP4 | 58.8 | 358.8 | 674.0 | 0.03 | 0.80 | 1 | 1 | 1.430 | 0.02 | 0.03 |
| 5 | Camp. | 22 | 31.7 | 365.7 | 670.4 | 0.76 | 0.80 | 1 | 1 | 1.442 | 0.54 | 0.78 |
| | Camp. | 23 | 31.7 | 422.1 | 640.8 | 0.76 | 0.80 | 1 | 1 | 1.378 | 0.54 | 0.75 |
| | App. | 24 | 25.6 | 423.2 | 640.3 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.378 | 0.58 | 0.79 |
| | App. | 25 | 25.6 | 455.0 | 626.6 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.380 | 0.58 | 0.79 |
| | Camp. | 26 | 25.6 | 460.7 | 624.1 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.380 | 0.58 | 0.79 |
| | Anc. | FP5 | 25.6 | 465.3 | 622.1 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.380 | 0.58 | 0.79 |
| 6 | Camp. | 27 | 8.3 | 471.3 | 621.2 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.394 | 0.58 | 0.80 |
| | App. | 28 | 8.3 | 530.9 | 612.6 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.330 | 0.58 | 0.77 |
| | Camp. | 29 | 8.3 | 536.5 | 611.8 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.330 | 0.58 | 0.77 |
| | Anc. | FP6 | 8.3 | 542.1 | 611.0 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.330 | 0.58 | 0.77 |
| 7 | Camp. | 30 | 11.6 | 547.1 | 609.9 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.398 | 0.58 | 0.81 |
| | Camp. | 31 | 11.6 | 563.1 | 606.7 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.332 | 0.58 | 0.77 |
| | App. | 32 | 11.6 | 567.1 | 605.9 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.332 | 0.58 | 0.77 |
| | Anc. | C | 11.6 | 575.0 | 604.4 | 0.80 | 0.80 | 1 | 1 | 1.332 | 0.58 | 0.77 |

Tabella 9 Carico neve – condotta 3

5.5 Azione del vento

La condotta è libera all'aperto, pertanto risulta sottoposta all'azione del vento. Il calcolo dell'azione del vento è stato condotto secondo quanto riportato al par. 6 delle SN 505 261. In particolare, per il sito dove sorge l'opera in esame si assumono i seguenti parametri:

| | |
|--|-----------------------------------|
| ▪ Categoria del terreno (località rurale) | III |
| ▪ Altezza del gradiente | $z_g = 450$ m |
| ▪ Esponente della rugosità del terreno | $\alpha_R = 0.23$ |
| ▪ Altezza asse della condotta rispetto al suolo (val. medio) | $z \approx 1.50$ m |
| ▪ Coefficiente del profilo di ripartizione del vento | $c_h = 0.66$ |
| ▪ Val. di riferimento della pressione dinamica (vedi fig. sottostante) | $q_{p0} = 1.10$ kN/m ² |
| ▪ Pressione dinamica del vento | $q_p = 0.73$ kN/m ² |
| ▪ Coefficiente di forma | $c_f = 1.30$ |
| ▪ Coefficiente dinamico | $c_d = 1.00$ |
| ▪ Coefficiente di riduzione | $c_{red} = 1.00$ |

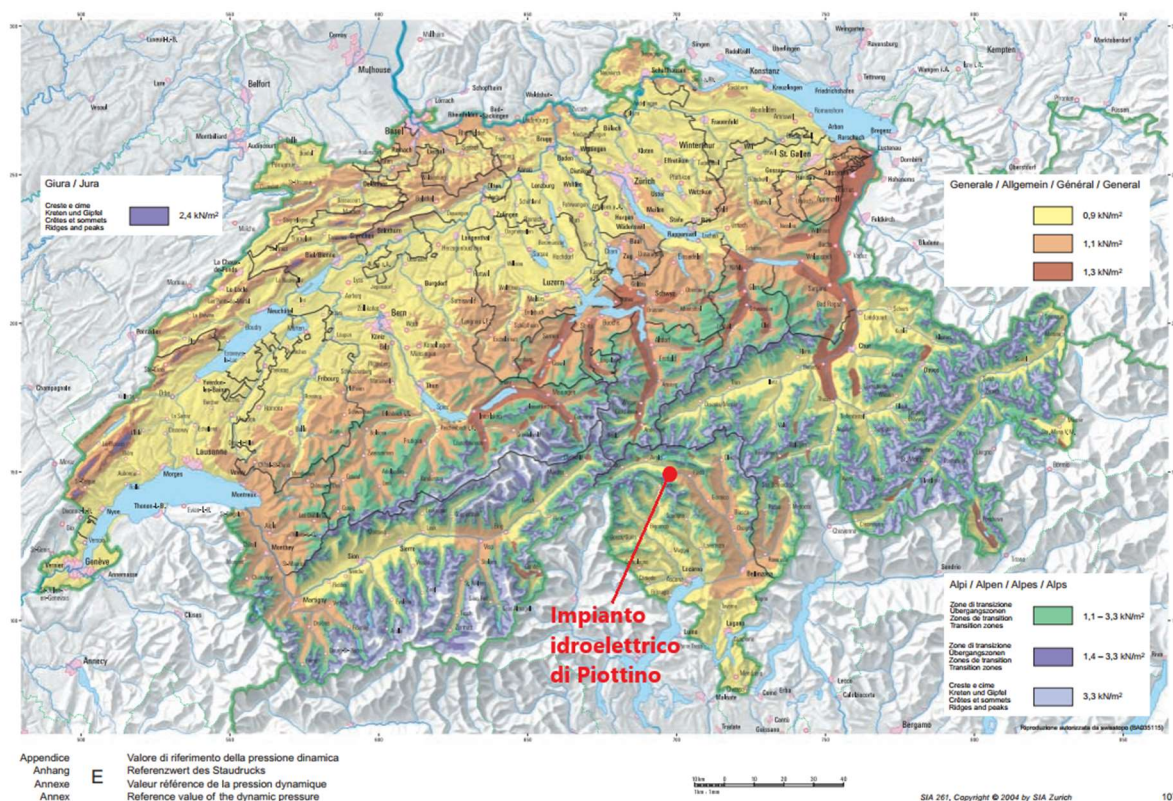


Figura 7 Valore di riferimento della pressione dinamica (q_{p0}) – rif. Appendice E, SN 505 261

Tabella 71: Coefficienti per pareti e pannelli disposti liberi in alto

| φ | Coefficienti di forza globali | | | | | | | | |
|------------------------|---|-------|-------|----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| | c_{f1} | e_v | e_h | c_{f1} | e_v | e_h | c_{f1} | e_v | e_h |
| | superficie di riferimento = $h \cdot b$ | | | | | | | | |
| 0° | 2,00 | 0,00 | 0,00 | 1,30 | 0,00 | 0,00 | 1,15 | 0,00 | 0,00 |
| 45° | – | 0,00 | – | 1,60 | 0,00 | 0,2 b | 1,10 | 0,00 | 0,1 b |
| $h_1 \geq \frac{h}{4}$ | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| 0° | 1,20 | 0,1 h | 0,00 | 1,20 | 0,1 h | 0,00 | 1,10 | 0,1 h | 0,00 |
| 45° | – | – | – | 1,50 | 0,1 h | 0,2 b | 1,50 | 0,1 h | 0,1 b |
| $b : h \geq 10 : 1$ | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| $b : h = 1 : 1$ | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

Si riporta di seguito una tabella in cui viene indicata la pressione del vento per ogni tratto di condotta analizzato, osservando che nei modelli di calcolo riferiti alle diverse tratte di condotta verrà considerato, cautelativamente, un carico uniformemente distribuito di intensità pari al massimo valore del carico da vento agente su ciascuna tratta.

| Tr. | Tipo | Sez. | α | Svil. | Q | C _p | D _e | q _p | p _w |
|-----|-------|------|----------|-------|------------|----------------|----------------|----------------------|----------------|
| [-] | [-] | [-] | [°] | [m] | [m.s.l.m.] | [-] | [m] | [kN/m ²] | [kN/m] |
| | Anc. | FP1 | 22.8 | 45.0 | 888.1 | 1.30 | 1.566 | 0.95 | 1.49 |
| 1 | Camp. | 1 | 22.8 | 51.1 | 885.7 | 1.30 | 1.610 | 0.95 | 1.53 |
| | Camp. | 2 | 22.8 | 105.9 | 864.4 | 1.30 | 1.566 | 0.95 | 1.49 |
| | App. | 3 | 22.8 | 111.4 | 862.3 | 1.30 | 1.566 | 0.95 | 1.49 |
| | Anc. | FP2 | 22.8 | 126.1 | 856.6 | 1.30 | 1.566 | 0.95 | 1.49 |
| 2 | Camp. | 4 | 42.9 | 133.3 | 851.7 | 1.30 | 1.514 | 0.95 | 1.44 |
| | Camp. | 5 | 42.9 | 139.5 | 847.4 | 1.30 | 1.468 | 0.95 | 1.39 |
| | App. | 6 | 42.9 | 144.1 | 844.3 | 1.30 | 1.470 | 0.95 | 1.40 |
| | Camp. | 7 | 42.9 | 160.6 | 833.1 | 1.30 | 1.470 | 0.95 | 1.40 |
| | App. | 8 | 42.9 | 165.4 | 829.8 | 1.30 | 1.470 | 0.95 | 1.40 |
| | Camp. | 9 | 42.9 | 179.6 | 820.1 | 1.30 | 1.472 | 0.95 | 1.40 |
| | App. | 10 | 42.9 | 184.5 | 816.8 | 1.30 | 1.472 | 0.95 | 1.40 |
| | Camp. | 11 | 42.9 | 198.7 | 807.1 | 1.30 | 1.474 | 0.95 | 1.40 |
| 3 | App. | 12 | 42.9 | 203.5 | 803.9 | 1.30 | 1.474 | 0.95 | 1.40 |
| | Anc. | FP3 | 42.9 | 220.6 | 792.2 | 1.30 | 1.478 | 0.95 | 1.40 |
| | Camp. | 13 | 58.8 | 231.0 | 783.3 | 1.30 | 1.484 | 0.95 | 1.41 |
| | Camp. | 14 | 58.8 | 238.7 | 776.7 | 1.30 | 1.428 | 0.95 | 1.36 |
| | App. | 15 | 58.8 | 241.9 | 774.0 | 1.30 | 1.428 | 0.95 | 1.36 |
| | Camp. | 16 | 58.8 | 256.2 | 761.8 | 1.30 | 1.430 | 0.95 | 1.36 |
| | App. | 17 | 58.8 | 261.0 | 757.7 | 1.30 | 1.430 | 0.95 | 1.36 |
| | Camp. | 18 | 58.8 | 265.7 | 753.7 | 1.30 | 1.432 | 0.95 | 1.36 |
| | App. | 19 | 58.8 | 270.5 | 749.6 | 1.30 | 1.432 | 0.95 | 1.36 |
| | Camp. | 20 | 58.8 | 284.8 | 737.3 | 1.30 | 1.434 | 0.95 | 1.36 |
| | App. | 21 | 58.8 | 289.5 | 733.3 | 1.30 | 1.434 | 0.95 | 1.36 |
| | Camp. | 22 | 58.8 | 294.3 | 729.2 | 1.30 | 1.436 | 0.95 | 1.36 |
| | App. | 23 | 58.8 | 299.1 | 725.1 | 1.30 | 1.436 | 0.95 | 1.36 |
| | Camp. | 24 | 58.8 | 313.5 | 712.8 | 1.30 | 1.438 | 0.95 | 1.37 |
| | App. | 25 | 58.8 | 318.3 | 708.7 | 1.30 | 1.438 | 0.95 | 1.37 |
| | Camp. | 26 | 58.8 | 332.5 | 696.5 | 1.30 | 1.440 | 0.95 | 1.37 |
| 4 | App. | 27 | 58.8 | 337.2 | 692.5 | 1.30 | 1.440 | 0.95 | 1.37 |
| | Camp. | 28 | 58.8 | 342.1 | 688.3 | 1.30 | 1.442 | 0.95 | 1.37 |
| | App. | 29 | 58.8 | 346.9 | 684.2 | 1.30 | 1.442 | 0.95 | 1.37 |
| | Anc. | FP4 | 58.8 | 358.8 | 674.0 | 1.30 | 1.444 | 0.95 | 1.37 |
| | Camp. | 30 | 31.7 | 365.7 | 670.4 | 1.30 | 1.448 | 0.95 | 1.38 |
| | Camp. | 31 | 31.7 | 383.8 | 660.9 | 1.30 | 1.394 | 0.95 | 1.32 |
| | App. | 32 | 31.7 | 387.7 | 658.9 | 1.30 | 1.394 | 0.95 | 1.32 |
| | Camp. | 33 | 31.7 | 407.7 | 648.4 | 1.30 | 1.396 | 0.95 | 1.33 |
| | App. | 34 | 31.7 | 411.7 | 646.3 | 1.30 | 1.396 | 0.95 | 1.33 |
| | Camp. | 35 | 31.7 | 422.1 | 640.8 | 1.30 | 1.398 | 0.95 | 1.33 |
| | App. | 36 | 25.6 | 423.7 | 640.1 | 1.30 | 1.398 | 0.95 | 1.33 |
| | Camp. | 37 | 25.6 | 442.3 | 632.0 | 1.30 | 1.398 | 0.95 | 1.33 |
| | App. | 38 | 25.6 | 446.4 | 630.3 | 1.30 | 1.398 | 0.95 | 1.33 |
| | Camp. | 39 | 25.6 | 452.4 | 627.7 | 1.30 | 1.400 | 0.95 | 1.33 |
| | App. | 40 | 25.6 | 454.4 | 626.8 | 1.30 | 1.400 | 0.95 | 1.33 |
| 5 | Anc. | FP5 | 25.6 | 465.3 | 622.1 | 1.30 | 1.400 | 0.95 | 1.33 |
| | Camp. | 41 | 8.3 | 471.3 | 621.2 | 1.30 | 1.410 | 0.95 | 1.34 |
| | Camp. | 42 | 8.3 | 487.1 | 618.9 | 1.30 | 1.348 | 0.95 | 1.28 |
| | App. | 43 | 8.3 | 491.1 | 618.4 | 1.30 | 1.348 | 0.95 | 1.28 |
| | Camp. | 44 | 8.3 | 527.0 | 613.1 | 1.30 | 1.350 | 0.95 | 1.28 |
| | App. | 45 | 8.3 | 531.1 | 612.6 | 1.30 | 1.350 | 0.95 | 1.28 |
| 6 | Anc. | FP6 | 8.3 | 542.1 | 611.0 | 1.30 | 1.350 | 0.95 | 1.28 |
| | Camp. | 46 | 16.4 | 547.1 | 609.5 | 1.30 | 1.410 | 0.95 | 1.34 |
| | Camp. | 47 | 16.4 | 555.2 | 607.3 | 1.30 | 1.350 | 0.95 | 1.28 |
| | App. | 48 | 16.4 | 559.1 | 606.1 | 1.30 | 1.350 | 0.95 | 1.28 |
| | Anc. | C | 16.4 | 565.8 | 604.3 | 1.30 | 1.350 | 0.95 | 1.28 |

Tabella 10 Carico vento – condotta 1

| Tr. | Tipo | Sez. | α | Svil. | Q | C_p | D_e | q_p | p_w |
|-----|-------|------|----------|-------|------------|-------|-------|----------------------|--------|
| [-] | [-] | [-] | [°] | [m] | [m.s.l.m.] | [-] | [m] | [kN/m ²] | [kN/m] |
| | Anc. | FP1 | 22.8 | 45.0 | 888.1 | 1.30 | 1.568 | 0.95 | 1.49 |
| 1 | Camp. | 1 | 22.8 | 51.1 | 885.7 | 1.30 | 1.606 | 0.95 | 1.53 |
| | Camp. | 2 | 22.8 | 106.0 | 864.4 | 1.30 | 1.568 | 0.95 | 1.49 |
| | App. | 3 | 22.8 | 111.5 | 862.3 | 1.30 | 1.568 | 0.95 | 1.49 |
| | Anc. | FP2 | 22.8 | 126.1 | 856.6 | 1.30 | 1.568 | 0.95 | 1.49 |
| 2 | Camp. | 4 | 42.9 | 133.3 | 851.7 | 1.30 | 1.506 | 0.95 | 1.43 |
| | Camp. | 5 | 42.9 | 170.2 | 826.5 | 1.30 | 1.468 | 0.95 | 1.39 |
| | App. | 6 | 42.9 | 175.0 | 823.3 | 1.30 | 1.468 | 0.95 | 1.39 |
| | Camp. | 7 | 42.9 | 198.7 | 807.1 | 1.30 | 1.470 | 0.95 | 1.40 |
| | App. | 8 | 42.9 | 203.4 | 803.9 | 1.30 | 1.470 | 0.95 | 1.40 |
| | Anc. | FP3 | 42.9 | 220.6 | 792.2 | 1.30 | 1.470 | 0.95 | 1.40 |
| 3 | Camp. | 9 | 58.8 | 231.0 | 783.3 | 1.30 | 1.474 | 0.95 | 1.40 |
| | App. | 10 | 58.8 | 241.8 | 774.1 | 1.30 | 1.420 | 0.95 | 1.35 |
| | Camp. | 11 | 58.8 | 246.8 | 769.9 | 1.30 | 1.420 | 0.95 | 1.35 |
| | App. | 12 | 58.8 | 270.7 | 749.4 | 1.30 | 1.422 | 0.95 | 1.35 |
| | Camp. | 13 | 58.8 | 275.4 | 745.3 | 1.30 | 1.422 | 0.95 | 1.35 |
| | App. | 14 | 58.8 | 289.7 | 733.1 | 1.30 | 1.424 | 0.95 | 1.35 |
| | Camp. | 15 | 58.8 | 294.4 | 729.1 | 1.30 | 1.424 | 0.95 | 1.35 |
| | App. | 16 | 58.8 | 318.2 | 708.8 | 1.30 | 1.426 | 0.95 | 1.35 |
| | Camp. | 17 | 58.8 | 322.9 | 704.7 | 1.30 | 1.426 | 0.95 | 1.35 |
| | App. | 18 | 58.8 | 337.2 | 692.5 | 1.30 | 1.428 | 0.95 | 1.36 |
| | Camp. | 19 | 58.8 | 342.0 | 688.4 | 1.30 | 1.428 | 0.95 | 1.36 |
| | App. | 20 | 58.8 | 346.8 | 684.3 | 1.30 | 1.430 | 0.95 | 1.36 |
| | Anc. | FP4 | 58.8 | 358.8 | 674.0 | 1.30 | 1.430 | 0.95 | 1.36 |
| 4 | Camp. | 22 | 31.7 | 365.7 | 670.4 | 1.30 | 1.442 | 0.95 | 1.37 |
| | Camp. | 23 | 31.7 | 422.1 | 640.8 | 1.30 | 1.378 | 0.95 | 1.31 |
| | App. | 24 | 25.6 | 423.2 | 640.3 | 1.30 | 1.378 | 0.95 | 1.31 |
| | App. | 25 | 25.6 | 455.0 | 626.6 | 1.30 | 1.380 | 0.95 | 1.31 |
| | Camp. | 26 | 25.6 | 460.7 | 624.1 | 1.30 | 1.380 | 0.95 | 1.31 |
| | Anc. | FP5 | 25.6 | 465.3 | 622.1 | 1.30 | 1.380 | 0.95 | 1.31 |
| 5 | Camp. | 27 | 8.3 | 471.3 | 621.2 | 1.30 | 1.394 | 0.95 | 1.32 |
| | App. | 28 | 8.3 | 530.9 | 612.6 | 1.30 | 1.330 | 0.95 | 1.26 |
| | Camp. | 29 | 8.3 | 536.5 | 611.8 | 1.30 | 1.330 | 0.95 | 1.26 |
| | Anc. | FP6 | 8.3 | 542.1 | 611.0 | 1.30 | 1.330 | 0.95 | 1.26 |
| 6 | Camp. | 30 | 11.6 | 547.1 | 609.9 | 1.30 | 1.398 | 0.95 | 1.33 |
| | Camp. | 31 | 11.6 | 563.1 | 606.7 | 1.30 | 1.332 | 0.95 | 1.27 |
| | App. | 32 | 11.6 | 567.1 | 605.9 | 1.30 | 1.332 | 0.95 | 1.27 |
| | Anc. | C | 11.6 | 575.0 | 604.4 | 1.30 | 1.332 | 0.95 | 1.27 |

Tabella 11 Carico vento – condotta 3

5.6 Effetti dovuti all'attrito

Per le condotte con giunti di dilatazione risulta necessario valutare le azioni derivanti dall'attrito sulle selle di appoggio e nei giunti di dilatazione.

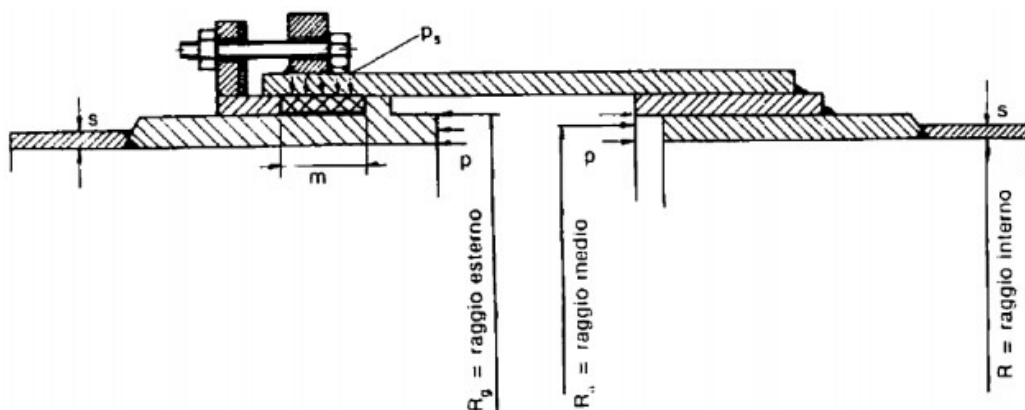


Figura 8 Schema delle sollecitazioni agenti in corrispondenza dei giunti di dilatazione

Per le selle di appoggio la forza assiale agente sulla condotta (F_1) sarà calcolata con la relazione:

$$F_1 = f_1 P_{\text{tot,sella}}$$

Dove:

- f_1 Coefficiente di attrito tra l'elemento della sella solidale alla condotta e il controprezzo solidale al terreno;
- $P_{\text{tot,sella}}$ Peso totale gravante sulla sella per effetto della massa del tubo, dell'acqua e per il carico neve.

Per i giunti di dilatazione la forza assiale agente (F_2) sarà calcolata con la relazione:

$$F_2 = f_2 A_t p_g$$

dove:

- f_2 Coefficiente di attrito sul giunto;
- A_t Area della corona circolare ricavata nello spazio anulare del giunto;
- p_g Pressione statica agente.

I valori dei coefficienti di attrito sono definiti in accordo alle indicazioni riportate nel par. 2 dell'appendice II B delle C.E.C.T.:

- $f_1 = 0.3$ Coeff. attrito nel caso di strisciamento in presenza di lubrificazione;
- $f_1 = 0.4$ Coeff. attrito nel caso di strisciamento in assenza di lubrificazione;
- $f_2 = 0.3$ Coeff. attrito nel caso di strisciamento nei giunti di dilatazione.

6. COMBINAZIONE DEI CARICHI

6.1 Metodi di verifica alle tensioni ammissibili

6.1.1 Condizione di carico normale

Per le verifiche strutturali della condotta in condizione di carico normale, si adotteranno le sollecitazioni generate dalla seguente combinazione di carico:

$$S_d = G_{dead} \gamma_{dead} + G_{water} \gamma_{water} + G_{press} \gamma_{press} + G_{frict} \gamma_{frict} + Q_{wind} \gamma_{wind} + Q_{snow} \gamma_{snow}$$

Dove i coefficienti di combinazione (γ_i) sono assunti pari a:

| | γ_{dead} | γ_{water} | γ_{press} | γ_{frict} | γ_{wind} | γ_{snow} |
|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| COMB. 1 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

Tabella 12 Coefficienti combinazione di carico – Condizione Normale

I carichi considerati sono stati indicati secondo la seguente nomenclatura:

- DEAD Peso permanente strutturale;
- WATER Peso dell'acqua contenuta nella condotta;
- PRESS Pressione interna massima statica (pressione idrostatica + colpo d'ariete);
- FRICT Azione derivante dall'attrito in corrispondenza dei giunti di dilatazione e delle selle di appoggio;
- WIND Azione del vento;
- SNOW Azione della neve.

6.1.2 Condizione di carico saltuaria

Per le verifiche strutturali della condotta in condizione di carico saltuaria, si adotteranno le sollecitazioni generate dalla seguente combinazione di carico:

$$S_d = G_{dead} \gamma_{dead} + G_{water} \gamma_{water} + G_{press} \gamma_{press} + G_{frict} \gamma_{frict} + Q_{wind} \gamma_{wind} + Q_{snow} \gamma_{snow}$$

I coefficienti di combinazione (γ_i) sono assunti pari a:

| | γ_{dead} | γ_{water} | γ_{press} | γ_{frict} | γ_{wind} | γ_{snow} |
|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|
| COMB. 2 | 1.00 | 1.00 | 0.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

Tabella 13 Coefficienti combinazione di carico – Condizione Saltuaria

6.1.3 Condizione di carico eccezionale

Per le verifiche strutturali della condotta in condizione di carico eccezionale, si adotteranno le sollecitazioni generate dalla seguente combinazione di carico:

$$S_d = G_{dead} \gamma_{dead} + G_{water} \gamma_{water} + G_{press} \gamma_{press} + G_{frict} \gamma_{frict} + E_{earth} \gamma_{earth}$$

I coefficienti di combinazione (γ_i) sono assunti pari a:

| | γ_{dead} | γ_{water} | γ_{press} | γ_{frict} | γ_{earth} |
|----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| COMB. 3 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |

Tabella 14 Coefficienti combinazione di carico – Condizione Eccezionale

dove:

- EARTH Azione sismica.

7. ANALISI STRUTTURALE DELLA CONDOTTA

7.1 Definizione delle sezioni di calcolo

Per ogni tratta lungo lo sviluppo della condotta saranno analizzate diverse sezioni:

- Sezione di tubo liscio in campata (A);
- Sezione di tubo in corrispondenza delle selle di appoggio (B).

Schematicamente e per maggiore chiarezza, le sezioni tipologiche di verifica sono rappresentate nella seguente figura:

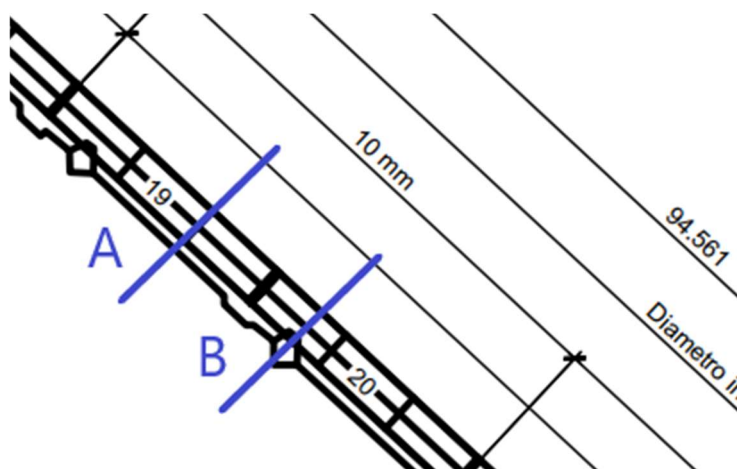


Figura 9 Schematizzazione sezione di verifica in campata (A) e in corrispondenza dell'appoggio (B)

Per ciascuna delle suddette sezioni, le verifiche saranno effettuate nelle configurazioni di carico più sfavorevoli.

7.1 Tubazione in campata

7.1.1 Efficienza dei giunti saldati

Per tenere in considerazione l'effetto della presenza di giunzioni saldate non sottoposte a Controlli Non Distruttivi, le tensioni equivalenti dovranno essere corrette rispetto alle tensioni equivalenti teoriche mediante un opportuno coefficiente di efficienza della saldatura (z_s). I valori di tale coefficiente vengono definiti in accordo alla tabella 3-3 del manuale ASCE n° 79 "Steel penstocks" e alla tabella 5.6-1 della norma EN 13445-3:

- $z_s = 0.7$ In assenza di controlli non distruttivi (UT o RT);
- $z_s = 0.85$ Nel caso di controlli non distruttivi eseguiti in modo parziale;
- $z_s = 1$ Nel caso di controlli non distruttivi UT e/o RT, con esito positivo, sul 100% delle saldature.

Tale coefficiente sarà applicato alle tensioni, circonferenziali e longitudinali, adottando la formulazione seguente:

$$\sigma_{j,(z)} = \sigma_j / Z_s$$

Nel caso delle condotte 1 e 2 i giunti della condotta sono stati eseguiti a processo ossiacetilenico fino allo spessore di 21mm e oltre tale spessore la tecnica di saldatura riscontrata nell'ispezione visiva è per bollitura (saldatura autogena per pressione). Le saldature al montaggio risultano eseguite elettricamente. Il coefficiente di efficienza delle saldature fu assunto pari a $z_s = 0.85$ (rif. [1]).

Viceversa, per la condotta 3 (costruita sul finire degli anni '50) non sono noti i coefficienti di efficienza delle saldature assunti in fase di calcolo. Per tale condotta si assume un coefficiente di efficienza dei giunti saldati pari a $z_s = 1.0$.

7.1.2 Tensioni circonferenziali

7.1.2.1 Tensioni dovute alla pressione interna

Le sollecitazioni circonferenziali dovute alla pressione interna sono date dalla formula di Mariotte:

$$\sigma_{c1} = \frac{p D}{2 s}$$

Dove:

- p Pressione interna;
- D Diametro interno della condotta;
- s Spessore della condotta.

Si osserva che saranno analizzate diverse sezioni lungo lo sviluppo longitudinale della condotta con i rispettivi valori di pressione.

7.1.2.2 Tensioni circonferenziali provocate dall'ovalizzazione della condotta (dipendente dai processi produttivi e dalle sollecitazioni di trasporto e messa in opera)

I processi produttivi e le fasi di messa in opera potrebbero determinare delle ovalizzazioni indesiderate della condotta. Tali ovalizzazioni generano incrementi delle tensioni circonferenziali che possono essere valutate in accordo alle prescrizioni indicate al paragrafo 2.2.1 del documento "*ILVA - Condotte in acciaio per grandi acquedotti*". In particolare, tali incrementi delle tensioni circonferenziali possono essere valutati considerando la seguente figura:

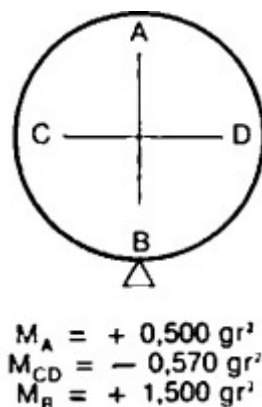


Figura 10 Calcolo dei momenti di ovalizzazione delle condotte dovuti al peso proprio della condotta

$$\sigma_f = M / W$$

Dove:

- M Momento flettente da valutare secondo i valori indicati nelle figure precedenti;
- $W = s^2 b / 6$ Modulo di resistenza a flessione di un tratto di condotta, di spessore s , avente lunghezza unitaria ($b=1\text{m}$).

Si osserva che in accordo al paragrafo 2.2.2 b) del documento "ILVA - Condotte in acciaio per grandi acquedotti", la pressione interna ha l'effetto di ridurre il valore dei momenti ovalizzanti (teoria di Lazard) e il coefficiente di riduzione è pari a:

$$\alpha = 1 / (1 + (p r^3) / (3 E s^3/12))$$

Pertanto, la sollecitazione circonferenziale dovuta alla flessione della condotta diviene:

$$\sigma'_{c2} = \alpha \sigma_f$$

7.1.3 Tensioni longitudinali

7.1.3.1 Tensioni dovute al peso del tubo e al peso dell'acqua

Le sollecitazioni longitudinali M ed N sono desunte direttamente dai modelli di calcolo a elementi finiti adottati. Si valutano, dunque, le tensioni longitudinali determinate dal momento flettente e dall'azione assiale agenti lungo la condotta:

$$\sigma_{L1} = \pm M \frac{y}{J}$$

$$\sigma_{L2} = \pm \frac{N}{A}$$

Il momento flettente dovuto al peso proprio è calcolato direttamente dal codice di calcolo assumendo la geometria della condotta nelle diverse tratte modellate e un peso specifico dell'acciaio $\gamma_s = 78.5$ kN/m³. Il peso dell'acqua viene invece applicato come un carico distribuito uniforme agente in direzione ortogonale all'asse della condotta.

7.1.3.2 Tensioni dovute all'attrito sulle selle d'appoggio

Le tensioni longitudinali dovute all'attrito in corrispondenza delle selle di appoggio valgono:

$$\sigma_{L3} = \pm \frac{f_1 P_{tot,sella}}{2\pi R_m s}$$

dove:

- f_1 Coefficiente di attrito tra l'elemento della sella solidale alla condotta e il controprezzo solidale alla sella;
- s Spessore della condotta;
- R_m Raggio medio della condotta;
- $P_{tot,sella}$ Peso totale gravante sulla sella.

7.1.3.3 Tensioni dovute alla spinta idrostatica nello spazio anulare dei giunti di dilatazione

Le tensioni longitudinali (locali) dovute all'effetto della spinta idrostatica agente in corrispondenza dello spazio anulare dei giunti di dilatazione si valutano considerando la formulazione riportata al paragrafo 3.1.1.B.g del documento "Condotte in acciaio per grandi acquedotti":

$$\sigma_{L4} = \pm \frac{R_m b P_E}{R_i s}$$

dove:

- R_m Raggio medio della sezione su cui agisce la pressione di esercizio P_E ;
- s Spessore della condotta;
- R_g Raggio esterno del giunto;
- R_i Raggio interno del giunto;
- $b = R_g - R_i$

7.1.3.4 Tensioni dovute all'attrito nel giunto di dilatazione

Le tensioni longitudinali (locali) dovute all'effetto di attrito agente in corrispondenza dei giunti di dilatazione si valutano considerando la formulazione riportata al paragrafo 3.1.1.B.h del documento "Condotte in acciaio per grandi acquedotti":

dove:

- m Lunghezza scatola a stoppa;
- f Coefficiente d'attrito tra guarnizione e tubo (in genere pari a 0.3);
- P_s Pressione di serraggio del premistoppa
- R_g Raggio esterno del giunto;
- R_i Raggio interno del giunto;

Nell'ipotesi che la pressione di serraggio del premistoppa sia uguale alla pressione di esercizio ($P = P_s$) e che $R_a \sim R_i$, tale sollecitazione longitudinale diviene pari a:

$$\sigma_{L5} = \pm 0.6 \frac{P m}{s}$$

7.2 Selle di appoggio e ancoraggi metallici con rinforzi

Le condotte in esame presentano le seguenti tipologie di appoggi intermedi:

- Ancoraggi metallici con rinforzi Condotte 1 – 2 nel tratto compreso tra i blocchi di ancoraggio FP1 e FP2;
Condotta 3 nel tratto compreso tra i blocchi di ancoraggio FP1 e FP3.
- Selle di appoggio in calcestruzzo Per i tratti rimanenti delle condotte.

7.2.1 Selle di appoggio in calcestruzzo

La valutazione delle sollecitazioni nelle sezioni in corrispondenza delle selle di appoggio in calcestruzzo viene eseguita in accordo alla formulazione riportata al paragrafo 3.1.3 B) del documento “Condotte in acciaio per grandi acquedotti – Progettazione di tubazioni saldate, ILVA”, che richiama la formulazione introdotta nella pubblicazione “Valves Gates and Steel Conducts: Stiffener ring coefficients” del Bureau of Reclamations. In dettaglio, nella sezione di appoggio, il momento flettente radiale (M) è dato dalla formula:

$$M = c \cdot P_{t+W} \cdot R_i$$

dove:

- P_{t+w} Peso del tubo pieno d'acqua gravante sull'appoggio;
- R_i Raggio interno della condotta;

- c coefficiente ricavabile dall'articolo "Test of cylindrical shells" (del bollettino dell'università dell'Illinois – USA – settembre 1941).

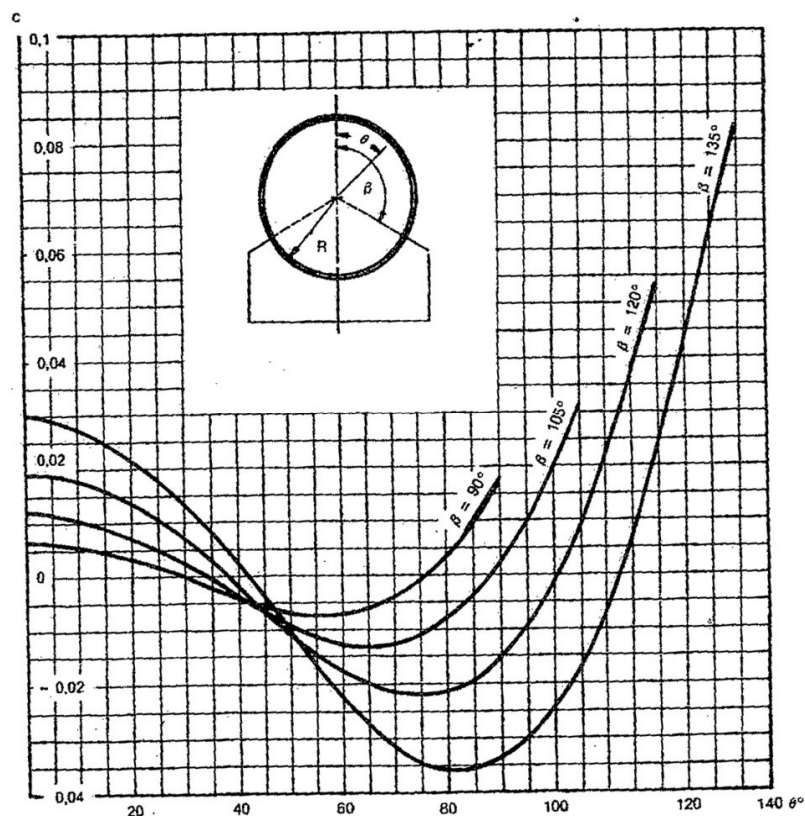


Figura 11 Determinazione del coefficiente c (appoggio su selle)

Nei calcoli, cautelativamente, si assumerà il valore massimo del coefficiente $c = 0.082$, per un angolo $\beta = 135^\circ$ ed un angolo $\vartheta = 135^\circ$. Si combinano così le tensioni circonferenziali risultanti con le massime tensioni longitudinali, le quali non necessariamente si sviluppano su tale porzione trasversale di tubazione.

Le tensioni circonferenziali si valutano mediante la seguente formula:

$$\sigma_{c3,s} = \frac{M}{0.8L} \frac{6}{s^2} \cos \alpha$$

dove:

- L Interasse tra le selle;
- α Inclinazione della condotta;
- s Spessore della condotta (della sola camicia o dell'anello in caso di tubazione blindata).

7.2.2 Ancoraggi metallici con rinforzi

La valutazione delle sollecitazioni nelle sezioni in corrispondenza degli ancoraggi metallici viene eseguita in accordo alla formulazione riportata al paragrafo 3.1.3 A) del documento "Condotte in acciaio per grandi acquedotti – Progettazione di tubazioni saldate, ILVA", che richiama la formulazione introdotta nella pubblicazione "Valves Gates and Steel Conducts: Stiffener ring coefficients" del Bureau of Reclamations.

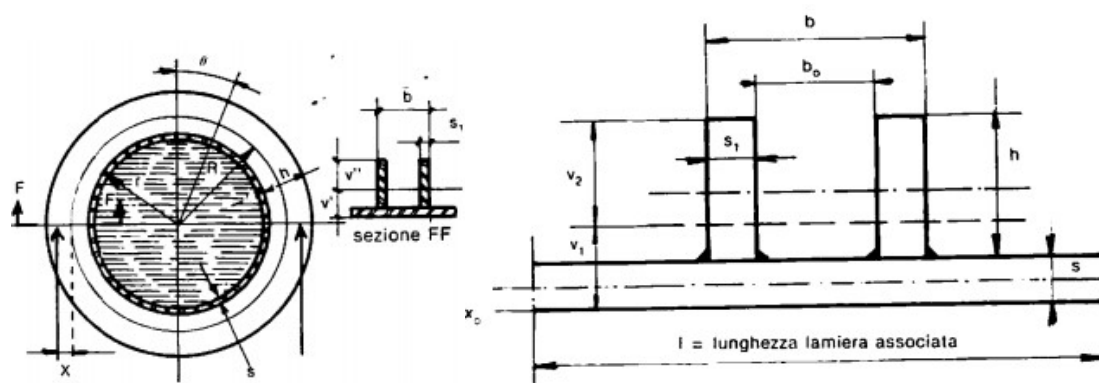


Figura 12 Caratteristiche anelli di rinforzo in corrispondenza degli ancoraggi metallici

La tensione circonferenziale determinata dal momento flettente agente in corrispondenza dell'appoggio è pari a:

$$\sigma_{c,3M} = \frac{M_{(\vartheta)} V}{J} = (Q \cos(\alpha) (R K_3 + X K_4)) \frac{V}{J}$$

dove:

- J / V È il modulo di resistenza nel punto considerato di angolo ϑ ;
- $M_{(\vartheta)}$ È il momento sollecitante nel punto considerato di angolo ϑ ;
- α Inclinazione della condotta;
- Q È il carico totale dovuto al peso scaricato sull'appoggio dal tubo pieno d'acqua;
- R È il raggio dell'asse neutro dell'assieme rinforzo lamiera;
- X È la distanza tra il punto di applicazione della reazione all'appoggio e l'asse neutro dell'assieme rinforzo lamiera;
- K_3 e K_4 Sono coefficienti variabili in funzione dell'angolo ϑ che la sezione considerata determina con l'asse verticale del tubo, i cui valori sono riportati nella

| θ° | $N = Q (K_1 + BK_2)$ | | $M = Q (RK_3 + XK_4)$ | | $S = Q (K_5 + CK_6)$ | |
|---|----------------------|----------|-----------------------|----------|----------------------|----------|
| | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | K_5 | K_6 |
| 0 | -.238732 | +.318310 | +.011267 | -.068310 | 0 | 0 |
| 15 | -.241384 | +.307464 | +.008618 | -.057464 | +.019651 | +.082385 |
| 30 | -.248415 | +.275664 | +.001585 | -.025665 | +.032380 | +.159155 |
| 45 | -.257198 | +.225079 | -.007198 | +.024921 | +.032117 | +.225079 |
| 60 | -.263704 | +.159155 | -.013704 | +.090845 | +.014417 | +.275664 |
| 75 | -.263023 | +.082385 | -.013023 | +.167616 | -.022945 | +.307463 |
| 90 - | -.250000 | 0 | 0 | +.250000 | -.079577 | +.318310 |
| 90 + | +.250000 | 0 | 0 | -.250000 | -.079577 | +.318310 |
| 105 | +.263023 | -.082385 | +.013023 | -.167616 | -.022945 | +.307463 |
| 120 | +.263704 | -.159155 | +.013704 | -.090845 | +.014417 | +.275664 |
| 135 | +.257198 | -.225079 | +.007198 | -.024921 | +.032117 | +.225079 |
| 150 | +.248415 | -.275664 | -.001585 | +.025665 | +.032380 | +.159155 |
| 165 | +.241384 | -.307464 | -.008618 | +.057464 | +.019651 | +.082385 |
| 180 | +.238732 | -.318310 | -.011267 | +.068310 | 0 | 0 |
| segno + = trazione segno - = compressione S = sforzo radiale di taglio nell'anello di rinforzo. Tale valore, però, essendo assai ridotto rispetto ad N e M, viene generalmente trascurato | | | | | | |

Tabella 15 Coefficienti K_1 , K_2 , K_3 e K_4 per il calcolo delle tensioni circonferenziali

La tensione circonferenziale determinata dal dall'azione normale agente in corrispondenza dell'appoggio è pari a:

$$\sigma_{c,3N} = \frac{N_{(\theta)}}{A} = (Q \cos(\alpha) (K_1 + B K_2)) \frac{1}{A}$$

$$B = \frac{r}{R} \left(1 - \frac{2K}{r} \right) - \frac{X}{R}$$

$$K = \frac{r}{L} \left(\frac{v L^2}{12 r^2} + (1 - v^2) \left(1 - \frac{Q_s}{2Q} \right) + \frac{(2 + v)L}{4 \beta r^2} \right)$$

dove:

- A È l'area della sezione rinforzo-lamiera associata;
- $N_{(\theta)}$ È l'azione assiale nel punto considerato di angolo θ ;
- α Inclinazione della condotta;
- Q È il carico totale dovuto al peso scaricato sull'appoggio dal tubo pieno d'acqua;

- r È il raggio esterno del tubo;
- R È il raggio dell'asse neutro dell'assieme rinforzo lamiera;
- X È la distanza tra il punto di applicazione della reazione all'appoggio e l'asse neutro dell'assieme rinforzo lamiera;
- B Parametro funzione delle caratteristiche geometriche del rinforzo;
- β Parametro pari a $\beta = 1.285 / (rs)^{0.5}$;
- s Spessore della parete del tubo;
- K Parametro;
- ν Coefficiente di Poisson;
- Q_s Componente verticale del peso della condotta vuota gravante sull'appoggio;
- Q Componente verticale del peso della condotta piena d'acqua gravante sull'appoggio;
- L Distanza tra gli appoggi;
- K_1 e K_2 Sono coefficienti variabili in funzione dell'angolo ϑ che la sezione considerata determina con l'asse verticale del tubo, i cui valori sono riportati nella Tabella 15.

8. MODELLI DI CALCOLO

8.1 Premessa

La modellazione strutturale della condotta è stata sviluppata considerando le seguenti ipotesi:

- I blocchi di ancoraggio ai vertici plano-altimetrici e le selle intermedie d'appoggio sono considerate come vincoli non cedevoli;
- Lo schema statico di una generica livelletta è quello di una trave continua su più appoggi, incastrata in corrispondenza del blocco di ancoraggio al vertice di valle e con estremo libero in corrispondenza del giunto di dilatazione di monte;
- Si assume che l'asse della trave coincida con l'asse medio della tubazione;
- Le selle hanno caratteristiche anti-ribaltamento ai fini sismici, in maniera da impedire i movimenti della condotta nelle direzioni trasversali all'asse medio, in tal modo, la singola sella consente i soli spostamenti lungo l'asse della tubazione secondo un vincolo ad attrito.

8.2 Modellazione della condotta

La condotta, nel suo sviluppo longitudinale, è stata suddivisa in 6 tratti, ciascuna delle quali è caratterizzata da diversa pendenza (variabile tra 8.4° e 58.8°) ed è delimitata a monte e a valle da un blocco di ancoraggio. Ciascuna tratta della condotta è stata modellata con elementi di tipo "Beam". In corrispondenza delle selle d'appoggio è stato introdotto un vincolo alla traslazione in direzione perpendicolare all'asse della condotta, mentre in corrispondenza dei blocchi ancoraggi sono stati adottati vincoli di incastro. Inoltre, in corrispondenza dei giunti di dilatazione posti in prossimità dell'ancoraggio di monte, sono stati introdotti degli svincoli assiali, tramite "beam end release" tali da modellare il comportamento a "manicotto".

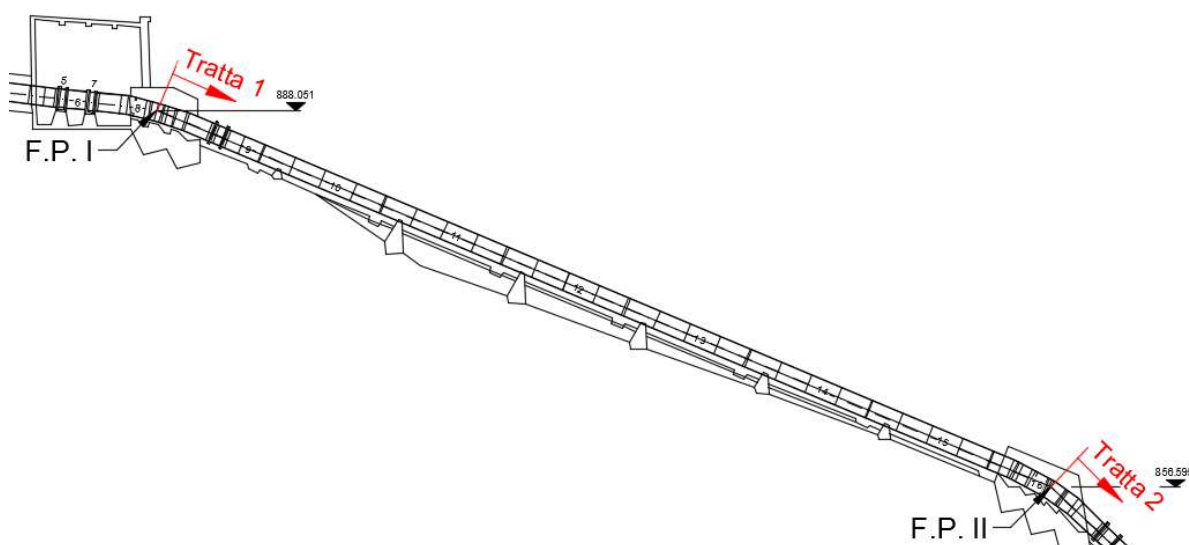


Figura 13 Profilo longitudinale delle condotte – Tratta 1

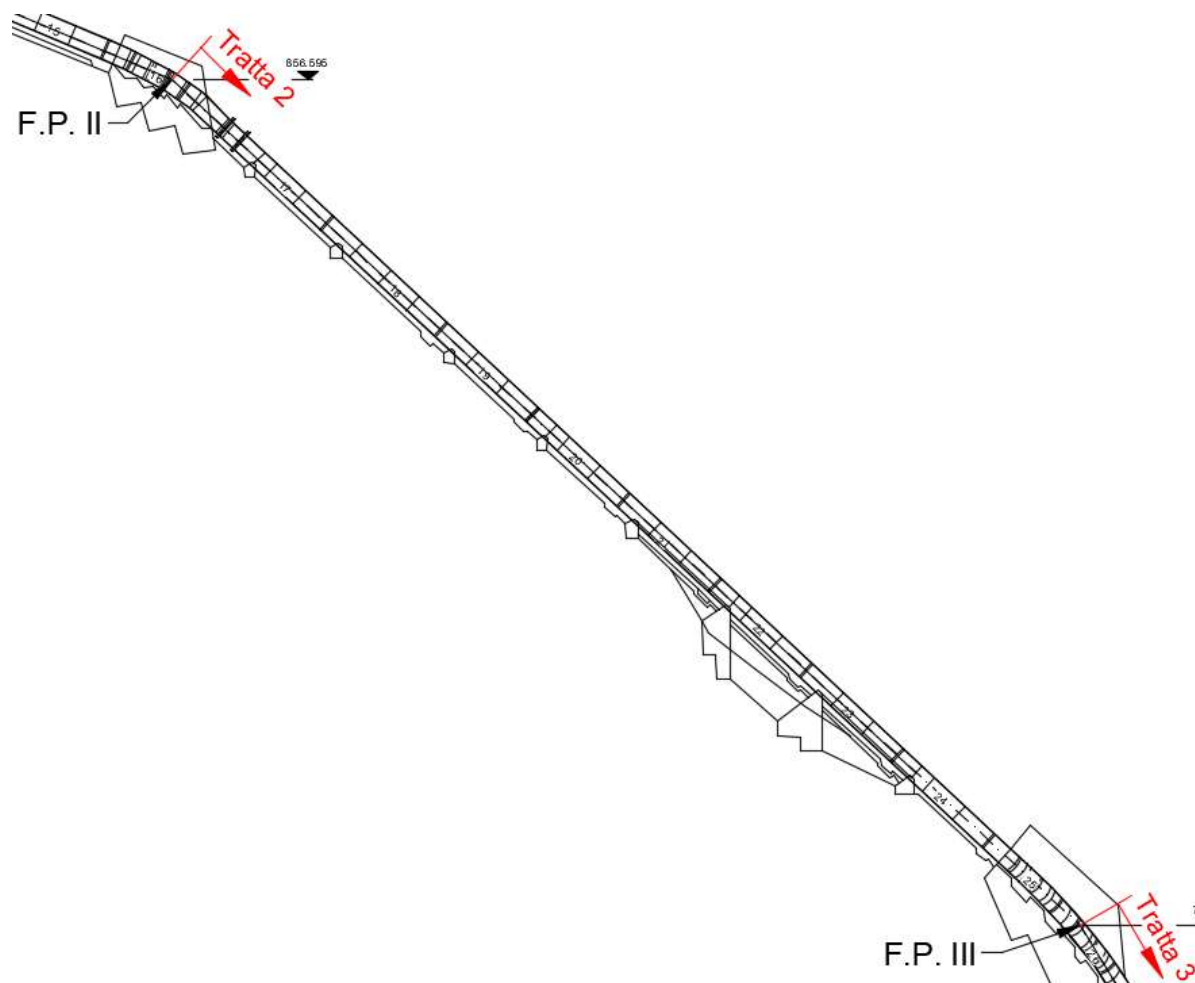


Figura 14 Profilo longitudinale delle condotte – Tratta 2



Figura 15 Profilo longitudinale delle condotte – Tratta 3

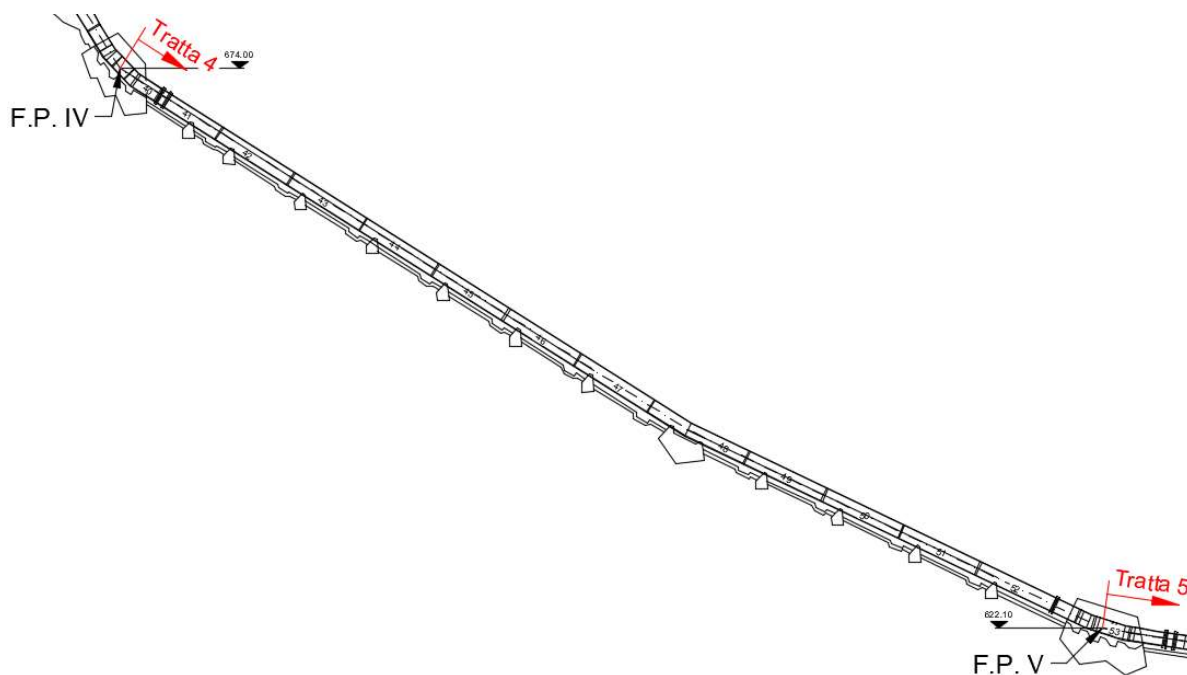


Figura 16 Profilo longitudinale delle condotte – Tratta 4

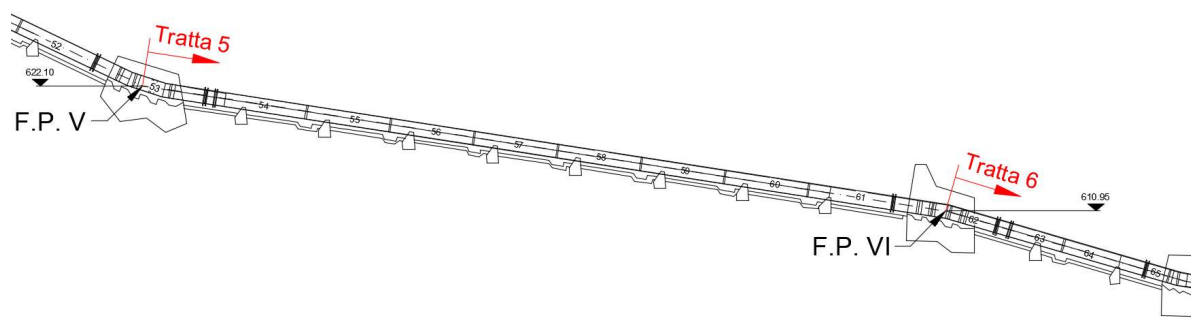


Figura 17 Profilo longitudinale delle condotte – Tratta 5 e 6

Nei grafici che seguono sono riportate le azioni interne sollecitanti la condotta relativi ai seguenti carichi elementari:

- Peso proprio della tubazione vuota;
- Peso dell'acqua all'interno della tubazione.

8.3 Condotta 1 – Tratta 1

8.3.1 Definizioni geometriche

Si considera il tratto di condotta tra il blocco di ancoraggio FP1 e il blocco di ancoraggio FP2. La tratta 1 ha una lunghezza complessiva di 81.053m, è caratterizzata da una pendenza pari a 22.84° e, appoggia su ancoraggi metallici disposti a interassi variabili. Lo spessore della tubazione nella tratta considerata è costante e pari a 8mm. Il diametro interno della tubazione è pari a 1550mm.

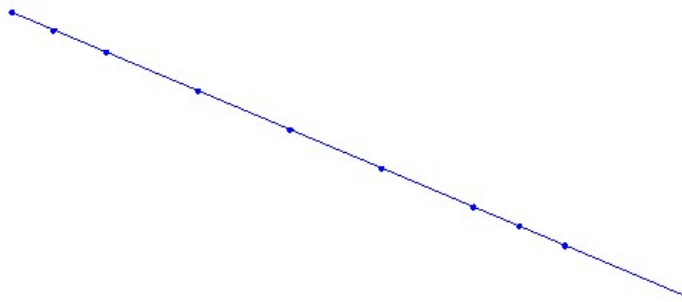


Figura 18 Geometria del modello di calcolo – Condotta 1 e 2 – Tratta 1

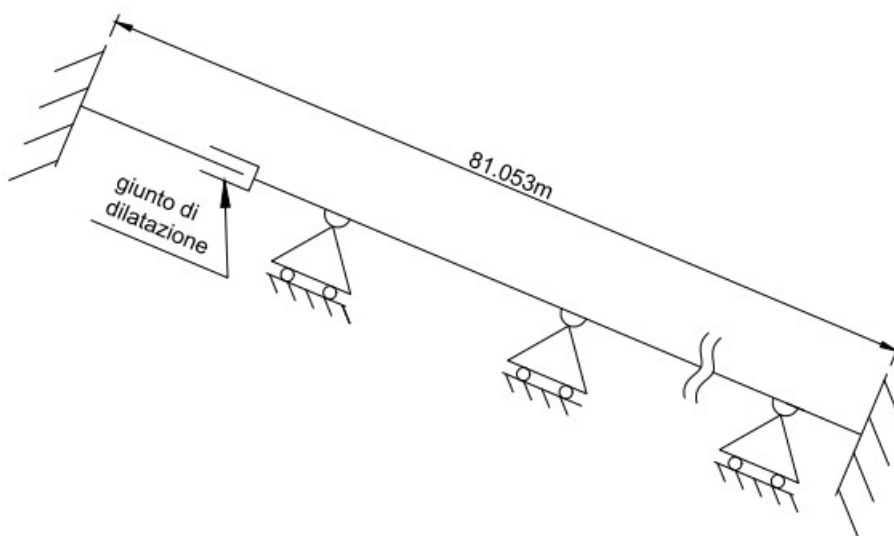


Figura 19 Schema statico della tratta – Condotta 1 e 2 – Tratta 1

Considerando lo schema statico del modello di calcolo si possono notare i vincoli a incastro alle due estremità della tratta, gli appoggi metallici intermedi modellati in semplice appoggio e il giunto di dilatazione modellato mediante un manicotto.

8.3.2 Sollecitazioni risultanti

Peso proprio strutturale

Si riportano a seguire i diagrammi del momento flettente e dell'azione assiale relativi all'effetto del peso proprio della condotta.

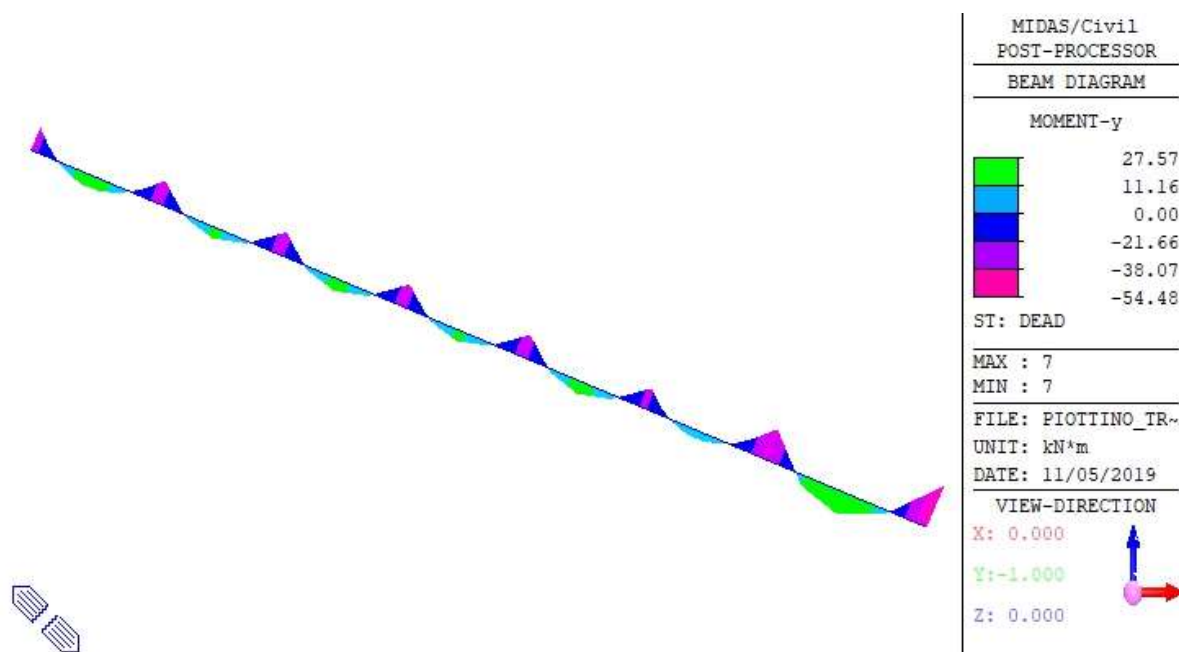


Figura 20 Momento flettente – DEAD – Condotta 1 e 2 – Tratta 1

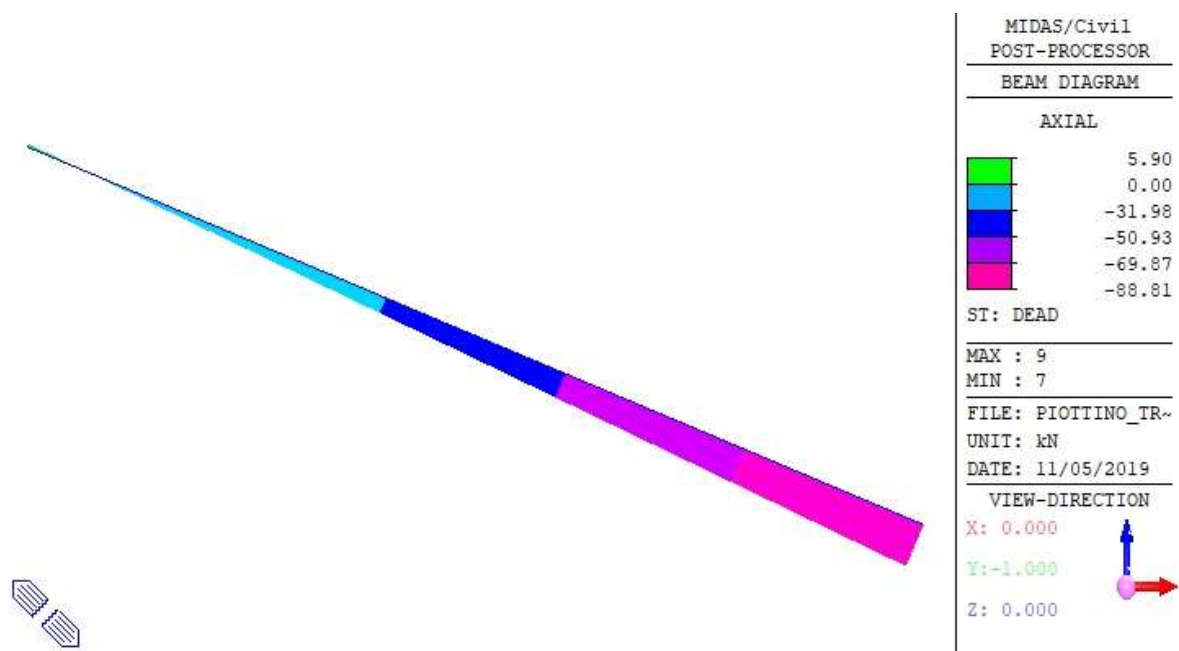


Figura 21 Azione assiale – DEAD – Condotta 1 e 2 – Tratta 1

Peso dell'acqua

Si riporta a seguire il diagramma del momento flettente relativo all'effetto del peso dell'acqua contenuta nella condotta.

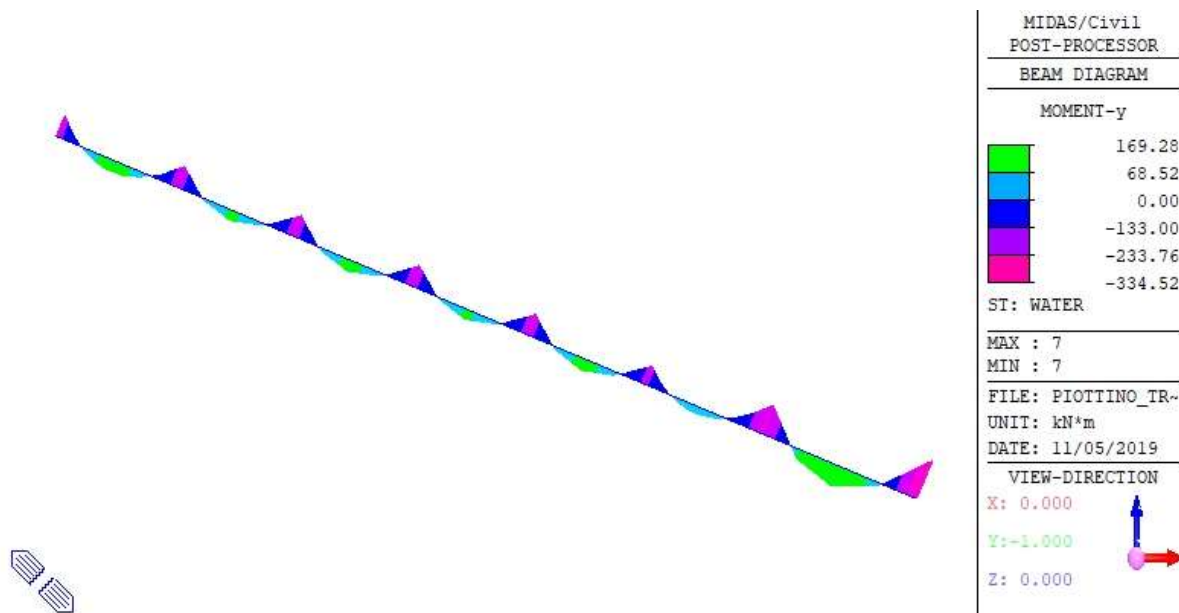


Figura 22 Momento flettente – WATER – Condotta 1 e 2 – Tratta 1

8.4 Condotta 1 – Tratta 2

8.4.1 Definizioni geometriche

Si considera il tratto di condotta tra il blocco di ancoraggio FP2 e il blocco di ancoraggio FP3. La tratta 2 ha una lunghezza complessiva di 94.561m, è caratterizzata da una pendenza pari a 42.90° e, appoggia su selle in calcestruzzo disposte a interassi variabili. Lo spessore della tubazione nella tratta considerata è variabile tra 9mm e 13mm. Il diametro interno della tubazione è pari a 1450mm.

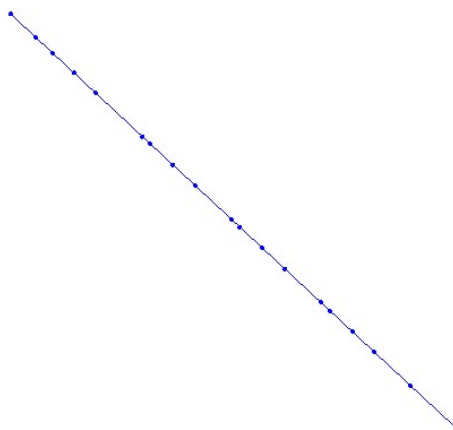


Figura 23 Geometria del modello di calcolo – Condotta 1 e 2 – Tratta 2

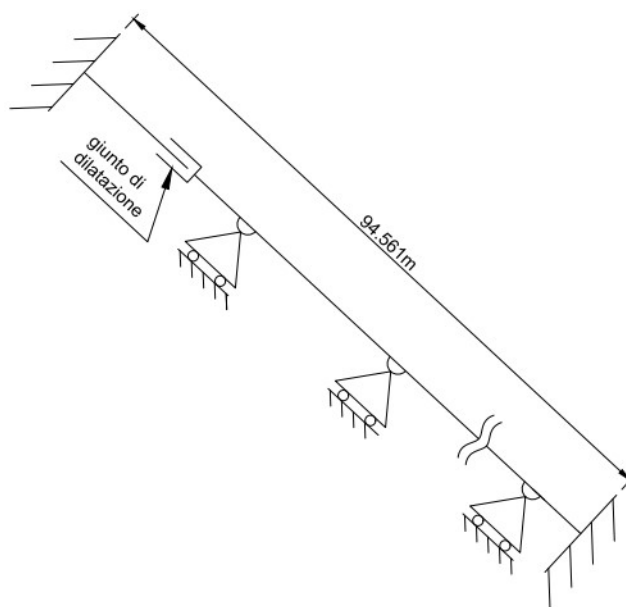


Figura 24 Schema statico della tratta – Condotta 1 e 2 – Tratta 2

Considerando lo schema statico del modello di calcolo si possono notare i vincoli a incastro alle due estremità della tratta, le selle intermedie modellate in semplice appoggio e il giunto di dilatazione modellato mediante un manicotto.

8.4.2 Sollecitazioni risultanti

Peso proprio strutturale

Si riportano a seguire i diagrammi del momento flettente e dell'azione assiale relativi all'effetto del peso proprio della condotta.

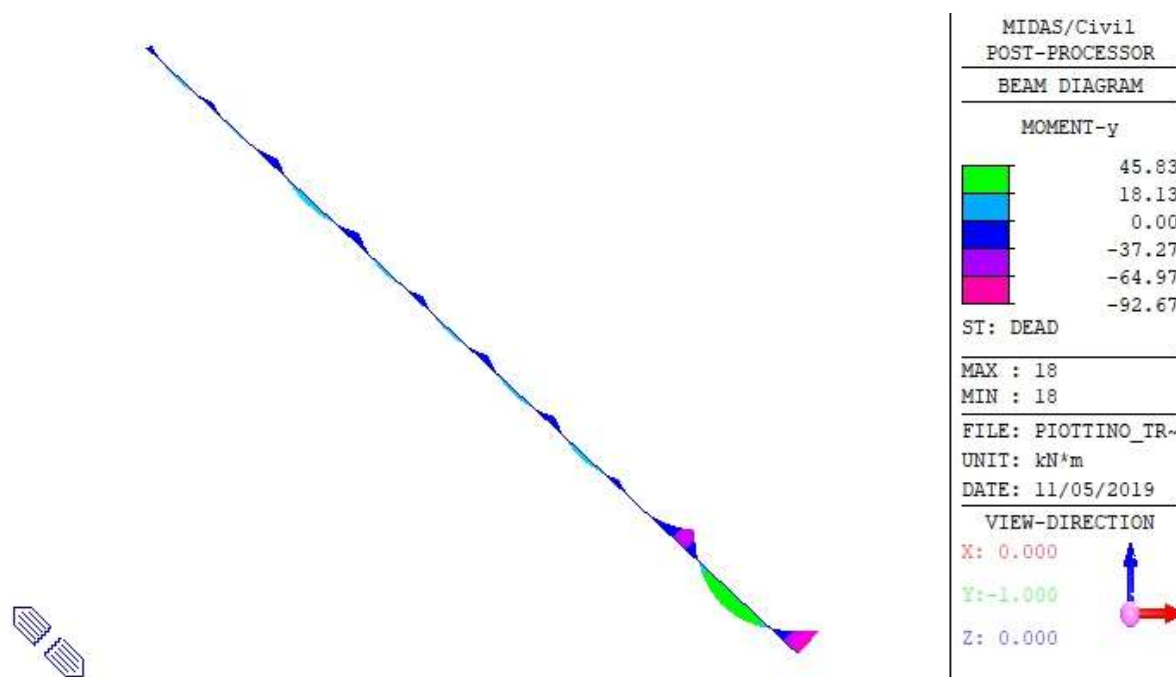


Figura 25 Momento flettente – DEAD – Condotta 1 e 2 – Tratta 2

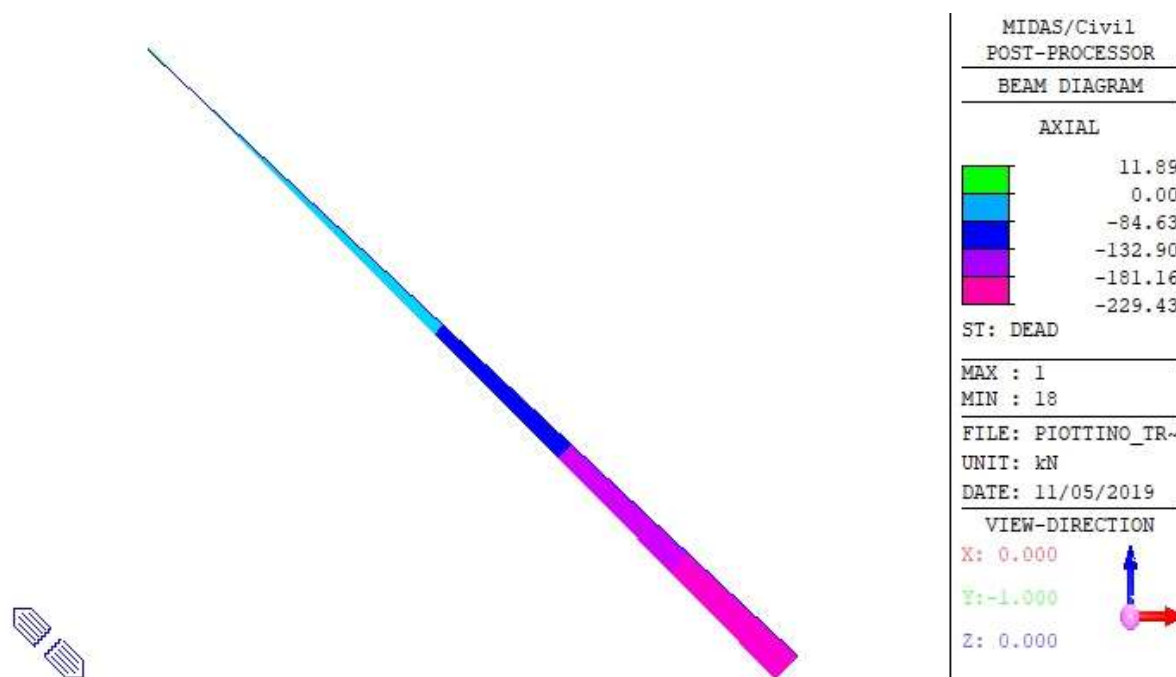


Figura 26 Azione assiale – DEAD – Condotta 1 e 2 – Tratta 2

Peso dell'acqua

Si riporta a seguire il diagramma del momento flettente relativo all'effetto del peso dell'acqua contenuta nella condotta.

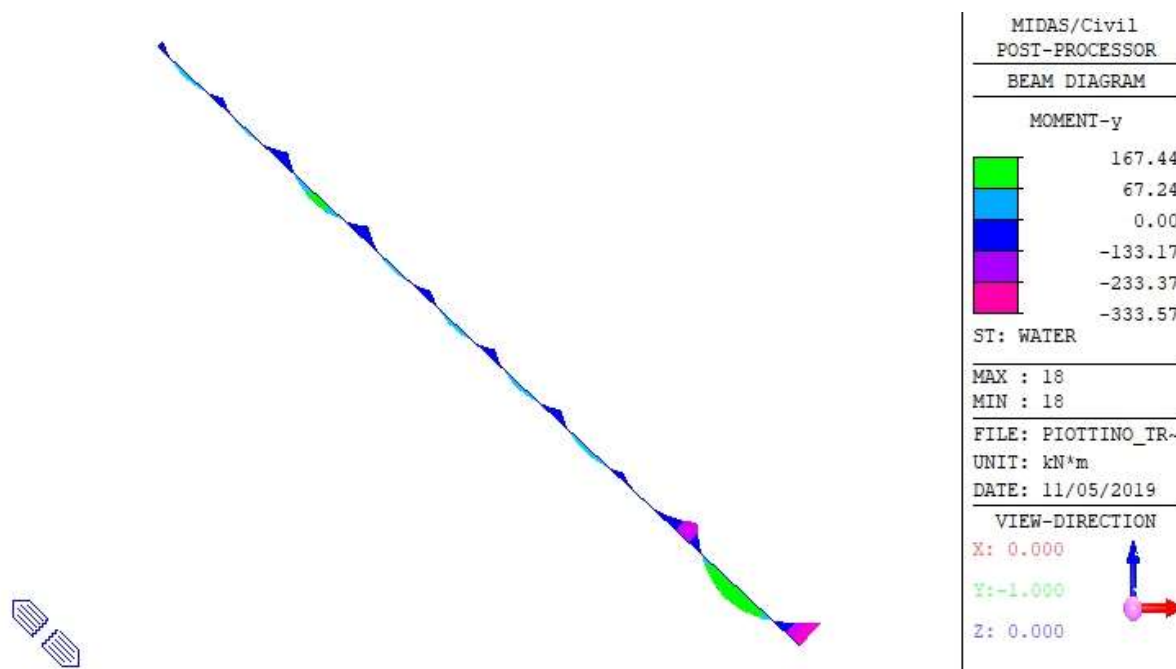


Figura 27 Momento flettente – WATER – Condotta 1 e 2 – Tratta 2

8.5 Condotta 1 – Tratta 3

8.5.1 Definizioni geometriche

Si considera il tratto di condotta tra il blocco di ancoraggio FP3 e il blocco di ancoraggio FP4. La tratta 3 ha una lunghezza complessiva di 138.232m, è caratterizzata da una pendenza pari a 58.79° e, appoggia su selle in calcestruzzo disposte a interassi variabili. Lo spessore della tubazione nella tratta considerata è variabile tra 14mm e 21mm. Il diametro interno della tubazione è pari a 1400mm.

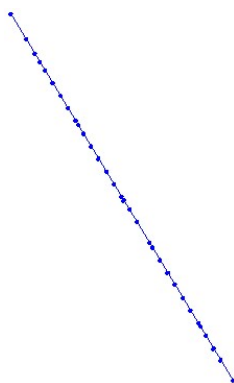


Figura 28 Geometria del modello di calcolo – Condotta 1 e 2 – Tratta 3

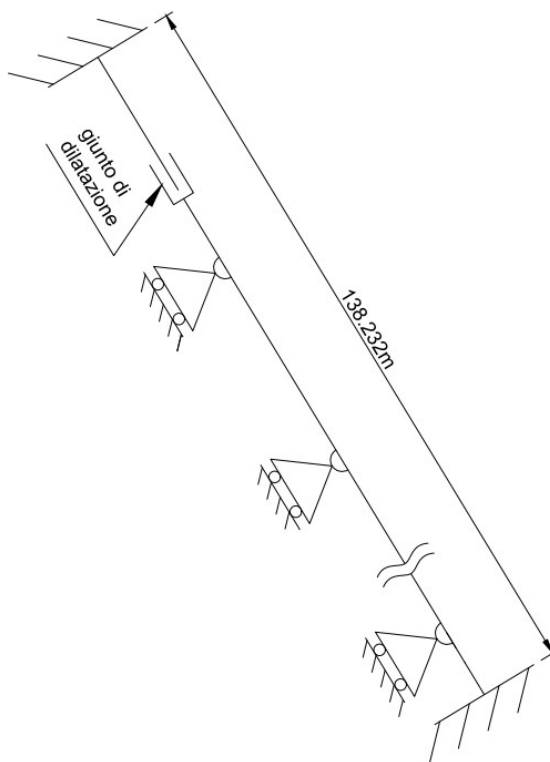


Figura 29 Schema statico della tratta – Condotta 1 e 2 – Tratta 3

Considerando lo schema statico del modello di calcolo si possono notare i vincoli a incastro alle due estremità della tratta, le selle intermedie modellate in semplice appoggio e il giunto di dilatazione modellato mediante un manicotto.

8.5.2 Sollecitazioni risultanti

Peso proprio strutturale

Si riportano a seguire i diagrammi del momento flettente e dell'azione assiale relativi all'effetto del peso proprio della condotta.

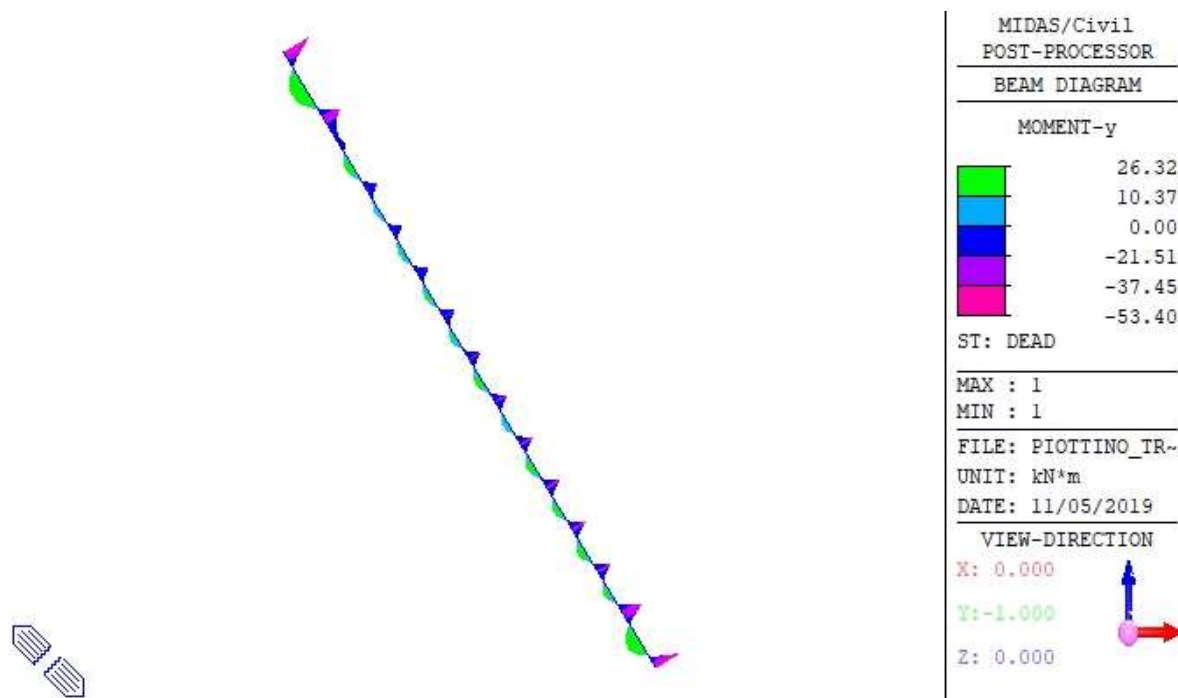


Figura 30 Momento flettente – DEAD – Condotta 1 e 2 – Tratta 3

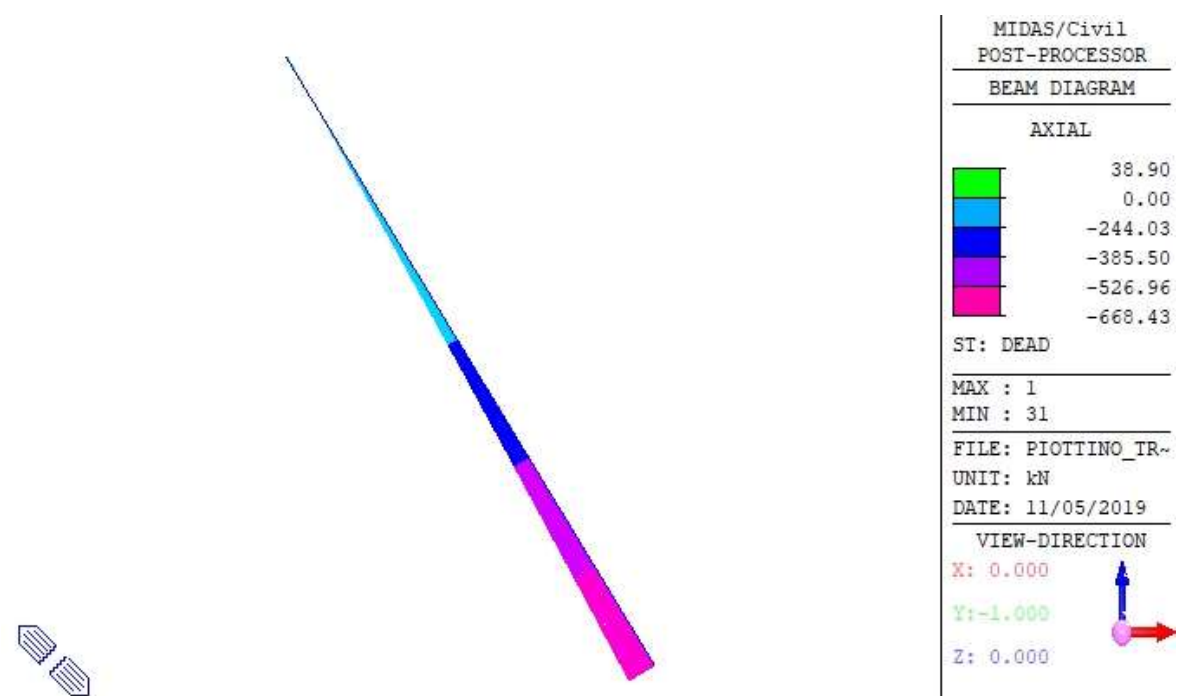


Figura 31 Azione assiale – DEAD – Condotta 1 e 2 – Tratta 3

Peso dell'acqua

Si riporta a seguire il diagramma del momento flettente relativo all'effetto del peso dell'acqua contenuta nella condotta.

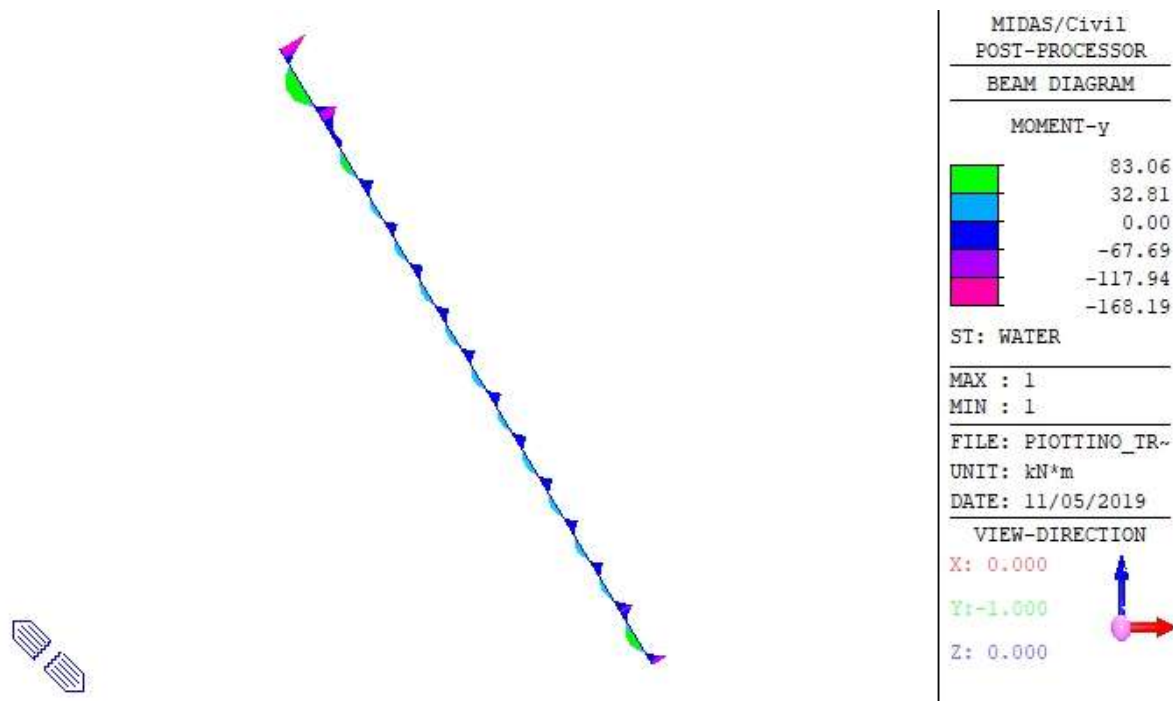


Figura 32 Momento flettente – WATER – Condotta 1 e 2 – Tratta 3

8.6 Condotta 1 – Tratta 4

8.6.1 Definizioni geometriche

Si considera il tratto di condotta tra il blocco di ancoraggio FP4 e il blocco di ancoraggio FP5. La tratta 4 ha una lunghezza complessiva di 106.470m, è caratterizzata da una pendenza pari a 31.68° nella prima parte della tratta (di lunghezza 63.219m) e 25.62° nella seconda parte della tratta (di lunghezza 43.251m) e, appoggia su selle in calcestruzzo disposte a interassi variabili. Lo spessore della tubazione nella tratta considerata è variabile tra 22mm e 25mm. Il diametro interno della tubazione è pari a 1350mm.

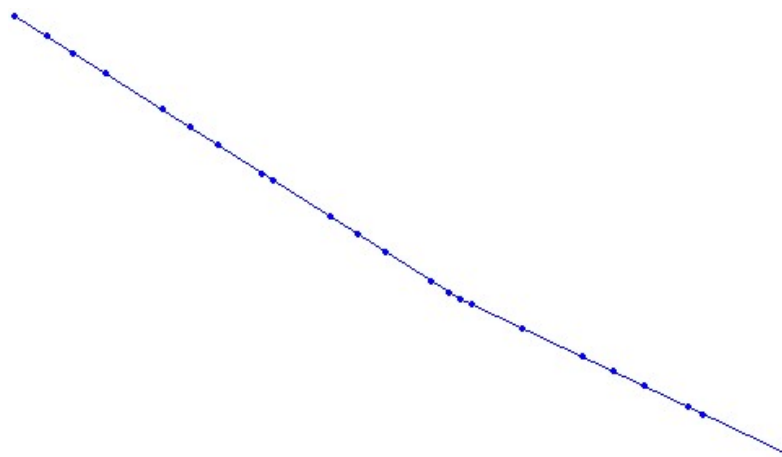


Figura 33 Geometria del modello di calcolo – Condotta 1 e 2 – Tratta 4

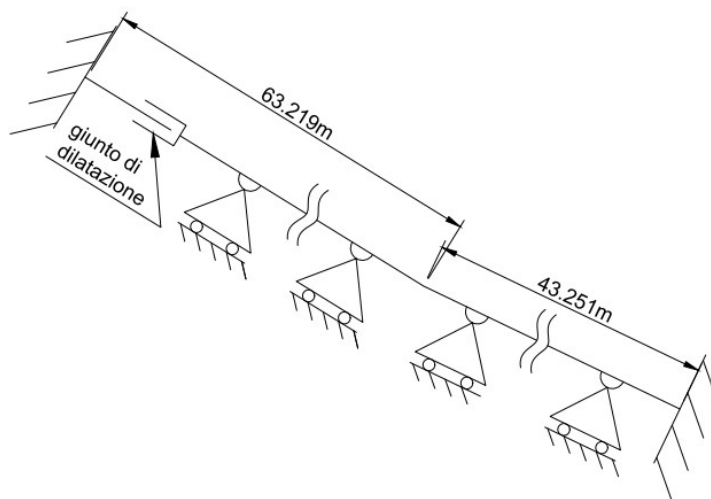


Figura 34 Schema statico della tratta – Condotta 1 e 2 – Tratta 4

Considerando lo schema statico del modello di calcolo si possono notare i vincoli a incastro alle due estremità della tratta, le selle intermedie modellate in semplice appoggio e il giunto di dilatazione modellato mediante un manicotto.

8.6.2 Sollecitazioni risultanti

Peso proprio strutturale

Si riportano a seguire i diagrammi del momento flettente e dell'azione assiale relativi all'effetto del peso proprio della condotta.

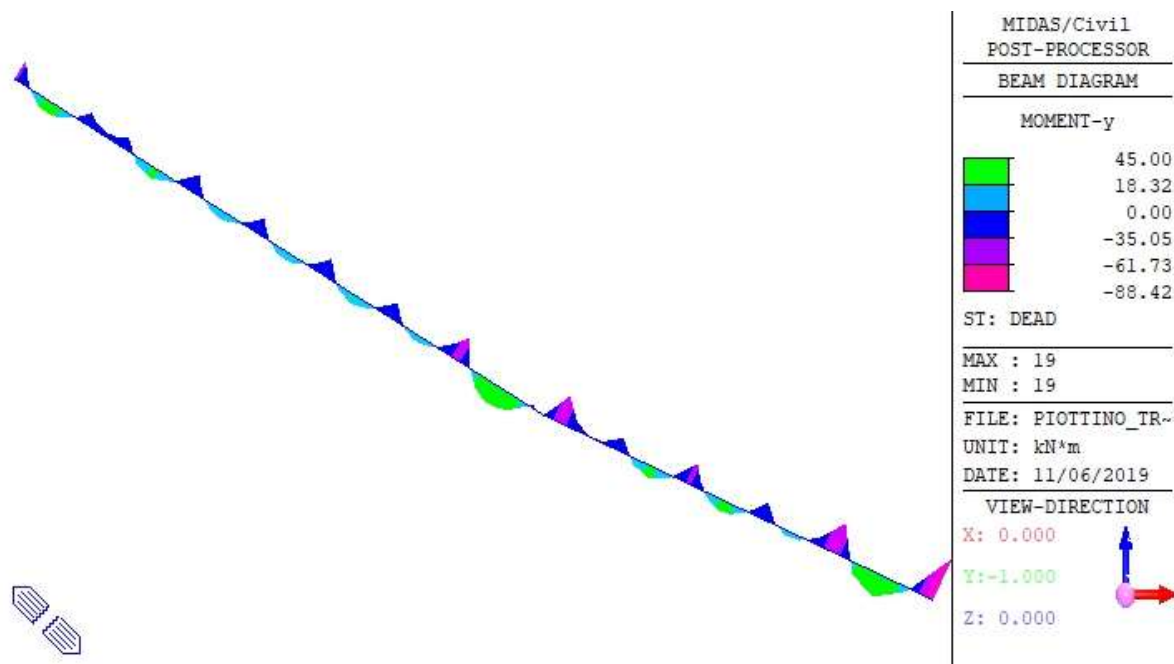


Figura 35 Momento flettente – DEAD – Condotta 1 e 2 – Tratta 4

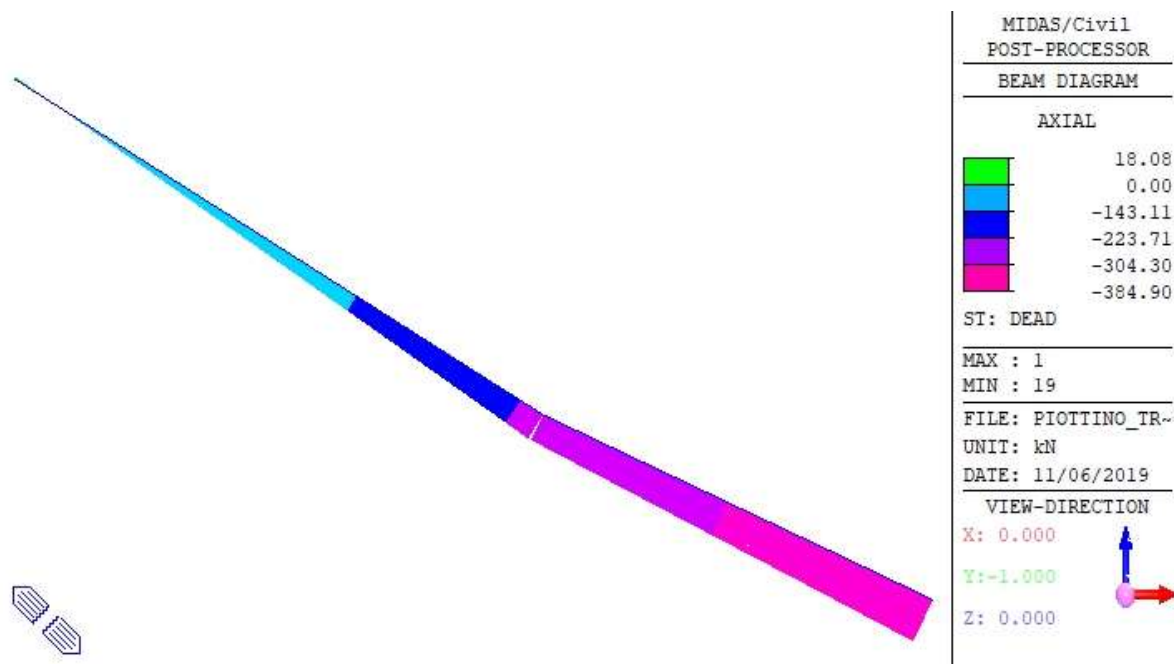


Figura 36 Azione assiale – DEAD – Condotta 1 e 2 – Tratta 4

Peso dell'acqua

Si riporta a seguire il diagramma del momento flettente relativo all'effetto del peso dell'acqua contenuta nella condotta e delle spinte idrauliche in corrispondenza del cambio repentino di pendenza della condotta.

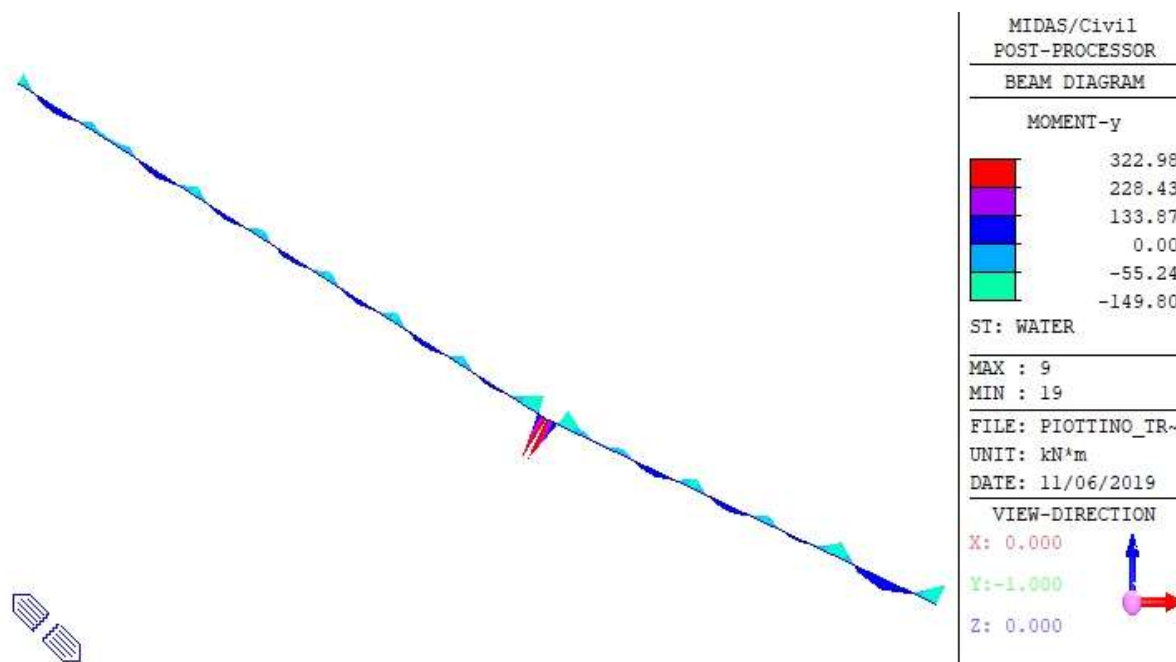


Figura 37 Momento flettente – WATER – Condotta 1 e 2 – Tratta 4

8.7 Condotta 1 – Tratta 5

8.7.1 Definizioni geometriche

Si considera il tratto di condotta tra il blocco di ancoraggio FP5 e il blocco di ancoraggio FP6. La tratta 5 ha una lunghezza complessiva di 76.814m, è caratterizzata da una pendenza pari a 8.35° e, appoggia su selle in calcestruzzo disposte a interassi variabili. Lo spessore della tubazione nella tratta considerata è variabile tra 24mm e 25mm. Il diametro interno della tubazione è pari a 1300mm.



Figura 38 Geometria del modello di calcolo – Condotta 1 e 2 – Tratta 5

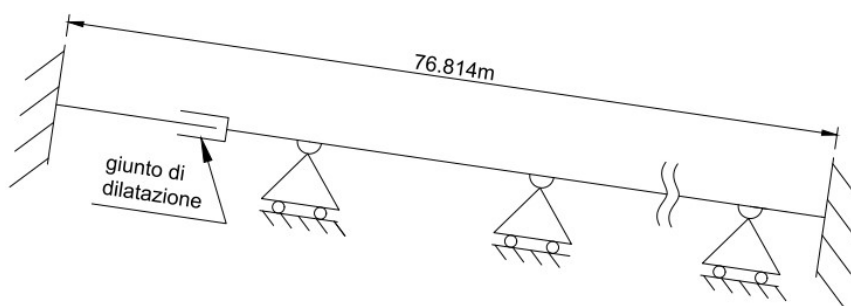


Figura 39 Schema statico della tratta – Condotta 1 e 2 – Tratta 5

Considerando lo schema statico del modello di calcolo si possono notare i vincoli a incastro alle due estremità della tratta, le selle intermedie modellate in semplice appoggio e il giunto di dilatazione modellato mediante un manicotto.

8.7.2 Sollecitazioni risultanti

Peso proprio strutturale

Si riportano a seguire i diagrammi del momento flettente e dell'azione assiale relativi all'effetto del peso proprio della condotta.

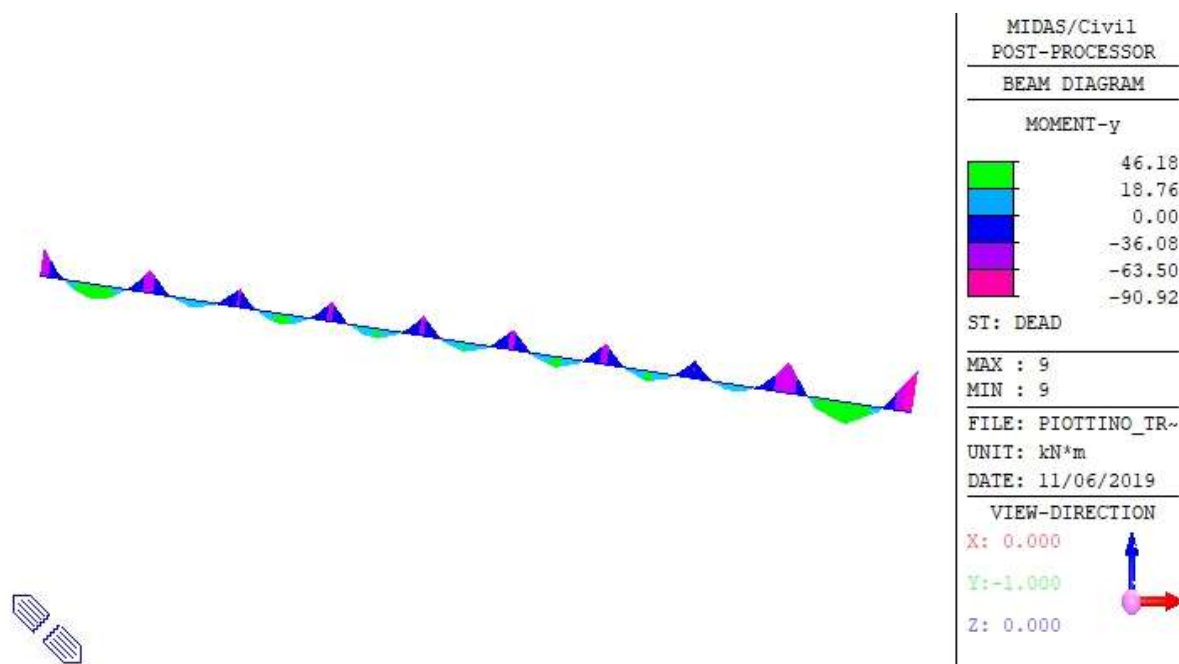


Figura 40 Momento flettente – DEAD – Condotta 1 e 2 – Tratta 5

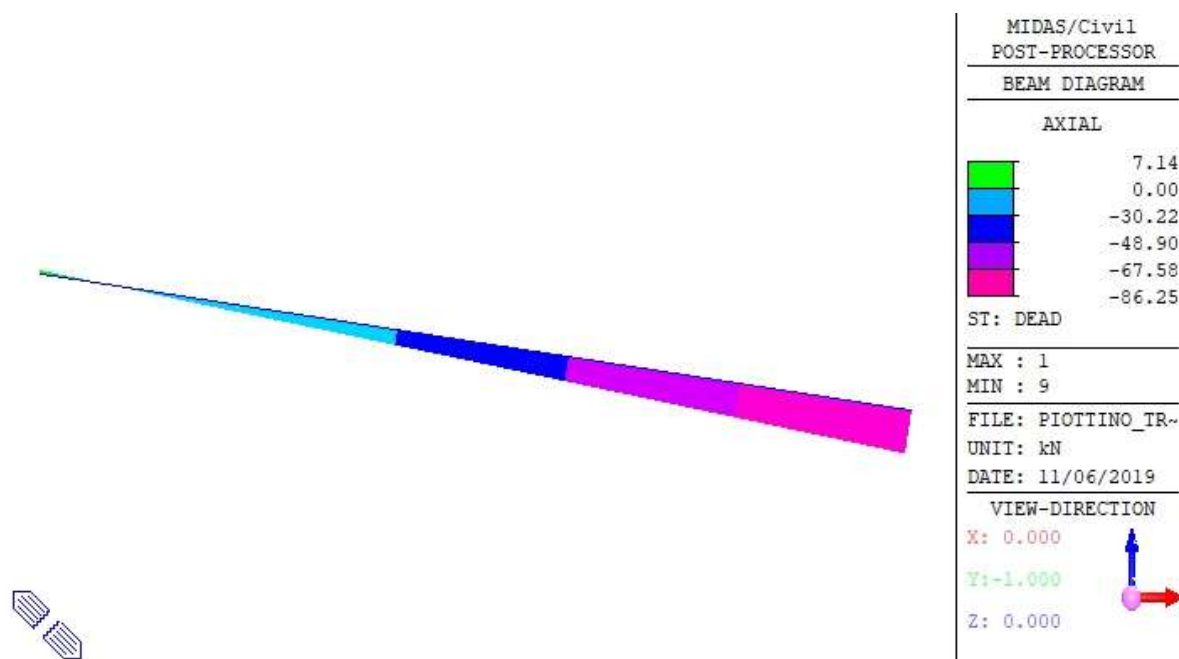


Figura 41 Azione assiale – DEAD – Condotta 1 e 2 – Tratta 5

Peso dell'acqua

Si riporta a seguire il diagramma del momento flettente relativo all'effetto del peso dell'acqua contenuta nella condotta.

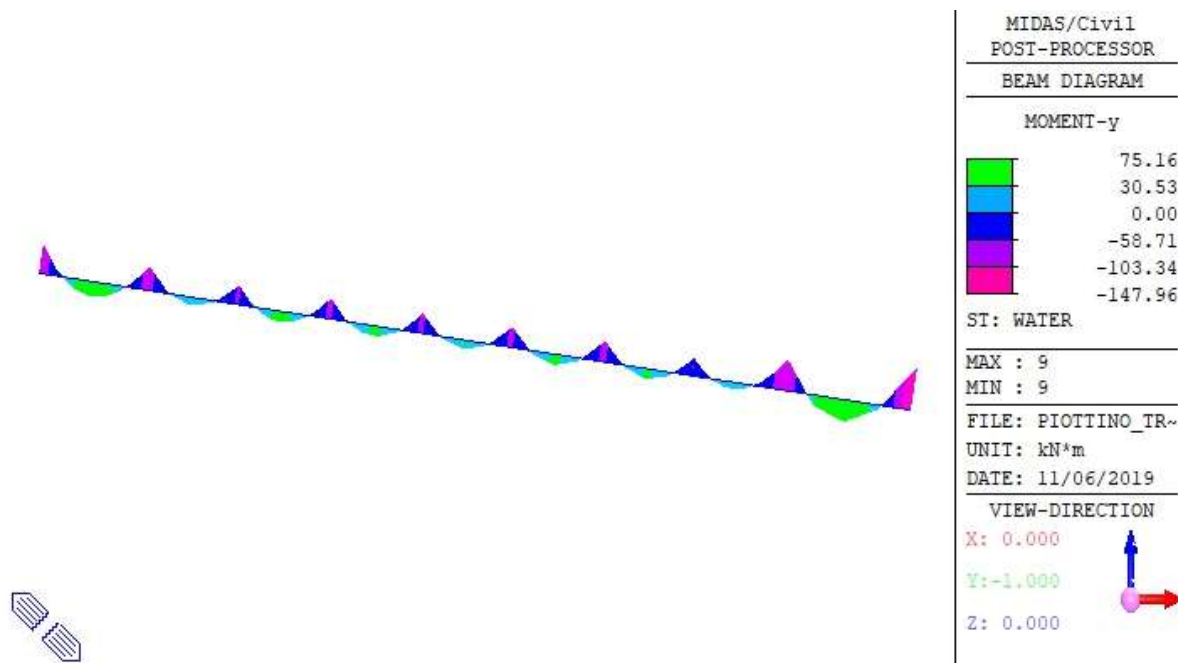


Figura 42 Momento flettente – WATER – Condotta 1 e 2 – Tratta 5

8.8 Condotta 1 – Tratta 6

8.8.1 Definizioni geometriche

Si considera il tratto di condotta tra il blocco di ancoraggio FP6 e l'ingresso in centrale. La tratta 6 ha una lunghezza complessiva di 23.707m, è caratterizzata da una pendenza pari a 16.40° e, appoggia su due selle in calcestruzzo. Lo spessore della tubazione nella tratta considerata è costante e pari a 25mm. Il diametro interno della tubazione è pari a 1300mm.

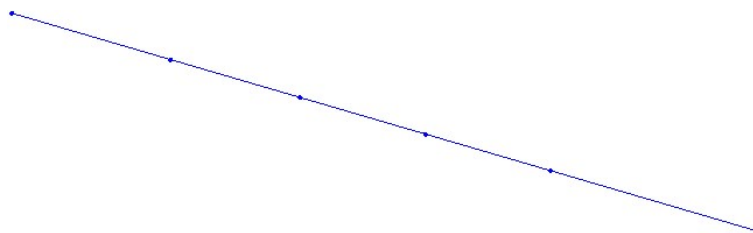


Figura 43 Geometria del modello di calcolo – Condotta 1 e 2 – Tratta 6

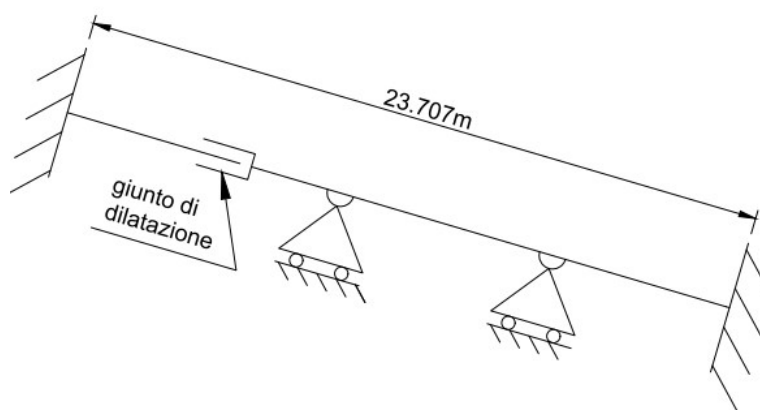


Figura 44 Schema statico della tratta – Condotta 1 e 2 – Tratta 6

Considerando lo schema statico del modello di calcolo si possono notare i vincoli a incastro alle due estremità della tratta, le selle intermedie modellate in semplice appoggio e il giunto di dilatazione modellato mediante un manicotto.

8.8.2 Sollecitazioni risultanti

Peso proprio strutturale

Si riportano a seguire i diagrammi del momento flettente e dell'azione assiale relativi all'effetto del peso proprio della condotta.

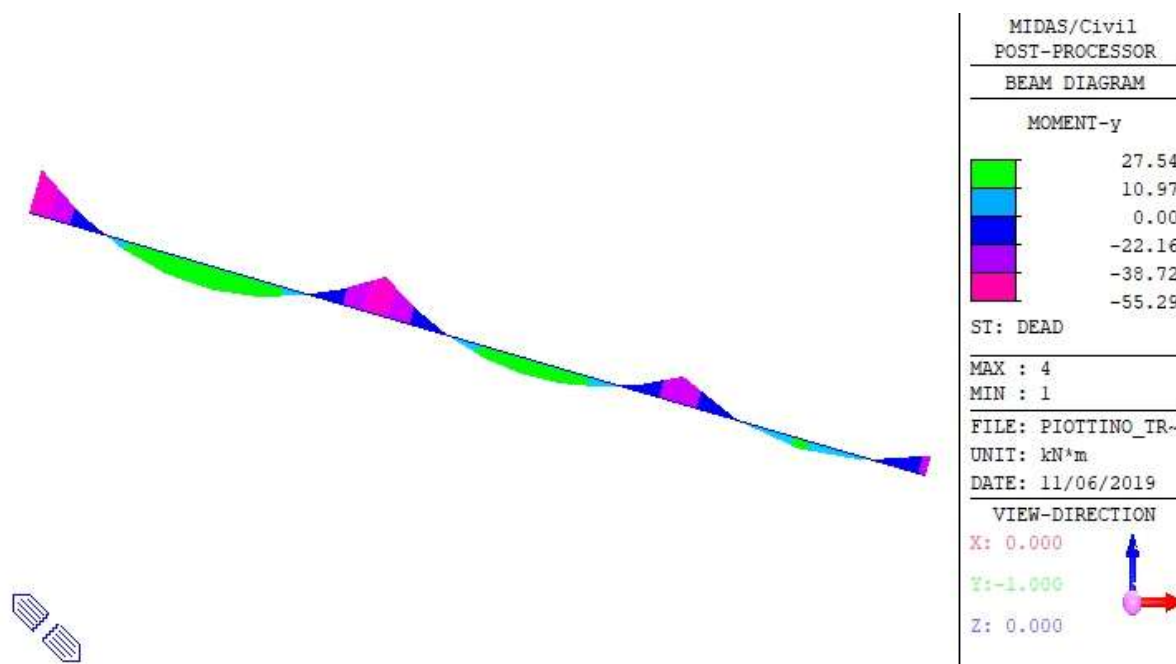


Figura 45 Momento flettente – DEAD – Condotta 1 e 2 – Tratta 6

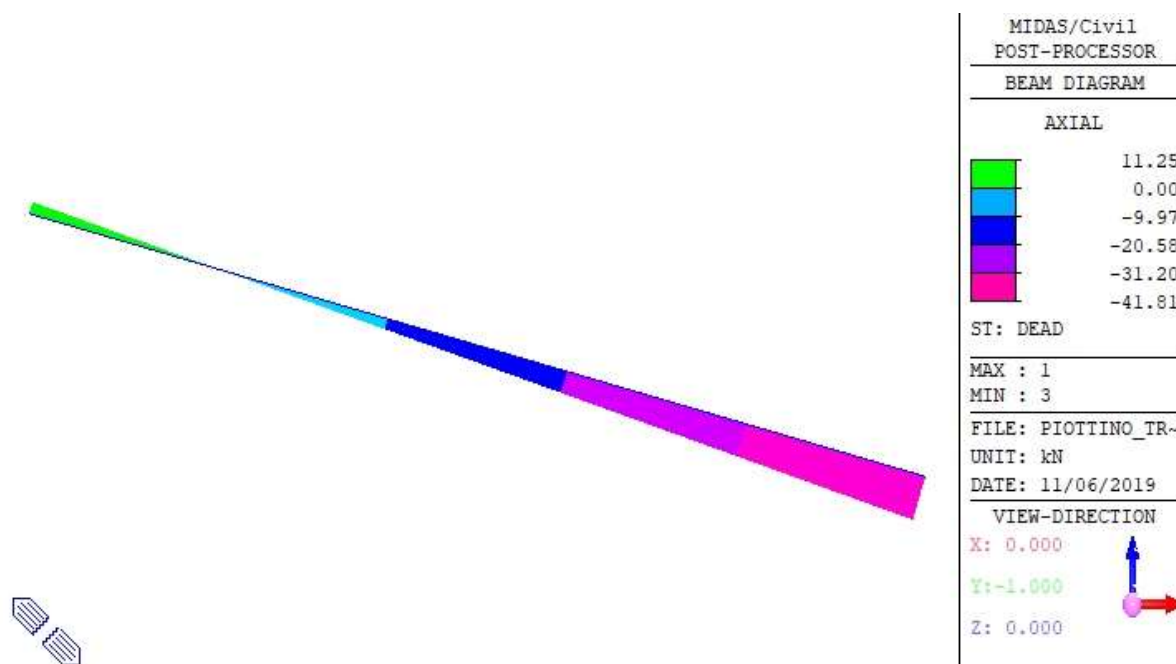


Figura 46 Azione assiale – DEAD – Condotta 1 e 2 – Tratta 6

Peso dell'acqua

Si riporta a seguire il diagramma del momento flettente relativo all'effetto del peso dell'acqua contenuta nella condotta.

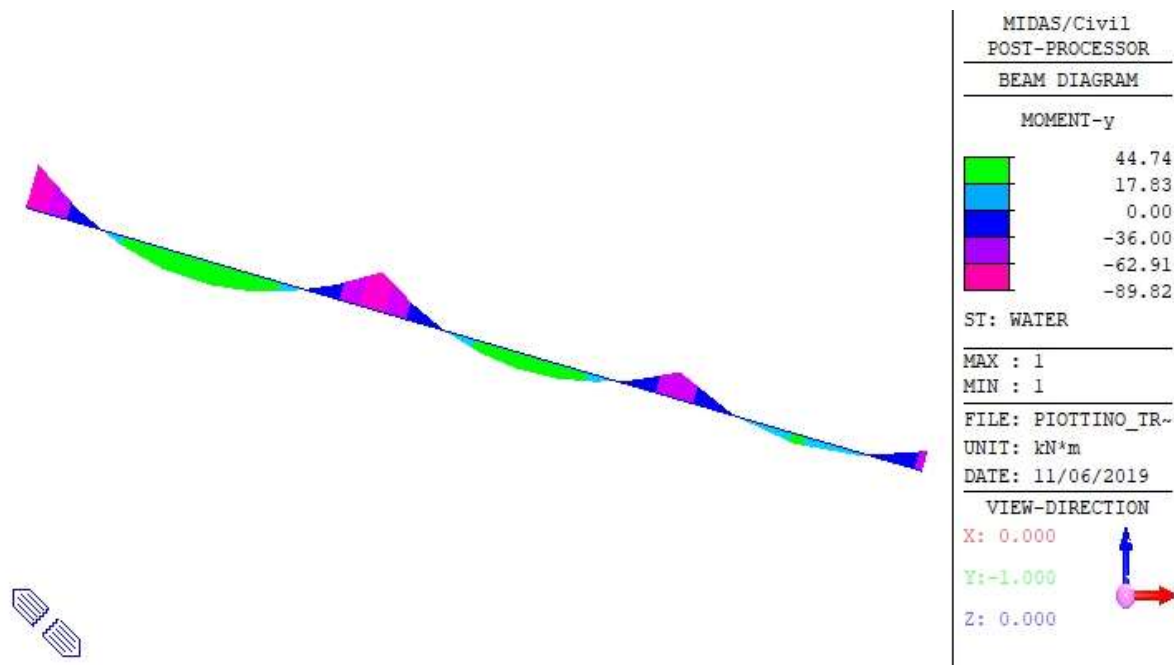


Figura 47 Momento flettente – WATER – Condotta 1 e 2 – Tratta 6

8.9 Condotta 3 – Tratta 1

8.9.1 Definizioni geometriche

Si considera il tratto di condotta tra il blocco di ancoraggio FP1 e il blocco di ancoraggio FP2. La tratta 1 ha una lunghezza complessiva di 81.053m, è caratterizzata da una pendenza pari a 22.84° e, appoggia su ancoraggi metallici disposti a interassi variabili. Lo spessore della tubazione nella tratta considerata è costante e pari a 9mm. Il diametro interno della tubazione è pari a 1550mm.

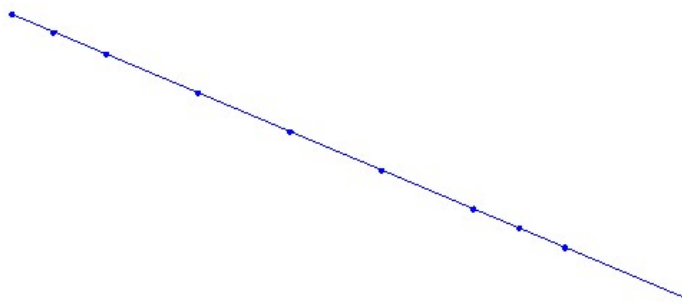


Figura 48 Geometria del modello di calcolo – Condotta 3 – Tratta 1

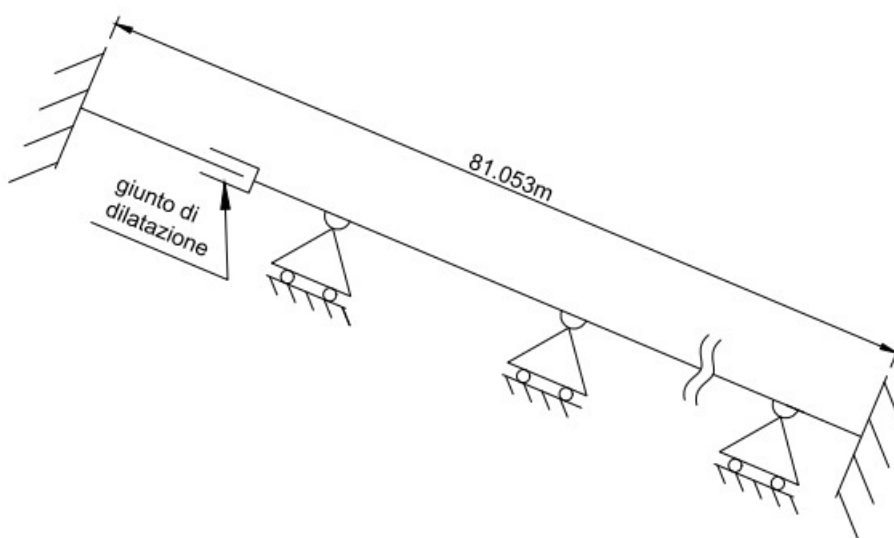


Figura 49 Schema statico della tratta – Condotta 3 – Tratta 1

Considerando lo schema statico del modello di calcolo si possono notare i vincoli a incastro alle due estremità della tratta, gli appoggi metallici intermedi modellati in semplice appoggio e il giunto di dilatazione modellato mediante un manicotto.

8.9.2 Sollecitazioni risultanti

Peso proprio strutturale

Si riportano a seguire i diagrammi del momento flettente e dell'azione assiale relativi all'effetto del peso proprio della condotta.

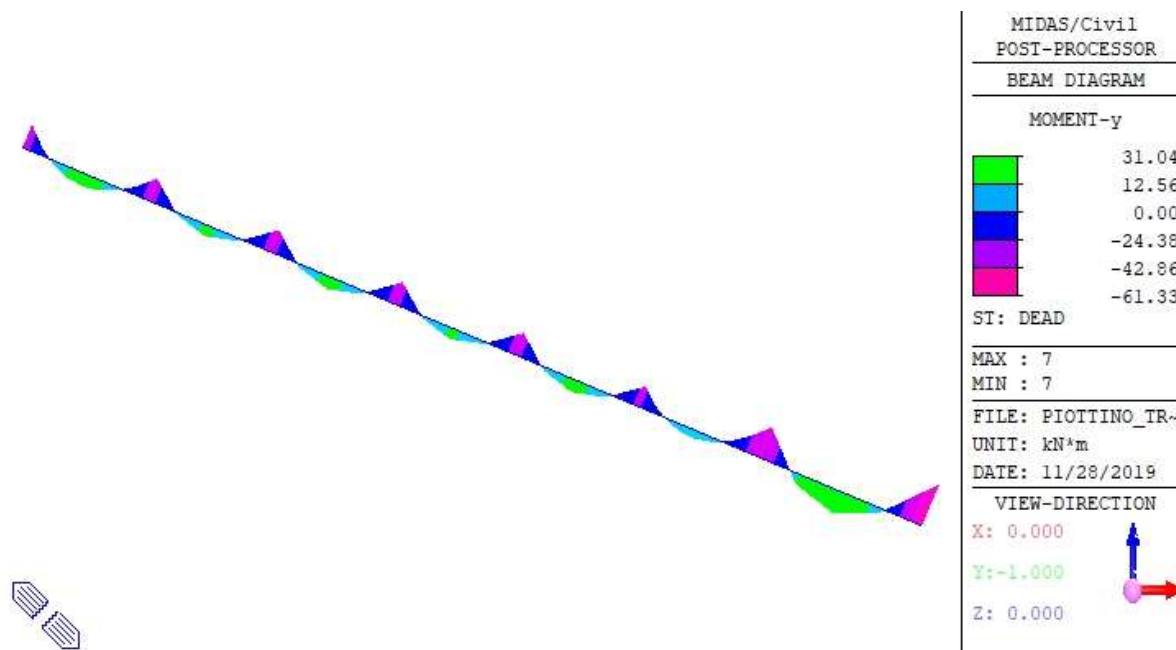


Figura 50 Momento flettente – DEAD – Condotta 3 – Tratta 1

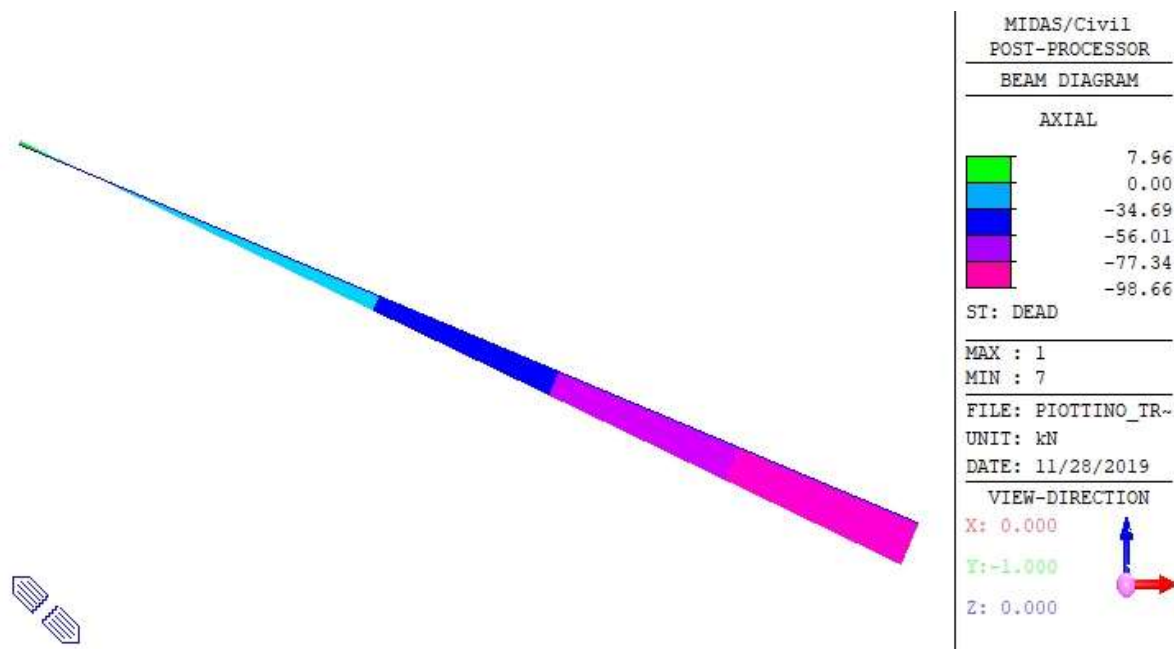


Figura 51 Azione assiale – DEAD – Condotta 3 – Tratta 1

Peso dell'acqua

Si riporta a seguire il diagramma del momento flettente relativo all'effetto del peso dell'acqua contenuta nella condotta.

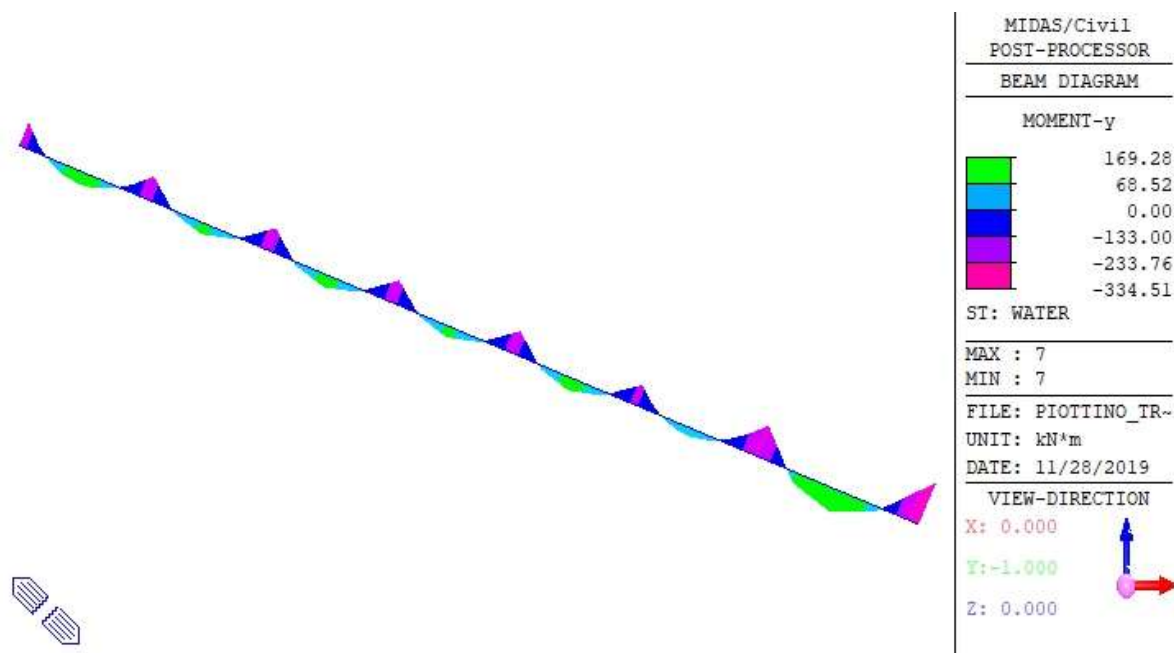


Figura 52 Momento flettente – WATER – Condotta 3 – Tratta 1

8.10 Condotta 3 – Tratta 2

8.10.1 Definizioni geometriche

Si considera il tratto di condotta tra il blocco di ancoraggio FP2 e il blocco di ancoraggio FP3. La tratta 2 ha una lunghezza complessiva di 94.561m, è caratterizzata da una pendenza pari a 42.90° e, appoggia su selle in calcestruzzo disposte a interassi variabili. Lo spessore della tubazione nella tratta considerata è variabile tra 9mm e 10mm. Il diametro interno della tubazione è pari a 1450mm.

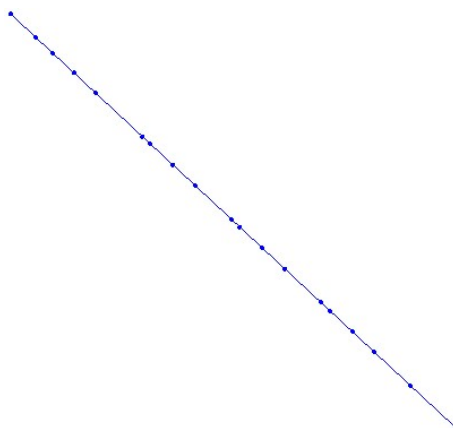


Figura 53 Geometria del modello di calcolo – Condotta 3 – Tratta 2

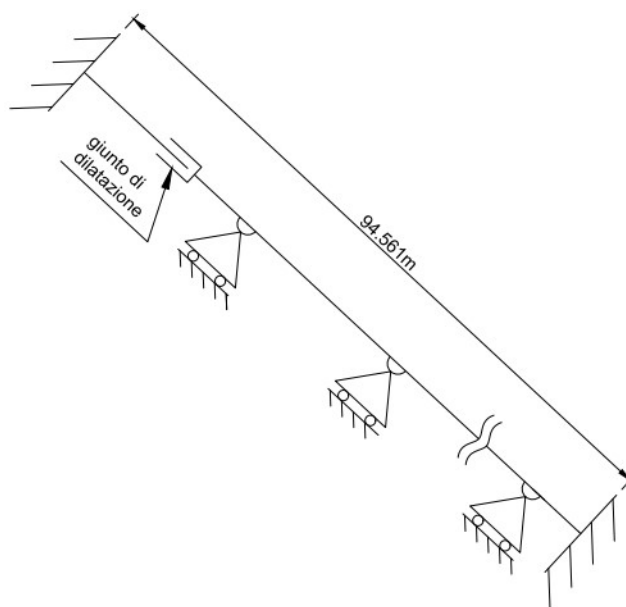


Figura 54 Schema statico della tratta – Condotta 1 e 2 – Tratta 2

Considerando lo schema statico del modello di calcolo si possono notare i vincoli a incastro alle due estremità della tratta, le selle intermedie modellate in semplice appoggio e il giunto di dilatazione modellato mediante un manicotto.

8.10.2 Sollecitazioni risultanti

Peso proprio strutturale

Si riportano a seguire i diagrammi del momento flettente e dell'azione assiale relativi all'effetto del peso proprio della condotta.

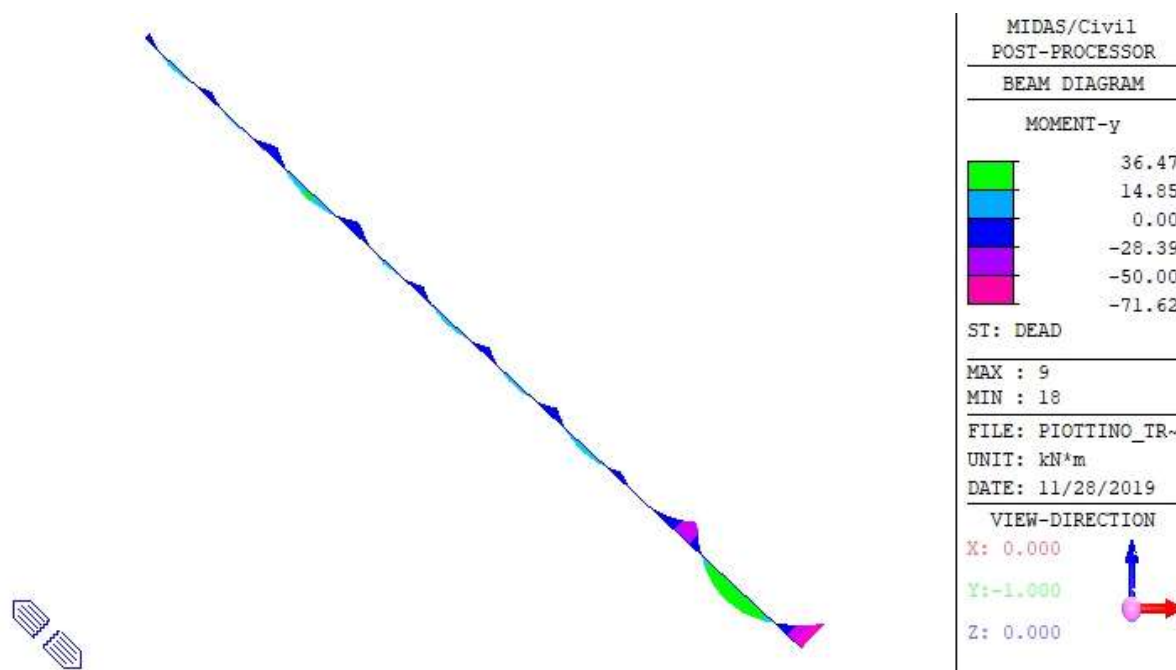


Figura 55 Momento flettente – DEAD – Condotta 3 – Tratta 2

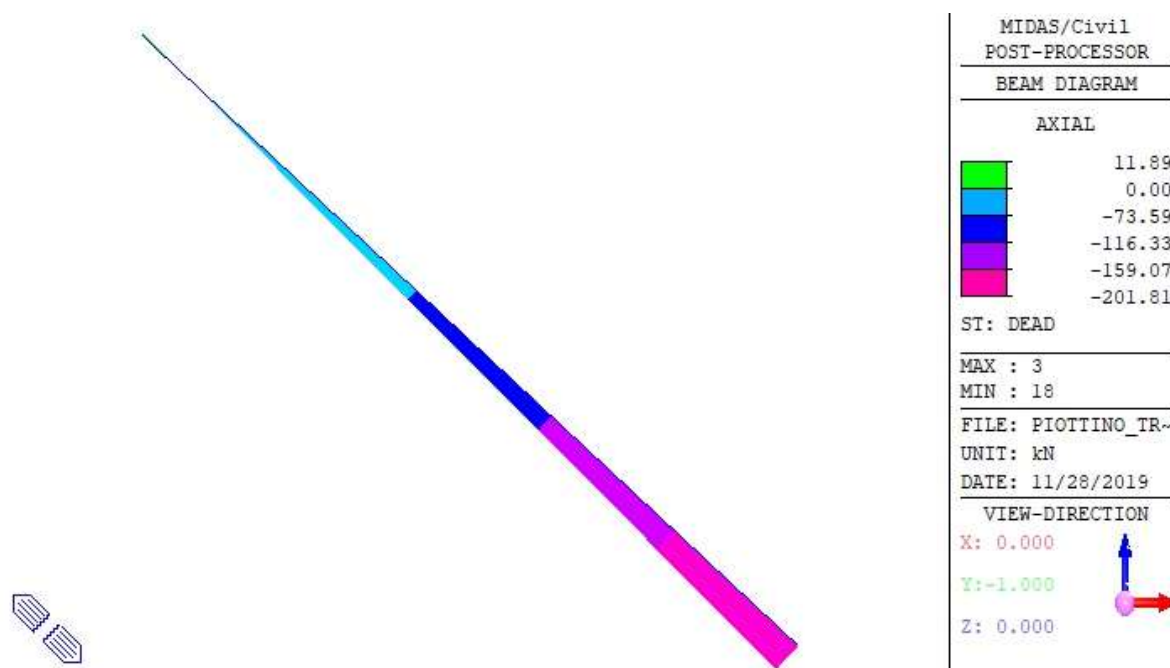


Figura 56 Azione assiale – DEAD – Condotta 3 – Tratta 2

Peso dell'acqua

Si riporta a seguire il diagramma del momento flettente relativo all'effetto del peso dell'acqua contenuta nella condotta.

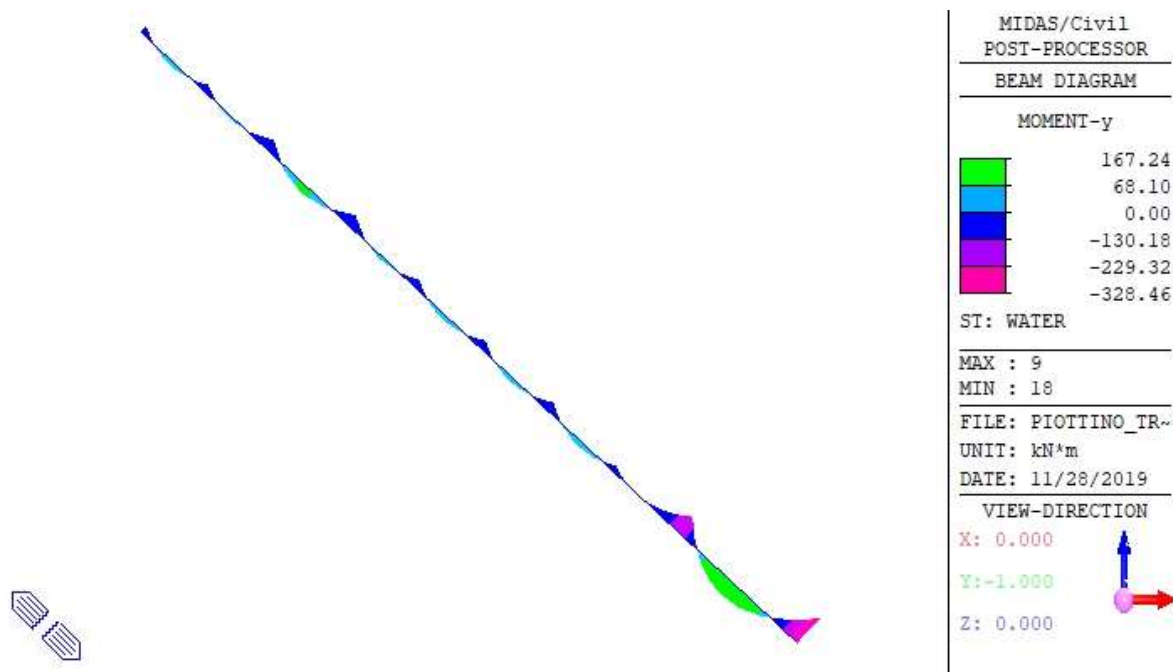


Figura 57 Momento flettente – WATER – Condotta 3 – Tratta 2

8.11 Condotta 3 – Tratta 3

8.11.1 Definizioni geometriche

Si considera il tratto di condotta tra il blocco di ancoraggio FP3 e il blocco di ancoraggio FP4. La tratta 3 ha una lunghezza complessiva di 138.232m, è caratterizzata da una pendenza pari a 58.79° e, appoggia su selle in calcestruzzo disposte a interassi variabili. Lo spessore della tubazione nella tratta considerata è variabile tra 10mm e 15mm. Il diametro interno della tubazione è pari a 1400mm.

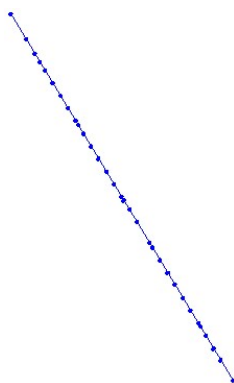


Figura 58 Geometria del modello di calcolo – Condotta 3 – Tratta 3

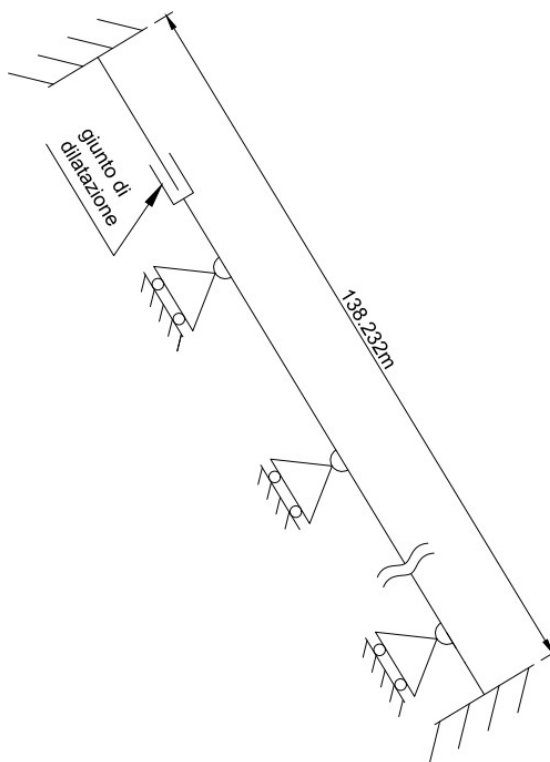


Figura 59 Schema statico della tratta – Condotta 3 – Tratta 3

Considerando lo schema statico del modello di calcolo si possono notare i vincoli a incastro alle due estremità della tratta, le selle intermedie modellate in semplice appoggio e il giunto di dilatazione modellato mediante un manicotto.

8.11.2 Sollecitazioni risultanti

Peso proprio strutturale

Si riportano a seguire i diagrammi del momento flettente e dell'azione assiale relativi all'effetto del peso proprio della condotta.

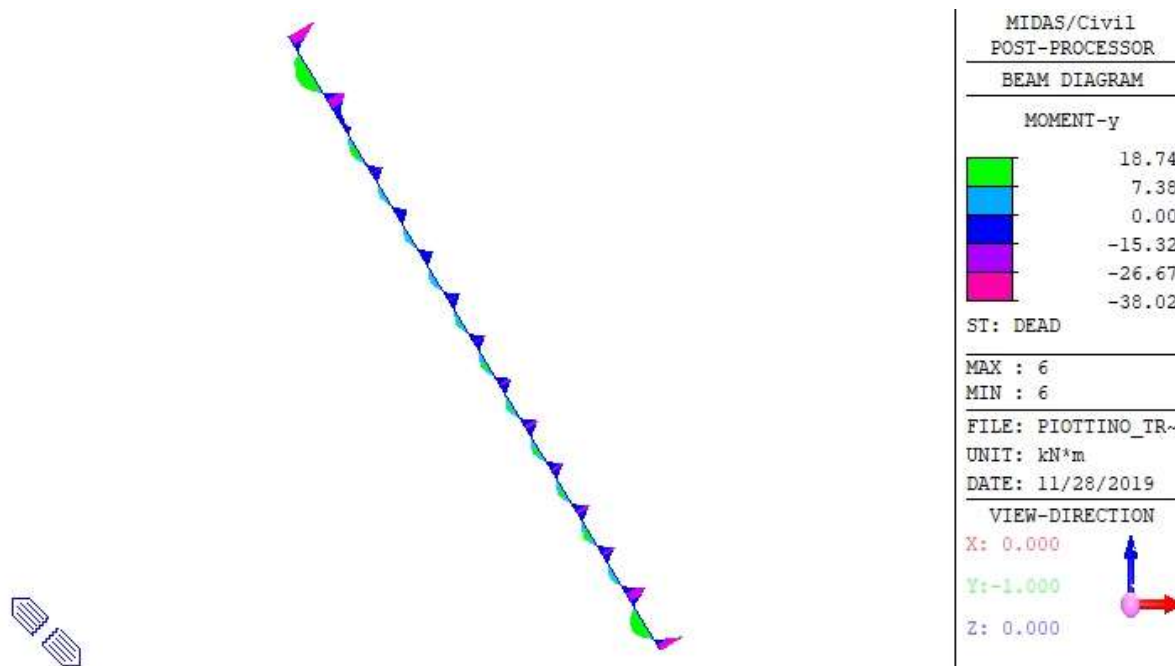


Figura 60 Momento flettente – DEAD – Condotta 3 – Tratta 3

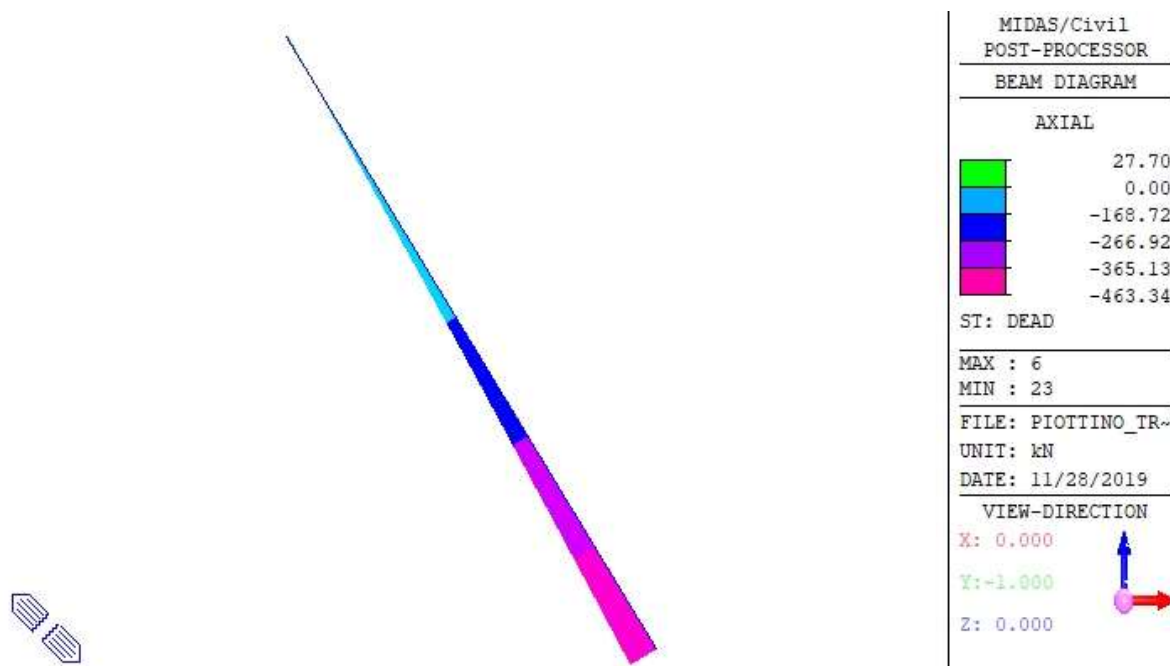


Figura 61 Azione assiale – DEAD – Condotta 3 – Tratta 3

Peso dell'acqua

Si riporta a seguire il diagramma del momento flettente relativo all'effetto del peso dell'acqua contenuta nella condotta.

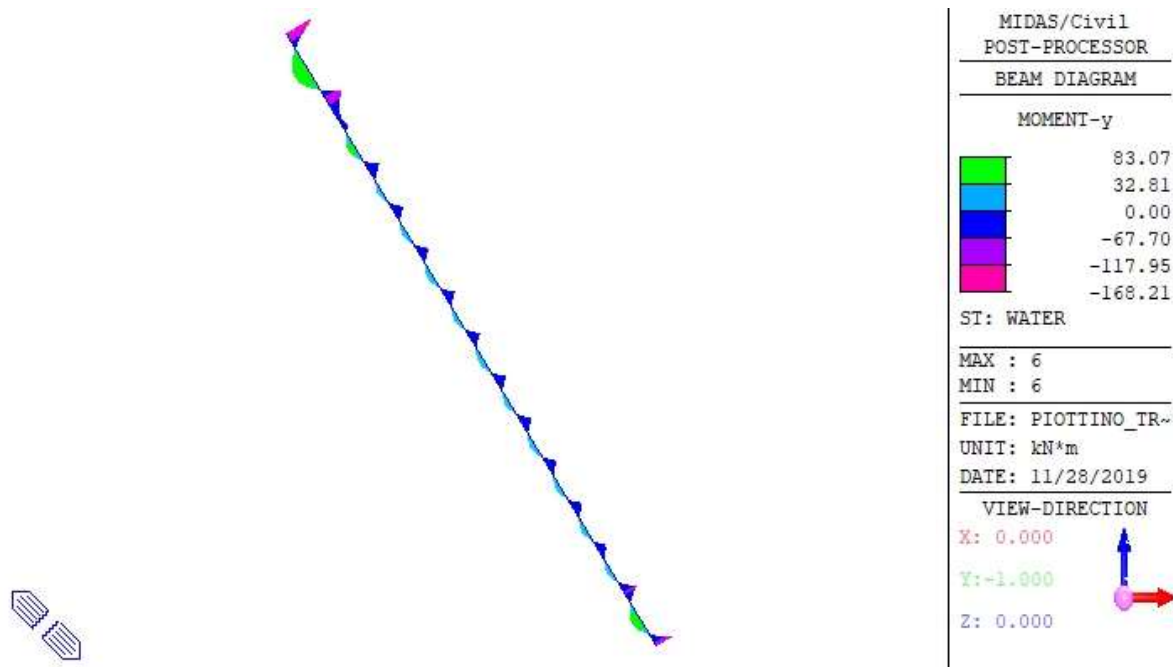


Figura 62 Momento flettente – WATER – Condotta 3 – Tratta 3

8.12 Condotta 3 – Tratta 4

8.12.1 Definizioni geometriche

Si considera il tratto di condotta tra il blocco di ancoraggio FP4 e il blocco di ancoraggio FP5. La tratta 4 ha una lunghezza complessiva di 106.470m, è caratterizzata da una pendenza pari a 31.68° nella prima parte della tratta (di lunghezza 63.219m) e 25.62° nella seconda parte della tratta (di lunghezza 43.251m) e, appoggia su selle in calcestruzzo disposte a interassi variabili. Lo spessore della tubazione nella tratta considerata è variabile tra 14mm e 15mm. Il diametro interno della tubazione è pari a 1350mm.

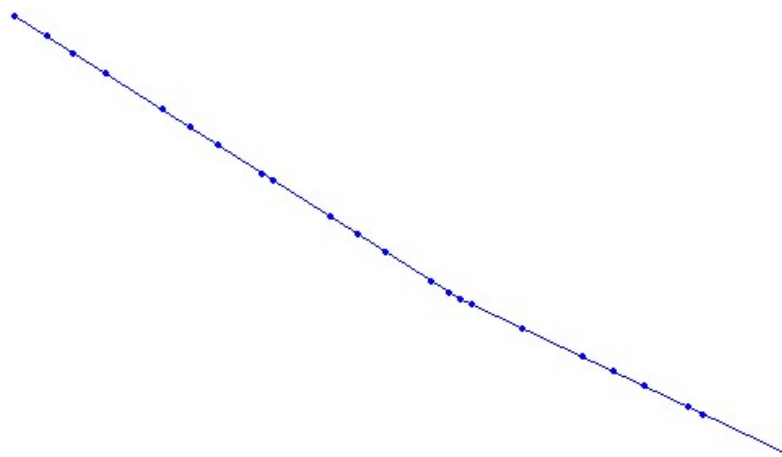


Figura 63 Geometria del modello di calcolo – Condotta 3 – Tratta 4

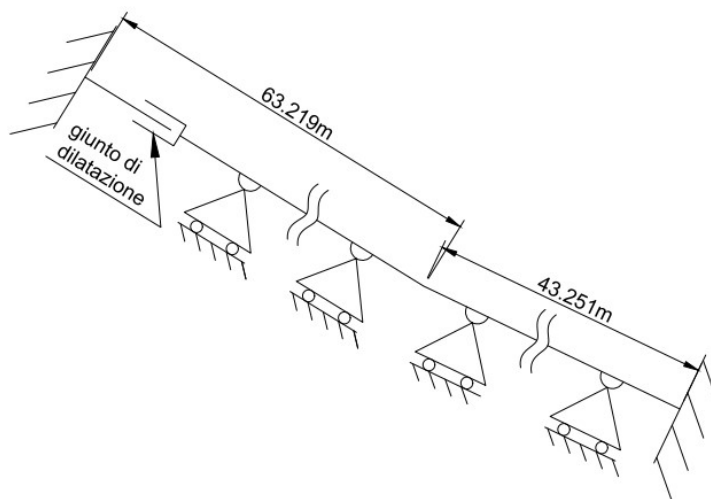


Figura 64 Schema statico della tratta – Condotta 3 – Tratta 4

Considerando lo schema statico del modello di calcolo si possono notare i vincoli a incastro alle due estremità della tratta, le selle intermedie modellate in semplice appoggio e il giunto di dilatazione modellato mediante un manicotto.

8.12.2 Sollecitazioni risultanti

Peso proprio strutturale

Si riportano a seguire i diagrammi del momento flettente e dell'azione assiale relativi all'effetto del peso proprio della condotta.

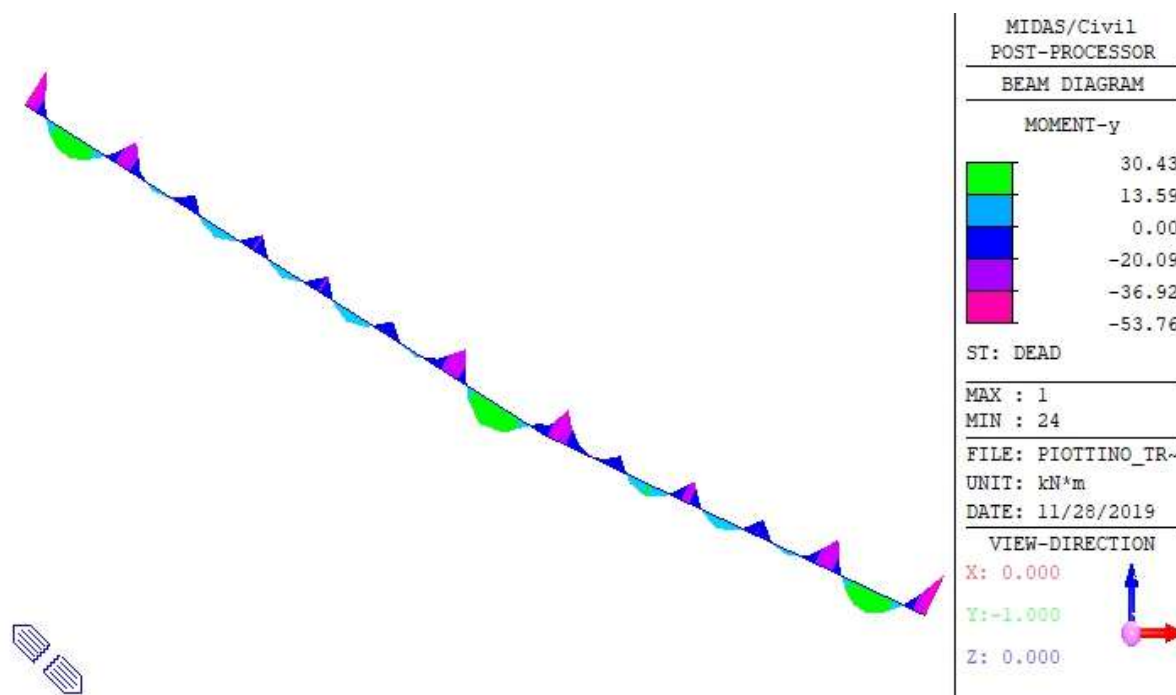


Figura 65 Momento flettente – DEAD – Condotta 3 – Tratta 4

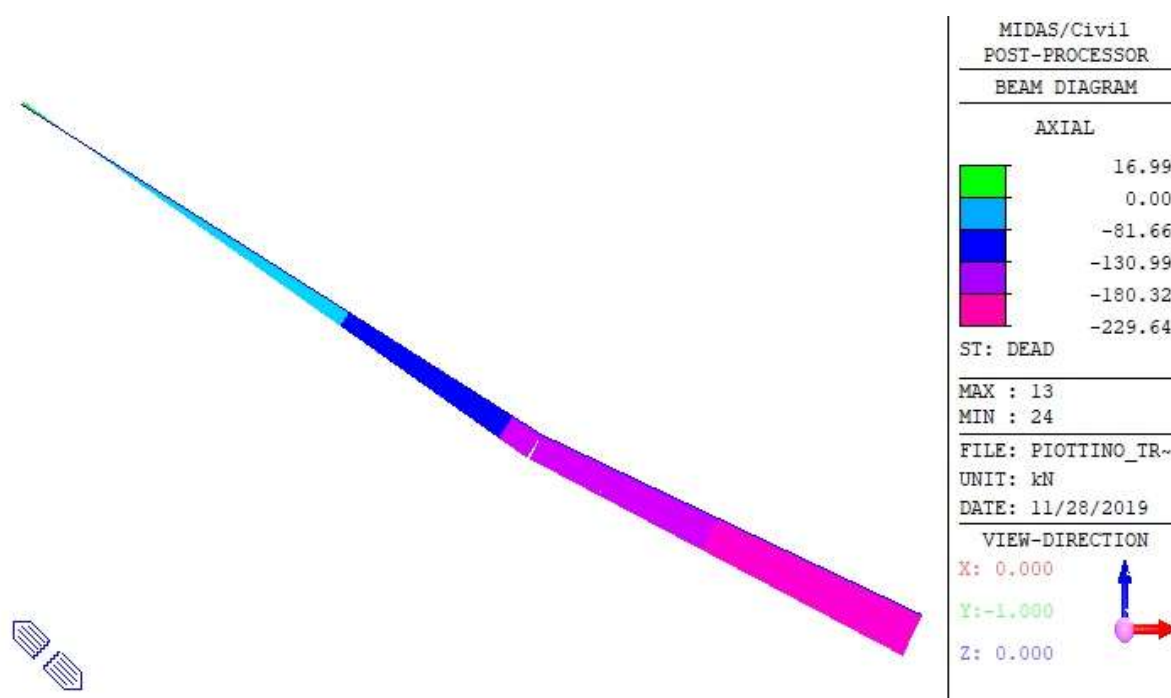


Figura 66 Azione assiale – DEAD – Condotta 3 – Tratta 4

Peso dell'acqua

Si riporta a seguire il diagramma del momento flettente relativo all'effetto del peso dell'acqua contenuta nella condotta e delle spinte idrauliche in corrispondenza del cambio repentino di pendenza della condotta.

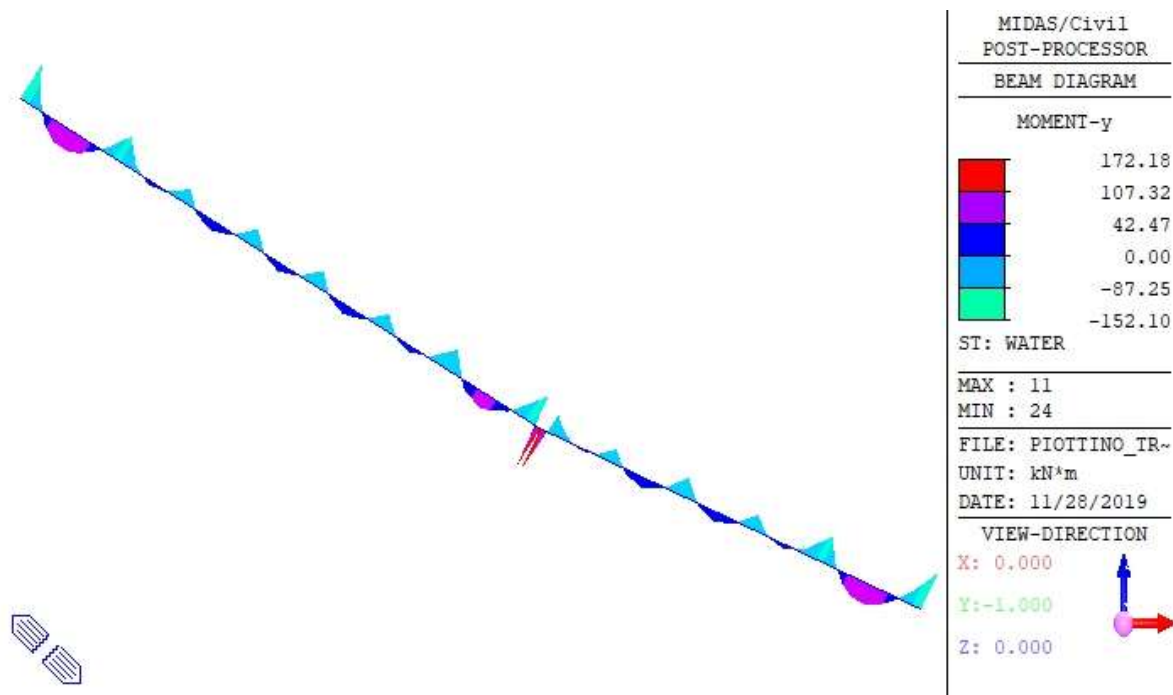


Figura 67 Momento flettente – WATER – Condotta 3 – Tratta 4

8.13 Condotta 3 – Tratta 5

8.13.1 Definizioni geometriche

Si considera il tratto di condotta tra il blocco di ancoraggio FP5 e il blocco di ancoraggio FP6. La tratta 5 ha una lunghezza complessiva di 76.814m, è caratterizzata da una pendenza pari a 8.35° e, appoggia su selle in calcestruzzo disposte a interassi variabili. Lo spessore della tubazione nella tratta considerata è costante e pari a 15mm. Il diametro interno della tubazione è pari a 1300mm.



Figura 68 Geometria del modello di calcolo – Condotta 3 – Tratta 5

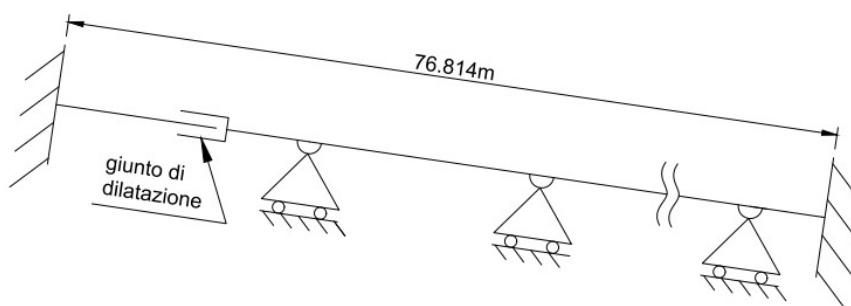


Figura 69 Schema statico della tratta – Condotta 3 – Tratta 5

Considerando lo schema statico del modello di calcolo si possono notare i vincoli a incastro alle due estremità della tratta, le selle intermedie modellate in semplice appoggio e il giunto di dilatazione modellato mediante un manicotto.

8.13.2 Sollecitazioni risultanti

Peso proprio strutturale

Si riportano a seguire i diagrammi del momento flettente e dell'azione assiale relativi all'effetto del peso proprio della condotta.

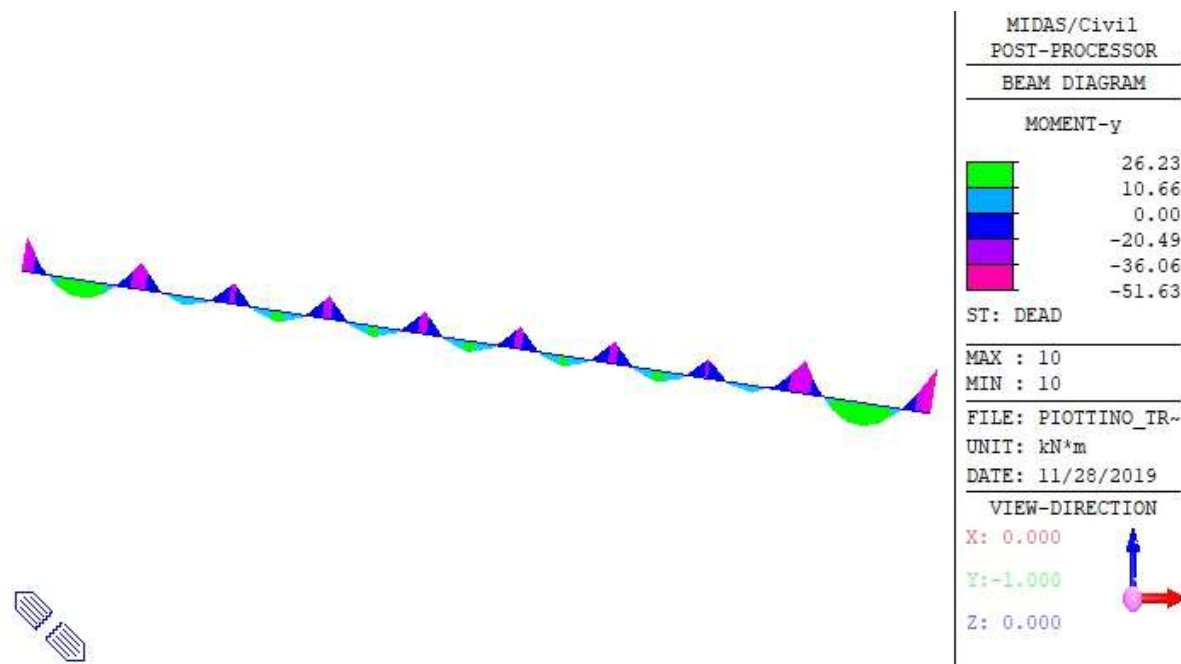


Figura 70 Momento flettente – DEAD – Condotta 3 – Tratta 5

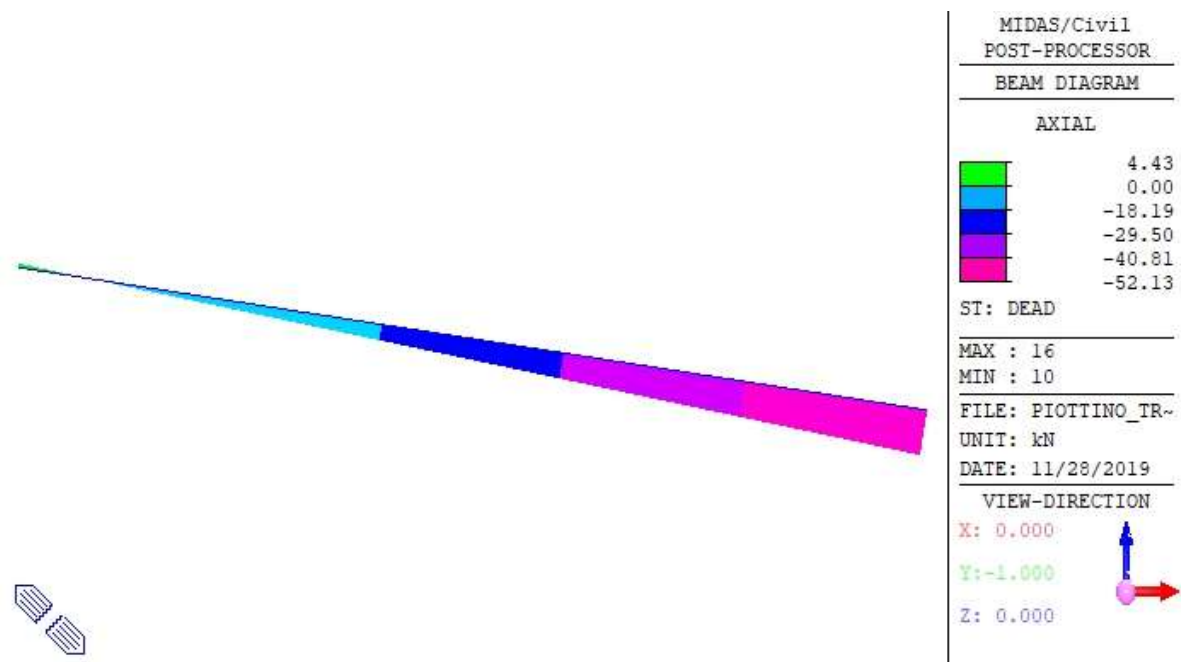


Figura 71 Azione assiale – DEAD – Condotta 3 – Tratta 5

Peso dell'acqua

Si riporta a seguire il diagramma del momento flettente relativo all'effetto del peso dell'acqua contenuta nella condotta.

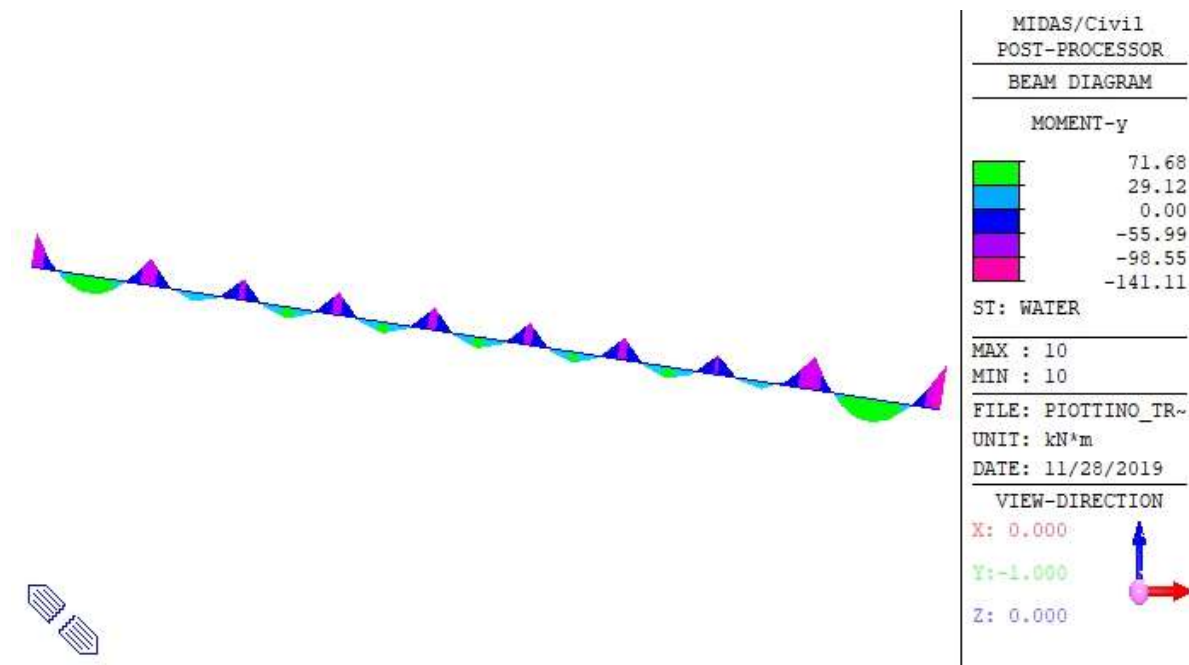


Figura 72 Momento flettente – WATER – Condotta 3 – Tratta 5

8.14 Condotta 3 – Tratta 6

8.14.1 Definizioni geometriche

Si considera il tratto di condotta tra il blocco di ancoraggio FP6 e l'ingresso in centrale. La tratta 6 ha una lunghezza complessiva di 32.879m, è caratterizzata da una pendenza pari a 11.58° e, appoggia su tre selle in calcestruzzo. Lo spessore della tubazione nella tratta considerata è costante e pari a 16mm. Il diametro interno della tubazione è pari a 1300mm.

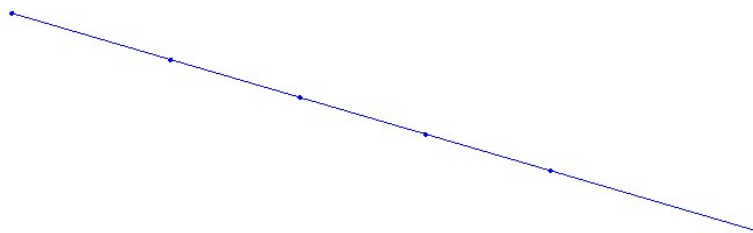


Figura 73 Geometria del modello di calcolo – Condotta 3 – Tratta 6

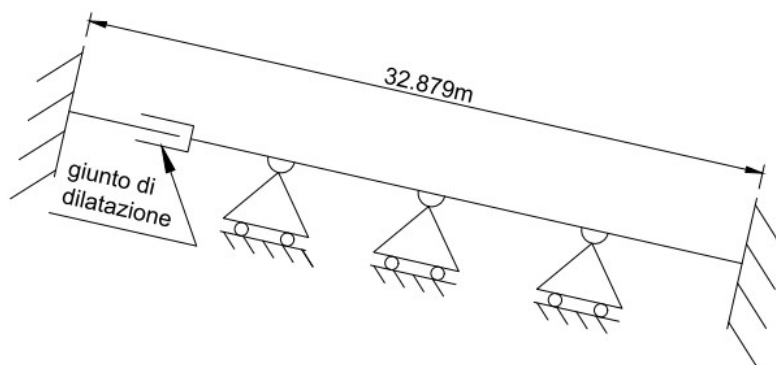


Figura 74 Schema statico della tratta – Condotta 3 – Tratta 6

Considerando lo schema statico del modello di calcolo si possono notare i vincoli a incastro alle due estremità della tratta, le selle intermedie modellate in semplice appoggio e il giunto di dilatazione modellato mediante un manicotto.

8.14.2 Sollecitazioni risultanti

Peso proprio strutturale

Si riportano a seguire i diagrammi del momento flettente e dell'azione assiale relativi all'effetto del peso proprio della condotta.

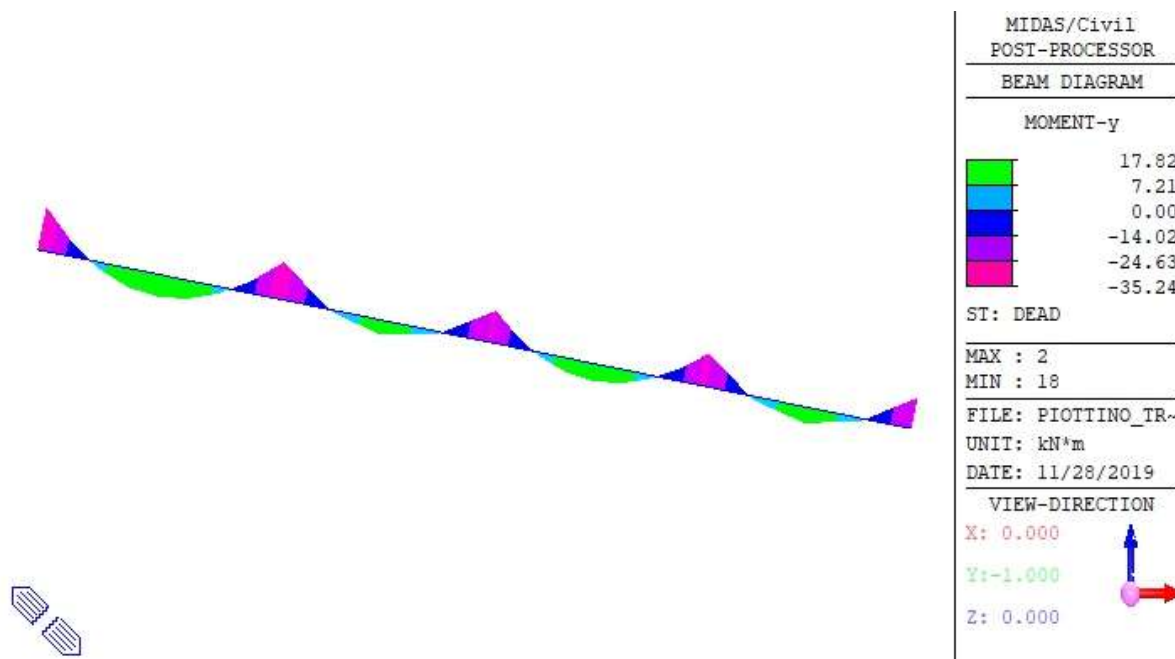


Figura 75 Momento flettente – DEAD – Condotta 3 – Tratta 6

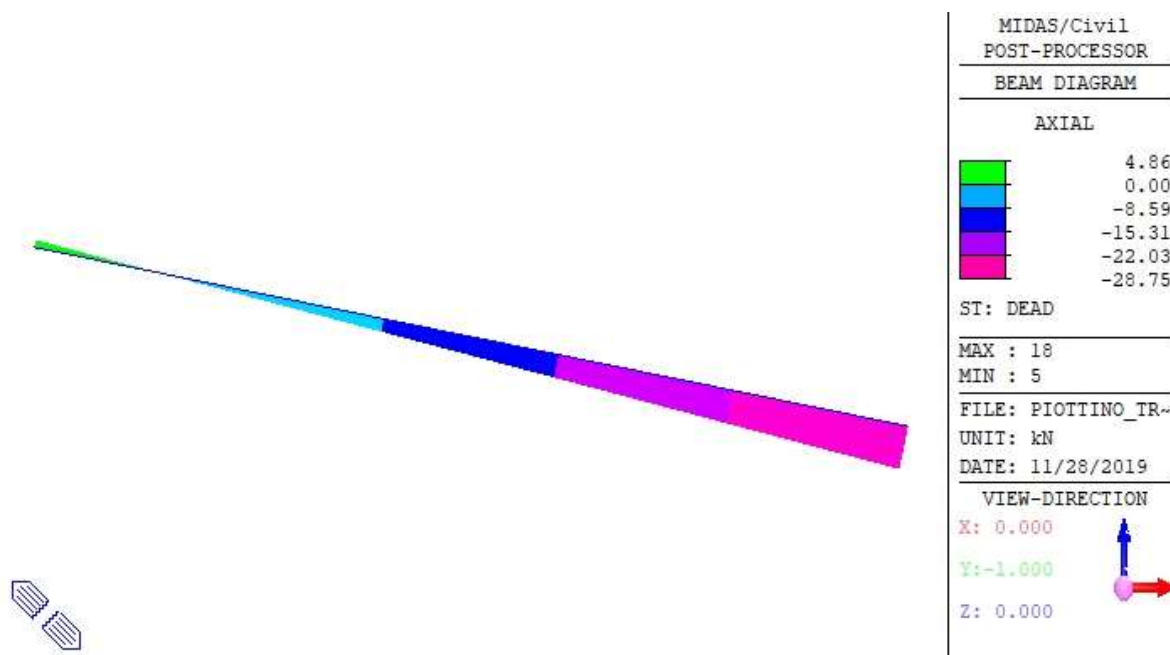


Figura 76 Azione assiale – DEAD – Condotta 3 – Tratta 6

Peso dell'acqua

Si riporta a seguire il diagramma del momento flettente relativo all'effetto del peso dell'acqua contenuta nella condotta.

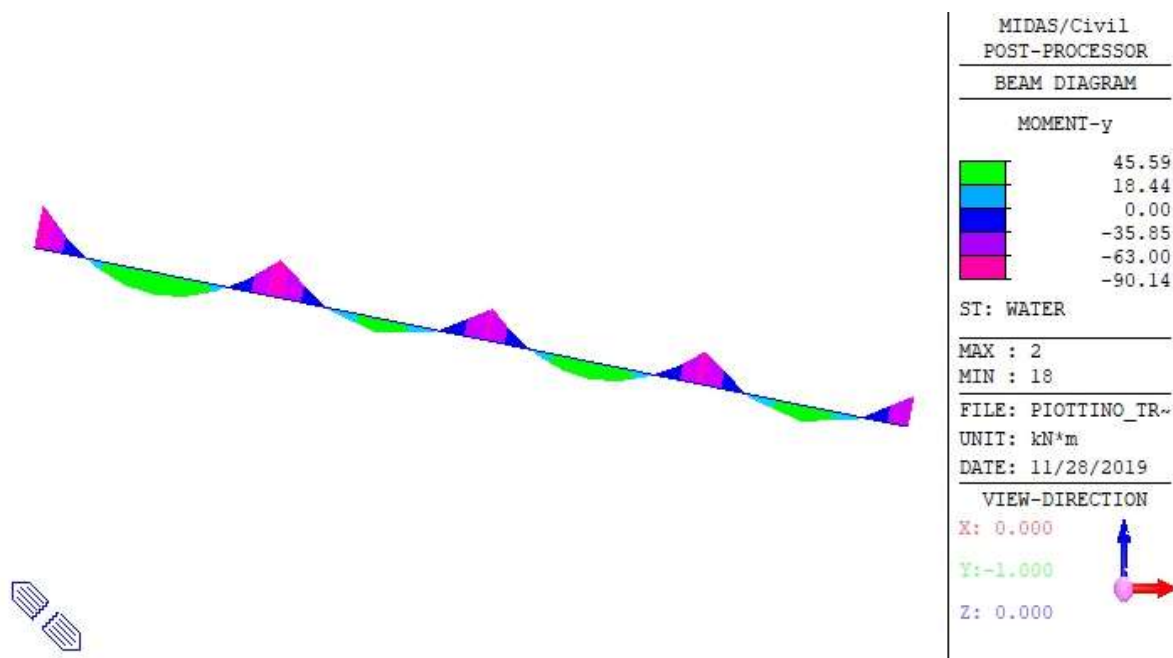


Figura 77 Momento flettente – WATER – Condotta 3 – Tratta 6

9. ANALISI SISMICA

L'opera in oggetto si trova nel comune di Chironico nel Canton Ticino e i parametri utilizzati per la definizione dell'azione sismica sono riportati di seguito:

- Zona sismica Z1
- Accelerazione orizzontale al terreno $a_{gd} = 0.6 \text{ m/s}^2$
- Classe di terreno (roccia dura o tenera) A
- Coefficiente di smorzamento $\xi = 5 \%$

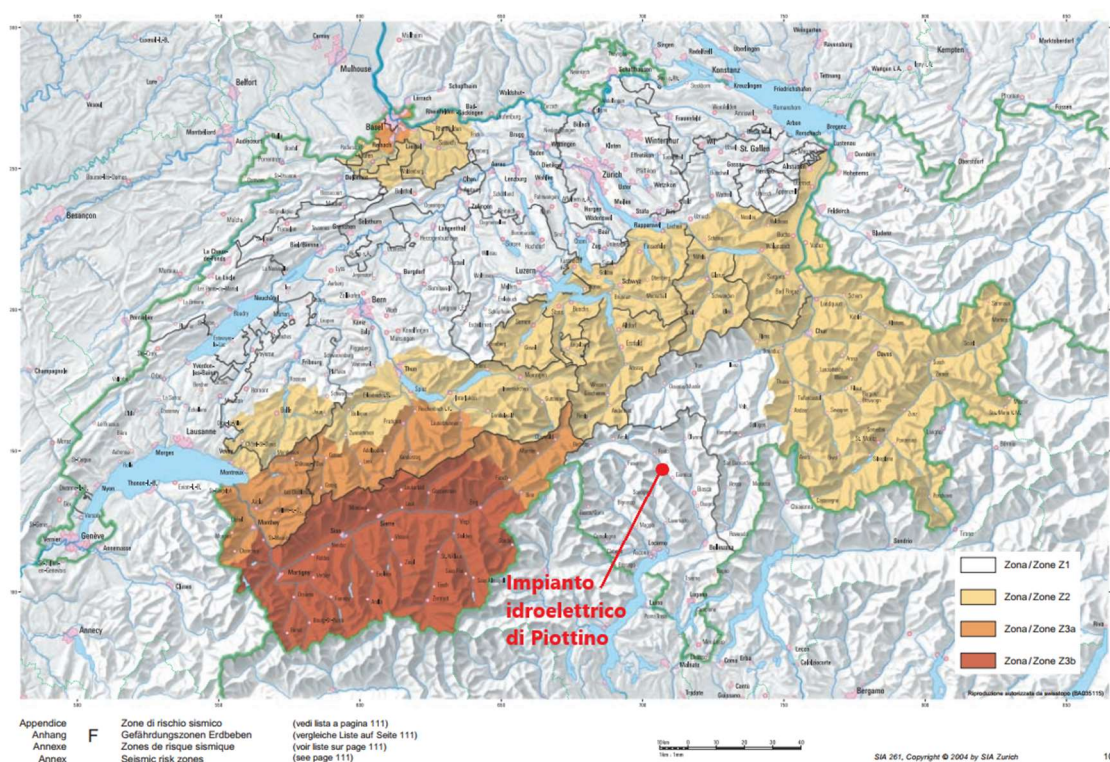


Figura 78 Zone sismiche – rif. Appendice F, SN 505 261

Lo spettro di risposta elastico nel comune in esame viene determinato in accordo al paragrafo 16.2.3.1 delle SN 505 261:

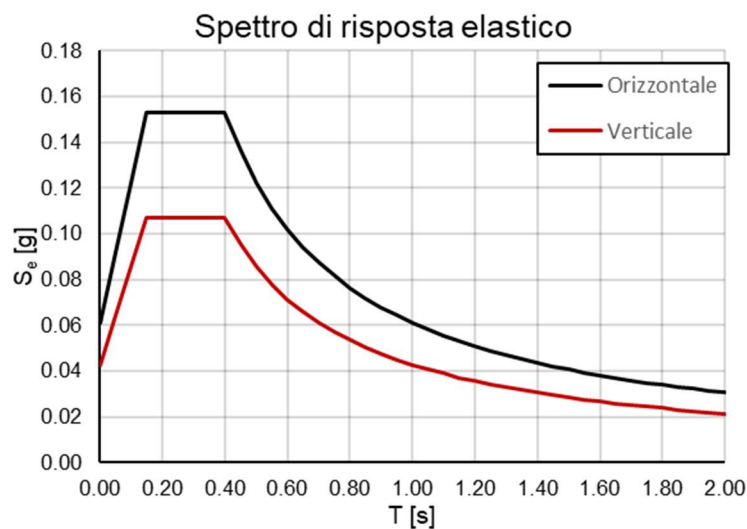


Figura 79 Spettro di risposta elastico

Per la definizione delle azioni sismiche è stata eseguita un'analisi dinamica lineare nelle direzioni orizzontali X, Y e verticale Z, determinando i modi di vibrare della struttura. Combinando le singole risposte modali (modi più significativi) ed in funzione degli spettri di risposta in accelerazione secondo il metodo SRSS, si ottengono le sollecitazioni di progetto in condizioni sismiche. Si riportano a seguire i diagrammi del momento flettente relativi all'effetto del sisma.

9.1 Tratta 1

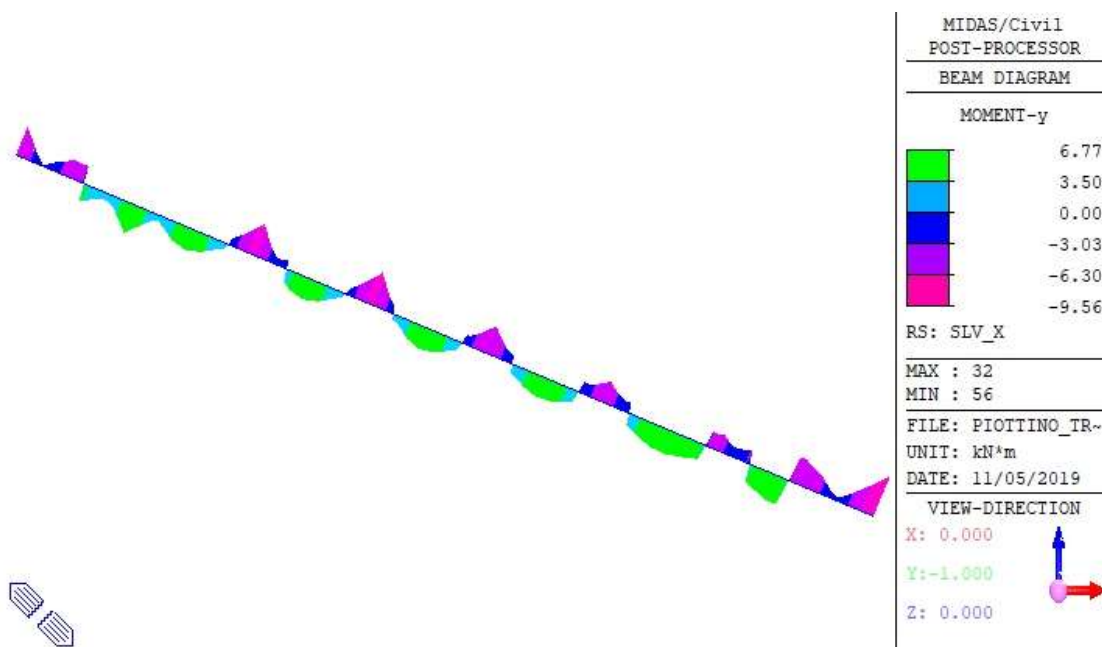


Figura 80 Momento flettente – Sisma di progetto in direzione X – Condotta 1 –Tratta 1

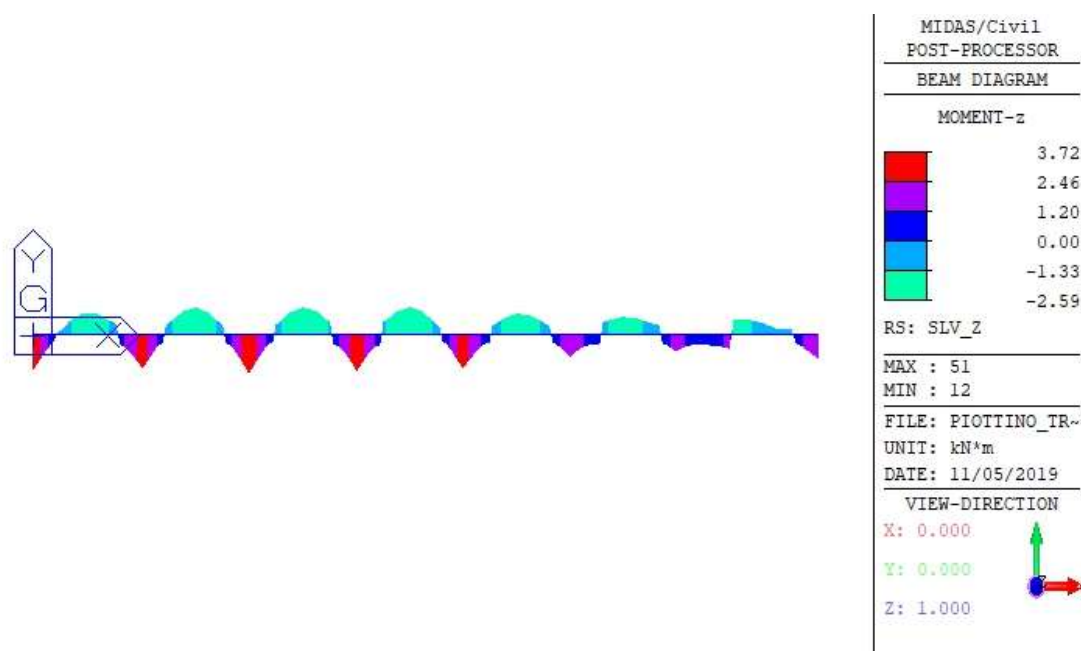


Figura 81 Momento flettente – Sisma di progetto in direzione Y – Condotta 1 – Tratta 1

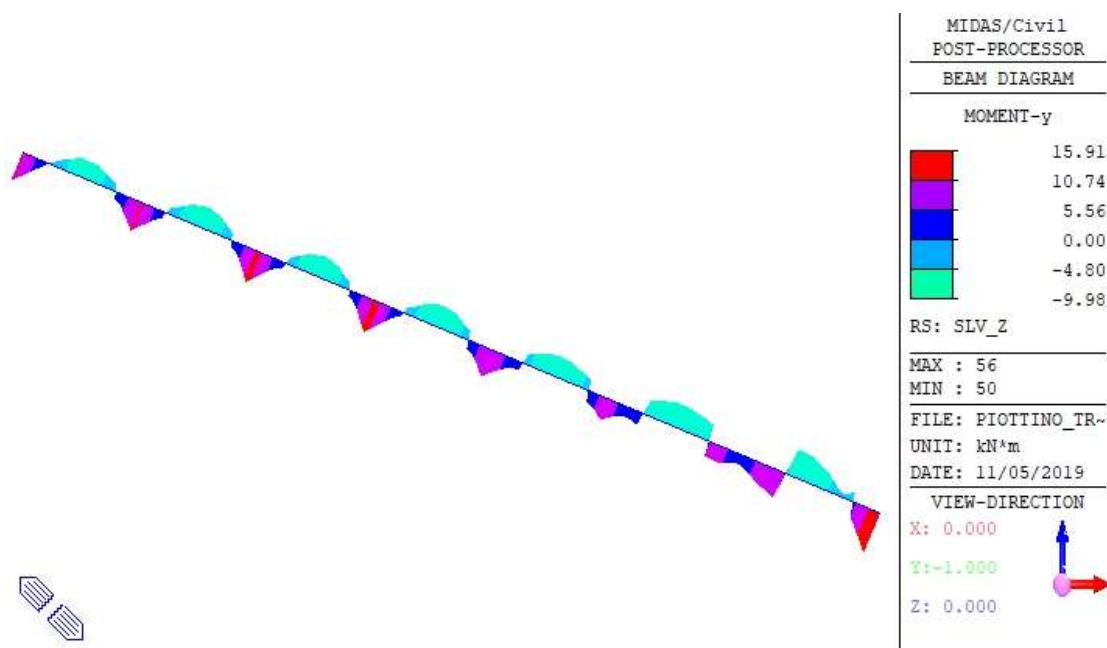


Figura 82 Momento flettente – Sisma di progetto in direzione Z – Condotta 1 – Tratta 1

9.2 Valutazione incremento idrodinamico della pressione per effetto del sisma

La valutazione dell'incremento sismico delle pressioni viene eseguita in accordo alla formulazione presentata nell'articolo "Hydrodynamic pressure" (ref. [10]). In particolare, si ottiene:

| | | |
|---|--|-------------------|
| ▪ Lunghezza totale della condotta | $L = 565.446$ | m |
| ▪ Celerità propagazione delle perturbazioni | $c = 1000$ | m/s |
| ▪ Frequenza modo fondamentale (n=1) | $f_n = (2n-1) c / (4L) = f_1 = 0.44$ | 1/s |
| ▪ Periodo di vibrazione modo fondamentale (n=1) | $T_n = 1 / f_n = T_1 = 2.26$ | s |
| ▪ Smorzamento | $\xi = 2$ | % |
| ▪ Fattore di correzione effetti di smorzamento | $\eta = (10 / (5 + \xi))^{0.5} = \eta = 1.195$ | |
| ▪ Densità dell'acqua | $\rho = 1000$ | kg/m ³ |
| ▪ Ordinata spettro di risposta elastico di progetto (vedi figura seguente) | $S_e = S_e(f_1, \xi_1) = S_e = 0.024$ | 1/g |
| ▪ Massimo incremento idrodinamico della pressione per effetto del sisma (n=1) [$p_n = 8\eta\rho LS / ((2n-1)^2 \pi^2)$] | $p_1 = 128.536$ | kN/m ² |

Analogamente, si valutano i contributi all'incremento idrodinamico della pressione relativi ai modi di vibrare di ordine superiore:

| | | |
|---|----------------|-------------------|
| ▪ Incremento idrodinamico della pressione per effetto del sisma (n=2) [$p_n = 8\eta\rho LS / ((2n-1)^2 \pi^2)$] | $p_2 = 48.455$ | kN/m ² |
| ▪ Incremento idrodinamico della pressione per effetto del sisma (n=3) [$p_n = 8\eta\rho LS / ((2n-1)^2 \pi^2)$] | $P_3 = 29.079$ | kN/m ² |
| ▪ Incremento idrodinamico della pressione per effetto del sisma (n=4) [$p_n = 8\eta\rho LS / ((2n-1)^2 \pi^2)$] | $p_4 = 16.770$ | kN/m ² |

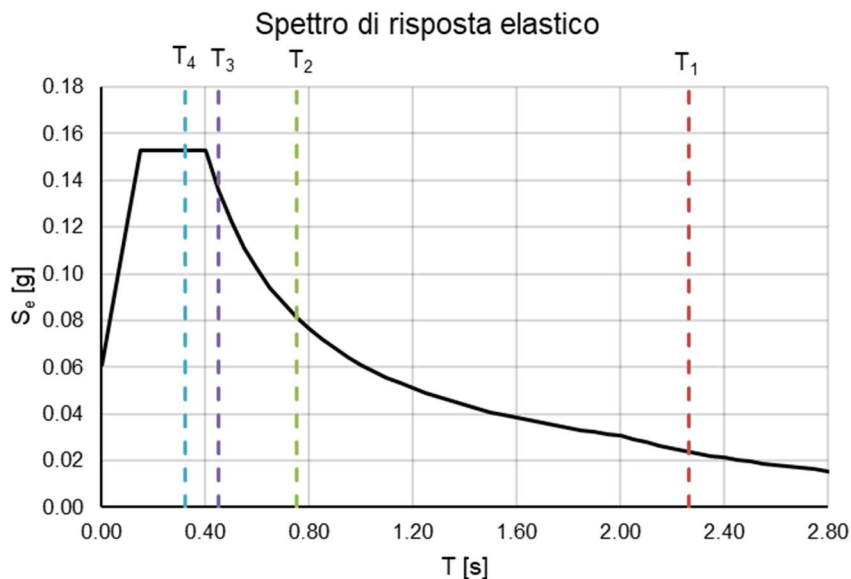


Figura 83 Ordinate dello spettro di risposta elastico in corrispondenza dei primi 4 modi di vibrare della condotta

Considerando i primi 4 modi di vibrare della condotta si ottiene un incremento idrodinamico della pressione per effetto del sisma pari a:

- Incremento idrodinamico totale della pressione $P_{\text{tot}} = 222.840 \text{ kN/m}^2$

9.3 Considerazioni

In base ai risultati ottenuti nei paragrafi precedenti si può osservare che l'azione sismica non è dimensionante per l'opera in oggetto; infatti, si evidenzia che:

- I valori dei momenti flettenti, agenti nel piano verticale, per effetto del sisma risultano marginali rispetto ai valori dei momenti flettenti determinati dagli effetti del peso proprio della condotta e del peso dell'acqua contenuta all'interno della condotta stessa;
- I valori dei momenti flettenti, agenti nel piano orizzontale, per effetto del sisma risultano modesti; inoltre, gli effetti di tali momenti flettenti possono essere trascurati poiché la condotta risulta maggiormente sollecitata nel piano verticale rispetto al piano orizzontale;
- L'incremento idrodinamico della pressione per effetto del sisma risulta circa pari al 7% della pressione idrostatica massima e dunque marginale rispetto agli effetti di quest'ultima;
- I coefficienti di sicurezza che devono essere adottati nella definizione delle tensioni ammissibili per la condizione di carico sismica risultano inferiori rispetto ai coefficienti di sicurezza relativi alla condizione di carico normale.

10. VERIFICA E DETERMINAZIONE DEGLI SPESSORI DI CALCOLO – METODO ALLE TENSIONI AMMISSIBILI – CONDOTTA 1

10.1 Sezioni di verifica

Per le verifiche di resistenza sezionali si considerano lungo lo sviluppo della condotta le variazioni di pressione, di sollecitazione e di spessore individuando 48 sezioni di riferimento ritenute significative per le verifiche.

| Tr. | Tipo | Sez. | n° Virola | α | Svil. | Q | s_d | D | R_{eH} |
|-----|----------|------|-----------|----------|--------|------------|-------|------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [-] | [°] | [m] | [m.s.l.m.] | [mm] | [mm] | [N/mm ²] |
| 1 | Campata | 1 | 9 | 22.84 | 50.00 | 886.11 | 8 | 1594 | 235 |
| | Campata | 2 | 14 | 22.84 | 105.89 | 864.42 | 8 | 1550 | 235 |
| | Appoggio | 3 | 14 | 22.84 | 111.39 | 862.29 | 8 | 1550 | 235 |
| 2 | Campata | 4 | 17 | 42.90 | 131.55 | 852.85 | 9 | 1496 | 235 |
| | Campata | 5 | 17 | 42.90 | 139.55 | 847.41 | 9 | 1450 | 235 |
| | Appoggio | 6 | 18 | 42.90 | 144.08 | 844.32 | 10 | 1450 | 235 |
| | Campata | 7 | 19 | 42.90 | 160.62 | 833.06 | 10 | 1450 | 235 |
| | Appoggio | 8 | 20 | 42.90 | 165.43 | 829.79 | 10 | 1450 | 235 |
| | Campata | 9 | 21 | 42.90 | 179.65 | 820.11 | 11 | 1450 | 235 |
| | Appoggio | 10 | 22 | 42.90 | 184.45 | 816.84 | 11 | 1450 | 235 |
| | Campata | 11 | 23 | 42.90 | 198.74 | 807.11 | 12 | 1450 | 235 |
| 3 | Appoggio | 12 | 24 | 42.90 | 203.49 | 803.88 | 12 | 1450 | 235 |
| | Campata | 13 | 27 | 58.79 | 230.11 | 784.10 | 14 | 1456 | 235 |
| | Campata | 14 | 27 | 58.79 | 238.74 | 776.72 | 14 | 1400 | 235 |
| | Appoggio | 15 | 28 | 58.79 | 241.88 | 774.04 | 14 | 1400 | 235 |
| | Campata | 16 | 29 | 58.79 | 256.16 | 761.82 | 15 | 1400 | 235 |
| | Appoggio | 17 | 30 | 58.79 | 260.97 | 757.71 | 15 | 1400 | 235 |
| | Campata | 18 | 31 | 58.79 | 265.71 | 753.65 | 16 | 1400 | 235 |
| | Appoggio | 19 | 31 | 58.79 | 270.45 | 749.60 | 16 | 1400 | 235 |
| | Campata | 20 | 32 | 58.79 | 284.80 | 737.33 | 17 | 1400 | 235 |
| | Appoggio | 21 | 33 | 58.79 | 289.55 | 733.27 | 17 | 1400 | 235 |
| | Campata | 22 | 33 | 58.79 | 294.34 | 729.17 | 18 | 1400 | 235 |
| | Appoggio | 23 | 34 | 58.79 | 299.13 | 725.07 | 18 | 1400 | 235 |
| | Campata | 24 | 35 | 58.79 | 313.50 | 712.79 | 19 | 1400 | 235 |
| | Appoggio | 25 | 36 | 58.79 | 318.32 | 708.66 | 19 | 1400 | 235 |
| | Campata | 26 | 37 | 58.79 | 332.50 | 696.53 | 20 | 1400 | 235 |
| | Appoggio | 27 | 38 | 58.79 | 337.24 | 692.47 | 20 | 1400 | 235 |
| | Campata | 28 | 38 | 58.79 | 342.08 | 688.33 | 21 | 1400 | 235 |
| | Appoggio | 29 | 39 | 58.79 | 346.92 | 684.20 | 21 | 1400 | 235 |
| 4 | Campata | 30 | 40 | 31.68 | 363.35 | 671.64 | 22 | 1404 | 235 |
| | Campata | 31 | 43 | 31.68 | 383.75 | 660.92 | 22 | 1350 | 235 |
| | Appoggio | 32 | 44 | 31.68 | 387.69 | 658.85 | 22 | 1350 | 235 |
| | Campata | 33 | 46 | 31.68 | 407.66 | 648.37 | 23 | 1350 | 235 |
| | Appoggio | 34 | 47 | 31.68 | 411.66 | 646.26 | 23 | 1350 | 235 |
| | Campata | 35 | 48 | 31.68 | 422.06 | 640.80 | 24 | 1350 | 235 |
| | Appoggio | 36 | 48 | 25.62 | 423.74 | 640.08 | 24 | 1350 | 235 |
| | Campata | 37 | 50 | 25.62 | 442.35 | 632.03 | 24 | 1350 | 235 |
| | Appoggio | 38 | 51 | 25.62 | 446.39 | 630.28 | 24 | 1350 | 235 |
| | Campata | 39 | 52 | 25.62 | 452.41 | 627.68 | 25 | 1350 | 235 |
| | Appoggio | 40 | 52 | 25.62 | 454.37 | 626.83 | 25 | 1350 | 235 |
| 5 | Campata | 41 | 53 | 8.35 | 471.32 | 621.23 | 25 | 1360 | 235 |
| | Campata | 42 | 55 | 8.35 | 487.09 | 618.94 | 24 | 1300 | 235 |
| | Appoggio | 43 | 56 | 8.35 | 491.11 | 618.36 | 24 | 1300 | 235 |
| | Campata | 44 | 60 | 8.35 | 527.05 | 613.14 | 25 | 1300 | 235 |
| | Appoggio | 45 | 61 | 8.35 | 531.06 | 612.56 | 25 | 1300 | 235 |
| 6 | Campata | 46 | 62 | 16.40 | 547.13 | 609.54 | 25 | 1360 | 235 |
| | Campata | 47 | 64 | 16.40 | 555.18 | 607.27 | 25 | 1300 | 235 |
| | Appoggio | 48 | 64 | 16.40 | 559.14 | 606.15 | 25 | 1300 | 235 |

Tabella 16 Caratteristiche sezioni di verifica

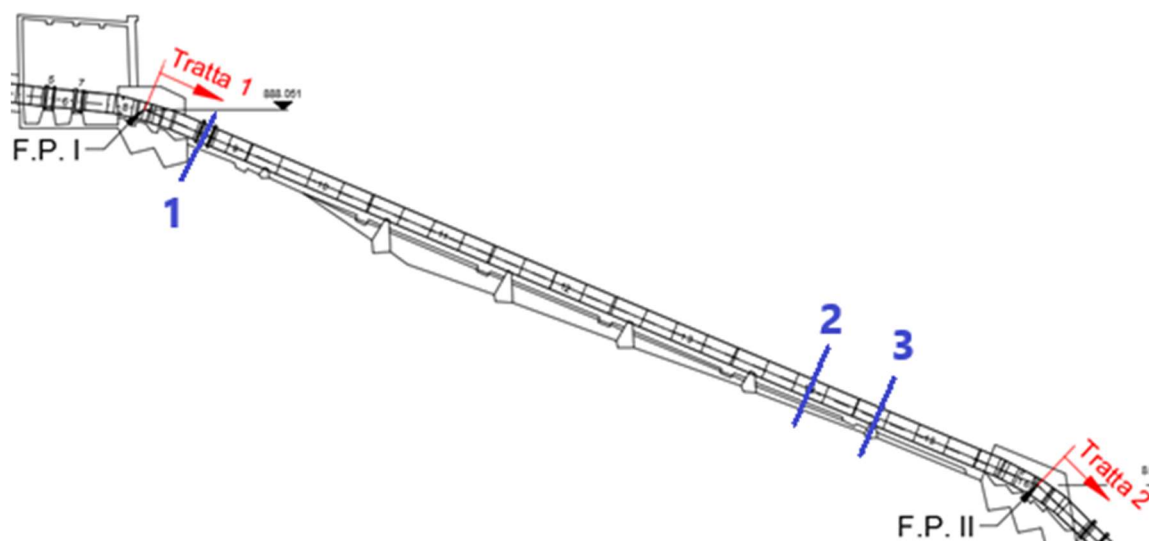


Figura 84 Sezioni di riferimento per le verifiche strutturali – Tratta 1

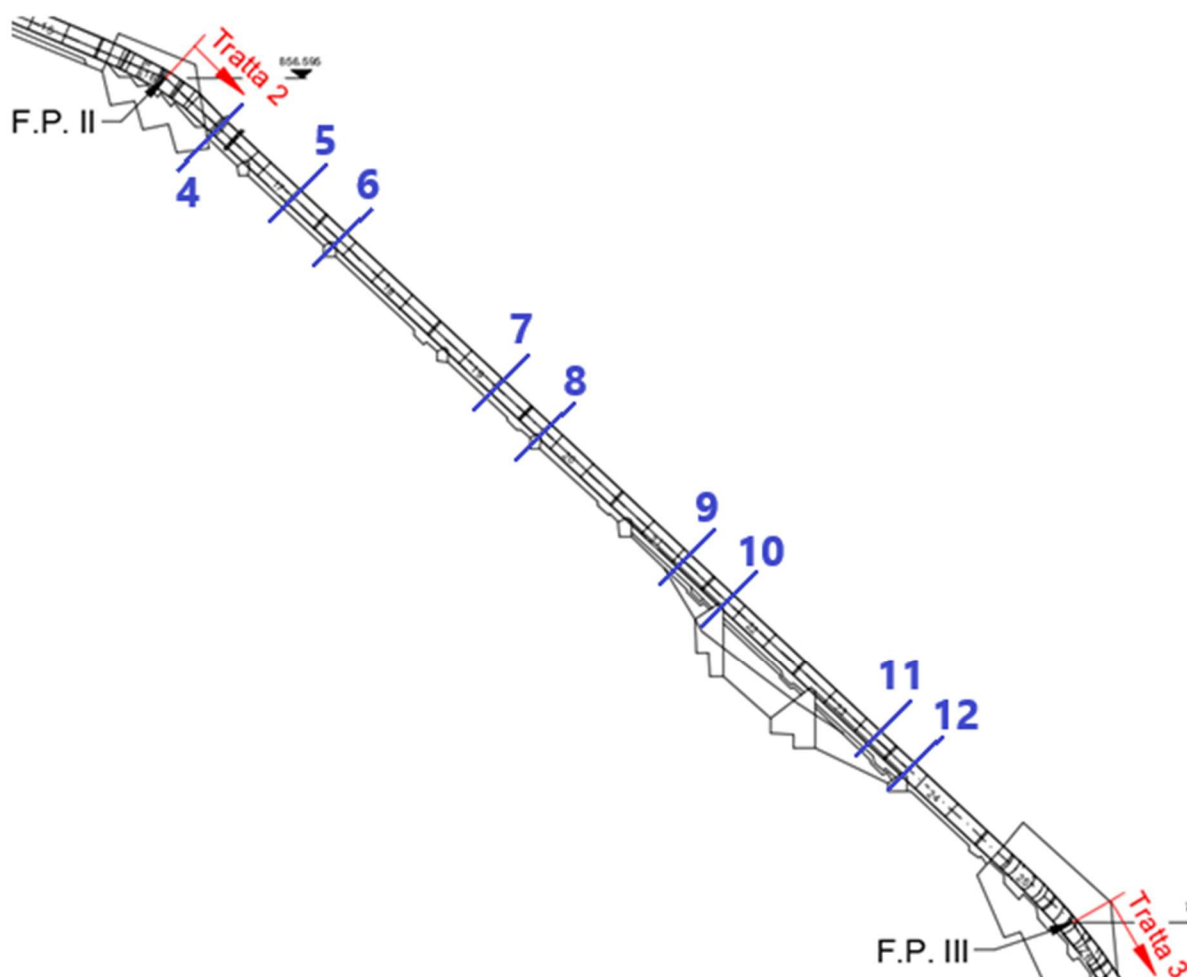


Figura 85 Sezioni di riferimento per le verifiche strutturali – Tratta 2

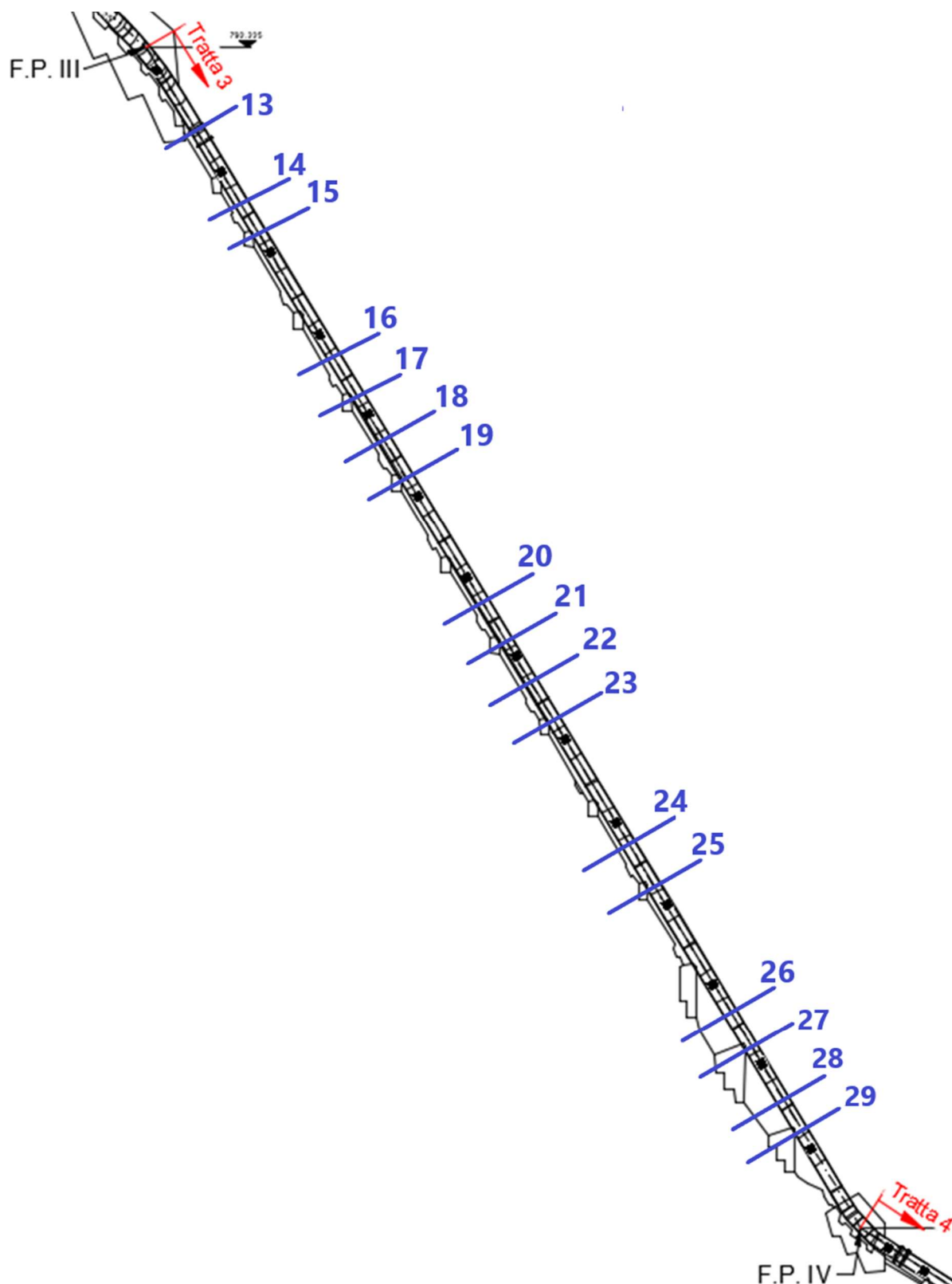


Figura 86 Sezioni di riferimento per le verifiche strutturali – Tratta 3

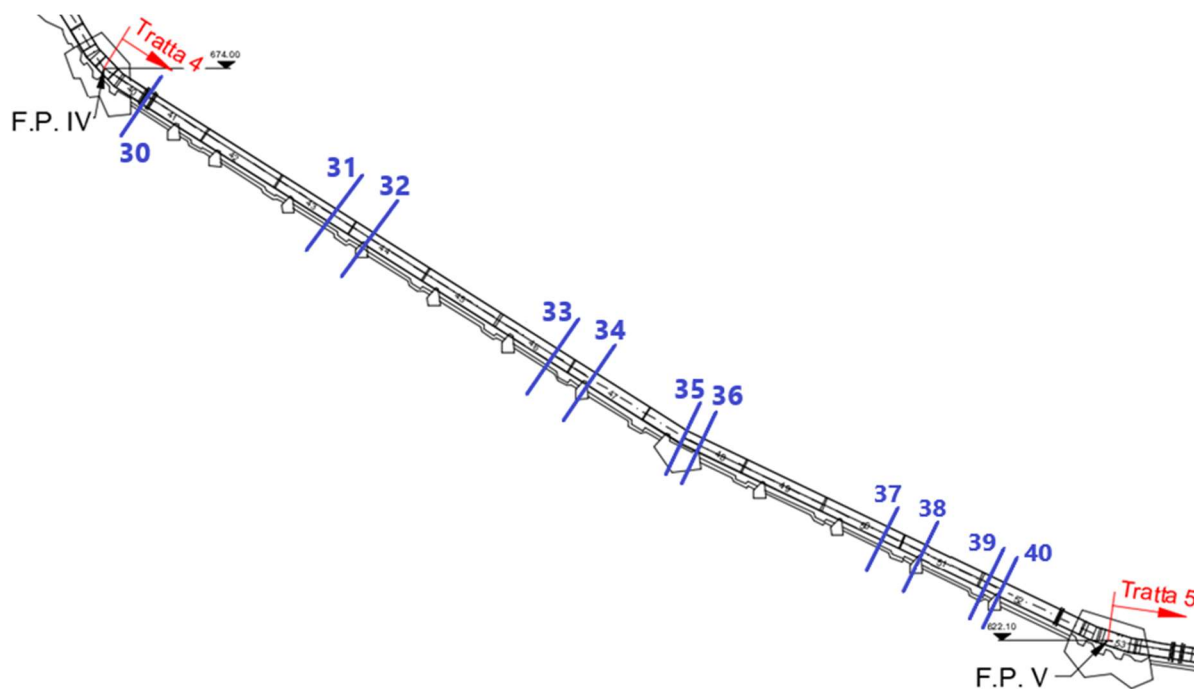


Figura 87 Sezioni di riferimento per le verifiche strutturali – Tratta 4

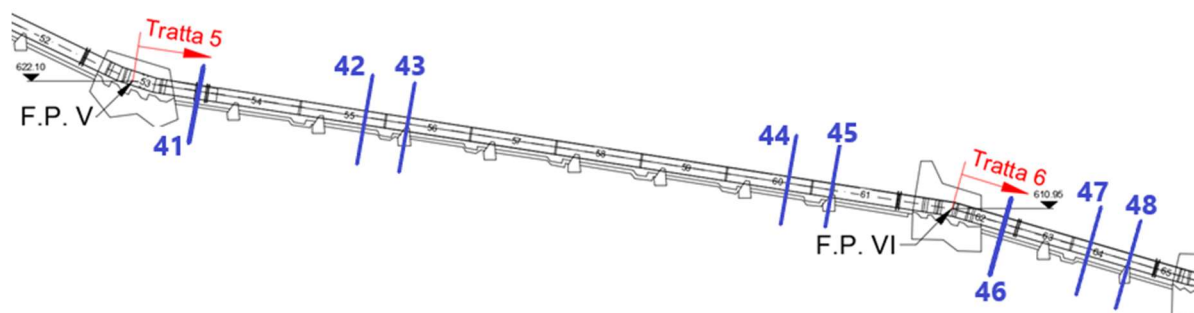


Figura 88 Sezioni di riferimento per le verifiche strutturali – Tratte 5 e 6

10.2 Condizione di carico normale

Per la condotta in oggetto, nella condizione di carico normale si considera la combinazione delle seguenti azioni:

- Pressione interna massima (considerando gli effetti dovuti al colpo d'ariete);
- Peso proprio della tubazione e dell'acqua in essa contenuta;
- Azioni derivanti dall'attrito sulle selle di appoggio;
- Spinta sulle curve e/o tratti caratterizzati da variazione repentina di pendenza;
- Azione della neve;
- Azione del vento.

Nella condizione di carico normale si adottano i seguenti coefficienti di sicurezza nella definizione delle tensioni ammissibili:

| Norma | Tensioni principali | | Tensioni da perturbazioni locali |
|-------|---|--|---|
| ASCE | $\sigma_{adm} \leq \min \left[\frac{R_{eH}}{1,5}; \frac{R_m}{2,4} \right] = S$ | | $\sigma_{adm} \leq \min[S * 1.5; R_{eH}]$ |
| CECT | $\sigma_{adm} \leq \frac{R_{eH}}{1,7}$ | | $\sigma_{adm} \leq R_{eH}$ |

Tabella 17 Fattori di sicurezza – Condizione di carico normale

Si assume inoltre un fattore di efficienza dei giunti saldati pari a $z_s = 0.85$.

10.2.1 Spinte idrauliche generate in corrispondenza dei cambi di pendenza e/o tratti in curva

La condotta in esame presenta un vertice che con continuità collega tratti della condotta stessa caratterizzati da repentine variazioni di pendenza. La diversa pendenza tra il tratto immediatamente a monte e a valle del vertice determina la generazione di una spinta idraulica diretta, approssimativamente, lungo la bisettrice dell'angolo formato tra i due tratti di condotta a monte e a valle del vertice stesso.

Le azioni sollecitanti i tratti di condotta caratterizzati da cambi di pendenza e/o tratti curvilinei vengono analizzate tramite l'equazione globale dell'equilibrio dinamico dei fluidi viscosi incompressibili:

$$G + \Pi_i + M_1 - M_2 + I - T = 0$$

dove:

- $\Pi = \gamma h_g A$ Spinta idrostatica, agente in direzione normale rispetto alle superfici premute, con verso entrante;

- $M = \beta \rho Q^2 / A$ Flusso della quantità di moto, agente in direzione normale rispetto alle superfici premute, con verso entrante;
- $I = - \frac{\partial}{\partial t} \int \rho v dW$ Risultante delle inerzie locali;
- $T = \mu \int \frac{\partial v}{\partial n} dA$ Azione di trascinamento;
- $G = \gamma V$ Peso del fluido contenuto all'interno del tratto di condotta.

In tali relazioni sono state introdotte le seguenti quantità:

- h_g Quota baricentrica della sezione esaminata rispetto al piano dei carichi idrostatici al quale viene aggiunto l'altezza idraulica determinata dal colpo di ariete;
- A Area della sezione della condotta;
- $\gamma = \rho g$ Peso specifico dell'acqua (ρ = densità);
- Q Portata del fluido;
- V Volume del tratto di condotta analizzato;
- β Coefficiente di ragguaglio dei flussi delle quantità di moto.

Nei calcoli che seguono si valutano le spinte idrauliche considerando gli incrementi di pressione dovuti agli effetti del colpo d'ariete, pertanto si assume che l'acqua all'interno della condotta stia arrestando il proprio moto. Conseguentemente, si assumono le seguenti ipotesi:

- Le inerzie locali vengono trascurate supponendo che la velocità e la densità del fluido non varino nel tempo ($I = 0$);
- Il flusso delle quantità di moto ($M = 0$) e l'azione di trascinamento ($T = 0$) vengono trascurati (poiché la velocità del fluido è nulla).

10.2.1.1 Variazione repentina di pendenza nel tratto 4

Nel tratto 4 della condotta è presente un vertice di connessione tra due tratti aventi inclinazione pari a 31.68°, a monte, e pari a 25.62°, a valle. Il tratto di condotta in cui si verifica tale cambiamento di pendenza presenta una lunghezza misurata tra agli assi delle selle di appoggio poste alle sue estremità pari a 3.13m.

Isolando il tratto di condotta tra le due selle di appoggio e scrivendo l'equazione di equilibrio globale della dinamica dei fluidi si ottiene: $G + \Pi_1 + \Pi_2 = 0$.

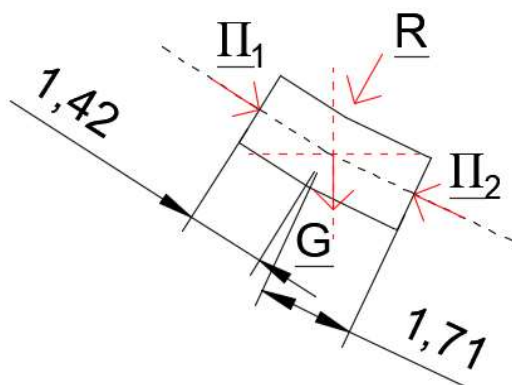


Figura 89 Geometria di calcolo del tratto caratterizzato dalla variazione repentina di pendenza

Le azioni agenti in questo tratto isolato di condotta sono pari a:

▪ **Spinta totale**

| | | | | |
|--------------------------------|----------|---|-----------------|-------------------|
| (idrostatica + colpo d'ariete) | h_{g1} | = | 312.89 | m |
| | A | = | 1.431 | m ² |
| | γ | = | 9.81 | kN/m ³ |
| $(\Pi_1 = \gamma h_{g1} A)$ | Π_1 | = | 4393.614 | kN |

▪ **Spinta totale**

| | | | | |
|--------------------------------|----------|---|-----------------|-------------------|
| (idrostatica + colpo d'ariete) | h_{g2} | = | 314.46 | m |
| | A | = | 1.431 | m ² |
| | γ | = | 9.81 | kN/m ³ |
| $(\Pi_2 = \gamma h_{g2} A)$ | Π_2 | = | 4415.632 | kN |

▪ **Peso proprio**

| | | | | |
|------------------|----------|---|--------------|-------------------|
| | γ | = | 9.81 | kN/m ³ |
| | A | = | 1.431 | m ² |
| | L | = | 3.13 | m |
| $(G = \gamma V)$ | G | = | 43.95 | kN |

Componendo vettorialmente tali azioni, adottando il metodo grafico "punta-coda", si ottiene un vettore risultante (**R**) inclinato di $\alpha = 61.25^\circ$ rispetto al piano orizzontale e di modulo pari a:

| | | | | |
|-------------------|----------|---|----------------|-----------|
| Risultante | R | = | 504.217 | kN |
| Comp. orizzontale | R_x | = | 242.55 | kN |
| Comp. verticale | R_z | = | 442.04 | kN |

10.2.2 Analisi tensionale

La pressione interna massima nelle sezioni di verifica risulta nella seguente Tabella 18.

| Tr. | Tipo | Sez. | α | Svil. | Progr. | Q | Q _{p.c.i.} | Q _{piezometrica} | P _{hydro} | C _A | P _{tot} |
|-----|-------|------|----------|-------|--------|------------|---------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [°] | [m] | [m] | [m.s.l.m.] | [m] | [m] | [kN/m ²] | [kN/m ²] | [kN/m ²] |
| 1 | Camp. | 1 | 22.8 | 51.1 | 50.3 | 885.69 | 945.0 | 59.3 | 581.8 | 14.9 | 596.7 |
| | Camp. | 2 | 22.8 | 105.9 | 100.8 | 864.42 | 945.0 | 80.6 | 790.5 | 29.8 | 820.3 |
| | App. | 3 | 22.8 | 111.4 | 105.9 | 862.29 | 945.0 | 82.7 | 811.4 | 31.3 | 842.8 |
| 2 | Camp. | 4 | 42.9 | 133.3 | 124.7 | 851.68 | 945.0 | 93.3 | 915.5 | 36.9 | 952.4 |
| | Camp. | 5 | 42.9 | 139.5 | 129.3 | 847.41 | 945.0 | 97.6 | 957.4 | 38.3 | 995.6 |
| | App. | 6 | 42.9 | 144.1 | 132.6 | 844.32 | 945.0 | 100.7 | 987.6 | 39.2 | 1026.9 |
| | Camp. | 7 | 42.9 | 160.6 | 144.7 | 833.06 | 945.0 | 111.9 | 1098.1 | 42.8 | 1140.9 |
| | App. | 8 | 42.9 | 165.4 | 148.3 | 829.79 | 945.0 | 115.2 | 1130.2 | 43.9 | 1174.1 |
| | Camp. | 9 | 42.9 | 179.6 | 158.7 | 820.11 | 945.0 | 124.9 | 1225.1 | 47.0 | 1272.1 |
| | App. | 10 | 42.9 | 184.5 | 162.2 | 816.84 | 945.0 | 128.2 | 1257.2 | 48.0 | 1305.2 |
| | Camp. | 11 | 42.9 | 198.7 | 172.7 | 807.11 | 945.0 | 137.9 | 1352.7 | 51.1 | 1403.8 |
| 3 | App. | 12 | 42.9 | 203.5 | 176.1 | 803.88 | 945.0 | 141.1 | 1384.3 | 52.1 | 1436.5 |
| | Camp. | 13 | 58.8 | 231.0 | 194.1 | 783.31 | 945.0 | 161.7 | 1586.1 | 57.4 | 1643.6 |
| | Camp. | 14 | 58.8 | 238.7 | 198.1 | 776.72 | 945.0 | 168.3 | 1650.8 | 58.6 | 1709.4 |
| | App. | 15 | 58.8 | 241.9 | 199.7 | 774.04 | 945.0 | 171.0 | 1677.1 | 59.1 | 1736.2 |
| | Camp. | 16 | 58.8 | 256.2 | 207.1 | 761.82 | 945.0 | 183.2 | 1797.0 | 61.3 | 1858.3 |
| | App. | 17 | 58.8 | 261.0 | 209.6 | 757.71 | 945.0 | 187.3 | 1837.3 | 62.0 | 1899.3 |
| | Camp. | 18 | 58.8 | 265.7 | 212.1 | 753.65 | 945.0 | 191.3 | 1877.1 | 62.7 | 1939.8 |
| | App. | 19 | 58.8 | 270.5 | 214.5 | 749.60 | 945.0 | 195.4 | 1916.9 | 63.5 | 1980.4 |
| | Camp. | 20 | 58.8 | 284.8 | 222.0 | 737.33 | 945.0 | 207.7 | 2037.3 | 65.7 | 2102.9 |
| | App. | 21 | 58.8 | 289.5 | 224.4 | 733.27 | 945.0 | 211.7 | 2077.1 | 66.4 | 2143.5 |
| | Camp. | 22 | 58.8 | 294.3 | 226.9 | 729.17 | 945.0 | 215.8 | 2117.3 | 67.1 | 2184.4 |
| | App. | 23 | 58.8 | 299.1 | 229.4 | 725.07 | 945.0 | 219.9 | 2157.5 | 67.9 | 2225.4 |
| | Camp. | 24 | 58.8 | 313.5 | 236.8 | 712.79 | 945.0 | 232.2 | 2278.0 | 70.1 | 2348.1 |
| | App. | 25 | 58.8 | 318.3 | 239.3 | 708.66 | 945.0 | 236.3 | 2318.5 | 70.8 | 2389.3 |
| | Camp. | 26 | 58.8 | 332.5 | 246.7 | 696.53 | 945.0 | 248.5 | 2437.5 | 73.0 | 2510.5 |
| | App. | 27 | 58.8 | 337.2 | 249.1 | 692.47 | 945.0 | 252.5 | 2477.3 | 73.7 | 2551.0 |
| | Camp. | 28 | 58.8 | 342.1 | 251.6 | 688.33 | 945.0 | 256.7 | 2517.9 | 74.5 | 2592.3 |
| | App. | 29 | 58.8 | 346.9 | 254.1 | 684.20 | 945.0 | 260.8 | 2558.4 | 75.2 | 2633.6 |
| 4 | Camp. | 30 | 31.7 | 365.7 | 266.2 | 670.40 | 945.0 | 274.6 | 2693.9 | 78.8 | 2772.6 |
| | Camp. | 31 | 31.7 | 383.8 | 281.5 | 660.92 | 945.0 | 284.1 | 2786.8 | 83.3 | 2870.1 |
| | App. | 32 | 31.7 | 387.7 | 284.9 | 658.85 | 945.0 | 286.1 | 2807.1 | 84.3 | 2891.4 |
| | Camp. | 33 | 31.7 | 407.7 | 301.9 | 648.37 | 945.0 | 296.6 | 2910.0 | 89.3 | 2999.3 |
| | App. | 34 | 31.7 | 411.7 | 305.3 | 646.26 | 945.0 | 298.7 | 2930.6 | 90.3 | 3020.9 |
| | Camp. | 35 | 31.7 | 422.1 | 314.1 | 640.80 | 945.0 | 304.2 | 2984.2 | 92.9 | 3077.2 |
| | App. | 36 | 25.6 | 423.7 | 315.6 | 640.08 | 945.0 | 304.9 | 2991.3 | 93.4 | 3084.7 |
| | Camp. | 37 | 25.6 | 442.3 | 332.4 | 632.03 | 945.0 | 313.0 | 3070.2 | 98.4 | 3168.6 |
| | App. | 38 | 25.6 | 446.4 | 336.1 | 630.28 | 945.0 | 314.7 | 3087.4 | 99.4 | 3186.8 |
| | Camp. | 39 | 25.6 | 452.4 | 341.5 | 627.68 | 945.0 | 317.3 | 3112.9 | 101.0 | 3213.9 |
| | App. | 40 | 25.6 | 454.4 | 343.3 | 626.83 | 945.0 | 318.2 | 3121.2 | 101.6 | 3222.8 |
| 5 | Camp. | 41 | 8.3 | 471.3 | 359.1 | 621.23 | 945.0 | 323.8 | 3176.2 | 106.2 | 3282.4 |
| | Camp. | 42 | 8.3 | 487.1 | 374.7 | 618.94 | 945.0 | 326.1 | 3198.7 | 110.9 | 3309.5 |
| | App. | 43 | 8.3 | 491.1 | 378.6 | 618.36 | 945.0 | 326.6 | 3204.4 | 112.0 | 3316.4 |
| | Camp. | 44 | 8.3 | 527.0 | 414.2 | 613.14 | 945.0 | 331.9 | 3255.6 | 122.6 | 3378.1 |
| | App. | 45 | 8.3 | 531.1 | 418.2 | 612.56 | 945.0 | 332.4 | 3261.3 | 123.7 | 3385.0 |
| 6 | Camp. | 46 | 16.4 | 547.1 | 433.9 | 609.54 | 945.0 | 335.5 | 3290.9 | 128.4 | 3419.3 |
| | Camp. | 47 | 16.4 | 555.2 | 441.6 | 607.27 | 945.0 | 337.7 | 3313.2 | 130.7 | 3443.9 |
| | App. | 48 | 16.4 | 559.1 | 445.4 | 606.15 | 945.0 | 338.9 | 3324.1 | 131.8 | 3455.9 |

Tabella 18 Pressione interna massima (idrostatica + colpo d'ariete) – Condizione di carico normale

Le tensioni circonferenziali dovute alla pressione interna sono date dalla formula di Mariotte:

$$\sigma_{c,1} = (p D) / (2 s) ; \sigma_{c,1d} = \sigma_{c,1} / z_s$$

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | Q | s | D | P _{tot} | $\sigma_{c,1}$ | z _s | $\sigma_{c,1} / z_s$ |
|-----|-------|------|-------|------------|------|------|----------------------|----------------------|----------------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [m.s.l.m.] | [mm] | [mm] | [kN/m ²] | [N/mm ²] | [-] | [N/mm ²] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 885.7 | 8 | 1594 | 596.7 | 59.45 | 0.85 | 69.94 |
| | Camp. | 2 | 105.9 | 864.4 | 8 | 1550 | 820.3 | 79.47 | 0.85 | 93.49 |
| | App. | 3 | 111.4 | 862.3 | 8 | 1550 | 842.8 | 81.64 | 0.85 | 96.05 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 851.7 | 9 | 1496 | 952.4 | 79.15 | 0.85 | 93.12 |
| | Camp. | 5 | 139.5 | 847.4 | 9 | 1450 | 995.6 | 80.20 | 0.85 | 94.36 |
| | App. | 6 | 144.1 | 844.3 | 10 | 1450 | 1026.9 | 74.45 | 0.85 | 87.59 |
| | Camp. | 7 | 160.6 | 833.1 | 10 | 1450 | 1140.9 | 82.72 | 0.85 | 97.32 |
| | App. | 8 | 165.4 | 829.8 | 10 | 1450 | 1174.1 | 85.12 | 0.85 | 100.14 |
| | Camp. | 9 | 179.6 | 820.1 | 11 | 1450 | 1272.1 | 83.84 | 0.85 | 98.64 |
| | App. | 10 | 184.5 | 816.8 | 11 | 1450 | 1305.2 | 86.03 | 0.85 | 101.21 |
| | Camp. | 11 | 198.7 | 807.1 | 12 | 1450 | 1403.8 | 84.81 | 0.85 | 99.78 |
| 3 | App. | 12 | 203.5 | 803.9 | 12 | 1450 | 1436.5 | 86.79 | 0.85 | 102.10 |
| | Camp. | 13 | 231.0 | 783.3 | 14 | 1456 | 1643.6 | 85.47 | 0.85 | 100.55 |
| | Camp. | 14 | 238.7 | 776.7 | 14 | 1400 | 1709.4 | 85.47 | 0.85 | 100.55 |
| | App. | 15 | 241.9 | 774.0 | 14 | 1400 | 1736.2 | 86.81 | 0.85 | 102.13 |
| | Camp. | 16 | 256.2 | 761.8 | 15 | 1400 | 1858.3 | 86.72 | 0.85 | 102.02 |
| | App. | 17 | 261.0 | 757.7 | 15 | 1400 | 1899.3 | 88.64 | 0.85 | 104.28 |
| | Camp. | 18 | 265.7 | 753.7 | 16 | 1400 | 1939.8 | 84.87 | 0.85 | 99.85 |
| | App. | 19 | 270.5 | 749.6 | 16 | 1400 | 1980.4 | 86.64 | 0.85 | 101.93 |
| | Camp. | 20 | 284.8 | 737.3 | 17 | 1400 | 2102.9 | 86.59 | 0.85 | 101.87 |
| | App. | 21 | 289.5 | 733.3 | 17 | 1400 | 2143.5 | 88.26 | 0.85 | 103.84 |
| | Camp. | 22 | 294.3 | 729.2 | 18 | 1400 | 2184.4 | 84.95 | 0.85 | 99.94 |
| | App. | 23 | 299.1 | 725.1 | 18 | 1400 | 2225.4 | 86.54 | 0.85 | 101.81 |
| | Camp. | 24 | 313.5 | 712.8 | 19 | 1400 | 2348.1 | 86.51 | 0.85 | 101.77 |
| | App. | 25 | 318.3 | 708.7 | 19 | 1400 | 2389.3 | 88.03 | 0.85 | 103.56 |
| | Camp. | 26 | 332.5 | 696.5 | 20 | 1400 | 2510.5 | 87.87 | 0.85 | 103.37 |
| | App. | 27 | 337.2 | 692.5 | 20 | 1400 | 2551.0 | 89.28 | 0.85 | 105.04 |
| | Camp. | 28 | 342.1 | 688.3 | 21 | 1400 | 2592.3 | 86.41 | 0.85 | 101.66 |
| | App. | 29 | 346.9 | 684.2 | 21 | 1400 | 2633.6 | 87.79 | 0.85 | 103.28 |
| 4 | Camp. | 30 | 365.7 | 670.4 | 22 | 1404 | 2772.6 | 88.47 | 0.85 | 104.08 |
| | Camp. | 31 | 383.8 | 660.9 | 22 | 1350 | 2870.1 | 88.06 | 0.85 | 103.60 |
| | App. | 32 | 387.7 | 658.9 | 22 | 1350 | 2891.4 | 88.71 | 0.85 | 104.37 |
| | Camp. | 33 | 407.7 | 648.4 | 23 | 1350 | 2999.3 | 88.02 | 0.85 | 103.56 |
| | App. | 34 | 411.7 | 646.3 | 23 | 1350 | 3020.9 | 88.66 | 0.85 | 104.30 |
| | Camp. | 35 | 422.1 | 640.8 | 24 | 1350 | 3077.2 | 86.54 | 0.85 | 101.82 |
| | App. | 36 | 423.7 | 640.1 | 24 | 1350 | 3084.7 | 86.76 | 0.85 | 102.07 |
| | Camp. | 37 | 442.3 | 632.0 | 24 | 1350 | 3168.6 | 89.12 | 0.85 | 104.84 |
| | App. | 38 | 446.4 | 630.3 | 24 | 1350 | 3186.8 | 89.63 | 0.85 | 105.45 |
| | Camp. | 39 | 452.4 | 627.7 | 25 | 1350 | 3213.9 | 86.78 | 0.85 | 102.09 |
| | App. | 40 | 454.4 | 626.8 | 25 | 1350 | 3222.8 | 87.02 | 0.85 | 102.37 |
| 5 | Camp. | 41 | 471.3 | 621.2 | 25 | 1360 | 3282.4 | 89.28 | 0.85 | 105.04 |
| | Camp. | 42 | 487.1 | 618.9 | 24 | 1300 | 3309.5 | 89.63 | 0.85 | 105.45 |
| | App. | 43 | 491.1 | 618.4 | 24 | 1300 | 3316.4 | 89.82 | 0.85 | 105.67 |
| | Camp. | 44 | 527.0 | 613.1 | 25 | 1300 | 3378.1 | 87.83 | 0.85 | 103.33 |
| | App. | 45 | 531.1 | 612.6 | 25 | 1300 | 3385.0 | 88.01 | 0.85 | 103.54 |
| 6 | Camp. | 46 | 547.1 | 609.5 | 25 | 1360 | 3419.3 | 93.00 | 0.85 | 109.42 |
| | Camp. | 47 | 555.2 | 607.3 | 25 | 1300 | 3443.9 | 89.54 | 0.85 | 105.34 |
| | App. | 48 | 559.1 | 606.1 | 25 | 1300 | 3455.9 | 89.85 | 0.85 | 105.71 |

Tabella 19 Tensioni circonferenziali – Pressione interna massima (idrostatica + colpo d'ariete) – Condizione di carico normale

Le tensioni circonferenziali determinate dall'ovalizzazione della condotta vengono valutate come segue:

$$\sigma_{c2} = M / W$$

La tensione circonferenziale dovuta alla flessione della condotta viene poi ridotta in accordo alla teoria di Lazard, per effetto della pressione interna alla condotta:

$$\sigma'_{c2} = \alpha \sigma_{c2} / Z_s = 1 / (1 + (p r^3) / (3 E s^3/12)) \sigma_{c2} / Z_s$$

Il calcolo dei momenti d'ovalizzazione viene eseguito considerando la condotta vuota sottoposta al peso proprio ($M_A = 0.5gr^2$, $M_{CD} = -0.57gr^2$, $M_B = 1.5gr^2$, secondo Figura 10).

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | g | r | M _{w,B} | M _{g,A} | M _{g,CD} | M _{g,B} | W |
|-----|-------|------|-------|------|------|----------------------|-------|------------------|------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [kg/m ²] | [m] | [kgm/m] | [kgm/m] | [kgm/m] | [kgm/m] | [cm ³] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 8 | 1594 | 62.80 | 0.801 | 385.4 | 20.15 | -22.97 | 60.44 | 10.67 |
| | Camp. | 2 | 105.9 | 8 | 1550 | 62.80 | 0.779 | 354.5 | 19.05 | -21.72 | 57.16 | 10.67 |
| | App. | 3 | 111.4 | 8 | 1550 | 62.80 | 0.779 | 354.5 | 19.05 | -21.72 | 57.16 | 10.67 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1496 | 70.65 | 0.753 | 319.6 | 20.00 | -22.80 | 60.01 | 13.50 |
| | Camp. | 5 | 139.5 | 9 | 1450 | 70.65 | 0.730 | 291.2 | 18.80 | -21.43 | 56.40 | 13.50 |
| | App. | 6 | 144.1 | 10 | 1450 | 78.50 | 0.730 | 291.8 | 20.92 | -23.84 | 62.75 | 16.67 |
| | Camp. | 7 | 160.6 | 10 | 1450 | 78.50 | 0.730 | 291.8 | 20.92 | -23.84 | 62.75 | 16.67 |
| | App. | 8 | 165.4 | 10 | 1450 | 78.50 | 0.730 | 291.8 | 20.92 | -23.84 | 62.75 | 16.67 |
| | Camp. | 9 | 179.6 | 11 | 1450 | 86.35 | 0.731 | 292.4 | 23.04 | -26.27 | 69.12 | 20.17 |
| | App. | 10 | 184.5 | 11 | 1450 | 86.35 | 0.731 | 292.4 | 23.04 | -26.27 | 69.12 | 20.17 |
| | Camp. | 11 | 198.7 | 12 | 1450 | 94.20 | 0.731 | 293.0 | 25.17 | -28.69 | 75.51 | 24.00 |
| 3 | App. | 12 | 203.5 | 12 | 1450 | 94.20 | 0.731 | 293.0 | 25.17 | -28.69 | 75.51 | 24.00 |
| | Camp. | 13 | 231.0 | 14 | 1456 | 109.90 | 0.735 | 297.8 | 29.69 | -33.84 | 89.06 | 32.67 |
| | Camp. | 14 | 238.7 | 14 | 1400 | 109.90 | 0.707 | 265.0 | 27.47 | -31.31 | 82.40 | 32.67 |
| | App. | 15 | 241.9 | 14 | 1400 | 109.90 | 0.707 | 265.0 | 27.47 | -31.31 | 82.40 | 32.67 |
| | Camp. | 16 | 256.2 | 15 | 1400 | 117.75 | 0.708 | 265.6 | 29.47 | -33.60 | 88.41 | 37.50 |
| | App. | 17 | 261.0 | 15 | 1400 | 117.75 | 0.708 | 265.6 | 29.47 | -33.60 | 88.41 | 37.50 |
| | Camp. | 18 | 265.7 | 16 | 1400 | 125.60 | 0.708 | 266.2 | 31.48 | -35.89 | 94.44 | 42.67 |
| | App. | 19 | 270.5 | 16 | 1400 | 125.60 | 0.708 | 266.2 | 31.48 | -35.89 | 94.44 | 42.67 |
| | Camp. | 20 | 284.8 | 17 | 1400 | 133.45 | 0.709 | 266.7 | 33.49 | -38.18 | 100.48 | 48.17 |
| | App. | 21 | 289.5 | 17 | 1400 | 133.45 | 0.709 | 266.7 | 33.49 | -38.18 | 100.48 | 48.17 |
| | Camp. | 22 | 294.3 | 18 | 1400 | 141.30 | 0.709 | 267.3 | 35.51 | -40.49 | 106.54 | 54.00 |
| | App. | 23 | 299.1 | 18 | 1400 | 141.30 | 0.709 | 267.3 | 35.51 | -40.49 | 106.54 | 54.00 |
| | Camp. | 24 | 313.5 | 19 | 1400 | 149.15 | 0.710 | 267.9 | 37.54 | -42.80 | 112.62 | 60.17 |
| | App. | 25 | 318.3 | 19 | 1400 | 149.15 | 0.710 | 267.9 | 37.54 | -42.80 | 112.62 | 60.17 |
| | Camp. | 26 | 332.5 | 20 | 1400 | 157.00 | 0.710 | 268.4 | 39.57 | -45.11 | 118.72 | 66.67 |
| | App. | 27 | 337.2 | 20 | 1400 | 157.00 | 0.710 | 268.4 | 39.57 | -45.11 | 118.72 | 66.67 |
| | Camp. | 28 | 342.1 | 21 | 1400 | 164.85 | 0.711 | 269.0 | 41.61 | -47.43 | 124.83 | 73.50 |
| | App. | 29 | 346.9 | 21 | 1400 | 164.85 | 0.711 | 269.0 | 41.61 | -47.43 | 124.83 | 73.50 |
| 4 | Camp. | 30 | 365.7 | 22 | 1404 | 172.70 | 0.713 | 271.9 | 43.90 | -50.04 | 131.69 | 80.67 |
| | Camp. | 31 | 383.8 | 22 | 1350 | 172.70 | 0.686 | 242.1 | 40.64 | -46.32 | 121.91 | 80.67 |
| | App. | 32 | 387.7 | 22 | 1350 | 172.70 | 0.686 | 242.1 | 40.64 | -46.32 | 121.91 | 80.67 |
| | Camp. | 33 | 407.7 | 23 | 1350 | 180.55 | 0.687 | 242.7 | 42.55 | -48.50 | 127.64 | 88.17 |
| | App. | 34 | 411.7 | 23 | 1350 | 180.55 | 0.687 | 242.7 | 42.55 | -48.50 | 127.64 | 88.17 |
| | Camp. | 35 | 422.1 | 24 | 1350 | 188.40 | 0.687 | 243.2 | 44.46 | -50.68 | 133.38 | 96.00 |
| | App. | 36 | 423.7 | 24 | 1350 | 188.40 | 0.687 | 243.2 | 44.46 | -50.68 | 133.38 | 96.00 |
| | Camp. | 37 | 442.3 | 24 | 1350 | 188.40 | 0.687 | 243.2 | 44.46 | -50.68 | 133.38 | 96.00 |
| | App. | 38 | 446.4 | 24 | 1350 | 188.40 | 0.687 | 243.2 | 44.46 | -50.68 | 133.38 | 96.00 |
| | Camp. | 39 | 452.4 | 25 | 1350 | 196.25 | 0.688 | 243.7 | 46.38 | -52.87 | 139.14 | 104.17 |
| | App. | 40 | 454.4 | 25 | 1350 | 196.25 | 0.688 | 243.7 | 46.38 | -52.87 | 139.14 | 104.17 |
| | Camp. | 41 | 471.3 | 25 | 1360 | 196.25 | 0.693 | 249.1 | 47.06 | -53.64 | 141.17 | 104.17 |
| 5 | Camp. | 42 | 487.1 | 24 | 1300 | 188.40 | 0.662 | 217.6 | 41.28 | -47.06 | 123.85 | 96.00 |
| | App. | 43 | 491.1 | 24 | 1300 | 188.40 | 0.662 | 217.6 | 41.28 | -47.06 | 123.85 | 96.00 |
| | Camp. | 44 | 527.0 | 25 | 1300 | 196.25 | 0.663 | 218.1 | 43.07 | -49.10 | 129.20 | 104.17 |
| | App. | 45 | 531.1 | 25 | 1300 | 196.25 | 0.663 | 218.1 | 43.07 | -49.10 | 129.20 | 104.17 |
| 6 | Camp. | 46 | 547.1 | 25 | 1360 | 196.25 | 0.693 | 249.1 | 47.06 | -53.64 | 141.17 | 104.17 |
| | Camp. | 47 | 555.2 | 25 | 1300 | 196.25 | 0.663 | 218.1 | 43.07 | -49.10 | 129.20 | 104.17 |
| | App. | 48 | 559.1 | 25 | 1300 | 196.25 | 0.663 | 218.1 | 43.07 | -49.10 | 129.20 | 104.17 |

Tabella 20 Momenti di ovalizzazione dovuti al peso proprio

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | $\sigma_{C_{GA}}$ | $\sigma_{C_{GD}}$ | $\sigma_{C_{GB}}$ | α | z_s | $\sigma''_{C_{GA}}$ | $\sigma''_{C_{GD}}$ | $\sigma''_{C_{GB}}$ |
|-----|-------|------|-------|------|------|-------------------|-------------------|-------------------|----------|-------|---------------------|---------------------|---------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [-] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 8 | 1594 | 18.53 | -21.12 | 55.58 | 0.08 | 0.85 | 1.76 | -2.00 | 5.27 |
| | Camp. | 2 | 105.9 | 8 | 1550 | 17.52 | -19.98 | 52.57 | 0.06 | 0.85 | 1.34 | -1.52 | 4.01 |
| | App. | 3 | 111.4 | 8 | 1550 | 17.52 | -19.98 | 52.57 | 0.06 | 0.85 | 1.30 | -1.49 | 3.91 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1496 | 14.54 | -16.57 | 43.61 | 0.09 | 0.85 | 1.47 | -1.68 | 4.42 |
| | Camp. | 5 | 139.5 | 9 | 1450 | 13.66 | -15.57 | 40.98 | 0.09 | 0.85 | 1.45 | -1.65 | 4.34 |
| | App. | 6 | 144.1 | 10 | 1450 | 12.31 | -14.03 | 36.93 | 0.12 | 0.85 | 1.68 | -1.92 | 5.05 |
| | Camp. | 7 | 160.6 | 10 | 1450 | 12.31 | -14.03 | 36.93 | 0.11 | 0.85 | 1.53 | -1.75 | 4.60 |
| | App. | 8 | 165.4 | 10 | 1450 | 12.31 | -14.03 | 36.93 | 0.10 | 0.85 | 1.49 | -1.70 | 4.48 |
| | Camp. | 9 | 179.6 | 11 | 1450 | 11.21 | -12.78 | 33.62 | 0.12 | 0.85 | 1.63 | -1.86 | 4.89 |
| | App. | 10 | 184.5 | 11 | 1450 | 11.21 | -12.78 | 33.62 | 0.12 | 0.85 | 1.59 | -1.82 | 4.78 |
| | Camp. | 11 | 198.7 | 12 | 1450 | 10.29 | -11.73 | 30.86 | 0.14 | 0.85 | 1.72 | -1.96 | 5.15 |
| 3 | App. | 12 | 203.5 | 12 | 1450 | 10.29 | -11.73 | 30.86 | 0.14 | 0.85 | 1.68 | -1.92 | 5.05 |
| | Camp. | 13 | 231.0 | 14 | 1456 | 8.91 | -10.16 | 26.74 | 0.18 | 0.85 | 1.90 | -2.16 | 5.69 |
| | Camp. | 14 | 238.7 | 14 | 1400 | 8.25 | -9.40 | 24.75 | 0.19 | 0.85 | 1.87 | -2.13 | 5.61 |
| | App. | 15 | 241.9 | 14 | 1400 | 8.25 | -9.40 | 24.75 | 0.19 | 0.85 | 1.85 | -2.10 | 5.54 |
| | Camp. | 16 | 256.2 | 15 | 1400 | 7.71 | -8.79 | 23.13 | 0.21 | 0.85 | 1.92 | -2.19 | 5.77 |
| | App. | 17 | 261.0 | 15 | 1400 | 7.71 | -8.79 | 23.13 | 0.21 | 0.85 | 1.89 | -2.16 | 5.67 |
| | Camp. | 18 | 265.7 | 16 | 1400 | 7.24 | -8.25 | 21.71 | 0.24 | 0.85 | 2.03 | -2.31 | 6.08 |
| | App. | 19 | 270.5 | 16 | 1400 | 7.24 | -8.25 | 21.71 | 0.23 | 0.85 | 1.99 | -2.27 | 5.98 |
| | Camp. | 20 | 284.8 | 17 | 1400 | 6.82 | -7.78 | 20.47 | 0.26 | 0.85 | 2.06 | -2.35 | 6.17 |
| | App. | 21 | 289.5 | 17 | 1400 | 6.82 | -7.78 | 20.47 | 0.25 | 0.85 | 2.03 | -2.31 | 6.09 |
| | Camp. | 22 | 294.3 | 18 | 1400 | 6.45 | -7.36 | 19.36 | 0.28 | 0.85 | 2.14 | -2.44 | 6.43 |
| | App. | 23 | 299.1 | 18 | 1400 | 6.45 | -7.36 | 19.36 | 0.28 | 0.85 | 2.11 | -2.41 | 6.34 |
| | Camp. | 24 | 313.5 | 19 | 1400 | 6.12 | -6.98 | 18.36 | 0.30 | 0.85 | 2.16 | -2.47 | 6.49 |
| | App. | 25 | 318.3 | 19 | 1400 | 6.12 | -6.98 | 18.36 | 0.30 | 0.85 | 2.14 | -2.44 | 6.41 |
| | Camp. | 26 | 332.5 | 20 | 1400 | 5.82 | -6.64 | 17.47 | 0.32 | 0.85 | 2.18 | -2.49 | 6.55 |
| | App. | 27 | 337.2 | 20 | 1400 | 5.82 | -6.64 | 17.47 | 0.32 | 0.85 | 2.16 | -2.46 | 6.48 |
| | Camp. | 28 | 342.1 | 21 | 1400 | 5.55 | -6.33 | 16.66 | 0.34 | 0.85 | 2.24 | -2.56 | 6.73 |
| | App. | 29 | 346.9 | 21 | 1400 | 5.55 | -6.33 | 16.66 | 0.34 | 0.85 | 2.22 | -2.53 | 6.66 |
| 4 | Camp. | 30 | 365.7 | 22 | 1404 | 5.34 | -6.09 | 16.02 | 0.36 | 0.85 | 2.24 | -2.56 | 6.73 |
| | Camp. | 31 | 383.8 | 22 | 1350 | 4.94 | -5.63 | 14.83 | 0.38 | 0.85 | 2.19 | -2.49 | 6.56 |
| | App. | 32 | 387.7 | 22 | 1350 | 4.94 | -5.63 | 14.83 | 0.37 | 0.85 | 2.18 | -2.48 | 6.53 |
| | Camp. | 33 | 407.7 | 23 | 1350 | 4.73 | -5.40 | 14.20 | 0.40 | 0.85 | 2.21 | -2.52 | 6.63 |
| | App. | 34 | 411.7 | 23 | 1350 | 4.73 | -5.40 | 14.20 | 0.40 | 0.85 | 2.20 | -2.51 | 6.60 |
| | Camp. | 35 | 422.1 | 24 | 1350 | 4.54 | -5.18 | 13.63 | 0.42 | 0.85 | 2.25 | -2.57 | 6.75 |
| | App. | 36 | 423.7 | 24 | 1350 | 4.54 | -5.18 | 13.63 | 0.42 | 0.85 | 2.25 | -2.56 | 6.74 |
| | Camp. | 37 | 442.3 | 24 | 1350 | 4.54 | -5.18 | 13.63 | 0.41 | 0.85 | 2.21 | -2.52 | 6.64 |
| | App. | 38 | 446.4 | 24 | 1350 | 4.54 | -5.18 | 13.63 | 0.41 | 0.85 | 2.21 | -2.51 | 6.62 |
| | Camp. | 39 | 452.4 | 25 | 1350 | 4.37 | -4.98 | 13.10 | 0.44 | 0.85 | 2.26 | -2.58 | 6.78 |
| | App. | 40 | 454.4 | 25 | 1350 | 4.37 | -4.98 | 13.10 | 0.44 | 0.85 | 2.26 | -2.57 | 6.77 |
| 5 | Camp. | 41 | 471.3 | 25 | 1360 | 4.43 | -5.05 | 13.29 | 0.43 | 0.85 | 2.24 | -2.55 | 6.72 |
| | Camp. | 42 | 487.1 | 24 | 1300 | 4.22 | -4.81 | 12.66 | 0.43 | 0.85 | 2.14 | -2.44 | 6.41 |
| | App. | 43 | 491.1 | 24 | 1300 | 4.22 | -4.81 | 12.66 | 0.43 | 0.85 | 2.13 | -2.43 | 6.40 |
| | Camp. | 44 | 527.0 | 25 | 1300 | 4.06 | -4.62 | 12.17 | 0.46 | 0.85 | 2.17 | -2.48 | 6.51 |
| | App. | 45 | 531.1 | 25 | 1300 | 4.06 | -4.62 | 12.17 | 0.45 | 0.85 | 2.17 | -2.47 | 6.51 |
| 6 | Camp. | 46 | 547.1 | 25 | 1360 | 4.43 | -5.05 | 13.29 | 0.42 | 0.85 | 2.19 | -2.49 | 6.56 |
| | Camp. | 47 | 555.2 | 25 | 1300 | 4.06 | -4.62 | 12.17 | 0.45 | 0.85 | 2.15 | -2.45 | 6.45 |
| | App. | 48 | 559.1 | 25 | 1300 | 4.06 | -4.62 | 12.17 | 0.45 | 0.85 | 2.14 | -2.44 | 6.43 |

Tabella 21 Tensioni circonferenziali determinate dai momenti di ovalizzazione dovuti al peso proprio

Nel tratto tra FP1 e FP2, in cui la condotta è vincolata ai supporti tramite travi ad anello, la tensione circonferenziale è valutata tramite la sovrapposizione degli effetti del momento flettente e dell'azione normale agenti in corrispondenza dell'appoggio:

$$\sigma_{c,3an} = \sigma_{c,3N} + \sigma_{c,3M} = \frac{N_{(\vartheta)}}{A} + \frac{M_{(\vartheta)}V}{J}$$

Nei calcoli, si valuteranno tali tensioni considerando un angolo ϑ pari a 180° , il quale individua l'estremo inferiore della condotta; inoltre, si suppone che la distanza tra il punto di applicazione della reazione all'appoggio e l'asse neutro dell'assieme anelli di rinforzo-camicia sia nulla ($X=0$).

| Tr. | Tipo | Sez. | α | Svil. | Q | s | D | P_{t+W} | Q_s | L | ϑ | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | $\cos\alpha$ |
|-----|-------|------|----------|-------|------------|------|------|-----------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| [-] | [-] | [-] | [°] | [m] | [m.s.l.m.] | [mm] | [mm] | [kN] | [kN] | [mm] | [°] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 1 | Camp. | 1 | 22.8 | 50.0 | 886.1 | 8 | 1594 | \ | \ | 11330 | 180 | 0.24 | -0.32 | -0.01 | 0.07 | 0.92 |
| | Camp. | 2 | 22.8 | 105.9 | 864.4 | 8 | 1550 | \ | \ | 11000 | 180 | 0.24 | -0.32 | -0.01 | 0.07 | 0.92 |
| | App. | 3 | 22.8 | 111.4 | 862.3 | 8 | 1550 | 256.3 | 35.9 | 11000 | 180 | 0.24 | -0.32 | -0.01 | 0.07 | 0.92 |

Tabella 22 Tensioni circonferenziali in corrispondenza degli ancoraggi metallici – Geometrie

| Tr. | Tipo | Sez. | i_a | s_a | L_a | n°_a | $L_{i,d}$ | S_m | A_{tot} | R | J_m | J_{1-1} | V_{1-1} | V_{2-2} | W_{sup} | W_{inf} |
|-----|-------|------|-------|-------|-------|-------------|-----------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|-----------|-----------|--------------------|--------------------|
| [-] | [-] | [-] | [mm] | [mm] | [mm] | [-] | [mm] | [mm ³] | [mm ²] | [mm] | [mm ⁴] | [mm ⁴] | [mm] | [mm] | [mm ³] | [mm ³] |
| 1 | Camp. | 1 | 330 | 120 | 30 | 2 | 515.2 | 1E+07 | 1E+04 | 8E+02 | 8E+09 | 2E+07 | 44.7 | 83.3 | 2E+05 | 4E+05 |
| | Camp. | 2 | 330 | 120 | 30 | 2 | 513.5 | 9E+06 | 1E+04 | 8E+02 | 8E+09 | 2E+07 | 44.8 | 83.2 | 2E+05 | 4E+05 |
| | App. | 3 | 330 | 120 | 30 | 2 | 513.5 | 9E+06 | 1E+04 | 8E+02 | 8E+09 | 2E+07 | 44.8 | 83.2 | 2E+05 | 4E+05 |

Tabella 23 Tensioni circonferenziali in corrispondenza degli ancoraggi metallici – Azioni

| Tr. | Tipo | Sez. | X | u | r | β | K | B | σ_{cM} | σ_{cN} | $\sigma_{c,3an}$ | z_s | $\sigma_{c,3an}/z_s$ |
|-----|-------|------|------|-----|------|---------|------|------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [mm] | [-] | [mm] | [-] | [-] | [-] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [-] | [N/mm ²] |
| 1 | Camp. | 1 | 0 | 0.3 | 805 | 0.02 | \ | \ | \ | \ | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 2 | 0 | 0.3 | 783 | 0.02 | \ | \ | \ | \ | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 3 | 0 | 0.3 | 783 | 0.02 | 0.46 | 0.89 | -5.04 | -0.91 | -5.95 | 0.85 | -7.00 |

Tabella 24 Tensioni circonferenziali in corrispondenza degli ancoraggi metallici – Tensioni interne

Nelle altre tratte a valle del vertice FP2, la condotta è vincolata tramite selle di ancoraggio in calcestruzzo. Nelle sezioni in corrispondenza delle selle di appoggio il momento flettente radiale (M) viene valutato come segue:

$$M = c \cdot P_{t+W} \cdot R_i$$

Nei calcoli, cautelativamente, si assumerà il valore massimo del coefficiente $c = 0.082$, per un angolo $\beta = 135^\circ$ ed un angolo $\vartheta = 135^\circ$. Le tensioni circonferenziali risultanti si calcolano con la formula seguente:

$$\sigma_{c3,s} = \frac{M}{0.8L} \frac{6}{s^2} \cos\alpha$$

| Tr. | Tipo | Sez. | α | Svil. | s | D | P_{t+w} | L | c | $\cos\alpha$ | $\sigma_{c,3s}$ | z_s | $\sigma_{c,3s} / z_s$ |
|-----|-------|------|----------|-------|------|------|-----------|-------|-------|--------------|----------------------|-------|-----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [°] | [m] | [mm] | [mm] | [kN] | [mm] | [-] | [-] | [N/mm ²] | [-] | [N/mm ²] |
| 2 | Camp. | 4 | 42.9 | 133.3 | 9 | 1496 | \ | 8966 | 0.082 | 0.73 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 5 | 42.9 | 139.5 | 9 | 1450 | \ | 9059 | 0.082 | 0.73 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 6 | 42.9 | 144.1 | 10 | 1450 | 152.2 | 9059 | 0.082 | 0.73 | 54.87 | 0.85 | 64.56 |
| | Camp. | 7 | 42.9 | 160.6 | 10 | 1450 | \ | 9618 | 0.082 | 0.73 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 8 | 42.9 | 165.4 | 10 | 1450 | 130.5 | 9618 | 0.082 | 0.73 | 44.32 | 0.85 | 52.14 |
| | Camp. | 9 | 42.9 | 179.6 | 11 | 1450 | \ | 9612 | 0.082 | 0.73 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 10 | 42.9 | 184.5 | 11 | 1450 | 145.8 | 9612 | 0.082 | 0.73 | 40.94 | 0.85 | 48.17 |
| | Camp. | 11 | 42.9 | 198.7 | 12 | 1450 | \ | 9486 | 0.082 | 0.73 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| 3 | App. | 12 | 42.9 | 203.5 | 12 | 1450 | 209.1 | 9486 | 0.082 | 0.73 | 50.01 | 0.85 | 58.83 |
| | Camp. | 13 | 58.8 | 231.0 | 14 | 1456 | \ | 14990 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 14 | 58.8 | 238.7 | 14 | 1400 | \ | 6272 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 15 | 58.8 | 241.9 | 14 | 1400 | 62.5 | 6272 | 0.082 | 0.52 | 11.34 | 0.85 | 13.34 |
| | Camp. | 16 | 58.8 | 256.2 | 15 | 1400 | \ | 9545 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 17 | 58.8 | 261.0 | 15 | 1400 | 98.6 | 9545 | 0.082 | 0.52 | 10.24 | 0.85 | 12.05 |
| | Camp. | 18 | 58.8 | 265.7 | 16 | 1400 | \ | 9484 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 19 | 58.8 | 270.5 | 16 | 1400 | 102.4 | 9484 | 0.082 | 0.52 | 9.41 | 0.85 | 11.07 |
| | Camp. | 20 | 58.8 | 284.8 | 17 | 1400 | \ | 9499 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 21 | 58.8 | 289.5 | 17 | 1400 | 103.9 | 9499 | 0.082 | 0.52 | 8.44 | 0.85 | 9.93 |
| | Camp. | 22 | 58.8 | 294.3 | 18 | 1400 | \ | 9584 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 23 | 58.8 | 299.1 | 18 | 1400 | 105.4 | 9584 | 0.082 | 0.52 | 7.57 | 0.85 | 8.90 |
| 4 | Camp. | 24 | 58.8 | 313.5 | 19 | 1400 | \ | 9655 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 25 | 58.8 | 318.3 | 19 | 1400 | 107.0 | 9655 | 0.082 | 0.52 | 6.85 | 0.85 | 8.06 |
| | Camp. | 26 | 58.8 | 332.5 | 20 | 1400 | \ | 9488 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 27 | 58.8 | 337.2 | 20 | 1400 | 105.6 | 9488 | 0.082 | 0.52 | 6.21 | 0.85 | 7.31 |
| | Camp. | 28 | 58.8 | 342.1 | 21 | 1400 | \ | 9664 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 29 | 58.8 | 346.9 | 21 | 1400 | 126.3 | 9664 | 0.082 | 0.52 | 6.61 | 0.85 | 7.78 |
| | Camp. | 30 | 31.7 | 365.7 | 22 | 1404 | \ | 8446 | 0.082 | 0.85 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 31 | 31.7 | 383.8 | 22 | 1350 | \ | 7875 | 0.082 | 0.85 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 32 | 31.7 | 387.7 | 22 | 1350 | 140.0 | 7875 | 0.082 | 0.85 | 12.98 | 0.85 | 15.27 |
| | Camp. | 33 | 31.7 | 407.7 | 23 | 1350 | \ | 8005 | 0.082 | 0.85 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| 5 | App. | 34 | 31.7 | 411.7 | 23 | 1350 | 155.0 | 8005 | 0.082 | 0.85 | 12.93 | 0.85 | 15.21 |
| | Camp. | 35 | 31.7 | 422.1 | 24 | 1350 | \ | 3150 | 0.082 | 0.85 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 36 | 25.6 | 423.7 | 24 | 1350 | 340.8 | 3150 | 0.082 | 0.9 | 70.31 | 0.85 | 82.72 |
| | Camp. | 37 | 25.6 | 442.3 | 24 | 1350 | \ | 8080 | 0.082 | 0.9 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 38 | 25.6 | 446.4 | 24 | 1350 | 148.6 | 8080 | 0.082 | 0.9 | 11.95 | 0.85 | 14.06 |
| | Camp. | 39 | 25.6 | 452.4 | 25 | 1350 | \ | 7948 | 0.082 | 0.9 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 40 | 25.6 | 454.4 | 25 | 1350 | 195.8 | 7948 | 0.082 | 0.9 | 14.76 | 0.85 | 17.36 |
| | Camp. | 41 | 8.3 | 471.3 | 25 | 1360 | \ | 9396 | 0.082 | 0.99 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| 6 | Camp. | 42 | 8.3 | 487.1 | 24 | 1300 | \ | 8036 | 0.082 | 0.99 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 43 | 8.3 | 491.1 | 24 | 1300 | 165.9 | 8036 | 0.082 | 0.99 | 14.18 | 0.85 | 16.68 |
| | Camp. | 44 | 8.3 | 527.0 | 25 | 1300 | \ | 8029 | 0.082 | 0.99 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 45 | 8.3 | 531.1 | 25 | 1300 | 202.8 | 8029 | 0.082 | 0.99 | 15.98 | 0.85 | 18.81 |
| | Camp. | 46 | 16.4 | 547.1 | 25 | 1360 | \ | 9096 | 0.082 | 0.96 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 47 | 16.4 | 555.2 | 25 | 1300 | \ | 7911 | 0.082 | 0.96 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 48 | 16.4 | 559.1 | 25 | 1300 | 144.2 | 7911 | 0.082 | 0.96 | 11.18 | 0.85 | 13.15 |

Tabella 25 Tensioni circonferenziali in corrispondenza delle selle di appoggio

Si valutano le tensioni longitudinali determinate dall'effetto del peso strutturale della condotta e dal peso dell'acqua contenuto nella condotta: $\sigma_{L1,t+w} = \pm (M y / J) / z_s$; $\sigma_{L2,t+w} = (N / A) / z_s$.

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | N | M | y | A | J | z _s | σ_{L1}^+ | σ_{L1}^- | σ_{L2} |
|-----|-------|------|-------|------|------|--------|--------|-------|-------------------|-------------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [kN] | [kNm] | [m] | [m ²] | [m ⁴] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 8 | 1594 | 0.0 | 103.9 | 0.801 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 7.58 | -7.58 | 0.00 |
| | Camp. | 2 | 105.9 | 8 | 1550 | -65.3 | 67.9 | 0.779 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 5.23 | -5.23 | -1.96 |
| | App. | 3 | 111.4 | 8 | 1550 | -71.7 | -282.4 | 0.779 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 21.78 | -21.78 | -2.15 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1496 | 0.0 | 44.1 | 0.753 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 3.24 | -3.24 | 0.00 |
| | Camp. | 5 | 139.5 | 9 | 1450 | -17.3 | 33.0 | 0.730 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 2.58 | -2.58 | -0.49 |
| | App. | 6 | 144.1 | 10 | 1450 | -27.1 | -138.7 | 0.730 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 9.75 | -9.75 | -0.69 |
| | Camp. | 7 | 160.6 | 10 | 1450 | -64.5 | 41.7 | 0.730 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 2.93 | -2.93 | -1.65 |
| | App. | 8 | 165.4 | 10 | 1450 | -76.0 | -98.8 | 0.730 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 6.94 | -6.94 | -1.95 |
| | Camp. | 9 | 179.6 | 11 | 1450 | -111.8 | 54.6 | 0.731 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 3.48 | -3.48 | -2.61 |
| | App. | 10 | 184.5 | 11 | 1450 | -124.5 | -119.5 | 0.731 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 7.62 | -7.62 | -2.90 |
| | Camp. | 11 | 198.7 | 12 | 1450 | -163.9 | -2.0 | 0.731 | 0.06 | 0.01 | 0.85 | 0.12 | -0.12 | -3.50 |
| | App. | 12 | 203.5 | 12 | 1450 | -177.6 | -260.3 | 0.731 | 0.06 | 0.01 | 0.85 | 15.20 | -15.20 | -3.79 |
| 3 | Camp. | 13 | 231.0 | 14 | 1456 | 0.0 | 103.4 | 0.735 | 0.06 | 0.02 | 0.85 | 5.12 | -5.12 | 0.00 |
| | Camp. | 14 | 238.7 | 14 | 1400 | -35.4 | -37.2 | 0.707 | 0.06 | 0.02 | 0.85 | 1.99 | -1.99 | -0.67 |
| | App. | 15 | 241.9 | 14 | 1400 | -48.2 | -42.5 | 0.707 | 0.06 | 0.02 | 0.85 | 2.27 | -2.27 | -0.91 |
| | Camp. | 16 | 256.2 | 15 | 1400 | -109.8 | 36.8 | 0.708 | 0.07 | 0.02 | 0.85 | 1.83 | -1.83 | -1.94 |
| | App. | 17 | 261.0 | 15 | 1400 | -130.7 | -76.6 | 0.708 | 0.07 | 0.02 | 0.85 | 3.82 | -3.82 | -2.31 |
| | Camp. | 18 | 265.7 | 16 | 1400 | -152.5 | 40.8 | 0.708 | 0.07 | 0.02 | 0.85 | 1.90 | -1.90 | -2.52 |
| | App. | 19 | 270.5 | 16 | 1400 | -174.8 | -81.5 | 0.708 | 0.07 | 0.02 | 0.85 | 3.81 | -3.81 | -2.89 |
| | Camp. | 20 | 284.8 | 17 | 1400 | -244.9 | 40.0 | 0.709 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 1.75 | -1.75 | -3.81 |
| | App. | 21 | 289.5 | 17 | 1400 | -268.6 | -82.1 | 0.709 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 3.60 | -3.60 | -4.18 |
| | Camp. | 22 | 294.3 | 18 | 1400 | -293.5 | 43.5 | 0.709 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 1.80 | -1.80 | -4.31 |
| | App. | 23 | 299.1 | 18 | 1400 | -318.8 | -83.9 | 0.709 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 3.47 | -3.47 | -4.68 |
| | Camp. | 24 | 313.5 | 19 | 1400 | -396.7 | 44.9 | 0.710 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 1.76 | -1.76 | -5.51 |
| | App. | 25 | 318.3 | 19 | 1400 | -423.7 | -84.9 | 0.710 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 3.32 | -3.32 | -5.88 |
| | Camp. | 26 | 332.5 | 20 | 1400 | -505.8 | 44.4 | 0.710 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 1.65 | -1.65 | -6.67 |
| | App. | 27 | 337.2 | 20 | 1400 | -533.7 | -81.8 | 0.710 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 3.04 | -3.04 | -7.04 |
| | Camp. | 28 | 342.1 | 21 | 1400 | -563.2 | 36.9 | 0.711 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 1.30 | -1.30 | -7.07 |
| | App. | 29 | 346.9 | 21 | 1400 | -593.0 | -114.4 | 0.711 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 4.04 | -4.04 | -7.44 |
| 4 | Camp. | 30 | 365.7 | 22 | 1404 | 0.0 | 65.0 | 0.713 | 0.10 | 0.03 | 0.85 | 2.17 | -2.17 | 0.00 |
| | Camp. | 31 | 383.8 | 22 | 1350 | -79.4 | 43.3 | 0.686 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 1.56 | -1.56 | -0.99 |
| | App. | 32 | 387.7 | 22 | 1350 | -94.8 | -91.0 | 0.686 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 3.29 | -3.29 | -1.18 |
| | Camp. | 33 | 407.7 | 23 | 1350 | -175.4 | 43.8 | 0.687 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 1.51 | -1.51 | -2.08 |
| | App. | 34 | 411.7 | 23 | 1350 | -191.8 | -109.9 | 0.687 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 3.79 | -3.79 | -2.27 |
| | Camp. | 35 | 422.1 | 24 | 1350 | -238.8 | 277.8 | 0.687 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 9.18 | -9.18 | -2.71 |
| | App. | 36 | 423.7 | 24 | 1350 | -244.7 | -158.8 | 0.687 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 5.25 | -5.25 | -2.78 |
| | Camp. | 37 | 442.3 | 24 | 1350 | -309.1 | 58.4 | 0.687 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 1.93 | -1.93 | -3.51 |
| | App. | 38 | 446.4 | 24 | 1350 | -322.9 | -92.8 | 0.687 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 3.07 | -3.07 | -3.67 |
| | Camp. | 39 | 452.4 | 25 | 1350 | -343.7 | -31.5 | 0.688 | 0.11 | 0.03 | 0.85 | 1.00 | -1.00 | -3.74 |
| | App. | 40 | 454.4 | 25 | 1350 | -350.5 | -165.6 | 0.688 | 0.11 | 0.03 | 0.85 | 5.25 | -5.25 | -3.82 |
| 5 | Camp. | 41 | 471.3 | 25 | 1360 | 0.0 | 68.0 | 0.693 | 0.11 | 0.03 | 0.85 | 2.12 | -2.12 | 0.00 |
| | Camp. | 42 | 487.1 | 24 | 1300 | -18.2 | 57.1 | 0.662 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 2.03 | -2.03 | -0.21 |
| | App. | 43 | 491.1 | 24 | 1300 | -22.9 | -111.9 | 0.662 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 3.98 | -3.98 | -0.27 |
| | Camp. | 44 | 527.0 | 25 | 1300 | -67.4 | 35.0 | 0.663 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 1.19 | -1.19 | -0.76 |
| | App. | 45 | 531.1 | 25 | 1300 | -72.4 | -169.5 | 0.663 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 5.78 | -5.78 | -0.82 |
| 6 | Camp. | 46 | 547.1 | 25 | 1360 | 0.0 | 72.3 | 0.693 | 0.11 | 0.03 | 0.85 | 2.26 | -2.26 | 0.00 |
| | Camp. | 47 | 555.2 | 25 | 1300 | -18.1 | 51.8 | 0.663 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 1.77 | -1.77 | -0.20 |
| | App. | 48 | 559.1 | 25 | 1300 | -27.0 | -86.6 | 0.663 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 2.95 | -2.95 | -0.31 |

Tabella 26 Tensioni longitudinali – Peso proprio strutturale + Peso acqua nelle condotte

Si valutano le tensioni longitudinali determinate dall'effetto dell'azione della neve:

$$\sigma_{L1,snow} = \pm (M y / J) / z_s ; \sigma_{L2,snow} = (N / A) / z_s.$$

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | N | M | y | A | J | z _s | σ _{L1} ⁺ | σ _{L1} ⁻ | σ _{L2} |
|-----|-------|------|-------|------|------|-------|-------|------|-------------------|-------------------|----------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [kN] | [kNm] | [m] | [m ²] | [m ⁴] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 8 | 1594 | 0.0 | 4.3 | 0.80 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 0.32 | -0.32 | 0.00 |
| | Camp. | 2 | 105.9 | 8 | 1550 | -19.5 | 2.8 | 0.78 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 0.22 | -0.22 | -0.59 |
| | App. | 3 | 111.4 | 8 | 1550 | -21.4 | -11.8 | 0.78 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 0.91 | -0.91 | -0.64 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1496 | 0.0 | 1.1 | 0.75 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 0.08 | -0.08 | 0.00 |
| | Camp. | 5 | 139.5 | 9 | 1450 | -2.6 | 0.8 | 0.73 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 0.06 | -0.06 | -0.07 |
| | App. | 6 | 144.1 | 10 | 1450 | -4.1 | -3.4 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 0.24 | -0.24 | -0.10 |
| | Camp. | 7 | 160.6 | 10 | 1450 | -9.5 | 1.0 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 0.07 | -0.07 | -0.24 |
| | App. | 8 | 165.4 | 10 | 1450 | -11.1 | -2.4 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 0.17 | -0.17 | -0.28 |
| | Camp. | 9 | 179.6 | 11 | 1450 | -15.7 | 1.3 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 0.08 | -0.08 | -0.37 |
| | App. | 10 | 184.5 | 11 | 1450 | -17.3 | -2.9 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 0.18 | -0.18 | -0.40 |
| | Camp. | 11 | 198.7 | 12 | 1450 | -22.0 | 0.0 | 0.73 | 0.06 | 0.01 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.47 |
| 3 | App. | 12 | 203.5 | 12 | 1450 | -23.5 | -6.1 | 0.73 | 0.06 | 0.01 | 0.85 | 0.35 | -0.35 | -0.50 |
| | Camp. | 13 | 231.0 | 14 | 1456 | 0.0 | 0.1 | 0.74 | 0.06 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 14 | 238.7 | 14 | 1400 | -0.2 | 0.0 | 0.71 | 0.06 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 15 | 241.9 | 14 | 1400 | -0.2 | 0.0 | 0.71 | 0.06 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 16 | 256.2 | 15 | 1400 | -0.5 | 0.0 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.01 |
| | App. | 17 | 261.0 | 15 | 1400 | -0.5 | -0.1 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.01 |
| | Camp. | 18 | 265.7 | 16 | 1400 | -0.6 | 0.0 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.01 |
| | App. | 19 | 270.5 | 16 | 1400 | -0.7 | -0.1 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.01 |
| | Camp. | 20 | 284.8 | 17 | 1400 | -0.9 | 0.0 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.01 |
| | App. | 21 | 289.5 | 17 | 1400 | -1.0 | -0.1 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.02 |
| | Camp. | 22 | 294.3 | 18 | 1400 | -1.1 | 0.0 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.02 |
| | App. | 23 | 299.1 | 18 | 1400 | -1.2 | -0.1 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.02 |
| | Camp. | 24 | 313.5 | 19 | 1400 | -1.4 | 0.0 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.02 |
| | App. | 25 | 318.3 | 19 | 1400 | -1.5 | -0.1 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.02 |
| | Camp. | 26 | 332.5 | 20 | 1400 | -1.8 | 0.0 | 0.71 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.02 |
| | App. | 27 | 337.2 | 20 | 1400 | -1.8 | -0.1 | 0.71 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.02 |
| | Camp. | 28 | 342.1 | 21 | 1400 | -1.9 | 0.0 | 0.71 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.02 |
| | App. | 29 | 346.9 | 21 | 1400 | -2.0 | -0.1 | 0.71 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 0.00 | 0.00 | -0.03 |
| 4 | Camp. | 30 | 365.7 | 22 | 1404 | 0.0 | 2.3 | 0.71 | 0.10 | 0.03 | 0.85 | 0.08 | -0.08 | 0.00 |
| | Camp. | 31 | 383.8 | 22 | 1350 | -8.1 | 1.5 | 0.69 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 0.05 | -0.05 | -0.10 |
| | App. | 32 | 387.7 | 22 | 1350 | -9.6 | -3.2 | 0.69 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 0.11 | -0.11 | -0.12 |
| | Camp. | 33 | 407.7 | 23 | 1350 | -17.5 | 1.1 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.04 | -0.04 | -0.21 |
| | App. | 34 | 411.7 | 23 | 1350 | -19.1 | -4.7 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.16 | -0.16 | -0.23 |
| | Camp. | 35 | 422.1 | 24 | 1350 | -23.1 | 0.2 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.01 | -0.01 | -0.26 |
| | App. | 36 | 423.7 | 24 | 1350 | -23.7 | -5.5 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.18 | -0.18 | -0.27 |
| | Camp. | 37 | 442.3 | 24 | 1350 | -30.2 | 2.1 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.07 | -0.07 | -0.34 |
| | App. | 38 | 446.4 | 24 | 1350 | -31.6 | -3.4 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.11 | -0.11 | -0.36 |
| | Camp. | 39 | 452.4 | 25 | 1350 | -33.7 | -1.1 | 0.69 | 0.11 | 0.03 | 0.85 | 0.04 | -0.04 | -0.37 |
| | App. | 40 | 454.4 | 25 | 1350 | -34.3 | -6.0 | 0.69 | 0.11 | 0.03 | 0.85 | 0.19 | -0.19 | -0.37 |
| 5 | Camp. | 41 | 471.3 | 25 | 1360 | 0.0 | 2.6 | 0.69 | 0.11 | 0.03 | 0.85 | 0.08 | -0.08 | 0.00 |
| | Camp. | 42 | 487.1 | 24 | 1300 | -1.9 | 2.2 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.08 | -0.08 | -0.02 |
| | App. | 43 | 491.1 | 24 | 1300 | -2.3 | -4.2 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.15 | -0.15 | -0.03 |
| | Camp. | 44 | 527.0 | 25 | 1300 | -6.7 | 1.3 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.04 | -0.04 | -0.08 |
| | App. | 45 | 531.1 | 25 | 1300 | -7.2 | -6.3 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.21 | -0.21 | -0.08 |
| 6 | Camp. | 46 | 547.1 | 25 | 1360 | 0.0 | 2.7 | 0.69 | 0.11 | 0.03 | 0.85 | 0.08 | -0.08 | 0.00 |
| | Camp. | 47 | 555.2 | 25 | 1300 | -1.8 | 1.9 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.07 | -0.07 | -0.02 |
| | App. | 48 | 559.1 | 25 | 1300 | -2.6 | -3.2 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.11 | -0.11 | -0.03 |

Tabella 27 Tensioni longitudinali – Azione della neve

Si valutano le tensioni longitudinali determinate dall'effetto dell'azione del vento:

$$\sigma_{L1,wind} = \pm (M y / J) / z_s ; \sigma_{L2,wind} = (N / A) / z_s.$$

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | N | M | y | A | J | z _s | σ_{L1}^+ | σ_{L1}^- | σ_{L2} |
|-----|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------------------|-------------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [kN] | [kNm] | [m] | [m ²] | [m ⁴] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 8 | 1594 | 0 | -7.8 | 0.80 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 0.57 | -0.57 | 0.00 |
| | Camp. | 2 | 105.9 | 8 | 1550 | 0 | -5.1 | 0.78 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 0.39 | -0.39 | 0.00 |
| | App. | 3 | 111.4 | 8 | 1550 | 0 | 21.2 | 0.78 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 1.64 | -1.64 | 0.00 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1496 | 0 | -4.4 | 0.75 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 0.32 | -0.32 | 0.00 |
| | Camp. | 5 | 139.5 | 9 | 1450 | 0 | -3.3 | 0.73 | 0.04 | 0.01 | 0.85 | 0.25 | -0.25 | 0.00 |
| | App. | 6 | 144.1 | 10 | 1450 | 0 | 13.7 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 0.96 | -0.96 | 0.00 |
| | Camp. | 7 | 160.6 | 10 | 1450 | 0 | -4.0 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 0.28 | -0.28 | 0.00 |
| | App. | 8 | 165.4 | 10 | 1450 | 0 | 9.6 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 0.67 | -0.67 | 0.00 |
| | Camp. | 9 | 179.6 | 11 | 1450 | 0 | -5.2 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 0.33 | -0.33 | 0.00 |
| | App. | 10 | 184.5 | 11 | 1450 | 0 | 11.3 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 0.85 | 0.72 | -0.72 | 0.00 |
| | Camp. | 11 | 198.7 | 12 | 1450 | 0 | 0.2 | 0.73 | 0.06 | 0.01 | 0.85 | 0.01 | -0.01 | 0.00 |
| | App. | 12 | 203.5 | 12 | 1450 | 0 | 24.2 | 0.73 | 0.06 | 0.01 | 0.85 | 1.41 | -1.41 | 0.00 |
| 3 | Camp. | 13 | 231.0 | 14 | 1456 | 0 | -13.7 | 0.74 | 0.06 | 0.02 | 0.85 | 0.68 | -0.68 | 0.00 |
| | Camp. | 14 | 238.7 | 14 | 1400 | 0 | 4.9 | 0.71 | 0.06 | 0.02 | 0.85 | 0.26 | -0.26 | 0.00 |
| | App. | 15 | 241.9 | 14 | 1400 | 0 | 5.6 | 0.71 | 0.06 | 0.02 | 0.85 | 0.30 | -0.30 | 0.00 |
| | Camp. | 16 | 256.2 | 15 | 1400 | 0 | -4.8 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 0.85 | 0.24 | -0.24 | 0.00 |
| | App. | 17 | 261.0 | 15 | 1400 | 0 | 9.9 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 0.85 | 0.50 | -0.50 | 0.00 |
| | Camp. | 18 | 265.7 | 16 | 1400 | 0 | -5.2 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 0.85 | 0.24 | -0.24 | 0.00 |
| | App. | 19 | 270.5 | 16 | 1400 | 0 | 10.4 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 0.85 | 0.49 | -0.49 | 0.00 |
| | Camp. | 20 | 284.8 | 17 | 1400 | 0 | -5.1 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 0.22 | -0.22 | 0.00 |
| | App. | 21 | 289.5 | 17 | 1400 | 0 | 10.3 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 0.45 | -0.45 | 0.00 |
| | Camp. | 22 | 294.3 | 18 | 1400 | 0 | -5.4 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 0.22 | -0.22 | 0.00 |
| | App. | 23 | 299.1 | 18 | 1400 | 0 | 10.4 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 0.43 | -0.43 | 0.00 |
| | Camp. | 24 | 313.5 | 19 | 1400 | 0 | -5.5 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 0.21 | -0.21 | 0.00 |
| | App. | 25 | 318.3 | 19 | 1400 | 0 | 10.3 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 0.85 | 0.40 | -0.40 | 0.00 |
| | Camp. | 26 | 332.5 | 20 | 1400 | 0 | -5.4 | 0.71 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 0.20 | -0.20 | 0.00 |
| | App. | 27 | 337.2 | 20 | 1400 | 0 | 9.8 | 0.71 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 0.36 | -0.36 | 0.00 |
| | Camp. | 28 | 342.1 | 21 | 1400 | 0 | -4.4 | 0.71 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 0.15 | -0.15 | 0.00 |
| | App. | 29 | 346.9 | 21 | 1400 | 0 | 13.5 | 0.71 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 0.48 | -0.48 | 0.00 |
| 4 | Camp. | 30 | 365.7 | 22 | 1404 | 0 | -4.8 | 0.71 | 0.10 | 0.03 | 0.85 | 0.16 | -0.16 | 0.00 |
| | Camp. | 31 | 383.8 | 22 | 1350 | 0 | -3.2 | 0.69 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 0.12 | -0.12 | 0.00 |
| | App. | 32 | 387.7 | 22 | 1350 | 0 | 6.7 | 0.69 | 0.09 | 0.02 | 0.85 | 0.24 | -0.24 | 0.00 |
| | Camp. | 33 | 407.7 | 23 | 1350 | 0 | -2.9 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.10 | -0.10 | 0.00 |
| | App. | 34 | 411.7 | 23 | 1350 | 0 | 8.7 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.30 | -0.30 | 0.00 |
| | Camp. | 35 | 422.1 | 24 | 1350 | 0 | 3.2 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.11 | -0.11 | 0.00 |
| | App. | 36 | 423.7 | 24 | 1350 | 0 | 2.8 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.09 | -0.09 | 0.00 |
| | Camp. | 37 | 442.3 | 24 | 1350 | 0 | -4.0 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.13 | -0.13 | 0.00 |
| | App. | 38 | 446.4 | 24 | 1350 | 0 | 6.3 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.21 | -0.21 | 0.00 |
| | Camp. | 39 | 452.4 | 25 | 1350 | 0 | 2.0 | 0.69 | 0.11 | 0.03 | 0.85 | 0.06 | -0.06 | 0.00 |
| | App. | 40 | 454.4 | 25 | 1350 | 0 | 10.9 | 0.69 | 0.11 | 0.03 | 0.85 | 0.35 | -0.35 | 0.00 |
| 5 | Camp. | 41 | 471.3 | 25 | 1360 | 0 | -4.3 | 0.69 | 0.11 | 0.03 | 0.85 | 0.13 | -0.13 | 0.00 |
| | Camp. | 42 | 487.1 | 24 | 1300 | 0 | -3.6 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.13 | -0.13 | 0.00 |
| | App. | 43 | 491.1 | 24 | 1300 | 0 | 7.0 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.25 | -0.25 | 0.00 |
| | Camp. | 44 | 527.0 | 25 | 1300 | 0 | -2.2 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.07 | -0.07 | 0.00 |
| | App. | 45 | 531.1 | 25 | 1300 | 0 | 10.4 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.36 | -0.36 | 0.00 |
| 6 | Camp. | 46 | 547.1 | 25 | 1360 | 0 | -4.6 | 0.69 | 0.11 | 0.03 | 0.85 | 0.14 | -0.14 | 0.00 |
| | Camp. | 47 | 555.2 | 25 | 1300 | 0 | -3.3 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.11 | -0.11 | 0.00 |
| | App. | 48 | 559.1 | 25 | 1300 | 0 | 5.5 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 0.85 | 0.19 | -0.19 | 0.00 |

Tabella 28 Tensioni longitudinali – Azione del vento

Si osserva che data l'esiguità dei valori delle tensioni determinate dall'azione del vento, verranno trascurate nelle verifiche.

Le tensioni longitudinali ($\sigma_{L,3}$) determinate dalle azioni di attrito in corrispondenza degli appoggi si valutano come segue: $\sigma_{L,3} = (f_1 P_{tot}) / (2 \pi R_m s)$.

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | P _{t+w} | y | A | f ₁ | z _s | $\sigma_{L,3}$ | $\sigma_{L,3} / z_s$ |
|-----|-------|------|-------|------|------|------------------|------|-------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [kN] | [m] | [m ²] | [-] | [-] | [N/mm ²] | [N/mm ²] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 8 | 1594 | \ | 0.80 | 0.04 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 2 | 105.9 | 8 | 1550 | \ | 0.78 | 0.04 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 3 | 111.4 | 8 | 1550 | 256.3 | 0.78 | 0.04 | 0.40 | 0.85 | 2.62 | 3.08 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1496 | \ | 0.75 | 0.04 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 5 | 139.5 | 9 | 1450 | \ | 0.73 | 0.04 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 6 | 144.1 | 10 | 1450 | 152.2 | 0.73 | 0.05 | 0.40 | 0.85 | 1.33 | 1.56 |
| | Camp. | 7 | 160.6 | 10 | 1450 | \ | 0.73 | 0.05 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 8 | 165.4 | 10 | 1450 | 130.5 | 0.73 | 0.05 | 0.40 | 0.85 | 1.14 | 1.34 |
| | Camp. | 9 | 179.6 | 11 | 1450 | \ | 0.73 | 0.05 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 10 | 184.5 | 11 | 1450 | 145.8 | 0.73 | 0.05 | 0.40 | 0.85 | 1.16 | 1.36 |
| | Camp. | 11 | 198.7 | 12 | 1450 | \ | 0.73 | 0.06 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| 3 | App. | 12 | 203.5 | 12 | 1450 | 209.1 | 0.73 | 0.06 | 0.40 | 0.85 | 1.52 | 1.79 |
| | Camp. | 13 | 231.0 | 14 | 1456 | \ | 0.74 | 0.06 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 14 | 238.7 | 14 | 1400 | \ | 0.71 | 0.06 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 15 | 241.9 | 14 | 1400 | 62.5 | 0.71 | 0.06 | 0.40 | 0.85 | 0.40 | 0.47 |
| | Camp. | 16 | 256.2 | 15 | 1400 | \ | 0.71 | 0.07 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 17 | 261.0 | 15 | 1400 | 98.6 | 0.71 | 0.07 | 0.40 | 0.85 | 0.59 | 0.70 |
| | Camp. | 18 | 265.7 | 16 | 1400 | \ | 0.71 | 0.07 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 19 | 270.5 | 16 | 1400 | 102.4 | 0.71 | 0.07 | 0.40 | 0.85 | 0.58 | 0.68 |
| | Camp. | 20 | 284.8 | 17 | 1400 | \ | 0.71 | 0.08 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 21 | 289.5 | 17 | 1400 | 103.9 | 0.71 | 0.08 | 0.40 | 0.85 | 0.55 | 0.65 |
| | Camp. | 22 | 294.3 | 18 | 1400 | \ | 0.71 | 0.08 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 23 | 299.1 | 18 | 1400 | 105.4 | 0.71 | 0.08 | 0.40 | 0.85 | 0.53 | 0.62 |
| | Camp. | 24 | 313.5 | 19 | 1400 | \ | 0.71 | 0.08 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 25 | 318.3 | 19 | 1400 | 107.0 | 0.71 | 0.08 | 0.40 | 0.85 | 0.51 | 0.59 |
| | Camp. | 26 | 332.5 | 20 | 1400 | \ | 0.71 | 0.09 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 27 | 337.2 | 20 | 1400 | 105.6 | 0.71 | 0.09 | 0.40 | 0.85 | 0.47 | 0.56 |
| | Camp. | 28 | 342.1 | 21 | 1400 | \ | 0.71 | 0.09 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 29 | 346.9 | 21 | 1400 | 126.3 | 0.71 | 0.09 | 0.40 | 0.85 | 0.54 | 0.63 |
| 4 | Camp. | 30 | 365.7 | 22 | 1404 | \ | 0.71 | 0.10 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 31 | 383.8 | 22 | 1350 | \ | 0.69 | 0.09 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 32 | 387.7 | 22 | 1350 | 140.0 | 0.69 | 0.09 | 0.40 | 0.85 | 0.59 | 0.69 |
| | Camp. | 33 | 407.7 | 23 | 1350 | \ | 0.69 | 0.10 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 34 | 411.7 | 23 | 1350 | 155.0 | 0.69 | 0.10 | 0.40 | 0.85 | 0.62 | 0.74 |
| | Camp. | 35 | 422.1 | 24 | 1350 | \ | 0.69 | 0.10 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 36 | 423.7 | 24 | 1350 | 340.8 | 0.69 | 0.10 | 0.40 | 0.85 | 1.32 | 1.55 |
| | Camp. | 37 | 442.3 | 24 | 1350 | \ | 0.69 | 0.10 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 38 | 446.4 | 24 | 1350 | 148.6 | 0.69 | 0.10 | 0.40 | 0.85 | 0.57 | 0.68 |
| | Camp. | 39 | 452.4 | 25 | 1350 | \ | 0.69 | 0.11 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 40 | 454.4 | 25 | 1350 | 195.8 | 0.69 | 0.11 | 0.40 | 0.85 | 0.73 | 0.85 |
| 5 | Camp. | 41 | 471.3 | 25 | 1360 | \ | 0.69 | 0.11 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 42 | 487.1 | 24 | 1300 | \ | 0.66 | 0.10 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 43 | 491.1 | 24 | 1300 | 165.9 | 0.66 | 0.10 | 0.40 | 0.85 | 0.66 | 0.78 |
| | Camp. | 44 | 527.0 | 25 | 1300 | \ | 0.66 | 0.10 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 45 | 531.1 | 25 | 1300 | 202.8 | 0.66 | 0.10 | 0.40 | 0.85 | 0.78 | 0.92 |
| 6 | Camp. | 46 | 547.1 | 25 | 1360 | \ | 0.69 | 0.11 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 47 | 555.2 | 25 | 1300 | \ | 0.66 | 0.10 | 0.40 | 0.85 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 48 | 559.1 | 25 | 1300 | 144.2 | 0.66 | 0.10 | 0.40 | 0.85 | 0.55 | 0.65 |

Tabella 29 Tensioni longitudinali – Attrito appoggi

Le tensioni longitudinali dovute all'effetto della spinta idrostatica agente in corrispondenza dello spazio anulare dei giunti di dilatazione si valutano come segue:

$$\sigma_{L4} = \frac{N}{A} = \frac{P_{E,j} A_{joint}}{A}$$

dove:

- A Area della sezione di condotta;
- $P_{E,j}$ Pressione totale in corrispondenza del j-esimo giunto di dilatazione;
- A_{joint} Area della corona circolare in cui si esercita la pressione idrostatica in corrispondenza del giunto di dilatazione.

Nel caso in esame l'incremento delle tensioni longitudinali si registra solo in un tratto limitato del giunto di dilatazione, poiché, come evidenziato nelle figure seguenti, la pressione sollecita il tratto conico del tubo a valle del giunto e un anello di tenuta solidale alla medesima tubazione. Pertanto, l'effetto globale della pressione è autoequilibrato, mentre localmente la pressione interstiziale agente in corrispondenza del giunto di dilatazione determina delle tensioni longitudinali di trazione.

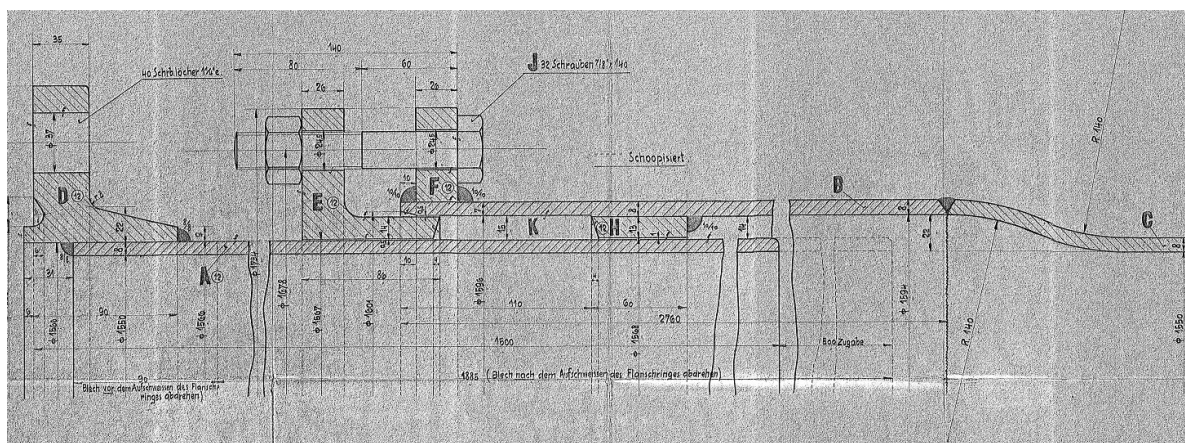


Figura 10.90: Geometria tipologica dei giunti di dilatazione

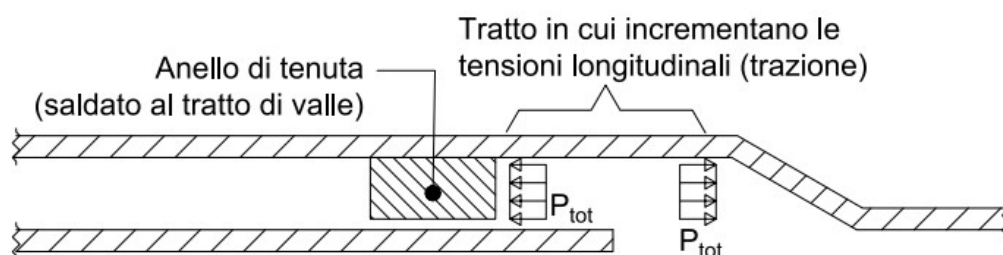


Figura 10.91: Schema di analisi delle tensioni longitudinali provocate della pressione interstiziale nei giunti di dilatazione

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | P _{tot} | s | D | ΔD | N | A | σ _{L4} | z _s | σ _{L4} / z _s |
|-----|-------|------|-------|----------------------|------|------|------|-------|-------------------|-----------------|----------------|----------------------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [kN/m ²] | [mm] | [mm] | [mm] | [kN] | [m ²] | [MPa] | [-] | [MPa] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 596.7 | 8 | 1594 | 44 | 64.8 | 0.04 | 1.61 | 0.85 | 1.89 |
| | Camp. | 2 | 105.9 | 820.3 | 8 | 1550 | 0 | 0.0 | 0.04 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 3 | 111.4 | 842.8 | 8 | 1550 | 0 | 0.0 | 0.04 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 952.4 | 9 | 1496 | 46 | 101.4 | 0.04 | 2.38 | 0.85 | 2.80 |
| | Camp. | 5 | 139.5 | 995.6 | 9 | 1450 | 0 | 0.0 | 0.04 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 6 | 144.1 | 1026.9 | 10 | 1450 | 0 | 0.0 | 0.05 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 7 | 160.6 | 1140.9 | 10 | 1450 | 0 | 0.0 | 0.05 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 8 | 165.4 | 1174.1 | 10 | 1450 | 0 | 0.0 | 0.05 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 9 | 179.6 | 1272.1 | 11 | 1450 | 0 | 0.0 | 0.05 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 10 | 184.5 | 1305.2 | 11 | 1450 | 0 | 0.0 | 0.05 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 11 | 198.7 | 1403.8 | 12 | 1450 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| 3 | App. | 12 | 203.5 | 1436.5 | 12 | 1450 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 13 | 231.0 | 1643.6 | 14 | 1456 | 56 | 206.5 | 0.06 | 3.19 | 0.85 | 3.76 |
| | Camp. | 14 | 238.7 | 1709.4 | 14 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 15 | 241.9 | 1736.2 | 14 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 16 | 256.2 | 1858.3 | 15 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.07 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 17 | 261.0 | 1899.3 | 15 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.07 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 18 | 265.7 | 1939.8 | 16 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.07 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 19 | 270.5 | 1980.4 | 16 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.07 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 20 | 284.8 | 2102.9 | 17 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.08 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 21 | 289.5 | 2143.5 | 17 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.08 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 22 | 294.3 | 2184.4 | 18 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.08 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 23 | 299.1 | 2225.4 | 18 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.08 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 24 | 313.5 | 2348.1 | 19 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.08 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 25 | 318.3 | 2389.3 | 19 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.08 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 26 | 332.5 | 2510.5 | 20 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.09 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 27 | 337.2 | 2551.0 | 20 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.09 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 28 | 342.1 | 2592.3 | 21 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.09 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 29 | 346.9 | 2633.6 | 21 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.09 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| 4 | Camp. | 30 | 365.7 | 2772.6 | 22 | 1404 | 54 | 323.8 | 0.10 | 3.29 | 0.85 | 3.87 |
| | Camp. | 31 | 383.8 | 2870.1 | 22 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.09 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 32 | 387.7 | 2891.4 | 22 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.09 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 33 | 407.7 | 2999.3 | 23 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.10 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 34 | 411.7 | 3020.9 | 23 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.10 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 35 | 422.1 | 3077.2 | 24 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.10 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 36 | 423.7 | 3084.7 | 24 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.10 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 37 | 442.3 | 3168.6 | 24 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.10 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 38 | 446.4 | 3186.8 | 24 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.10 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 39 | 452.4 | 3213.9 | 25 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.11 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 40 | 454.4 | 3222.8 | 25 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.11 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| 5 | Camp. | 41 | 471.3 | 3282.4 | 25 | 1360 | 60 | 411.5 | 0.11 | 3.78 | 0.85 | 4.45 |
| | Camp. | 42 | 487.1 | 3309.5 | 24 | 1300 | 0 | 0.0 | 0.10 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 43 | 491.1 | 3316.4 | 24 | 1300 | 0 | 0.0 | 0.10 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | Camp. | 44 | 527.0 | 3378.1 | 25 | 1300 | 0 | 0.0 | 0.10 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 45 | 531.1 | 3385.0 | 25 | 1300 | 0 | 0.0 | 0.10 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| 6 | Camp. | 46 | 547.1 | 3419.3 | 25 | 1360 | 60 | 428.6 | 0.11 | 3.94 | 0.85 | 4.64 |
| | Camp. | 47 | 555.2 | 3443.9 | 25 | 1300 | 0 | 0.0 | 0.10 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |
| | App. | 48 | 559.1 | 3455.9 | 25 | 1300 | 0 | 0.0 | 0.10 | 0.00 | 0.85 | 0.00 |

Tabella 30 Tensioni longitudinali – Pressione giunti di dilatazione

Le tensioni radiali si valutano come segue: $\tau = 4/3 T/A (r_e+r_i)^2 / (r_e^2+r_i^2)$.

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | V | y | A | J | r _i | r _e | r _i / r _e | τ |
|-----|-------|------|-------|------|------|-------|------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|---------------------------------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [kN] | [m] | [m ²] | [m ⁴] | [mm] | [mm] | [%] | [N/mm ²] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 8 | 1594 | -13.1 | 0.80 | 0.04 | 0.01 | 797 | 805 | 99 | -0.87 |
| | Camp. | 2 | 105.9 | 8 | 1550 | 9.1 | 0.78 | 0.04 | 0.01 | 775 | 783 | 99 | 0.62 |
| | App. | 3 | 111.4 | 8 | 1550 | 118.2 | 0.78 | 0.04 | 0.01 | 775 | 783 | 99 | 8.05 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1496 | 13.0 | 0.75 | 0.04 | 0.01 | 748 | 757 | 99 | 0.82 |
| | Camp. | 5 | 139.5 | 9 | 1450 | 5.8 | 0.73 | 0.04 | 0.01 | 725 | 734 | 99 | 0.37 |
| | App. | 6 | 144.1 | 10 | 1450 | 70.0 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 725 | 735 | 99 | 4.07 |
| | Camp. | 7 | 160.6 | 10 | 1450 | -5.5 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 725 | 735 | 99 | -0.32 |
| | App. | 8 | 165.4 | 10 | 1450 | 64.0 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 725 | 735 | 99 | 3.72 |
| | Camp. | 9 | 179.6 | 11 | 1450 | 0.8 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 725 | 736 | 99 | 0.04 |
| | App. | 10 | 184.5 | 11 | 1450 | 71.6 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 725 | 736 | 99 | 3.78 |
| | Camp. | 11 | 198.7 | 12 | 1450 | 19.0 | 0.73 | 0.06 | 0.01 | 725 | 737 | 98 | 0.92 |
| | App. | 12 | 203.5 | 12 | 1450 | 90.0 | 0.73 | 0.06 | 0.01 | 725 | 737 | 98 | 4.35 |
| | Camp. | 13 | 231.0 | 14 | 1456 | 14.8 | 0.74 | 0.06 | 0.02 | 728 | 742 | 98 | 0.61 |
| 3 | Camp. | 14 | 238.7 | 14 | 1400 | -14.5 | 0.71 | 0.06 | 0.02 | 700 | 714 | 98 | -0.62 |
| | App. | 15 | 241.9 | 14 | 1400 | 17.9 | 0.71 | 0.06 | 0.02 | 700 | 714 | 98 | 0.77 |
| | Camp. | 16 | 256.2 | 15 | 1400 | -1.3 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 700 | 715 | 98 | -0.05 |
| | App. | 17 | 261.0 | 15 | 1400 | 48.8 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 700 | 715 | 98 | 1.95 |
| | Camp. | 18 | 265.7 | 16 | 1400 | 0.5 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 700 | 716 | 98 | 0.02 |
| | App. | 19 | 270.5 | 16 | 1400 | 51.1 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 700 | 716 | 98 | 1.91 |
| | Camp. | 20 | 284.8 | 17 | 1400 | -0.1 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 700 | 717 | 98 | 0.00 |
| | App. | 21 | 289.5 | 17 | 1400 | 51.5 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 700 | 717 | 98 | 1.81 |
| | Camp. | 22 | 294.3 | 18 | 1400 | 0.2 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 700 | 718 | 97 | 0.01 |
| | App. | 23 | 299.1 | 18 | 1400 | 53.0 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 700 | 718 | 97 | 1.76 |
| | Camp. | 24 | 313.5 | 19 | 1400 | -0.2 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 700 | 719 | 97 | -0.01 |
| | App. | 25 | 318.3 | 19 | 1400 | 53.9 | 0.71 | 0.08 | 0.02 | 700 | 719 | 97 | 1.70 |
| | Camp. | 26 | 332.5 | 20 | 1400 | -0.4 | 0.71 | 0.09 | 0.02 | 700 | 720 | 97 | -0.01 |
| | App. | 27 | 337.2 | 20 | 1400 | 53.6 | 0.71 | 0.09 | 0.02 | 700 | 720 | 97 | 1.60 |
| | Camp. | 28 | 342.1 | 21 | 1400 | 3.4 | 0.71 | 0.09 | 0.02 | 700 | 721 | 97 | 0.10 |
| | App. | 29 | 346.9 | 21 | 1400 | 59.2 | 0.71 | 0.09 | 0.02 | 700 | 721 | 97 | 1.68 |
| 4 | Camp. | 30 | 365.7 | 22 | 1404 | 1.0 | 0.71 | 0.10 | 0.03 | 702 | 724 | 97 | 0.03 |
| | Camp. | 31 | 383.8 | 22 | 1350 | -1.4 | 0.69 | 0.09 | 0.02 | 675 | 697 | 97 | -0.04 |
| | App. | 32 | 387.7 | 22 | 1350 | 69.6 | 0.69 | 0.09 | 0.02 | 675 | 697 | 97 | 1.96 |
| | Camp. | 33 | 407.7 | 23 | 1350 | 1.8 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 675 | 698 | 97 | 0.05 |
| | App. | 34 | 411.7 | 23 | 1350 | 75.0 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 675 | 698 | 97 | 2.02 |
| | Camp. | 35 | 422.1 | 24 | 1350 | 249.2 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 675 | 699 | 97 | 6.41 |
| | App. | 36 | 423.7 | 24 | 1350 | 261.5 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 675 | 699 | 97 | 6.73 |
| | Camp. | 37 | 442.3 | 24 | 1350 | -2.9 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 675 | 699 | 97 | -0.07 |
| | App. | 38 | 446.4 | 24 | 1350 | 77.7 | 0.69 | 0.10 | 0.02 | 675 | 699 | 97 | 2.00 |
| | Camp. | 39 | 452.4 | 25 | 1350 | 49.9 | 0.69 | 0.11 | 0.03 | 675 | 700 | 96 | 1.23 |
| | App. | 40 | 454.4 | 25 | 1350 | 89.0 | 0.69 | 0.11 | 0.03 | 675 | 700 | 96 | 2.20 |
| 5 | Camp. | 41 | 471.3 | 25 | 1360 | 23.4 | 0.69 | 0.11 | 0.03 | 680 | 705 | 96 | 0.57 |
| | Camp. | 42 | 487.1 | 24 | 1300 | 0.9 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 650 | 674 | 96 | 0.02 |
| | App. | 43 | 491.1 | 24 | 1300 | 83.2 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 650 | 674 | 96 | 2.22 |
| | Camp. | 44 | 527.0 | 25 | 1300 | 9.2 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 650 | 675 | 96 | 0.24 |
| | App. | 45 | 531.1 | 25 | 1300 | 92.7 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 650 | 675 | 96 | 2.37 |
| 6 | Camp. | 46 | 547.1 | 25 | 1360 | 7.0 | 0.69 | 0.11 | 0.03 | 680 | 705 | 96 | 0.17 |
| | Camp. | 47 | 555.2 | 25 | 1300 | -4.9 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 650 | 675 | 96 | -0.13 |
| | App. | 48 | 559.1 | 25 | 1300 | 74.9 | 0.66 | 0.10 | 0.02 | 650 | 675 | 96 | 1.92 |

Tabella 31 Tensioni radiali – Peso proprio strutturale + Peso acqua nelle condotte

Si osserva che data l'esiguità delle tensioni radiali, esse verranno trascurate in fase di verifica della condotta.

Si verificano le tensioni nella condotta in accordo con il criterio di von Mises, assumendo per la condizione di carico normale e per l'acciaio S 235 una tensione ammissibile pari a:

- Sezioni in campata

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min (R_{eH} / 1.5 ; R_m / 2.4) = \min (235 \text{ N/mm}^2 / 1.5 ; 360 \text{ N/mm}^2 / 2.4) = 150.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = R_{eH} / 1.7 = 235 \text{ N/mm}^2 / 1.7 = 138.2 \text{ N/mm}^2$$

- Sezioni in appoggio

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min(R_{eH}/1.5 ; R_m/2.4)1.5 = \min(235\text{N/mm}^2 / 1.5 ; 360\text{N/mm}^2 / 2.4) 1.5 = 225.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = R_{eH} / 1 = 235 \text{ N/mm}^2$$

Si osserva che la distinzione delle tensioni ammissibili tra le sezioni in campata e appoggio è stata introdotta assumendo che possano verificarsi snervamenti localizzati nelle zone dove sono presenti perturbazioni locali. In particolare, tale assunzione è indicata nel manuale ASCE n° 79 "Steel Penstocks", in cui al paragrafo 3.5.1 viene indicato che la tensione ammissibile deve essere modificata tramite i fattori "*weld joint reduction factors*" e "*allowable stress increase factors*" e, le tabelle 3.2 ("*penstocks shell immediately above horn or tip of saddle*") e 3.5 ("*local primary membrane*") indicano che per le selle di appoggio si possa considerare un coefficiente di incremento della tensione ammissibile pari a 1.5.

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | R _{eH} | $\Sigma\sigma_L$ | $\Sigma\sigma_C$ | z _s | σ_{eff} | $\sigma_{adm,ASCE}$ | $\sigma_{adm,CECT}$ | σ_{adm}/σ ASCE | σ_{adm}/σ CECT |
|-----|-------|------|-------|------|------|-----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | | |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 8 | 1594 | 235 | 9.8 | 75.2 | 0.85 | 70.8 | 150.0 | 138.2 | 2.12 | 1.95 |
| | Camp. | 2 | 105.9 | 8 | 1550 | 235 | 2.9 | 97.5 | 0.85 | 96.1 | 150.0 | 138.2 | 1.56 | 1.44 |
| | App. | 3 | 111.4 | 8 | 1550 | 235 | -22.4 | 93.0 | 0.85 | 106.0 | 225.0 | 235.0 | 2.12 | 2.22 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1496 | 235 | 6.1 | 97.5 | 0.85 | 94.6 | 150.0 | 138.2 | 1.59 | 1.46 |
| | Camp. | 5 | 139.5 | 9 | 1450 | 235 | 2.1 | 98.7 | 0.85 | 97.7 | 150.0 | 138.2 | 1.54 | 1.42 |
| | App. | 6 | 144.1 | 10 | 1450 | 235 | -9.2 | 157.2 | 0.85 | 162.0 | 225.0 | 235.0 | 1.39 | 1.45 |
| | Camp. | 7 | 160.6 | 10 | 1450 | 235 | 1.1 | 101.9 | 0.85 | 101.4 | 150.0 | 138.2 | 1.48 | 1.36 |
| | App. | 8 | 165.4 | 10 | 1450 | 235 | -8.0 | 156.8 | 0.85 | 160.9 | 225.0 | 235.0 | 1.40 | 1.46 |
| | Camp. | 9 | 179.6 | 11 | 1450 | 235 | 0.6 | 103.5 | 0.85 | 103.2 | 150.0 | 138.2 | 1.45 | 1.34 |
| | App. | 10 | 184.5 | 11 | 1450 | 235 | -9.7 | 154.2 | 0.85 | 159.2 | 225.0 | 235.0 | 1.41 | 1.48 |
| | Camp. | 11 | 198.7 | 12 | 1450 | 235 | -3.8 | 104.9 | 0.85 | 106.9 | 150.0 | 138.2 | 1.40 | 1.29 |
| | App. | 12 | 203.5 | 12 | 1450 | 235 | -18.1 | 166.0 | 0.85 | 175.7 | 225.0 | 235.0 | 1.28 | 1.34 |
| | Camp. | 13 | 231.0 | 14 | 1456 | 235 | 8.9 | 106.2 | 0.85 | 102.1 | 150.0 | 138.2 | 1.47 | 1.35 |
| 3 | Camp. | 14 | 238.7 | 14 | 1400 | 235 | 1.3 | 106.2 | 0.85 | 105.5 | 150.0 | 138.2 | 1.42 | 1.31 |
| | App. | 15 | 241.9 | 14 | 1400 | 235 | -2.7 | 121.0 | 0.85 | 122.4 | 225.0 | 235.0 | 1.84 | 1.92 |
| | Camp. | 16 | 256.2 | 15 | 1400 | 235 | -0.1 | 107.8 | 0.85 | 107.8 | 150.0 | 138.2 | 1.39 | 1.28 |
| | App. | 17 | 261.0 | 15 | 1400 | 235 | -5.4 | 122.0 | 0.85 | 124.8 | 225.0 | 235.0 | 1.80 | 1.88 |
| | Camp. | 18 | 265.7 | 16 | 1400 | 235 | -0.6 | 105.9 | 0.85 | 106.2 | 150.0 | 138.2 | 1.41 | 1.30 |
| | App. | 19 | 270.5 | 16 | 1400 | 235 | -6.0 | 119.0 | 0.85 | 122.1 | 225.0 | 235.0 | 1.84 | 1.92 |
| | Camp. | 20 | 284.8 | 17 | 1400 | 235 | -2.1 | 108.0 | 0.85 | 109.1 | 150.0 | 138.2 | 1.37 | 1.27 |
| | App. | 21 | 289.5 | 17 | 1400 | 235 | -7.2 | 119.9 | 0.85 | 123.6 | 225.0 | 235.0 | 1.82 | 1.90 |
| | Camp. | 22 | 294.3 | 18 | 1400 | 235 | -2.5 | 106.4 | 0.85 | 107.7 | 150.0 | 138.2 | 1.39 | 1.28 |
| | App. | 23 | 299.1 | 18 | 1400 | 235 | -7.6 | 117.1 | 0.85 | 121.0 | 225.0 | 235.0 | 1.86 | 1.94 |
| | Camp. | 24 | 313.5 | 19 | 1400 | 235 | -3.8 | 108.3 | 0.85 | 110.2 | 150.0 | 138.2 | 1.36 | 1.25 |
| | App. | 25 | 318.3 | 19 | 1400 | 235 | -8.6 | 118.0 | 0.85 | 122.6 | 225.0 | 235.0 | 1.84 | 1.92 |
| | Camp. | 26 | 332.5 | 20 | 1400 | 235 | -5.0 | 109.9 | 0.85 | 112.5 | 150.0 | 138.2 | 1.33 | 1.23 |
| | App. | 27 | 337.2 | 20 | 1400 | 235 | -9.5 | 118.8 | 0.85 | 123.9 | 225.0 | 235.0 | 1.82 | 1.90 |
| | Camp. | 28 | 342.1 | 21 | 1400 | 235 | -5.8 | 108.4 | 0.85 | 111.4 | 150.0 | 138.2 | 1.35 | 1.24 |
| | App. | 29 | 346.9 | 21 | 1400 | 235 | -10.9 | 117.7 | 0.85 | 123.5 | 225.0 | 235.0 | 1.82 | 1.90 |
| 4 | Camp. | 30 | 365.7 | 22 | 1404 | 235 | 6.1 | 110.8 | 0.85 | 107.9 | 150.0 | 138.2 | 1.39 | 1.28 |
| | Camp. | 31 | 383.8 | 22 | 1350 | 235 | 0.5 | 110.2 | 0.85 | 109.9 | 150.0 | 138.2 | 1.36 | 1.26 |
| | App. | 32 | 387.7 | 22 | 1350 | 235 | -4.0 | 126.2 | 0.85 | 128.2 | 225.0 | 235.0 | 1.75 | 1.83 |
| | Camp. | 33 | 407.7 | 23 | 1350 | 235 | -0.7 | 110.2 | 0.85 | 110.6 | 150.0 | 138.2 | 1.36 | 1.25 |
| | App. | 34 | 411.7 | 23 | 1350 | 235 | -5.7 | 126.1 | 0.85 | 129.1 | 225.0 | 235.0 | 1.74 | 1.82 |
| | Camp. | 35 | 422.1 | 24 | 1350 | 235 | 6.2 | 108.6 | 0.85 | 105.6 | 150.0 | 138.2 | 1.42 | 1.31 |
| | App. | 36 | 423.7 | 24 | 1350 | 235 | -6.9 | 191.5 | 0.85 | 195.1 | 225.0 | 235.0 | 1.15 | 1.20 |
| | Camp. | 37 | 442.3 | 24 | 1350 | 235 | -1.9 | 111.5 | 0.85 | 112.4 | 150.0 | 138.2 | 1.33 | 1.23 |
| | App. | 38 | 446.4 | 24 | 1350 | 235 | -6.5 | 126.1 | 0.85 | 129.5 | 225.0 | 235.0 | 1.74 | 1.81 |
| | Camp. | 39 | 452.4 | 25 | 1350 | 235 | -3.1 | 108.9 | 0.85 | 110.4 | 150.0 | 138.2 | 1.36 | 1.25 |
| | App. | 40 | 454.4 | 25 | 1350 | 235 | -8.8 | 126.5 | 0.85 | 131.1 | 225.0 | 235.0 | 1.72 | 1.79 |
| | Camp. | 41 | 471.3 | 25 | 1360 | 235 | 6.7 | 111.8 | 0.85 | 108.6 | 150.0 | 138.2 | 1.38 | 1.27 |
| 5 | Camp. | 42 | 487.1 | 24 | 1300 | 235 | 1.9 | 111.9 | 0.85 | 110.9 | 150.0 | 138.2 | 1.35 | 1.25 |
| | App. | 43 | 491.1 | 24 | 1300 | 235 | -3.6 | 128.8 | 0.85 | 130.6 | 225.0 | 235.0 | 1.72 | 1.80 |
| | Camp. | 44 | 527.0 | 25 | 1300 | 235 | 0.4 | 109.8 | 0.85 | 109.6 | 150.0 | 138.2 | 1.37 | 1.26 |
| | App. | 45 | 531.1 | 25 | 1300 | 235 | -6.0 | 128.9 | 0.85 | 131.9 | 225.0 | 235.0 | 1.71 | 1.78 |
| | Camp. | 46 | 547.1 | 25 | 1360 | 235 | 7.0 | 116.0 | 0.85 | 112.7 | 150.0 | 138.2 | 1.33 | 1.23 |
| 6 | Camp. | 47 | 555.2 | 25 | 1300 | 235 | 1.6 | 111.8 | 0.85 | 111.0 | 150.0 | 138.2 | 1.35 | 1.25 |
| | App. | 48 | 559.1 | 25 | 1300 | 235 | -2.7 | 125.3 | 0.85 | 126.7 | 225.0 | 235.0 | 1.78 | 1.85 |

Tabella 32 Verifica delle tensioni effettive – CF1 e 2 – Condizione di carico normale

È possibile notare le tensioni agenti risultino ovunque inferiori rispetto alle tensioni ammissibili. Nella tabella seguente si riportano per ciascuna sezione gli spessori di calcolo e gli spessori di progetto della condotta. Lo spessore di sovrametallo viene calcolato come la differenza tra lo spessore di progetto e lo spessore di calcolo.

$$\Delta s = s_{\text{design}} - s_{\text{min}}$$

Dove:

- s_{design} Spessore di progetto della condotta;
- s_{min} Spessore di calcolo;
- Δs Massimo sovrametallo disponibile.

| Sez. | Svil. | s_{design} | $s_{min,ASCE}$ | $s_{min,CECT}$ | Δs_{ASCE} | Δs_{CECT} |
|------|-------|--------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|
| [-] | [m] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
| 1 | 51.1 | 8 | 3.5 | 3.8 | 4.5 | 4.2 |
| 2 | 105.9 | 8 | 5.0 | 5.4 | 3.0 | 2.6 |
| 3 | 111.4 | 8 | 3.7 | 3.6 | 4.3 | 4.4 |
| 4 | 133.3 | 9 | 5.5 | 6.0 | 3.5 | 3.0 |
| 5 | 139.5 | 9 | 5.7 | 6.2 | 3.3 | 2.8 |
| 6 | 144.1 | 10 | 7.9 | 7.6 | 2.1 | 2.4 |
| 7 | 160.6 | 10 | 6.5 | 7.1 | 3.5 | 2.9 |
| 8 | 165.4 | 10 | 7.7 | 7.5 | 2.3 | 2.5 |
| 9 | 179.6 | 11 | 7.3 | 8.0 | 3.7 | 3.0 |
| 10 | 184.5 | 11 | 8.4 | 8.1 | 2.6 | 2.9 |
| 11 | 198.7 | 12 | 8.3 | 9.0 | 3.7 | 3.0 |
| 12 | 203.5 | 12 | 9.9 | 9.6 | 2.1 | 2.4 |
| 13 | 231.0 | 14 | 9.2 | 10.0 | 4.8 | 4.0 |
| 14 | 238.7 | 14 | 9.5 | 10.4 | 4.5 | 3.6 |
| 15 | 241.9 | 14 | 8.0 | 7.7 | 6.0 | 6.3 |
| 16 | 256.2 | 15 | 10.4 | 11.4 | 4.6 | 3.6 |
| 17 | 261.0 | 15 | 8.6 | 8.3 | 6.4 | 6.7 |
| 18 | 265.7 | 16 | 10.9 | 11.9 | 5.1 | 4.1 |
| 19 | 270.5 | 16 | 9.0 | 8.6 | 7.0 | 7.4 |
| 20 | 284.8 | 17 | 12.0 | 13.1 | 5.0 | 3.9 |
| 21 | 289.5 | 17 | 9.6 | 9.2 | 7.4 | 7.8 |
| 22 | 294.3 | 18 | 12.5 | 13.6 | 5.5 | 4.4 |
| 23 | 299.1 | 18 | 9.9 | 9.5 | 8.1 | 8.5 |
| 24 | 313.5 | 19 | 13.5 | 14.8 | 5.5 | 4.2 |
| 25 | 318.3 | 19 | 10.5 | 10.1 | 8.5 | 8.9 |
| 26 | 332.5 | 20 | 14.6 | 15.9 | 5.4 | 4.1 |
| 27 | 337.2 | 20 | 11.1 | 10.7 | 8.9 | 9.3 |
| 28 | 342.1 | 21 | 15.1 | 16.5 | 5.9 | 4.5 |
| 29 | 346.9 | 21 | 11.6 | 11.2 | 9.4 | 9.8 |
| 30 | 365.7 | 22 | 15.3 | 16.7 | 6.7 | 5.3 |
| 31 | 383.8 | 22 | 15.6 | 17.1 | 6.4 | 4.9 |
| 32 | 387.7 | 22 | 13.1 | 12.6 | 8.9 | 9.4 |
| 33 | 407.7 | 23 | 16.4 | 18.0 | 6.6 | 5.0 |
| 34 | 411.7 | 23 | 13.8 | 13.3 | 9.2 | 9.7 |
| 35 | 422.1 | 24 | 16.3 | 17.8 | 7.7 | 6.2 |
| 36 | 423.7 | 24 | 21.6 | 21.0 | 2.4 | 3.0 |
| 37 | 442.3 | 24 | 17.5 | 19.1 | 6.5 | 4.9 |
| 38 | 446.4 | 24 | 14.3 | 13.8 | 9.7 | 10.2 |
| 39 | 452.4 | 25 | 17.9 | 19.5 | 7.1 | 5.5 |
| 40 | 454.4 | 25 | 15.3 | 14.7 | 9.7 | 10.3 |
| 41 | 471.3 | 25 | 17.5 | 19.1 | 7.5 | 5.9 |
| 42 | 487.1 | 24 | 17.2 | 18.8 | 6.8 | 5.2 |
| 43 | 491.1 | 24 | 14.6 | 14.1 | 9.4 | 9.9 |
| 44 | 527.0 | 25 | 17.7 | 19.4 | 7.3 | 5.6 |
| 45 | 531.1 | 25 | 15.5 | 14.9 | 9.5 | 10.1 |
| 46 | 547.1 | 25 | 18.3 | 19.9 | 6.7 | 5.1 |
| 47 | 555.2 | 25 | 18.0 | 19.6 | 7.0 | 5.4 |
| 48 | 559.1 | 25 | 14.6 | 14.1 | 10.4 | 10.9 |

Tabella 33 Verifica degli spessori – CF 1 e 2 – Condizione di carico normale

10.3 Condizione di carico saltuaria

Per la condotta in oggetto, nella condizione di carico saltuaria si considera la combinazione delle seguenti azioni:

- Peso proprio della tubazione e dell'acqua in essa contenuta;
- Azione della neve;
- Azione del vento;
- Azioni derivanti dall'attrito sulle selle di appoggio.

Nella condizione di carico saltuaria si adottano i seguenti coefficienti di sicurezza nella definizione delle tensioni ammissibili:

| Norma | Tensioni principali | | Tensioni da perturbazioni locali |
|-------------|---|--|---|
| ASCE | $\sigma_{adm} \leq \min \left[1.33 \frac{R_{eH}}{1.5}; 1.33 \frac{R_m}{2.4}; R_{eH} \right]$ | | $\sigma_{adm} \leq \min \left[2 \frac{R_{eH}}{1.5}; 2 \frac{R_m}{2.4}; R_{eH} \right]$ |
| CECT | $\sigma_{adm} \leq \frac{R_{eH}}{1.5}$ | | $\sigma_{adm} \leq R_{eH}$ |

Tabella 10.34 Fattori di sicurezza – Condizione di carico saltuaria

Nella condizione di carico saltuaria si osserva una riduzione delle sollecitazioni agenti rispetto alla condizione di carico normale, legate al fatto che non è applicata la pressione idrostatica e, si osserva una variazione delle verifiche tensionali, poiché le tensioni ammissibili risultano maggiori nella condizione saltuaria. Inoltre, essendo la pressione all'interno della condotta nulla, in tale condizione di carico si osserva che nella valutazione degli effetti di ovalizzazione il coefficiente di Lazard è unitario ($\alpha = 1$). Pertanto, nella condizione di carico saltuaria viene considerato il massimo effetto ovalizzante. Infine, si osserva una variazione delle tensioni longitudinali nella tratta 4 della condotta determinata dall'assenza della spinta idrostatica in corrispondenza del vertice caratterizzato dalla repentina variazione di pendenza.

Dunque, si verificano le tensioni nella condotta in accordo al criterio di Von Mises, assumendo per la condizione di carico saltuaria e per l'acciaio S 235 una tensione ammissibile pari a:

- Sezioni in campata

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min (1.33 \cdot 235 \text{ N/mm}^2 / 1.5 ; 1.33 \cdot 360 \text{ N/mm}^2 / 2.4 ; 235 \text{ N/mm}^2) = 199.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = 235 \text{ N/mm}^2 / 1.5 = 156.7 \text{ N/mm}^2$$

- Sezioni in appoggio

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min (2 \cdot 235 \text{ N/mm}^2 / 1.5 ; 2 \cdot 360 \text{ N/mm}^2 / 2.4 ; 235 \text{ N/mm}^2) = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = 235 \text{ N/mm}^2$$

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | R _{eH} | $\Sigma\sigma_L$ | $\Sigma\sigma_C$ | z _s | σ_{eff} | $\sigma_{adm,ASCE}$ | $\sigma_{adm,CECT}$ | σ_{adm}/σ ASCE | σ_{adm}/σ CECT |
|-----|-------|------|-------|------|------|-----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | | |
| 1 | Camp. | 1 | 50.0 | 8 | 1594 | 235 | 7.9 | 65.4 | 0.85 | 61.8 | 199.5 | 156.7 | 3.23 | 2.53 |
| | Camp. | 2 | 105.9 | 8 | 1550 | 235 | 2.9 | 61.9 | 0.85 | 60.4 | 199.5 | 156.7 | 3.30 | 2.59 |
| | App. | 3 | 111.4 | 8 | 1550 | 235 | -22.4 | 54.9 | 0.85 | 68.9 | 235.0 | 235.0 | 3.41 | 3.41 |
| 2 | Camp. | 4 | 131.6 | 9 | 1496 | 235 | 3.3 | 51.3 | 0.85 | 49.7 | 199.5 | 156.7 | 4.01 | 3.15 |
| | Camp. | 5 | 139.5 | 9 | 1450 | 235 | 2.1 | 48.2 | 0.85 | 47.2 | 199.5 | 156.7 | 4.23 | 3.32 |
| | App. | 6 | 144.1 | 10 | 1450 | 235 | -9.2 | 108.0 | 0.85 | 112.9 | 235.0 | 235.0 | 2.08 | 2.08 |
| | Camp. | 7 | 160.6 | 10 | 1450 | 235 | 1.1 | 43.5 | 0.85 | 42.9 | 199.5 | 156.7 | 4.65 | 3.65 |
| | App. | 8 | 165.4 | 10 | 1450 | 235 | -8.0 | 95.6 | 0.85 | 99.8 | 235.0 | 235.0 | 2.35 | 2.35 |
| | Camp. | 9 | 179.6 | 11 | 1450 | 235 | 0.6 | 39.6 | 0.85 | 39.3 | 199.5 | 156.7 | 5.08 | 3.99 |
| | App. | 10 | 184.5 | 11 | 1450 | 235 | -9.7 | 87.7 | 0.85 | 93.0 | 235.0 | 235.0 | 2.53 | 2.53 |
| | Camp. | 11 | 198.7 | 12 | 1450 | 235 | -3.8 | 36.3 | 0.85 | 38.4 | 199.5 | 156.7 | 5.20 | 4.08 |
| | App. | 12 | 203.5 | 12 | 1450 | 235 | -18.1 | 95.1 | 0.85 | 105.3 | 235.0 | 235.0 | 2.23 | 2.23 |
| 3 | Camp. | 13 | 230.1 | 14 | 1456 | 235 | 5.1 | 31.5 | 0.85 | 29.2 | 199.5 | 156.7 | 6.82 | 5.36 |
| | Camp. | 14 | 238.7 | 14 | 1400 | 235 | 1.3 | 29.1 | 0.85 | 28.5 | 199.5 | 156.7 | 7.01 | 5.50 |
| | App. | 15 | 241.9 | 14 | 1400 | 235 | -2.7 | 42.4 | 0.85 | 43.9 | 235.0 | 235.0 | 5.36 | 5.36 |
| | Camp. | 16 | 256.2 | 15 | 1400 | 235 | -0.1 | 27.2 | 0.85 | 27.3 | 199.5 | 156.7 | 7.32 | 5.75 |
| | App. | 17 | 261.0 | 15 | 1400 | 235 | -5.4 | 39.3 | 0.85 | 42.2 | 235.0 | 235.0 | 5.56 | 5.56 |
| | Camp. | 18 | 265.7 | 16 | 1400 | 235 | -0.6 | 25.5 | 0.85 | 25.9 | 199.5 | 156.7 | 7.71 | 6.06 |
| | App. | 19 | 270.5 | 16 | 1400 | 235 | -6.0 | 36.6 | 0.85 | 40.0 | 235.0 | 235.0 | 5.88 | 5.88 |
| | Camp. | 20 | 284.8 | 17 | 1400 | 235 | -2.1 | 24.1 | 0.85 | 25.2 | 199.5 | 156.7 | 7.93 | 6.22 |
| | App. | 21 | 289.5 | 17 | 1400 | 235 | -7.2 | 34.0 | 0.85 | 38.1 | 235.0 | 235.0 | 6.17 | 6.17 |
| | Camp. | 22 | 294.3 | 18 | 1400 | 235 | -2.5 | 22.8 | 0.85 | 24.1 | 199.5 | 156.7 | 8.27 | 6.49 |
| | App. | 23 | 299.1 | 18 | 1400 | 235 | -7.6 | 31.7 | 0.85 | 36.0 | 235.0 | 235.0 | 6.52 | 6.52 |
| | Camp. | 24 | 313.5 | 19 | 1400 | 235 | -3.8 | 21.6 | 0.85 | 23.7 | 199.5 | 156.7 | 8.41 | 6.61 |
| | App. | 25 | 318.3 | 19 | 1400 | 235 | -8.6 | 29.7 | 0.85 | 34.8 | 235.0 | 235.0 | 6.75 | 6.75 |
| | Camp. | 26 | 332.5 | 20 | 1400 | 235 | -5.0 | 20.6 | 0.85 | 23.5 | 199.5 | 156.7 | 8.50 | 6.67 |
| | App. | 27 | 337.2 | 20 | 1400 | 235 | -9.5 | 27.9 | 0.85 | 33.7 | 235.0 | 235.0 | 6.98 | 6.98 |
| | Camp. | 28 | 342.1 | 21 | 1400 | 235 | -5.8 | 19.6 | 0.85 | 23.0 | 199.5 | 156.7 | 8.66 | 6.80 |
| | App. | 29 | 346.9 | 21 | 1400 | 235 | -10.9 | 27.4 | 0.85 | 34.1 | 235.0 | 235.0 | 6.88 | 6.88 |
| 4 | Camp. | 30 | 363.3 | 22 | 1404 | 235 | 2.3 | 18.8 | 0.85 | 17.8 | 199.5 | 156.7 | 11.19 | 8.79 |
| | Camp. | 31 | 383.8 | 22 | 1350 | 235 | 0.5 | 17.4 | 0.85 | 17.2 | 199.5 | 156.7 | 11.61 | 9.12 |
| | App. | 32 | 387.7 | 22 | 1350 | 235 | -4.0 | 32.7 | 0.85 | 34.9 | 235.0 | 235.0 | 6.74 | 6.74 |
| | Camp. | 33 | 407.7 | 23 | 1350 | 235 | -0.9 | 16.7 | 0.85 | 17.2 | 199.5 | 156.7 | 11.60 | 9.11 |
| | App. | 34 | 411.7 | 23 | 1350 | 235 | -6.2 | 33.0 | 0.85 | 36.5 | 235.0 | 235.0 | 6.43 | 6.43 |
| | Camp. | 35 | 422.1 | 24 | 1350 | 235 | -2.0 | 16.0 | 0.85 | 17.1 | 199.5 | 156.7 | 11.67 | 9.16 |
| | App. | 36 | 423.7 | 24 | 1350 | 235 | -5.5 | 44.4 | 0.85 | 47.3 | 235.0 | 235.0 | 4.96 | 4.96 |
| | Camp. | 37 | 442.3 | 24 | 1350 | 235 | -1.8 | 16.0 | 0.85 | 17.0 | 199.5 | 156.7 | 11.75 | 9.22 |
| | App. | 38 | 446.4 | 24 | 1350 | 235 | -6.5 | 30.2 | 0.85 | 33.9 | 235.0 | 235.0 | 6.94 | 6.94 |
| | Camp. | 39 | 452.4 | 25 | 1350 | 235 | -3.0 | 15.4 | 0.85 | 17.1 | 199.5 | 156.7 | 11.64 | 9.14 |
| | App. | 40 | 454.4 | 25 | 1350 | 235 | -8.7 | 32.8 | 0.85 | 37.9 | 235.0 | 235.0 | 6.20 | 6.20 |
| 5 | Camp. | 41 | 471.3 | 25 | 1360 | 235 | 2.2 | 15.6 | 0.85 | 14.7 | 199.5 | 156.7 | 13.60 | 10.68 |
| | Camp. | 42 | 487.1 | 24 | 1300 | 235 | 1.9 | 14.9 | 0.85 | 14.0 | 199.5 | 156.7 | 14.20 | 11.15 |
| | App. | 43 | 491.1 | 24 | 1300 | 235 | -3.6 | 31.6 | 0.85 | 33.5 | 235.0 | 235.0 | 7.01 | 7.01 |
| | Camp. | 44 | 527.0 | 25 | 1300 | 235 | 0.4 | 14.3 | 0.85 | 14.1 | 199.5 | 156.7 | 14.13 | 11.10 |
| | App. | 45 | 531.1 | 25 | 1300 | 235 | -6.0 | 33.1 | 0.85 | 36.5 | 235.0 | 235.0 | 6.44 | 6.44 |
| 6 | Camp. | 46 | 547.1 | 25 | 1360 | 235 | 2.3 | 15.6 | 0.85 | 14.6 | 199.5 | 156.7 | 13.65 | 10.72 |
| | Camp. | 47 | 555.2 | 25 | 1300 | 235 | 1.6 | 14.3 | 0.85 | 13.6 | 199.5 | 156.7 | 14.69 | 11.53 |
| | App. | 48 | 559.1 | 25 | 1300 | 235 | -2.7 | 27.5 | 0.85 | 28.9 | 235.0 | 235.0 | 8.12 | 8.12 |

Tabella 35 Verifica delle tensioni effettive – CF1 e 2 - Condizione di carico saltuaria

È possibile notare le tensioni agenti risultino ovunque inferiori rispetto alle tensioni ammissibili.

Inoltre, data la differenza dei fattori di sicurezza considerati (K e C), tale condizione di carico risulta non determinante.

11. VERIFICA E DETERMINAZIONE DEGLI SPESSORI DI CALCOLO – METODO ALLE TENSIONI AMMISSIBILI – CONDOTTA 3

11.1 Sezioni di verifica

Per le verifiche di resistenza sezionali si considerano lungo lo sviluppo della condotta le variazioni di pressione, di sollecitazione e di spessore individuando 36 sezioni di riferimento ritenute significative per le verifiche.

| Tr. | Tipo | Sez. | n° Virola | α | Svil. | Q | s_d | D | R_{eH} |
|-----|----------|------|-----------|----------|--------|------------|-------|------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [-] | [°] | [m] | [m.s.l.m.] | [mm] | [mm] | [N/mm ²] |
| 1 | Campata | 1 | 3 | 22.84 | 51.08 | 885.69 | 9 | 1588 | 235 |
| | Campata | 2 | 8 | 22.84 | 105.95 | 864.40 | 9 | 1550 | 235 |
| | Appoggio | 3 | 8 | 22.84 | 111.45 | 862.26 | 9 | 1550 | 235 |
| 2 | Campata | 4 | 10 | 42.90 | 133.27 | 851.68 | 9 | 1488 | 235 |
| | Campata | 5 | 14 | 42.90 | 170.20 | 826.54 | 9 | 1450 | 235 |
| | Appoggio | 6 | 14 | 42.90 | 174.97 | 823.29 | 9 | 1450 | 235 |
| | Campata | 7 | 17 | 42.90 | 198.72 | 807.13 | 10 | 1450 | 235 |
| | Appoggio | 8 | 17 | 42.90 | 203.43 | 803.92 | 10 | 1450 | 235 |
| 3 | Campata | 9 | 20 | 58.79 | 231.03 | 783.31 | 10 | 1454 | 275 |
| | Appoggio | 10 | 21 | 58.79 | 241.85 | 774.07 | 10 | 1400 | 275 |
| | Campata | 11 | 21 | 58.79 | 246.77 | 769.85 | 10 | 1400 | 275 |
| | Appoggio | 12 | 24 | 58.79 | 270.70 | 749.39 | 11 | 1400 | 275 |
| | Campata | 13 | 24 | 58.79 | 275.45 | 745.33 | 11 | 1400 | 275 |
| | Appoggio | 14 | 26 | 58.79 | 289.70 | 733.14 | 12 | 1400 | 275 |
| | Campata | 15 | 26 | 58.79 | 294.45 | 729.08 | 12 | 1400 | 275 |
| | Appoggio | 16 | 29 | 58.79 | 318.20 | 708.77 | 13 | 1400 | 275 |
| | Campata | 17 | 29 | 58.79 | 322.95 | 704.70 | 13 | 1400 | 275 |
| | Appoggio | 18 | 31 | 58.79 | 337.25 | 692.47 | 14 | 1400 | 275 |
| | Campata | 19 | 31 | 58.79 | 342.02 | 688.39 | 14 | 1400 | 275 |
| | Appoggio | 20 | 32 | 58.79 | 346.80 | 684.31 | 15 | 1400 | 275 |
| 4 | Campata | 21 | 32 | 58.79 | 352.82 | 679.15 | 15 | 1400 | 275 |
| | Campata | 22 | 34 | 31.68 | 365.71 | 670.40 | 15 | 1412 | 315 |
| | Campata | 23 | 39 | 31.68 | 422.06 | 640.80 | 14 | 1350 | 315 |
| | Appoggio | 24 | 39 | 25.62 | 423.16 | 640.32 | 14 | 1350 | 315 |
| | Appoggio | 25 | 41 | 25.62 | 455.02 | 626.55 | 15 | 1350 | 315 |
| 5 | Campata | 26 | 41 | 25.62 | 460.72 | 624.09 | 15 | 1350 | 315 |
| | Campata | 27 | 43 | 8.35 | 471.32 | 621.23 | 15 | 1364 | 315 |
| | Appoggio | 28 | 49 | 8.35 | 530.92 | 612.58 | 15 | 1300 | 315 |
| 6 | Campata | 29 | 49 | 8.35 | 536.53 | 611.76 | 15 | 1300 | 315 |
| | Campata | 30 | 49 | 11.58 | 547.13 | 609.95 | 16 | 1366 | 315 |
| | Campata | 31 | 49 | 11.58 | 563.13 | 606.73 | 16 | 1300 | 315 |
| | Appoggio | 32 | 49 | 11.58 | 567.13 | 605.93 | 16 | 1300 | 315 |

Tabella 36 Caratteristiche sezioni di verifica

Si osserva che, nelle sezioni in corrispondenza delle selle di appoggio, allo spessore nominale della condotta verrà aggiunto lo spessore della lamiera di rinforzo saldata alla parte inferiore della condotta, adottata per limitare le tensioni che si sviluppano in corrispondenza della sella, e pari a 5 mm.

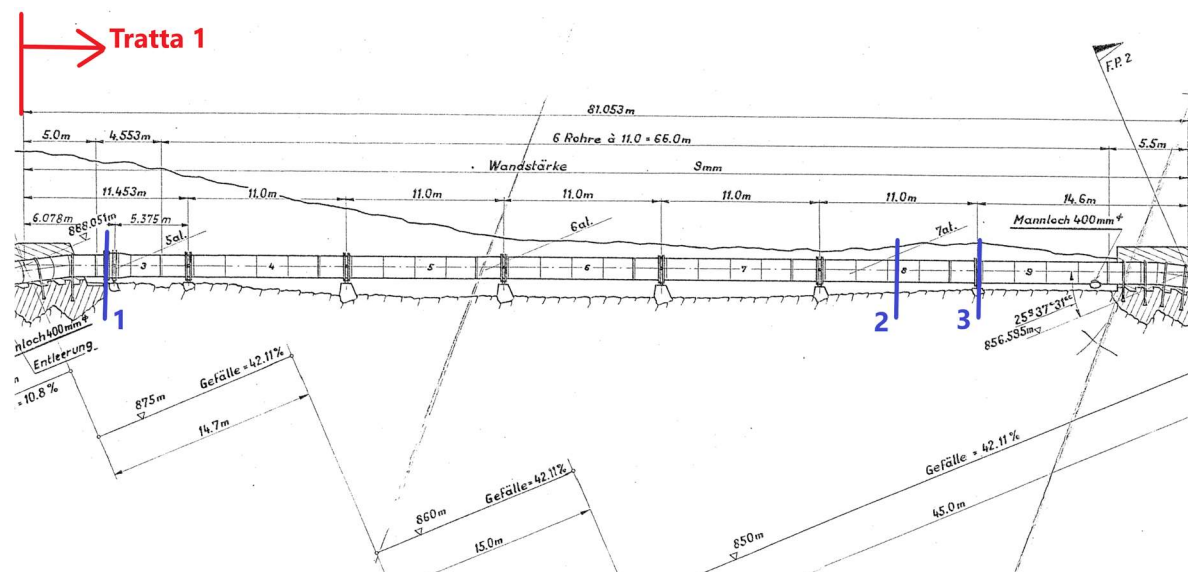


Figura 92 Sezioni di riferimento per le verifiche strutturali – Tratta 1

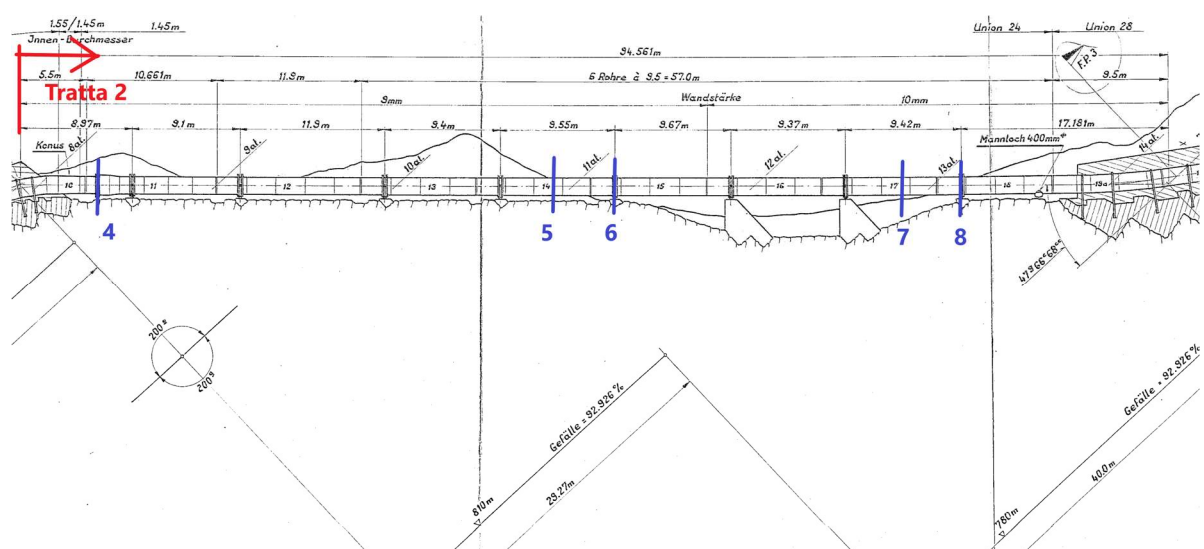


Figura 93 Sezioni di riferimento per le verifiche strutturali – Tratta 2

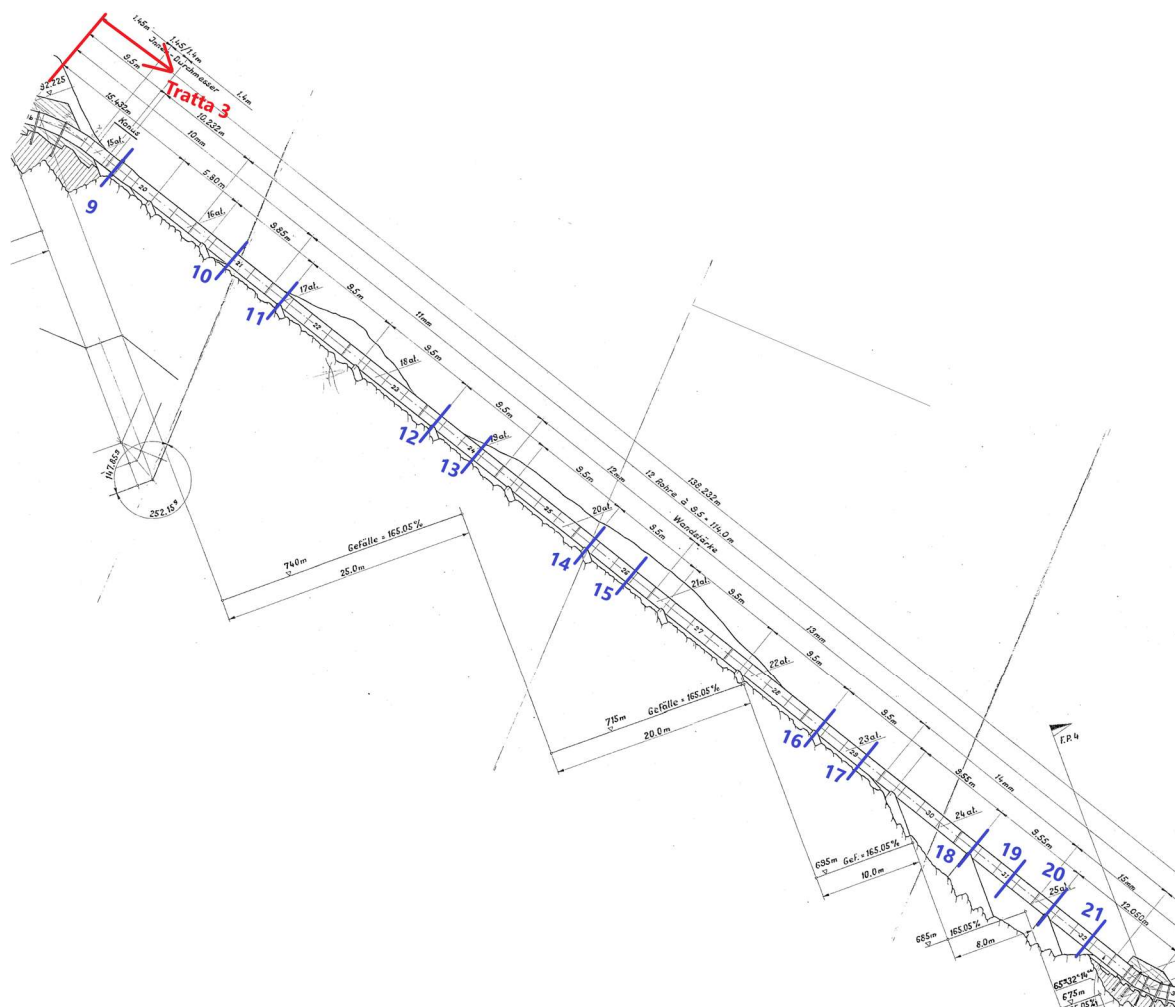


Figura 94 Sezioni di riferimento per le verifiche strutturali – Tratta 3

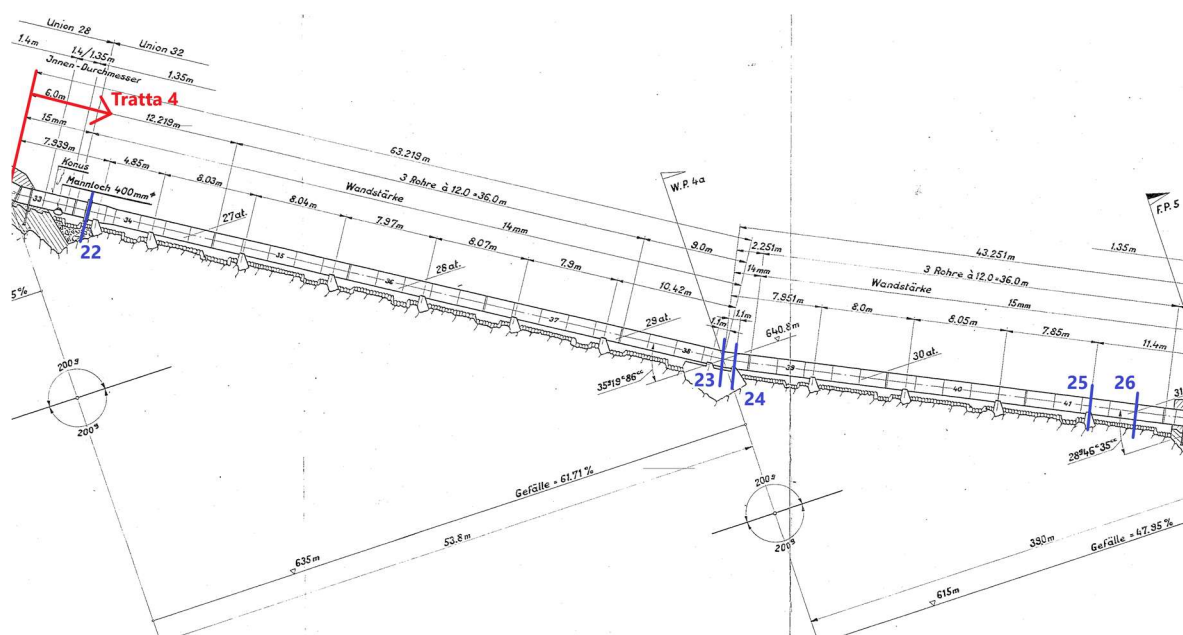


Figura 95 Sezioni di riferimento per le verifiche strutturali – Tratta 4

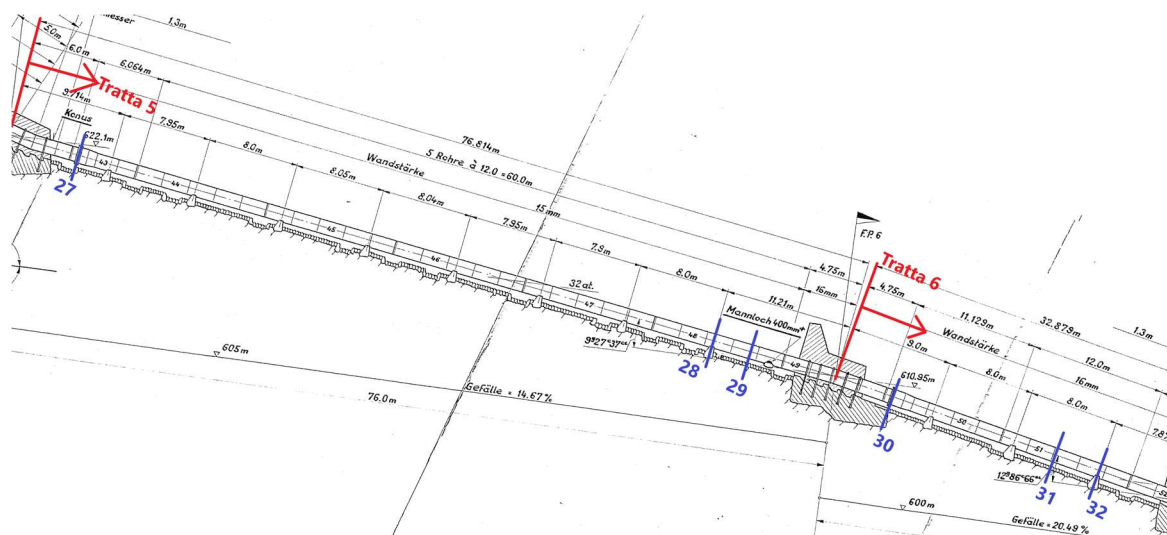


Figura 96 Sezioni di riferimento per le verifiche strutturali – Tratte 5 e 6

11.2 Condizione di carico normale

Per la condotta in oggetto, nella condizione di carico normale si considera la combinazione delle seguenti azioni:

- Pressione interna massima (considerando gli effetti dovuti al colpo d'ariete);
- Peso proprio della tubazione e dell'acqua in essa contenuta;
- Azioni derivanti dall'attrito sulle selle di appoggio;
- Spinta sulle curve e/o tratti caratterizzati da variazione repentina di pendenza;
- Azione della neve;
- Azione del vento.

Nella condizione di carico normale si adottano i seguenti coefficienti di sicurezza nella definizione delle tensioni ammissibili:

| Norma | Tensioni principali | | Tensioni da perturbazioni locali |
|-------|---|--|---|
| ASCE | $\sigma_{adm} \leq \min \left[\frac{R_{eH}}{1,5}; \frac{R_m}{2,4} \right] = S$ | | $\sigma_{adm} \leq \min[S * 1.5; R_{eH}]$ |
| CECT | $\sigma_{adm} \leq \frac{R_{eH}}{1,7}$ | | $\sigma_{adm} \leq R_{eH}$ |

Tabella 37 Fattori di sicurezza – Condizione di carico normale

Si assume inoltre un fattore di efficienza dei giunti saldati pari a $z_s = 1.00$.

11.2.1 Spinte idrauliche generate in corrispondenza dei cambi di pendenza e/o tratti in curva

La condotta in esame presenta un vertice che con continuità collega tratti della condotta stessa caratterizzati da repentine variazioni di pendenza. La diversa pendenza tra il tratto immediatamente a monte e a valle del vertice determina la generazione di una spinta idraulica diretta, approssimativamente, lungo la bisettrice dell'angolo formato tra i due tratti di condotta a monte e a valle del vertice stesso.

Le azioni sollecitanti i tratti di condotta caratterizzati da cambi di pendenza e/o tratti curvilinei vengono analizzate tramite l'equazione globale dell'equilibrio dinamico dei fluidi viscosi incompressibili:

$$G + \Pi_i + M_1 - M_2 + I - T = 0$$

dove:

- $\Pi = \gamma h_g A$ Spinta idrostatica, agente in direzione normale rispetto alle superfici premute, con verso entrante;

- $M = \beta \rho Q^2 / A$ Flusso della quantità di moto, agente in direzione normale rispetto alle superfici premute, con verso entrante;
- $I = - \frac{\partial}{\partial t} \int \rho v dW$ Risultante delle inerzie locali;
- $T = \mu \int \frac{\partial v}{\partial n} dA$ Azione di trascinamento;
- $G = \gamma V$ Peso del fluido contenuto all'interno del tratto di condotta.

In tali relazioni sono state introdotte le seguenti quantità:

- h_g Quota baricentrica della sezione esaminata rispetto al piano dei carichi idrostatici al quale viene aggiunto l'altezza idraulica determinata dal colpo di ariete;
- A Area della sezione della condotta;
- $\gamma = \rho g$ Peso specifico dell'acqua (ρ = densità);
- Q Portata del fluido;
- V Volume del tratto di condotta analizzato;
- β Coefficiente di ragguaglio dei flussi delle quantità di moto.

Nei calcoli che seguono si valutano le spinte idrauliche considerando gli incrementi di pressione dovuti agli effetti del colpo d'ariete, pertanto si assume che l'acqua all'interno della condotta stia arrestando il proprio moto. Conseguentemente, si assumono le seguenti ipotesi:

- Le inerzie locali vengono trascurate supponendo che la velocità e la densità del fluido non varino nel tempo ($I = 0$);
- Il flusso delle quantità di moto ($M = 0$) e l'azione di trascinamento ($T = 0$) vengono trascurati (poiché la velocità del fluido è nulla).

11.2.1.1 Variazione repentina di pendenza nel tratto 4

Nel tratto 4 della condotta è presente un vertice di connessione tra due tratti aventi inclinazione pari a 31.68°, a monte, e pari a 25.62°, a valle. Il tratto di condotta in cui si verifica tale cambiamento di pendenza presenta una lunghezza misurata tra agli assi delle selle di appoggio poste alle sue estremità pari a 2.20m.

Isolando il tratto di condotta tra le due selle di appoggio e scrivendo l'equazione di equilibrio globale della dinamica dei fluidi si ottiene: $G + \Pi_1 + \Pi_2 = 0$

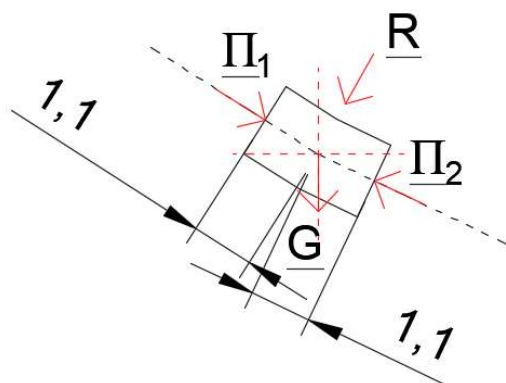


Figura 97 Geometria di calcolo del tratto caratterizzato dalla variazione repentina di pendenza

Le azioni agenti in questo tratto isolato di condotta sono pari a:

▪ **Spinta totale**

| | | | | |
|--------------------------------|----------|---|----------------|-------------------|
| (idrostatica + colpo d'ariete) | h_{g1} | = | 312.872 | m |
| | A | = | 1.431 | m ² |
| | γ | = | 9.81 | kN/m ³ |
| $(\Pi_1 = \gamma h_{g1} A)$ | Π_1 | = | 4393.33 | kN |

▪ **Spinta totale**

| | | | | |
|--------------------------------|----------|---|----------------|-------------------|
| (idrostatica + colpo d'ariete) | h_{g2} | = | 313.983 | m |
| | A | = | 1.431 | m ² |
| | γ | = | 9.81 | kN/m ³ |
| $(\Pi_2 = \gamma h_{g2} A)$ | Π_2 | = | 4408.92 | kN |

▪ **Peso proprio**

| | | | | |
|------------------|----------|---|--------------|-------------------|
| | γ | = | 9.81 | kN/m ³ |
| | A | = | 1.431 | m ² |
| | L | = | 2.20 | m |
| $(G = \gamma V)$ | G | = | 30.89 | kN |

Componendo vettorialmente tali azioni, adottando il metodo grafico "punta-coda", si ottiene un vettore risultante (**R**) inclinato di $\alpha = 61.26^\circ$ rispetto al piano orizzontale e di modulo pari a:

| | | | | |
|-------------------|----------|---|----------------|-----------|
| Risultante | R | = | 492.388 | kN |
| Comp. orizzontale | R_x | = | 236.74 | kN |
| Comp. verticale | R_z | = | 431.74 | kN |

11.2.2 Analisi tensionale

La pressione interna massima nelle sezioni di verifica risulta pari a:

| Tr. | Tipo | Sez. | α | Svil. | Progr. | Q | Q _{p.c.i.} | Q _{piezometrica} | P _{hydro} | C _A | P _{tot} |
|-----|-------|------|----------|-------|--------|------------|---------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [°] | [m] | [m] | [m.s.l.m.] | [m] | [m] | [kN/m ²] | [kN/m ²] | [kN/m ²] |
| 1 | Camp. | 1 | 22.8 | 51.1 | 50.3 | 885.69 | 945.0 | 59.3 | 581.8 | 14.6 | 596.4 |
| | Camp. | 2 | 22.8 | 106.0 | 100.9 | 864.40 | 945.0 | 80.6 | 790.7 | 29.2 | 820.0 |
| | App. | 3 | 22.8 | 111.5 | 106.0 | 862.26 | 945.0 | 82.7 | 811.7 | 30.7 | 842.4 |
| 2 | Camp. | 4 | 42.9 | 133.3 | 124.7 | 851.68 | 945.0 | 93.3 | 915.5 | 36.1 | 951.6 |
| | Camp. | 5 | 42.9 | 170.2 | 151.8 | 826.54 | 945.0 | 118.5 | 1162.0 | 44.0 | 1206.0 |
| | App. | 6 | 42.9 | 175.0 | 155.3 | 823.29 | 945.0 | 121.7 | 1193.9 | 45.0 | 1238.9 |
| | Camp. | 7 | 42.9 | 198.7 | 172.7 | 807.13 | 945.0 | 137.9 | 1352.5 | 50.0 | 1402.6 |
| | App. | 8 | 42.9 | 203.4 | 176.1 | 803.92 | 945.0 | 141.1 | 1384.0 | 51.0 | 1435.0 |
| 3 | Camp. | 9 | 58.8 | 231.0 | 194.1 | 783.31 | 945.0 | 161.7 | 1586.1 | 56.2 | 1642.4 |
| | App. | 10 | 58.8 | 241.8 | 199.7 | 774.07 | 945.0 | 170.9 | 1676.9 | 57.9 | 1734.7 |
| | Camp. | 11 | 58.8 | 246.8 | 202.2 | 769.85 | 945.0 | 175.1 | 1718.2 | 58.6 | 1776.8 |
| | App. | 12 | 58.8 | 270.7 | 214.6 | 749.39 | 945.0 | 195.6 | 1918.9 | 62.2 | 1981.1 |
| | Camp. | 13 | 58.8 | 275.4 | 217.1 | 745.33 | 945.0 | 199.7 | 1958.8 | 62.9 | 2021.7 |
| | App. | 14 | 58.8 | 289.7 | 224.5 | 733.14 | 945.0 | 211.9 | 2078.3 | 65.0 | 2143.4 |
| | Camp. | 15 | 58.8 | 294.4 | 226.9 | 729.08 | 945.0 | 215.9 | 2118.2 | 65.8 | 2183.9 |
| | App. | 16 | 58.8 | 318.2 | 239.3 | 708.77 | 945.0 | 236.2 | 2317.5 | 69.3 | 2386.8 |
| | Camp. | 17 | 58.8 | 322.9 | 241.7 | 704.70 | 945.0 | 240.3 | 2357.3 | 70.0 | 2427.3 |
| | App. | 18 | 58.8 | 337.2 | 249.1 | 692.47 | 945.0 | 252.5 | 2477.3 | 72.2 | 2549.5 |
| | Camp. | 19 | 58.8 | 342.0 | 251.6 | 688.39 | 945.0 | 256.6 | 2517.3 | 72.9 | 2590.2 |
| | App. | 20 | 58.8 | 346.8 | 254.1 | 684.31 | 945.0 | 260.7 | 2557.4 | 73.6 | 2631.0 |
| 4 | Camp. | 21 | 58.8 | 352.8 | 257.2 | 679.15 | 945.0 | 265.8 | 2608.0 | 74.5 | 2682.5 |
| | Camp. | 22 | 31.7 | 365.7 | 266.2 | 670.40 | 945.0 | 274.6 | 2693.9 | 77.1 | 2771.0 |
| | Camp. | 23 | 31.7 | 422.1 | 314.1 | 640.80 | 945.0 | 304.2 | 2984.2 | 91.0 | 3075.2 |
| | App. | 24 | 25.6 | 423.2 | 315.1 | 640.32 | 945.0 | 304.7 | 2988.9 | 91.3 | 3080.2 |
| | App. | 25 | 25.6 | 455.0 | 343.8 | 626.55 | 945.0 | 318.4 | 3124.0 | 99.6 | 3223.6 |
| | Camp. | 26 | 25.6 | 460.7 | 349.0 | 624.09 | 945.0 | 320.9 | 3148.1 | 101.1 | 3249.3 |
| 5 | Camp. | 27 | 8.3 | 471.3 | 359.1 | 621.23 | 945.0 | 323.8 | 3176.2 | 104.0 | 3280.2 |
| | App. | 28 | 8.3 | 530.9 | 418.0 | 612.58 | 945.0 | 332.4 | 3261.1 | 121.1 | 3382.2 |
| | Camp. | 29 | 8.3 | 536.5 | 423.6 | 611.76 | 945.0 | 333.2 | 3269.0 | 122.7 | 3391.8 |
| 6 | Camp. | 30 | 11.6 | 547.1 | 434.0 | 609.95 | 945.0 | 335.1 | 3286.9 | 125.8 | 3412.6 |
| | Camp. | 31 | 11.6 | 563.1 | 449.7 | 606.73 | 945.0 | 338.3 | 3318.4 | 130.3 | 3448.7 |
| | App. | 32 | 11.6 | 567.1 | 453.6 | 605.93 | 945.0 | 339.1 | 3326.3 | 131.4 | 3457.7 |

Tabella 38 Pressione interna massima (idrostatica + colpo d'ariete)

Le tensioni circonferenziali dovute alla pressione interna sono date dalla formula di Mariotte:

$$\sigma_{c,1} = (p D) / (2 s) ; \sigma_{c,1d} = \sigma_{c,1} / z_s$$

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | Q | s | D | P _{tot} | $\sigma_{c,1}$ | z _s | $\sigma_{c,1} / z_s$ |
|-----|-------|------|-------|------------|------|------|----------------------|----------------------|----------------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [m.s.l.m.] | [mm] | [mm] | [kN/m ²] | [N/mm ²] | [-] | [N/mm ²] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 885.7 | 9 | 1588 | 596.4 | 52.61 | 1.00 | 52.61 |
| | Camp. | 2 | 106.0 | 864.4 | 9 | 1550 | 820.0 | 70.61 | 1.00 | 70.61 |
| | App. | 3 | 111.5 | 862.3 | 9 | 1550 | 842.4 | 72.54 | 1.00 | 72.54 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 851.7 | 9 | 1488 | 951.6 | 78.67 | 1.00 | 78.67 |
| | Camp. | 5 | 170.2 | 826.5 | 9 | 1450 | 1206.0 | 97.15 | 1.00 | 97.15 |
| | App. | 6 | 175.0 | 823.3 | 9 | 1450 | 1238.9 | 99.80 | 1.00 | 99.80 |
| | Camp. | 7 | 198.7 | 807.1 | 10 | 1450 | 1402.6 | 101.69 | 1.00 | 101.69 |
| | App. | 8 | 203.4 | 803.9 | 10 | 1450 | 1435.0 | 104.04 | 1.00 | 104.04 |
| 3 | Camp. | 9 | 231.0 | 783.3 | 10 | 1454 | 1642.4 | 119.40 | 1.00 | 119.40 |
| | App. | 10 | 241.8 | 774.1 | 10 | 1400 | 1734.7 | 121.43 | 1.00 | 121.43 |
| | Camp. | 11 | 246.8 | 769.9 | 10 | 1400 | 1776.8 | 124.37 | 1.00 | 124.37 |
| | App. | 12 | 270.7 | 749.4 | 11 | 1400 | 1981.1 | 126.07 | 1.00 | 126.07 |
| | Camp. | 13 | 275.4 | 745.3 | 11 | 1400 | 2021.7 | 128.65 | 1.00 | 128.65 |
| | App. | 14 | 289.7 | 733.1 | 12 | 1400 | 2143.4 | 125.03 | 1.00 | 125.03 |
| | Camp. | 15 | 294.4 | 729.1 | 12 | 1400 | 2183.9 | 127.40 | 1.00 | 127.40 |
| | App. | 16 | 318.2 | 708.8 | 13 | 1400 | 2386.8 | 128.52 | 1.00 | 128.52 |
| | Camp. | 17 | 322.9 | 704.7 | 13 | 1400 | 2427.3 | 130.70 | 1.00 | 130.70 |
| | App. | 18 | 337.2 | 692.5 | 14 | 1400 | 2549.5 | 127.47 | 1.00 | 127.47 |
| | Camp. | 19 | 342.0 | 688.4 | 14 | 1400 | 2590.2 | 129.51 | 1.00 | 129.51 |
| | App. | 20 | 346.8 | 684.3 | 15 | 1400 | 2631.0 | 122.78 | 1.00 | 122.78 |
| 4 | Camp. | 21 | 352.8 | 679.2 | 15 | 1400 | 2682.5 | 125.18 | 1.00 | 125.18 |
| | Camp. | 22 | 365.7 | 670.4 | 15 | 1412 | 2771.0 | 130.42 | 1.00 | 130.42 |
| | Camp. | 23 | 422.1 | 640.8 | 14 | 1350 | 3075.2 | 148.27 | 1.00 | 148.27 |
| | App. | 24 | 423.2 | 640.3 | 14 | 1350 | 3080.2 | 148.51 | 1.00 | 148.51 |
| | App. | 25 | 455.0 | 626.6 | 15 | 1350 | 3223.6 | 145.06 | 1.00 | 145.06 |
| 5 | Camp. | 26 | 460.7 | 624.1 | 15 | 1350 | 3249.3 | 146.22 | 1.00 | 146.22 |
| | Camp. | 27 | 471.3 | 621.2 | 15 | 1364 | 3280.2 | 149.14 | 1.00 | 149.14 |
| | App. | 28 | 530.9 | 612.6 | 15 | 1300 | 3382.2 | 146.56 | 1.00 | 146.56 |
| 6 | Camp. | 29 | 536.5 | 611.8 | 15 | 1300 | 3391.8 | 146.98 | 1.00 | 146.98 |
| | Camp. | 30 | 547.1 | 609.9 | 16 | 1366 | 3412.6 | 145.68 | 1.00 | 145.68 |
| | Camp. | 31 | 563.1 | 606.7 | 16 | 1300 | 3448.7 | 140.10 | 1.00 | 140.10 |
| | App. | 32 | 567.1 | 605.9 | 16 | 1300 | 3457.7 | 140.47 | 1.00 | 140.47 |

Tabella 39 Tensioni circonferenziali – Pressione interna massima (idrostatica + colpo d'ariete)

Le tensioni circonferenziali determinate dall'ovalizzazione della condotta vengono valutate come segue: $\sigma_{c2} = M / W$.

La tensione circonferenziale dovuta alla flessione della condotta viene poi ridotta in accordo alla teoria di Lazard, per effetto della pressione interna alla condotta:

$$\sigma'_{c2} = \alpha \sigma_{c2} / Z_s = 1 / (1 + (p r^3) / (3 E s^3/12)) \sigma_{c2} / Z_s$$

Il calcolo dei momenti d'ovalizzazione viene eseguito considerando la condotta vuota sottoposta al peso proprio ($M_A = 0.5gr^2$, $M_{CD} = -0.57gr^2$, $M_B = 1.5gr^2$, secondo Figura 10).

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | Q | s | D | g | r | M _{g,A} | M _{g,CD} | M _{g,B} | W |
|-----|-------|------|-------|------------|------|------|----------------------|-------|------------------|-------------------|------------------|--------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [m.s.l.m.] | [mm] | [mm] | [kg/m ²] | [m] | [kgm/m] | [kgm/m] | [kgm/m] | [cm ³] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 885.7 | 9 | 1588 | 70.65 | 0.799 | 22.52 | -25.68 | 67.57 | 13.50 |
| | Camp. | 2 | 106.0 | 864.4 | 9 | 1550 | 70.65 | 0.780 | 21.46 | -24.47 | 64.39 | 13.50 |
| | App. | 3 | 111.5 | 862.3 | 9 | 1550 | 70.65 | 0.780 | 21.46 | -24.47 | 64.39 | 13.50 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 851.7 | 9 | 1488 | 70.65 | 0.749 | 19.79 | -22.56 | 59.37 | 13.50 |
| | Camp. | 5 | 170.2 | 826.5 | 9 | 1450 | 70.65 | 0.730 | 18.80 | -21.43 | 56.40 | 13.50 |
| | App. | 6 | 175.0 | 823.3 | 9 | 1450 | 70.65 | 0.730 | 18.80 | -21.43 | 56.40 | 13.50 |
| | Camp. | 7 | 198.7 | 807.1 | 10 | 1450 | 78.50 | 0.730 | 20.92 | -23.84 | 62.75 | 16.67 |
| 3 | App. | 8 | 203.4 | 803.9 | 10 | 1450 | 78.50 | 0.730 | 20.92 | -23.84 | 62.75 | 16.67 |
| | Camp. | 9 | 231.0 | 783.3 | 10 | 1454 | 78.50 | 0.732 | 21.03 | -23.98 | 63.09 | 16.67 |
| | App. | 10 | 241.8 | 774.1 | 10 | 1400 | 78.50 | 0.705 | 19.51 | -22.24 | 58.52 | 16.67 |
| | Camp. | 11 | 246.8 | 769.9 | 10 | 1400 | 78.50 | 0.705 | 19.51 | -22.24 | 58.52 | 16.67 |
| | App. | 12 | 270.7 | 749.4 | 11 | 1400 | 86.35 | 0.706 | 21.49 | -24.50 | 64.47 | 20.17 |
| | Camp. | 13 | 275.4 | 745.3 | 11 | 1400 | 86.35 | 0.706 | 21.49 | -24.50 | 64.47 | 20.17 |
| | App. | 14 | 289.7 | 733.1 | 12 | 1400 | 94.20 | 0.706 | 23.48 | -26.76 | 70.43 | 24.00 |
| | Camp. | 15 | 294.4 | 729.1 | 12 | 1400 | 94.20 | 0.706 | 23.48 | -26.76 | 70.43 | 24.00 |
| | App. | 16 | 318.2 | 708.8 | 13 | 1400 | 102.05 | 0.707 | 25.47 | -29.03 | 76.41 | 28.17 |
| | Camp. | 17 | 322.9 | 704.7 | 13 | 1400 | 102.05 | 0.707 | 25.47 | -29.03 | 76.41 | 28.17 |
| | App. | 18 | 337.2 | 692.5 | 14 | 1400 | 109.90 | 0.707 | 27.47 | -31.31 | 82.40 | 32.67 |
| | Camp. | 19 | 342.0 | 688.4 | 14 | 1400 | 109.90 | 0.707 | 27.47 | -31.31 | 82.40 | 32.67 |
| 4 | App. | 20 | 346.8 | 684.3 | 15 | 1400 | 117.75 | 0.708 | 29.47 | -33.60 | 88.41 | 37.50 |
| | Camp. | 21 | 352.8 | 679.2 | 15 | 1400 | 117.75 | 0.708 | 29.47 | -33.60 | 88.41 | 37.50 |
| | Camp. | 22 | 365.7 | 670.4 | 15 | 1412 | 117.75 | 0.714 | 29.97 | -34.17 | 89.92 | 37.50 |
| | Camp. | 23 | 422.1 | 640.8 | 14 | 1350 | 109.90 | 0.682 | 25.56 | -29.14 | 76.68 | 32.67 |
| | App. | 24 | 423.2 | 640.3 | 14 | 1350 | 109.90 | 0.682 | 25.56 | -29.14 | 76.68 | 32.67 |
| 5 | App. | 25 | 455.0 | 626.6 | 15 | 1350 | 117.75 | 0.683 | 27.42 | -31.26 | 82.27 | 37.50 |
| | Camp. | 26 | 460.7 | 624.1 | 15 | 1350 | 117.75 | 0.683 | 27.42 | -31.26 | 82.27 | 37.50 |
| | Camp. | 27 | 471.3 | 621.2 | 15 | 1364 | 117.75 | 0.690 | 27.99 | -31.91 | 83.97 | 37.50 |
| | App. | 28 | 530.9 | 612.6 | 15 | 1300 | 117.75 | 0.658 | 25.45 | -29.02 | 76.36 | 37.50 |
| | Camp. | 29 | 536.5 | 611.8 | 15 | 1300 | 117.75 | 0.658 | 25.45 | -29.02 | 76.36 | 37.50 |
| 6 | Camp. | 30 | 547.1 | 609.9 | 16 | 1366 | 125.60 | 0.691 | 29.99 | -34.18 | 89.96 | 42.67 |
| | Camp. | 31 | 563.1 | 606.7 | 16 | 1300 | 125.60 | 0.658 | 27.19 | -31.00 | 81.57 | 42.67 |
| | App. | 32 | 567.1 | 605.9 | 16 | 1300 | 125.60 | 0.658 | 27.19 | -31.00 | 81.57 | 42.67 |

Tabella 40 Momenti di ovalizzazione dovuti al peso proprio

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | $\sigma_{C,GA}$ | $\sigma_{C,GCD}$ | $\sigma_{C,GB}$ | α | z_s | $\sigma''_{C,GA}$ | $\sigma''_{C,GCD}$ | $\sigma''_{C,GB}$ |
|-----|-------|------|-------|------|------|-----------------|------------------|-----------------|----------|-------|-------------------|--------------------|-------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [-] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 9 | 1588 | 16.37 | -18.66 | 49.10 | 0.11 | 1.00 | 1.83 | -2.09 | 5.50 |
| | Camp. | 2 | 106.0 | 9 | 1550 | 15.60 | -17.78 | 46.79 | 0.09 | 1.00 | 1.40 | -1.60 | 4.20 |
| | App. | 3 | 111.5 | 9 | 1550 | 15.60 | -17.78 | 46.79 | 0.09 | 1.00 | 1.37 | -1.56 | 4.10 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1488 | 14.38 | -16.39 | 43.14 | 0.09 | 1.00 | 1.26 | -1.43 | 3.78 |
| | Camp. | 5 | 170.2 | 9 | 1450 | 13.66 | -15.57 | 40.98 | 0.08 | 1.00 | 1.03 | -1.18 | 3.10 |
| | App. | 6 | 175.0 | 9 | 1450 | 13.66 | -15.57 | 40.98 | 0.07 | 1.00 | 1.01 | -1.15 | 3.02 |
| | Camp. | 7 | 198.7 | 10 | 1450 | 12.31 | -14.03 | 36.93 | 0.09 | 1.00 | 1.08 | -1.23 | 3.24 |
| | App. | 8 | 203.4 | 10 | 1450 | 12.31 | -14.03 | 36.93 | 0.09 | 1.00 | 1.06 | -1.21 | 3.17 |
| 3 | Camp. | 9 | 231.0 | 10 | 1454 | 12.38 | -14.11 | 37.14 | 0.08 | 1.00 | 0.93 | -1.06 | 2.80 |
| | App. | 10 | 241.8 | 10 | 1400 | 11.48 | -13.09 | 34.45 | 0.08 | 1.00 | 0.91 | -1.04 | 2.74 |
| | Camp. | 11 | 246.8 | 10 | 1400 | 11.48 | -13.09 | 34.45 | 0.08 | 1.00 | 0.89 | -1.02 | 2.68 |
| | App. | 12 | 270.7 | 11 | 1400 | 10.45 | -11.92 | 31.36 | 0.09 | 1.00 | 0.95 | -1.09 | 2.86 |
| | Camp. | 13 | 275.4 | 11 | 1400 | 10.45 | -11.92 | 31.36 | 0.09 | 1.00 | 0.94 | -1.07 | 2.81 |
| | App. | 14 | 289.7 | 12 | 1400 | 9.60 | -10.94 | 28.79 | 0.11 | 1.00 | 1.03 | -1.17 | 3.09 |
| | Camp. | 15 | 294.4 | 12 | 1400 | 9.60 | -10.94 | 28.79 | 0.11 | 1.00 | 1.01 | -1.15 | 3.04 |
| | App. | 16 | 318.2 | 13 | 1400 | 8.87 | -10.11 | 26.61 | 0.12 | 1.00 | 1.07 | -1.22 | 3.21 |
| | Camp. | 17 | 322.9 | 13 | 1400 | 8.87 | -10.11 | 26.61 | 0.12 | 1.00 | 1.05 | -1.20 | 3.16 |
| | App. | 18 | 337.2 | 14 | 1400 | 8.25 | -9.40 | 24.75 | 0.14 | 1.00 | 1.14 | -1.30 | 3.41 |
| | Camp. | 19 | 342.0 | 14 | 1400 | 8.25 | -9.40 | 24.75 | 0.14 | 1.00 | 1.12 | -1.28 | 3.36 |
| | App. | 20 | 346.8 | 15 | 1400 | 7.71 | -8.79 | 23.13 | 0.16 | 1.00 | 1.23 | -1.40 | 3.70 |
| 4 | Camp. | 21 | 352.8 | 15 | 1400 | 7.71 | -8.79 | 23.13 | 0.16 | 1.00 | 1.21 | -1.38 | 3.64 |
| | Camp. | 22 | 365.7 | 15 | 1412 | 7.84 | -8.94 | 23.52 | 0.15 | 1.00 | 1.17 | -1.34 | 3.52 |
| | Camp. | 23 | 422.1 | 14 | 1350 | 7.68 | -8.75 | 23.03 | 0.13 | 1.00 | 0.99 | -1.13 | 2.96 |
| | App. | 24 | 423.2 | 14 | 1350 | 7.68 | -8.75 | 23.03 | 0.13 | 1.00 | 0.99 | -1.12 | 2.96 |
| | Camp. | 25 | 455.0 | 15 | 1350 | 7.17 | -8.18 | 21.52 | 0.15 | 1.00 | 1.06 | -1.21 | 3.17 |
| 5 | Camp. | 26 | 460.7 | 15 | 1350 | 7.17 | -8.18 | 21.52 | 0.15 | 1.00 | 1.05 | -1.20 | 3.15 |
| | Camp. | 27 | 471.3 | 15 | 1364 | 7.32 | -8.35 | 21.97 | 0.14 | 1.00 | 1.04 | -1.18 | 3.11 |
| | App. | 28 | 530.9 | 15 | 1300 | 6.66 | -7.59 | 19.97 | 0.16 | 1.00 | 1.04 | -1.18 | 3.11 |
| 6 | Camp. | 29 | 536.5 | 15 | 1300 | 6.66 | -7.59 | 19.97 | 0.16 | 1.00 | 1.03 | -1.18 | 3.10 |
| | Camp. | 30 | 547.1 | 16 | 1366 | 6.89 | -7.86 | 20.68 | 0.16 | 1.00 | 1.11 | -1.26 | 3.32 |
| | App. | 31 | 563.1 | 16 | 1300 | 6.25 | -7.13 | 18.75 | 0.18 | 1.00 | 1.12 | -1.28 | 3.37 |
| | | 32 | 567.1 | 16 | 1300 | 6.25 | -7.13 | 18.75 | 0.18 | 1.00 | 1.12 | -1.28 | 3.36 |

Tabella 41 Tensioni circonferenziali determinate dai momenti di ovalizzazione dovuti al peso proprio

Nel tratto tra FP1 e FP3, in cui la condotta è vincolata ai supporti tramite travi ad anello, la tensione circonferenziale è valutata tramite la sovrapposizione degli effetti del momento flettente e dell'azione normale agenti in corrispondenza dell'appoggio:

$$\sigma_{c,3an} = \sigma_{c,3N} + \sigma_{c,3M} = \frac{N_{(\vartheta)}}{A} + \frac{M_{(\vartheta)}V}{J}$$

Nei calcoli, si valuteranno tali tensioni considerando un angolo ϑ pari a 180° , il quale individua l'estremo inferiore della condotta; inoltre, si suppone che la distanza tra il punto di applicazione della reazione all'appoggio e l'asse neutro dell'assieme anelli di rinforzo-camicia sia nulla ($X=0$).

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | Q | s | D | P_{t+w} | Q_s | L | ϑ | K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | $\cos\alpha$ |
|-----|-------|------|-------|------------|------|------|-----------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|--------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [m.s.l.m.] | [mm] | [mm] | [kN] | [kN] | [mm] | [°] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 885.7 | 9 | 1588 | \ | \ | 11330 | 180 | 0.24 | -0.32 | -0.01 | 0.07 | 0.92 |
| | Camp. | 2 | 106.0 | 864.4 | 9 | 1550 | \ | \ | 11000 | 180 | 0.24 | -0.32 | -0.01 | 0.07 | 0.92 |
| | App. | 3 | 111.5 | 862.3 | 9 | 1550 | 260.8 | 40.4 | 11000 | 180 | 0.24 | -0.32 | -0.01 | 0.07 | 0.92 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 851.7 | 9 | 1488 | \ | \ | 8966 | 180 | 0.24 | -0.32 | -0.01 | 0.07 | 0.73 |
| | Camp. | 5 | 170.2 | 826.5 | 9 | 1450 | \ | \ | 9059 | 180 | 0.24 | -0.32 | -0.01 | 0.07 | 0.73 |
| | App. | 6 | 175.0 | 823.3 | 9 | 1450 | 120.4 | 21.9 | 9059 | 180 | 0.24 | -0.32 | -0.01 | 0.07 | 0.73 |
| | Camp. | 7 | 198.7 | 807.1 | 10 | 1450 | \ | \ | 9618 | 180 | 0.24 | -0.32 | -0.01 | 0.07 | 0.73 |
| | App. | 8 | 203.4 | 803.9 | 10 | 1450 | 134.5 | 36.3 | 9618 | 180 | 0.24 | -0.32 | -0.01 | 0.07 | 0.73 |

Tabella 42 Tensioni circonferenziali in corrispondenza degli ancoraggi metallici – Geometrie

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | i_a | s_a | L_a | n_a | $L_{i,d}$ | S_m | A_{tot} | R | J_m | J_{1-1} | V_{1-1} | V_{2-2} | W_{sup} | W_{inf} |
|-----|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|-----------|-----------|--------------------|--------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [mm] | [-] | [mm] | [mm ³] | [mm ²] | [mm] | [mm ⁴] | [mm ⁴] | [mm] | [mm] | [mm ³] | [mm ³] |
| 1 | Camp. | 1 | 51 | 330 | 120 | 30 | 2 | 523 | 1E+07 | 1E+04 | 8E+02 | 8E+09 | 2E+07 | 43.5 | 85.5 | 2E+05 | 5E+05 |
| | Camp. | 2 | 106 | 330 | 120 | 30 | 2 | 521 | 1E+07 | 1E+04 | 8E+02 | 8E+09 | 2E+07 | 43.6 | 85.4 | 2E+05 | 5E+05 |
| | App. | 3 | 111 | 330 | 120 | 30 | 2 | 521 | 1E+07 | 1E+04 | 8E+02 | 8E+09 | 2E+07 | 43.6 | 85.4 | 2E+05 | 5E+05 |
| 2 | Camp. | 4 | 133 | 330 | 120 | 30 | 2 | 518 | 9E+06 | 1E+04 | 8E+02 | 7E+09 | 2E+07 | 43.6 | 85.4 | 2E+05 | 5E+05 |
| | Camp. | 5 | 170 | 330 | 120 | 30 | 2 | 517 | 9E+06 | 1E+04 | 8E+02 | 7E+09 | 2E+07 | 43.7 | 85.3 | 2E+05 | 5E+05 |
| | App. | 6 | 175 | 330 | 120 | 30 | 2 | 517 | 9E+06 | 1E+04 | 8E+02 | 7E+09 | 2E+07 | 43.7 | 85.3 | 2E+05 | 5E+05 |
| | Camp. | 7 | 199 | 330 | 120 | 30 | 2 | 524 | 1E+07 | 1E+04 | 8E+02 | 7E+09 | 2E+07 | 42.6 | 87.4 | 2E+05 | 5E+05 |
| | App. | 8 | 203 | 330 | 120 | 30 | 2 | 524 | 1E+07 | 1E+04 | 8E+02 | 7E+09 | 2E+07 | 42.6 | 87.4 | 2E+05 | 5E+05 |

Tabella 43 Tensioni circonferenziali in corrispondenza degli ancoraggi metallici – Azioni

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | X | u | r | β | K | B | $\sigma_{c,M}$ | $\sigma_{c,N}$ | $\sigma_{c,3an}$ | z_s | $\sigma_{c,3an}/z_s$ |
|-----|-------|------|-------|------|-----|------|---------|------|------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [-] | [mm] | [-] | [-] | [-] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [N/mm ²] | [-] | [N/mm ²] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 0 | 0.3 | 803 | 0.02 | \ | \ | \ | \ | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | Camp. | 2 | 106.0 | 0 | 0.3 | 784 | 0.02 | \ | \ | \ | \ | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 3 | 111.5 | 0 | 0.3 | 784 | 0.02 | 0.46 | 0.88 | -4.71 | -0.87 | -5.58 | 1.00 | -5.58 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 0 | 0.3 | 753 | 0.02 | \ | \ | \ | \ | 0.00 | 1 | 0.00 |
| | Camp. | 5 | 170.2 | 0 | 0.3 | 734 | 0.02 | \ | \ | \ | \ | 0.00 | 1 | 0.00 |
| | App. | 6 | 175.0 | 0 | 0.3 | 734 | 0.02 | 0.43 | 0.88 | -1.63 | -0.32 | -1.95 | 1 | -1.95 |
| | Camp. | 7 | 198.7 | 0 | 0.3 | 735 | 0.01 | \ | \ | \ | \ | 0.00 | 1 | 0.00 |
| | App. | 8 | 203.4 | 0 | 0.3 | 735 | 0.01 | 0.44 | 0.88 | -1.69 | -0.33 | -2.02 | 1 | -2.02 |

Tabella 44 Tensioni circonferenziali in corrispondenza degli ancoraggi metallici – Tensioni interne

Nelle tratte a valle del vertice FP3, la condotta è vincolata tramite selle di ancoraggio in calcestruzzo. Nelle sezioni in corrispondenza delle selle di appoggio il momento flettente radiale (M) viene valutato come segue:

$$M = c \cdot P_{t+w} \cdot R_i$$

Nei calcoli, cautelativamente, si assumerà il valore massimo del coefficiente $c = 0.082$, per un angolo $\beta = 135^\circ$ ed un angolo $\vartheta = 135^\circ$. Le tensioni circonferenziali risultanti si calcolano con la formula seguente:

$$\sigma_{c3,s} = \frac{M}{0.8L} \frac{6}{s^2} \cos\alpha$$

In questo caso, gli spessori in corrispondenza dell'appoggio sono stati aumentati di 5 mm per tenere conto dei rinforzi saldati sulla condotta.

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | Q | s | D | P _{t+w} | L | c | cosα | σ _{c3s} | z _s | σ _{c3s} / z _s |
|-----|-------|------|-------|------------|------|------|------------------|-------|-------|------|----------------------|----------------|-----------------------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [m.s.l.m.] | [mm] | [mm] | [kN] | [mm] | [-] | [-] | [N/mm ²] | [-] | [N/mm ²] |
| 3 | Camp. | 9 | 231.0 | 783.3 | 10 | 1454 | \ | 14990 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 10 | 241.8 | 774.1 | 15 | 1400 | 57.9 | 6272 | 0.082 | 0.52 | 9.15 | 1.00 | 9.15 |
| | Camp. | 11 | 246.8 | 769.9 | 10 | 1400 | \ | 6272 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 12 | 270.7 | 749.4 | 16 | 1400 | 93.4 | 9545 | 0.082 | 0.52 | 8.52 | 1.00 | 8.52 |
| | Camp. | 13 | 275.4 | 745.3 | 11 | 1400 | \ | 9545 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 14 | 289.7 | 733.1 | 17 | 1400 | 94.6 | 9484 | 0.082 | 0.52 | 7.70 | 1.00 | 7.70 |
| | Camp. | 15 | 294.4 | 729.1 | 12 | 1400 | \ | 9484 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 16 | 318.2 | 708.8 | 18 | 1400 | 96.5 | 9499 | 0.082 | 0.52 | 7.00 | 1.00 | 7.00 |
| | Camp. | 17 | 322.9 | 704.7 | 13 | 1400 | \ | 9499 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 18 | 337.2 | 692.5 | 19 | 1400 | 94.9 | 9584 | 0.082 | 0.52 | 6.12 | 1.00 | 6.12 |
| | Camp. | 19 | 342.0 | 688.4 | 14 | 1400 | \ | 9584 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 20 | 346.8 | 684.3 | 20 | 1400 | 113.8 | 9655 | 0.082 | 0.52 | 6.57 | 1.00 | 6.57 |
| | Camp. | 21 | 352.8 | 679.2 | 15 | 1400 | \ | 9655 | 0.082 | 0.52 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| 4 | Camp. | 22 | 365.7 | 670.4 | 15 | 1412 | \ | 8446 | 0.082 | 0.85 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | Camp. | 23 | 422.1 | 640.8 | 14 | 1350 | \ | 7875 | 0.082 | 0.85 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 24 | 423.2 | 640.3 | 19 | 1350 | 320.7 | 7875 | 0.082 | 0.9 | 42.22 | 1.00 | 42.22 |
| | App. | 25 | 455.0 | 626.6 | 20 | 1350 | 167.4 | 8005 | 0.082 | 0.9 | 19.57 | 1.00 | 19.57 |
| | Camp. | 26 | 460.7 | 624.1 | 15 | 1350 | \ | 8005 | 0.082 | 0.9 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| 5 | Camp. | 27 | 471.3 | 621.2 | 15 | 1364 | \ | 9396 | 0.082 | 0.99 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 28 | 530.9 | 612.6 | 20 | 1300 | 168.5 | 8036 | 0.082 | 0.99 | 20.74 | 1.00 | 20.74 |
| | Camp. | 29 | 536.5 | 611.8 | 15 | 1300 | \ | 8036 | 0.082 | 0.99 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| 6 | Camp. | 30 | 547.1 | 609.9 | 16 | 1366 | \ | 9096 | 0.082 | 0.98 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | Camp. | 31 | 563.1 | 606.7 | 16 | 1300 | \ | 7911 | 0.082 | 0.98 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 32 | 567.1 | 605.9 | 21 | 1300 | 141.5 | 7911 | 0.082 | 0.98 | 15.89 | 1.00 | 15.89 |

Tabella 45 Tensioni circonferenziali in corrispondenza delle selle di appoggio

Si valutano le tensioni longitudinali determinate dall'effetto del peso strutturale della condotta e dal peso dell'acqua contenuto nella condotta: $\sigma_{L1,t+w} = \pm (M y / J) / z_s$; $\sigma_{L2,t+w} = (N / A) / z_s$.

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | N | M | y | A | J | z _s | σ_{L1}^+ | σ_{L1}^- | σ_{L2} |
|-----|-------|------|-------|------|------|--------|--------|-------|-------------------|-------------------|----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [kN] | [kNm] | [m] | [m ²] | [m ⁴] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 9 | 1588 | 0.0 | 108.9 | 0.799 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 6.04 | -6.04 | 0.00 |
| | Camp. | 2 | 106.0 | 9 | 1550 | -72.2 | 69.1 | 0.780 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 4.02 | -4.02 | -1.64 |
| | App. | 3 | 111.5 | 9 | 1550 | -79.4 | -287.4 | 0.780 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 16.73 | -16.73 | -1.80 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1488 | 0.0 | 44.3 | 0.749 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 2.79 | -2.79 | 0.00 |
| | Camp. | 5 | 170.2 | 9 | 1450 | -83.5 | 54.5 | 0.730 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 3.62 | -3.62 | -2.02 |
| | App. | 6 | 175.0 | 9 | 1450 | -93.6 | -106.3 | 0.730 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 7.06 | -7.06 | -2.27 |
| | Camp. | 7 | 198.7 | 10 | 1450 | -149.2 | -2.5 | 0.730 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.15 | -0.15 | -3.25 |
| | App. | 8 | 203.4 | 10 | 1450 | -160.6 | -255.1 | 0.730 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 15.23 | -15.23 | -3.50 |
| 3 | Camp. | 9 | 231.0 | 10 | 1454 | 0.0 | 96.2 | 0.732 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 5.72 | -5.72 | 0.00 |
| | App. | 10 | 241.8 | 10 | 1400 | -34.4 | -39.5 | 0.705 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 2.53 | -2.53 | -0.78 |
| | Camp. | 11 | 246.8 | 10 | 1400 | -48.3 | 48.2 | 0.705 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 3.09 | -3.09 | -1.09 |
| | App. | 12 | 270.7 | 11 | 1400 | -124.0 | -74.3 | 0.706 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 4.32 | -4.32 | -2.54 |
| | Camp. | 13 | 275.4 | 11 | 1400 | -139.4 | 37.4 | 0.706 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 2.18 | -2.18 | -2.86 |
| | App. | 14 | 289.7 | 12 | 1400 | -188.7 | -74.9 | 0.706 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 3.99 | -3.99 | -3.55 |
| | Camp. | 15 | 294.4 | 12 | 1400 | -205.5 | 38.2 | 0.706 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 2.03 | -2.03 | -3.86 |
| | App. | 16 | 318.2 | 13 | 1400 | -296.0 | -76.6 | 0.707 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 3.76 | -3.76 | -5.13 |
| | Camp. | 17 | 322.9 | 13 | 1400 | -313.9 | 35.8 | 0.707 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 1.76 | -1.76 | -5.44 |
| | App. | 18 | 337.2 | 14 | 1400 | -371.3 | -73.5 | 0.707 | 0.06 | 0.02 | 1.00 | 3.34 | -3.34 | -5.97 |
| | Camp. | 19 | 342.0 | 14 | 1400 | -390.9 | 31.9 | 0.707 | 0.06 | 0.02 | 1.00 | 1.45 | -1.45 | -6.28 |
| | App. | 20 | 346.8 | 15 | 1400 | -411.5 | -104.0 | 0.708 | 0.07 | 0.02 | 1.00 | 4.41 | -4.41 | -6.17 |
| 4 | Camp. | 21 | 352.8 | 15 | 1400 | -437.7 | 67.7 | 0.708 | 0.07 | 0.02 | 1.00 | 2.87 | -2.87 | -6.56 |
| | Camp. | 22 | 365.7 | 15 | 1412 | 0.0 | 100.0 | 0.714 | 0.07 | 0.02 | 1.00 | 4.17 | -4.17 | 0.00 |
| | Camp. | 23 | 422.1 | 14 | 1350 | -141.7 | 159.6 | 0.682 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 7.80 | -7.80 | -2.36 |
| | App. | 24 | 423.2 | 14 | 1350 | -143.8 | -118.5 | 0.682 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 5.79 | -5.79 | -2.40 |
| | App. | 25 | 455.0 | 15 | 1350 | -210.1 | -141.4 | 0.683 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 6.44 | -6.44 | -3.27 |
| 5 | Camp. | 26 | 460.7 | 15 | 1350 | -222.2 | 104.7 | 0.683 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 4.77 | -4.77 | -3.45 |
| | Camp. | 27 | 471.3 | 15 | 1364 | 0.0 | 67.6 | 0.690 | 0.06 | 0.02 | 1.00 | 3.02 | -3.02 | 0.00 |
| | App. | 28 | 530.9 | 15 | 1300 | -44.0 | -138.1 | 0.658 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 6.78 | -6.78 | -0.71 |
| 6 | Camp. | 29 | 536.5 | 15 | 1300 | -48.1 | 97.9 | 0.658 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 4.81 | -4.81 | -0.78 |
| | Camp. | 30 | 547.1 | 16 | 1366 | 0.0 | 63.4 | 0.691 | 0.07 | 0.02 | 1.00 | 2.64 | -2.64 | 0.00 |
| | App. | 31 | 563.1 | 16 | 1300 | -16.6 | 48.9 | 0.658 | 0.07 | 0.01 | 1.00 | 2.25 | -2.25 | -0.25 |
| | App. | 32 | 567.1 | 16 | 1300 | -20.7 | -94.0 | 0.658 | 0.07 | 0.01 | 1.00 | 4.32 | -4.32 | -0.31 |

Tabella 46 Tensioni longitudinali – Peso proprio strutturale + Peso acqua nelle condotte

Si valutano le tensioni longitudinali determinate dall'effetto dell'azione della neve:

$$\sigma_{L1,snow} = \pm (M y / J) / z_s; \sigma_{L2,snow} = (N / A) / z_s.$$

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | N | M | y | A | J | z _s | σ _{L1} ⁺ | σ _{L1} ⁻ | σ _{L2} |
|-----|-------|------|-------|------|------|-------|-------|------|-------------------|-------------------|----------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [kN] | [kNm] | [m] | [m ²] | [m ⁴] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 9 | 1588 | 0.0 | 4.5 | 0.80 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.25 | -0.25 | 0.00 |
| | Camp. | 2 | 106.0 | 9 | 1550 | -19.1 | 2.8 | 0.78 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.17 | -0.17 | -0.43 |
| | App. | 3 | 111.5 | 9 | 1550 | -21.1 | -11.8 | 0.78 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.69 | -0.69 | -0.48 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1488 | 0.0 | 1.1 | 0.75 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.07 | -0.07 | 0.00 |
| | Camp. | 5 | 170.2 | 9 | 1450 | -12.6 | 1.4 | 0.73 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.09 | -0.09 | -0.31 |
| | App. | 6 | 175.0 | 9 | 1450 | -14.2 | -2.6 | 0.73 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.18 | -0.18 | -0.34 |
| | Camp. | 7 | 198.7 | 10 | 1450 | -22.0 | -0.1 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | -0.48 |
| | App. | 8 | 203.4 | 10 | 1450 | -23.5 | -6.2 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.37 | -0.37 | -0.51 |
| 3 | Camp. | 9 | 231.0 | 10 | 1454 | 0.0 | 0.1 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.01 | -0.01 | 0.00 |
| | App. | 10 | 241.8 | 10 | 1400 | -0.2 | 0.0 | 0.71 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 11 | 246.8 | 10 | 1400 | -0.3 | 0.1 | 0.71 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | -0.01 |
| | App. | 12 | 270.7 | 11 | 1400 | -0.7 | -0.1 | 0.71 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | -0.01 |
| | Camp. | 13 | 275.4 | 11 | 1400 | -0.8 | 0.0 | 0.71 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | -0.02 |
| | App. | 14 | 289.7 | 12 | 1400 | -1.0 | -0.1 | 0.71 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | -0.02 |
| | Camp. | 15 | 294.4 | 12 | 1400 | -1.1 | 0.0 | 0.71 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | -0.02 |
| | App. | 16 | 318.2 | 13 | 1400 | -1.5 | -0.1 | 0.71 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | -0.03 |
| | Camp. | 17 | 322.9 | 13 | 1400 | -1.6 | 0.0 | 0.71 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | -0.03 |
| | App. | 18 | 337.2 | 14 | 1400 | -1.8 | -0.1 | 0.71 | 0.06 | 0.02 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | -0.03 |
| | Camp. | 19 | 342.0 | 14 | 1400 | -1.9 | 0.0 | 0.71 | 0.06 | 0.02 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | -0.03 |
| | App. | 20 | 346.8 | 15 | 1400 | -2.0 | -0.1 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | -0.03 |
| | Camp. | 21 | 352.8 | 15 | 1400 | -2.1 | 0.1 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 1.00 | 0.00 | 0.00 | -0.03 |
| 4 | Camp. | 22 | 365.7 | 15 | 1412 | 0.0 | 4.2 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 1.00 | 0.18 | -0.18 | 0.00 |
| | Camp. | 23 | 422.1 | 14 | 1350 | -23.6 | -2.1 | 0.68 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.10 | -0.10 | -0.39 |
| | App. | 24 | 423.2 | 14 | 1350 | -24.0 | -6.7 | 0.68 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.33 | -0.33 | -0.40 |
| | App. | 25 | 455.0 | 15 | 1350 | -34.4 | -5.9 | 0.68 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.27 | -0.27 | -0.54 |
| | Camp. | 26 | 460.7 | 15 | 1350 | -36.4 | 4.4 | 0.68 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.20 | -0.20 | -0.57 |
| 5 | Camp. | 27 | 471.3 | 15 | 1364 | 0.0 | 3.0 | 0.69 | 0.06 | 0.02 | 1.00 | 0.14 | -0.14 | 0.00 |
| | App. | 28 | 530.9 | 15 | 1300 | -7.4 | -6.2 | 0.66 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.30 | -0.30 | -0.12 |
| | Camp. | 29 | 536.5 | 15 | 1300 | -8.1 | 4.4 | 0.66 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.22 | -0.22 | -0.13 |
| 6 | Camp. | 30 | 547.1 | 16 | 1366 | 0.0 | 2.8 | 0.69 | 0.07 | 0.02 | 1.00 | 0.12 | -0.12 | 0.00 |
| | Camp. | 31 | 563.1 | 16 | 1300 | -2.6 | 2.2 | 0.66 | 0.07 | 0.01 | 1.00 | 0.10 | -0.10 | -0.04 |
| | App. | 32 | 567.1 | 16 | 1300 | -3.3 | -4.2 | 0.66 | 0.07 | 0.01 | 1.00 | 0.19 | -0.19 | -0.05 |

Tabella 47 Tensioni longitudinali – Azione della neve

Si valutano le tensioni longitudinali determinate dall'effetto dell'azione del vento:

$$\sigma_{L1,wind} = \pm (M y / J) / z_s ; \sigma_{L2,wind} = (N / A) / z_s.$$

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | N | M | y | A | J | z _s | σ _{L1} ⁺ | σ _{L1} ⁻ | σ _{L2} |
|-----|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------------------|-------------------|----------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [kN] | [kNm] | [m] | [m ²] | [m ⁴] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 9 | 1588 | 0 | -8.0 | 0.80 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.45 | -0.45 | 0.00 |
| | Camp. | 2 | 106.0 | 9 | 1550 | 0 | -5.1 | 0.78 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.30 | -0.30 | 0.00 |
| | App. | 3 | 111.5 | 9 | 1550 | 0 | 21.2 | 0.78 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 1.23 | -1.23 | 0.00 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1488 | 0 | -4.4 | 0.75 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.28 | -0.28 | 0.00 |
| | Camp. | 5 | 170.2 | 9 | 1450 | 0 | -5.4 | 0.73 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.36 | -0.36 | 0.00 |
| | App. | 6 | 175.0 | 9 | 1450 | 0 | 10.5 | 0.73 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.70 | -0.70 | 0.00 |
| | Camp. | 7 | 198.7 | 10 | 1450 | 0 | 0.2 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.01 | -0.01 | 0.00 |
| | App. | 8 | 203.4 | 10 | 1450 | 0 | 24.7 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 1.48 | -1.48 | 0.00 |
| 3 | Camp. | 9 | 231.0 | 10 | 1454 | 0 | -13.7 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.82 | -0.82 | 0.00 |
| | App. | 10 | 241.8 | 10 | 1400 | 0 | 5.7 | 0.71 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.36 | -0.36 | 0.00 |
| | Camp. | 11 | 246.8 | 10 | 1400 | 0 | -6.9 | 0.71 | 0.04 | 0.01 | 1.00 | 0.44 | -0.44 | 0.00 |
| | App. | 12 | 270.7 | 11 | 1400 | 0 | 10.4 | 0.71 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.61 | -0.61 | 0.00 |
| | Camp. | 13 | 275.4 | 11 | 1400 | 0 | -5.3 | 0.71 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.31 | -0.31 | 0.00 |
| | App. | 14 | 289.7 | 12 | 1400 | 0 | 10.3 | 0.71 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.55 | -0.55 | 0.00 |
| | Camp. | 15 | 294.4 | 12 | 1400 | 0 | -5.3 | 0.71 | 0.05 | 0.01 | 1.00 | 0.28 | -0.28 | 0.00 |
| | App. | 16 | 318.2 | 13 | 1400 | 0 | 10.4 | 0.71 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.51 | -0.51 | 0.00 |
| | Camp. | 17 | 322.9 | 13 | 1400 | 0 | -4.9 | 0.71 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.24 | -0.24 | 0.00 |
| | App. | 18 | 337.2 | 14 | 1400 | 0 | 9.8 | 0.71 | 0.06 | 0.02 | 1.00 | 0.44 | -0.44 | 0.00 |
| | Camp. | 19 | 342.0 | 14 | 1400 | 0 | -4.3 | 0.71 | 0.06 | 0.02 | 1.00 | 0.20 | -0.20 | 0.00 |
| | App. | 20 | 346.8 | 15 | 1400 | 0 | 13.7 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 1.00 | 0.58 | -0.58 | 0.00 |
| 4 | Camp. | 21 | 352.8 | 15 | 1400 | 0 | -8.8 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 1.00 | 0.37 | -0.37 | 0.00 |
| | Camp. | 22 | 365.7 | 15 | 1412 | 0 | -8.3 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 1.00 | 0.34 | -0.34 | 0.00 |
| | Camp. | 23 | 422.1 | 14 | 1350 | 0 | 5.4 | 0.68 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.26 | -0.26 | 0.00 |
| | App. | 24 | 423.2 | 14 | 1350 | 0 | 3.2 | 0.68 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.16 | -0.16 | 0.00 |
| | App. | 25 | 455.0 | 15 | 1350 | 0 | 10.8 | 0.68 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.49 | -0.49 | 0.00 |
| 5 | Camp. | 26 | 460.7 | 15 | 1350 | 0 | -8.0 | 0.68 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.36 | -0.36 | 0.00 |
| | Camp. | 27 | 471.3 | 15 | 1364 | 0 | -5.0 | 0.69 | 0.06 | 0.02 | 1.00 | 0.22 | -0.22 | 0.00 |
| | App. | 28 | 530.9 | 15 | 1300 | 0 | 10.2 | 0.66 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.50 | -0.50 | 0.00 |
| 6 | Camp. | 29 | 536.5 | 15 | 1300 | 0 | -7.2 | 0.66 | 0.06 | 0.01 | 1.00 | 0.36 | -0.36 | 0.00 |
| | Camp. | 30 | 547.1 | 16 | 1366 | 0 | -4.8 | 0.69 | 0.07 | 0.02 | 1.00 | 0.20 | -0.20 | 0.00 |
| | Camp. | 31 | 563.1 | 16 | 1300 | 0 | -3.7 | 0.66 | 0.07 | 0.01 | 1.00 | 0.17 | -0.17 | 0.00 |
| | App. | 32 | 567.1 | 16 | 1300 | 0 | 7.0 | 0.66 | 0.07 | 0.01 | 1.00 | 0.32 | -0.32 | 0.00 |

Tabella 48 Tensioni longitudinali – Azione del vento

Si osserva che data l'esiguità dei valori delle tensioni determinate dall'azione del vento, nelle verifiche esse verranno trascurate.

Le tensioni longitudinali ($\sigma_{L,3}$) determinate dalle azioni di attrito in corrispondenza degli appoggi si valutano come segue: $\sigma_{L,3} = (f_1 P_{tot}) / (2 \pi R_m s)$.

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | Q | s | D | P _{t+w} | y | A | f ₁ | z _s | $\sigma_{L,3}$ | $\sigma_{L,3} / z_s$ |
|-----|-------|------|-------|------------|------|------|------------------|------|-------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [m.s.l.m.] | [mm] | [mm] | [kN] | [m] | [m ²] | [-] | [-] | [N/mm ²] | [N/mm ²] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 885.7 | 9 | 1588 | \ | 0.80 | 0.05 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 2 | 106.0 | 864.4 | 9 | 1550 | \ | 0.78 | 0.04 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 3 | 111.5 | 862.3 | 9 | 1550 | 260.8 | 0.78 | 0.04 | 0.40 | 1.00 | 2.37 | 2.37 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 851.7 | 9 | 1488 | \ | 0.75 | 0.04 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 5 | 170.2 | 826.5 | 9 | 1450 | \ | 0.73 | 0.04 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 6 | 175.0 | 823.3 | 9 | 1450 | 120.4 | 0.73 | 0.04 | 0.40 | 1.00 | 1.17 | 1.17 |
| | Camp. | 7 | 198.7 | 807.1 | 10 | 1450 | \ | 0.73 | 0.05 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 8 | 203.4 | 803.9 | 10 | 1450 | 134.5 | 0.73 | 0.05 | 0.40 | 1.00 | 1.17 | 1.17 |
| 3 | Camp. | 9 | 231.0 | 783.3 | 10 | 1454 | \ | 0.73 | 0.05 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 10 | 241.8 | 774.1 | 10 | 1400 | 57.9 | 0.71 | 0.04 | 0.40 | 1.00 | 0.52 | 0.52 |
| | Camp. | 11 | 246.8 | 769.9 | 10 | 1400 | \ | 0.71 | 0.04 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 12 | 270.7 | 749.4 | 11 | 1400 | 93.4 | 0.71 | 0.05 | 0.40 | 1.00 | 0.77 | 0.77 |
| | Camp. | 13 | 275.4 | 745.3 | 11 | 1400 | \ | 0.71 | 0.05 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 14 | 289.7 | 733.1 | 12 | 1400 | 94.6 | 0.71 | 0.05 | 0.40 | 1.00 | 0.71 | 0.71 |
| | Camp. | 15 | 294.4 | 729.1 | 12 | 1400 | \ | 0.71 | 0.05 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 16 | 318.2 | 708.8 | 13 | 1400 | 96.5 | 0.71 | 0.06 | 0.40 | 1.00 | 0.67 | 0.67 |
| | Camp. | 17 | 322.9 | 704.7 | 13 | 1400 | \ | 0.71 | 0.06 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 18 | 337.2 | 692.5 | 14 | 1400 | 94.9 | 0.71 | 0.06 | 0.40 | 1.00 | 0.61 | 0.61 |
| | Camp. | 19 | 342.0 | 688.4 | 14 | 1400 | \ | 0.71 | 0.06 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4 | App. | 20 | 346.8 | 684.3 | 15 | 1400 | 113.8 | 0.71 | 0.07 | 0.40 | 1.00 | 0.68 | 0.68 |
| | Camp. | 21 | 352.8 | 679.2 | 15 | 1400 | \ | 0.71 | 0.07 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 22 | 365.7 | 670.4 | 15 | 1412 | \ | 0.71 | 0.07 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 23 | 422.1 | 640.8 | 14 | 1350 | \ | 0.68 | 0.06 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 24 | 423.2 | 640.3 | 14 | 1350 | 320.7 | 0.68 | 0.06 | 0.40 | 1.00 | 2.14 | 2.14 |
| 5 | App. | 25 | 455.0 | 626.6 | 15 | 1350 | 167.4 | 0.68 | 0.06 | 0.40 | 1.00 | 1.04 | 1.04 |
| | Camp. | 26 | 460.7 | 624.1 | 15 | 1350 | \ | 0.68 | 0.06 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 27 | 471.3 | 621.2 | 15 | 1364 | \ | 0.69 | 0.06 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| 6 | App. | 28 | 530.9 | 612.6 | 15 | 1300 | 168.5 | 0.66 | 0.06 | 0.40 | 1.00 | 1.09 | 1.09 |
| | Camp. | 29 | 536.5 | 611.8 | 15 | 1300 | \ | 0.66 | 0.06 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 30 | 547.1 | 609.9 | 16 | 1366 | \ | 0.69 | 0.07 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Camp. | 31 | 563.1 | 606.7 | 16 | 1300 | \ | 0.66 | 0.07 | 0.40 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| | App. | 32 | 567.1 | 605.9 | 16 | 1300 | 141.5 | 0.66 | 0.07 | 0.40 | 1.00 | 0.86 | 0.86 |

Tabella 49 Tensioni longitudinali – Attrito appoggi

$$\sigma_{L4} = \frac{N}{A} = \frac{P_{E,j} A_{joint}}{A}$$

- A Area della sezione di condotta;
- $P_{E,j}$ Pressione totale in corrispondenza del j-esimo giunto di dilatazione;
- A_{joint} Area della corona circolare in cui si esercita la pressione idrostatica in corrispondenza del giunto di dilatazione.

Diagramma di un giunto a bullone in trazione. Due lastre sono unite da un bullone. Le forze P_{tot} agiscono in trazione su entrambe le lastre. L'anello di tenuta è saldato al tratto di valle. Il tratto in cui aumentano le tensioni longitudinali (trazione) è indicato.

11.05.2020

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | P _{tot} | s | D | ΔD | N | A | σ _{L,4} | z _s | σ _{L,4} / z _s |
|-----|-------|------|-------|----------------------|------|------|------|-------|-------------------|------------------|----------------|-----------------------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [kN/m ²] | [mm] | [mm] | [mm] | [kN] | [m ²] | [MPa] | [-] | [MPa] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 596.4 | 9 | 1588 | 38 | 55.9 | 0.05 | 1.24 | 1.00 | 1.24 |
| | Camp. | 2 | 106.0 | 820.0 | 9 | 1550 | 0 | 0.0 | 0.04 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 3 | 111.5 | 842.4 | 9 | 1550 | 0 | 0.0 | 0.04 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 951.6 | 9 | 1488 | 38 | 83.4 | 0.04 | 1.97 | 1.00 | 1.97 |
| | Camp. | 5 | 170.2 | 1206.0 | 9 | 1450 | 0 | 0.0 | 0.04 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 6 | 175.0 | 1238.9 | 9 | 1450 | 0 | 0.0 | 0.04 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | Camp. | 7 | 198.7 | 1402.6 | 10 | 1450 | 0 | 0.0 | 0.05 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 8 | 203.4 | 1435.0 | 10 | 1450 | 0 | 0.0 | 0.05 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| 3 | Camp. | 9 | 231.0 | 1642.4 | 10 | 1454 | 54 | 198.8 | 0.05 | 4.32 | 1.00 | 4.32 |
| | App. | 10 | 241.8 | 1734.7 | 10 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.04 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | Camp. | 11 | 246.8 | 1776.8 | 10 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.04 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 12 | 270.7 | 1981.1 | 11 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.05 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | Camp. | 13 | 275.4 | 2021.7 | 11 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.05 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 14 | 289.7 | 2143.4 | 12 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.05 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | Camp. | 15 | 294.4 | 2183.9 | 12 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.05 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 16 | 318.2 | 2386.8 | 13 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | Camp. | 17 | 322.9 | 2427.3 | 13 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 18 | 337.2 | 2549.5 | 14 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | Camp. | 19 | 342.0 | 2590.2 | 14 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 20 | 346.8 | 2631.0 | 15 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.07 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| 4 | Camp. | 21 | 352.8 | 2682.5 | 15 | 1400 | 0 | 0.0 | 0.07 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | Camp. | 22 | 365.7 | 2771.0 | 15 | 1412 | 62 | 372.7 | 0.07 | 5.54 | 1.00 | 5.54 |
| | Camp. | 23 | 422.1 | 3075.2 | 14 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 24 | 423.2 | 3080.2 | 14 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 25 | 455.0 | 3223.6 | 15 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| 5 | Camp. | 26 | 460.7 | 3249.3 | 15 | 1350 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | Camp. | 27 | 471.3 | 3280.2 | 15 | 1364 | 64 | 439.2 | 0.06 | 6.76 | 1.00 | 6.76 |
| | App. | 28 | 530.9 | 3382.2 | 15 | 1300 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| 6 | Camp. | 29 | 536.5 | 3391.8 | 15 | 1300 | 0 | 0.0 | 0.06 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | Camp. | 30 | 547.1 | 3412.6 | 16 | 1366 | 66 | 471.6 | 0.07 | 6.79 | 1.00 | 6.79 |
| | Camp. | 31 | 563.1 | 3448.7 | 16 | 1300 | 0 | 0.0 | 0.07 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| | App. | 32 | 567.1 | 3457.7 | 16 | 1300 | 0 | 0.0 | 0.07 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |

Tabella 50 Tensioni longitudinali – Pressione giunti di dilatazione

Le tensioni radiali si valutano come segue: $\tau = 4/3 T/A (r_e+r_i)^2 / (r_e^2+r_i^2)$.

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | V | y | A | J | r _i | r _e | r _i / r _e | τ |
|-----|-------|------|-------|------|------|-------|------|-------------------|-------------------|----------------|----------------|---------------------------------|----------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [kN] | [m] | [m ²] | [m ⁴] | [mm] | [mm] | [%] | [N/mm ²] |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 9 | 1588 | 6.9 | 0.80 | 0.05 | 0.01 | 794 | 803 | 99 | 0.41 |
| | Camp. | 2 | 106.0 | 9 | 1550 | 9.3 | 0.78 | 0.04 | 0.01 | 775 | 784 | 99 | 0.56 |
| | App. | 3 | 111.5 | 9 | 1550 | 120.3 | 0.78 | 0.04 | 0.01 | 775 | 784 | 99 | 7.28 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1488 | 13.0 | 0.75 | 0.04 | 0.01 | 744 | 753 | 99 | 0.82 |
| | Camp. | 5 | 170.2 | 9 | 1450 | 0.8 | 0.73 | 0.04 | 0.01 | 725 | 734 | 99 | 0.05 |
| | App. | 6 | 175.0 | 9 | 1450 | 67.6 | 0.73 | 0.04 | 0.01 | 725 | 734 | 99 | 4.37 |
| | Camp. | 7 | 198.7 | 10 | 1450 | 19.0 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 725 | 735 | 99 | 1.10 |
| | App. | 8 | 203.4 | 10 | 1450 | 87.5 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 725 | 735 | 99 | 5.09 |
| 3 | Camp. | 9 | 231.0 | 10 | 1454 | 13.8 | 0.73 | 0.05 | 0.01 | 727 | 737 | 99 | 0.80 |
| | App. | 10 | 241.8 | 10 | 1400 | -41.3 | 0.71 | 0.04 | 0.01 | 700 | 710 | 99 | -2.48 |
| | Camp. | 11 | 246.8 | 10 | 1400 | 4.5 | 0.71 | 0.04 | 0.01 | 700 | 710 | 99 | 0.27 |
| | App. | 12 | 270.7 | 11 | 1400 | -46.7 | 0.71 | 0.05 | 0.01 | 700 | 711 | 98 | -2.56 |
| | Camp. | 13 | 275.4 | 11 | 1400 | 0.2 | 0.71 | 0.05 | 0.01 | 700 | 711 | 98 | 0.01 |
| | App. | 14 | 289.7 | 12 | 1400 | -47.5 | 0.71 | 0.05 | 0.01 | 700 | 712 | 98 | -2.38 |
| | Camp. | 15 | 294.4 | 12 | 1400 | 0.2 | 0.71 | 0.05 | 0.01 | 700 | 712 | 98 | 0.01 |
| | App. | 16 | 318.2 | 13 | 1400 | -47.7 | 0.71 | 0.06 | 0.01 | 700 | 713 | 98 | -2.21 |
| | Camp. | 17 | 322.9 | 13 | 1400 | 0.1 | 0.71 | 0.06 | 0.01 | 700 | 713 | 98 | 0.00 |
| | App. | 18 | 337.2 | 14 | 1400 | -46.7 | 0.71 | 0.06 | 0.02 | 700 | 714 | 98 | -2.00 |
| | Camp. | 19 | 342.0 | 14 | 1400 | 2.5 | 0.71 | 0.06 | 0.02 | 700 | 714 | 98 | 0.11 |
| | App. | 20 | 346.8 | 15 | 1400 | -60.1 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 700 | 715 | 98 | -2.40 |
| 4 | Camp. | 21 | 352.8 | 15 | 1400 | 2.5 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 700 | 715 | 98 | 0.10 |
| | Camp. | 22 | 365.7 | 15 | 1412 | 10.4 | 0.71 | 0.07 | 0.02 | 706 | 721 | 98 | 0.41 |
| | Camp. | 23 | 422.1 | 14 | 1350 | 250.5 | 0.68 | 0.06 | 0.01 | 675 | 689 | 98 | 11.13 |
| | App. | 24 | 423.2 | 14 | 1350 | 255.1 | 0.68 | 0.06 | 0.01 | 675 | 689 | 98 | 11.34 |
| | App. | 25 | 455.0 | 15 | 1350 | -92.0 | 0.68 | 0.06 | 0.01 | 675 | 690 | 98 | -3.81 |
| 5 | Camp. | 26 | 460.7 | 15 | 1350 | 5.7 | 0.68 | 0.06 | 0.01 | 675 | 690 | 98 | 0.23 |
| | Camp. | 27 | 471.3 | 15 | 1364 | 16.8 | 0.69 | 0.06 | 0.02 | 682 | 697 | 98 | 0.69 |
| | App. | 28 | 530.9 | 15 | 1300 | -91.3 | 0.66 | 0.06 | 0.01 | 650 | 665 | 98 | -3.93 |
| 6 | Camp. | 29 | 536.5 | 15 | 1300 | 5.0 | 0.66 | 0.06 | 0.01 | 650 | 665 | 98 | 0.22 |
| | Camp. | 30 | 547.1 | 16 | 1366 | 2.4 | 0.69 | 0.07 | 0.02 | 683 | 699 | 98 | 0.09 |
| | Camp. | 31 | 563.1 | 16 | 1300 | 0.2 | 0.66 | 0.07 | 0.01 | 650 | 666 | 98 | 0.01 |
| | App. | 32 | 567.1 | 16 | 1300 | 71.2 | 0.66 | 0.07 | 0.01 | 650 | 666 | 98 | 2.87 |

Tabella 51 Tensioni radiali – Peso proprio strutturale + Peso acqua nelle condotte

Si osserva che data l'esiguità delle tensioni radiali, esse verranno trascurate in fase di verifica della condotta.

Si verificano le tensioni nella condotta in accordo al criterio di Von Mises, assumendo per la condizione di carico normale e per gli acciai UNION 24, 28 e 32 una tensione ammissibile pari a:

- Sezioni in campata (acciaio UNION 24)

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min (R_{eH} / 1.5 ; R_m / 2.4) = \min (235 \text{ N/mm}^2 / 1.5 ; 360 \text{ N/mm}^2 / 2.4) = 150.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = R_{eH} / 1.7 = 235 \text{ N/mm}^2 / 1.7 = 138.2 \text{ N/mm}^2$$

- Sezioni in campata (acciaio UNION 28)

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min (R_{eH} / 1.5 ; R_m / 2.4) = \min (275 \text{ N/mm}^2 / 1.5 ; 430 \text{ N/mm}^2 / 2.4) = 179.2 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = R_{eH} / 1.7 = 275 \text{ N/mm}^2 / 1.7 = 161.8 \text{ N/mm}^2$$

- Sezioni in campata (acciaio UNION 32)

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min (R_{eH} / 1.5 ; R_m / 2.4) = \min (315 \text{ N/mm}^2 / 1.5 ; 510 \text{ N/mm}^2 / 2.4) = 210.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = R_{eH} / 1.7 = 315 \text{ N/mm}^2 / 1.7 = 185.3 \text{ N/mm}^2$$

- Sezioni in appoggio (acciaio UNION 24)

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min(R_{eH}/1.5 ; R_m/2.4)1.5 = \min(235\text{N/mm}^2 / 1.5 ; 360\text{N/mm}^2 / 2.4) 1.5 = 225.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = R_{eH} / 1 = 235 \text{ N/mm}^2$$

- Sezioni in appoggio (acciaio UNION 28)

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min(R_{eH}/1.5 ; R_m/2.4)1.5 = \min(275\text{N/mm}^2 / 1.5 ; 430\text{N/mm}^2 / 2.4) 1.5 = 268.8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = R_{eH} / 1 = 275 \text{ N/mm}^2$$

- Sezioni in appoggio (acciaio UNION 32)

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min(R_{eH}/1.5 ; R_m/2.4)1.5 = \min(315\text{N/mm}^2 / 1.5 ; 510\text{N/mm}^2 / 2.4) 1.5 = 315.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = 315 \text{ N/mm}^2$$

Si osserva che tra le sezioni in campata e appoggio è stata introdotta una distinzione delle tensioni ammissibili assumendo che possano verificarsi snervamenti localizzati nelle zone dove sono presenti perturbazioni locali. In particolare, tale assunzione è indicata nel manuale ASCE n° 79 “Steel Penstocks”, in cui al paragrafo 3.5.1 viene indicato che la tensione ammissibile deve essere modificata tramite i fattori “*weld joint reduction factors*” e “*allowable stress increase factors*” e, le tabelle 3.2 (“*penstocks shell immediately above horn or tip of saddle*”) e 3.5 (“*local primary membrane*”) indicano che per le selle di appoggio si possa considerare un coefficiente di incremento della tensione ammissibile pari a 1.5.

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | R _{eH} | $\Sigma\sigma_L$ | $\Sigma\sigma_C$ | z _s | σ_{eff} | $\sigma_{adm,ASCE}$ | $\sigma_{adm,CECT}$ | σ_{adm}/σ ASCE | σ_{adm}/σ CECT |
|-----|-------|------|-------|------|------|-----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | | |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 9 | 1588 | 235 | -5.1 | 54.4 | 1.00 | 57.1 | 150.0 | 138.2 | 2.63 | 2.42 |
| | Camp. | 2 | 106.0 | 9 | 1550 | 235 | -6.3 | 72.0 | 1.00 | 75.3 | 150.0 | 138.2 | 1.99 | 1.84 |
| | App. | 3 | 111.5 | 9 | 1550 | 235 | 17.5 | 68.3 | 1.00 | 61.5 | 225.0 | 235.0 | 3.66 | 3.82 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1488 | 235 | -0.9 | 79.9 | 1.00 | 80.4 | 150.0 | 138.2 | 1.87 | 1.72 |
| | Camp. | 5 | 170.2 | 9 | 1450 | 235 | -6.0 | 98.2 | 1.00 | 101.3 | 150.0 | 138.2 | 1.48 | 1.36 |
| | App. | 6 | 175.0 | 9 | 1450 | 235 | 5.8 | 98.9 | 1.00 | 96.1 | 225.0 | 235.0 | 2.34 | 2.45 |
| | Camp. | 7 | 198.7 | 10 | 1450 | 235 | -3.9 | 102.8 | 1.00 | 104.8 | 150.0 | 138.2 | 1.43 | 1.32 |
| | App. | 8 | 203.4 | 10 | 1450 | 235 | 12.8 | 103.1 | 1.00 | 97.3 | 225.0 | 235.0 | 2.31 | 2.41 |
| 3 | Camp. | 9 | 231.0 | 10 | 1454 | 275 | -1.4 | 120.3 | 1.00 | 121.0 | 179.2 | 161.8 | 1.48 | 1.34 |
| | App. | 10 | 241.8 | 10 | 1400 | 275 | 2.3 | 131.5 | 1.00 | 130.4 | 268.8 | 275.0 | 2.06 | 2.11 |
| | Camp. | 11 | 246.8 | 10 | 1400 | 275 | -4.2 | 125.3 | 1.00 | 127.4 | 179.2 | 161.8 | 1.41 | 1.27 |
| | App. | 12 | 270.7 | 11 | 1400 | 275 | 2.5 | 135.5 | 1.00 | 134.3 | 268.8 | 275.0 | 2.00 | 2.05 |
| | Camp. | 13 | 275.4 | 11 | 1400 | 275 | -5.1 | 129.6 | 1.00 | 132.2 | 179.2 | 161.8 | 1.36 | 1.22 |
| | App. | 14 | 289.7 | 12 | 1400 | 275 | 1.1 | 133.8 | 1.00 | 133.2 | 268.8 | 275.0 | 2.02 | 2.06 |
| | Camp. | 15 | 294.4 | 12 | 1400 | 275 | -5.9 | 128.4 | 1.00 | 131.5 | 179.2 | 161.8 | 1.36 | 1.23 |
| | App. | 16 | 318.2 | 13 | 1400 | 275 | -0.7 | 136.6 | 1.00 | 136.9 | 268.8 | 275.0 | 1.96 | 2.01 |
| | Camp. | 17 | 322.9 | 13 | 1400 | 275 | -7.2 | 131.8 | 1.00 | 135.5 | 179.2 | 161.8 | 1.32 | 1.19 |
| | App. | 18 | 337.2 | 14 | 1400 | 275 | -2.0 | 134.7 | 1.00 | 135.8 | 268.8 | 275.0 | 1.98 | 2.03 |
| | Camp. | 19 | 342.0 | 14 | 1400 | 275 | -7.8 | 130.6 | 1.00 | 134.7 | 179.2 | 161.8 | 1.33 | 1.20 |
| | App. | 20 | 346.8 | 15 | 1400 | 275 | -1.1 | 130.6 | 1.00 | 131.1 | 268.8 | 275.0 | 2.05 | 2.10 |
| | Camp. | 21 | 352.8 | 15 | 1400 | 275 | -9.5 | 126.4 | 1.00 | 131.4 | 179.2 | 161.8 | 1.36 | 1.23 |
| 4 | Camp. | 22 | 365.7 | 15 | 1412 | 315 | 1.2 | 131.6 | 1.00 | 131.0 | 210.0 | 185.3 | 1.60 | 1.41 |
| | Camp. | 23 | 422.1 | 14 | 1350 | 315 | -10.7 | 149.3 | 1.00 | 154.9 | 210.0 | 185.3 | 1.36 | 1.20 |
| | App. | 24 | 423.2 | 14 | 1350 | 315 | 5.5 | 191.7 | 1.00 | 189.0 | 315.0 | 315.0 | 1.67 | 1.67 |
| | App. | 25 | 455.0 | 15 | 1350 | 315 | 3.9 | 165.7 | 1.00 | 163.7 | 315.0 | 315.0 | 1.92 | 1.92 |
| | Camp. | 26 | 460.7 | 15 | 1350 | 315 | -9.0 | 147.3 | 1.00 | 152.0 | 210.0 | 185.3 | 1.38 | 1.22 |
| 5 | Camp. | 27 | 471.3 | 15 | 1364 | 315 | 3.6 | 150.2 | 1.00 | 148.4 | 210.0 | 185.3 | 1.42 | 1.25 |
| | App. | 28 | 530.9 | 15 | 1300 | 315 | 7.3 | 168.3 | 1.00 | 164.8 | 315.0 | 315.0 | 1.91 | 1.91 |
| | Camp. | 29 | 536.5 | 15 | 1300 | 315 | -5.9 | 148.0 | 1.00 | 151.1 | 210.0 | 185.3 | 1.39 | 1.23 |
| 6 | Camp. | 30 | 547.1 | 16 | 1366 | 315 | 4.0 | 146.8 | 1.00 | 144.8 | 210.0 | 185.3 | 1.45 | 1.28 |
| | Camp. | 31 | 563.1 | 16 | 1300 | 315 | -2.6 | 141.2 | 1.00 | 142.6 | 210.0 | 185.3 | 1.47 | 1.30 |
| | App. | 32 | 567.1 | 16 | 1300 | 315 | 5.0 | 157.5 | 1.00 | 155.0 | 315.0 | 315.0 | 2.03 | 2.03 |

Tabella 52 Verifica delle tensioni effettive – CF3 - Condizione di carico normale

È possibile notare le tensioni agenti risultino ovunque inferiori rispetto alle tensioni ammissibili. Nella tabella seguente si riportano per ciascuna sezione gli spessori di calcolo e gli spessori di progetto della condotta. Lo spessore di sovrametallo viene calcolato come la differenza tra lo spessore di progetto e lo spessore di calcolo.

$$\Delta s = s_{\text{design}} - s_{\text{min}}$$

Dove:

- s_{design} Spessore di progetto della condotta;
- s_{min} Spessore di calcolo;
- Δs Massimo sovrametallo disponibile.

| Sez. | Svil. | S _{design} | S _{min,ASCE} | S _{min,CECT} | ΔS _{ASCE} | ΔS _{CECT} |
|------|-------|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| [-] | [m] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] | [mm] |
| 1 | 51.1 | 9 | 3.3 | 3.6 | 5.67 | 5.39 |
| 2 | 106.0 | 9 | 4.4 | 4.8 | 4.55 | 4.17 |
| 3 | 111.5 | 9 | 2.5 | 2.4 | 6.50 | 6.60 |
| 4 | 133.3 | 9 | 4.8 | 5.2 | 4.24 | 3.83 |
| 5 | 170.2 | 9 | 6.0 | 6.6 | 2.96 | 2.44 |
| 6 | 175.0 | 9 | 3.8 | 3.7 | 5.17 | 5.33 |
| 7 | 198.7 | 10 | 6.9 | 7.5 | 3.06 | 2.46 |
| 8 | 203.4 | 10 | 4.3 | 4.1 | 5.69 | 5.88 |
| 9 | 231.0 | 10 | 6.7 | 7.5 | 3.28 | 2.55 |
| 10 | 241.8 | 10 | 4.9 | 4.8 | 5.14 | 5.25 |
| 11 | 246.8 | 10 | 7.1 | 7.8 | 2.92 | 2.15 |
| 12 | 270.7 | 11 | 5.5 | 5.4 | 5.48 | 5.61 |
| 13 | 275.4 | 11 | 8.1 | 9.0 | 2.92 | 2.04 |
| 14 | 289.7 | 12 | 6.0 | 5.8 | 6.03 | 6.16 |
| 15 | 294.4 | 12 | 8.8 | 9.7 | 3.23 | 2.28 |
| 16 | 318.2 | 13 | 6.7 | 6.5 | 6.35 | 6.50 |
| 17 | 322.9 | 13 | 9.8 | 10.9 | 3.21 | 2.14 |
| 18 | 337.2 | 14 | 7.1 | 6.9 | 6.90 | 7.06 |
| 19 | 342.0 | 14 | 10.5 | 11.6 | 3.52 | 2.38 |
| 20 | 346.8 | 15 | 7.4 | 7.2 | 7.64 | 7.80 |
| 21 | 352.8 | 15 | 10.9 | 12.1 | 4.06 | 2.86 |
| 22 | 365.7 | 15 | 9.3 | 10.5 | 5.70 | 4.45 |
| 23 | 422.1 | 14 | 10.3 | 11.7 | 3.71 | 2.33 |
| 24 | 423.2 | 14 | 8.7 | 8.7 | 5.27 | 5.27 |
| 25 | 455.0 | 15 | 8.0 | 8.0 | 7.00 | 7.00 |
| 26 | 460.7 | 15 | 10.8 | 12.3 | 4.19 | 2.73 |
| 27 | 471.3 | 15 | 10.6 | 12.0 | 4.45 | 3.02 |
| 28 | 530.9 | 15 | 8.1 | 8.1 | 6.94 | 6.94 |
| 29 | 536.5 | 15 | 10.7 | 12.2 | 4.25 | 2.81 |
| 30 | 547.1 | 16 | 11.0 | 12.5 | 5.02 | 3.54 |
| 31 | 563.1 | 16 | 10.8 | 12.3 | 5.19 | 3.74 |
| 32 | 567.1 | 16 | 8.1 | 8.1 | 7.93 | 7.93 |

Tabella 53 Verifica degli spessori – CF3 – Condizione di carico normale

11.3 Condizione di carico saltuaria

Per la condotta in oggetto, nella condizione di carico saltuaria si considera la combinazione delle seguenti azioni:

- Peso proprio della tubazione e dell'acqua in essa contenuta;
- Azione della neve;
- Azione del vento;
- Azioni derivanti dall'attrito sulle selle di appoggio.

Nella condizione di carico saltuaria si adottano i seguenti coefficienti di sicurezza nella definizione delle tensioni ammissibili:

| Norma | Tensioni principali | | Tensioni da perturbazioni locali |
|-------|---|--|---|
| ASCE | $\sigma_{adm} \leq \min \left[1.33 \frac{R_{eH}}{1.5}; 1.33 \frac{R_m}{2.4}; R_{eH} \right]$ | | $\sigma_{adm} \leq \min \left[2 \frac{R_{eH}}{1.5}; 2 \frac{R_m}{2.4}; R_{eH} \right]$ |
| CECT | $\sigma_{adm} \leq \frac{R_{eH}}{1.5}$ | | $\sigma_{adm} \leq R_{eH}$ |

Tabella 11.54 Fattori di sicurezza – Condizione di carico saltuaria

Nella condizione di carico saltuaria si osserva una riduzione delle sollecitazioni agenti rispetto alla condizione di carico normale, legate al fatto che non è applicata la pressione idrostatica e, si osserva una variazione delle verifiche tensionali, poiché le tensioni ammissibili risultano maggiori nella condizione saltuaria. Inoltre, essendo la pressione all'interno della condotta nulla, in tale condizione di carico si osserva che nella valutazione degli effetti di ovalizzazione il coefficiente di Lazard è unitario ($\alpha = 1$). Pertanto, nella condizione di carico saltuaria viene considerato il massimo effetto ovalizzante. Infine, si osserva una variazione delle tensioni longitudinali nella tratta 4 della condotta determinata dall'assenza della spinta idrostatica in corrispondenza del vertice caratterizzato dalla repentina variazione di pendenza. Dunque, si verificano le tensioni nella condotta in accordo al criterio di von Mises, assumendo per la condizione di carico saltuaria e per gli acciai UNION 24, 28 e 32 una tensione ammissibile pari a:

- Sezioni in campata (acciaio UNION 24)

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min (1.33 \cdot 235 \text{ N/mm}^2 / 1.5 ; 1.33 \cdot 360 \text{ N/mm}^2 / 2.4 ; 235 \text{ N/mm}^2) = 199.5 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = 235 \text{ N/mm}^2 / 1.5 = 156.7 \text{ N/mm}^2$$

- Sezioni in campata (acciaio UNION 28)

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min (1.33 \cdot 275 \text{ N/mm}^2 / 1.5 ; 1.33 \cdot 430 \text{ N/mm}^2 / 2.4 ; 275 \text{ N/mm}^2) = 238.3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = 275 \text{ N/mm}^2 / 1.5 = 183.3 \text{ N/mm}^2$$

- Sezioni in campata (acciaio UNION 32)

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min (1.33 \cdot 315 \text{ N/mm}^2 / 1.5 ; 1.33 \cdot 510 \text{ N/mm}^2 / 2.4 ; 315 \text{ N/mm}^2) = 279.3 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = 315 \text{ N/mm}^2 / 1.5 = 210.0 \text{ N/mm}^2$$

- Sezioni in appoggio (acciaio UNION 24)

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min (2 \cdot 235 \text{ N/mm}^2 / 1.5 ; 2 \cdot 360 \text{ N/mm}^2 / 2.4 ; 235 \text{ N/mm}^2) = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = 235 \text{ N/mm}^2$$

- Sezioni in appoggio (acciaio UNION 28)

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min (2 \cdot 275 \text{ N/mm}^2 / 1.5 ; 2 \cdot 430 \text{ N/mm}^2 / 2.4 ; 275 \text{ N/mm}^2) = 275 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = 275 \text{ N/mm}^2$$

- Sezioni in appoggio (acciaio UNION 32)

$$\sigma_{adm,ASCE} = \min (2 \cdot 315 \text{ N/mm}^2 / 1.5 ; 2 \cdot 510 \text{ N/mm}^2 / 2.4 ; 315 \text{ N/mm}^2) = 315 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{adm,CECT} = 315 \text{ N/mm}^2$$

| Tr. | Tipo | Sez. | Svil. | s | D | R _{eH} | $\Sigma\sigma_L$ | $\Sigma\sigma_C$ | z _s | σ_{eff} | $\sigma_{adm,ASCE}$ | $\sigma_{adm,CECT}$ | σ_{adm}/σ ASCE | σ_{adm}/σ CECT |
|-----|-------|------|-------|------|------|-----------------|------------------|------------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| [-] | [-] | [-] | [m] | [mm] | [mm] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [-] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | | |
| 1 | Camp. | 1 | 51.1 | 9 | 1588 | 235 | -6.3 | 49.1 | 1.00 | 52.5 | 199.5 | 156.7 | 3.80 | 2.98 |
| | Camp. | 2 | 106.0 | 9 | 1550 | 235 | -6.3 | 46.8 | 1.00 | 50.2 | 199.5 | 156.7 | 3.97 | 3.12 |
| | App. | 3 | 111.5 | 9 | 1550 | 235 | 17.5 | 41.2 | 1.00 | 35.8 | 235.0 | 235.0 | 6.56 | 6.56 |
| 2 | Camp. | 4 | 133.3 | 9 | 1488 | 235 | -2.9 | 43.1 | 1.00 | 44.6 | 199.5 | 156.7 | 4.47 | 3.51 |
| | Camp. | 5 | 170.2 | 9 | 1450 | 235 | -6.0 | 41.0 | 1.00 | 44.3 | 199.5 | 156.7 | 4.50 | 3.54 |
| | App. | 6 | 175.0 | 9 | 1450 | 235 | 5.8 | 39.0 | 1.00 | 36.5 | 235.0 | 235.0 | 6.44 | 6.44 |
| | Camp. | 7 | 198.7 | 10 | 1450 | 235 | -3.9 | 36.9 | 1.00 | 39.0 | 199.5 | 156.7 | 5.11 | 4.01 |
| | App. | 8 | 203.4 | 10 | 1450 | 235 | 12.8 | 34.9 | 1.00 | 30.6 | 235.0 | 235.0 | 7.68 | 7.68 |
| 3 | Camp. | 9 | 231.0 | 10 | 1454 | 275 | -5.7 | 37.1 | 1.00 | 40.3 | 238.3 | 183.3 | 5.91 | 4.55 |
| | App. | 10 | 241.8 | 10 | 1400 | 275 | 2.3 | 43.6 | 1.00 | 42.5 | 275.0 | 275.0 | 6.47 | 6.47 |
| | Camp. | 11 | 246.8 | 10 | 1400 | 275 | -4.2 | 34.4 | 1.00 | 36.7 | 238.3 | 183.3 | 6.49 | 4.99 |
| | App. | 12 | 270.7 | 11 | 1400 | 275 | 2.5 | 39.9 | 1.00 | 38.7 | 275.0 | 275.0 | 7.11 | 7.11 |
| | Camp. | 13 | 275.4 | 11 | 1400 | 275 | -5.1 | 31.4 | 1.00 | 34.2 | 238.3 | 183.3 | 6.97 | 5.37 |
| | App. | 14 | 289.7 | 12 | 1400 | 275 | 1.1 | 36.5 | 1.00 | 35.9 | 275.0 | 275.0 | 7.65 | 7.65 |
| | Camp. | 15 | 294.4 | 12 | 1400 | 275 | -5.9 | 28.8 | 1.00 | 32.2 | 238.3 | 183.3 | 7.41 | 5.70 |
| | App. | 16 | 318.2 | 13 | 1400 | 275 | -0.7 | 33.6 | 1.00 | 34.0 | 275.0 | 275.0 | 8.09 | 8.09 |
| | Camp. | 17 | 322.9 | 13 | 1400 | 275 | -7.2 | 26.6 | 1.00 | 30.9 | 238.3 | 183.3 | 7.72 | 5.94 |
| | App. | 18 | 337.2 | 14 | 1400 | 275 | -2.0 | 30.9 | 1.00 | 31.9 | 275.0 | 275.0 | 8.61 | 8.61 |
| | Camp. | 19 | 342.0 | 14 | 1400 | 275 | -7.8 | 24.7 | 1.00 | 29.4 | 238.3 | 183.3 | 8.10 | 6.23 |
| | App. | 20 | 346.8 | 15 | 1400 | 275 | -1.1 | 29.7 | 1.00 | 30.3 | 275.0 | 275.0 | 9.09 | 9.09 |
| | Camp. | 21 | 352.8 | 15 | 1400 | 275 | -9.5 | 23.1 | 1.00 | 29.0 | 238.3 | 183.3 | 8.20 | 6.31 |
| 4 | Camp. | 22 | 365.7 | 15 | 1412 | 315 | -4.3 | 23.5 | 1.00 | 26.0 | 279.3 | 210.0 | 10.76 | 8.09 |
| | Camp. | 23 | 422.1 | 14 | 1350 | 315 | -6.1 | 23.0 | 1.00 | 26.6 | 279.3 | 210.0 | 10.51 | 7.90 |
| | App. | 24 | 423.2 | 14 | 1350 | 315 | 1.7 | 33.0 | 1.00 | 32.2 | 315.0 | 315.0 | 9.80 | 9.80 |
| | App. | 25 | 455.0 | 15 | 1350 | 315 | 4.0 | 41.1 | 1.00 | 39.2 | 315.0 | 315.0 | 8.03 | 8.03 |
| | Camp. | 26 | 460.7 | 15 | 1350 | 315 | -9.0 | 21.5 | 1.00 | 27.1 | 279.3 | 210.0 | 10.29 | 7.74 |
| 5 | Camp. | 27 | 471.3 | 15 | 1364 | 315 | -3.2 | 22.0 | 1.00 | 23.7 | 279.3 | 210.0 | 11.78 | 8.86 |
| | App. | 28 | 530.9 | 15 | 1300 | 315 | 7.3 | 40.7 | 1.00 | 37.6 | 315.0 | 315.0 | 8.38 | 8.38 |
| | Camp. | 29 | 536.5 | 15 | 1300 | 315 | -5.9 | 20.0 | 1.00 | 23.5 | 279.3 | 210.0 | 11.88 | 8.93 |
| 6 | Camp. | 30 | 547.1 | 16 | 1366 | 315 | -2.8 | 20.7 | 1.00 | 22.2 | 279.3 | 210.0 | 12.59 | 9.46 |
| | Camp. | 31 | 563.1 | 16 | 1300 | 315 | -2.6 | 18.8 | 1.00 | 20.2 | 279.3 | 210.0 | 13.82 | 10.39 |
| | App. | 32 | 567.1 | 16 | 1300 | 315 | 5.0 | 34.6 | 1.00 | 32.4 | 315.0 | 315.0 | 9.71 | 9.71 |

Tabella 55 Verifica delle tensioni effettive – CF3 – Condizione di carico saltuaria

È possibile notare le tensioni agenti risultino ovunque inferiori rispetto alle tensioni ammissibili.

Inoltre, data la differenza dei fattori di sicurezza considerati (K e C), tale condizione di carico risulta non determinante.

12. VERIFICHE DI STABILITÀ ELASTICA PER DEPRESSIONE ALL'INTERNO DELLA CONDOTTA

La pressione critica di collasso della condotta per instabilità è valutata considerando la relazione di Von Mises corretta, riportata nell'articolo *"Collapse by Instability of Thin Cylindrical Shells Under External Pressure"* – D. F. Windenburg e C. Trilling (1934).

La formulazione considerata è valida per tubazioni semplicemente appoggiate alle estremità, aventi lunghezza inferiore rispetto alla lunghezza critica e sottoposte esclusivamente a pressione radiale, in dettaglio, la pressione critica risulta pari a:

$$P_{cr} = \frac{1}{3} \left(n^2 - 1 + \frac{\lambda_1 n^4 - \lambda_2 n^2 + \lambda_3}{n^2 - 1} \right) \frac{2E}{1 - \nu^2} \left(\frac{t}{D} \right)^3 + 2E \left(\frac{t}{D} \right) \frac{1}{(n^2 - 1) \left(n^2 \left(\frac{2L}{\pi D} \right)^2 + 1 \right)^2}$$

- P_{cr} Pressione critica;
- $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ Modulo elastico;
- $\nu = 0.3$ Coefficiente di Poisson;
- t Spessore della condotta;
- D Diametro della condotta;
- $\lambda_1 = \rho (2 - \rho) / (1 - \rho)^2$ Coefficiente vedi Windenburg e Trilling (1934);
- $\lambda_2 = \rho (3 + \nu + (1 - \nu^2) \rho)$ Coefficiente vedi Windenburg e Trilling (1934);
- $\lambda_3 = \rho (1 + \nu) - \rho^2 [\nu (1 + 2 \nu) + (1 - \nu^2) (1 - \rho \nu) (1 + (1 + \nu) / (1 - \nu) \rho)]$ Coefficiente vedi Windenburg e Trilling (1934);
- $\rho = 1 / (n^2 (2L/\pi D)^2 + 1)$ Coefficiente vedi Windenburg e Trilling (1934);
- $n = [\frac{3}{4} \pi^2 (1 - \nu^2)^{0.5} / ((L/D)^2 (t/D))]^{0.25}$ Numero dei lobi sull'intera circonferenza in fase di collasso (tale valore di n minimizza il carico critico P_{cr}).

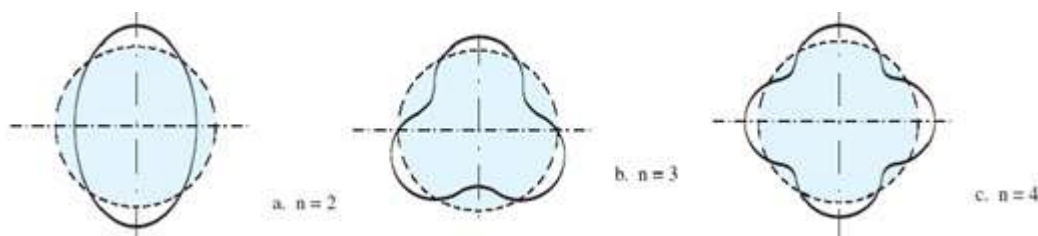


Figura 12.1: Possibili configurazioni di imbozzamento in fase di collasso

Nella verifica di stabilità elastica della condotta in depressione, si adottano i seguenti coefficienti di sicurezza:

$$\text{ASCE} \quad k = \frac{P_{cr}}{P_{min}} \geq 1.5$$

$$\text{CECT} \quad k = \frac{P_{cr}}{P_{min}} \geq 1.6$$

Tabella 56 Fattori di sicurezza – stabilità elastica nella condizione di carico eccezionale

12.1 Condotta 1

Nella tabella seguente, si riportano i risultati per ciascun spessore presente lungo il tracciato della condotta, è possibile notare come la pressione critica minima sia pari a 163kPa in corrispondenza della sezione caratterizzata dal minimo spessore (8mm). La condotta risulta dunque verificata.

| s | D | A | J | L | f _{yk} | E | u | n | ρ | λ ₁ | λ ₂ | λ ₃ | P _{cr} | P _{min} | P _{cr} /P _{min} | Ver. |
|------|------|--------------------|--------------------|-------|-----------------|--------|-----|-----|------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------------------------|------|
| [mm] | [mm] | [mm ²] | [mm ⁴] | [mm] | [MPa] | [MPa] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] | [kPa] | [kPa] | [-] | [-] |
| 8 | 1594 | 4E+04 | 1E+10 | 11330 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.02 | 163 | 100 | 1.6 | OK |
| 8 | 1550 | 4E+04 | 1E+10 | 11000 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.02 | 172 | 100 | 1.7 | OK |
| 9 | 1496 | 4E+04 | 1E+10 | 8966 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.02 | 347 | 100 | 3.5 | OK |
| 9 | 1450 | 4E+04 | 1E+10 | 9059 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 326 | 100 | 3.3 | OK |
| 10 | 1450 | 5E+04 | 1E+10 | 9059 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 392 | 100 | 3.9 | OK |
| 10 | 1450 | 5E+04 | 1E+10 | 9618 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 341 | 100 | 3.4 | OK |
| 11 | 1450 | 5E+04 | 1E+10 | 9612 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 411 | 100 | 4.1 | OK |
| 12 | 1450 | 6E+04 | 1E+10 | 9486 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 503 | 100 | 5.0 | OK |
| 14 | 1456 | 6E+04 | 2E+10 | 14990 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 450 | 100 | 4.5 | OK |
| 14 | 1400 | 6E+04 | 2E+10 | 6272 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.03 | 0.06 | 0.10 | 0.04 | 1761 | 100 | 17.6 | OK |
| 15 | 1400 | 7E+04 | 2E+10 | 9545 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 832 | 100 | 8.3 | OK |
| 16 | 1400 | 7E+04 | 2E+10 | 9484 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 978 | 100 | 9.8 | OK |
| 17 | 1400 | 8E+04 | 2E+10 | 9499 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 1130 | 100 | 11.3 | OK |
| 18 | 1400 | 8E+04 | 2E+10 | 9584 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 1288 | 100 | 12.9 | OK |
| 19 | 1400 | 8E+04 | 2E+10 | 9655 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 1466 | 100 | 14.7 | OK |
| 20 | 1400 | 9E+04 | 2E+10 | 9488 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 1696 | 100 | 17.0 | OK |
| 21 | 1400 | 9E+04 | 2E+10 | 9664 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 1893 | 100 | 18.9 | OK |
| 22 | 1404 | 1E+05 | 3E+10 | 8446 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.02 | 2408 | 100 | 24.1 | OK |
| 22 | 1350 | 9E+04 | 2E+10 | 7875 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.02 | 2742 | 100 | 27.4 | OK |
| 23 | 1350 | 1E+05 | 2E+10 | 8005 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.02 | 3004 | 100 | 30.0 | OK |
| 24 | 1350 | 1E+05 | 2E+10 | 3150 | 235 | 210000 | 0.3 | 3 | 0.05 | 0.11 | 0.17 | 0.06 | 9555 | 100 | 95.5 | OK |
| 24 | 1350 | 1E+05 | 2E+10 | 8080 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.02 | 3311 | 100 | 33.1 | OK |
| 25 | 1350 | 1E+05 | 3E+10 | 7948 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.02 | 3727 | 100 | 37.3 | OK |
| 25 | 1360 | 1E+05 | 3E+10 | 9396 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 3239 | 100 | 32.4 | OK |
| 24 | 1300 | 1E+05 | 2E+10 | 8036 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 3542 | 100 | 35.4 | OK |
| 25 | 1300 | 1E+05 | 2E+10 | 8029 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 3940 | 100 | 39.4 | OK |
| 25 | 1360 | 1E+05 | 3E+10 | 9096 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 3305 | 100 | 33.0 | OK |
| 25 | 1300 | 1E+05 | 2E+10 | 7911 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.03 | 0.06 | 0.02 | 3987 | 100 | 39.9 | OK |

Tabella 57 Verifica all'instabilità elastica per depressione in condotta 1

12.2 Condotta 3

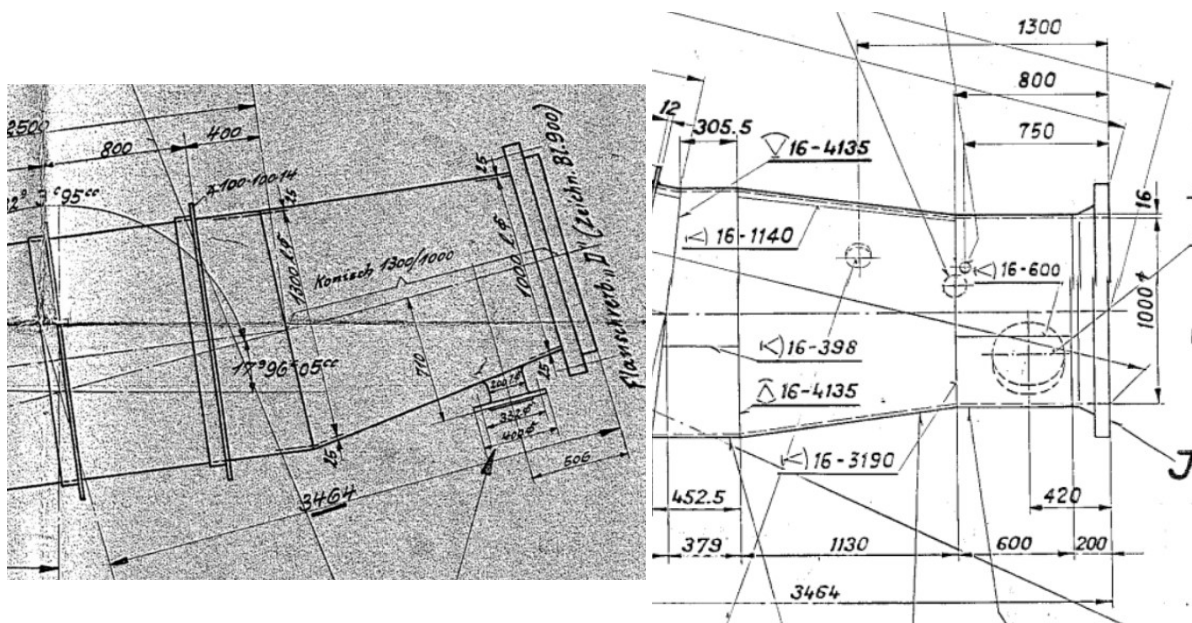
Nella tabella seguente, si riportano i risultati per ciascun spessore presente lungo il tracciato della condotta, è possibile notare come la pressione critica minima sia pari a 182kPa in corrispondenza del giunto di dilatazione a valle del blocco di ancoraggio FP3 caratterizzata da spessore pari a 10mm. La condotta risulta dunque verificata.

| s | D | A | J | L | f _{yk} | E | u | n | ρ | λ ₁ | λ ₂ | λ ₃ | P _{cr} | P _{min} | P _{cr} /P _{min} | Ver. |
|------|------|--------------------|--------------------|-------|-----------------|--------|-----|-----|------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------------------------|------|
| [mm] | [mm] | [mm ²] | [mm ⁴] | [mm] | [MPa] | [MPa] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] | [kPa] | [kPa] | [-] | [-] |
| 9 | 1588 | 45154 | 1E+10 | 11330 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.02 | 201 | 100 | 2.0 | OK |
| 9 | 1550 | 44080 | 1E+10 | 11000 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.02 | 0.04 | 0.02 | 212 | 100 | 2.1 | OK |
| 9 | 1488 | 42327 | 1E+10 | 8966 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.03 | 0.06 | 0.02 | 345 | 100 | 3.4 | OK |
| 9 | 1450 | 41252 | 1E+10 | 9059 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 326 | 100 | 3.3 | OK |
| 10 | 1450 | 45867 | 1E+10 | 9618 | 235 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 341 | 100 | 3.4 | OK |
| 10 | 1454 | 45993 | 1E+10 | 14990 | 275 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 182 | 100 | 1.8 | OK |
| 10 | 1400 | 44296 | 1E+10 | 6272 | 275 | 210000 | 0.3 | 3 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 521 | 100 | 5.2 | OK |
| 11 | 1400 | 48761 | 1E+10 | 9545 | 275 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 418 | 100 | 4.2 | OK |
| 12 | 1400 | 53231 | 1E+10 | 9484 | 275 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 509 | 100 | 5.1 | OK |
| 13 | 1400 | 57708 | 1E+10 | 9499 | 275 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 604 | 100 | 6.0 | OK |
| 14 | 1400 | 62191 | 2E+10 | 9584 | 275 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 705 | 100 | 7.0 | OK |
| 15 | 1400 | 66680 | 2E+10 | 9655 | 275 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 820 | 100 | 8.2 | OK |
| 15 | 1412 | 67246 | 2E+10 | 8446 | 315 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.02 | 998 | 100 | 10.0 | OK |
| 14 | 1350 | 59992 | 1E+10 | 7875 | 315 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.02 | 994 | 100 | 9.9 | OK |
| 15 | 1350 | 64324 | 1E+10 | 8005 | 315 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.04 | 0.06 | 0.02 | 1115 | 100 | 11.2 | OK |
| 15 | 1364 | 64984 | 2E+10 | 9396 | 315 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 874 | 100 | 8.7 | OK |
| 15 | 1300 | 61968 | 1E+10 | 8036 | 315 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 1132 | 100 | 11.3 | OK |
| 16 | 1366 | 69467 | 2E+10 | 9096 | 315 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.01 | 0.03 | 0.05 | 0.02 | 1059 | 100 | 10.6 | OK |
| 16 | 1300 | 66149 | 1E+10 | 7911 | 315 | 210000 | 0.3 | 2 | 0.02 | 0.03 | 0.06 | 0.02 | 1341 | 100 | 13.4 | OK |

Tabella 58 Verifica all'instabilità elastica per depressione in condotta 3

Le condotte forzate qui calcolate sono state considerate nel loro sviluppo a partire dall'esterno della camera valvole fino al blocco di ancoraggio a ridosso del muro di centrale.

Il dettaglio di tali elementi è indicato nella Figura 2, tratti dai dis. Escher-Wyss Bl. 897 e 3204953)



Nel presente capitolo, verrà effettuata un'analisi tensionale dei tronchetti in questione, sotto le seguenti ipotesi:

- Stanti le sopramenzionate ipotesi, si prenderà in esame solo la condizione di carico normale (pressione idrostatica più colpo d'ariete, pari a 3.48 MPa circa (si veda il cap. 5.3).

11.05.2020

1. la tensione circonferenziale (Mariotte), calcolata sul diametro maggiore (1'300 mm)
2. la tensione longitudinale, risultante dai seguenti contributi:
 - a) effetto Poisson, considerando che la dilatazione del tronchetto sia impedita;
 - b) effetto di variazione termica;
 - c) effetto dovuto al cono di riduzione, considerato in aria libera (nella condotta 3, il cono è parzialmente annegato nel calcestruzzo);
 - d) trazione dovuta alla spinta sulla valvola.

Lo spessore dei tronchetti in questione è pari a 25 mm nelle condotte 1 e 2 e pari a 16 mm nella condotta 3.

I dati geometrici dei tronchetti sono riassunti in Tabella 59.

| simbolo | um | CF1, 2 | CF3 | Note |
|---------|-----------------|-----------|-----------|-----------------------------------|
| sp | mm | 25 | 16 | spessore (costante sulle sezioni) |
| D1 | mm | 1'300 | 1'300 | diametro a monte |
| A1 | mm ² | 1'327'323 | 1'327'323 | sezione idraulica |
| As1 | mm ² | 104'065 | 66'149 | superficie di acciaio |
| | | | | |
| D2 | mm | 1'000 | 1'000 | diametro a valle |
| A2 | mm ² | 785'398 | 785'398 | sezione idraulica |
| As2 | mm ² | 80'503 | 51'070 | superficie di acciaio |

Tabella 59 Tronchetti in centrale – Caratteristiche geometriche

Considerata la pressione interna di riferimento $p=3.48$ MPa, le forze che si esercitano sui tronchetti terminali sono le seguenti

| simbolo | um | CF1, 2 | CF3 | Note |
|---------|----|-----------|-----------|---|
| F1 | N | 4'614'305 | 4'614'305 | Spinta idraulica sulla sezione a monte del cono |
| F2 | N | 2'730'358 | 2'730'358 | Spinta idraulica sulla sezione a valle del cono |
| F1-F2 | N | 1'883'947 | 1'883'947 | Spinta idraulica risultante sul cono |
| Fv | N | 2'730'358 | 2'730'358 | Spinta idraulica sulla valvola chiusa |

Considerati:

- una variazione termica $\Delta T = -10^{\circ}\text{K}$ (per massimizzare le tensioni);
- il coefficiente di efficienza delle saldature $z=0.85$ per le condotte 1 e 2 e $z=1.0$ per la condotta 3

le tensioni risultanti ed i fattori di sicurezza sullo snervamento sono riassunti nella Tabella 60 per la sezione a monte e nella Tabella 61 per la sezione a valle del cono.

| simbolo | um | CF1,2 | CF3 | Note |
|---------------|-----|--------|--------|--|
| σ_c | MPa | 106.34 | 141.23 | tensione circonferenziale |
| σ_{L1} | MPa | 31.90 | 42.37 | effetto Poisson; positivo in trazione |
| σ_{L2} | MPa | 29.08 | 24.72 | variazione termica ΔT ; positivo in trazione |
| σ_{L3} | MPa | 21.30 | 28.48 | spinta sul cono; positivo in trazione |
| σ_{L4} | MPa | 30.87 | 41.28 | spinta sulla valvola; positivo in trazione |

| simbolo | um | CF1,2 | CF3 | Note |
|----------------|-----|-------------|-------------|-------------------------------|
| σ_L tot | MPa | 113.15 | 136.84 | tensione longitudinale totale |
| σ_{eq} | MPa | 109.90 | 139.09 | tensione equivalente |
| Re | MPa | 235.00 | 315.00 | tensione di snervamento |
| Fs | - | 2.14 | 2.26 | Fattore di sicurezza |

Tabella 60 Tronchetti in centrale – Sezione a monte - Tensioni e fattori di sicurezza

| simbolo | um | CF1,2 | CF3 | Note |
|----------------|-----|-------------|-------------|--|
| σ_c | MPa | 81.80 | 108.64 | tensione circonferenziale |
| σ_{L1} | MPa | 24.54 | 32.59 | effetto Poisson; positivo in trazione |
| σ_{L2} | MPa | 29.08 | 24.72 | variazione termica ΔT ; positivo in trazione |
| σ_{L3} | MPa | 27.53 | 36.89 | spinta sul cono; positivo in trazione |
| σ_{L4} | MPa | 39.90 | 53.46 | spinta sulla valvola; positivo in trazione |
| σ_L tot | MPa | 121.05 | 147.66 | tensione longitudinale totale |
| σ_{eq} | MPa | 106.97 | 132.53 | tensione equivalente |
| Re | MPa | 235.00 | 315.00 | tensione di snervamento |
| Fs | - | 2.20 | 2.38 | Fattore di sicurezza |

Tabella 61 Tronchetti in centrale – Sezione a valle - Tensioni e fattori di sicurezza

Come si può notare, i fattori di sicurezza sono ampiamente positivi; il valore minimo richiesto dalle norme CECT è pari a 2.0 (pezzi speciali, condotte esposte).

14. ANALISI DI SENSITIVITÀ

14.1 Generalità

Il coefficiente di efficienza dei giunti (z) gioca un ruolo importante nel determinare il livello tensionale della condotta nelle diverse condizioni di esercizio.

Per evidenziare l'influenza di tale fattore, è stata condotta un'analisi di sensitività facendo variare il coefficiente di efficienza delle saldature z_s , nelle condizioni limite:

- a) $z_s = 0.70$, applicabile in tutti i casi in cui non siano disponibili informazioni sugli esiti dei controlli non distruttivi delle saldature;
- b) $z_s = 0.85$, applicabile ai casi in cui siano disponibili parziali informazioni sugli esiti dei controlli non distruttivi delle saldature;
- c) $z_s = 1.00$, applicabile ipotizzando che le saldature siano state correttamente testate secondo le prescrizioni dell'epoca.

Il risultato è riportato sinteticamente nei grafici seguenti, in cui sono evidenziati i fattori di sicurezza delle condotte nelle condizioni limite sopracitate; questo consente di esprimere un giudizio complessivo sul grado di affidabilità di esercizio della condotta, essendo i fattori di sicurezza valutati tramite il rapporto tra la tensione di snervamento del materiale e la tensione equivalente calcolata in ciascuna delle sezioni della condotta analizzate ($F_s = R_e / \sigma_{eff}$).

Le analisi sono state effettuate per la condizione attuale e per una proiezione futura a 40 anni, tenendo conto di un tasso medio di usura pari a 0.0125 mm/anno per le condotte 1 e 2 e di 0.0128 mm/anno per la condotta 3 (si veda in proposito il rapporto 7108.1-R-002).

Per quanto riguarda le analisi nella condizione attuale, è opportuno segnalare che la quasi totalità delle tubazioni analizzate evidenzia uno spessore superiore a quello riportato sui disegni di progetto, con cui sono state effettuate le valutazioni; solo in pochi tubi delle condotte 1 e 2 sono stati evidenziati alcune zone in sottospessore, la cui importanza in valore assoluto è modesta (inferiore a -0.4 mm).

Per quanto riguarda la proiezione a 40 anni, il numero dei tubi in sottospessore delle condotte 1 e 2 aumenterebbe in maniera significativa, pur sempre evidenziandosi un limitato valore assoluto del sottospessore (mediamente inferiore a -0.4 mm); solo nel tubo 45 si evidenzerebbe un sottospessore più marcato, pari a quasi 1 mm (-0.8 e -0.9 mm rispettivamente per le condotte 1 e 2). In ogni caso, le analisi di sensitività nella proiezione a 40 anni tengono conto di una generale riduzione dello spessore di disegno pari a 0.5 mm, eccezion fatta per i tubi n. 45 e 48, dove lo spessore è stato decrementato ulteriormente, per tenere conto del sottospessore già attualmente esistente. Essendo lo spessore attuale di quasi tutti i tubi maggiore di quello a disegno, una riduzione pari a 0.5 mm rispetto ai valori di disegno equivarrebbe a considerare un tasso di usura nel tempo maggiore di quello stimato.

Infine, è stata condotta un'indagine anche per un possibile incremento del colpo d'ariete in centrale, che potrebbe subire un aumento con l'installazione di nuovo gruppi. AET ha comunicato che il valore del nuovo colpo d'ariete è pari al 10% della pressione statica, contro il 4% della condizione attuale, portando la pressione di esercizio in caso normale da 3.48 MPa (vedi Tabella 7) a 3.68 MPa. Anche questa indagine è stata sviluppata sia per la condizione attuale delle condotte che per la proiezione futura.

14.2 Situazione attuale

14.2.1 Condotte 1 e 2

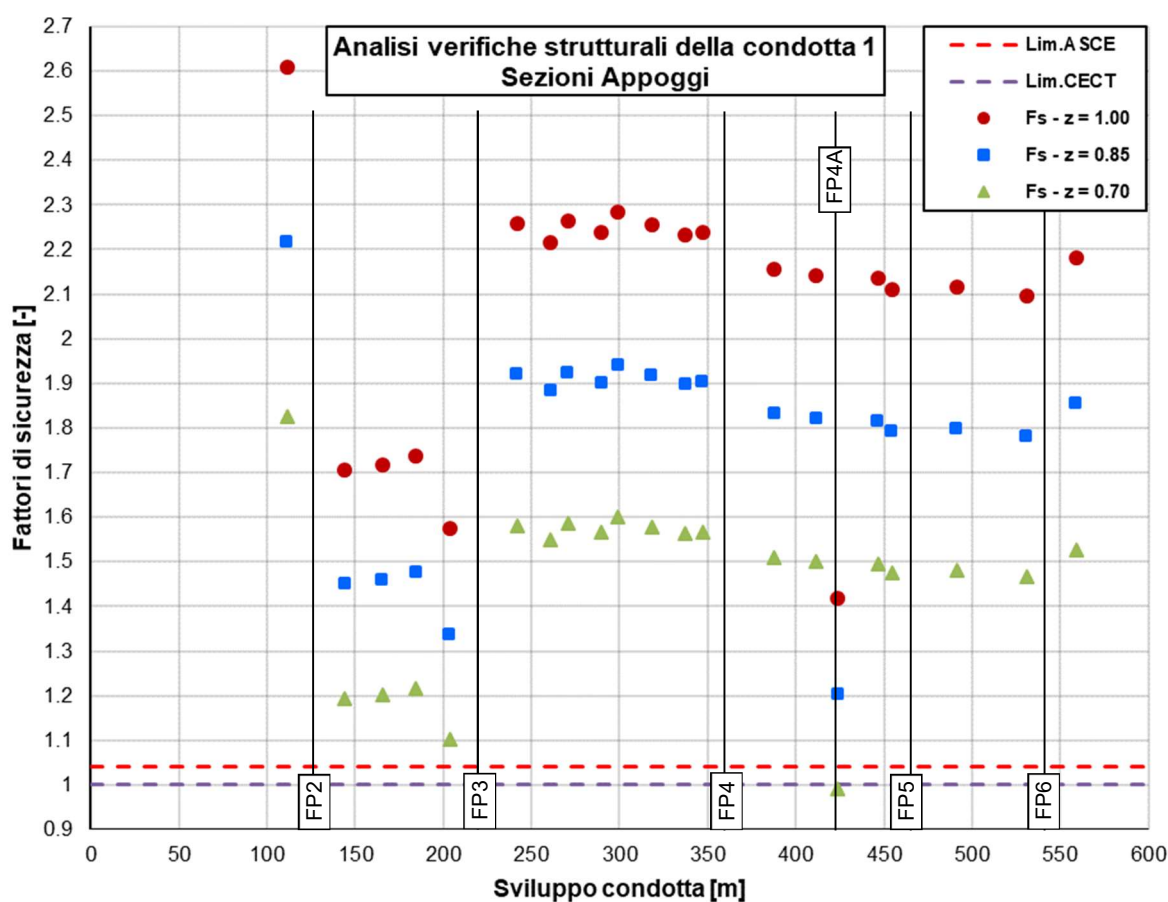


Figura 3 Fattori di sicurezza – Condotte 1 – Condizione di carico Normale – Sez. Appoggi

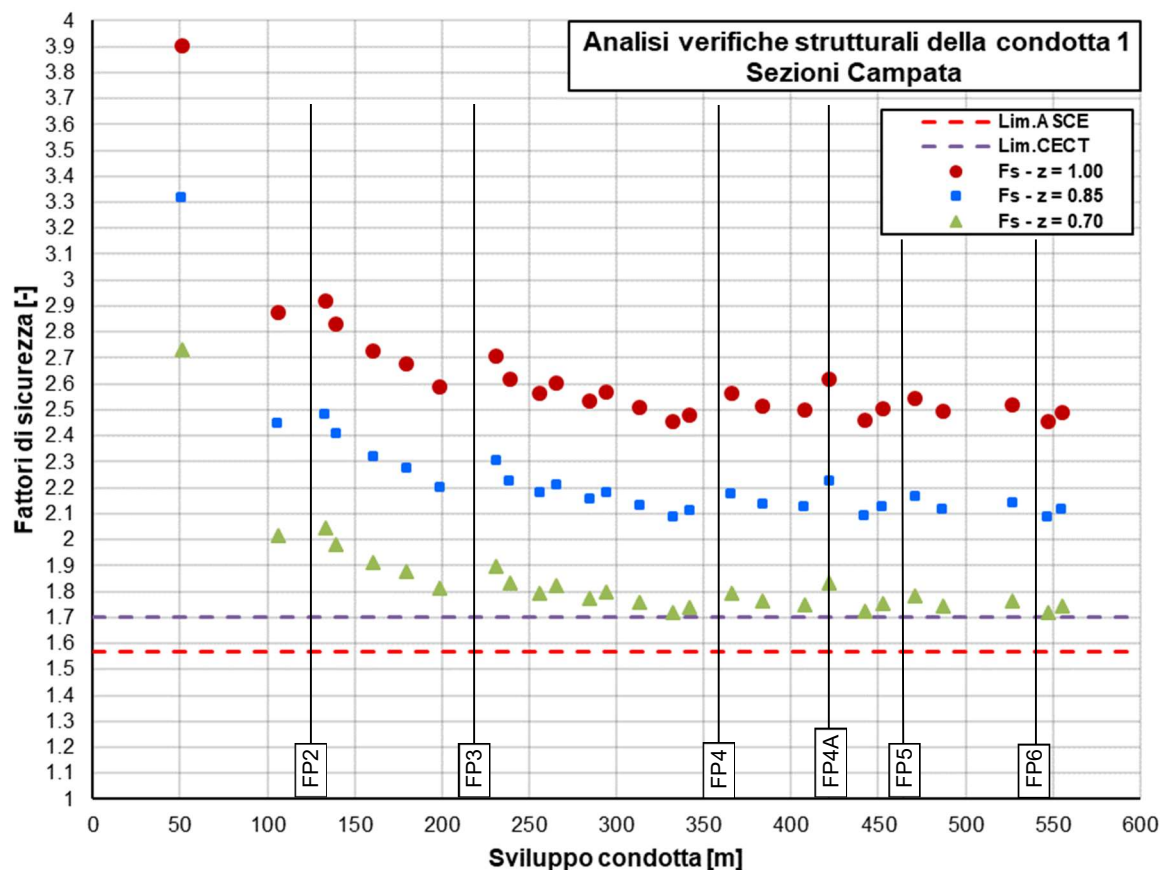


Figura 4 Fattori di sicurezza – Condotta 1 – Condizione di carico Normale – Sez. Campata

Per le sezioni in appoggio, il fattore di sicurezza risulta più penalizzato ove non sono stati utilizzati anelli di rinforzo, come nella tratta FP1-FP2.

Considerando un coefficiente di efficienza delle saldature $z_s=0.70$ (cioè in assenza di qualsiasi controllo, come definito dalle attuali norme relative alle condotte ed alle attrezzature in pressione), si può osservare come, in linea di massima, i fattori di sicurezza sugli appoggi sono quasi ovunque superiori a $1.45 \div 1.50$ (contro un minimo di 1.0), ad eccezione:

- degli appoggi della tratta 2, in cui il fattore di sicurezza scende a $1.2 \div 1.1$ (comunque ancora accettabile);
- nell'appoggio del FP4A (sez. 32) in cui il fattore di sicurezza scende al di sotto di 1.0. Ciò si verifica perché, in corrispondenza di questo appoggio, si scarica una forza concentrata dovuta al cambio di direzione (vedi 10.2.1.1).

Per quanto riguarda le tensioni in campata, si può notare come il fattore di sicurezza di 1.7 richiesto dalle CECT possa essere raggiunto praticamente ovunque anche considerando un coefficiente di efficienza delle saldature $z_s=0.70$ (cioè in assenza di qualsiasi controllo, come definito dalle attuali norme relative alle condotte ed alle attrezzature in pressione). Il manuale ASCE prevede un fattore di sicurezza sullo snervamento pari a $235/150 = 1.57$, perciò i requisiti sono meno stringenti che non quelli di CECT.

Considerando un coefficiente di efficienza delle saldature pari a $z_s=0.85$ (fattore che sembra essere stato assunto alla base del dimensionamento, come riportato sui documenti storici – vedi 7108.0-R-001), il fattore di sicurezza sugli appoggi risulterebbe quasi ovunque maggiore o uguale a 1.45 (nell'appoggio F4a sale oltre a 1.2), mentre in campata si avrebbero fattori di sicurezza oltre il valore di 2.0.

14.2.2 Condotta 3

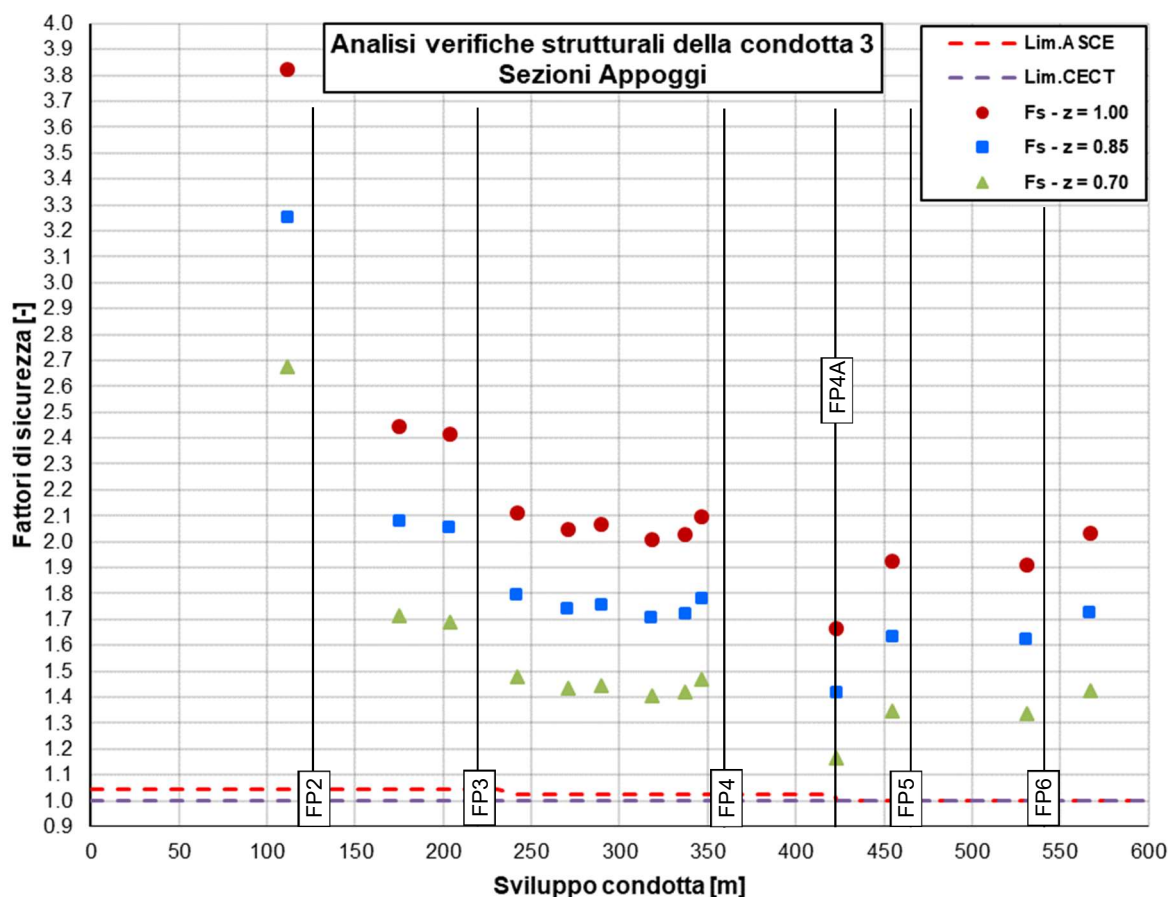


Figura 5 Fattori di sicurezza – Condotta 3 – Condizione di carico Normale – Sez. Appoggi

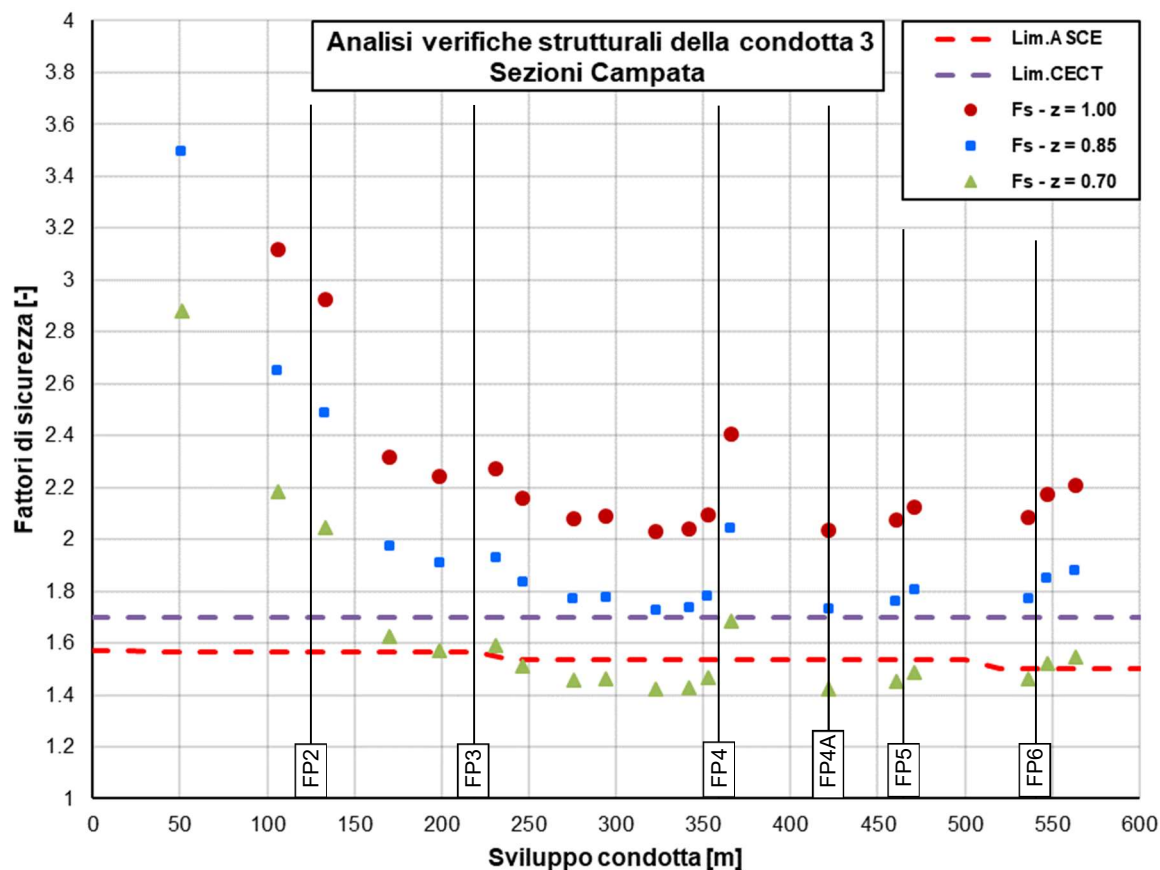


Figura 6 Fattori di sicurezza – Condotta 3 – Condizione di carico Normale – Sez. Campata

Diversamente da quanto verificato per le condotte 1 e 2, nella condotta 3 l'adozione di spessori di rinforzo in corrispondenza degli appoggi fa sì che i relativi coefficienti di sicurezza siano maggiori di quelli che si trovano in campata; in particolare, anche considerando un coefficiente di efficienza delle saldature $z_s=0.70$, si osserva che il fattore di sicurezza è quasi ovunque maggiore di 1.4, fatta eccezione per l'appoggio 4a per le ragioni viste più sopra, e per alcuni appoggi più a valle, dove comunque il fattore di sicurezza rimane alto ($F_s > 1.2$).

Per quanto riguarda le tensioni in campata, si può notare come il fattore di sicurezza di 1.7 richiesto dalle CECT possa essere raggiunto ovunque anche considerando un coefficiente di efficienza delle saldature $z_s=0.85$ (cioè adottando controlli a spot). Il manuale ASCE prevede un fattore di sicurezza sullo snervamento pari a $235/150 = 1.57$ (fino a 1.50, a seconda del materiale), perciò i requisiti sono meno stringenti che non quelli di CECT.

Dal momento che la condotta è stata eseguita in anni più recenti, si può supporre che le saldature siano state testate correttamente, perciò si può considerare l'adozione di un coefficiente $z_s=1.0$, in base al quale i fattori di sicurezza sono ovunque al di sopra del valore di 2.0

14.2.3 Tronchetti in centrale

Ripetendo le analisi di cui al cap. 13, si ottengono i fattori di sicurezza riportati nella seguente Tabella 62.

| Coeff z_s | Sezione a monte | | Sezione a valle | |
|-------------|-----------------|------|-----------------|------|
| | CF1 e 2 | CF3 | CF1 e 2 | CF3 |
| 0.70 | 1.76 | 1.59 | 1.81 | 1.66 |
| 0.85 | 2.14 | 1.93 | 2.20 | 2.02 |
| 1.00 | 2.52 | 2.26 | 2.58 | 2.38 |

Tabella 62 Tronchetti in centrale – Fattori di sicurezza per differenti coefficienti di efficienza delle saldature

Come si vede, con un coefficiente di efficienza pari a 0.85 i fattori di sicurezza sono superiori al minimo richiesto da CECT ($F_s=2.0$ per pezzi speciali di condotte esposte), con l'eccezione della sezione a monte del tronchetto della condotta 3. Peraltro, come già accennato, il cono di riduzione di tale unità è annegato per metà nel calcestruzzo del muro di centrale; considerando per la sezione a monte un diametro intermedio (ad es. 1'150 mm), il fattore di sicurezza risulterebbe positivo ($F_s=2.15$ a monte, incrementandosi anche quello relativo alla sezione di valle fino a $F_s=2.24$).

14.3 Proiezione futura

14.3.1 Condotte 1 e 2

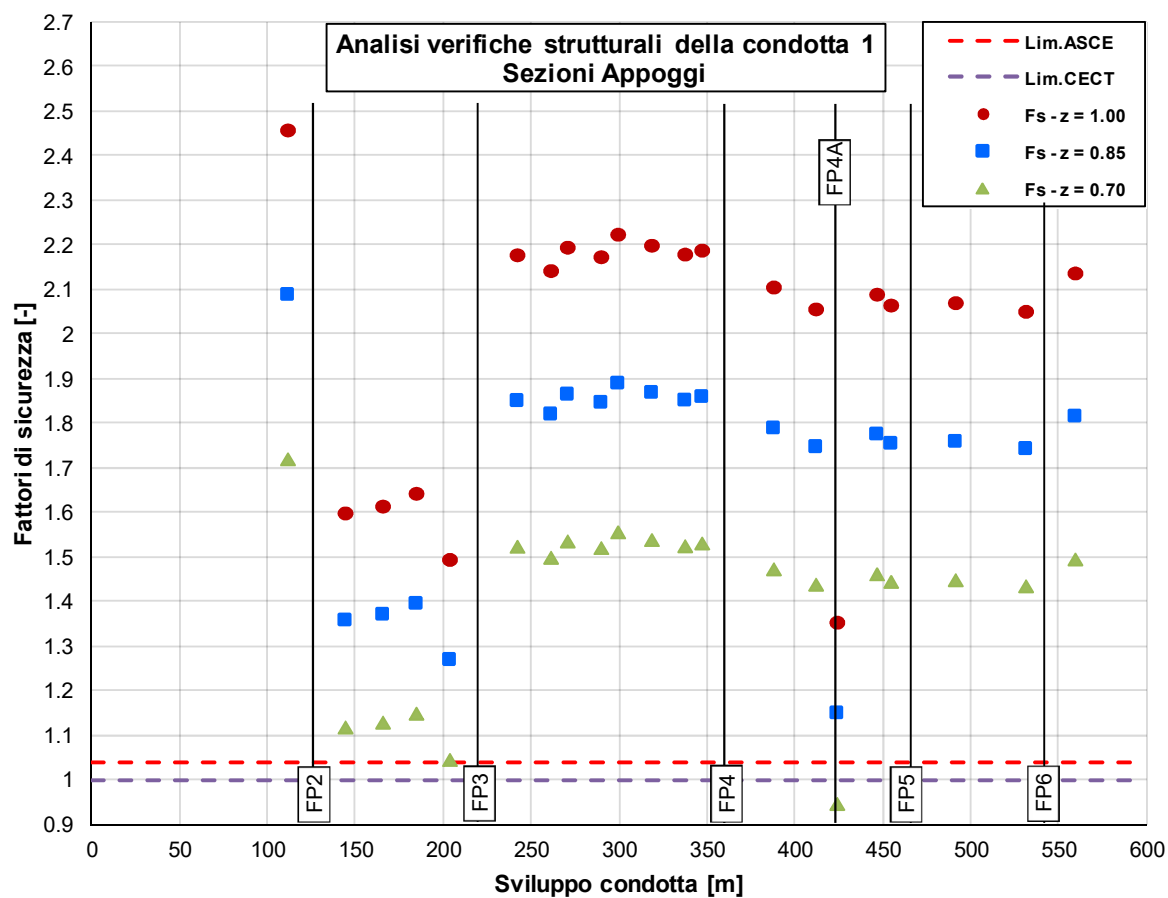


Figura 7 Fattori di sicurezza – Condotte 1 – Condizione di carico Normale – Sez. Appoggi

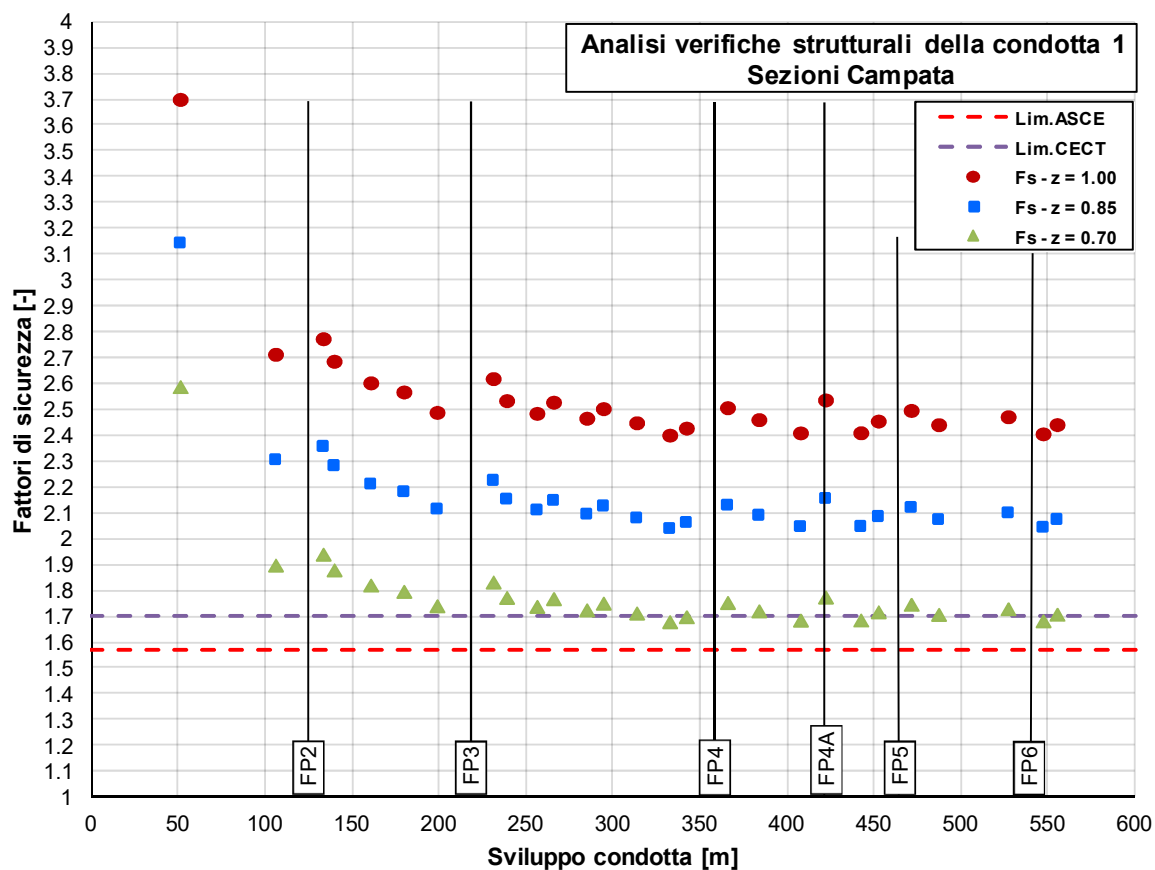


Figura 8 Fattori di sicurezza – Condotta 1 – Condizione di carico Normale – Sez. Campata

In generale, valgono le stesse considerazioni già evidenziate nel cap. 14.2.1.

In campata, non si evidenziano criticità, potendo le sezioni soddisfare in maniera generale ai criteri di verifica più stringenti (CECT).

Per gli appoggi, vale quanto già detto più sopra.

14.3.2 Condotta 3

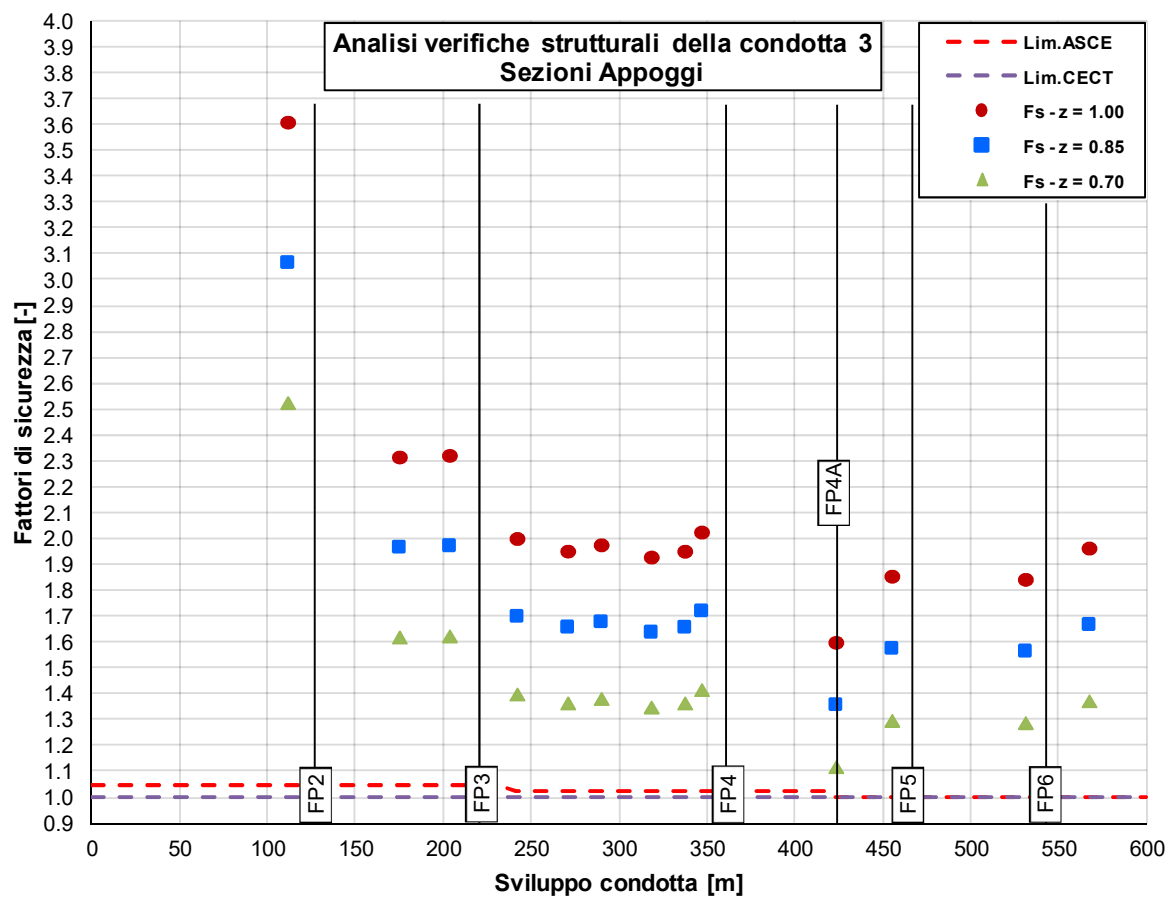


Figura 9 Fattori di sicurezza – Condotta 3 – Condizione di carico Normale – Sez. Appoggi

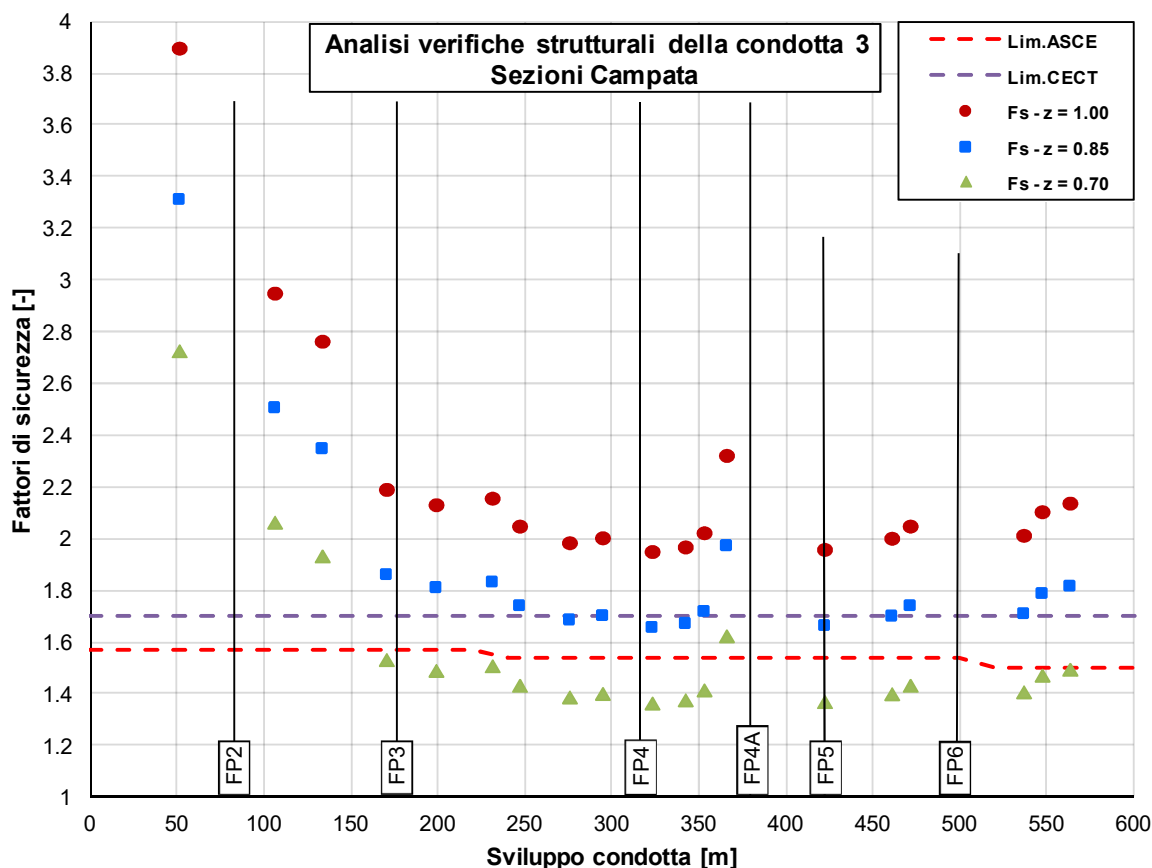


Figura 10 Fattori di sicurezza – Condotta 3 – Condizione di carico Normale – Sez. Campata

Come per le condotte 1 e 2, anche per la condotta 3 valgono le considerazioni relative, già espresse al cap. 14.2.2.

14.3.3 Tronchetti in centrale

Considerando uno spessore ridotto di 0.5 mm (0.512 mm per la condotta 3), ripetendo le analisi di cui al cap. 13, si ottengono i fattori di sicurezza riportati nella seguente Tabella 63.

| Coeff zs | Sezione a monte | | Sezione a valle | |
|----------|-----------------|------|-----------------|------|
| | CF1 e 2 | CF3 | CF1 e 2 | CF3 |
| 0.70 | 1.73 | 1.54 | 1.78 | 1.62 |
| 0.85 | 2.10 | 1.87 | 2.16 | 1.96 |
| 1.00 | 2.47 | 2.20 | 2.54 | 2.31 |

Tabella 63 Tronchetti in centrale – Fattori di sicurezza per differenti coefficienti di efficienza delle saldature

Come si vede, con un coefficiente di efficienza pari a 0.85 i fattori di sicurezza per i tronchetti delle condotte 1 e 2 sono superiori al minimo richiesto da CECT ($F_s=2.0$ per pezzi speciali di condotte esposte), mentre per la condotta 3 valgono le precisazioni già espresse al precedente cap. 14.2.3: considerando un diametro intermedio, i fattori di sicurezza risultanti sarebbero pari a 2.09 e 2.18 per le sezioni di monte e di valle rispettivamente.

14.4 Situazione attuale – Colpo d'ariete incrementato

14.4.1 Condotte 1 e 2

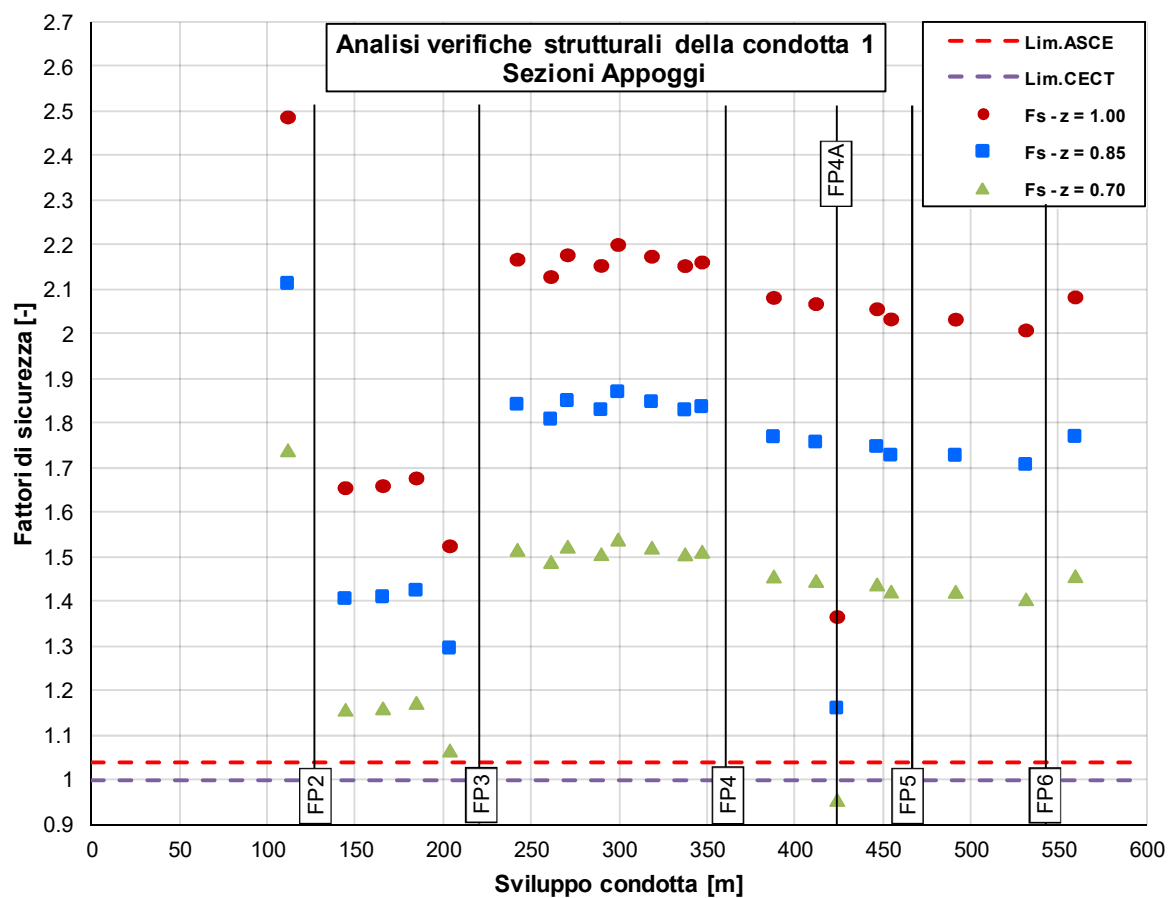


Figura 11 Fattori di sicurezza – Condotte 1 – Condizione di carico Normale – Sez. Appoggi

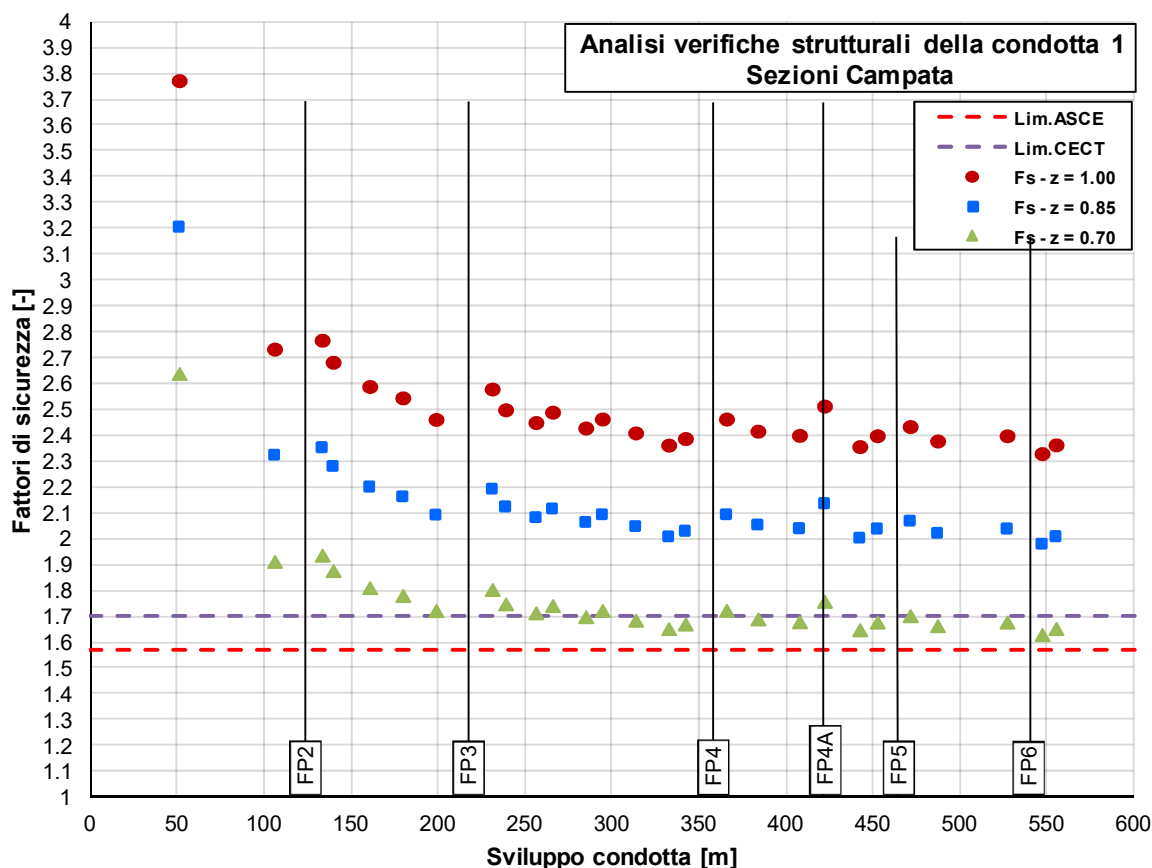


Figura 12 Fattori di sicurezza – Condotta 1 – Condizione di carico Normale – Sez. Campata

L'incremento del colpo d'ariete provoca una riduzione del fattore di sicurezza.

Per quanto riguarda le tensioni sugli appoggi, in linea generale, valgono le stesse considerazioni già esposte in precedenza (cap. 14.2.1).

Per quanto riguarda le tensioni in campata, considerando un coefficiente di efficienza delle saldature pari a $z_s=0.70$ (cioè in assenza di qualsiasi controllo, come definito dalle attuali norme relative alle condotte ed alle attrezzature in pressione), il fattore di sicurezza è comunque ampiamente positivo, al di sopra del minimo richiesto da ASCE, anche se leggermente al di sotto del minimo richiesto da CECT

Considerando un coefficiente di efficienza delle saldature pari a $z_s=0.85$ (fattore che sembra essere stato assunto alla base del dimensionamento, come riportato sui documenti storici – vedi 7108.0-R-001), il fattore di sicurezza sugli appoggi risulterebbe quasi ovunque maggiore o uguale a 1.3 (nell'appoggio F4a sale oltre a 1.17), mentre in campata si avrebbero fattori di sicurezza oltre il valore di 2.0.

14.4.2 Condotta 3

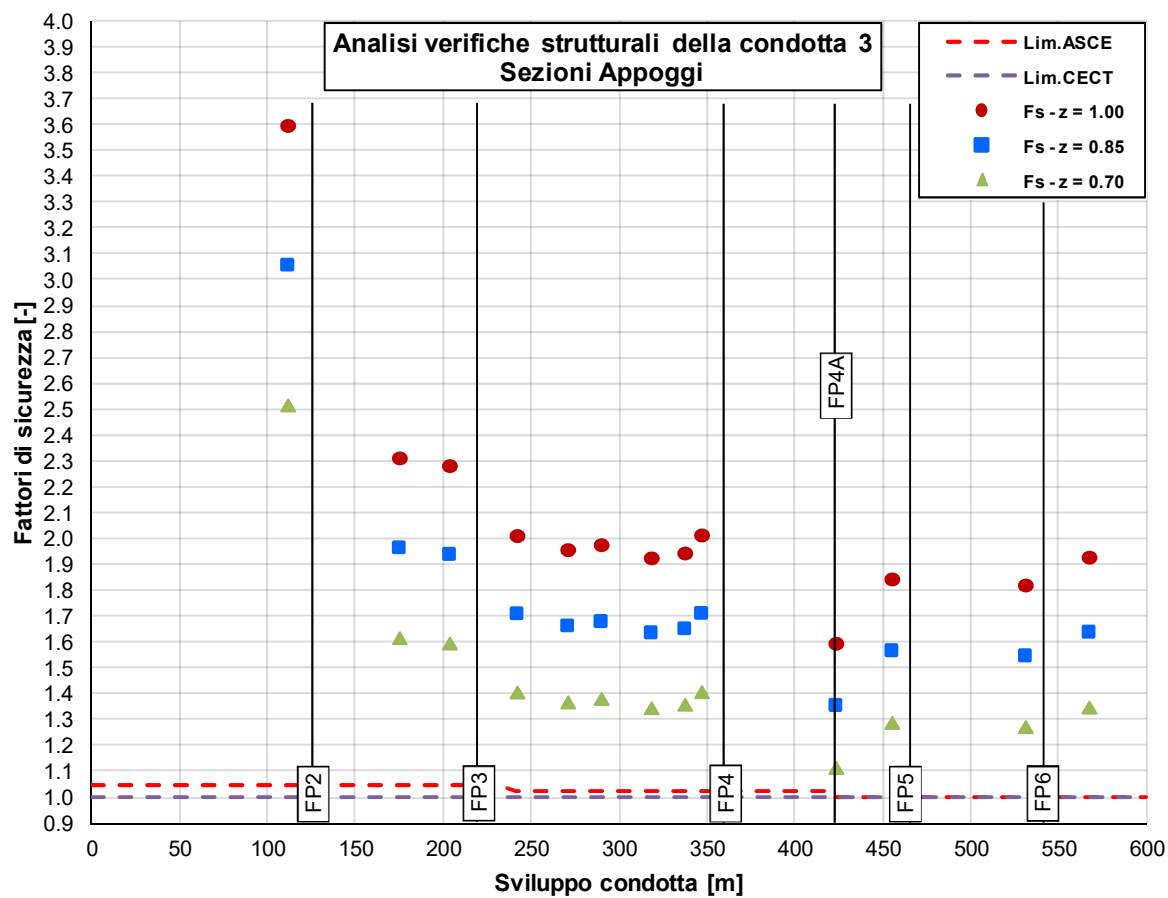


Figura 13 Fattori di sicurezza – Condotta 3 – Condizione di carico Normale – Sez. Appoggi

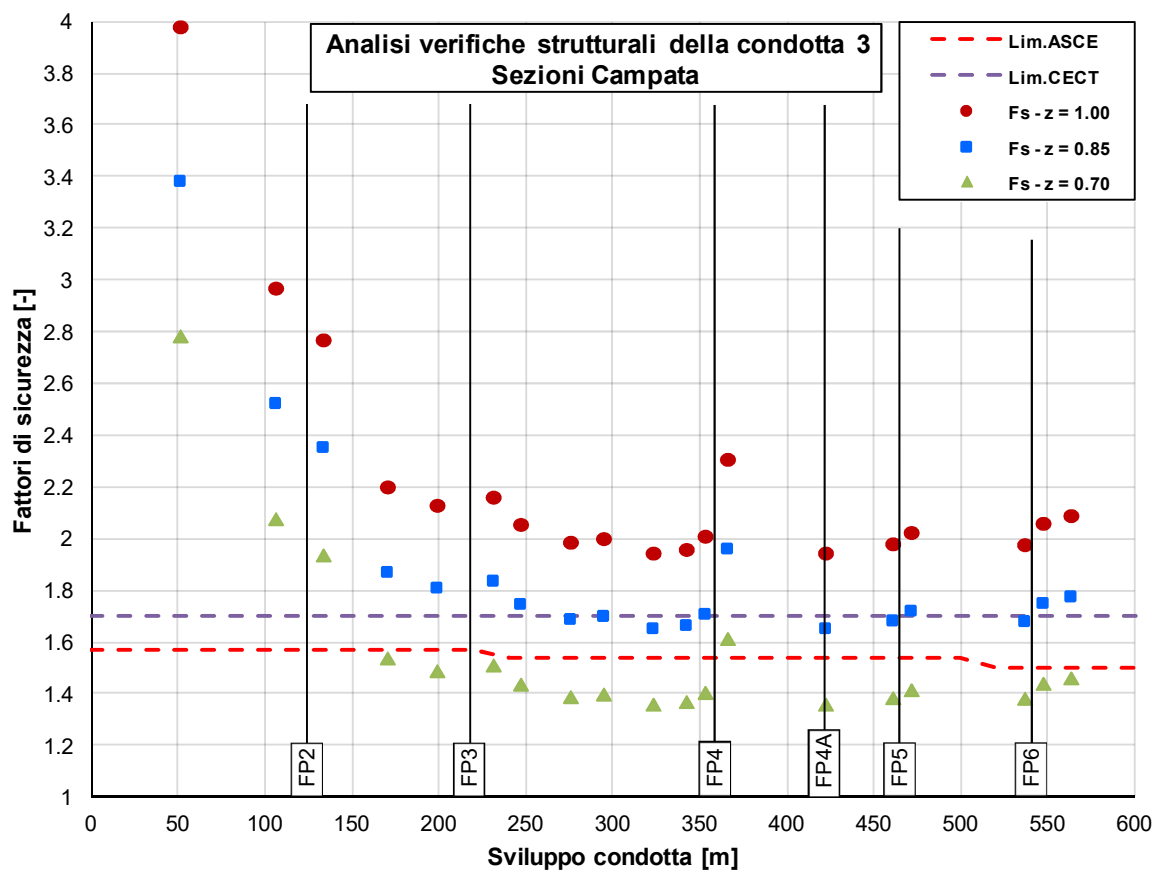


Figura 14 Fattori di sicurezza – Condotta 3 – Condizione di carico Normale – Sez. Campata

Anche in questo caso, le considerazioni generali sono le medesime già esposte nel cap. 14.2.2.

Per le sezioni in appoggio, anche considerando un coefficiente di efficienza delle saldature $z_s=0.70$, si osserva che il fattore di sicurezza sarebbe quasi ovunque maggiore di 1.3, fatta eccezione per l'appoggio 4a per le ragioni viste più sopra, e per alcuni appoggi più a valle, dove comunque il fattore di sicurezza rimarrebbe al di sopra del limite minimo ($F_s > 1.1$).

Per quanto riguarda le tensioni in campata, si può notare come il fattore di sicurezza di 1.7 richiesto dalle CECT possa essere raggiunto praticamente ovunque considerando un coefficiente di efficienza delle saldature $z_s=0.85$ (cioè adottando controlli a spot).

Dal momento che la condotta è stata eseguita in anni più recenti, si può supporre che le saldature siano state testate correttamente, perciò si può considerare l'adozione di un coefficiente $z_s=1.0$, in base al quale i fattori di sicurezza rimarrebbero ovunque al di sopra del valore di 1.9.

14.4.3 Tronchetti in centrale

Considerando una pressione in centrale pari a 3.68 MPa (colpo d'ariete incrementato), ripetendo le analisi di cui al cap. 13, si ottengono i fattori di sicurezza riportati nella seguente Tabella 64.

| Coeff z_s | Sezione a monte | | Sezione a valle | |
|-------------|-----------------|------|-----------------|------|
| | CF1 e 2 | CF3 | CF1 e 2 | CF3 |
| 0.70 | 1.68 | 1.51 | 1.73 | 1.58 |
| 0.85 | 2.04 | 1.83 | 2.10 | 1.92 |
| 1.00 | 2.40 | 2.15 | 2.47 | 2.26 |

Tabella 64 Tronchetti in centrale – Fattori di sicurezza per differenti coefficienti di efficienza delle saldature

Come si vede, con un coefficiente di efficienza pari a 0.85 i fattori di sicurezza per le condotte 1 e 2 sono superiori al minimo richiesto da CECT ($F_s=2.0$ per pezzi speciali di condotte esposte), mentre ciò non risulta verificato nella condotta 3. Peraltro, come già accennato, il cono di riduzione di tale unità è annegato per metà nel calcestruzzo del muro di centrale; considerando per la sezione a monte un diametro intermedio (ad es. 1'150 mm), il fattore di sicurezza risulterebbe positivo ($F_s=2.05$ a monte, incrementandosi anche quello relativo alla sezione di valle fino a $F_s=2.13$).

14.5 Proiezione futura – Colpo d'ariete incrementato

14.5.1 Condotte 1 e 2

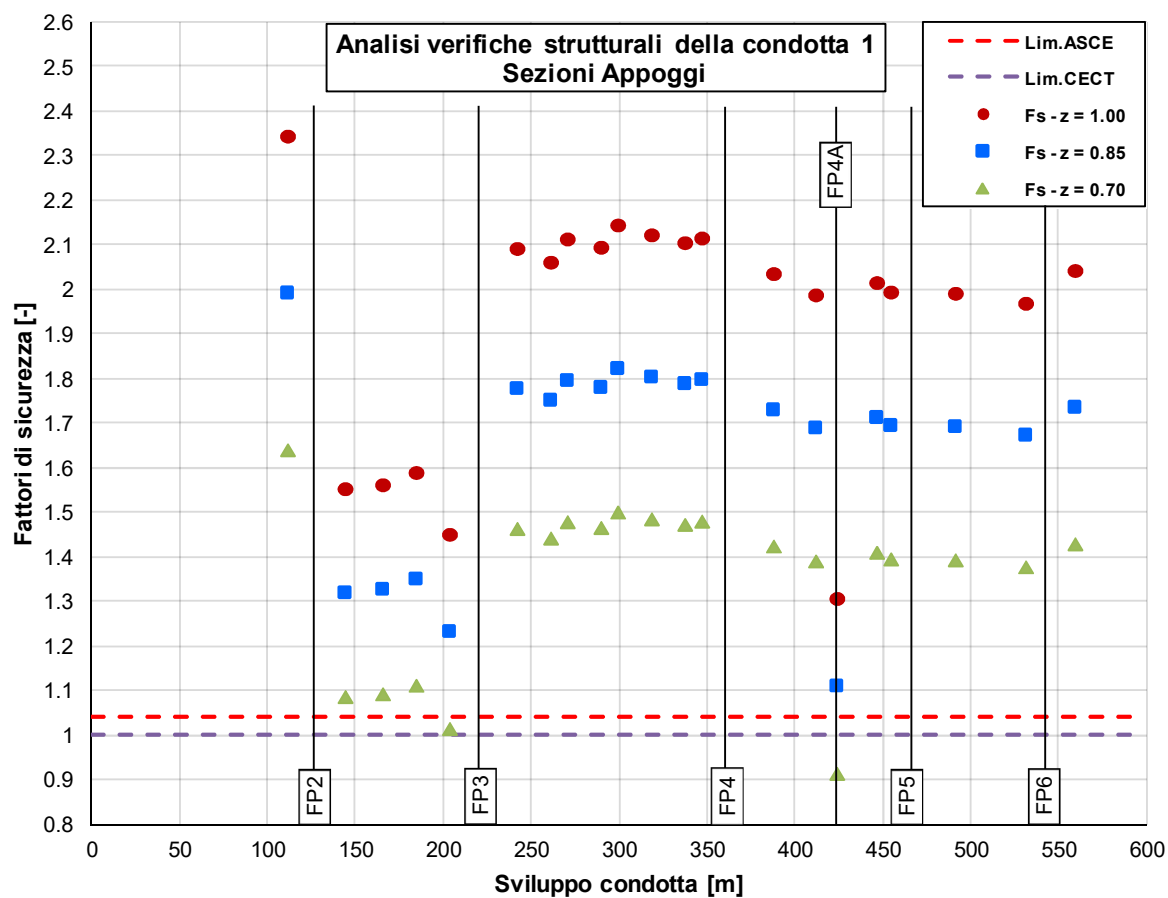


Figura 15 Fattori di sicurezza – Condotte 1 – Condizione di carico Normale – Sez. Appoggi

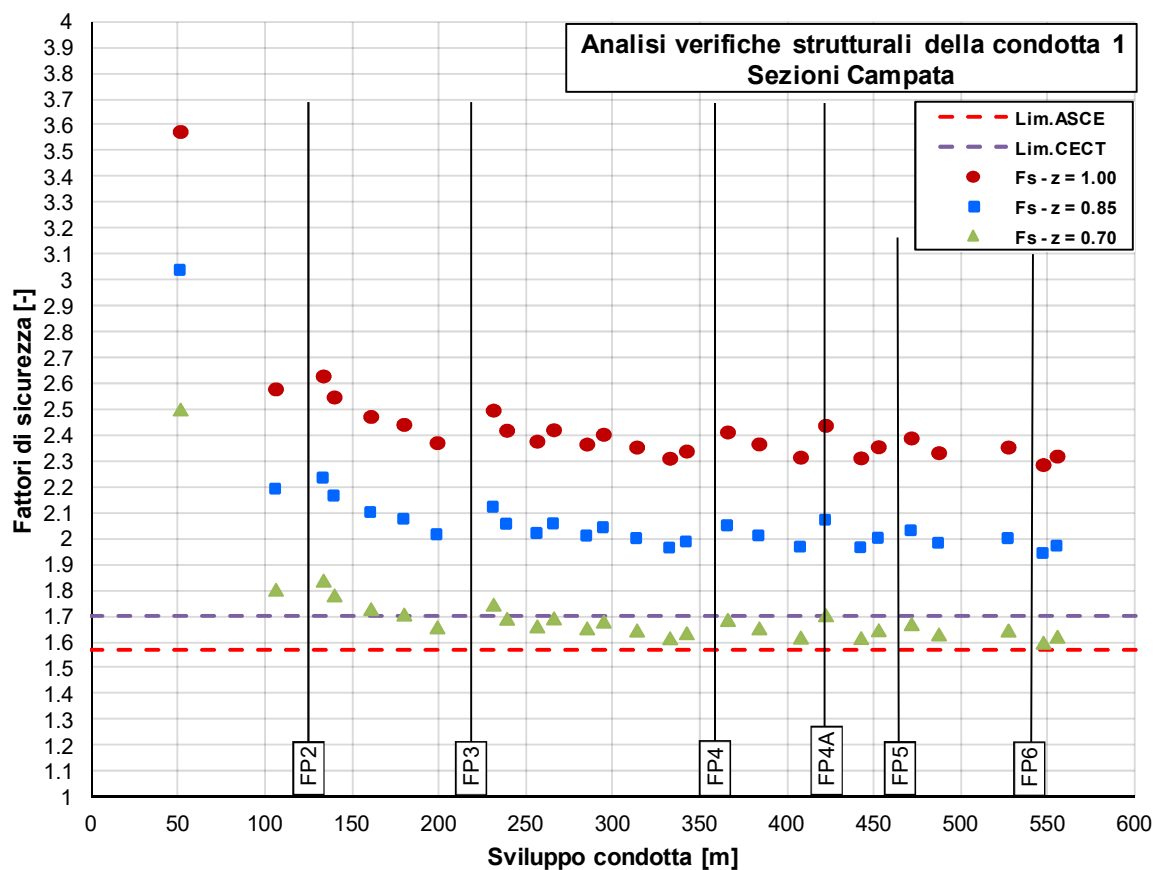


Figura 16 Fattori di sicurezza – Condotta 1 – Condizione di carico Normale – Sez. Campata

In generale, valgono le stesse considerazioni già evidenziate nel cap. 14.3.1.

In campata, non si evidenziano particolari criticità, potendo le sezioni soddisfare in maniera generale ai criteri di verifica di ASCE, anche se non a quelli di CECT.

Per gli appoggi, vale quanto già detto più sopra.

14.5.2 Condotta 3

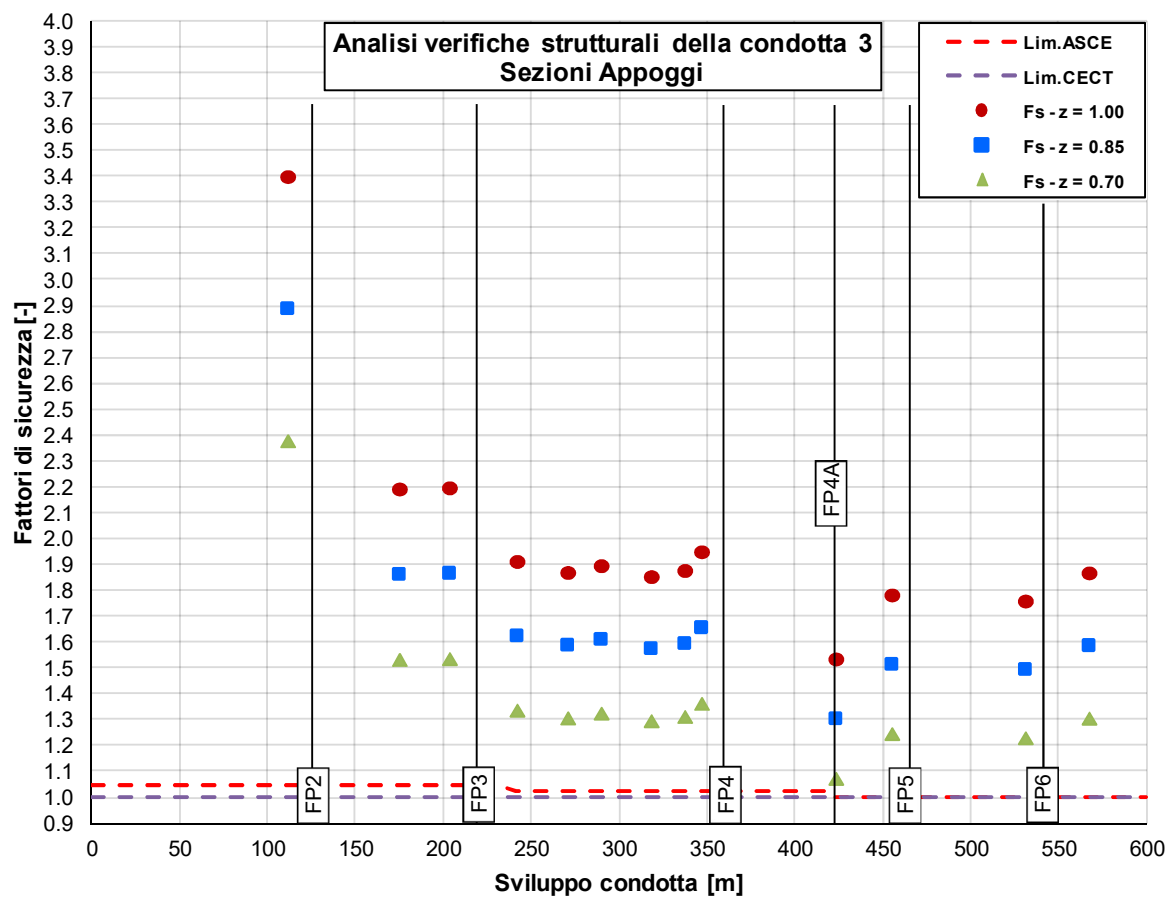


Figura 17 Fattori di sicurezza – Condotta 3 – Condizione di carico Normale – Sez. Appoggi

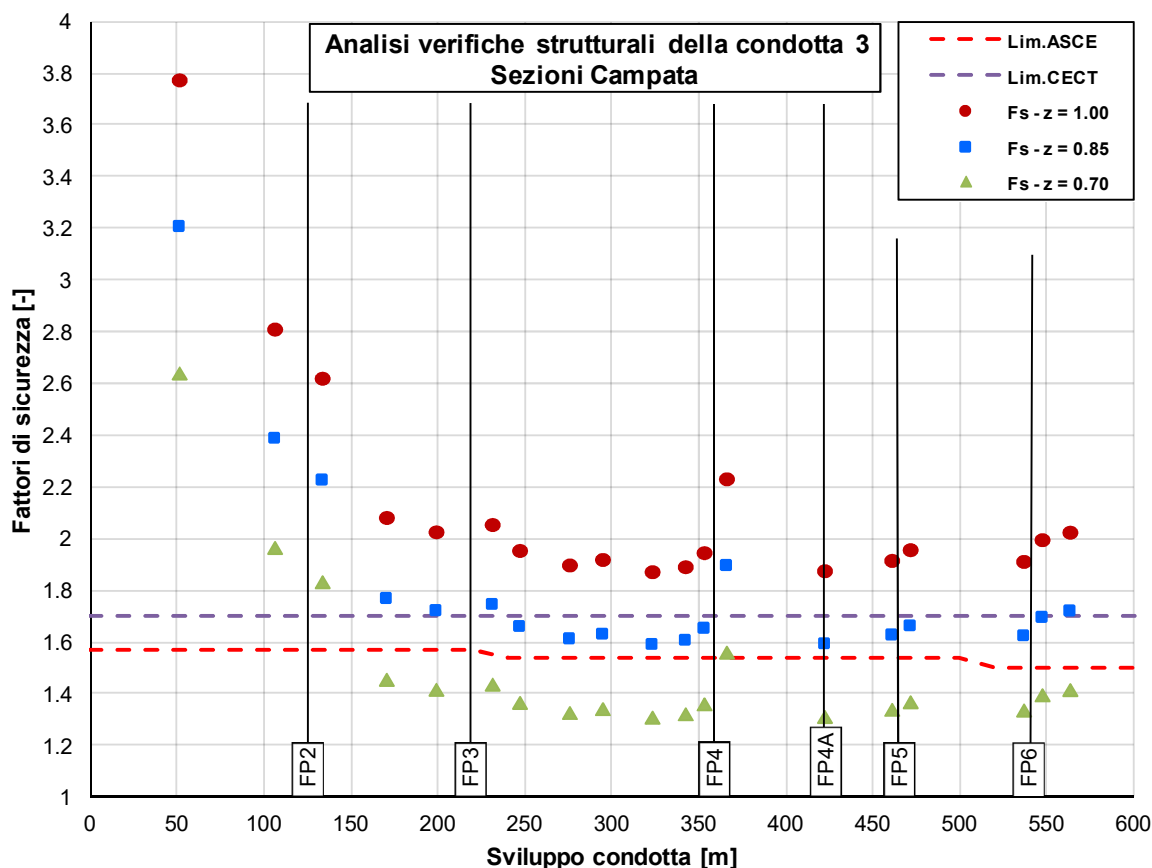


Figura 18 Fattori di sicurezza – Condotta 3 – Condizione di carico Normale – Sez. Campata

Come per le condotte 1 e 2, anche per la condotta 3 valgono le considerazioni relative, già espresse al cap. 14.3.2.

14.5.3 Tronchetti in centrale

Considerando:

- uno spessore ridotto di 0.5 mm (0.512 mm per la condotta 3);
- una pressione in centrale pari a 3.68 MPa (colpo d'ariete incrementato)

ripetendo le analisi di cui al cap. 13, si ottengono i fattori di sicurezza riportati nella seguente Tabella 65.

| Coeff zs | Sezione a monte | | Sezione a valle | |
|----------|-----------------|------|-----------------|------|
| | CF1 e 2 | CF3 | CF1 e 2 | CF3 |
| 0.70 | 1.65 | 1.46 | 1.70 | 1.54 |
| 0.85 | 2.00 | 1.77 | 2.07 | 1.87 |
| 1.00 | 2.36 | 2.09 | 2.43 | 2.20 |

Tabella 65 Tronchetti in centrale – Fattori di sicurezza per differenti coefficienti di efficienza delle saldature

Come si vede, con un coefficiente di efficienza pari a 0.85 i fattori di sicurezza per i tronchetti delle condotte 1 e 2 sono superiori al minimo richiesto da CECT ($F_s=2.0$ per pezzi speciali di condotte

esposte), mentre per la condotta 3 valgono le precisazioni già esposte al precedente cap. 14.2.3: considerando un diametro intermedio, i fattori di sicurezza risultanti sarebbero pari a 1.99 e 2.07 per le sezioni di monte e di valle rispettivamente.

15. CONCLUSIONI

La presente relazione è stata redatta al fine di verificare lo stato attuale delle condotte forzate dell'impianto idroelettrico del Piottino.

A partire dai principali elaborati progettuali messi a disposizione è stato possibile modellare l'intera condotta in modo tale da individuare le principali sollecitazioni agenti su essa nelle varie condizioni di carico imposte dagli standard usualmente utilizzati come riferimento per il dimensionamento e la verifica di condotte forzate (CECT e ASCE).

La condizione di carico normale è risultata la più gravosa e, considerando gli spessori di progetto riportati sugli elaborati progettuali, la condotta risulta ampiamente verificata, secondo entrambi gli standard utilizzati, considerando un incremento di pressione per colpo d'ariete pari al 4% della pressione statica alla centrale. Sono state comunque analizzate anche condizioni di carico saltuarie (con azioni dovute a neve e vento, oltre all'attrito sulle selle di appoggio).

Per i casi di carico eccezionali, si sono prese in considerazione le azioni derivanti da un'azione sismica; le sollecitazioni risultanti sono risultate di limitata entità e, in combinazione con i differenti fattori di sicurezza previsti dagli standard, non dimensionanti.

Infine, si è provveduto ad effettuare anche un'analisi di instabilità causata dal vuoto assoluto interno.

Infine, si è condotta un'analisi di sensitività, facendo variare i seguenti parametri:

- il coefficiente di efficienza delle saldature ($z_s = 0.70, 0.85, 1.0$);
- lo spessore della condotta (riduzione di 0.5 mm attesa nei prossimi 40 anni);
- la pressione di colpo d'ariete in centrale, che secondo informazioni fornite da AET, potrebbe variare dall'attuale 4% al 10% della pressione statica, in seguito ad una possibile sostituzione del macchinario di centrale.

Una volta effettuata l'analisi, è stato anche possibile definire gli spessori minimi di calcolo secondo i due standard considerati. Tale informazione potrà essere utilizzata in futuro per controllare periodicamente lo stato della condotta.

Nei paragrafi che seguono, si dà conto dello stato di sollecitazione nelle 3 diverse condotte, espresso come fattore di sicurezza relativo allo snervamento, per il caso dimensionante (caso di carico normale), tenendo peraltro conto delle seguenti considerazioni:

- a) la pressione di colpo d'ariete assunta (4% o 10% del valore statico alla centrale) potrebbe non essere rappresentativa della sovrappressione massima, qualora si consideri un possibile malfunzionamento della valvola di scarico sincrono installata su ciascuna turbina;
- b) il limite di snervamento dei diversi materiali è conosciuto solo mediante dati di letteratura, compatibili con i dati generalmente in uso negli anni di costruzione delle condotte, ma comunque non certificati.

15.1 Condotte 1 e 2

Sostanzialmente, in corrispondenza delle campate tra appoggio e appoggio, i fattori di sicurezza della condotta nelle varie tratte sono praticamente ovunque maggiori o uguali a 1.7 rispetto allo snervamento (il valore $F_s=1.7$ è definito dallo standard CECT per condotte esposte).

Tale risultato si ottiene anche senza considerare alcuna indagine sulle saldature (presente o passata), cosa per cui si è assunto un coefficiente di efficienza pari a quanto stabilito negli standard attuali ($z_s=0.70$).

In corrispondenza degli appoggi, gli standard prevedono che si possano avere degli snervamenti localizzati che possano portare ad una ridistribuzione delle tensioni locali. Nel caso delle condotte 1 e 2, i fattori di sicurezza rispetto allo snervamento risultano generalmente pari a circa $1.45 \div 1.5$; nella tratta 2 (tra il FP2 ed il FP3), i fattori di sicurezza in corrispondenza agli appoggi si riducono fino a 1.1, ed in corrispondenza del FP4a si scende al di sotto del valore limite di 1.0. Occorre peraltro precisare che tali valori sono ottenuti sempre considerando un coefficiente di efficienza delle saldature pari a $z_s=0.70$, cioè senza considerare alcun controllo non distruttivo sulle saldature.

Eventuali controlli sulle saldature possono essere realizzati a spot nel tratto 2, potendo così permettere l'adozione di un coefficiente di efficienza pari a 0.85 e garantire l'innalzamento del fattore di sicurezza al di sopra di 1.5, come nelle restanti parti.

Per quanto riguarda l'efficienza delle saldature, occorre anche considerare che i documenti storici menzionano l'adozione di un coefficiente pari a 0.85; in tal caso, i valori dei fattori di sicurezza in campata sarebbero superiori a 2, e in corrispondenza degli appoggi sarebbero generalmente superiori a 1.8, ad eccezione della tratta 2 (in cui $F_s > 1.5$).

Resterebbe comunque un punto più debole in corrispondenza dell'appoggio FP4a, in cui la concentrazione delle forze sviluppate dal cambio di direzione causa un incremento localizzato delle tensioni.

In conclusione, è possibile affermare che lo stato tensionale delle condotte 1 e 2 risulta ampiamente entro i margini considerati per le tensioni ammissibili.

L'analisi dei tronchetti in centrale ha evidenziato che i coefficienti di sicurezza sono superiori a quelli ammissibili considerando un coefficiente di efficienza delle saldature pari a 0.85 o superiore, il che comporterebbe la necessità di esecuzione di CND a spot su saldature per bollitura, i cui risultati potrebbero essere di difficile interpretazione. D'altra parte, anche non effettuando alcun controllo, il fattore di sicurezza risulterebbe comunque sufficientemente positivo (1.76 e 1.81 per le sezioni di monte e di valle rispettivamente) per garantire la continuità di servizio, anche se non in maniera tale da poter soddisfare le verifiche secondo CECT.

L'analisi di sensitività effettuata in proiezione futura (a 40 anni) non evidenzia particolari criticità, rispetto alle considerazioni già svolte per la condizione attuale, posto che il tasso di usura nel tempo possa venire confermato con ulteriori periodiche misurazioni.

Le stesse considerazioni sono sostanzialmente ripetibili anche considerando l'incremento del colpo d'ariete comunicato; in questo caso:

- le tensioni in campata, nella proiezione futura, si manterrebbero comunque in una zona di sicurezza, essendo il fattore di sicurezza (per un coefficiente $z_s=0.70$) al di sopra dei valori minimi previsti da ASCE, anche se leggermente al di sotto di quelli previsti da CECT.
- anche per i tronchetti in centrale valgono le stesse considerazioni già esposte, essendo il fattore di sicurezza minimo in proiezione futura (per un coefficiente $z_s=0.70$) pari a 1.65, non sufficiente a soddisfare quanto previsto dalle norme ma sufficiente a garantirne l'esercizio.

15.2 Condotta 3

Considerando un coefficiente di efficienza delle saldature pari 1.0, come potrebbe essere ipotizzato vista la data di esecuzione della condotta, i fattori di sicurezza della condotta sono ovunque maggiori di 2.0, contro un limite di 1.7 (in campata) previsto da CECT, perciò lo stato tensionale della condotta risulterebbe ampiamente entro i margini considerati per le tensioni ammissibili.

Considerando un coefficiente di efficienza delle saldature pari a $z_s=0.70$, cioè senza considerare alcun controllo sulle saldature, i fattori di sicurezza in corrispondenza degli appoggi sono ovunque superiori a 1.3÷1.4, con l'eccezione in corrispondenza del vertice FP4a, in cui peraltro il valore risulta superiore a 1.1; in corrispondenza delle campate, invece, il fattore di sicurezza scenderebbe fino a 1.4, sicuramente sufficiente per assicurare la resistenza, anche se non in grado di verificare le richieste degli standard considerati.

Eventuali controlli sulle saldature possono essere realizzati a spot, potendo così permettere l'adozione di un coefficiente di efficienza pari a 0.85 e garantire l'innalzamento del fattore di sicurezza al di sopra di 1.7.

L'analisi del tronchetto in centrale ha evidenziato che i coefficienti di sicurezza sono superiori a quelli ammissibili considerando un coefficiente di efficienza delle saldature pari a 0.85 o superiore, il che comporta l'opportunità di effettuare CND su saldature. Considerando un coefficiente di efficienza delle saldature pari a 0.70 (nessun controllo), il fattore di sicurezza risultante (1.77 e 1.85 per le sezioni di monte e di valle rispettivamente) risulterebbe offrire sufficienti garanzie per la prosecuzione del servizio, anche se non sufficienti per soddisfare alle verifiche.

Anche per questa condotta, l'analisi di sensitività effettuata in proiezione futura (a 40 anni) non evidenzia particolari criticità, rispetto alle considerazioni già svolte per la condizione attuale, posto che il tasso di usura nel tempo possa venire confermato con ulteriori periodiche misurazioni.

15.3 Raccomandazioni

15.3.1 Controlli a spot sulle saldature

Sia per le condotte 1 e 2, limitatamente alle zone in appoggio della tratta 2, che per la condotta 3 (a valle del FP II), si suggerisce l'esecuzione di controlli a spot sulle saldature.

Per la condotta 3, si suggerisce l'effettuazione di CND a spot anche sulle saldature del tronchetto di collegamento alla valvola di macchina all'interno della centrale.

L'estensione dei controlli a spot sulle saldature può essere definita secondo EN 13445. La scelta del coefficiente di efficienza fa riferimento al tipo di materiale di base. Per l'acciaio di classe 1.1 o 1.2 (snervamento ≤ 275 e ≤ 360 MPa rispettivamente), con testing group 3b, il controllo a spot viene definito tramite NDT pari al 10% della lunghezza delle saldature governanti il giunto (EN 13445-3, Table 6.6.1.1, vedi Figura 15.1).

Table 6.6.1-1 — Testing groups for steel pressure vessels

| Requirements | Testing group ^a | | | | | | |
|--|--|------------------------|--|--|---|--|---|
| | 1a | 1b | 2a | 2b | 3a | 3b | 4 ^{b,j} |
| Permitted materials ^a | 1 to 10 | 1.1, 1.2, 8.1 | 8.2, 9.1, 9.2, 9.3, 10 | 1.1, 1.2, 8.1 | 8.2, 9.1, 9.2, 10 | 1.1, 1.2, 8.1 | 1.1, 8.1 |
| Extent of NDT for governing welded joints ^{e,h} | 100 % | 100 % | 100 % - 10% ^a | 100 % - 10 % ^d | 25 % | 10 % | 0 % |
| NDT of other welds | Defined for each type of weld in Table 6.6.2-1 | | | | | | |
| Joint coefficient | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.85 | 0.85 | 0.7 |
| Maximum thickness for which specific materials are permitted | Unlimited ^f | Unlimited ^f | 30 mm for groups 9.1, 9.2 16 mm for groups 9.3, 8.2, 10 | 50 mm for groups 1.1, 8.1 30 mm for group 1.2 | 30 mm for groups 9.2, 9.1 16 mm for groups 8.2, 10 | 50 mm for groups 1.1, 8.1 30 mm for group 1.2 | 12 mm for groups 1.1, 8.1 |
| Welding process | Unlimited ^f | Unlimited ^f | Fully mechanical welding only ^c | | Unlimited ^f | Unlimited ^f | Unlimited ^f |
| Service temperature range | Unlimited ^f | Unlimited ^f | Unlimited ^f | Unlimited ^f | Unlimited ^f | Unlimited ^f | Limited to (-10 to +200) °C for group 1.1 (-50 to +300) °C for group 8.1 |

^a All testing groups shall require 100 % visual inspection to the maximum extent possible
^b Testing group 4 shall be applicable only for:
- Group 2 fluids; and
- $P_S \leq 20$ bar; and
- $P_S V \leq 20\,000$ bar·L above 100 °C; or
- $P_S V \leq 50\,000$ bar·L if temperature is equal or less than 100 °C;
- higher pressure test (See clause 10);
- maximum number of full pressure cycle less than 500;
- lower level of nominal design stress (See EN 13445-3:2009).
^c Fully mechanised and/or automatic welding process (See EN 1418:1997).
^d First figure: initially, second figure: after satisfactory experience. For definition of "satisfactory experience", see 6.6.1.1.4
^e Testing details are given in Table 6.6.2-1
^f Unlimited means no additional restriction due to testing. The limitations mentioned in the table are limitations imposed by testing. Other limitations given in the various clauses of the standard (such as design, or material limitations, etc.) shall also be taken into account.
^g See EN 13445-2:2009 for permitted materials.
^h The percentage relates to the percentage of welds of each individual vessel
ⁱ 30 mm for group 8.2 material is allowed if delta ferrite containing welding consumables are used for depositing filling passes up to but not including the capping run.
^j Limited to single compartment vessels and single material group.

Figura 15.1: Estratto dalla EN 13445-5

15.3.2 Interventi sull'appoggio FP4a

Per incrementare la resistenza della condotta in corrispondenza dei due appoggi presenti su questo vertice, si potrebbe ipotizzare di saldare una lamiera d'acciaio di rinforzo, abbracciante un angolo un po' superiore a quello di appoggio sulla sella.

Questa raccomandazione vale per le condotte 1 e 2. La condotta 3 risulta già adeguatamente rinforzata.

In alternativa alla lamiera di acciaio, potrebbe essere preso in considerazione un rinforzo in fibra di carbonio.

15.3.3 Determinazione delle caratteristiche dei materiali

I fattori di sicurezza delle condotte presentati nella presente relazione, e su cui si basano le conclusioni, derivano da una assunzione fatta circa le caratteristiche meccaniche di resistenza dei materiali, desunte da letteratura.

In realtà, il limite di snervamento dei materiali impiegati potrebbe essere differente, col che le conclusioni del presente rapporto potrebbero essere riviste.

Si consiglia, perciò, di prelevare dalle condotte esistenti un tallone di prova, per sottoporlo a prove distruttive di tipo chimico / fisico presso laboratori specializzati.

15.3.4 Valutazione di altri casi di carico eccezionale

Le condizioni di carico eccezionale analizzate nel presente rapporto si riferiscono sostanzialmente alle azioni sismiche.

Esistono poi altre condizioni di carico eccezionale, che sono legate ad un possibile difetto / malfunzionamento degli organi di chiusura delle turbine, tali da provocare un incremento delle pressioni all'interno delle condotte.

in particolare, un elemento determinante nell'operazione dell'impianto è costituito dalle valvole di scarico sincrono, che consentono di mantenere limitate le pressioni di esercizio.

Si ritiene opportuno investigare l'incremento delle pressioni causato da un possibile malfunzionamento di tali valvole, tramite l'impiego di un software adeguato, che possa tenere conto delle caratteristiche dinamiche delle turbine. Con tali pressioni, le condizioni di carico potranno essere investigate in maniera più completa.