

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 1 di 22	Rev. 0

Metanodotto:

POT. ALL. CENTRALE ENEL DI TORREVALDALIGA NORD (ROMA)
 DN 400 (16") – DP 75 bar

VERIFICA STRUTTURALE ALLO SCUOTIMENTO SISMICO



0	Emissione	Righi M.	Battisti	Luminari	18/10/2019
Rev.	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato	Data

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 2 di 22	Rev. 0

INDICE

1	PREMESSA	3
1.1	Scopo del documento	3
1.2	Normativa di riferimento	4
2	DATI DI CALCOLO	5
2.1	Parametri geotecnici	5
2.2	Azione sismica di riferimento	6
2.3	Condizioni di progetto.....	8
2.4	Parametri geometrici - meccanici	8
3	VERIFICA ALLO SCUOTIMENTO SISMICO	9
3.1	Criterio di verifica	11
3.2	Metodologia di calcolo tratto rettilineo	12
3.2.1	Massima deformazione indotta dalle onde sismiche.....	12
3.2.2	Applicazione del criterio di verifica.....	15
3.3	Metodologia di calcolo per la curva	16
3.3.1	Applicazione del criterio di verifica.....	18
4	SINTESI DEI RISULTATI	19
5	APPENDICE 1	20

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 3 di 22	Rev. 0

1 PREMESSA

1.1 Scopo del documento

La presente relazione, redatta su incarico di Snam Rete Gas S.p.A., è relativa allo studio di pericolosità allo scuotimento sismico della tubazione del metanodotto Snam Rete Gas:

- Potenziamento Allacciamento Centrale Enel Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar" nel comune di Civitavecchia (RM)

Sulla base della nuova classificazione della Regione Lazio (Delibera 387/09 e 835/09), il comune di Civitavecchia in cui ricade il tracciato in oggetto è classificato in zona sismica 3 Sottozona B, come si osserva dalla Relazione geologica COMIS NR/19426 LSC-170.

AL fine di salvaguardare la condotta si rende necessario verificare la resistenza della tubazione alle azioni esercitate dallo scuotimento del terreno in cui la condotta è posata, in caso di evento sismico.

Nella presente relazione si espongono pertanto le verifiche effettuate tramite il confronto tra le sollecitazioni indotte sulla condotta dallo scuotimento sismico, calcolate in accordo con le "Guidelines For The Design Of Buried Steel Pipe" (Rif.[4] § 1.2), e con le "Guidelines for the Seismic Design and Assessment of Natural Gas and Liquid Hydrocarbon Pipelines" (Rif.[5] § 1.2) e le tensioni ammissibili calcolate sulla base della normativa internazionale di riferimento (Rif.[1] § 1.2), separatamente per il caso di metanodotto rettilineo e in curva.

Tali verifiche sono state condotte utilizzando come input sismico di progetto i valori di massima accelerazione attesa al suolo per $T_r=949$ anni, competente alla verifica agli stati limite SLV, in accordo con le NTC 2018 (Rif. [2] § 1.2).

Poiché il tracciato in progetto percorre una zona del territorio prevalentemente pianeggiante si assume il coefficiente di amplificazione topografica "T1".

In assenza di analisi specifiche sul terreno, previste nell'ambito della progettazione di dettaglio, si assume cautelativamente la categoria di sottosuolo "D" la quale risulta essere la più gravosa per le verifiche di scuotimento, come si evince dal raffronto degli spettri elastici, visibili in fig.1-1. L'accelerazione sismica del comune di Civitavecchia corrisponde al valore $a_g=0,068g$

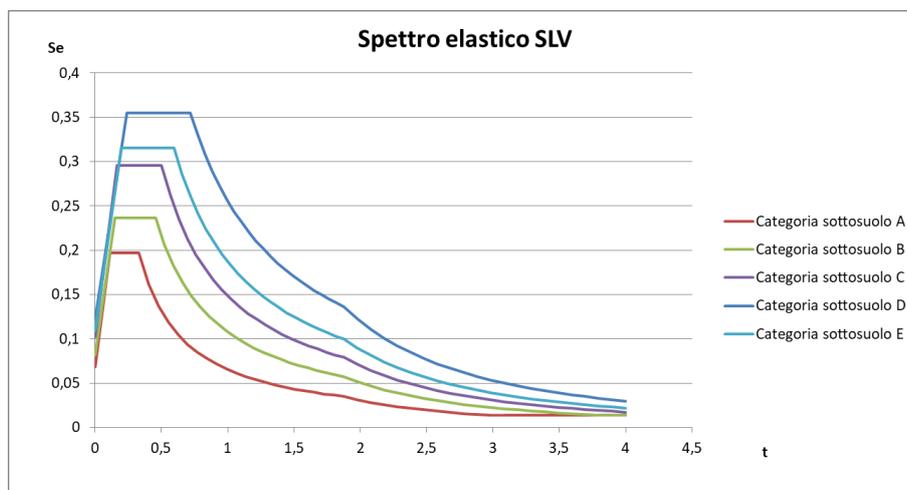


Figura 1-1: Spettri di risposta ver. 1.03

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torvaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 4 di 22	Rev. 0

1.2 Normativa di riferimento

1. ASME B31.8 – 2010 Gas Transmission and Distribution Piping Systems
2. NTC 2018 D.M. Infrastrutture 17/01/2018 (Aggiornamento Norme Tecniche per le Costruzioni)
3. ASCE 1984 – Guidelines for the Seismic Design Of Oil And Gas Pipeline System
4. ALA ASCE FEMA 2005 - Guidelines For The Design Of Buried Steel Pipe
5. PRCI (Pipeline Research Council International) 2004 - Guidelines for the Seismic Design and Assessment of Natural Gas and Liquid Hydrocarbon Pipelines
6. UNI EN 1993-4-3:2007 "Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 4-3: Condotte"
7. UNI EN 1998-4:2006 "Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 4: Silos, serbatoi e condotte"
8. ASCE (4-98) Seismic Analysis of Safety-related Nuclear Structures and Commentary

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 5 di 22	Rev. 0

2 DATI DI CALCOLO

2.1 Parametri geotecnici

Sulla base della ricognizione della cartografia geologica, l'area in cui si snoda il tracciato è rappresentata da depositi di sabbie, marne e argille passanti inferiormente a sabbie, sabbie argillose e conglomerati alternati ad argille sabbiose o a calcare sabbioso. Tali depositi, di esiguo spessore, stanno sul basamento roccioso.



Figura 2-1: – Stralcio della Carta Geologica d'Italia a scala 1:100.000 (cerchio rosso zona di intervento)

Ai fini del calcolo si assumono le caratteristiche meccaniche più cautelative corrispondenti ai depositi superficiali sabbioso-marnosi:

Categoria di sottosuolo	D
Angolo di attrito	30°
Peso specifico	19 KN/m ³
Modulo di reazione laterale	10 N/mm ²

Tabella 1: Input geotecnici

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 6 di 22	Rev. 0

2.2 Azione sismica di riferimento

L'azione sismica è stata valutata in conformità alle indicazioni riportate al capitolo 3.2 del D.M. 17 gennaio 2018 "Norme tecniche per le Costruzioni". In analogia con il programma fornito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, la definizione degli spettri di risposta relativi ad uno Stato Limite è articolata in tre fasi:

- Fase 1: Individuazione della pericolosità del sito
- Fase 2: Scelta delle strategie di progettazione
- Fase 3: Determinazione dell'azione di progetto

Si ripercorrono, dunque, le tre fasi per determinare innanzi tutto i parametri spettrali di riferimento a_g , F_0 e T_C^* e poi le forme spettrali per la struttura in esame.

FASE 1

Individuazione della pericolosità del sito.



Figura 2-2: Spettri di risposta ver. 1.03

FASE 2

In riferimento al D.M. 17/01/2018 l'opera viene analizzata con le seguenti caratteristiche:

Classe d'uso	IV	-
Vita nominale V_N	50	anni
Coefficiente d'uso C_U	2	-
Periodo di riferimento V_R	100	anni

Tabella 2: Input sismici

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 7 di 22	Rev. 0

Nota il periodo di riferimento V_R si determinano i periodi di ritorno T_R in base alla probabilità di superamento del periodo di riferimento P_{VR} associata ad ogni stato limite:

Stati limite		P_{VR} : Probabilità di superamento del periodo di riferimento V_R
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Tabella 3: Probabilità di superamento del periodo V_R

Stato limite di esercizio: operatività	SLO	TR = 60
Stato limite di esercizio: danno	SLD	TR = 101
Stati limite ultimo: salvaguardia della vita	SLV	TR = 949
Stati limite ultimo: di prevenzione del collasso	SLC	TR = 1950

Tabella 4: Tempo di ritorno per i diversi stati limite

FASE 3

Determinazione dell'azione di progetto corrispondente allo stato limite considerato, in questo caso lo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV). Il valore utilizzato per il calcolo e la verifica delle tubazioni che si deformano analogamente al terreno, corrisponde al parametro sismico PGA (Peak Ground Acceleration), ossia il valore di accelerazione massima del suolo misurata nel corso di un terremoto o attesa in un determinato sito. Tale valore è una grandezza di significato analogo ad a_g , ma che tiene conto dell'influenza degli eventuali effetti di amplificazione del moto sismico dovuti alle caratteristiche del sottosuolo o alla topografia.

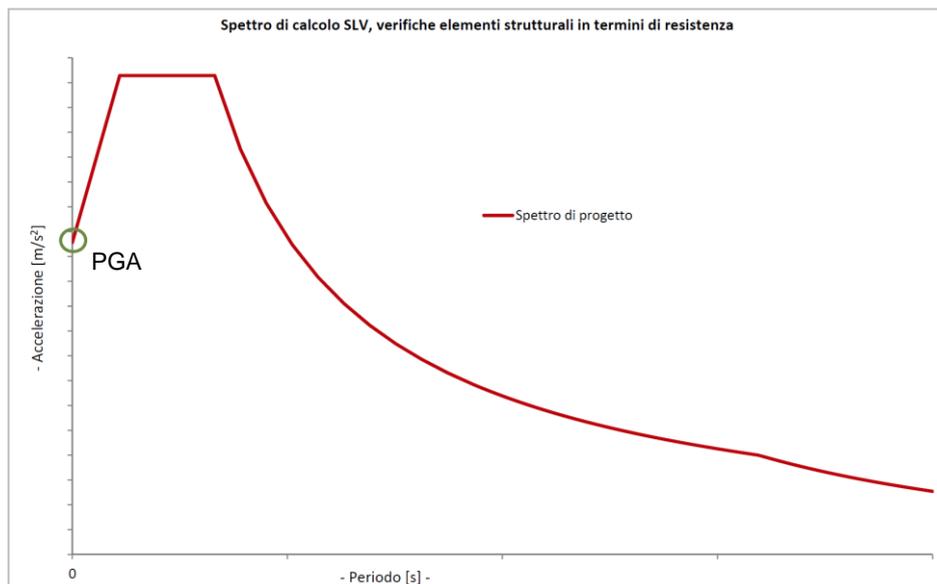


Figura 2-3: Spettro elastico per lo SLV

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 8 di 22	Rev. 0

Di seguito vengono elencate la pressione di progetto e la PGA utilizzata nelle verifiche.

Stato	Tr	Categoria sottosuolo	a_g/g	S	PGA/g
SLV	949	D	0,068	1,8	0,122

Tabella 5: Parametri sismici di calcolo

2.3 Condizioni di progetto

Si riportano la pressione di progetto e la differenza di temperatura tra l'installazione e l'esercizio, utilizzate per la verifica in concomitanza allo scuotimento sismico della condotta in oggetto:

ΔT	45°C
DP	75 bar

Tabella 6: Differenza di temperatura e pressione di progetto e diametro nominale

2.4 Parametri geometrici - meccanici

Di seguito si riportano i dati relativi alla condotta utilizzata per il metanodotto in oggetto.

DN	400 (16")
Materiale	L360 NB/MB
Spessore in linea	11,1 mm
Spessore in curva	11,1 mm
Raggio di curvatura (3DN)	1219 mm

Tabella 7: Parametri geometrici-meccanici

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 9 di 22	Rev. 0

3 VERIFICA ALLO SCUOTIMENTO SISMICO

Il presente capitolo comprende i calcoli e le verifiche degli stati tensionali, indotti dallo scuotimento sismico del terreno (shaking) sui tratti rettilinei e curvi della tubazione in occasione di un terremoto (di progetto) concomitante all'esercizio.

Lo shaking è provocato dalla propagazione delle onde sismiche nel terreno che impartisce movimenti alle particelle di suolo. La tubazione interrata pertanto tende a deformarsi così come il terreno circostante. Le tensioni indotte dalle onde sismiche sulla tubazione sono variabili sia nel tempo, che nello spazio, in funzione della direzione di propagazione del movimento sismico rispetto all'asse della condotta.

Secondo le indicazioni degli studi riportati dalla letteratura tecnica internazionale, l'azione di contenimento esercitata sulla tubazione dal terreno circostante consente di trascurare gli effetti dinamici di amplificazione (Hindy, Novak 1979). Pertanto la condotta può considerarsi semplicemente investita dalle onde sinusoidali (Rif. [3], [4] e [5] § 1.2), distinte come segue:

- onde di volume di compressione (onde P o primarie);
- onde di volume di taglio (onde S o secondarie);
- onde superficiali R (onde di Rayleigh).
- onde superficiali L (onde di Love).

Nei tratti di tubazione rettilinea le onde primarie P (onde di compressione) sono le onde di volume più veloci e determinano le massime sollecitazioni assiali di contrazione e dilatazione durante la prima parte del moto. Le onde secondarie S (onde di taglio) sono responsabili delle massime sollecitazioni di flessione durante la parte centrale del moto; di fatto imprimono alla roccia e al terreno circostante deformazioni trasversali alla direzione normale in cui viaggia e hanno un potenziale di danneggiamento maggiore rispetto alle onde P. I fenomeni descritti non avvengono tuttavia contemporaneamente.

Le onde superficiali R trasferiscono al terreno componenti di movimento sia parallelamente che perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda, lungo un'ellisse giacente nel piano perpendicolare alla superficie di discontinuità e contenente la direzione di propagazione. La loro energia decade esponenzialmente con la profondità.

Le onde L hanno le medesime caratteristiche del moto dell'onda S che non possessa alcuna componente verticale e generano moti del suolo sul piano orizzontale parallelo alla superficie terrestre e ortogonali alla direzione di propagazione dell'onda. Anche l'energia di tali onde decade esponenzialmente con la profondità.

Dal momento che i metanodotti sono, generalmente, posti a limitata profondità dal piano campagna (1÷3 m), sono da ritenersi interessanti sia le onde di volume che quelle di superficie. Tra le onde di volume, le onde di tipo S portano più energia e generano maggiori spostamenti di terreno rispetto alle onde P. Per le onde di superficie invece si considerano solo le onde R, in quanto inducono tensioni longitudinali significativamente maggiori rispetto alle tensioni flessionali indotte dalle onde L.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 10 di 22	Rev. 0

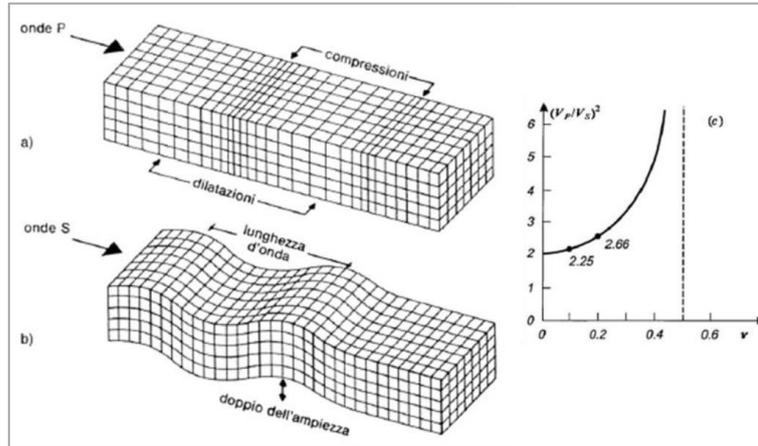


Figura 3-1: Rappresentazione grafica delle deformazioni generate dal passaggio dei diversi tipi di onde elastiche propagantisi nella stessa direzione: (a) onda longitudinale; (b) onda trasversale. (c) Dipendenza del rapporto fra velocità di propagazione dal coefficiente di Poisson (Faccioli, 2005)

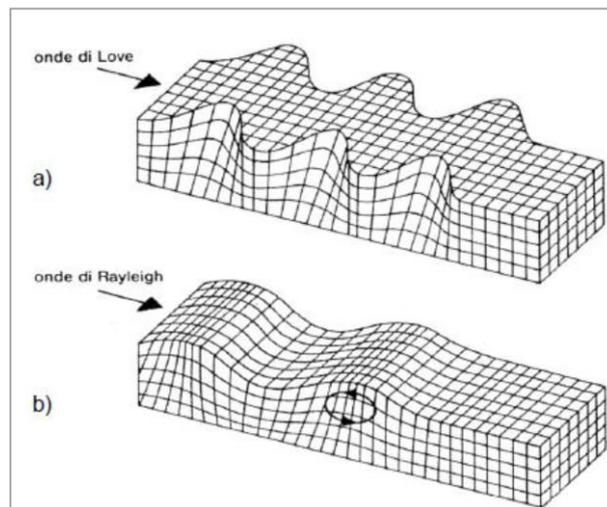


Figura 3-2: Rappresentazione grafica delle deformazioni generate dal passaggio dei diversi tipi di onde elastiche propagantisi nella stessa direzione: (a) onda di superficie tipo Love; (b) onda di superficie tipo Rayleigh

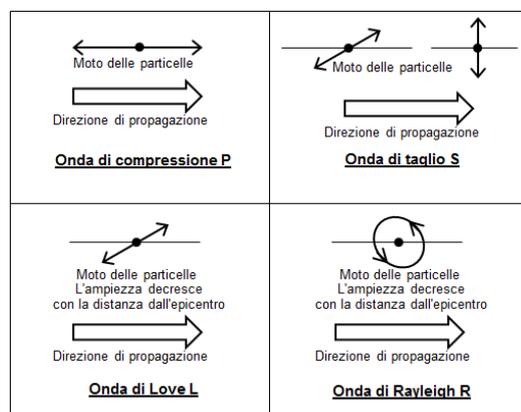


Figura 3-3: Moto delle particelle di terreno per i vari tipi di onde sismiche

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torvaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 11 di 22	Rev. 0

Poiché attualmente non è disponibile una Normativa Italiana finalizzata all'analisi sismica delle tubazioni interrato, la metodologia di verifica applicata è stata sviluppata secondo le indicazioni della Normativa sismica Americana Rif. [4] e Rif. [3] § 1.2.

Quest'ultima è ritenuta sufficientemente conservativa, poiché considera la simultaneità dell'azione (e quindi del relativo massimo effetto) delle onde P, S ed R, anche se trascura (nei tratti rettilinei) l'interazione trasversale tra tubo e terreno. L'interazione tubo-terreno viene invece considerata nell'analisi dei tratti di tubazione curvi.

Seguendo le indicazioni delle ultime normative ALA ASCE FEMA 2005 "Guidelines for the Design of Buried Steel pipe [4] § 1.2, si assume una velocità di propagazione dell'onda sismica "C, pari a 2000 m/s.

3.1 Criterio di verifica

La verifica allo scuotimento sismico è condotta operando una sostanziale distinzione fra tratto rettilineo di tubazione (cap.3.2) e tratto in curva (cap.3.3). Le tensioni indotte dal sisma sulla tubazione, in ciascuno dei suddetti scenari, sono calcolate secondo l'approccio proposto dalle ASCE 1984 (Rif.[3], [4] e [5] § 1.2).

Le "tensioni sismiche" così determinate sono quindi combinate con i carichi operativi (tipicamente dovuti a salto termico e pressione) secondo le modalità previste dalla normativa ASME B31.8 (Rif. [1] § 1.2) e confrontate con i valori ammissibili definiti nella medesima normativa.

In accordo alla "good engineering practice", una ulteriore analisi è condotta al fine di verificare l'insorgere di fenomeni di instabilità di parete, nel caso in cui risulti presente una deformazione negativa (ε) dovuta ad una tensione di compressione.

Per una tubazione a parete sottile, fenomeni di instabilità possono verificarsi per un accorciamento percentuale superiore a ε_{cr} , dato dalla seguente espressione (Rif.[3] § 1.2):

$$\varepsilon_{cr} = 0.35 t/(D-t)$$

Secondo la teoria di Fourier, l'onda sismica in movimento può essere scomposta in una sommatoria di onde sinusoidali semplici e considerare la condotta investita dalle seguenti onde:

- onde primarie di volume P
- onde secondarie di volume S
- onde superficiali R

Gli effetti sulla condotta provocati dalle onde sismiche sono variabili in funzione dell'angolo di incidenza tra la direzione della propagazione sismica e l'asse della tubazione. Pertanto a favore di sicurezza, vengono considerati gli angoli che comportano la massimizzazione delle deformazioni.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 12 di 22	Rev. 0

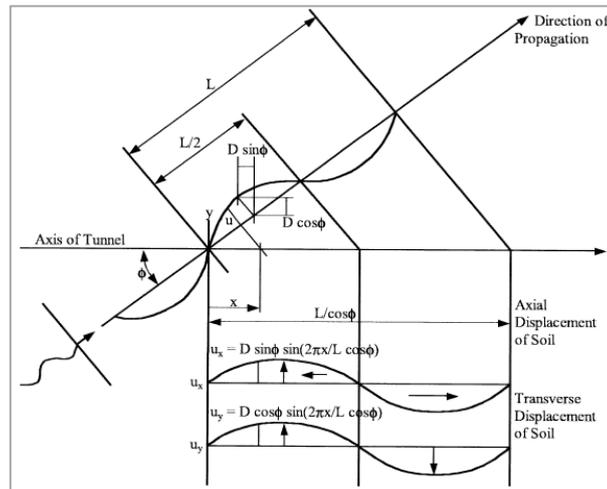


Figura 3-4: Geometria di un'onda S sinusoidale obliqua all'asse della condotta

3.2 Metodologia di calcolo tratto rettilineo

I criteri di verifica proposti dalle ASCE 1984 (Rif.[3] § 1.2) prevedono di trascurare l'interazione tubo-terreno nei tratti di tubazione rettilinei. Tale assunzione fornisce valori conservativi per quanto concerne lo stato tensionale indotto sulla tubazione. L'ipotesi che la tubazione rettilinea si deformi così come il suolo circostante si deforma a seguito del passaggio dell'onda sismica, rende le tensioni indotte pressoché indipendenti dallo spessore della tubazione.

A causa dell'effetto del terreno intorno al tubo, che attutisce sensibilmente le vibrazioni del tubo, e della rigidità torsionale elevata della sezione circolare, viene effettuata un'analisi statica degli effetti del sisma, trascurando l'amplificazione elastica.

3.2.1 Massima deformazione indotta dalle onde sismiche

La formula generale per la massima deformazione assiale prodotta dalle differenti onde sismiche, nell'ipotesi di assenza di scorrimenti fra tubazione e terreno, secondo il modello rigido di Newmark (1967) (Rif.[3] § 1.2) è di seguito riportata:

$$\varepsilon_g = v / \alpha_\varepsilon c$$

dove:

- v massima velocità del terreno;
- c velocità di propagazione dell'onda sismica;
- α_ε coefficiente di deformazione, dipendente dal tipo di onda e dall'angolo di incidenza formato da essa con l'asse longitudinale della condotta.

La massima curvatura della condotta è espressa dalla formula seguente (Rif.[3] § 1.2):

$$k_g = a / (\alpha_k c)^2$$

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 13 di 22	Rev. 0

dove:

- a massima accelerazione del terreno;
- c velocità di propagazione dell'onda;
- α_k coefficiente di curvatura, dipendente dal tipo di onda e dall'angolo di incidenza formato da essa con l'asse longitudinale della condotta.

Nel caso delle onde S, la direzione di propagazione è ortogonale al moto delle particelle solide come mostrato in figura 10.

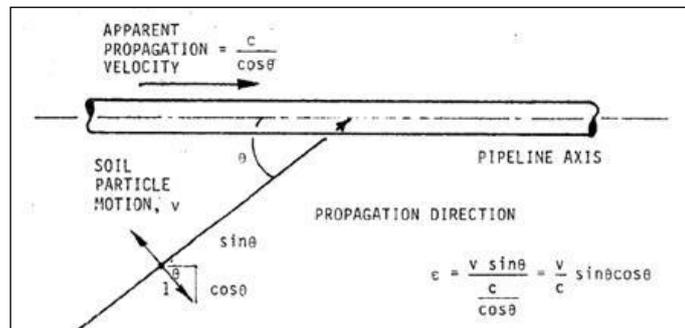


Figura 3-5: Effetto longitudinale delle onde di taglio sul tubo (ASCE, 1984 - Appendice B).

Essendo l'angolo di incidenza generalmente sconosciuto, si assume il valore per il quale si hanno le deformazioni ϵ massime del terreno, ovvero per valori di θ pari a 45° :

$$\epsilon = \frac{v}{c} \sin 45^\circ \cos 45^\circ = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v}{c} = \frac{v}{2c}$$

Le onde P invece inducono nel suolo movimenti nella medesima direzione di quella di propagazione come mostrato in figura 11.

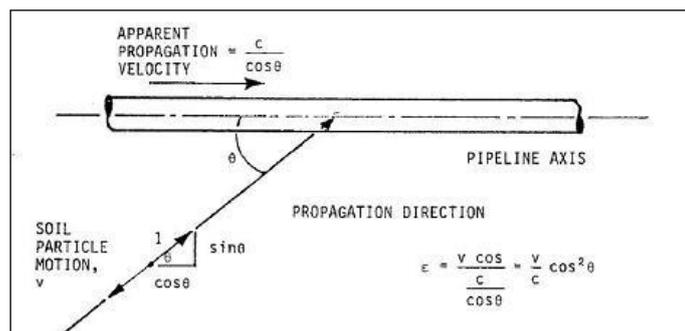


Figura 3-6: Effetto longitudinale delle onde di compressione sul tubo (ASCE, 1984-Appendice B).

Il valore dell'angolo di incidenza per il quale si hanno le deformazioni ϵ maggiori del terreno risulta essere per valori di θ pari a 0° , ovvero:

$$\epsilon = \frac{v}{c} \cos 0^\circ = \frac{v}{c}$$

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 14 di 22	Rev. 0

Le onde di superficie hanno generalmente una componente sia perpendicolare che parallela alla direzione di propagazione dell'onda; si considera il caso conservativo nella direzione corrispondente all'asse della tubazione.

Analogamente alle onde P, per le onde superficiali di Rayleigh (onde R) si considera un angolo θ pari a 0° .

$$\varepsilon = \frac{v}{c} \cos 0^\circ = \frac{v}{c}$$

Per il calcolo delle deformazioni prodotte da ciascun tipo di onda si riporta di seguito la tabella tratta dall'Appendice B del Rif. [3] § 1.2, con i relativi coefficienti di amplificazione della velocità di propagazione (α_ε , α_k), derivanti massimizzando l'effetto dell'angolo di incidenza.

Tipo Onda	Massima deformazione	Fattori
S	$\varepsilon_g = -\frac{v}{2c}$	$\alpha_\varepsilon=2,0$
	$k_g = \frac{a}{c^2}$	$\alpha_k=1,0$
P	$\varepsilon_g = -\frac{v}{c}$	$\alpha_\varepsilon=1,0$
	$k_g = \frac{a}{2.6c^2}$	$\alpha_k=1,6$
R	$\varepsilon_g = -\frac{v}{c}$	$\alpha_\varepsilon=1,0$
	$k_g = \frac{a}{c^2}$	$\alpha_k=1,0$

Figura 3-7: Massima deformazione sismica (Ground strain coefficients)

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 15 di 22	Rev. 0

3.2.2 Applicazione del criterio di verifica

Una stima conservativa delle tensioni massime assiali e di flessione si ottiene col metodo della radice quadrata della somma dei quadrati (SRSS method: Square Route Square Sum).

$$\sigma_{\varepsilon, \text{sisma}} = (\sigma_{\varepsilon, \text{sisma}}^S + \sigma_{\varepsilon, \text{sisma}}^P + \sigma_{\varepsilon, \text{sisma}}^R)^{1/2}$$

$$\sigma_{k, \text{sisma}} = (\sigma_{k, \text{sisma}}^S + \sigma_{k, \text{sisma}}^P + \sigma_{k, \text{sisma}}^R)^{1/2}$$

La massima tensione dovuta all'evento sismico risulta quindi:

$$\sigma_{\text{sisma}} = \sigma_{\varepsilon, \text{sisma}} + \sigma_{k, \text{sisma}}$$

Ai sensi delle ASME B31.8 (para 833) vengono condotte le verifiche di controllo delle tensioni secondo le due distinte ipotesi:

- "Unrestrained pipe"
- "Restrained pipe"

3.2.2.1 *Unrestrained Pipeline*

La normativa ASME B31.8 (para 833.6) prescrive di verificare che la tensione longitudinale sia compresa entro un valore ammissibile pari al 75% della tensione di snervamento:

$$\sigma_{L0} \leq 0.75 \sigma_y$$

con:

$$\sigma_{L0} = 0.5 \sigma_H + \sigma_{\text{Curva}}^{\text{SISMA}}$$

dove:

$$\sigma_H = PD/2t$$

3.2.2.2 *Restrained Pipeline*

La normativa ASME B31.8 (para 833.3) prescrive di verificare che la tensione longitudinale sia compresa entro un valore ammissibile pari al 90% della tensione di snervamento:

$$\sigma_{LT} \leq 0.90 \sigma_y$$

con:

$$\sigma_{LT} = -\nu \cdot \sigma_H + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\text{SISMA}}$$

dove:

$$\sigma_H = PD/2t$$

$$\sigma_{\Delta T} = \alpha \Delta T E$$

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 16 di 22	Rev. 0

La normativa ASME B31.8 (para 833.4) prescrive di verificare che la tensione equivalente calcolata secondo "Von Mises" sia compresa entro un valore ammissibile pari al 100% (carichi occasionali – di breve durata) della tensione di snervamento:

$$\sigma_{VM} \leq \sigma_y$$

con:

$$\sigma_{VM} = (\sigma_{LT}^2 + \sigma_H^2 - \sigma_{LT} \sigma_H)^{1/2}$$

3.3 Metodologia di calcolo per la curva

Nell'analisi dello stato tensionale causato dal terremoto sugli elementi curvi della condotta, l'interazione tra tubo e terreno va tenuta in debita considerazione.

Assumendo il movimento dell'onda sismica parallelo ad uno dei tratti rettilinei della curva, si calcola la lunghezza di scorrimento (L') della tubazione nel terreno su cui agisce la forza di attrito t_u (Rif.[3] § 1.2) secondo la formula seguente:

$$L' = \frac{4A_p E \lambda}{3k_w} \left(\sqrt{1 + \frac{3\varepsilon_{\max} k_w}{2t_u \lambda}} - 1 \right)$$

$$t_u = \frac{\pi D}{2} \gamma_t H (1 + k_0) \text{tg} \delta + W_p \text{tg} \delta$$

dove:

$$\lambda = \left(\frac{K_w}{4EI} \right)^{1/4}$$

con:

ε_{\max} massima deformazione del terreno
 k_w modulo di reazione laterale
 I momento d'inerzia della sezione
 K_0 coefficiente di spinta a riposo

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 17 di 22	Rev. 0

Per la tubazione in acciaio (flessibile) lo spostamento sulla curva dovuto allo scorrimento della stessa nel terreno è:

$$\Delta = \frac{\varepsilon_{\max} L' - \frac{t_u L'^2}{2A_p E}}{1 + \frac{k_w L'}{2\lambda A_p E} + 2 \frac{\lambda^2 L' I}{\pi A_p r_0}}$$

La forza assiale sul tratto rettilineo longitudinale (parallelo alla direzione del movimento sismico) è:

$$s = \Delta \left(\frac{K_w}{2\lambda} + \frac{2\lambda^2 K^* EI}{r_0 \pi} \right)$$

con:

$$K^* = 1 - \frac{9}{10 + 12(tr_0/R^2)^2}$$

Il momento flettente sulla curva è:

$$M = \Delta \frac{2\lambda K^* EI}{r_0 \pi}$$

Il fattore di intensificazione dello stress:

$$K_1 = \frac{2}{3K^*} \left\{ 3 \left[\frac{6}{5 + 6(tr_0/R^2)^2} \right] \right\}^{-1/2}$$

La tensione assiale sulla curva dovuta alla forza S, si calcola con la seguente:

$$\sigma_{SISMA}^S = S/A_p$$

La tensione di flessione sulla curva dovuta al momento flettente M, vale:

$$\sigma_{SISMA}^M = K_1 M D / 2I$$

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 18 di 22	Rev. 0

3.3.1 Applicazione del criterio di verifica

La tensione totale sulla curva per effetto del sima si ottiene per semplice somma:

$$\sigma^{\text{Curva}}_{\text{SISMA}} = \sigma^{\text{S}}_{\text{SISMA}} + \sigma^{\text{M}}_{\text{SISMA}}$$

Ai sensi delle ASME B31.8 (para 833) vengono condotte le verifiche di controllo delle tensioni secondo due distinte ipotesi:

- “unrestrained pipeline”
- “restrained pipeline”

3.3.1.1 *Unrestrained Pipeline*

La normativa ASME B31.8 (para 833.6) prescrive di verificare che la tensione longitudinale sia compresa entro un valore ammissibile pari al 75% della tensione di snervamento:

$$\sigma_{L0} \leq 0.75 \sigma_y$$

con:

$$\sigma_{L0} = 0.5 \sigma_H + \sigma^{\text{Curva}}_{\text{SISMA}}$$

dove:

$$\sigma_H = PD/2t$$

In riferimento alla norma ASME B31.8, paragrafo 833.4 punto (f), sul tratto in curva non si esegue il controllo sulla combinazione delle tensioni poiché tale verifica è prescritta esclusivamente per porzioni rettilinee di tubazione.

3.3.1.2 *Restrained Pipeline*

La normativa ASME B31.8 (para 833.3) prescrive di verificare che la tensione longitudinale sia compresa entro un valore ammissibile pari al 90% della tensione di snervamento:

$$\sigma_{LT} \leq 0.90 \sigma_y$$

con:

$$\sigma_{LT} = \sigma_H + \sigma_{\Delta T} + \sigma^{\text{Curva}}_{\text{SISMA}}$$

dove:

$$\sigma_H = PD/2t$$

e

$$\sigma_{\Delta T} = \alpha T E$$

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 19 di 22	Rev. 0

4 SINTESI DEI RISULTATI

Di seguito si riassumono i risultati delle verifiche sulla tubazione in progetto, secondo i criteri precedentemente specificati. Per maggiori informazioni fare riferimento all'Appendice 1 allegata a questo documento.

METANODOTTO	Tratto rettilineo		Tratto curvilineo	
DN 400 (16") 75 bar	$F_{LO}=\sigma_{LO}/\sigma_y=$	0,25 < 0,75 <i>Verificato</i>	$F_{LO}=\sigma_{LO}/\sigma_y=$	0,20 < 0,75 <i>Verificato</i>
	$F_{LT}=\sigma_{LT}/\sigma_y=$	0,25 < 0,90 <i>Verificato</i>		$F_{LT}=\sigma_{LT}/\sigma_y=$
	$F_{COMBO}=\sigma_{COMBO}/\sigma_y=$	0,34 < 1,00 <i>Verificato</i>		
	$\epsilon/\epsilon_{CR}=$	0,06 < 1,00 <i>Verificato</i>		

Tabella 8: Sintesi dei risultati

Come è possibile osservare dai risultati della tabella, tutti i valori delle verifiche risultano sotto i limiti di resistenza dell'acciaio utilizzato con un fattore di sicurezza ben maggiore di quanto prescritto dalla norma ASME B31.8.

Le verifiche evidenziano inoltre l'idoneità dello spessore della tubazione nel farsi carico delle sollecitazioni trasmesse dall'oscillazione del terreno durante l'evento sismico.

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 20 di 22	Rev. 0

5 APPENDICE 1

RISULTATI COMPLETI DELLE VERIFICHE STRUTTURALI ALLO SCUOTIMENTO SISMICO

DATI DI INGRESSO			
Input sismici			
Vita nominale	V_N	50	anni
Classe d'uso	-	IV	
Coefficiente d'uso	C_U	2	-
Periodo di riferimento	V_R	100	anni
Stato limite	-	SLV	
Probabilità di superamento	P_{VR}	10%	
Periodo di ritorno	T_R	949	anni
Latitudine (ED50)	(ED50)	42,094	°
Longitudine (ED50)	(ED50)	11,808	°
Acc. orizzontale massima sul periodo di riferimento	a_g	0,068	$\cdot g = 0,670 \text{ m/s}^2$
Accelerazione	g	9,81	m/s^2
Periodo d'inizio del tratto a velocità cost. dello spettro	T_C^*	0,332	s
Valore max del fattore di amplificazione dello spettro	F_0	2,887	-
Categoria sottosuolo	-	D	
Categoria topografica	-	T1	
Input geometrici - meccanici - sollecitazioni			
Diametro nominale	D_N	400	mm
Tipo di tubazione	Tipo1 / Tipo2	< > Tipo	2
Diametro esterno tubazione	D_e	406	mm
Spessore tubazione	t	11,10	mm
Diametro interno tubazione	D_i	384,2	mm
Accorciamento critico	$\epsilon_{CR}=0,35 \cdot t / (D-t)$	0,0098	- (ASCE 1984)
Modulo di elasticità di Young	E	205000	N/mm^2
Modulo di Poisson	ν	0,3	-
Tensione di sneramento	σ_y	360	N/mm^2
Coefficiente di dilatazione termica lineare	α	0,000012	$1/^\circ\text{C}$
Peso specifico acciaio	γ_p	78,5	KN/m^3
Velocità di propagazione dell'onda sismica	C	2000	m/s
Differenza di temperatura tra l'installazione e l'esercizio	ΔT	45	$^\circ\text{C}$
Pressione di esercizio	P	75	bar = 7,5 N/mm^2
Modulo di reazione laterale	K_W	10	N/mm^2
Angolo di attrito	ϕ	30	$^\circ = 0,524 \text{ radianti}$
Rivestimento	-	Polietilene	-
Profondità di posa	H	1,5	m = 1500 mm
Peso specifico del terreno	γ_t	19	$\text{KN/m}^3 = 0,00002 \text{ N/mm}^3$

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 21 di 22	Rev. 0

VERIFICA TRATTO RETTILINEO			
Calcolo delle azioni sismiche secondo le NTC 2018			
Coefficiente di amplificazione topografica	S_T	1,000	-
Coefficiente di amplificazione stratigrafica	S_S	1,800	-
Coefficiente di amplificazione	$S = S_S \cdot S_T$	1,800	-
Periodo d'inizio del tratto a velocità cost. dello spettro	T_C	0,721	s
Acc.orizzontale massima sul sito di riferimento	$PGA = a_g \cdot S =$	0,1230	$\cdot g = 1,207 \text{ m/s}^2$ (7.2.5 NTC18)
Velocità orizzontale del terreno	$V_g = 0,16 \cdot a_g \cdot S \cdot T_C$	0,139	m/s (3.2.3.3 NTC18)
Calcolo delle deformazioni indotte dal sisma sul terreno rettilineo			
Deformazione onde tipo S	$\epsilon_{\text{sisma}}^S = V_g / 2C$	0,00003479	- (ASCE 1984)
Deformazione onde tipo P	$\epsilon_{\text{sisma}}^P = V_g / C$	0,00006957	- (ASCE 1984)
Deformazione onde tipo R	$\epsilon_{\text{sisma}}^R = V_g / C$	0,00006957	- (ASCE 1984)
Curvatura onde tipo S	$k_{\text{sisma}}^S = PGA / C^2$	0,00000030	m^{-1} (ASCE 1984)
Curvatura onde tipo P	$k_{\text{sisma}}^P = PGA / (2,6 \cdot C^2)$	0,00000012	m^{-1} (ASCE 1984)
Curvatura onde tipo R	$k_{\text{sisma}}^R = PGA / C^2$	0,00000030	m^{-1} (ASCE 1984)
Calcolo delle tensioni indotte dal sisma sul tratto rettilineo			
Tensione sismica def. onde tipo S	$\sigma_{\epsilon, \text{sisma}}^S = E \cdot \epsilon_{\text{sisma}}^S$	7,13	N/mm ²
Tensione sismica def. onde tipo P	$\sigma_{\epsilon, \text{sisma}}^P = E \cdot \epsilon_{\text{sisma}}^P$	14,26	N/mm ²
Tensione sismica def. onde tipo R	$\sigma_{\epsilon, \text{sisma}}^R = E \cdot \epsilon_{\text{sisma}}^R$	14,26	N/mm ²
Involuppo tensione sismica deformazione	$\sigma_{\epsilon, \text{sisma}} = (\sigma_{\epsilon, \text{sisma}}^S)^2 + \sigma_{\epsilon, \text{sisma}}^P + \sigma_{\epsilon, \text{sisma}}^R$	21,39	N/mm ²
Tensione sismica curvatura onde tipo S	$\sigma_{k, \text{sisma}}^S = E \cdot D / 2 \cdot k_{\text{sisma}}^S$	0,01	N/mm ²
Tensione sismica curvatura onde tipo P	$\sigma_{k, \text{sisma}}^P = E \cdot D / 2 \cdot k_{\text{sisma}}^P$	0,005	N/mm ²
Tensione sismica curvatura onde tipo R	$\sigma_{k, \text{sisma}}^R = E \cdot D / 2 \cdot k_{\text{sisma}}^R$	0,01	N/mm ²
Involuppo tensione sismica curvatura	$\sigma_{k, \text{sisma}} = (\sigma_{k, \text{sisma}}^S)^2 + \sigma_{k, \text{sisma}}^P + \sigma_{k, \text{sisma}}^R$	0,02	N/mm ²
Massima tensione sismica	$\sigma_{\text{sisma}} = \sigma_{\epsilon, \text{sisma}} + \sigma_{k, \text{sisma}}$	21,41	N/mm ²
Calcolo delle tensioni indotte dal sisma sul tratto rettilineo secondo la B31.8			
Tensione di compressione da espansione termica	$\sigma_{\Delta T} = \alpha \cdot \Delta T \cdot E$	110,70	N/mm ² (833.2 ASME B31.8)
Tensione circonferenziale dovuta alla presione interna	$\sigma_H = P \cdot D / 2t$	137,30	N/mm ² (805.2.3 ASME B31.8)
Longitudinal stress in unrestrained pipe	$\sigma_{LO} = 0,5 \cdot \sigma_H + \sigma_{\epsilon, \text{sisma}}$	90,06	N/mm ² (833.6 ASME B31.8)
Longitudinal stress in restrained pipe	$\sigma_{LT} = -V \cdot \sigma_H + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{\text{sisma}}$	90,92	N/mm ² (833.6 ASME B31.8)
Tensione equivalente totale (criterio di Von Mises)	$\sigma_{\text{COMB}} = (\sigma_{LT}^2 + \sigma_H^2 - \sigma_{LT} \cdot \sigma_H)^{1/2}$	120,97	N/mm ²
Verifica delle tensioni e della deformazione sul tratto rettilineo secondo la ASCE 1984			
Accorciamento sismico	$\epsilon = \sigma_{\text{COMB}} / E$	0,000590	-
Verifica Unrestrained pipe	$F_{LO} = \sigma_{LO} / \sigma_y$	0,25	< 0,75 Verificato
Verifica Restrained pipe	$F_{LT} = \sigma_{LT} / \sigma_y$	0,25	< 0,90 Verificato
Rapporto tra tensioni di prog. combinate e snervamer	$F_{\text{COMBO}} = \sigma_{\text{COMBO}} / \sigma_y$	0,34	< 1 Verificato
Rapporto tra def. ottenuta e def. critica	ϵ / ϵ_{CR}	0,06	< 1 Verificato

	PROGETTISTA  <small>consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori</small>	COMMESSA NR/19426	UNITÀ 00
	LOCALITÀ REGIONE LAZIO	LSC-180	
	PROGETTO Potenziamento Allacciamento Centrale Enel di Torrevaldaliga Nord (Roma) DN 400 (16") – DP 75 bar in Comune di Civitavecchia (RM)	Pagina 22 di 22	Rev. 0

VERIFICA TRATTO CURVILINEO			
Angolo di attrito tubo terreno	$\delta=0,6 \cdot \phi$	18	= 0,31 rad
Coefficiente di spinta a riposo	$K_0=1-\sin\phi$	0,50	
Deformazione massima	$\epsilon_{max}=\sqrt{c}$	0,00006957	
Momento di inerzia	$I=\pi(Dc_e^4-Dc_i^4)/64$	269330404	mm ⁴
Diametro interno	Dc_i	384	mm
Spessore tubazione	t_c	11,1	mm
Diametro esterno	Dc_e	406,4	mm
Area sezione trasversale del tubo	A_p	13778	mm ²
Parametro per le travi su fondazione elastica	$\lambda=(K_w/4EI)^{1/4}$	0,00046129	mm ⁻¹
Peso lineare del tubo	W_p	0,85	KN/m
Forza d'attrito lineare del tubo	t_u	9,14	N/mm
Curvatura	-	3 diametri	
Raggio della curva prefabbricata	$r03$	1219	mm
Raggio della tubazione	R	203,2	mm
Coefficiente per calcolo delle curve flessibili	K^*	0,20274	-
Fattore di intensificazione dello stress	K_1	1,841	-
Lunghezza di scorrimento del tubo	L'	20312,04	mm
Spostamento per scorrimento del tubo nel terreno	Δ	0,71	mm
Forza assiale sul tratto rettilineo parallelo all'onda sismica	s	8,60	KN
Momento flettente della curva	M	1919,47	KNmm
Calcolo delle tensioni indotte dal sisma sul tratto curvilineo secondo la B31.8			
Tensione assiale dovuta alla forza s	$\sigma_{SISMA}^S=s/A_p$	0,62	N/mm ²
Tensione di flessione dovuta al momento M	$\sigma_{SISMA}^M=K_1MD/2I$	2,67	N/mm ²
Tensione totale sismica	σ_{SISMA}^{TOT}	3,29	N/mm ²
Verifica delle tensioni e della deformazione sul tratto curvilineo secondo la B31.8			
Tensione di compressione da espansione termica	$\sigma_{\Delta T}=\alpha \cdot \Delta T \cdot E$	110,70	N/mm ²
Tensione circonferenziale dovuta alla presione interna	$\sigma_H=P \cdot D/2t$	137,30	N/mm ²
Longitudinal stress in unrestrained pipe	$\sigma_{LO}=0,5 \cdot \sigma_H + \sigma_{e,sisma}$	71,94	N/mm ²
Longitudinal stress in restrained pipe	$\sigma_{LT}=-V \cdot \sigma_H + \sigma_{\Delta T} + \sigma_{sisma}$	72,80	N/mm ²
Verifica delle tensioni sul tratto curvilineo secondo la B31.8			
Verifica Unrestrained pipe	$F_{LO}=\sigma_{LO}/\sigma_y$	0,20	< 0,75 Verificato
Verifica Restrained pipe	$F_{LT}=\sigma_{LT}/\sigma_y$	0,20	< 0,90 Verificato