

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

Analisi sismica delle tubazioni negli impianti industriali

Relatori:

Prof. Bernardino CHIAIA

Prof. Valerio DE BIAGI

Tesi di:

Gian Maria JULITA

Matr. 221677

Anno Accademico 2017 - 2018

Sommario

1. INTRODUZIONE	6
2. IL RISCHIO INDUSTRIALE	7
2.1 Introduzione.....	7
2.2 Il quadro normativo sui grandi rischi in Italia	8
2.3 Gli insediamenti a rischio d’incidente rilevante in Italia	13
2.3.1 Introduzione e considerazioni riguardo il contesto italiano	13
2.3.2 Tipologie di impianti	17
2.3.3 Analisi preliminare delle interazioni di un’area industriale.....	20
2.4 Impianti industriali e rischio sismico	21
2.4.1 Introduzione	21
2.4.2 Evoluzione del quadro sismico in Italia	23
2.4.3 Normative Tecniche specifiche per serbatoi e tubazioni	26
2.4.4 Impianti industriali RIR a rischio sismico in Italia.....	28
3. L’EFFETTO DEL SISMA SUGLI IMPIANTI INDUSTRIALI.....	31
3.1 Introduzione.....	31
3.2 Differenze tra settore civile e settore industriale	33
3.3 Categorie funzionali dell’industria di processo	37
3.4 Modalità di danneggiamento tipiche dei serbatoi	44
3.5 Modalità di danneggiamento tipiche delle tubazioni	53
3.6 Effetti dei terremoti sugli impianti industriali	55
3.6.1 Modalità di danneggiamento per componenti omogenee di uno stabilimento ..	56
.....	56
3.6.2 Conseguenze	66

4. MODELLAZIONE DEL VINCOLO TRA SERBATOIO E TUBAZIONE	68
4.1 Introduzione.....	68
4.2 Modello di calcolo e ipotesi alla base	69
4.3 Scelta delle condizioni di vincolo sui bordi della lastra	74
4.4 Influenza numerica dei vincoli sul modello di calcolo	97
4.5 Conclusioni.....	102
5. MODELLAZIONE DELLE TUBAZIONI E DEI SOSTEGNI ALL'INTERNO DELLE VASCHE DI CONTENIMENTO	103
5.1 Introduzione e ipotesi di calcolo.....	103
5.2 Caratteristiche meccaniche e geometriche dei modelli di calcolo	104
5.3 Calcolo degli autovalori e delle corrispondenti forme modali	110
5.3.1 Tubazioni rettilinee	110
5.3.2 Tubazioni a "L"	123
5.4 Conclusioni.....	138
6. ANALISI SISMICA DELLE TUBAZIONI.....	139
6.1 Introduzione.....	139
6.2 Analisi sismica con spettro di risposta	140
6.3 Verifiche di flessibilità della tubazione secondo API 650	146
6.4 Risultati delle analisi e confronto dei risultati	147
6.4.1 Tubazioni rettilinee	147
6.4.2 Tubazioni a "L"	161
6.5 Verifiche di resistenza sulle tubazioni.....	191
6.5.1 Tubazioni rettilinee	196
6.5.2 Tubazioni a "L"	205

6.6	Calcolo degli spostamenti del serbatoio soggetto ad azione sismica	213
6.6.1	Introduzione e ipotesi di calcolo	213
6.6.2	Calcolo degli spostamenti in corrispondenza del collegamento tra serbatoio e tubazione	218
6.7	Conclusioni.....	222
7.	DISPOSITIVI ANTISISMICI PER LE TUBAZIONI.....	224
7.1	Introduzione.....	224
7.2	Compensatori a “omega” od a “lira”	225
7.3	Compensatori a soffietto	228
7.4	Giunti antisismici per le tubazioni	233
7.5	Conclusioni.....	234
8.	CONCLUSIONI.....	235
9.	BIBLIOGRAFIA.....	238

1. INTRODUZIONE

I sistemi di tubazioni rappresentano una componente vitale all'interno degli impianti industriali, in quanto sono utilizzati allo scopo di movimentare liquidi e gas tra le varie parti di uno stabilimento. Trattandosi perlopiù di sostanze nocive risulta di fondamentale importanza prevenire possibili danneggiamenti anche a livello locale, i quali potrebbero innescare incidenti e conseguenze ben più gravi, sia per la salute umana, sia per l'ambiente circostante.

Tra tutte le cause che possono provocare incidenti rilevanti negli impianti industriali, l'azione sismica dovrebbe essere considerata come una tra quelle potenzialmente più importanti. Infatti, a differenza dell'incidente casuale, che si può ritenere dovuto ad eventi indipendenti e pertanto ha una trascurabile probabilità che si verifichi simultaneamente in più apparati, nel caso sismico è altamente probabile che i danni si verifichino allo stesso tempo in più punti dell'impianto, amplificando così gli effetti, per esempio a causa del mancato funzionamento dei sistemi di sicurezza.

Alla luce di queste considerazioni ho deciso di approfondire la tematica riguardante l'analisi sismica delle tubazioni, in quanto presenti in tutte le tipologie di impianti industriali e aventi il compito di mettere in comunicazione le diverse componenti di uno stabilimento, ciascuna con le proprie peculiarità e con il proprio comportamento dinamico. Inoltre, essendo l'Italia un Paese fortemente industrializzato ed allo stesso tempo un territorio soggetto ad azione sismica, risulta di fondamentale importanza la prevenzione del rischio industriale, fortemente correlato al rischio sismico a cui sono soggetti un numero rilevante di stabilimenti, da Nord a Sud della nostra Penisola.

2. IL RISCHIO INDUSTRIALE

2.1 Introduzione

Nel seguente capitolo si introducono le nozioni base riguardanti i potenziali rischi generati dalla presenza sul territorio di stabilimenti industriali, i quali utilizzano o detengono sostanze chimiche per le loro attività produttive, esponendo, così, la popolazione e l'ambiente circostante, al rischio industriale. Un incidente in tali impianti, infatti, può provocare seri danni alla popolazione e al territorio.

Gli effetti sulla salute umana in caso di esposizione a sostanze tossiche rilasciate nell'atmosfera durante l'incidente variano a seconda delle caratteristiche delle sostanze, della loro concentrazione, della durata d'esposizione, e dalla dose assorbita. Gli effetti sull'ambiente sono legati alla contaminazione del suolo, dell'acqua e dell'atmosfera da parte delle sostanze tossiche. Gli effetti sulle cose riguardano principalmente i danni alle strutture. Una piena conoscenza di questi aspetti è la premessa indispensabile per ridurre il rischio industriale ai livelli più bassi possibili, prevenendo danni alla salute e all'ambiente.

Negli ultimi decenni diverse catastrofi naturali, principalmente i terremoti, hanno provocato dei danneggiamenti di notevole importanza agli impianti industriali causando, nella maggior parte dei casi, rilascio di sostanze pericolose e creando situazioni di emergenza molto difficili da gestire; ne consegue quindi l'importanza di approfondire tutti gli aspetti di protezione rispetto a questi eventi.

In seguito al terremoto di Izmit, in Turchia nel 1999, si è determinato un cambiamento di mentalità da parte dell'opinione pubblica, (dirigenza politica, enti di formazione e gestori degli impianti) per quanto riguarda l'approccio al rischio industriale, correlato ad eventi naturali ed in particolare ad eventi sismici.



Figura 2.1 – Danneggiamento di un impianto a seguito del sisma (Turchia 1999)

Dopo questo tragico evento, infatti, è cresciuta la convinzione relativa al fatto che il rischio naturale debba essere parte integrante processo di analisi del rischio per le attività industriali, dal momento che le conseguenze sono state particolarmente gravi per l'uomo, per l'ambiente e per la stessa economia di una nazione.

Per quanto riguarda il settore industriale sta assumendo sempre più importanza la branca dell'ingegneria della sicurezza denominata "Natech", la quale si occupa degli effetti dei fenomeni naturali sui beni tecnologici. Sia a livello scientifico, sia a livello di autorità competenti, si è diffusa la convinzione che sia necessario migliorare la conoscenza dei fenomeni naturali, ed in particolare, quelli che possono costituire un fattore iniziatore di catene incidentali, complesse e multiple, allo scopo di migliorare la gestione dell'emergenza in caso di crisi.

2.2 Il quadro normativo sui grandi rischi in Italia

La crescita dell'industrializzazione nel secondo dopoguerra ha elevato il livello di rischio di incidenti industriali in particolare nel settore chimico ed in quello nucleare. Il problema della sicurezza fu posto con particolare drammaticità in Europa dall'incidente di Seveso (1976), il quale provocò il rilascio di ingenti quantità di TCDD (diossina Seveso, una delle più pericolose), provocando danni ingenti alla salute di oltre 2000 cittadini e l'evacuazione di circa 600 abitanti dalle loro abitazioni.

Dalla fine degli anni '60 fino all'inizio degli anni '80, il verificarsi di alcuni gravi incidenti nelle industrie spinse gli Stati membri della Comunità Europea, anche a seguito della pressione dell'opinione pubblica, a mettere in atto misure più efficaci per la prevenzione o mitigazione dei rischi legati ad attività industriali particolarmente pericolose.

Dopo gli accordi di Maastricht (1992) si sono affermati una serie di principi generali che hanno influenzato il modo di concepire la legislazione stessa e la visione politica di pianificazione della sicurezza e dell'ambiente:

- Principio di precauzione: se vi è minaccia di danno la mancanza di certezza scientifica non può far rinviare l'adozione di misure di tutela adeguate, né fermare la ricerca che deve essere al contrario incoraggiata. Devono essere utilizzate le migliori tecnologie possibili;
- Principio di prevenzione: prevenire per quanto possibile il concretizzarsi di rischi. Per le grandi opere si ricorre alla valutazione di impatto ambientale;
- Principio del chi inquina paga: chi crea inquinamento deve risarcire il danno e ripristinare lo stato di partenza;
- Principio di sussidiarietà: le decisioni devono essere adottate al livello più vicino possibile ai cittadini. L'UE agisce solo nell'ambito delle competenze che le sono conferite: non bisogna prevaricare la sovranità degli stati membri.

La direttiva 82/501/CEE (nota anche come direttiva Seveso), emanata proprio per fronteggiare questo tipo di incidenti, affrontava il problema in modo più adeguato e puntuale di quanto fosse stato fatto in precedenza, inserendosi in un contesto di leggi e vincoli specifici, già esistenti negli Stati Membri, che erano però essenzialmente rivolte alla tutela dei lavoratori dagli infortuni e alla salvaguardia dell'ambiente dall'inquinamento dell'aria e dell'acqua, con riferimento alle condizioni normali di esercizio degli impianti industriali.

La direttiva Seveso invece ampliava la tutela della popolazione e dell'ambiente nella sua globalità, fissando l'attenzione sugli eventi "incidenti rilevanti" per la gravità delle conseguenze associate. Quest'ultima fu recepita in Italia sei anni dopo la sua emanazione, con il DPR del 17 maggio 1988, n. 175 Attuazione della direttiva CEE n. 501 del 24 giugno 1982 relativa ai rischi di incidenti rilevanti connessi con determinate attività industriali, in seguito modificato ed integrato.

Gli elementi caratterizzanti un'industria a rischio di incidente rilevante, ai sensi della direttiva sono:

- L'uso di sostanze pericolose in determinate attività industriali, in quantità tale da superare certe soglie, quali sostanze tossiche, infiammabili, esplosive e comburenti;
- La possibilità di evoluzione non controllata di una attività industriale con conseguente pericolo grave, immediato o differito sia per l'uomo all'interno o all'esterno dello stabilimento sia per l'ambiente circostante a causa di emissione di sostanze tossiche, incendi o esplosioni.

La prima direttiva Seveso dopo circa quindici anni di applicazione si è evoluta nella cosiddetta direttiva Seveso II (direttiva 96/82/CE), la quale è stata recepita in Italia il 17 agosto 1999 con il D.Lgs. 334/99 "Attuazione della direttiva 96/82/CE" relativa al controllo dei pericoli di incendi rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose.

Le principali innovazioni introdotte dal D.Lgs. 334/99, coerentemente con la direttiva europea, sono riassumibili nei seguenti punti:

- Le procedure di prevenzione degli incidenti rilevanti scattano subito nel caso della sola presenza di determinate sostanze pericolose in determinate quantità e non più in caso di svolgimento di determinate attività industriali che ne possono prevedere l'uso;
- Vengono inserite tra le categorie di pericolosità le sostanze pericolose per l'ambiente;
- Al gestore viene richiesta la redazione di un documento che definisca la propria politica di prevenzione degli incidenti rilevanti, corredato dal programma adottato per l'attuazione del Sistema di Gestione della Sicurezza, che dovrà essere adottato previa consultazione con il rappresentante della sicurezza dei lavoratori;
- Viene preso in considerazione il possibile accrescimento delle conseguenze di un incidente a causa della vicinanza di più stabilimenti o delle sostanze presenti (effetti domino);

- Integrazione tra concetto di stabilimento a rischio di incidente rilevante con quello di pianificazione territoriale, con particolare riferimento alla destinazione e utilizzazione dei suoli e l'introduzione del principio di mantenere opportune distanze tra gli stabilimenti e le zone residenziali.
- E' previsto inoltre che il gestore, informi la popolazione interessata, dei rischi a cui è soggetta e di tutte le eventuali problematiche.

Nel corso degli anni la normativa "Seveso" è stata sottoposta a modifiche e adeguamenti. Nel 2003 è stata emanata la Direttiva europea 2003/105/CE, che ha condotto anche in Italia all'adozione di alcuni provvedimenti di aggiornamento della normativa in materia di rischio industriale.

In particolare, il Decreto Legislativo n. 238/2005 ha esteso il campo di applicazione della normativa vigente, comprendendovi le operazioni di trattamento chimico o termico dei minerali, e il deposito che comporti l'impiego delle sostanze pericolose individuate nell'allegato I (contenente l'elenco delle sostanze classificate come pericolose e i relativi quantitativi di riferimento). Ha ampliato inoltre la partecipazione dei soggetti interessati al processo della pianificazione d'emergenza, attraverso la consultazione anche dei lavoratori delle imprese subappaltatrici a lungo termine nella fase di elaborazione dei piani di emergenza interni, nonché della popolazione interessata nel caso di aggiornamento dei piani di emergenza esterni; ha individuato un secondo sovraordinato livello di gestione del rischio di incidenti nelle aree interessate dagli stabilimenti "Seveso"; ha introdotto nuove tipologie a rischio di cui tener conto nell'elaborazione delle politiche di assetto del territorio e del controllo dell'urbanizzazione, quali edifici frequentati dal pubblico, vie di trasporto principali, aree ricreative ed aree di particolare interesse naturale o particolarmente sensibili dal punto di vista naturale; ha intensificato il diritto dei cittadini interessati all'informazione sulle misure di sicurezza, da fornire d'ufficio e nella forma più idonea possibile.

Tra le novità della normativa in materia di rischio industriale vi è, dunque, il coinvolgimento attivo di tutti i soggetti interessati, sia nella fase di predisposizione del piano sia nelle successive fasi di aggiornamento ed attuazione nell'ambito di una più articolata struttura operativa, che coinvolga Stato, Regioni ed enti locali, finalizzata al successo della pianificazione di emergenza stessa.

Il 29/07/2015 è divenuta operativa in Italia la Nuova Direttiva SEVESO III, 2012/18/UE del 04/07/2012, recepita con D.Lgs. n.105 del 26/06/2015. La Direttiva si applica a tutti i nuovi stabilimenti, realizzati successivamente al 01/06/2015, e agli stabilimenti esistenti al 29/05/2015, che entro il 29/07/2016 avranno l'obbligo di notifica secondo le nuove disposizioni.

Con l'entrata in vigore del nuovo decreto legislativo sono stati abrogati tutti i decreti fin qui emanati in attuazione del D.Lgs 334/99. Il nuovo decreto pur riproponendo impianto e contenuto alla vecchia normativa, raccorda le disposizioni alla legislazione ambientale e a quella antincendio e contiene gli aggiornamenti necessari per renderle conformi alla nuova direttiva europea. In particolare nel nuovo decreto viene introdotto:

- Una ridefinizione delle soglie delle sostanze pericolose;
- L'obbligo per il gestore di dichiarare, oltre alle sostanze effettivamente detenute in stabilimento, anche quelle ragionevolmente previste, compresa la presenza di rifiuti;
- Un'ampliata classificazione delle sostanze e delle miscele pericolose;
- L'obbligo esplicito per il gestore di fornire dettagli, se disponibili, sugli stabilimenti vicini;
- L'obbligo per il gestore di valutare "l'effetto domino" tra gli scenari incidentali;
- L'obbligo per il gestore di valutare anche gli scenari incidentali derivanti da eventi naturali quali terremoti, inondazioni, etc.;
- Un insieme di maggiori obblighi per l'informazione alla popolazione (chiara, comprensibile e tempestiva);
- Un ampliamento dell'articolo inerente alle misure di controllo ed integrato rispetto alla Direttiva Seveso II, anche mutuando alcune definizioni e terminologie.

E' da notare che, in caso di incidenti, al fine di limitare l'effetto domino, il testo approvato dal Parlamento Europeo, prevede che nelle aree interessate dalla presenza di insediamenti a rischio di incidente rilevante (R.I.R.) anche gli impianti industriali che non rientrano nei parametri della normativa Seveso ma che si trovano in prossimità di stabilimenti a rischio, debbano fornire informazioni circa la natura delle sostanze utilizzate.

Come si evince, tra i rischi di origine naturale da analizzare, viene esplicitamente indicato quello sismico. Le oscillazioni provocate dal passaggio delle onde sismiche determinano spinte orizzontali e verticali sulle costruzioni e sugli apparecchi di un impianto, provocando gravi danni o addirittura il crollo se non sono stati adottati criteri antisismici in fase di progettazione e costruzione.

2.3 Gli insediamenti a rischio d'incidente rilevante in Italia

2.3.1 Introduzione e considerazioni riguardo il contesto italiano

I cittadini a rischio di incidenti rilevanti, calcolati secondo stime adottate dal ministero dell'ambiente sono oltre cinque milioni di cui 500.000 in misura estremamente grave (rischio di alta letalità) ed il problema coinvolge nel nostro Paese, a diversi livelli, circa 10.000 imprese e 800.000 addetti. Le criticità ambientali e di sicurezza delle popolazioni sono in particolare legate a:

- Rilascio e fuga di sostanze ad elevata tossicità nell'immediato e nel lungo termine;
- Esplosione di sostanze infiammabili con coinvolgimento di altre strutture;
- Perdite di prodotti tossici o infiammabili durante le operazioni di movimentazione e di stoccaggio;
- Mancanza di adeguate vie di fuga o sovraccarico della viabilità ordinaria in caso di emergenza.

Un elemento particolarmente importante poi per il territorio italiano, e che aumenta la gravità della situazione del nostro paese è dato dal fatto che molti stabilimenti sono ubicati

in zone industriali integrate in aree urbane densamente popolate, oppure in aree ad alta densità di concentrazione di stabilimenti industriali a rischio di incidente rilevante. Cosa infine che aumenta ulteriormente la pericolosità di questi impianti è dato dal fatto che molti di questi sono situati in zone caratterizzate da un forte rischio naturale.

Assume una rilevata importanza in queste circostanze la pianificazione territoriale dei luoghi in cui sorgono industrie di processo; essa ha il compito di assicurare che la probabilità di accadimento di conseguenze di incidenti potenziali sia presa in debita considerazione in tutti i processi decisionali:

- Per la scelta dell'ubicazione di nuove installazioni;
- Per la modifica degli impianti esistenti;
- Per la determinazione degli usi del suolo nelle vicinanze degli stabilimenti stessi;
- Per gli sviluppi delle zone in prossimità degli stabilimenti o delle aree ad alta concentrazione di impianti.

Il decreto legislativo 238/95 prevede anche l'emanazione di uno specifico decreto interministeriale che sancisca quali siano le distanze da mantenere per le altre strutture dall'impianto, a tal fine venne emanato il 9 maggio 2001 un decreto che stabilisce i requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione territoriale, con riferimento alla destinazione ed utilizzazione dei suoli che tengano conto della necessità di mantenere le opportune distanze tra stabilimenti e zone residenziali. Ciò ovviamente solo per quanto riguarda le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante che rientrano nei seguenti casi:

- Insediamenti di nuovi stabilimenti;
- Modifiche degli stabilimenti esistenti;
- Nuovi insediamenti o infrastrutture attorno agli stabilimenti esistenti.

Gli strumenti urbanistici, nei casi previsti, individuano e disciplinano le aree da sottoporre a specifica regolamentazione, tenuto conto anche di tutte le problematiche territoriali ed infrastrutturali relative all'area. Per questo motivo, tali documenti devono

comprendere un Elaborato Tecnico “Rischio di incidenti rilevanti (RIR)” relativo al controllo dell’urbanizzazione, il quale deve contenere:

- Le aree di danno per ciascuna delle quattro categorie di effetti (elevata letalità, inizio letalità, danni irreversibili, danni reversibili) e secondo i valori di soglia previsti; la classe di probabilità di ogni singolo evento; le categorie di danno attese in relazione agli eventi incidentali che possono interessare gli elementi ambientali vulnerabili;
- L’individuazione e la rappresentazione su base cartografica tecnica e catastale aggiornata degli elementi territoriali e ambientali vulnerabili;
- La rappresentazione su base cartografica tecnica e catastale aggiornata dell’involuppo geometrico delle aree di danno per ciascuna delle categorie di effetti.
- L’individuazione e disciplina delle aree sottoposte a specifica regolamentazione risultanti dalla sovrapposizione cartografica degli involuppi e degli elementi territoriali e ambientali vulnerabili;
- Le eventuali ulteriori misure che possono essere adottate sul territorio, tra cui gli specifici criteri di pianificazione territoriale, la creazione di infrastrutture e opere di protezione, la pianificazione della viabilità, i criteri progettuali per opere specifiche ed anche dove necessario, gli elementi di correlazione con gli strumenti di pianificazione dell’emergenza e di protezione civile.

In Italia sono attualmente presenti 1.152 impianti industriali che trattano sostanze pericolose in quantitativi tali da rientrare nei parametri previsti negli artt. 6/7 del D.Lgs. 334/99, definiti insediamenti suscettibili di causare incidenti rilevanti e sottoposti alle specifiche norme di controllo e tutela descritte in premessa. Tali insediamenti sono situati nei territori di 739 comuni.

La legge prevede, per tali stabilimenti, che vengano perimetrate le aree circostanti all’insediamento nelle quali, nell’eventualità di un incidente, possono riscontrarsi conseguenze sull’ambiente o sulla salute della popolazione. Poiché la gravità degli effetti di un incidente è proporzionale alla distanza dal luogo dell’incidente e ai tempi di esposizione, l’area soggetta a rischio circostante allo stabilimento sarà divisa in tre distinte zone: “di

sicuro impatto”, “di danno” e “di attenzione”. È evidente che tali zone non sempre coincidono con i confini amministrativi di ogni singolo comune che ospita l’impianto, tali rischi infatti non possono limitarsi entro i confini amministrativi dei comuni in cui risiedono gli insediamenti.

L’analisi della distribuzione sul territorio degli insediamenti esposti a rischio d’incidente rilevante è di fondamentale importanza ai fini della prevenzione, proprio per valutare attentamente la pianificazione dell’utilizzo del suolo di quei territori dove si concentra una maggiore presenza di impianti con tali caratteristiche di pericolosità.

Inoltre, le attività di pianificazione d’emergenza devono considerare la presenza di più impianti in una medesima zona per ridurre la possibilità che un incidente possa innescare reazioni a catena (il cosiddetto effetto domino). In Italia, la maggior parte degli insediamenti RIR si concentra in Lombardia, Veneto, Piemonte ed Emilia Romagna.

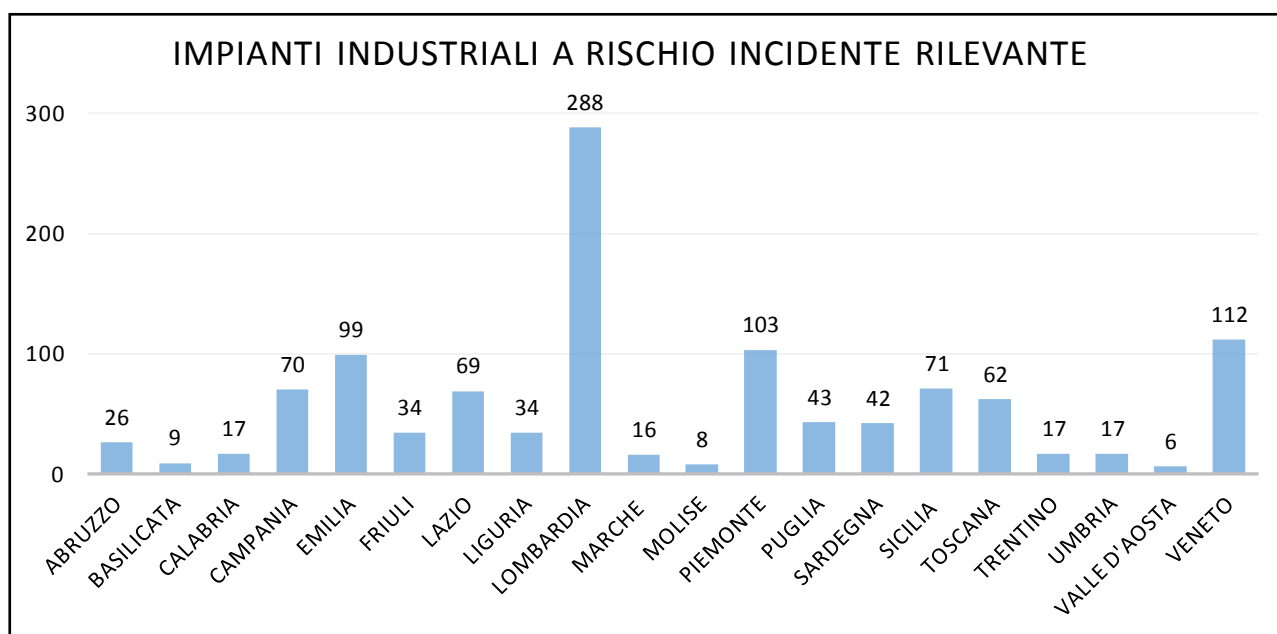


Tabella 2.3.1 - Impianti industriali RIR

In particolare si può osservare dall’istogramma che oltre il 25,2% degli stabilimenti sono concentrati in Lombardia ed in particolare nelle province di Milano, Bergamo, Brescia e Varese. Regioni con elevata presenza di industrie a rischio sono come già detto anche il Piemonte (circa 9% del totale), l’Emilia Romagna (8,7%) ed il Veneto (9,8%). In esse si evidenziano alcune aree di particolare concentrazione quali Trecate (nel Novarese), Porto

Marghera, Ferrara e Ravenna, in corrispondenza dei tradizionali poli di raffinazione e/o petrolchimici e le province di Torino, Alessandria e Bologna.

Al sud le regioni con maggior presenza di attività a notifica risultano essere la Sicilia (6,2%), la Campania (6,1%), la Puglia (3,8%) e la Sardegna (3,7%), in relazione alla presenza degli insediamenti petroliferi e petrolchimici nelle aree di Gela, Priolo, Augusta-Milazzo, Brindisi, Taranto, Porto Torres e Sarroch ed alla concentrazione di attività industriali nelle province di Napoli e Bari. Altre province che non fanno parte delle regioni elencate ma presentano un elevato numero di stabilimenti a rischio sono Livorno, Roma e Frosinone.

2.3.2 Tipologie di impianti

Nel definire i criteri di applicazione delle norme di tutela relativamente al rischio industriale il D.Lgs 334/99 all'art. 3 definisce cosa si intenda per "sostanze pericolose" e cioè: le sostanze, miscele o preparati, che sono presenti come materie prime, prodotti, sottoprodotti, residui o prodotti intermedi, ivi compresi quelli che possono ragionevolmente ritenersi generati in caso di incidente. La legge, quindi, stabilisce specifici criteri di sicurezza per impianti che trattino particolari sostanze in relazione al quantitativo presente nell'impianto.

Dall'indagine svolta da Legambiente è stato possibile avere una fotografia dettagliata in merito al territorio e al rischio industriale, in quanto ai comuni partecipanti è stato chiesto di indicare non solo il numero e l'ubicazione degli stabilimenti ma anche la loro tipologia.

Secondo i dati raccolti, la categoria più rappresentata tra gli insediamenti suscettibili di causare incidenti rilevanti è quella dei depositi di gas liquefatti (40%) e di seguito gli stabilimenti chimici e petrolchimici (30% fra le tipologie indicate dai comuni del campione). Tra questi insediamenti sono compresi alcuni degli impianti industriali più grandi del nostro Paese, tra cui il polo petrochimico di Porto Marghera e quello di Gela, presenti nel campione d'indagine. Si fa riferimento, in questo caso, ad alcune delle aree industriali più

importanti della Penisola, la cui presenza rappresenta un elemento fondamentale anche in relazione all'impatto ambientale di tali strutture.

Nella categoria indicata con "altro" una porzione rilevante del nostro campione d'indagine, le amministrazioni intervistate hanno indicato la presenza nei territori di loro competenza principalmente di stabilimenti che realizzano cromature di materiali metallici, stabilimenti di galvanotecnica, depositi di carburanti, depositi di gas tecnici, e impianti per il trattamento dei rifiuti speciali.

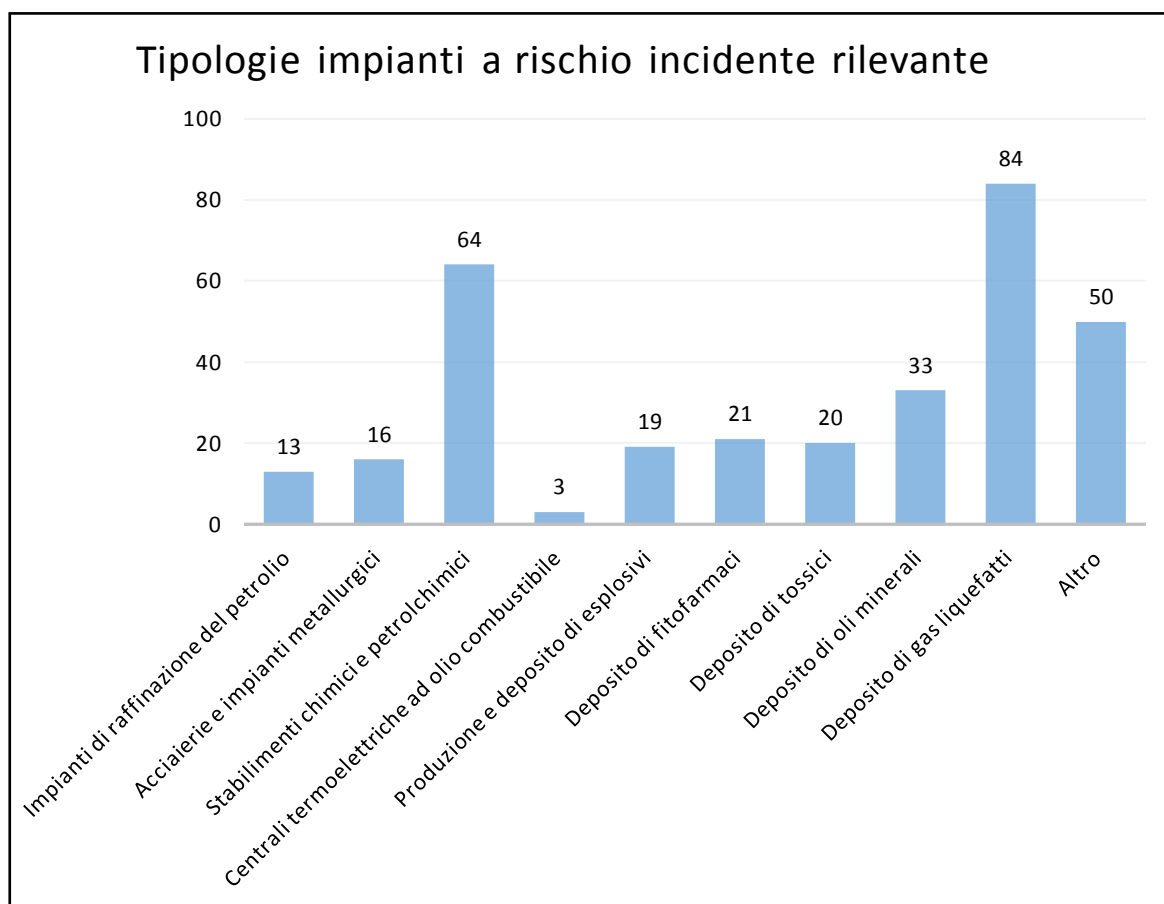


Tabella 2.3.2 – Tipologie di impianti RIR

Riguardo alla distribuzione sul territorio nazionale delle diverse tipologie di attività, si evidenzia una concentrazione di stabilimenti chimici e petrolchimici particolarmente in Lombardia (35% del totale nazionale e 40% del totale lombardo) e poi in Emilia Romagna, Piemonte e Veneto.

L'industria della raffinazione, 17 impianti in Italia, risulta invece piuttosto distribuita sul territorio nazionale, con una particolare concentrazione in Sicilia, dove sono presenti 5 impianti, ed in Lombardia; analogamente si riscontra per i depositi di oli minerali, che risultano però particolarmente concentrati in prossimità delle grandi aree urbane del Paese.

Per quanto riguarda i depositi di GPL, si evidenzia una diffusa presenza nelle regioni meridionali, in particolare in Campania e Sicilia, oltre che in Lombardia, Toscana, Veneto ed Emilia Romagna, ed in generale presso le aree urbane presenti nel territorio nazionale, con punte nelle province di Napoli, Salerno, Brescia, Venezia e Catania.

Per gli stabilimenti soggetti all'articolo 8 del D.Lgs. 334/99 è stata elaborata un'ulteriore suddivisione sulla base della loro complessità gestionale ed impiantistica, tale classificazione è stata fatta utilizzando, tra gli altri, fattori quali la tipologia di attività svolta e l'esistenza e la complessità di lavorazioni chimiche. Con questi criteri appena elencati si è ottenuta la seguente suddivisione:

- Stabilimenti ad elevata complessità sia impiantistica che gestionale (raffinerie ed impianti petrolchimici di base);
- Stabilimenti a media complessità, ovvero stabilimenti con impianti complessi quali i chimici di medie o piccole dimensioni ma con una gestione operativa relativamente semplice;
- Stabilimenti a bassa complessità cioè con impianti semplici, assenza di lavorazioni chimiche complesse, gestione operativa semplice e ridotto impiego di personale (depositi di GPL, di idrocarburi liquidi, magazzini).

Definire in maniera precisa e puntuale la mappatura degli insediamenti industriali a rischio d'incidente rilevante e la loro tipologia è assolutamente essenziale anche ai fini della pianificazione di interventi di mitigazione del rischio. Attraverso lo studio delle possibili conseguenze di un evento incidentale, del comportamento delle sostanze presenti e trattate nell'impianto, degli effetti sull'ambiente e sull'uomo e della relazione con il contesto

territoriale circostanze, è necessario mettere a punto tutti gli opportuni interventi per mitigare la pericolosità di tali attività.

2.3.3 Analisi preliminare delle interazioni di un'area industriale

Gli impianti industriali sono inseriti in un contesto complesso ed in questo contesto necessariamente interagiscono. Dal punto di vista della sicurezza queste interazioni possono essere delle seguenti tipologie:

- Interazioni con altri impianti industriali (effetto domino);
- Interazioni con il trasporto di merci pericolose;
- Calamità naturali;
- Cause accidentali (p.e. caduta aereo);
- Eventi politici subiti (p.e. guerra);
- Azioni terroristiche volontarie.

Tra le calamità naturali l'evento sismico è sicuramente il più temuto a livello nazionale, vista l'elevata sismicità di tutta la Penisola. È necessario quindi che impianti di nuova generazione siano realizzati secondo criteri antisismici, mentre per gli impianti esistenti sono necessari interventi di miglioramento e/o adeguamento alle normative vigenti.

2.4 Impianti industriali e rischio sismico

2.4.1 Introduzione

È ben noto come gli eventi sismici causino gravi danni alle strutture e possano provocare ingenti danni all'ambiente qualora vadano ad agire sugli impianti a rischio di incidente rilevante (RIR).

L'esperienza acquisita ha evidenziato che le criticità più ricorrenti sono relative a serbatoi di stoccaggio, si hanno danni al mantello e/o alle giunzioni tra le parti che provocano la perdita totale del contenuto, ma spesso si hanno danneggiamenti gravi anche senza arrivare al vero e proprio collasso. Per effetto delle vibrazioni innescate dal sisma nei serbatoi si possono creare, all'interfaccia liquido-gas, onde superficiali a bassa frequenza che possono avere effetti significativi sull'integrità dello stesso. Tale fenomeno, denominato "sloshing", è dovuto al movimento di un fluido in un contenitore chiuso non completamente riempito; esso causa una variazione della distribuzione delle pressioni sulle pareti del serbatoio e, conseguentemente, una risultante e dei momenti idrodinamici non nulli sulle pareti del serbatoio e sull'intera struttura a cui è vincolato.

In caso di sisma, le tubazioni sono tra gli elementi impiantistici più vulnerabili, siano esse interrate o meno. In genere nelle attività industriali il sisma può causare l'insorgenza contemporanea di più scenari incidentali, con ovvie ricadute sulla gestione degli stessi in termini di disponibilità delle risorse per effettuare un pronto intervento ed una gestione dell'emergenza.

Il rischio sismico, in generale, è determinato dalla combinazione della pericolosità sismica, della vulnerabilità e dell'esposizione di un certo luogo; esso rappresenta la misura dei danni attesi in un dato intervallo di tempo, in base al tipo di sismicità, di resistenza delle costruzioni e di antropizzazione (natura, qualità e quantità dei beni esposti). Tale definizione è valida per qualsiasi costruzione presente sul territorio, compresi gli impianti industriali, aventi peculiarità particolari, descritte accuratamente nel prossimo capitolo.

In genere la sismicità indica la frequenza e la forza con cui si manifestano i terremoti, ed è una caratteristica fisica del territorio. Se conosciamo la frequenza e l'energia associate ai terremoti che caratterizzano un territorio, e attribuiamo un valore di probabilità al verificarsi di un evento sismico di una data magnitudo in un certo intervallo di tempo, possiamo definirne la pericolosità sismica. La pericolosità sismica sarà tanto più elevata quanto più probabile sarà il verificarsi di un terremoto di elevata magnitudo, a parità di intervallo di tempo considerato.

Le conseguenze di un terremoto dipendono anche dalle caratteristiche di resistenza delle costruzioni alle azioni di una scossa sismica. La predisposizione di una costruzione ad essere danneggiata si definisce vulnerabilità. Quanto più un edificio è vulnerabile (per tipologia, progettazione inadeguata, scadente qualità dei materiali e modalità di costruzione, scarsa manutenzione), tanto maggiori saranno le conseguenze.

Infine, la maggiore o minore presenza di beni esposti al rischio, la possibilità cioè di subire un danno economico, ai beni culturali, la perdita di vite umane, è definita esposizione.

L'Italia ha una pericolosità sismica medio-alta (per frequenza e intensità dei fenomeni), una vulnerabilità molto elevata (per fragilità del patrimonio edilizio, infrastrutturale, industriale, produttivo e dei servizi) e un'esposizione altissima (per densità abitativa e presenza di un patrimonio storico, artistico e monumentale unico al mondo). La nostra Penisola è dunque ad elevato rischio sismico, in termini di vittime, danni alle costruzioni e costi diretti e indiretti attesi a seguito di un terremoto.

2.4.2 Evoluzione del quadro sismico in Italia

Le prime norme sismiche italiane risalgono al 1996 ma, le prime grandi novità relative alla valutazione del rischio sismico, sono state introdotte con l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n.3274 del 20/03/2003, successivamente aggiornata e integrata dall'O.P.C.M. n. 3316 del 02/10/2003 e dall'O.P.C.M. n. 3431 del 03/05/2005. Secondo l'ordinanza, le disposizioni dovevano essere applicate a tutti i nuovi edifici e agli edifici esistenti oggetto di modifiche strutturali. Veniva previsto, inoltre, un primo accenno all'obbligo, per i proprietari, di procedere con la verifica sismica di

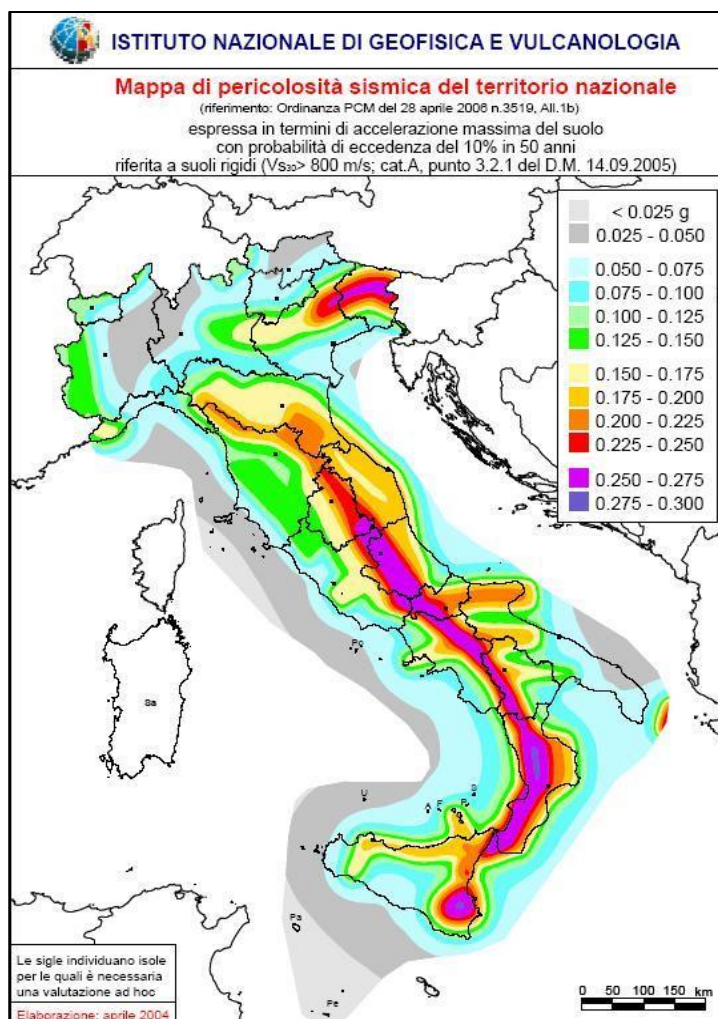


Figura 2.4.1 – Pericolosità sismica del territorio nazionale

quegli edifici e di quelle opere infrastrutturali esistenti che potevano assumere rilevanza in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso. Tale concetto è stato meglio chiarito, in seguito, dal Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3685 del 21/10/2003, dove le verifiche sismiche andavano eseguite su tutte quelle strutture esistenti "il cui collasso può comportare gravi conseguenze in termini di danni ambientali" e tra questi venivano esplicitamente menzionati gli impianti a rischio di incidente rilevante, rientranti nel D.Lgs. n.334 del 17/08/1999. Proprio sulla base della O.P.C.M. n. 3274 è stato chiesto ai gestori di tali impianti di valutare i rischi in conseguenza delle azioni sismiche.

Dal punto di vista strettamente tecnico, l'ordinanza n.3274 introduceva sia nuove metodologie di valutazione dell'azione sismica che potenzialmente si poteva sviluppare in un certo sito del territorio italiano, e sia nuove metodologie di calcolo, da utilizzare nelle verifiche strutturali degli edifici in zona sismica.

L'azione tellurica veniva così valutata in funzione della localizzazione del sito, delle caratteristiche del terreno su cui sorgeva la struttura considerata, dei periodi propri di oscillazione e dell'accelerazione massima al suolo che si poteva sviluppare. Quest'ultimo parametro, diverso per le n.4 zone sismiche allora previste, veniva definito come quel valore di accelerazione del terreno indotta dal sisma con una probabilità di superamento pari al 10% in un periodo di 50 anni.

Per quanto riguarda le metodologie di calcolo relative alle verifiche, oltre al cambiamento dettato dalla possibilità di far riferimento all'analisi modale, le verifiche strutturali dovevano essere effettuate abbandonando il metodo delle tensioni ammissibili e adottando il metodo degli Stati Limite.

Le novità introdotte con l'O.P.C.M. n.3274 del 2003, con le successive modifiche e integrazioni, sono state recepite e ulteriormente affinate negli anni portando prima alla pubblicazione del D.M. 14/09/2005 (T.U. 2005) e infine al D.M. 14/01/2008 (N.T.C. 2008), oggi vigente e aggiornato dalla Circolare n.617 del 02/02/2009. L'ultimo Testo Unico recepisce buona parte delle indicazioni sulla progettazione dettate dagli Eurocodici.

Analizzando l'evoluzione normativa avvenuta in Italia ci si rende conto che impianti industriali realizzati, ad esempio, antecedentemente al 1996, tra il 1996 e il 2003, tra il 2003 e il 2009 e successivamente al 2009, dal punto di vista del rischio sismico, descrivono un quadro non omogeneo. Ad oggi, impianti collocati in siti territorialmente analoghi o limitrofi, al variare del periodo della loro realizzazione, possono essere stati costruiti considerando diverse quantificazioni dell'azione sismica, a cui potenzialmente possono essere soggetti, e considerando diverse metodologie di calcolo e di verifica.

Nel tempo, ad esempio, è stata modificata più volte la mappatura sismica italiana, sia dal punto di vista dell'intensità dei terremoti che dal punto di vista della definizione delle zone, passando da una valutazione per zone omogenee, alla valutazione odierna, puntuale per ciascun sito in funzione delle coordinate geografiche e di altri parametri, tra cui fondamentali sono le caratteristiche del terreno di fondazione. Anche le metodologie di analisi strutturale sono mutate nel tempo. Le apparecchiature degli impianti venivano generalmente calcolate autonomamente, applicando l'azione sismica semplicemente al baricentro delle masse spesso senza tenere conto dell'effetto della mobilità dei liquidi contenuti, e le relative fondazioni venivano poi calcolate separatamente applicando i carichi trasmessi in fondazione dall'apparecchiatura.

Secondo le NTC 2008 e l'Eurocodice 8 il sistema apparecchiatura-fondazione deve essere ora considerato nel suo complesso e verificato per equilibrio, resistenza e stabilità, e non si può prescindere dalla mobilità dei liquidi contenuti, come visto per il fenomeno dello "sloshing" dei serbatoi. Quindi, per le opere industriali esistenti, si rende necessaria una verifica sismica soprattutto qualora l'accelerazione orizzontale calcolata ad oggi per il sito risulti maggiore di quella considerata nel periodo di realizzazione.

Purtroppo, nonostante l'evoluzione legislativa avutasi, relativamente agli impianti di processo, sussiste comunque, oggi, un vuoto normativo in termini di progettazione antisismica, nel senso che molti metodi esistenti non sono cogenti e le prescrizioni tecniche vigenti sono poche e prevalentemente rivolte al mondo dell'edilizia civile.

In ogni caso, per unità produttive operanti in zona sismica, ai sensi del D.Lgs. n. 81/08 le opere e le strutture presenti sui luoghi di lavoro devono possedere stabilità e solidità corrispondenti al loro tipo di impiego ed alle caratteristiche ambientali del sito. Inoltre, la nuova Direttiva 2012/18/UE - Seveso III - prescrive la valutazione del rischio sismico per tutti gli stabilimenti industriali.

2.4.3 Normative Tecniche specifiche per serbatoi e tubazioni

Per quanto concerne gli impianti industriali si applicano le disposizioni richiamate dal Decreto Ministeriale del 14.01.2008 “Norme Tecniche per le Costruzioni” (“N.T.C. 2008”). Premesso che all’interno delle N.T.C. 2008 è corretto ricondurre i serbatoi agli “impianti o elementi non strutturali”; con riferimento agli edifici già esistenti all’entrata in vigore delle N.T.C. 2008, il proprietario è tenuto ad una serie di adempimenti e verifiche su tutto ciò che insiste sul proprio sito, quand’anche di proprietà di terzi. La Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009 “Istruzioni per l’applicazione NTC 2008” individua i componenti non strutturali che richiedono una valutazione sismica. In generale, si richiede una maggiore priorità di adeguamento antisismico per i sistemi che presentano un’elevata vulnerabilità, una grande importanza, un basso costo di adeguamento sismico e una limitata interruzione dei servizi necessaria per portare a termine l’adeguamento.

La progettazione antisismica dei serbatoi in Italia fa in genere riferimento sia alle N.T.C. 2008 che, soprattutto, agli Eurocodici (specie l’Eurocodice 8, UNI EN 1998-4 (ed. 2006)), seppur esse siano pensate prevalentemente per opere di ingegneria civile.

Per apparecchiature o tubazioni PED, o che sono soggette a pressione interna a causa del carico liquido o solido di esercizio, le verifiche sono eseguite anche secondo le norme EN 13445 o EN 13480.

Per i grandi tanks di stoccaggio cilindrici verticali le verifiche possono essere eseguite secondo l’EC 8-4 o secondo lo standard API 650. Nella tabella E-8 delle Norme americane si fa riferimento ad una verifica specifica per le tubazioni, oggetto di studio nei successivi capitoli. In tabella, successivamente riportata, si fa riferimento a diversi spostamenti imposti nel punto di uscita della tubazione, a seconda del rapporto di ancoraggio del serbatoio, dipendente dalla tipologia di collegamento e dalla di fondazione presente.

Table E-8—Design Displacements for Piping Attachments

Condition	ASD Design Displacement mm (in.)
Mechanically-anchored tanks	
Upward vertical displacement relative to support or foundation:	25 (1)
Downward vertical displacement relative to support or foundation:	13 (0.5)
Range of horizontal displacement (radial and tangential) relative to support or foundation:	13 (0.5)
Self-anchored tanks	
Upward vertical displacement relative to support or foundation:	
Anchorage ratio less than or equal to 0.785:	25 (1)
Anchorage ratio greater than 0.785:	100 (4)
Downward vertical displacement relative to support or foundation:	
For tanks with a ringwall/mat foundation:	13 (0.5)
For tanks with a berm foundation:	25 (1)
Range of horizontal displacement (radial and tangential) relative to support or foundation	50 (2)

Figura 2.4.2 – Tabella E-8 Norme API 650

Altre norme degne di nota e spesso utilizzate dalle multinazionali sono le indiane IITK-GSDMA “Guidelines for Seismic Design of Liquid Storage Tanks”, e le neozelandesi “New Zealand Recommendations Seismic Design of Storage Tanks”.

Nei calcoli si tiene conto del sovrasspessore di corrosione, in atto o prevedibile, della tolleranza di fabbricazione delle lamiere, e delle tolleranze di costruzione sul diametro e per ovalizzazione. Per quanto concerne il grado di riempimento del serbatoio, parametro significativo per il dimensionamento e la verifica del comportamento alle sollecitazioni sismiche, ci si conforma alle indicazioni delle NTC 2008 per le categorie di azioni variabili E (ambiente ad uso industriale), coerenti con la norma UNI EN1991-4:2006. Si ritiene, pertanto, che il grado di riempimento possa essere considerato pari a non più dell’80% della capacità utile (variabile tra il 90 e il 95% della capacità geometrica).

2.4.4 Impianti industriali RIR a rischio sismico in Italia

Tra le cause che possono provocare incidenti rilevanti negli impianti industriali, l'azione sismica dovrebbe essere presa in considerazione come una tra quelle potenzialmente più importanti. Infatti, a differenza dell'incidente casuale, che si può ritenere dovuto ad eventi indipendenti e pertanto ha una trascurabile probabilità che si verifichi simultaneamente in più apparati (e da cui si può spesso cautelare mediante ridondanza degli stessi), nel caso sismico la causa comune, il terremoto, rende altamente probabile che i danni si verifichino simultaneamente in più punti dell'impianto, in questo modo gli effetti possono risultare amplificati, per esempio a causa del mancato funzionamento dei sistemi di sicurezza.

Un terremoto può produrre su di un impianto danni analoghi a quelli che si registrano, ad esempio negli edifici, a seguito della distruzione più o meno grande di costosi apparati, oltre alla possibile perdita di vite umane in conseguenza di crolli; oltre a questi, e spesso addirittura più rilevanti, si devono mettere in conto le perdite economiche dovute all'interruzione del ciclo produttivo e le conseguenze indirette sull'ambiente, e quindi sulle persone, a seguito di scoppi, incendi, rilascio di sostanze tossiche, ecc., che si possono produrre a causa dei danni prodotti dal terremoto.

Le normative sismiche vigenti, studiate per lo più per le costruzioni civili, si pongono come obiettivo, in caso di sisma violento, di proteggere la vita umana evitando il crollo della costruzione, ma non di impedire che questa si danneggi, anzi è proprio grazie a questi danni che il manufatto riesce a dissipare l'energia provocata dall'azione sismica.

Le norme per le costruzioni civili risultano quindi generalmente inadeguate per le strutture degli impianti industriali, per i quali un danneggiamento può comportare conseguenze anche gravi, in termini, ad esempio, di rilascio di sostanze pericolose. Tra le varie lavorazioni industriali, quelle dell'industria chimica, nei termini indicati sopra, appaiono potenzialmente ad elevato rischio.

La distribuzione degli impianti a rischio di incidente rilevante suddivisi per categoria sismica, articolo di adempimento al D.Lgs. 238/05, è data nella seguente tabella:

REGIONE	N° impianti tot.		N° impianti in zona sismica		N° impianti in I cat.		N° impianti in II cat.		N° impianti in III cat.		% impianti in zona sismica	
	art. 6	art. 8	art. 6	art. 8	art. 6	art. 8	art. 6	art. 8	art. 6	art. 8	art. 6	art. 8
ABRUZZO	12	8	5	3	-	-	5	3	-	-	41,7%	37,5%
BASILICATA	4	2	3	1	-	1	3	-	-	-	75%	50%
CALABRIA	5	6	5	6	3	3	2	3	-	-	100%	100%
CAMPANIA	44	28	40	27	-	-	19	5	21	22	90,9%	96,4%
EMILIA	66	46	18	2	-	-	18	2	-	-	27,3%	4,3%
FRIULI	20	11	12	3	4	2	8	1	-	-	60%	27,3%
LAZIO	44	35	24	13	-	-	24	13	-	-	54,5%	37,1%
LIGURIA	17	16	2	2	-	-	2	2	-	-	11,8%	12,5%
LOMBARDIA	144	113	1	1	-	-	1	1	-	-	0,7%	0,9%
MARCHE	8	7	8	7	-	-	8	7	-	-	100%	100%
MOLISE	3	4	1	1	-	-	1	1	-	-	33,3%	25%
PIEMONTE	80	38	-	1	-	-	-	1	-	-	-	2,6%
PUGLIA	26	24	9	6	-	-	6	6	3	-	34,6%	25%
SARDEGNA	22	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SICILIA	33	34	32	33	-	-	32	33	-	-	97%	97,1%
TOSCANA	42	19	28	11	-	-	28	11	-	-	66,7%	57,9%
TRENTINO	12	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UMBRIA	14	4	11	3	-	-	11	3	-	-	78,6%	75%
VALLE D'AOSTA	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
VENETO	51	40	3	-	-	-	3	-	-	-	5,9%	-
ITALIA	649	473	202	120	7	6	171	92	24	22	31,1%	25,1%

Tabella 2.4.1 – Localizzazione impianti RIR

Nella Tabella sono riportati i numeri degli impianti ritenuti a rischio rilevante secondo il D. L. 334/99, che recepisce la Direttiva 96/82/CE, suddivisi per regione ed in base alla sismicità della zona di localizzazione.

Risulta evidente che quasi trecento impianti ricadono in zone classificate in II categoria, e quindi ad elevata pericolosità sismica. L'importanza di prevedere tecniche di riduzione del rischio sismico da impiegare sia negli impianti esistenti con interventi migliorativi, sia in quelli nuovi od al rinnovamento di singoli apparati, appare dunque assolutamente evidente.

3 L'EFFETTO DEL SISMA SUGLI IMPIANTI INDUSTRIALI

3.1 Introduzione

Il sisma è uno degli eventi naturali più temuti in quanto non prevedibile e d'altra parte capace di conseguenze catastrofiche. In questo capitolo si esaminano le criticità, dovute all'azione sismica, sulle apparecchiature più comuni presenti negli stabilimenti produttivi.

L'insegnamento appreso dai terremoti passati è che le strutture contenute negli impianti petrolchimici non sono particolarmente vulnerabili al sisma, trattandosi per lo più di strutture in acciaio. I danni osservati sono in genere conseguenti di una progettazione che non aveva tenuto conto, o almeno non in modo sufficiente, delle caratteristiche dell'azione sismica; ad esempio alcuni danni nei sistemi di tubazioni erano dovuti al non aver messo in conto il moto relativo delle parti collegate; alcuni gusci sottili furono danneggiati dai collegamenti dovuti a scale e passerelle e di cui non si era tenuto conto.



Figura 3.1.1 – Esempio di danneggiamento di un serbatoio



Figura 3.1.2 – Incendio in un impianto causato dal sisma

Un'altra importante causa di insuccessi sono state le fondazioni; i cedimenti differenziali, le frane e, in qualche caso, la liquefazione, hanno spesso prodotto danni consistenti agli impianti. I contenitori snelli hanno avuto problemi nelle zone di transizione, come il collegamento tra le pareti, o i collegamenti alle fondazioni, dove sono stati osservati sfilamento o snervamento degli ancoraggi. I contenitori orizzontali sono spesso caduti dai loro sostegni. I serbatoi cilindrici, specialmente quelli non ancorati, si sono dimostrati particolarmente vulnerabili.

Le cause sono spesso da imputare ad una progettazione inadeguata, in cui non si è tenuto conto dell'effettivo livello di forze, e degli effetti legati "all'uplift" del serbatoio, che si può verificare nella parte soggetta a decompressione, quando il fondo è semplicemente appoggiato sul terreno. Se le pressioni dinamiche sulle pareti sono dovute principalmente al fluido trascinato nel moto del serbatoio, l'onda superficiale di lungo periodo (sloshing) che interessa la parte più alta del liquido può produrre anch'essa effetti negativi. Oltre al possibile superamento del franco con conseguente versamento del contenuto, nei serbatoi con tetto galleggiante l'onda superficiale produce ampie oscillazioni del tetto che comportano la rottura delle guarnizioni e la fuoruscita del contenuto; nel caso di serbatoi con contenuto infiammabile questa può essere la causa iniziatrice di un incendio di vaste proporzioni, come si è visto per la raffineria Tupras di Izmit (Turchia 1999).



Figura 3.1.3 – Incendi nella raffineria Tupras

Il punto critico delle tubazioni è costituito dai giunti di collegamento ai vari apparati connessi, quando non si è tenuto conto del moto relativo che si può verificare tra le parti collegate.

L'aspetto più preoccupante per quanto concerne il rischio sismico di questi impianti, è quello delle conseguenze prodotte dai danni, in se anche non rilevanti, dovuti al terremoto, ossia agli incendi del materiale altamente infiammabile che esse trattano ed al possibile rilascio di sostanze inquinanti o tossiche.

Naturalmente tutti questi impianti sono dotati di sistemi di protezione atti a ridurre il rischio e le conseguenze di incidenti di questo tipo; tuttavia questi sistemi sono per lo più studiati per far fronte ad eventi accidentali e non all'azione sismica, e si è visto che in caso di terremoto queste precauzioni si sono dimostrate insufficienti, poiché il sisma può produrre, oltre l'incidente, anche la messa fuori servizio dei sistemi di protezione, per esempio interrompendo l'afflusso dell'acqua o mettendo fuori uso i sistemi che trasportano o producono l'energia necessaria ad alimentare i sistemi antincendio.

3.2 Differenze tra settore civile e settore industriale

Un punto di partenza essenziale per analizzare le criticità riguarda l'osservazione dei danneggiamenti occorsi durante i terremoti, con la finalità di identificare, per una determinata tipologia strutturale, delle grandezze di riferimento da monitorare e dei relativi indicatori di pericolo. Per analizzare il danno si procede con la seguente modalità: in primo luogo si possono considerare le condizioni per cui si può avere il collasso locale o globale della struttura, il quale corrisponde ad un'interruzione della lavorazione ed al rilascio delle sostanze trattate; in seconda battuta si possono analizzare tutte quelle situazioni, strutturalmente secondarie, che presentano una perdita di integrità strutturale via via decrescente e valutarne le conseguenze dal punto di vista della sicurezza del processo.

L'analisi del rischio sismico di un impianto e la scelta delle soluzioni più efficienti per la sua riduzione non possono essere limitate allo studio di singoli componenti e strutture, a causa delle interazioni tra essi: infatti i componenti sono dotati di strutture di sostegno e sono tra loro connessi da sistemi di tubazioni, a loro volta dotati di strutture di sostegno.

Ad una prima analisi della risposta sismica di un impianto, proprio le tubazioni appaiono come un possibile elemento vulnerabile: infatti esse collegano apparecchiature diverse, che possono avere una diversa risposta al sisma, ed il loro percorso interessa un certo numero di sostegni, con proprie caratteristiche di vibrazione. Inoltre buona parte delle connessioni tra tubazioni e tubazioni e tra tubazioni ed apparecchiature sono realizzate per flangiatura, per cui anche modesti disassamenti delle due estremità delle flange possono portare a perdite.

Infine, durante un terremoto, si possono verificare cadute di oggetti ed accessori dalle parti più elevate delle strutture di sostegno e dei componenti di impianto, i quali possono impattare sulle tubazioni, poste generalmente più in basso.

L'analisi del rischio legato al rilascio di sostanze pericolose in un impianto di processo, a seguito di un sisma, richiede di valutare le frequenze di accadimento e le possibili conseguenze degli eventi (o scenari) incidentali da esso innescati. Per quanto riguarda le conseguenze, il caso non presenta apparentemente sostanziali differenze rispetto ad una tradizionale analisi del rischio legato ad eventi incidentali innescati da altre cause (guasti, rotture, ecc.); si tratta infatti di caratterizzare lo scenario incidentale che origina la perdita di contenimento, valutare l'entità e le modalità di fuoriuscita del prodotto, la dispersione nell'ambiente, l'eventuale innesco, se si tratta di un prodotto infiammabile, e l'estensione delle zone di danno. Il problema si complica perché un sisma, a differenza dei classici eventi incidentali, è in grado di originare una moltitudine di sorgenti di danno contemporanee e catene di effetti domino difficilmente prevedibili.

Anche la valutazione delle frequenze attese per lo scenario incidentale risulta, nel caso di un sisma, decisamente complessa, a causa della concatenazione di eventi che può portare allo scenario considerato. Inoltre, il ricorso all'analisi di dati storici per la stima delle frequenze incidentali, che costituisce l'approccio spesso adottato per gli scenari tradizionali dell'industria di processo è applicabile solo in parte, data la scarsa disponibilità di informazioni per eventi che sono, in termini assoluti, piuttosto rari e per la scarsa qualità dei report finora disponibili.

Fino a non molti anni fa gli studi di base, le attività di ricerca applicata e la realizzazione di tecnologie e dispositivi atti a contrastare o minimizzare gli effetti dei terremoti sui manufatti strutturali hanno fatto principale riferimento al settore civile. Per quanto concerne invece gli impianti industriali l'interesse è stato invece nettamente minore, con la sola eccezione del settore nucleare per cui il grande rischio potenziale derivante da rilasci di materiale radioattivo ha evidenziato, fin dalla sua origine, il bisogno di considerare nelle relative progettazioni tutte le possibili cause di danno, tra cui gli effetti dei sismi, attraverso valutazioni molto approfondite, anche più di quanto strettamente imposto dalle normative correnti.

Solo in tempi più recenti, anche a seguito di alcuni eventi catastrofici, che hanno provocato rilasci di sostanze pericolose, con forte impatto sull'uomo e sull'ambiente, lo studio della stabilità sismica delle strutture che costituiscono gli impianti industriali ha cominciato a divenire oggetto di studio ed analisi.

Le norme per le costruzioni civili risultano generalmente inadeguate per le strutture degli impianti industriali, per i quali un danneggiamento (accettato in campo civile al fine di dissipare l'energia del sisma) può comportare conseguenze anche gravi, in termini, ad esempio, di rilascio di sostanze pericolose. Il trasferimento agli impianti industriali delle conoscenze già acquisite e delle soluzioni di protezione già sviluppate in campo civile, non può essere quindi diretto né tantomeno risolutivo, a causa delle assai diverse peculiarità strutturali e funzionali. E neppure quanto sviluppato con riferimento agli impianti nucleari può rappresentare in maniera generale il settore industriale, il quale essendo caratterizzato da una elevata varietà di tipologie differenti, necessita di una differenziazione in modo da consentire una valutazione qualitativa dei rispettivi potenziali di impatto e quindi l'individuazione delle componenti impiantistiche a maggior rischio nonché una classificazione delle conseguenze in relazione alle specifiche di produzione.

In particolare di seguito si farà riferimento agli impianti dell'industria di processo: sotto questa denominazione rientrano tutte le installazioni che operano trasformazioni chimiche o chimico-fisiche dei materiali. Tale tipologia, oltre all'industria chimica, si estende in realtà a numerosi settori merceologici che utilizzano analoghe operazioni e conseguentemente analoghe apparecchiature e sistemi, come per esempio l'industria metallurgica di base, l'industria alimentare, quella farmaceutica ecc. Sostanzialmente sono coinvolte attrezzature eterogenee e complesse caratterizzate da un'ampia varietà di configurazioni impiantistiche, di condizioni operative e di sostanze trattate.

La varietà riguarda in questo caso sia le dimensioni delle apparecchiature utilizzate conseguentemente le loro masse, sia le condizioni di temperature e di pressioni coinvolte, questa eterogeneità complica notevolmente il comportamento durante un possibile evento sismico e di conseguenza anche l'analisi del rischio risulta più difficoltoso. Il pericolo maggiore comunque per questi tipi di industrie, oltre ovviamente al collasso completo della struttura, è quello collegato al rilascio delle sostanze trattate nell'ambiente, a seguito della rottura anche parziale di parti strutturali. Tali sostanze frequentemente rientrano, infatti, fra quelle definite pericolose in quanto infiammabili, esplosive, corrosive o tossiche. Il loro rilascio può pertanto creare effetti fortemente dannosi sull'impianto stesso ed altri addirittura catastrofici sia per l'uomo che per l'ambiente, arrivando anche ad interessare aree di molti chilometri nell'intorno dell'installazione.

3.3 Categorie funzionali dell'industria di processo

Prima di passare ad un'attenta disamina delle modalità di collasso osservate negli stabilimenti industriali a seguito di un sisma, si riportano due tipologie di classificazione utilizzate usualmente per gli impianti produttivi. Tali classificazioni permettono di raggruppare in gruppi omogenei le strutture di uno stabilimento aventi peculiarità simili, anche in termini di danneggiamento.

Nella maggior parte dei casi l'impiantistica che costituisce l'industria di processo è caratterizzata da strutture prevalentemente metalliche, dotate quindi di una determinata elasticità intrinseca, supportate da fondazioni in calcestruzzo armato. In particolare è possibile distinguere tre macro-categorie funzionali:

- Unità operative di processo. Sono quelle in cui avvengono le trasformazioni chimiche e chimico-fisiche della materia, soggette quindi a corrispondenti condizioni di pressione e temperatura particolari. Sono costituite nella massima parte dei casi da strutture metalliche di forma semplice a snella, raramente presentano masse considerevoli.
- Unità di stoccaggio. Sono ancora prevalentemente metalliche ma caratterizzate da limitata snellezza e da massa elevata e concentrata, determinata in massima parte dal contenuto di materiale immagazzinato. Le apparecchiature maggiormente sensibili al rischio sismico sono quelle destinate all'immagazzinamento di prodotti liquidi, perché all'azione diretta del sisma sull'involucro si unisce l'effetto dinamico sviluppato dall'ondeggiamento del liquido contenuto che costituisce una massa impulsiva di notevole intensità. Tale effetto invece è molto minore sia nel caso dei materiali stoccati allo stato solido, i quali hanno assai minore mobilità, sia per quelli allo stato gassoso a causa della loro modestissima massa.
- Tubazioni. Hanno il compito di convogliare i materiali oggetto di lavorazione da un'unità all'altra dell'impianto, assicurando al tempo stesso il loro pieno confinamento. In massima parte sono formate da tubazioni metalliche, esse

rappresentano la componente più semplice ed elastica dell'impianto. In realtà a causa dei numerosi elementi di sostegno, del raggruppamento in fasci comuni e degli elementi necessari per far fronte a dilatazioni o contrazioni termiche, sono presenti una serie di vincoli che le rendono un elemento multi iperstatico. Le tubazioni sono talvolta soggette, per ragioni di esercizio a fenomeni vibratorii, i quali combinati con un possibile evento sismico possono generare fenomeni di risonanza e conseguenti sollecitazioni anomale eccedenti la resistenza del materiale da costruzione. Per alcune peculiari finalità (reti fognarie, convogliamento di fluidi corrosivi e simili) le tubazioni sono realizzate con materiali non malleabili, quali ghisa, ceramiche, cemento, su cui le sollecitazioni sismiche quasi sempre provocano fratture.

È possibile fare anche una diversa classificazione della medesime apparecchiature dell'industria di processo, maggiormente rivolta al loro aspetto strutturale. Si possono in questa maniera distinguere:

- Apparecchiature a struttura snella. Sono strutture di forma tipicamente cilindrica caratterizzata da un elevato rapporto altezza/diametro (da 5:1 a 30:1), le quali si distinguono ulteriormente in:
 1. Recipienti a sviluppo verticale, direttamente ancorati tramite singolo basamento a plinto e liberi per tutta l'altezza, generalmente caratterizzati da una concentrazione di massa non elevata.
 2. Recipienti a sviluppo verticale, ancorati ad un unico basamento a terra e dotati di vincoli supplementari in posizioni elevate, anche per questi la massa complessiva è limitata.
 3. Recipienti a sviluppo orizzontale, sostenuti da uno o più appoggi a sella a loro volta fondati al terreno, a seconda del tipo di materiale stoccato possono presentare alta o bassa concentrazione di massa.

- Apparecchiature a struttura tozza poggianti direttamente a terra. Strutture con le tre dimensioni principali confrontabili tra loro, contraddistinte da una elevata concentrazione di massa che viene scaricata in maniera uniformemente distribuita sulla fondazione senza generazione di momenti di vincolo. Si possono distinguere le seguenti tipologie:

1. Serbatoi di stoccaggio di grandi dimensioni per liquidi con basso rapporto altezza/diametro (da 2:1 a 0,2:1), semplicemente appoggiati su una fondazione continua o in casi più rari ancorati in maniera fissa alla base sottostante. Sono chiusi superiormente da un tetto fisso (di diverse forme) o galleggiante, lavorano esclusivamente a pressione atmosferica ed a pieno carico presentano una elevata concentrazione di massa.
2. Grosse macchine operatrici, tra le quali rientra una vasta serie di macchine generalmente dotate di organi meccanici in movimento ma anche statiche. Tutte, comunque, presentano un'alta concentrazione di massa.

- Apparecchiature a struttura tozza sostenute in elevazione da elementi snelli discreti. Gruppo nel quale rientrano sia strutture adibite allo stoccaggio che al processo, quali per esempio:

1. Recipienti sferici destinati a lavorare sotto pressione, nella maggior parte dei casi utilizzati per lo stoccaggio di gas liquefatti. Struttura di sostegno realizzata da una successione circonferenziale di pilastri metallici saldati al mantello e fondati su singoli plinti in CLS.
2. Recipienti cilindrici ad asse verticale destinati a lavorare a pressione, del tutto analoghi alla categoria precedente se non per la forma.
3. Forni di processo e caldaie, i quali nell'industria petrolifera e petrolchimica hanno una configurazione semplice e compatta "a cattedrale" o "cilindrica",

con però dimensioni e masse significative che inoltre devono essere tenute sollevate da terra per permettere la manutenzione delle tubazioni sottostanti.

4. Serbatoi per GNL (gas naturale liquefatto). Essi lavorano a pressione atmosferica e bassa temperatura. Presentano dimensioni paragonabili a quelle dei serbatoi a tetto galleggiante per prodotti petroliferi.
- Linee di tubazioni. Devono essere trattate separatamente vista la complessità che spesso la loro configurazione assume a causa di corti bracci di flessione, di vincoli derivanti dalla riunione in fasci e di altri imposti per guidare le deformazioni termiche. Il punto più debole comunque risulta essere rappresentato da tutte quelle componenti accessorie di linea che è necessario installare e che rappresentano punti singolari di variazione di resistenza (compensatori di dilatazione a soffiutto, smorzatori di vibrazione, giunzioni flangiate) o di concentrazione di masse (strumenti di misura, valvole ecc.).
 - Accessori, strutture di sostegno ed apparecchiature di servizio. Sono in prevalenza costituite da telai in acciaio, non di rado irrigidite tramite controventi, tuttavia sono possibili anche strutture in cemento armato o miste (acciaio-clt).

Per quanto riguarda i serbatoi è possibile effettuare una classificazione più precisa, in quanto gli elementi di stoccaggio occupano una parte preponderante all'interno di uno stabilimento (oltre il 70% della superficie), da qui si capisce l'importanza di comprendere a pieno il loro comportamento durante un possibile evento sismico. I serbatoi non sono propriamente oggetto di questa ricerca, tuttavia i sistemi di tubazioni che verranno analizzati hanno origine proprio da quest'ultimi.

La scelta dell'entità degli stoccaggi è fatta in base a precise esigenze degli impianti, alla possibilità ed alla frequenza di rifornimento del grezzo, alla programmazione delle vendite nonché ad esigenze di ammortamento del capitale investito.

Per la quasi totalità sono realizzati in metallo, se non si considerano i casi di immagazzinamento di materiali corrosivi e le cui caratteristiche potrebbero creare problemi all'involucro stesso.

Certi tipi di prodotti liquidi producono poco gas o vapore, tipo olio lubrificante, kerosene, diesel, ecc. e sono stoccati in serbatoi cilindrici verticali a tetto fisso.

Per i prodotti che formano una notevole quantità di gas si utilizzano serbatoi a tetto galleggiante, al fine di evitare la formazione di una miscela altamente esplosiva. Il tetto galleggia quindi sul prodotto ed elimina la camera superiore di gas. Questo serve anche a diminuire le perdite per evaporazione del prodotto.

1. Serbatoi a tetto fisso.

Sono composti da un fondo che appoggia su una base opportunamente preparata, formato da lamiere che vengono fra loro sovrapposte ed unite a mezzo di una saldatura, in modo da realizzare un fondo a tenuta stagna. La parte verticale del serbatoio è chiamata mantello, formato da un insieme di corsi o virole di lamiere opportunamente preparate, calandrate, sovrapposte fra loro verticalmente ed unite da saldatura, formando così un cilindro a perfetta tenuta.

È' chiaro che la lamiera più in basso sopporta una maggiore pressione dal liquido contenuto, pressione che decrescerà avvicinandosi verso la sommità. Il criterio col quale devono essere dimensionate è accennato dalle norme, e quelle che comunemente vengono utilizzate sono le americane API 650 (American Petroleum Institute). Queste norme stabiliscono il procedimento per la progettazione e la costruzione dei serbatoi.

Alla sommità del mantello sarà presente nella maggior parte dei casi un angolare di irrigidimento che renderà più facile anche l'appoggio delle lamiere del tetto. Il tetto, se il serbatoio è di piccolo diametro, può avere la lamiera auto portante o solo dei puntoni di supporto; normalmente invece è portato da capriate ed intelaiatura che appoggia sul

mantello e che serve a sostenere le lamiere del tetto unite fra loro con saldatura a sovrapposizione.

Per la manutenzione ed il funzionamento del serbatoio sono necessari degli accessori come:

- Scarico di fondo che permette il completo svuotamento del serbatoio in modo particolare per la sua pulizia;
- Un bocchello dove si allaccerà il tubo per l'entrata ed uscita del prodotto, in molti casi ci sono due bocchelli, uno per l'entrata e l'altro per l'uscita del prodotto;
- Un passaggio per l'uomo sul mantello e sul tetto, i quali possono essere aperti quando il serbatoio è vuoto per lasciar passare le persone ed eventuali materiali per la manutenzione interna del serbatoio;
- Una scala elicoidale che corre lungo il mantello e che dà la possibilità di accedere al tetto che ha, lungo il suo perimetro un parapetto.
- Un indicatore di livello, che serve a dare i dati di riempimento del serbatoio e comunemente è composto da un galleggiante interno che sale e scende col variare del livello del liquido contenuto. A questo galleggiante è collegata una fune, che attraverso carrucolino va all'esterno su un'apposita asta graduata dove scorre un indicatore che dà appunto i dati di livello del liquido, e quindi in base alle graduazioni sull'asta il volume del liquido contenuto. In molti casi ci sono anche altri congegni che trasmettono i dati direttamente alla centrale di controllo.
- Una valvola di respirazione sul tetto, questa serve a far uscire o entrare aria a seconda che il serbatoio sia in fase di riempimento o svuotamento.
- Un boccaporto di campionatura, serve per poter far scendere nel serbatoio un apposito recipiente atto a prelevare un campione del prodotto contenuto per gli esami di laboratorio, che controlleranno la qualità del prodotto. Ci sono dei casi, per prodotti densi e che aumentano la loro densità col diminuire della temperatura, nei

quali viene posto sul fondo del serbatoio un apposito serpentino all'interno del quale passa del vapore che riscalda il prodotto per renderlo più fluido.

2. Serbatoi a tetto galleggiante

Questa tipologia di serbatoio ha il fondo ed il mantello come quello già descritto per il tetto fisso. Il tetto invece è composto normalmente da un anello circolare formato da un cassone, che essendo vuoto all'interno, galleggia sul prodotto, una lamiera nella zona centrale completa la chiusura ed è sostenuta dall'anello galleggiante.

Fra il tetto ed il mantello c'è una guarnizione in gomma che chiude questa zona ed un pattino che scorre sul mantello. In particolare questa tenuta varia a seconda del tipo richiesto e della marca, poiché queste tenute sono brevettate. Come nel caso precedente dei serbatoi a tetto fisso, alla sommità del mantello c'è un anello perimetrale, con relativo parapetto, il quale ha il doppio scopo di irrigidire il mantello che resta aperto, e di transito per poter accedere intorno al tetto. Per accedere al tetto galleggiante c'è, al di sopra dell'anello, un ballatoio e da qui, attraverso una scale oscillante incernierata al ballatoio e scorrevole su un binario sul tetto; la scala cambia la sua inclinazione col variare della posizione del tetto.

Quando il tetto galleggiante arriva al fondo appoggia in appositi supporti che servono anche da sfiato automatico quando il tetto toccando i supporti diventa fisso. Per quanto riguarda gli accessori presenti su questi recipienti, vale quanto detto per i serbatoi a tetto fisso per il mantello ed il fondo.

Sia per i serbatoi a tetto fisso che per quelli a tetto galleggiante, valgono le stesse regole di posizionamento, all'interno di bacini (o vasche) di contenimento atti a contenere il liquido in caso di rottura del serbatoio. C'è inoltre un apposito impianto anti-incendio con schiuma ed anelli che vengono opportunamente posti sui serbatoi per creare una pioggia di acqua di raffreddamento.

3.4 Modalità di danneggiamento tipiche dei serbatoi

Nel seguente paragrafo si introducono i fenomeni tipici di danneggiamento dei serbatoi, che si verificano comunemente durante i terremoti. L'obiettivo principale dei sistemi di una raffineria è preservare ed evitare lo sversamento del liquido contenuto. Per prevenire ciò è importante conoscere i danneggiamenti che possono subire tali sistemi, durante un evento sismico. Di seguito si riportano le modalità di danneggiamento tipiche di un serbatoio:

- Danneggiamento del tetto del serbatoio (roof damage). Ne è responsabile il fenomeno dello sloshing. Riguarda la formazione di onde di fluido sopra il pelo libero, che può portare ad un notevole danneggiamento del tetto (sia galleggiante che fisso) con conseguente fuoriuscita del fluido contenuto e a deformazioni ingenti sul mantello. In genere non è una rottura "particolarmente grave" in quanto si ha la fuoriuscita di una porzione limitata del liquido contenuto.



Figura 3.4.1 - Esempio di danneggiamento della copertura di un serbatoio

- Deformazione a zampa di elefante (elephant's foot buckling). Si tratta di instabilità elasto-plastica ed in genere è il tipo di danneggiamento più diffuso nei serbatoi, si verifica allorquando, nel serbatoio, l'effetto combinato della pressione idrostatica e delle sovrappressioni dovute al terremoto, produce tensioni circonferenziali elevate, contemporaneamente ad un incremento delle tensioni di compressione verticali che portano il materiale in prossimità della plasticizzazione. In queste condizioni si verifica un'instabilità locale della parete del serbatoio (in corrispondenza del fondo) che si manifesta mediante rigonfiamento. La resistenza del guscio può essere espressa in funzione dello sforzo di snervamento dell'acciaio, moltiplicata tramite appropriato fattore di riduzione dipendente dalla snellezza del guscio (tali espressioni sono fornite direttamente dalle normative). Indagini precedenti hanno dimostrato che il verificarsi di questo fenomeno è spesso associato alla rottura del serbatoio, infatti la fase di postbuckling è di tipo instabile. In particolare se il fenomeno si verifica in corrispondenza dell'ingresso/uscita di tubazioni di mandata spesso si ha rottura nel collegamento e fuoriuscita del liquido contenuto. L'elephant's foot buckling crea delle deformazioni permanenti e irreversibili del mantello; in alcuni casi se l'instabilità non è severa non si verificano perdite del liquido.



Figura 3.4.2 – Esempio di instabilità elasto-plastica molto pronunciata



Figura 3.4.3 - Esempio di instabilità elasto-plastica lieve

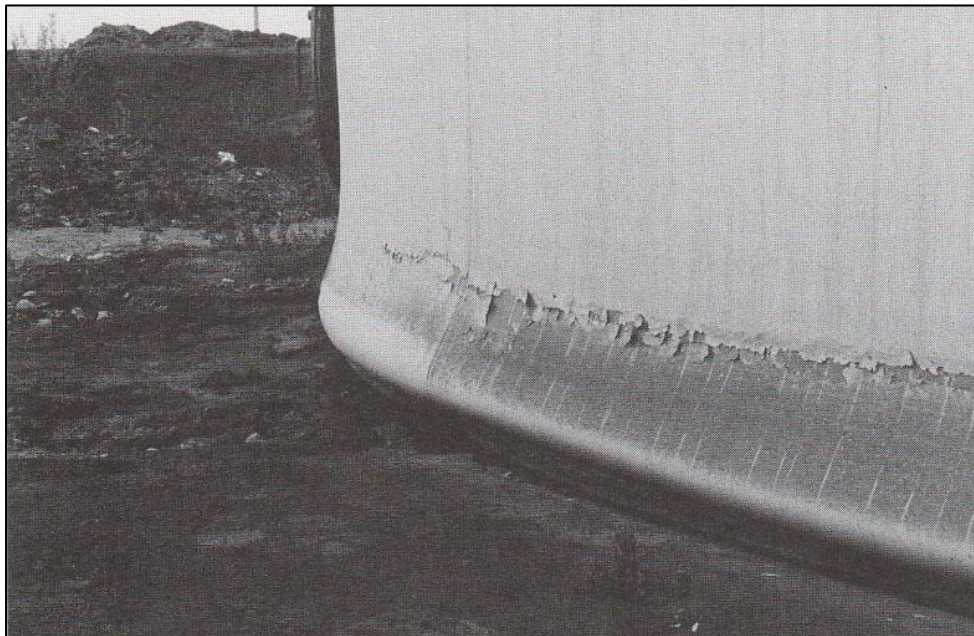


Figura 3.4.4 - Esempio di instabilità elasto-plastica

L'instabilità del mantello è spesso accompagnata dal sollevamento del serbatoio nel lato opposto (se il serbatoio non è ancorato alla fondazione, oppure per rottura degli ancoraggi), con possibile rottura della giunzione tra fondo e prima virola e conseguente perdita di contenuto. Questo danneggiamento congiunto è dovuto all'oscillazione del liquido all'interno del serbatoio; ovviamente i serbatoi danneggiati hanno un elevato grado di riempimento durante il sisma

In genere si osserva come tale deformazione si manifesti particolarmente in serbatoi non ancorati (si riporta in figura sottostante il meccanismo);

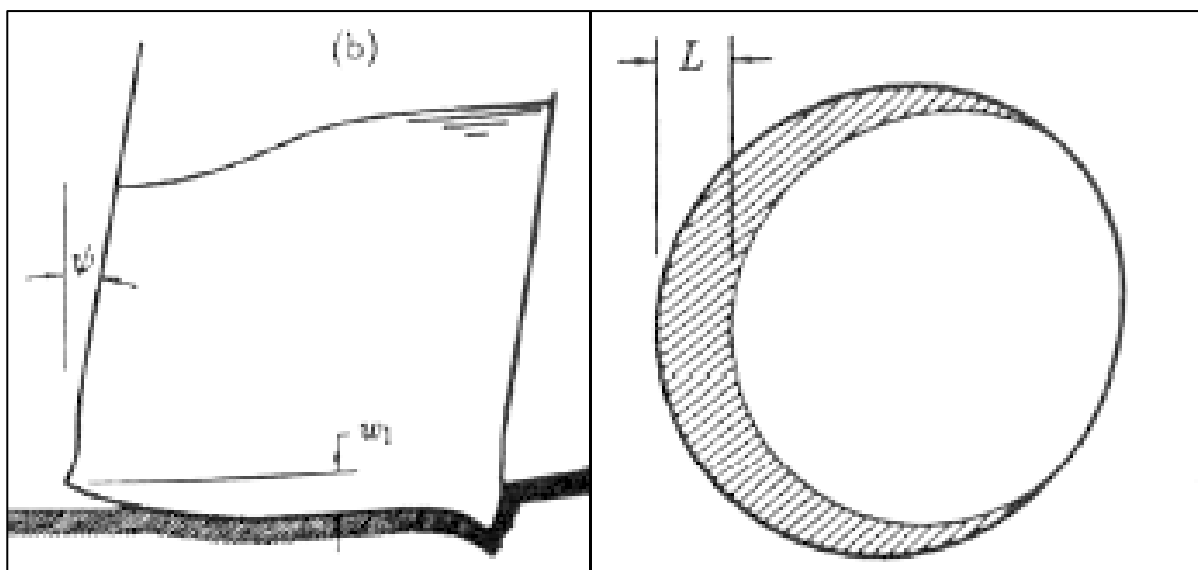


Figura 3.4.5 – Meccanismo combinato di sollevamento del serbatoio e “sloshing del liquido”

- Instabilità elastica della parete (buckling). Il fenomeno dell’instabilità elastica si verifica quando la tensione verticale supera il valore critico dello sforzo membranale verticale, per la valutazione del quale sono state effettuate numerose indagini numerico-sperimentali, che hanno portato alla formulazione del carico critico. Esso viene generalmente valutato utilizzando la relazione per gli sforzi di compressione critici di un guscio sottile perfetto, corretta con un adeguato fattore, che tiene conto della sensibilità all’imperfezione del guscio cilindrico. Il superamento del carico critico elastico produce la tipica deformazione riportata in figura detta anche a forma di diamante.



Figura 3.4.6 – Deformazione a “diamante”

Tale fenomeno si distingue dall'elephant's foot buckling visto al punto precedente. Infatti, i serbatoi cilindrici in acciaio soggetti alle azioni dinamiche prodotte dal sisma possono subire un notevole incremento tensionale con conseguente perdita di stabilità della parete e/o superamento dei limiti di resistenza del materiale. Nel primo caso si parla di instabilità elastica delle pareti del serbatoio, nel secondo caso si parla di instabilità elasto-plastica.

La figura sottostante riporta la tensione critica elastica ed elastoplastica in funzione della tensione circonferenziale e del rapporto tra il raggio del serbatoio R e dello spessore della parete t . Si osservi come al raggiungimento della tensione di snervamento (250 Mpa) il carico critico elasto-plastico tende a zero con conseguente verificarsi dell'elephant foot buckling. Al contrario, maggiore è la tensione circonferenziale e maggiore è il carico critico elastico, che ovviamente diminuisce all'aumentare del rapporto R/t .

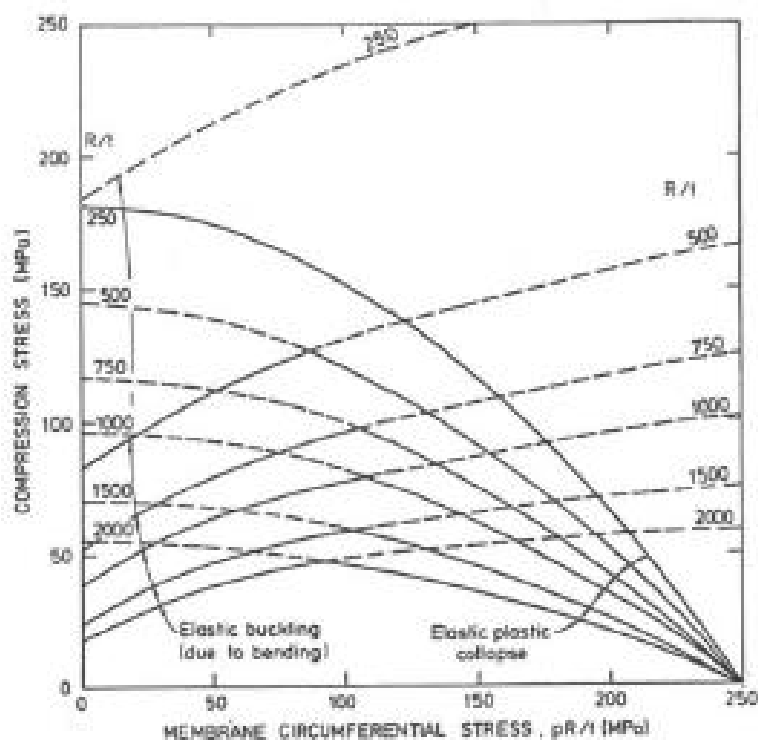


Figura 3.4.7 – Differenti meccanismi di collasso al variare di R/t

- La rottura del cordone di saldatura tra il fondo ed il mantello (failure of base plate). È spesso il risultato delle ingenti forze che si manifestano durante il sollevamento del fondo (a causa dello sloshing), con conseguente perdita del contenuto. Tale fenomeno, in genere, si verifica prevalentemente in serbatoi non ancorati. A causa del sollevamento si verificano deformazioni inelastiche in corrispondenza della saldatura tra virola e trincarino, arrivando alla rottura per eccessivo sforzo di trazione oppure per fenomeni di fatica dovuti alla natura ciclica dell'azione sismica;

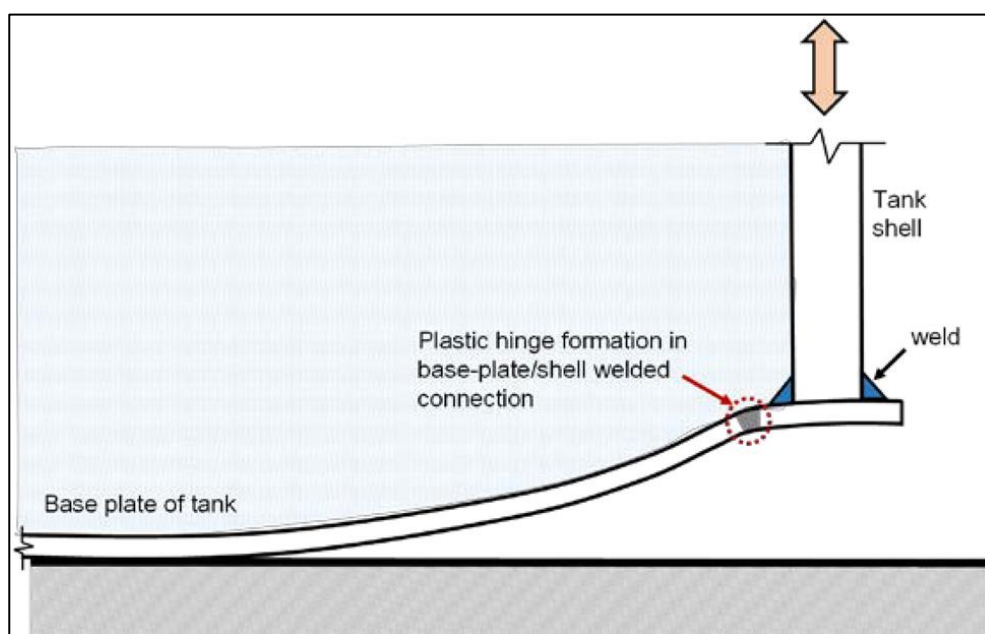


Figura 3.4.8 – Sollevamento del serbatoio e formazione cerniera plastica

- Rottura dei sistemi di ancoraggio del serbatoio (anchor bolt failure). In figura è possibile osservare come sia realizzato questo tipo di ancoraggio. Si possono avere diversi tipi di rottura in tali punti. In particolare si preferisce evitare lo strappo del tirafondo con conseguente rottura del calcestruzzo circostante, sovradimensionando quindi tale sistema. Un altro tipo di rottura riguarda il tirafondo stesso, il quale può snervarsi o rompersi (la verifica si effettua con le consuete formule utilizzate per i bulloni).



Figura 3.4.9 - Esempio di ancoraggio

Infine la rottura può avvenire sulle saldature dei piatti oppure per raggiunta resistenza tagliente degli stessi. Nel dimensionamento ci si cautela nei confronti delle rotture delle saldature in quanto esse potrebbero provocare degli strappi nel mantello con conseguente perdita di liquido. È necessario quindi favorire la nascita di zone di plasticizzazione all'interno dei piatti stessi, in modo tale da dissipare più energia possibile sfruttando la duttilità del materiale (inoltre i piatti risultano facilmente rimpiazzabili);

La rottura del sistema in generale potrebbe rendere vulnerabile il serbatoio rispetto al fenomeno del sollevamento, con tutte le problematiche che ne conseguono, come riportato nel punto precedente;

- Rottura in corrispondenza dell'ingresso/uscita di tubazioni di mandata (nozzle failure). Questo tipo di rottura dovuta all'incapacità di sopportare il movimento relativo del serbatoio può portare alla perdita del materiale contenuto. In particolare il cedimento avviene in corrispondenza dell'ugello saldato sul mantello del serbatoio (in genere si prevedendo appositi rinforzi in tali zone).

Il mantello del serbatoio funge da “incastro” per la tubazione (si parla di incastro cedevole), perciò guscio e tubazione si scambiano forze e momenti dovuti all’azione sismica; ciò potrebbe causare distorsioni localizzate nella parete del serbatoio, portando in alcuni casi a rotture per fatica in tali punti. L’entità delle azioni scambiate tra mantello e tubazione dipende principalmente dalla flessibilità del sistema di tubazione, piuttosto che dalla risposta del serbatoio.

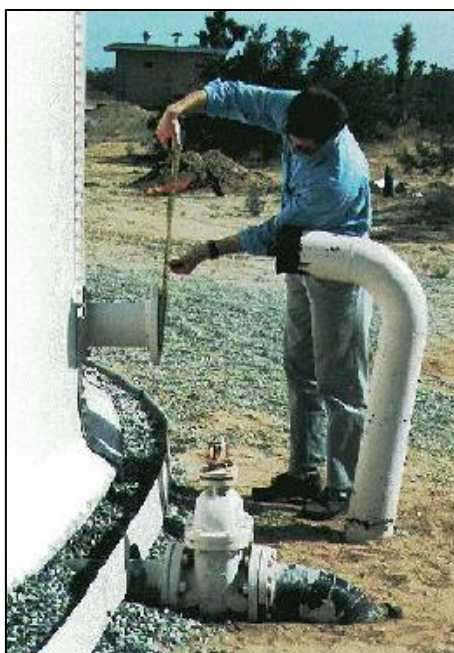


Figura 3.4.10 – Esempio di rottura del giunto

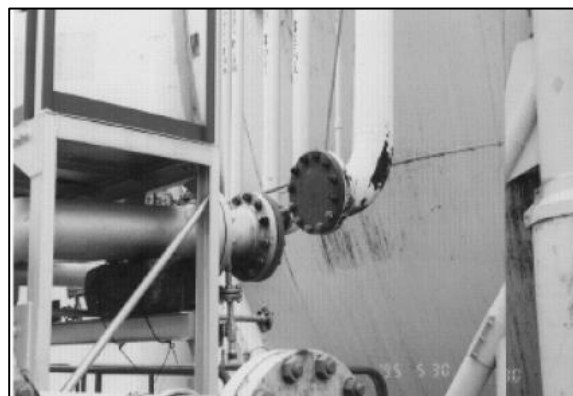


Figura 3.4.11 – Rottura di un giunto flangiato



Figura 3.4.12 – Rottura del collegamento e imbozzamento del serbatoio

- Incendio (torch fire) del serbatoio. È causato dal movimento relativo tra tetto galleggiante e mantello, indotto sia dal sisma che dal movimento del fluido contenuto. Tale movimento potrebbe produrre scintille che innescerebbero un incendio, coinvolgendo così tutto il contenuto del serbatoio;



Figura 3.4.13 - Effetto di incendi nei serbatoi

- Buckling. Riguarda il fenomeno dell'instabilità alla compressione, delle colonne di supporto dei serbatoi a tetto fisso. Dipende quindi dalla snellezza delle colonne, dalla lunghezza di libera inflessione, e dalla resistenza del materiale;
- Buckling dell'ultimo corso di virole. In alcuni casi si può verificare instabilità nell'ultimo corso di virole a causa della pressione negativa che si origina all'interno del serbatoio per il movimento del liquido contenuto. In questa situazione il guscio potrebbe instabilizzarsi in quanto è soggetto alla pressione atmosferica dall'esterno;
- Lacerazione del mantello del serbatoio o del fondo dovuto alla deformazione della scala e/o delle tubazioni ancorate alle fondazioni o al mantello stesso;
- Lacerazione del mantello dovuto alla deformazione o allo spostamento differenziale della passerella di collegamento tra due serbatoi;
- Elementi di connessione non deformabili. Causano ad una lacerazione del mantello del serbatoio o ad una rottura dell'ancoraggio;

- Perdita di contenuto dal fondo per fenomeni di liquefazione. il serbatoio perde il suo assetto e si manifestano importanti deformazioni meccaniche del fondo e del mantello.

3.5 Modalità di danneggiamento tipiche delle tubazioni

Analogamente ai serbatoi per le tubazioni è importante evitare la perdita del contenuto.

Di seguito si riportano le modalità tipiche di danneggiamento che possono verificarsi nei sistemi di tubazioni:

- Rotture causate dall'eccesso di sforzo di trazione (fracture due to excessive tensile strain). Generalmente la rottura per trazione avviene in corrispondenza delle saldature (escludendo la presenza di difetti grossolani lungo la tubazione, i quali potrebbero causare fenomeni di intensificazione locale delle tensioni). Tali rotture avvengono spesso in corrispondenza di zone critiche per le tubazioni come ad esempio gomiti, giunzioni a "T", riduttori, ugelli uscenti dai serbatoi.
- Instabilità locale dovuta allo sforzo di compressione (local buckling due to compressive action). A causa delle azioni sismiche nascono momenti flettenti all'interno delle tubazioni. Tali momenti inducono compressione (e trazione) nel tubo, il quale potrebbe andare incontro a instabilità locale (considerando anche la sottigliezza della parete) con conseguente formazione di pieghe nella tubazione (a livello locale). In presenza di azione ciclica la zona instabilizzata diventa particolarmente vulnerabile, in quanto se richiamata in trazione difficilmente raggiungerà la tensione di snervamento. Spesso si arriva a fratture dovute al fenomeno della fatica descritto nel punto successivo.
- Fenomeni di fatica dovuti alla natura ciclica dell'azione sismica (low-cycle fatigue damage due to strong repeated loading). In genere durante un sisma le tubazioni sono soggette a carichi ciclici dovuti alla natura dell'azione sollecitante. Tali carichi

portano il materiale ben oltre il regime elastico; si possono formare quindi fratture localizzate in un numero ristretto di cicli. Generalmente il fenomeno della fatica si verifica in corrispondenza delle saldature, o in corrispondenza di altri punti critici come ad esempio gomiti o giunzioni a "T".

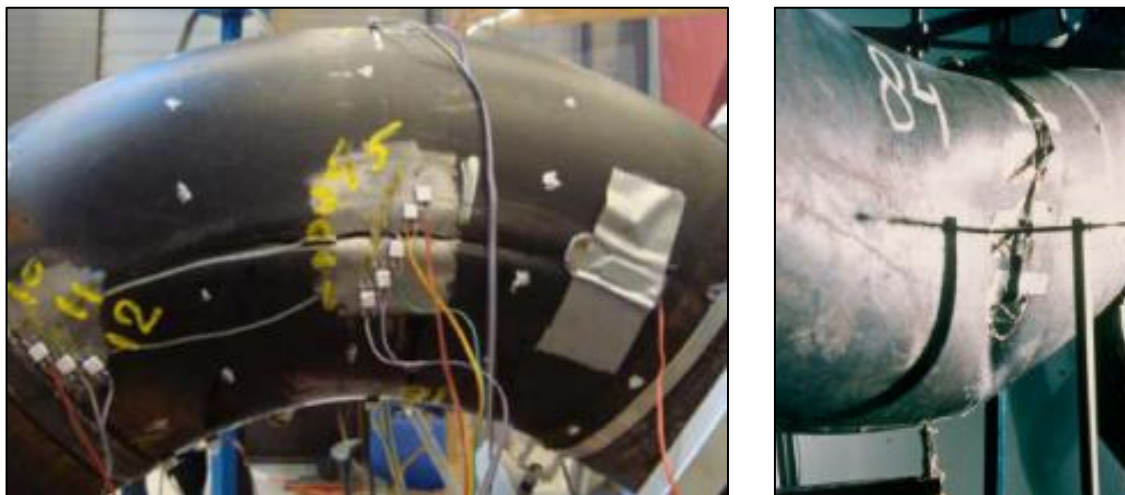


Figura 3.5.1 – sx: comparsa di fessure in seguito a prova di fatica su un gomito; dx: instabilità locale di una tubazione



Figura 3.5.2 – Esempio di piping system particolarmente complesso

3.6 Effetti dei terremoti sugli impianti industriali

L'esperienza acquisita dall'osservazione dei danni inferti dai terremoti del passato agli impianti di raffinazione è di grande utilità per identificare i componenti più esposti al rischio e le conseguenze che questi danni hanno generato. Poiché gli impianti petrolchimici, spesso di proprietà di grandi società multinazionali, sono progettate secondo standard comuni, i risultati di osservazioni condotte in diversi paesi sono di solito confrontabili, assai più per quanto non sia lecito fare nelle costruzioni civili. Per contro, a causa del piccolo numero di raffinerie presenti in tutto il mondo (circa 600), è difficile poter disporre di un campione statisticamente significativo di impianti danneggiati dal sisma. Inoltre molti apparati sono stati modificati e rinnovati nel tempo, per cui non è detto che i componenti di una raffineria odierna siano molto simili a quelli in funzione qualche decina di anni fa. A queste difficoltà si deve aggiungere la riservatezza delle società proprietarie degli impianti a rendere pubblica la documentazione relativa ai danni ed alle loro conseguenze.

Nonostante queste difficoltà, sono disponibili dettagliate informazioni sul comportamento delle raffinerie durante i seguenti terremoti:

- Nigata (Giappone), 16 giugno 1964 ($M = 7.6$);
- Valparaiso (Cile), 3 marzo 1985 ($M = 7.8$);
- Loma Prieta (California, USA), 17 ottobre 1989 ($M = 6.9$);
- Costa Rica, 22 aprile 1991 ($M = 7.6$);
- Kocaeli (Turchia), 17 agosto 1999 ($M = 7.6$);
- Bhuj (Gujarat – India), 26 gennaio 2001 ($M = 7.7$);
- Tokachi-Oki (Giappone), 26 settembre 2003 ($M = 8.3$).

3.6.1 Modalità di danneggiamento per componenti omogenee di uno stabilimento

Nel presente paragrafo si riassumono i danneggiamenti osservati nei sismi precedentemente riportati, raggruppando i principali componenti di uno stabilimento in un ristretto numero di classi, sulla base di una relativa similitudine delle caratteristiche geometriche e meccaniche. Le classi esaminate sono:

1. Contenitori snelli;
2. Apparecchiature tozze, poste direttamente sulle fondazioni;
3. Apparecchiature tozze, poggianti su pilastri;
4. Tubi e sistemi di tubazioni;
5. Strutture di sostegno;
6. Strutture portuali.

1. Contenitori snelli

Alla categoria dei contenitori snelli appartengono quelle apparecchiature di forma cilindrica, con un rapporto altezza/diametro piuttosto grande (tra 5 e 20, ed anche più). Tra questi, in base alla loro funzione nel processo ed ai vincoli che lo sostengono è possibile identificare:

- Contenitori verticali che sono ancorati direttamente alla fondazione e liberi lungo l'altezza. Questa categoria comprende colonne, torri e molti reattori. In questo tipo di oggetti la massa è ben distribuita.
- Contenitori verticali vincolati, oltre che alla base, lungo l'altezza. Questo gruppo comprende colonne molto snelle, come ad esempio le torce. La loro massa è dovuta interamente alla struttura, poiché contengono gas.

- Contenitori cilindrici orizzontali, sostenuti da due o più selle poggiate sulle fondazioni. In questa categoria sono compresi molti serbatoi sotto pressione e scambiatori di calore.

Descrizione dei danni

Dopo il terremoto di Nigata sono stati osservati dei cedimenti differenziali alla base delle apparecchiature di medio peso. Un apparato sostenuto da plinti, posti direttamente su di un terreno migliorato con vibrazione, ebbe cedimenti minori di quelli subiti da apparecchiature più pesanti che si trovavano nelle vicinanze, fondate su pali lunghi 7m infissi nel terreno migliorato. Nelle zone vicine, dove il terreno non aveva subito miglioramenti, furono osservate inclinazioni delle strutture alte, quali le ciminiere.

A seguito del terremoto di Valparaiso, un camino di ventilazione di 18'' di diametro, posto in sommità di una torre di frazionamento, si imbozzò, fessurandosi alla base, dove era saldato alla colonna. Per lo stesso evento si snervarono o si sfilarono dal calcestruzzo alcuni bulloni di ancoraggio. Nel calcestruzzo furono notate fessure ed espulsioni.

L'effetto più significativo sui contenitori verticali del terremoto di Loma Prieta riguarda gli ancoraggi. In una raffineria dove erano presenti circa 50 contenitori verticali, in più di 20 si manifestarono danni agli ancoraggi.

Durante il terremoto del Costa Rica, un bruciatore a gas, non ancorato, subì un piccolo scorrimento che provocò la rottura delle tubazioni del gas, senza però che si producesse un incendio.

Molti danni nelle raffinerie si sono verificati durante il terremoto a Izmit in Turchia. Una delle aree dove si verificarono danni “spettacolari”, fu in una delle tre unità del greggio, posta presso la zona di stoccaggio ed al pontile di carico. Un argine in terra ed una strada separavano l’impianto dall’area dei serbatoi. L’unità fu



Figura 3.6.1 –Crollo della ciminiera

distrutta dal crollo di una ciminiera alta 105m, che era posta al centro dell’unità. Un forno, che era stato progettato secondo le norme ACI-307 ebbe gravi danni. Le cause non risultarono subito chiare, per cui vennero fatti studi accurati che confermarono che la rottura del camino si era verificata vicino ad un condotto di riscaldamento di grosso diametro. La sommità del camino era caduta sull’unità distruggendo il forno, mentre la parte inferiore era caduta tra le tubazioni.

2. Apparecchiature tozze poste sulle fondazioni

Questi oggetti hanno dimensioni analoghe nelle tre direzioni e caratterizzate da masse elevate, possono raggrupparsi in due categorie:

- Grandi serbatoi per il contenimento dei liquidi a pressione atmosferica, di forma cilindrica con un rapporto altezza diametro da 2 a 0.2. Il fondo è circolare e poggia direttamente sulle fondazioni, il tetto può essere solidale alle pareti (tetto conico fisso) o galleggiante sul liquido contenuto. Il volume utile varia da poche decine a 200-000 m³. Quando sono pieni hanno una massa considerevole; sotto l’azione sismica parte di questa massa è posta in oscillazione, producendo forze elevate sulle pareti del serbatoio, mentre la parte superiore del liquido forma un’onda di “sloshing” che può provocare il versamento del liquido.

- Grandi macchine di processo, come filtri e decantatori, o apparati dinamici, quali pompe e compressori. Questi apparati hanno grandi masse poste su basse strutture; richiedono fondazioni di grande inerzia, a causa delle sollecitazioni dinamiche che producono in condizioni di funzionamento.

Descrizione dei danni

Come per altri tipi di strutture, i danni inferti dal terremoto di Nigata furono causati principalmente dai cedimenti del terreno.

Durante il terremoto di Valparaiso i principali danni interessarono i serbatoi, generalmente fondati su di un letto di sabbia e privi di ancoraggi. Risultarono danneggiati serbatoi di diverso volume, sia con tetto fisso che galleggiante. Spesso il danno era localizzato alla base, per cedimento della saldatura tra il fondo e le pareti. In diversi casi alla base del serbatoio si manifestò il fenomeno dell'instabilità elasto-plastica delle pareti, nota come "elephants foot buckling", mentre in altri casi furono danneggiati i tetti a cono, a causa della depressione interna prodotta dal rapido svuotamento, non compensato dalle valvole (figura sottostante).

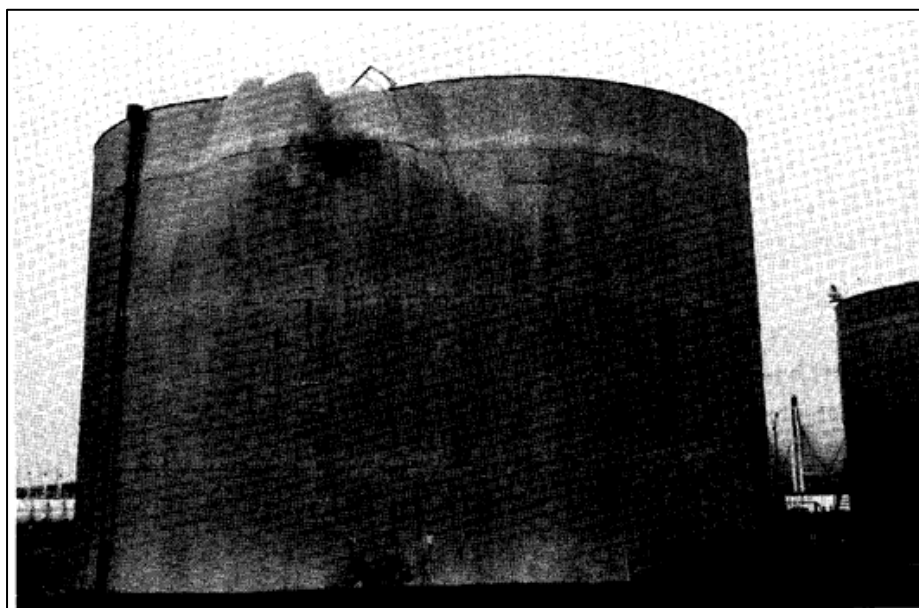


Figura 3.6.2 – Danneggiamento a causa della depressione interna

A questi danni spesso si accompagnarono fenomeni di cedimenti del terreno che produssero danni alle tubazioni uscenti dai serbatoi. Anche durante il terremoto di Loma Prieta alcuni serbatoi posti su terreni soffici furono variamente danneggiati: elephants foot, perdita del contenuto, rotture intermedie dovute a strappo di parti collegate.

In Costa Rica il terremoto produsse vari danni ai serbatoi della raffineria Moin. La raffineria Tupras fu fortemente danneggiata dal terremoto di Izmit del 1999. L'attrito tra il tetto galleggiante e la parete, dopo che erano state danneggiate le guarnizioni, produsse scintille che incendiarono i vapori di nafta. Gli incendi conseguenti, durati diversi giorni, distrussero completamente molti serbatoi, rendendo difficile il riconoscimento dei danni diretti portati dalle sovrappressioni indotte dal sisma.



Figura 3.6.3 - Serbatoio post incendio

3. Apparecchiature tozze sostenute da pilastri

Si possono includere in questa categoria:

- I serbatoi sferici, frequentemente usati per contenere sostanze gassose, liquefatte sotto pressione. Sono in genere sollevati rispetto al suolo, sostenuti da un certo numero di sostegni circonferenziali, collegati alla sfera a livello dell'equatore ed irrigiditi con controventi diagonali.

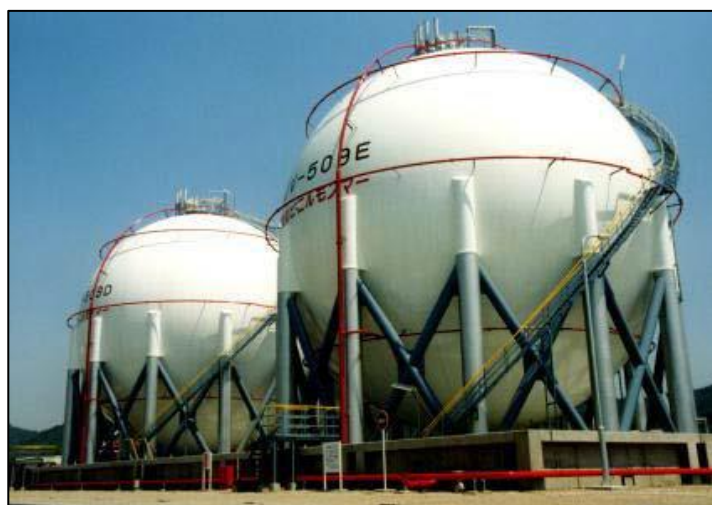


Figura 3.6.4 – Serbatoio sferico

- Serbatoi cilindrici per gas liquefatti a bassa temperatura; hanno una configurazione simile a quella dei serbatoi per liquidi descritti nel paragrafo precedente, ma le pareti sono formate con un guscio doppio, con un'intercapedine di materiale isolante e sono sostenuti su corti piedistalli che li pongono ad una certa distanza dal suolo.



Figura 3.6.5 – Serbatoio cilindrico

- Forni di processo e generatori di vapore. Questi apparati hanno lo scopo di riscaldare i liquidi trattati, in base alle esigenze del processo chimico. I forni sono strutture di notevoli dimensioni, con poche forme standardizzate: a cattedrale o a cilindro verticale. Questi forni devono essere tenuti sollevati da terra mediante due o più linee di pilastri, per la manutenzione e per il passaggio delle tubazioni.



Figura 3.6.6 – Esempi di forni

Descrizione dei danni

Non vi sono segnalazioni di sensibili danni nei serbatoi sferici, a meno delle conseguenze di cedimenti differenziali del terreno. I serbatoi per gas liquefatti a freddo, sostenuti da piastrini in c.a. hanno subito notevoli danni a seguito del collasso del basamento, durante il terremoto di Izmit. Durante lo stesso terremoto venne distrutto un forno a cattedrale, come conseguenza del collasso della sua ciminiera, come descritto in precedenza.

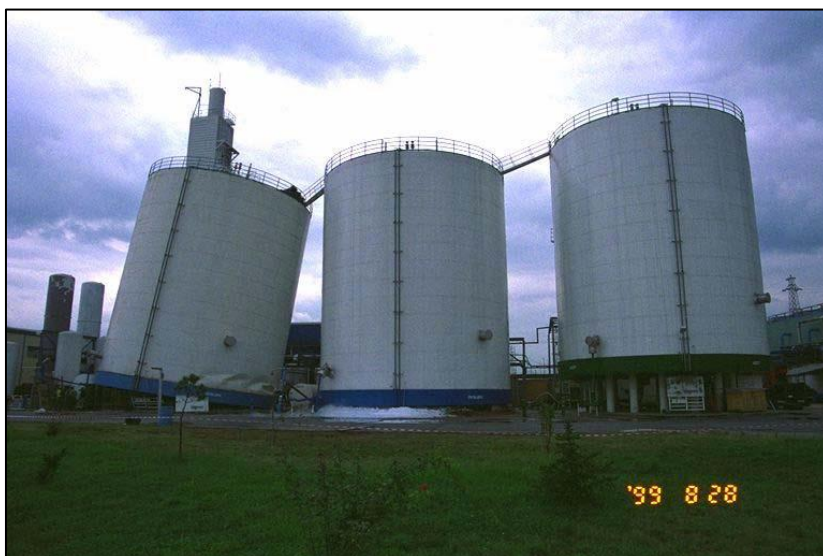


Figura 3.6.7 - Collasso di serbatoi

4. Tubazioni

Le tubazioni collegano praticamente tutti gli apparati coinvolti nel processo trasportando le sostanze liquide trattate attraverso l'impianto; come si è detto in una grande raffineria vi sono migliaia di chilometri di tubi di ogni specie, prevalentemente in metallo, ma anche in ceramica, vetro, calcestruzzo, ecc., per eventuali richieste di resistenza alla corrosione.

Descrizione dei danni

Di per se le tubazioni non sono particolarmente vulnerabili dall'azione sismica, ma risentono degli effetti di spostamenti differenziali di strutture diverse, o di parti della stessa struttura, da esse collegate e che possono risultare non compatibili con la deformabilità della tubazione. Possono inoltre danneggiarsi a seguito del collasso di qualche struttura di sostegno.

Nelle condutture che trasportano il greggio (oleodotto) od i prodotti lavorati a grande distanza, generalmente interrate, si possono provocare danni conseguenti alle deformazioni del terreno.

5. Strutture di sostegno

Le tubazioni, gli scambiatori di calore, le pompe, i ventilatori e molti altri apparati necessari per le lavorazioni, richiedono di opportune strutture di sostegno. La loro configurazione è condizionata dalle esigenze della produzione, per cui si hanno molte strutture di tipo diverso, con irregolare distribuzione delle masse e delle rigidità; inoltre le frequenti modifiche apportate al processo produttivo si riflettono in cambiamenti della geometria di queste strutture.

Le strutture di sostegno presenti nelle raffinerie sono in prevalenza telai in acciaio, non di rado irrigidite mediante controventi. Tuttavia non sono rare strutture realizzate in altro materiale, particolarmente cemento armato o strutture miste acciaio-calcestruzzo.

Descrizione dei danni

Nei rapporti esaminati non si trovano particolari segnalazioni di danni inferti alle strutture di sostegno. Alcuni telai di servizio ai reattori, durante il terremoto di Loma Prieta, subirono limitati danni a causa delle insufficienti dimensioni dei controventi.

Alcune strutture di sostegno dei ventilatori subirono danni del tipo mostrato in figura. Si trattava di una struttura inizialmente destinata al sostegno delle tubazioni e quindi utilizzata per i ventilatori. Le flange di collegamento la struttura dei ventilatori con le aste diagonali, cedettero per instabilità.



Figura 3.6.8 - Danno alle strutture di sostegno

6. Strutture portuali

Le raffinerie sono frequentemente poste in vicinanza della costa per facilitare il trasporto del greggio direttamente dalle navi petroliere. Le raffinerie più grandi dispongono di strutture autonome per lo scarico del greggio, sotto forma di isole di attracco collegate a terra da pontili che sostengono le tubazioni in cui viene pompato il petrolio.

Descrizione dei danni

Tra quelli esaminati, il terremoto di Kocaeli ha prodotto seri danni alle banchine portuali della raffineria di Tupras, a seguito del cedimento dei pali di sostegno della banchina.



Figura 3.6.9 – Rottura della banchina portuale

3.6.2 Conseguenze

I danni, strutturali e non, descritti in precedenza, sono spesso il punto di partenza di una catena di eventi che possono avere come conseguenza danni alle persone e perdite



Figura 3.6.10 – Incendio in seguito al terremoto in Giappone 1964

economiche. Negli impianti petrolchimici anche danni relativamente modesti possono portare al fermo dell'impianto, con conseguente danno economico; inoltre, a causa della pericolosità delle sostanze trattate, danni che producano una perdita della capacità di contenimento dell'impianto, comportano la fuoriuscita di prodotti facilmente infiammabili che, nel caso di

incendio, possono mettere in pericolo la vita delle persone anche all'esterno dell'impianto e comunque aggravano una situazione che è di solito già critica a causa dei danni inferti dal sisma agli altri edifici.

Le raffinerie danneggiate da forti terremoti sono in molti casi rimaste inattive per tempi piuttosto lunghi, da diversi giorni ad alcune settimane, con conseguente elevato danno economico. Tuttavia gli effetti più gravi sono quelli relativi all'incolumità delle persone. Oltre alle vittime causate direttamente dal collasso di parti strutturali all'interno dell'impianto, le conseguenze più gravi possono essere di natura indiretta. Ad esempio a seguito dell'incendio della raffineria Tupras fu evacuata un'area circostante di raggio 3-5 km, che comprendeva delle zone dove erano in corso le operazioni di ricerca e di soccorso delle persone rimaste intrappolate tra le macerie di edifici crollati. Il grande incendio di Tupras minacciò i serbatoi di GPL ed un adiacente deposito con 13000 tonnellate di ammoniaca. A causa del pericolo di esplosioni e del rilascio di sostanze fortemente tossiche

fu raccomandato di evacuare una zona di cinque chilometri di raggio; in pratica la zona evacuata fu ancora più ampia, portando alla sospensione delle operazioni di soccorso in una zona fortemente colpita: probabilmente non sarà mai possibile quantificare il numero di persone che avrebbero potuto essere salvate se non vi fosse stato il disastro della raffineria.

L'interruzione della produzione, che in questo caso fu di parecchi mesi, ebbe ripercussioni anche sulla ripresa economica della zona colpita, poiché i prodotti della raffineria erano in gran parte utilizzati da industrie locali. Un altro effetto collaterale fu il versamento di petrolio nel mare antistante la raffineria.



Figura 3.6.11 – Incendio nella raffineria a Tupras

4. MODELLAZIONE DEL VINCOLO TRA SERBATOIO E TUBAZIONE

4.1 Introduzione

Il presente capitolo è dedicato alla modellazione del vincolo sussistente tra serbatoio e tubazione di mandata. Come si è visto in precedenza tale collegamento rappresenta spesso un punto critico, dal quale possono scaturirsi diverse problematiche, in primis la perdita di liquido contenuto, che potrebbe originare incidenti di grave entità. In particolare questo tipo di rottura, durante un evento sismico, è dovuta all'incapacità della tubazione nel seguire il movimento del serbatoio. Infatti l'entità delle azioni scambiate, in corrispondenza del collegamento sul mantello, dipende principalmente dalla flessibilità della tubazione, piuttosto che dalla risposta del serbatoio.

In genere le tubazioni hanno lunghezze molto elevate, dell'ordine del chilometro, perciò risulta indispensabile, per le verifiche sismiche, considerare tronconi aventi sviluppo limitato, al fine di limitare l'onere computazionale. È necessario scegliere, quindi, dei vincoli che permettano di simulare la presenza delle porzioni di condotte escluse dall'analisi.

In particolare ci si occuperà dei sistemi di tubazioni all'interno delle vasche di contenimento dei serbatoi. Tali vasche sono realizzate generalmente con muri in cemento armato; le dimensioni possono variare a seconda del volume contenuto nel serbatoio. In genere le tubazioni partono dal serbatoio e passano attraverso i muri della vasca di contenimento. In figura si riporta un esempio di quanto descritto.



Figura 4.1.1 – Vasca di contenimento con tubazione di mandata

4.2 Modello di calcolo e ipotesi alla base

Il collegamento tra serbatoio e tubazione può essere schematizzato come un incastro. Ovviamente non si tratta di un incastro “perfetto” definito dai canoni dalla Scienza delle costruzioni, ma di un vincolo cedevole, avente rigidezze diverse a seconda del grado di libertà considerato. È necessario, quindi, ricavare le varie rigidezze mediante un semplice modello di calcolo; a tale scopo si riportano alcuni dettagli relativi alle modalità di realizzazione di tale collegamento.

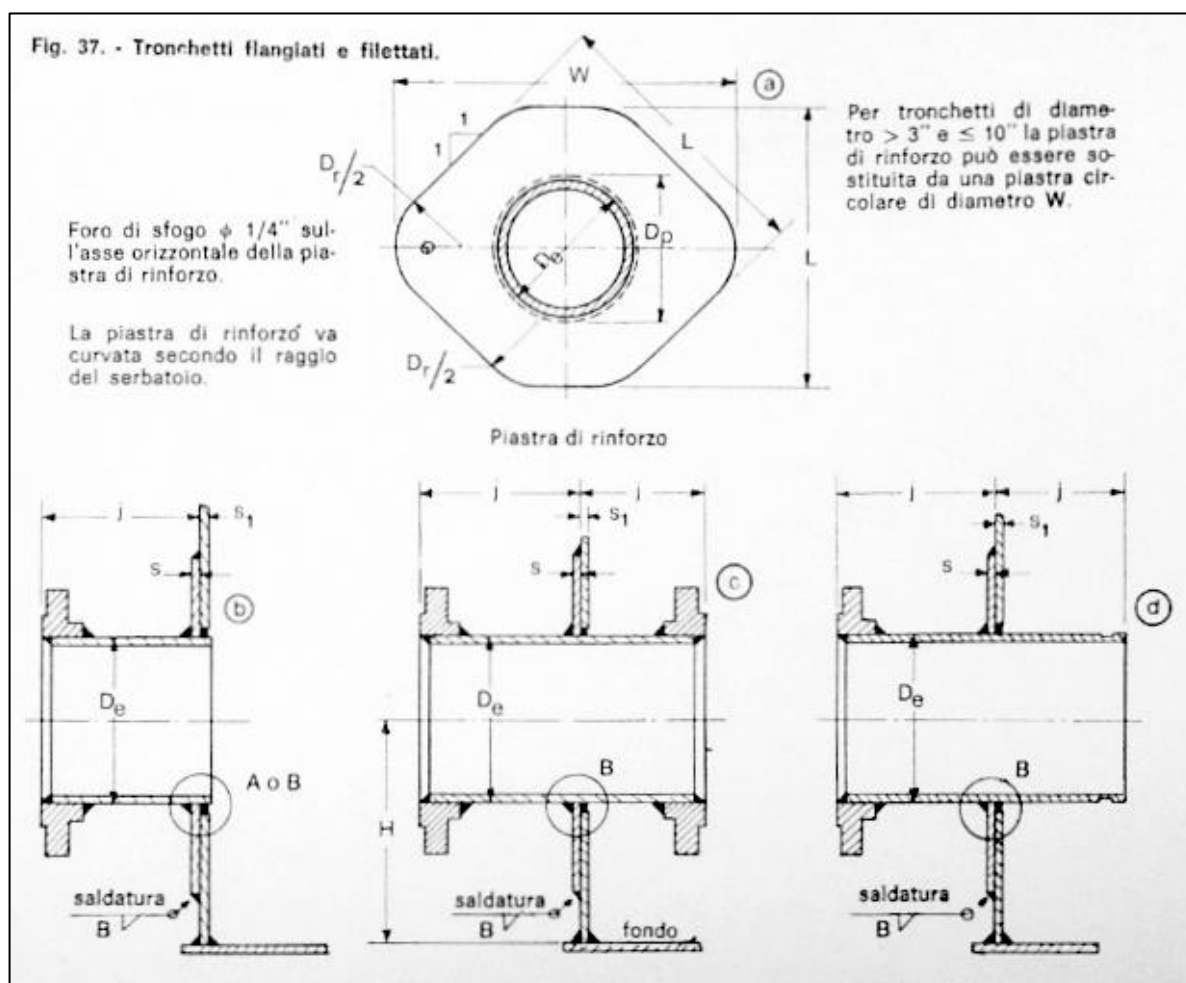


Figura 4.2.1 – Dettagli costruttivi collegamento tubazione/serbatoio

Dall'immagine è possibile osservare diverse modalità di realizzazione del collegamento; tali caratteristiche sono molto variabili e dipendono da molti fattori quali dimensioni del serbatoio, periodo e Paese di realizzazione, tipologia di impianto.

In genere la zona in prossimità dell'ugello viene rinforzata in quanto, attraverso il foro, si introduce un notevole indebolimento nella virola.

In figura 4.2.2 è riportata una rappresentazione schematica del collegamento, utilizzata per realizzare il modello a elementi finiti.

Il primo step da affrontare riguarda la scelta dell'estensione della porzione di serbatoio da schematizzare nel modello di calcolo; una sorta di area collaborante con la

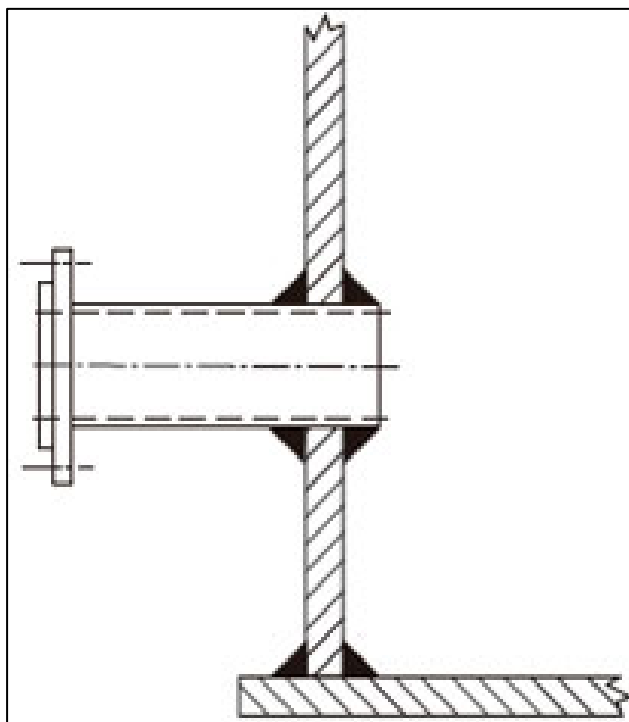


Figura 4.2.2 – Rappresentazione schematica del collegamento

tubazione di mandata (successivamente denominata anche “area d’interesse”). Ovviamente non è possibile realizzare l’intero serbatoio con la tubazione in uscita, in quanto comporterebbe un elevato onere computazionale, in particolare in presenza di serbatoi di grande diametro; infatti in prossimità del foro è necessaria una mesh particolarmente accurata, al fine di cogliere al meglio i forti gradienti relativi ad azioni interne e spostamenti.

Il modello di calcolo è realizzato secondo le seguenti ipotesi:

- Modello di calcolo elastico e lineare;
- Materiale tubazione e mantello: Acciaio strutturale avente modulo elastico pari a 210 GPa e densità pari a 7850 kg/m³;
- Spessore del mantello costante e pari a 15 mm;
- Diametro della tubazione pari a 406,6 mm con spessore di 10 mm. Tali caratteristiche vengono mantenute anche per le successive simulazioni;
- Utilizzo di elementi shell per definire la mesh (spessore esiguo rispetto alle altre dimensioni: rapporto inferiore a 1/10);
- Mantello incastrato sul fondo.

Nelle immagini successive si riporta il modello di calcolo realizzata mediante il programma ad elementi finiti LUSAS.

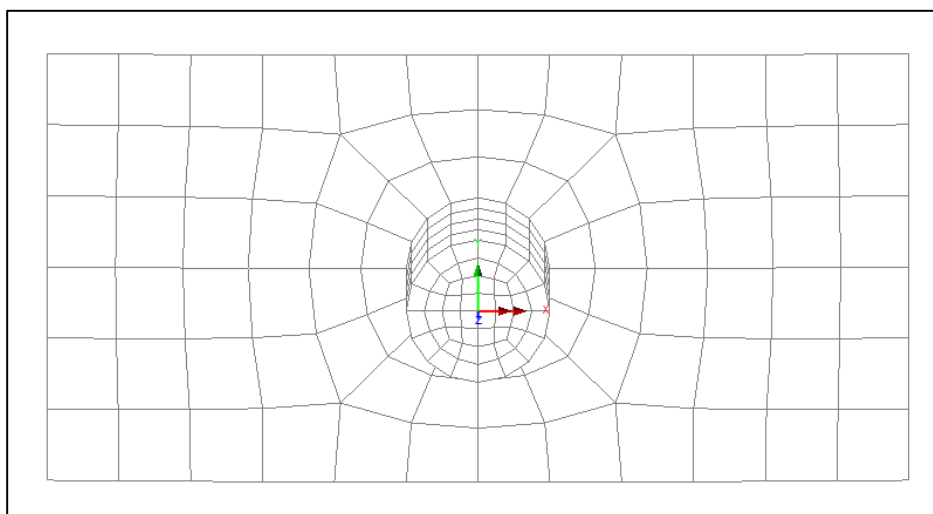


Figura 4.2.3 – Modello di calcolo realizzato

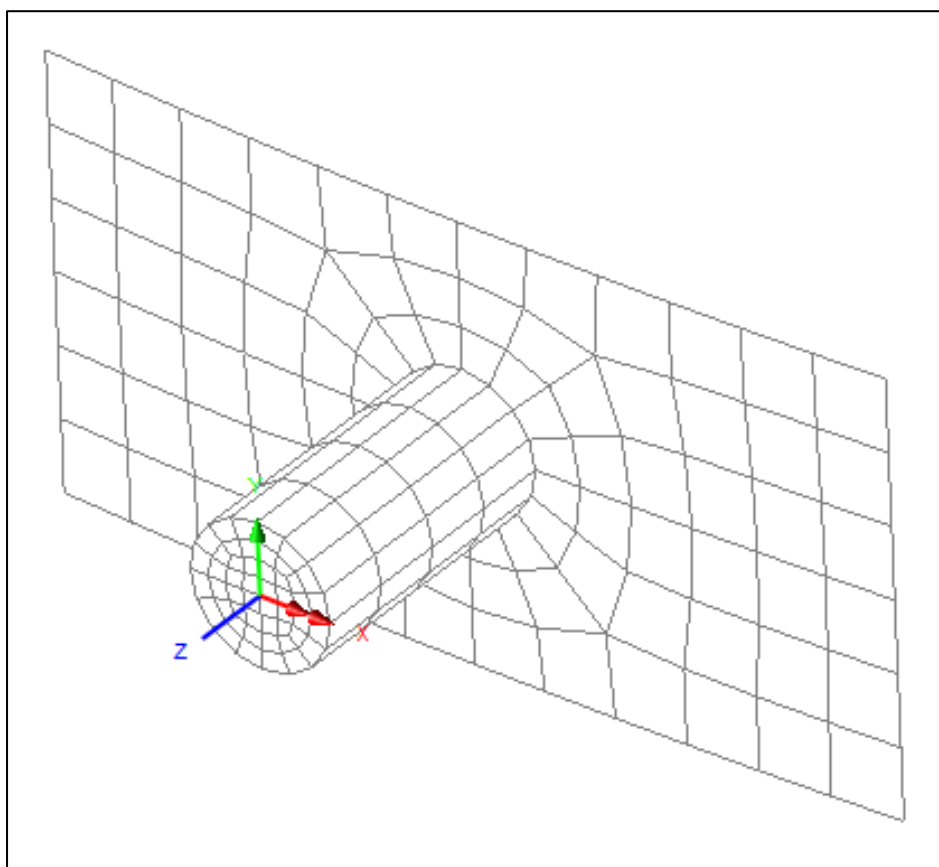


Figura 4.2.4 – Prospettiva relativa al modello di calcolo realizzato

Si osservi come tutte le dimensioni siano funzione del diametro del tubo, infatti la lunghezza stessa della tubazione è pari a $2D$, mentre l'estensione dell'area collaborante del serbatoio risulta essere pari a $3D$ in altezza e $6D$ in larghezza.

La finalità principale del modello è quella di valutare la rigidità del nodo, in particolare nei confronti di tre gradi di libertà:

1. Spostamento ortogonale alla superficie (radiale al serbatoio lungo z);
2. Spostamento tangenziale alla superficie (lungo x);
3. Rotazione attorno all'asse verticale (attorno y).

Si esaminano in particolare i tre gradi di libertà elencati in quanto le tubazioni, analizzate in seguito, sono contenute in un piano orizzontale, e l'incastro cedevole, rappresentante il collegamento, vincolerà i movimenti sopra descritti (vi saranno due molle "classiche" per le traslazioni e una molla rotazionale per la rotazione).

Al fine di ricavare la rigidità del nodo è possibile seguire due procedure differenti, le quali conducono ai medesimi risultati:

- Applicare forze unitarie valutando gli spostamenti, ricavando delle cedevolezza;
- Applicare spostamenti unitari valutando le reazioni corrispondenti, ricavando delle rigidità.

Cedevolezza e rigidità sono in relazione tra loro, essendo uno il reciproco dell'altro. Le condizioni di carico/spostamento vengono applicate ad una sorta di "tappo" posto sull'estremo libero della tubazione. Tale elemento ha funzione quindi di trasmettere al nodo gli input di carico, mantenendosi pressoché indeformato, avendo uno spessore superiore rispetto al tubo (tale spessore può variare, ad esempio può essere posto pari a 10 cm).

Nel caso in cui si voglia valutare direttamente la rigidità, applicando spostamenti unitari, è necessario posizionare, nel nodo centrale del "tappo" della tubazione, un vincolo corrispondente allo spostamento analizzato, allo scopo di valutare il valore della reazione duale al movimento applicato. Per quanto riguarda le condizioni di vincolo, da apporre sui bordi della lastra, si faccia riferimento al paragrafo successivo dedicato a tale argomento;

esso ricopre un aspetto preponderante in questa fase in quanto influenzerà notevolmente le rigidezze ottenute.

Passando alle caratteristiche del modello, si noti come la virola abbia il raggio di curvatura del serbatoio, questo per simulare al meglio il comportamento e la rigidezza del collegamento. Infatti un'ulteriore possibilità riguarda la scelta di una superficie piana, vista la modesta curvatura (al crescere del diametro del serbatoio diminuisce sempre più l'influenza della curvatura).

Per quanto riguarda la mesh si sono utilizzati elementi di superficie, visto lo spessore esiguo rispetto alle altre dimensioni; in particolare sono stati utilizzati elementi guscio di due tipologie: thin shell, ovvero elementi sottili trascuranti la deformabilità a taglio, e thick shell, elementi includenti la deformabilità a taglio. Entrambi gli elementi hanno 4 nodi (per elemento); i risultati verranno confrontati al fine di valutare l'influenza del taglio sulla soluzione ottenuta.

4.3 Scelta delle condizioni di vincolo sui bordi della lastra

Definita la porzione di serbatoio interagente con la tubazione di mandata, è necessario procedere con la corretta attribuzione delle condizioni di vincolo da applicare sul contorno della lastra. Tale scelta risulta essere di fondamentale importanza in quanto influenza la rigidezza del nodo studiato, e quindi la distribuzione delle sollecitazioni lungo la tubazione.

Le lastre cilindriche costituenti i serbatoi rientrano nella famiglia delle lastre a doppia curvatura; è possibile semplificare in parte il problema in quanto una curvatura risulta essere nulla. Nella seguente figura si riportano le azioni interne tipiche di questi elementi.

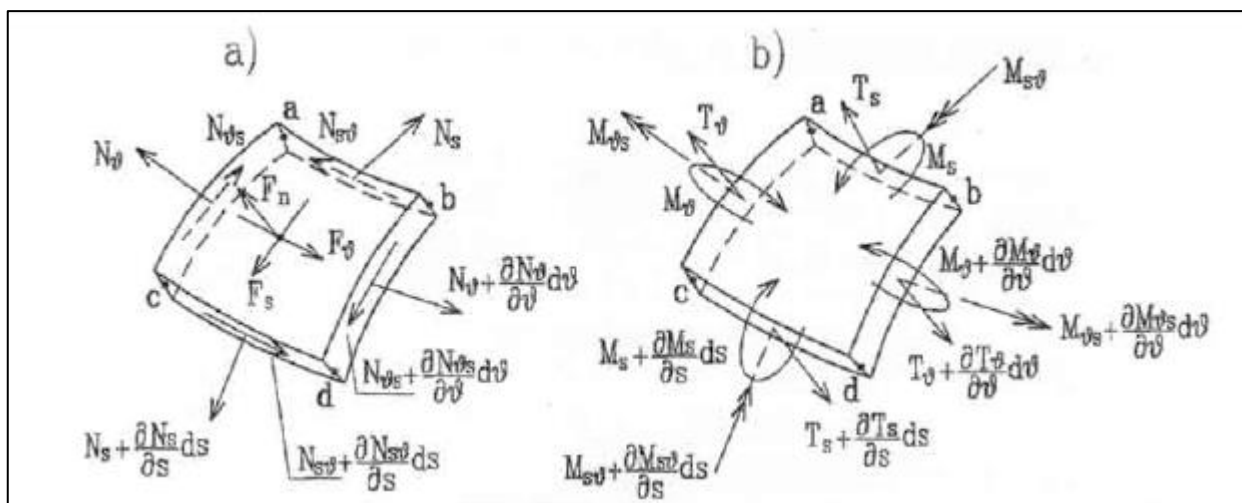


Figura 4.3.1 – Azioni interne in elementi a doppia curvatura

In figura è possibile osservare la presenza sia di sforzi membranali che di sforzi flessionali, in particolare:

1. Sforzi membranali:

- N_s = sforzo normale diretto lungo la tangente al meridiano;
- N_θ = sforzo normale diretto lungo la tangente al parallelo;
- $N_{s\theta}$ = sforzo tangenziale diretto lungo il parallelo/meridiano.

2. Sforzi flessionali:

- T_s = sforzo tagliante contenuto nel piano del meridiano, perpendicolare alla tangente al meridiano;
- T_θ = sforzo tagliante perpendicolare alla tangente al meridiano;
- M_s = momento flettente con asse diretto lungo la tangente al parallelo;
- M_θ = momento flettente con asse diretto lungo la tangente al meridiano;
- $M_{s\theta}$ = momento torcente con asse tangente al meridiano/parallelo.

In alcune situazioni gran parte delle azioni interne sopra riportate si annullano per simmetria, ad esempio nei serbatoi soggetti a carico idrostatico. Nel caso in esame è necessario capire quali sforzi interni siano presenti in corrispondenza dei bordi della porzione di serbatoio, e quali spostamenti siano nulli o meno, considerando le tre diverse condizioni di carico. Infatti da tali considerazioni è possibile risalire alle condizioni di vincolo da applicare alla porzione di lamiera in oggetto. In particolare le condizioni di vincolo saranno differenti a seconda del bordo considerato (superiore/laterale), e a seconda dello spostamento imposto in esame.

A tale scopo, viene analizzata una porzione di serbatoio avente raggio di curvatura e altezza rispettivamente pari a 20 m e 10 m. Ad un punto della superficie (sull'asse di simmetria) vengono applicati, in successione, i tre spostamenti considerati. Eseguita l'analisi (elastica e lineare) dei tre casi, risulta necessario valutare in maniera critica i risultati ottenuti, in termini di spostamenti e rotazioni (nelle varie direzioni e attorno i vari assi) e di azioni interne, stabilendo, successivamente, quali gradi libertà bloccare sui bordi della porzione di serbatoio considerata.

In particolare si considera un quarto di serbatoio incastrato inferiormente in corrispondenza della saldatura tra il primo corso di virole ed il fondo stesso (tale porzione di fondo viene chiamata trincarino). Tali lamiere hanno spessore confrontabile (maggiore rispetto alle parti adiacenti, perciò è lecito applicare tale tipo di vincolo (per tutte le

condizioni di carico). Nelle immagini successive si riportano alcuni particolari costruttivi che giustificano l'assunzione precedente.

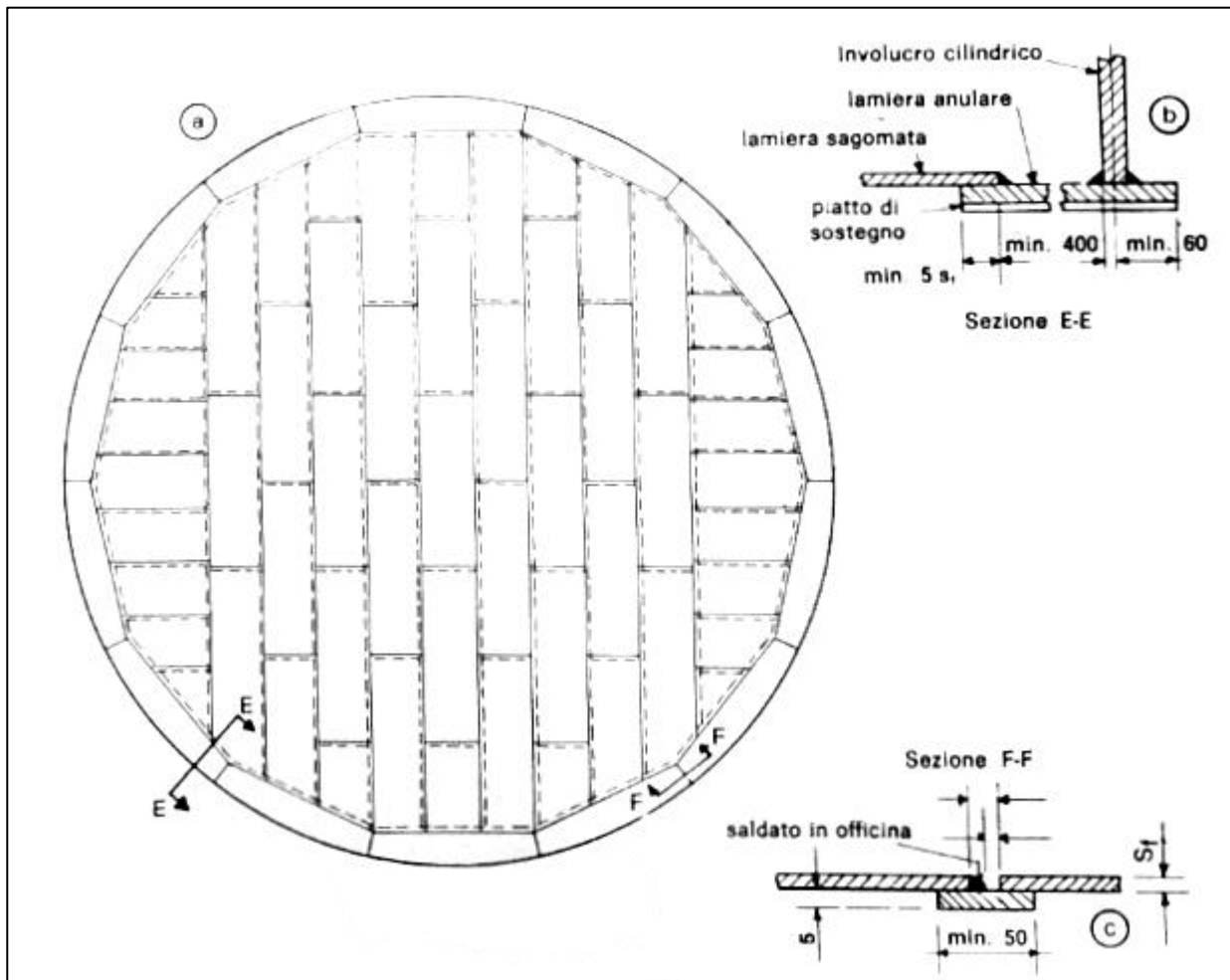


Figura 4.3.2 – Particolari del fondo, con sezioni

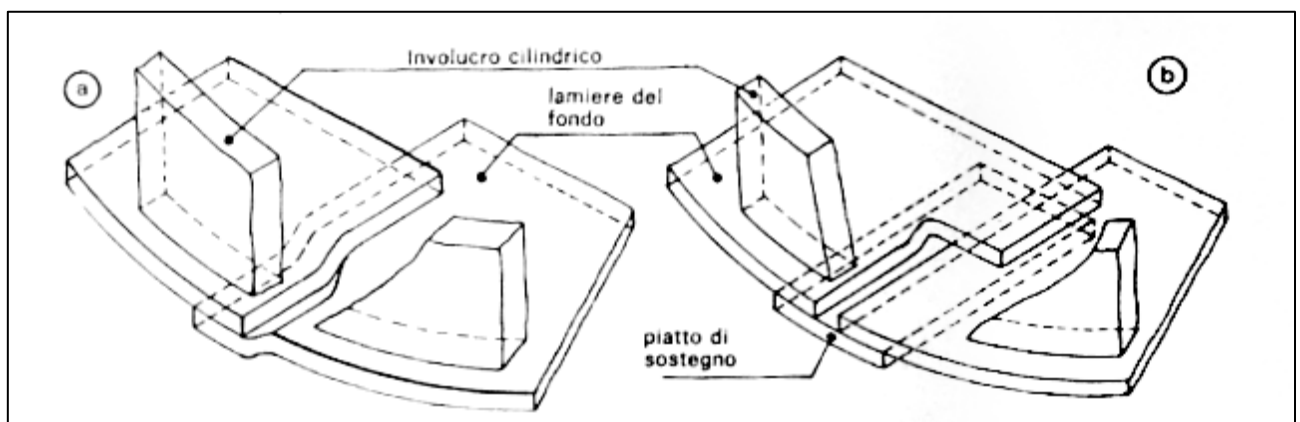


Figura 4.3.3 – Particolari relativi alla sovrapposizione delle lastre del fondo

Nell'immagine 4.3.2 è riportata la disposizione tipica delle lamiere sul fondo di un serbatoio, nella seconda un dettaglio di come viene effettuato il collegamento. Si osservi in particolare il dettaglio “b” in cui è possibile osservare la saldatura tra il fondo e la parete verticale. Perciò il vincolo di incastro, per le medesime ragioni, viene applicato anche al modello di calcolo del nodo, mostrato in precedenza, in corrispondenza del bordo inferiore (indipendentemente dalla condizione di carico).

Nell'immagine è riportato il modello di calcolo utilizzato; si osservi inoltre come lateralmente siano stati posizionati degli incastri.

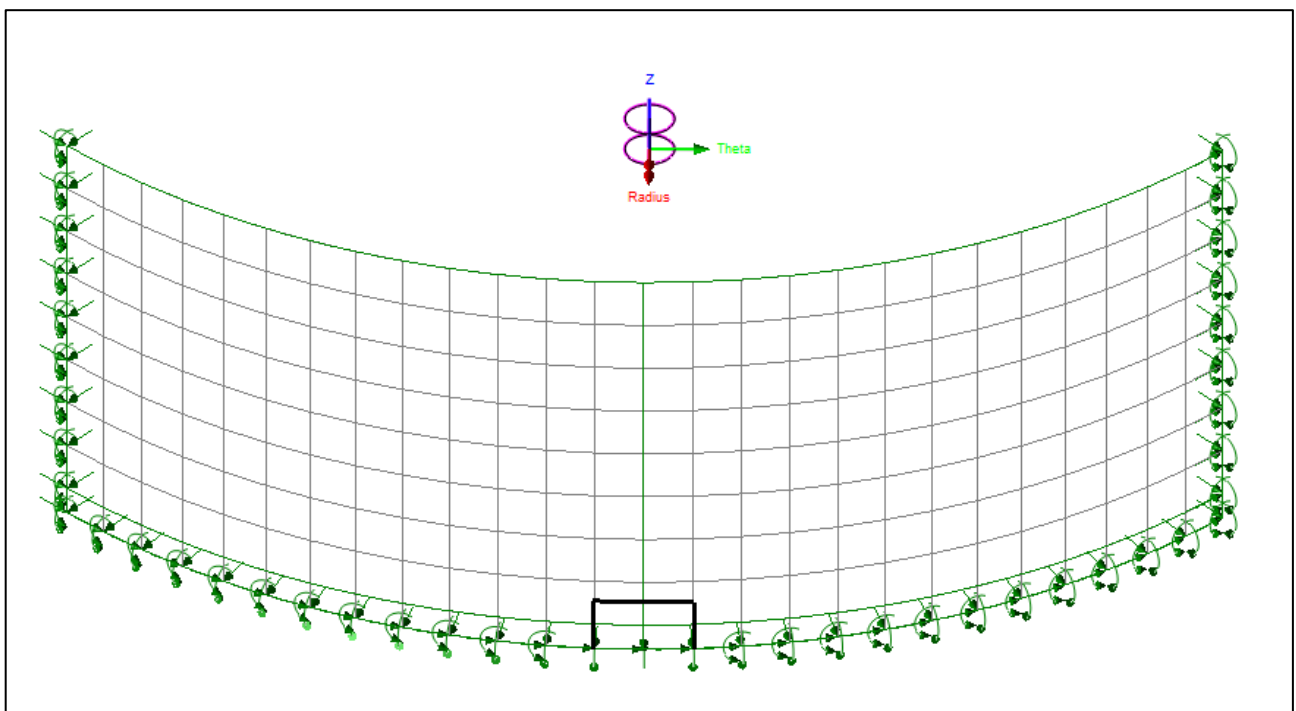


Figura 4.3.4 – Modello di calcolo della porzione di serbatoio

La scelta di posizionare degli incastri lateralmente non è propriamente corretta, ma per le finalità del modello di calcolo si ritiene adeguata. Infatti tali vincoli non influenzano la porzione di serbatoio “collaborante” con la tubazione, in quanto posti a distanza considerevole, si notino infatti le dimensioni di tale area (evidenziata in nero nella figura, e studiata in precedenza) confrontata con la restante porzione di serbatoio.

Per quanto riguarda la mesh sono stati utilizzati elementi “thin shell” a quattro nodi, trascuranti la deformabilità a taglio della parete; ciò è giustificato dallo spessore esiguo rispetto alle altre dimensioni (spessore della parete supposto costante e pari a 15 mm).

Gli spostamenti imposti vengono applicati sull'asse di simmetria della parete, al centro della porzione collaborante, evidenziata nell'immagine precedente. Verranno valutati, come detto in precedenza, spostamenti e azioni interne nei pressi dell'area interessata, al fine di scegliere le condizioni di vincolo più appropriate per le differenti condizioni di carico. In particolare si analizzeranno i bordi laterali ed il bordo superiore, mentre il bordo inferiore risulta incastrato, come dimostrato in precedenza.

In figura sono indicate le convenzioni di segno utilizzate dal software per i singoli elementi della mesh, l'asse x coincide con la direzione circonferenziale della superficie, l'asse y con la direzione verticale.

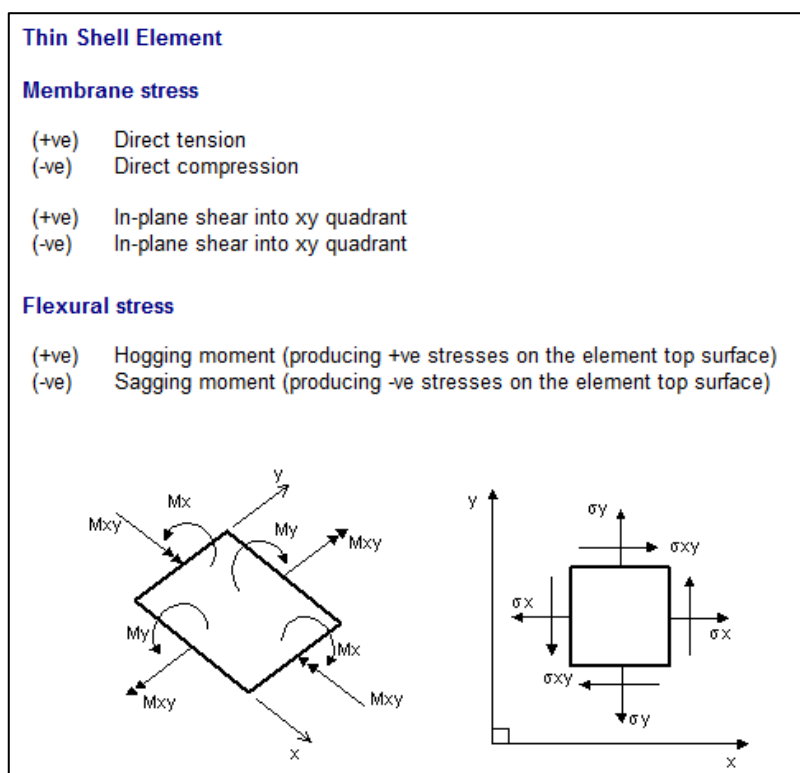


Figura 4.3.5 – Convenzioni di segno

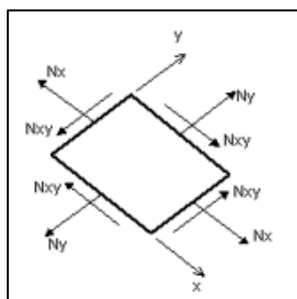


Figura 4.3.6 – Convenzioni di segno

Si riportano i risultati e le considerazioni effettuate per i tre spostamenti imposti.

A. Spostamento in direzione radiale rispetto la superficie.

Si applica al serbatoio uno spostamento unitario in direzione radiale. Si riporta successivamente il contour relativo a tale spostamento.

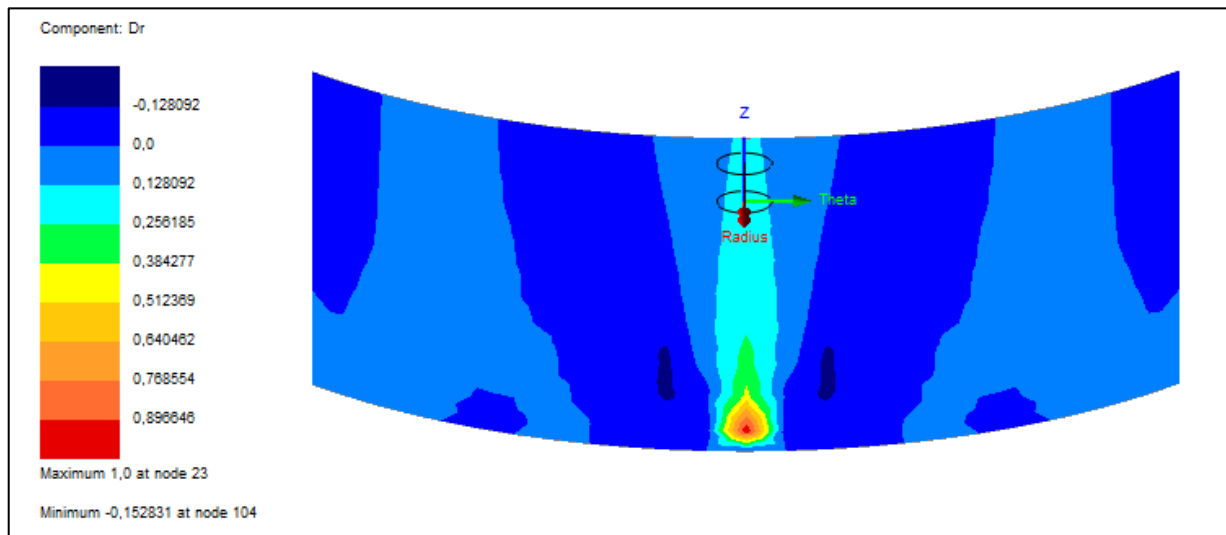


Figura 4.3.7 – Spostamento in direzione radiale

Dal contour è possibile osservare come lo spostamento in oggetto tenda ad annullarsi rapidamente in direzione circonferenziale, al di fuori dell'area di influenza. Differentemente, lungo l'altezza, lo spostamento si riduce senza annullarsi completamente. Da queste considerazioni è evidente come sia necessario bloccare lo spostamento in direzione radiale solo lungo i bordi laterali della lamiera interessata.

Si procede con l'analisi dello spostamento in direzione circonferenziale (causato sempre da uno spostamento in direzione radiale). Dal contour si nota come lo spostamento in oggetto non si annulli nella porzione superiore l'area interessata. Diversamente nella zona inferiore, muovendosi lateralmente ed esternamente l'area interessata, si osserva come tenda ad annullarsi (le porzioni verdi e gialle sono prossime allo zero) seppur "lentamente"; prima di procedere con il bloccaggio di tale spostamento si analizza il contour dello sforzo normale N_θ duale al movimento considerato.

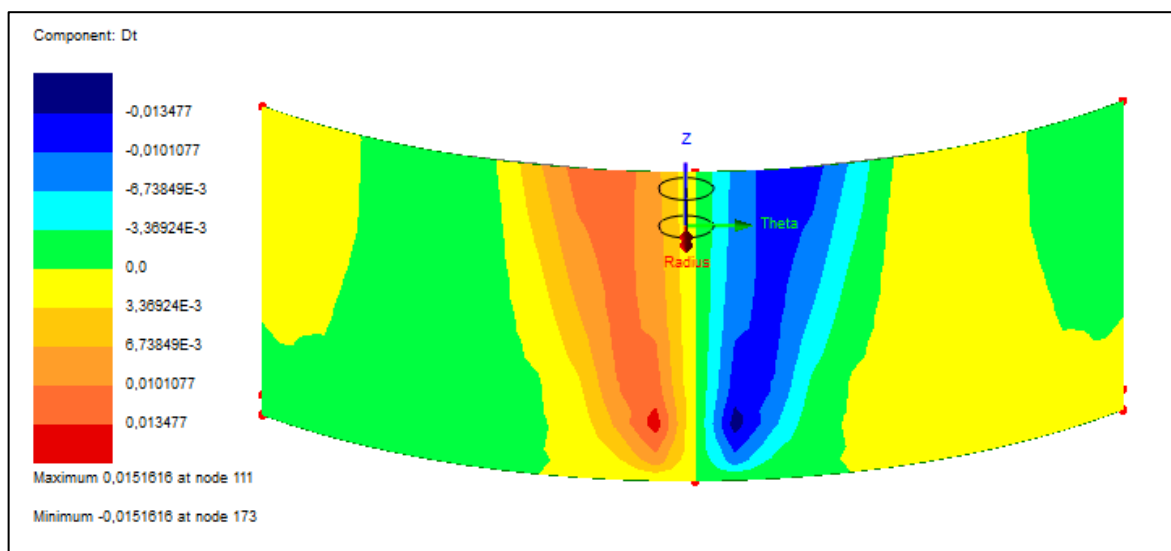


Figura 4.3.8 – Spostamento in direzione circonferenziale

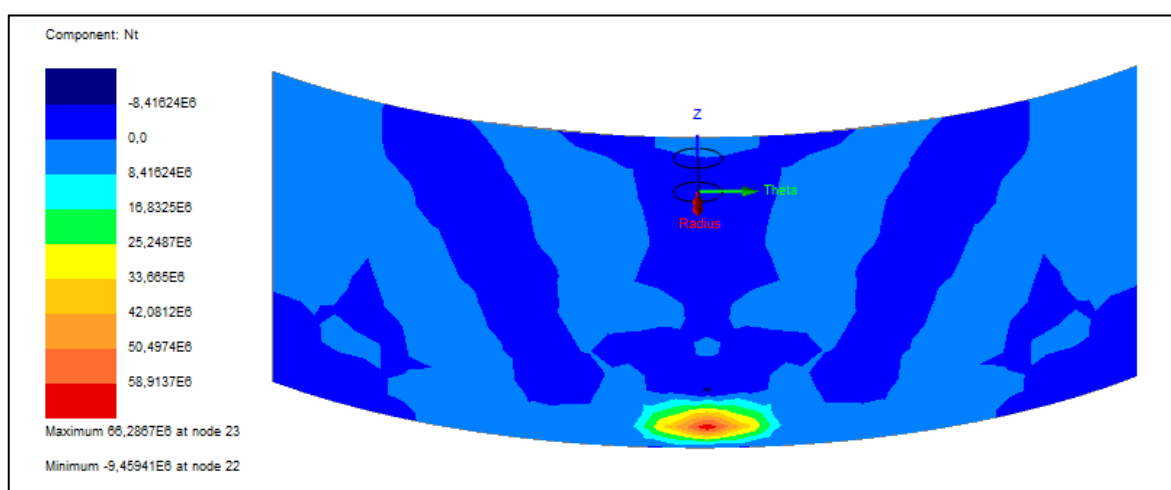


Figura 4.3.9 – Sforzo membranale lungo il parallelo, N_θ

Dal contour relativo a N_θ si osserva come le curve di livello siano particolarmente schiacciate (come ci si aspetta visto il tipo di movimento impresso). Perciò, visto l'elevato valore di N_θ lungo i bordi verticali dell'area considerata, si blocca lo spostamento circonferenziale lungo tali contorni.

Si procede con l'analisi dello spostamento in direzione verticale, del quale si riporta il plot in figura 4.3.10, successivamente si riporta anche l'azione interna duale lo spostamento verticale lungo il bordo superiore, ovvero N_z .

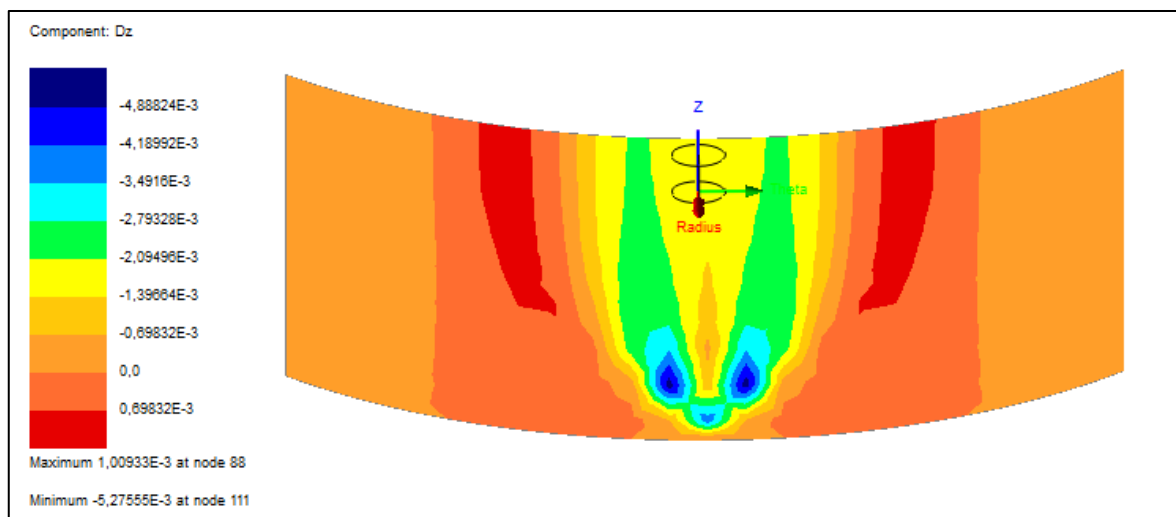


Figura 4.3.10 – Spostamento in direzione verticale

Per quanto riguarda lo spostamento verticale, nella parte superiore dell'area interessata, si osserva come non abbia un andamento particolarmente definito, infatti tende ad annullarsi in zona centrale per poi crescere allontanandosi lateralmente. Osservando invece l'andamento di N_z , sotto riportato, si nota come assuma valore elevato nella porzione superiore l'area interessata; si opta quindi per bloccare lo spostamento verticale del bordo superiore. Per quanto concerne il bordo laterale è possibile notare come, in prossimità della porzione interessata, lo spostamento verticale abbia valori non del tutto trascurabili, presentando due zone di picco simmetriche, perciò non si aggiungono ulteriori vincoli traslazionali lungo il bordo laterale.

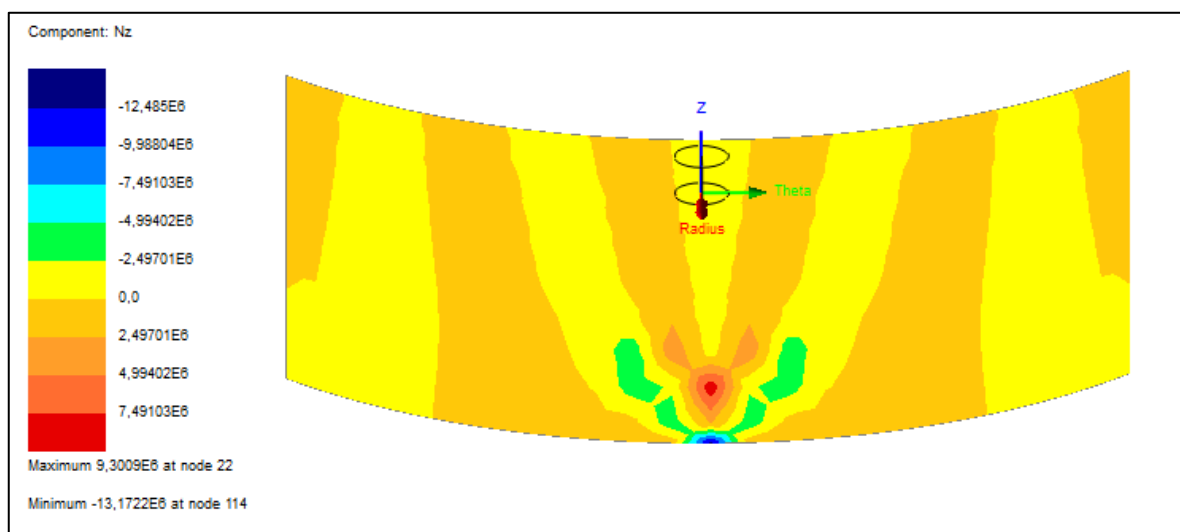


Figura 4.3.11 – Sforzo membranale lungo il meridiano, N_z

Successivamente si riporta il contour relativo alla rotazione attorno agli assi verticali (4.3.12). È possibile osservare la presenza di due picchi (blu e rosso) in prossimità della zona interessata, anche se la predominanza spetta alle colorazioni verde e gialla, le quali indicano rotazione prossima al valore nullo. Perciò è necessario vincolare entrambi i bordi rispetto alla rotazione attorno all'asse verticale.

Infine si riporta il contour relativo alla rotazione attorno ad assi circolarziali (4.3.13), e si nota come in entrambe le direzioni le rotazioni tendano ad annullarsi, rendendo necessaria la presenza di vincoli rotazionali (attorno ad assi circolarziali) su entrambi i bordi della porzione interessata.

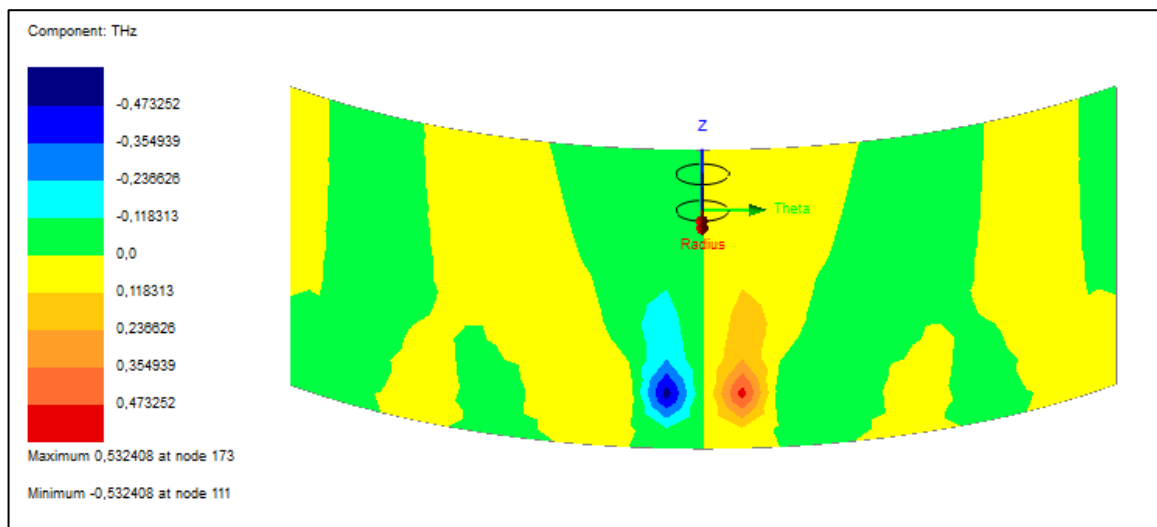


Figura 4.3.12 – Rotazione attorno assi verticali

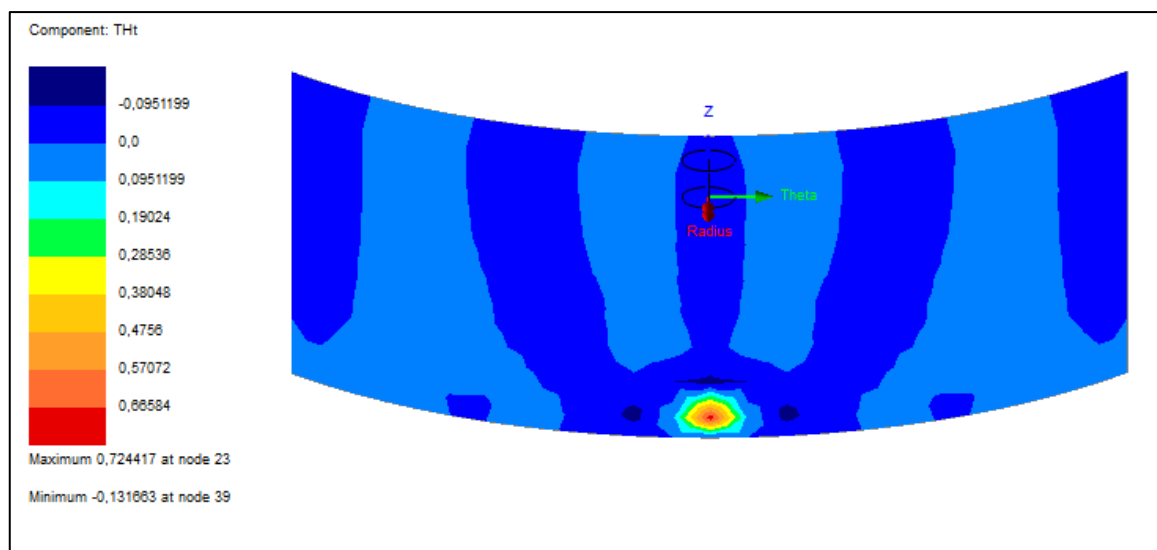


Figura 4.3.13 – Rotazione attorno assi circolarziali

In conclusione è possibile riassumere i gradi di libertà bloccati lungo i bordi laterale e lungo il bordo superiore per uno spostamento imposto in direzione radiale.

- Bordo superiore, gradi di libertà bloccati:
 1. Traslazione verticale;
 2. Rotazione attorno asse verticale;
 3. Rotazione attorno asse circonferenziale.
- Bordi laterali, gradi di libertà bloccati:
 1. Traslazione radiale;
 2. Traslazione circonferenziale;
 3. Rotazione attorno asse verticale;
 4. Rotazione attorno asse circonferenziale.

Infine in figura 4.3.14 si riporta il nodo con i gradi di libertà bloccati, in accordo con quanto riportato sopra.

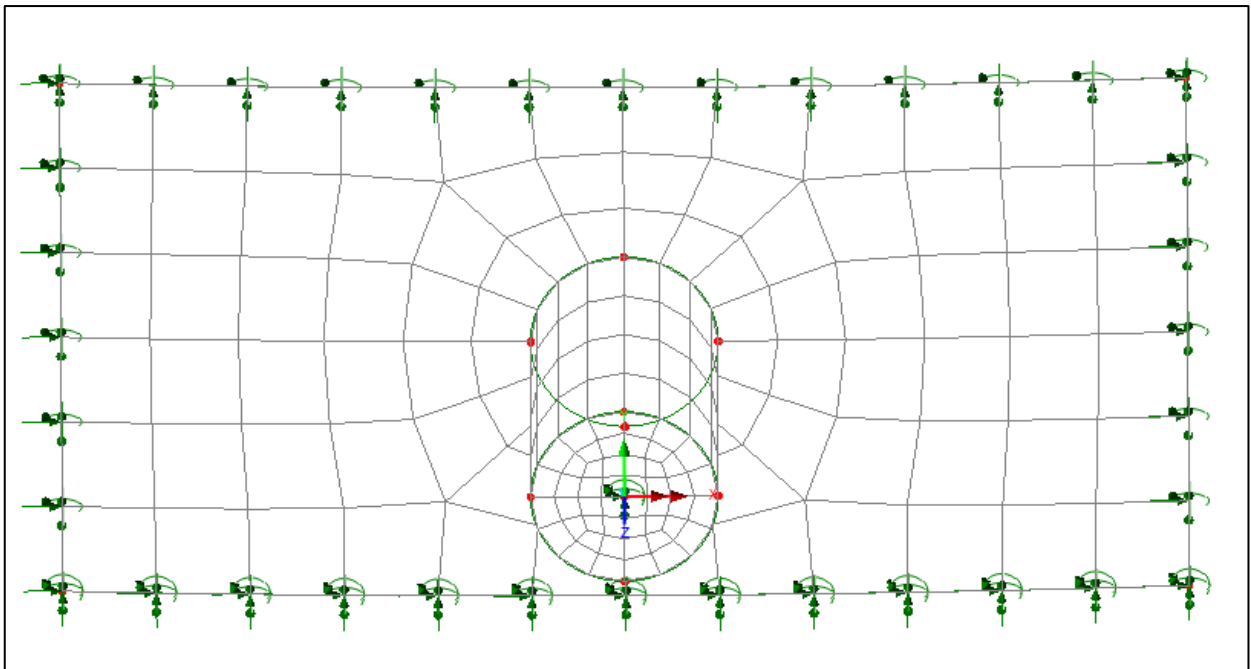


Figura 4.3.14 – Modello di calcolo con vincoli

Infine si riporta la deformata relativa ad uno spostamento applicato in direzione radiale.

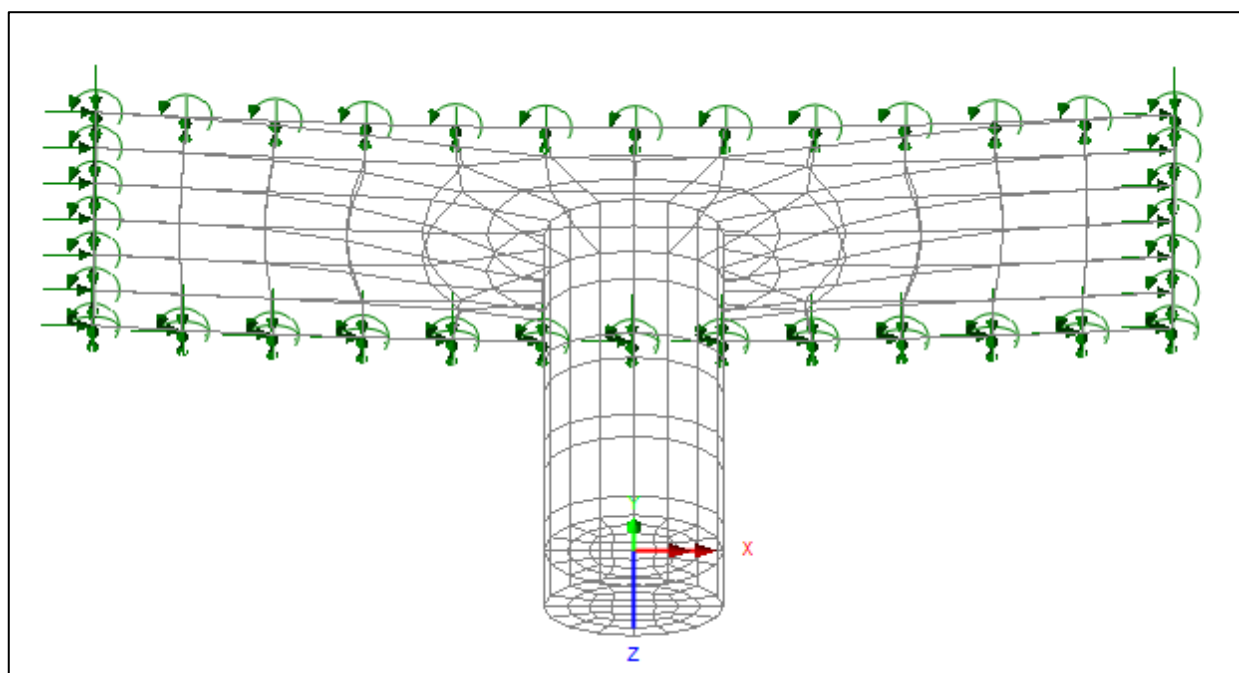


Figura 4.3.15 - Deformata

B. Spostamento in direzione circonferenziale rispetto la superficie.

Si procede analogamente al caso precedente, considerando ora uno spostamento applicato alla superficie in direzione circonferenziale. Come primo contour (4.3.16) si riporta lo spostamento in direzione circonferenziale dei punti appartenenti al serbatoio.

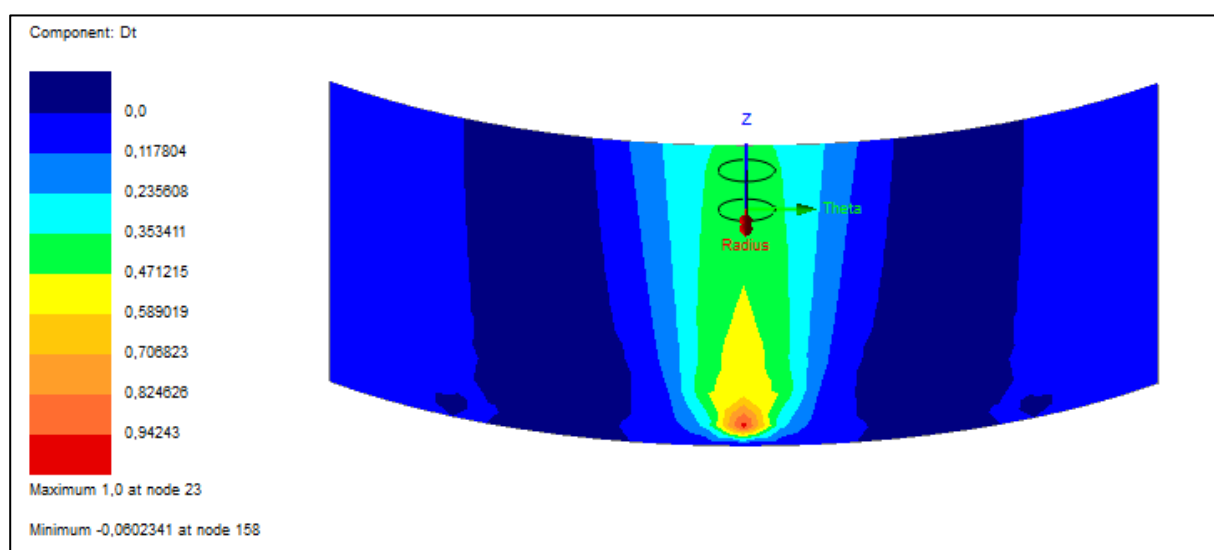


Figura 4.3.16 – Spostamento in direzione tangenziale

È possibile osservare come tale movimento non si annulla nella porzione superiore all'area interessata, diversamente rispetto a quanto succede muovendosi lateralmente. Si opta, quindi, per il bloccaggio dello spostamento in direzione circonferenziale lungo i bordi laterali. A conferma di quanto riportato sopra si osserva il contour di N_θ , il quale mostra la presenza di due picchi laterali rispetto l'area di influenza.

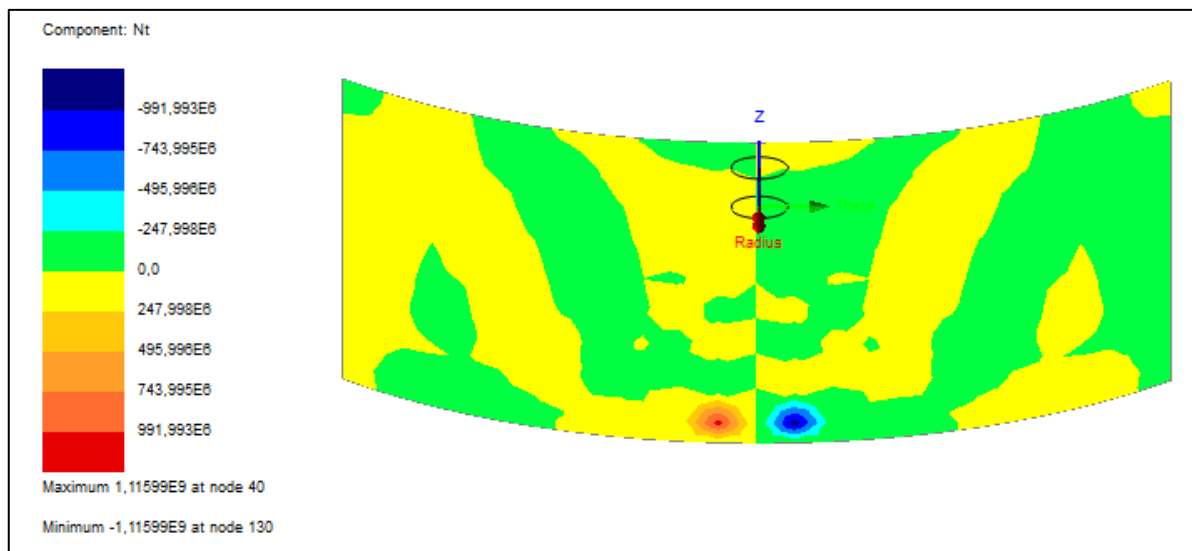


Figura 4.3.17 – Sforzo membranale lungo il parallelo

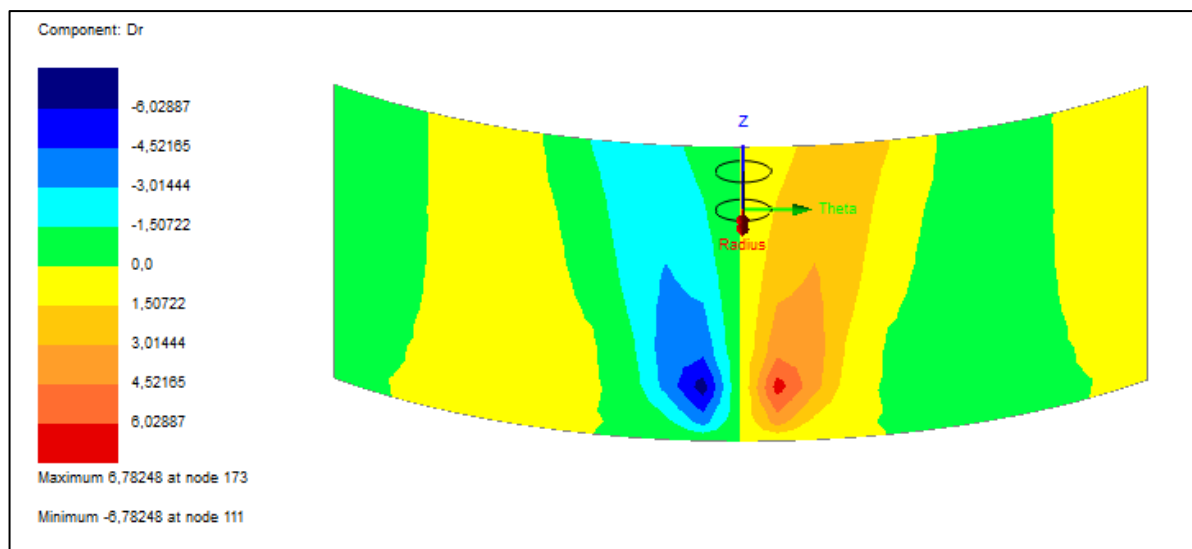


Figura 4.3.18 – Spostamento in direzione radiale

Si procede con l'analisi dello spostamento in direzione radiale (4.3.18). Dal contour si nota come lo spostamento tenda ad avere valori molto elevati sia lateralmente che superiormente l'area interessata, andando ad annullarsi molto lentamente; per questo motivo si decide di non bloccare nessuna traslazione in direzione radiale lungo entrambi i bordi della lastra.

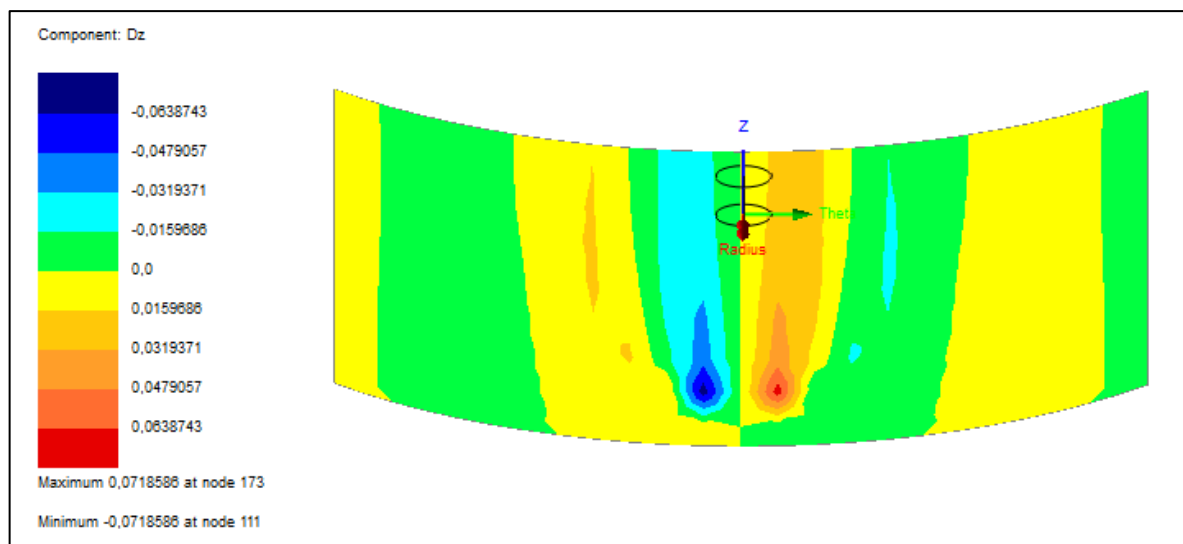


Figura 4.3.19 – Spostamento in direzione verticale

Nell'immagine soprastante è riportato lo spostamento in direzione verticale. Lateralmente il movimento tende a smorzarsi rapidamente, perciò si blocca tale grado di libertà lungo i bordi verticali. Nella zona superiore l'area interessata lo spostamento non si annulla del tutto, però, considerando i valori piuttosto limitati e la zona di nullo centrale, si opta per il bloccaggio della traslazione verticale anche lungo il bordo superiore.

Per quanto riguarda le rotazioni si riporta inizialmente l'andamento intorno gli assi verticali della superficie. Si può osservare come la rotazione tende a ridursi sia verticalmente che lateralmente all'area interessata.

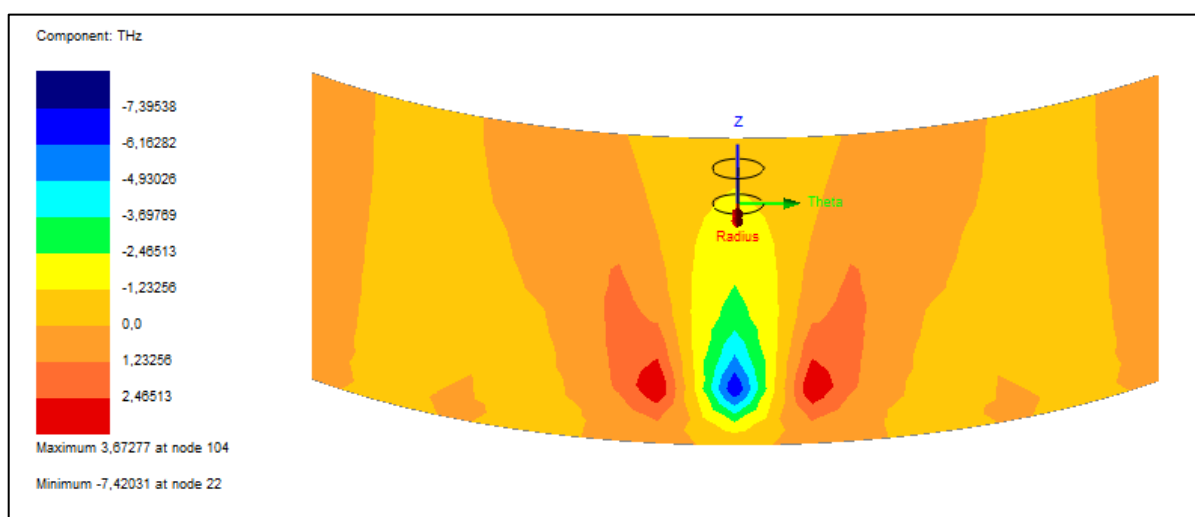


Figura 4.3.20 – Rotazione attorno assi verticali

In particolare tale riduzione è molto accentuata in direzione circonferenziale, mentre risulta più graduale nella porzione superiore. Alla luce di queste considerazioni si opta per bloccare le rotazioni attorno all'asse verticale lungo entrambi i bordi. A conferma di ciò si riportano gli andamenti di M_θ e di $M_{s\theta}$, azioni interne duali alla rotazione considerata.

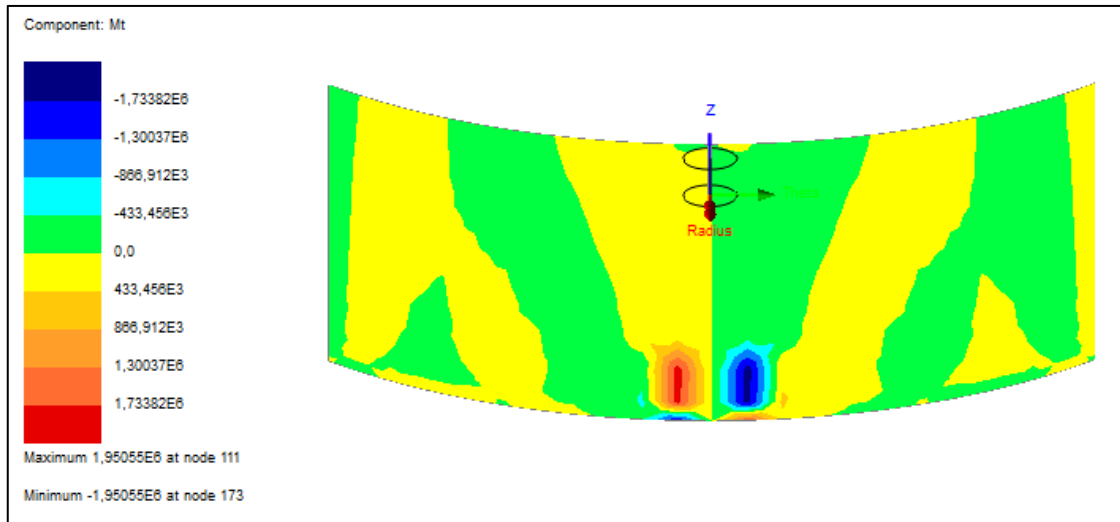


Figura 4.3.21 - Momento flettente circonferenziale, M_θ

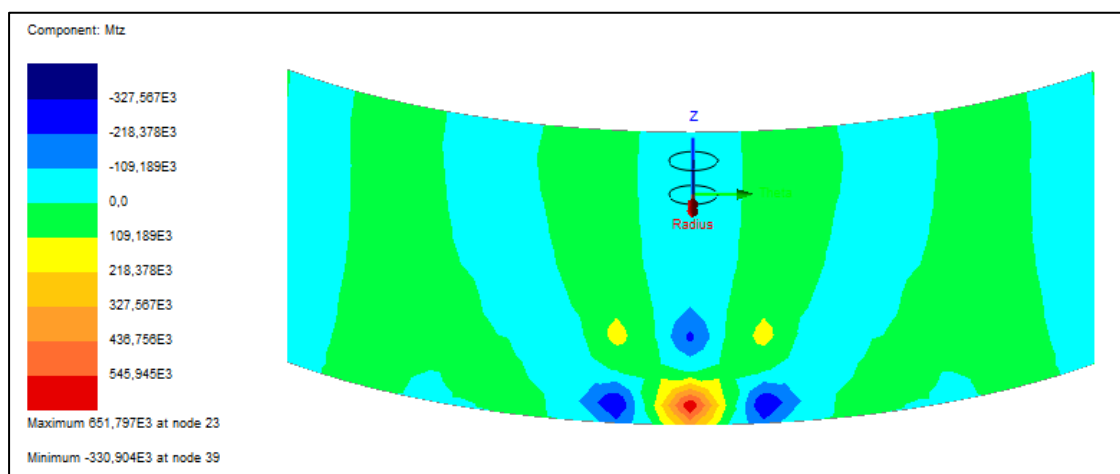


Figura 4.3.22 - Momento torcente $M_{z\theta}$

Dal contour di M_θ si nota la presenza di tale azione interna lateralmente l'area interessata, mentre osservando l'andamento di $M_{z\theta}$ in figura 4.3.22 si ha conferma di quanto ipotizzato precedentemente. Perciò si ritiene corretto bloccare la rotazione torsionale sul bordo superiore. Discorso analogo anche per i bordi laterali, infatti $M_{s\theta}$ è non nullo anche in tali zone. Per verificare quanto detto si riporta in ultimo l'andamento della rotazione attorno agli assi circonferenziali degli elementi (fig 4.3.23).

Si può osservare anche in questa situazione una riduzione della rotazione, più graduale lungo il parallelo inferiore. Si procede, dunque, con il bloccaggio dei gradi di libertà lungo entrambi i bordi, come confermato anche dal precedente contour ($M_{z\theta}$).

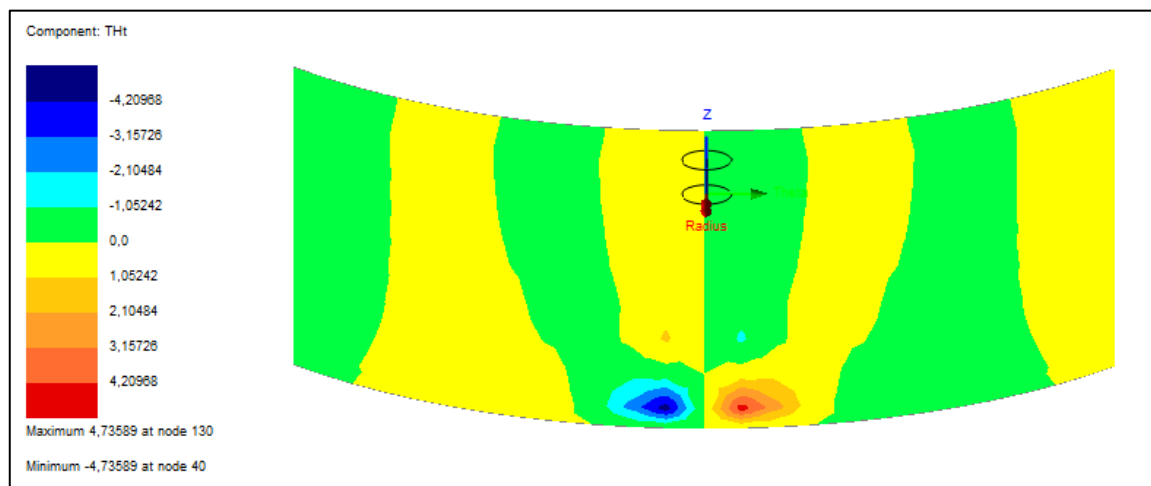


Figura 4.3.24 – Rotazione attorno assi circolferenziali

A ulteriore conferma di quanto sopra discusso si riporta il contour relativo al momento M_z .

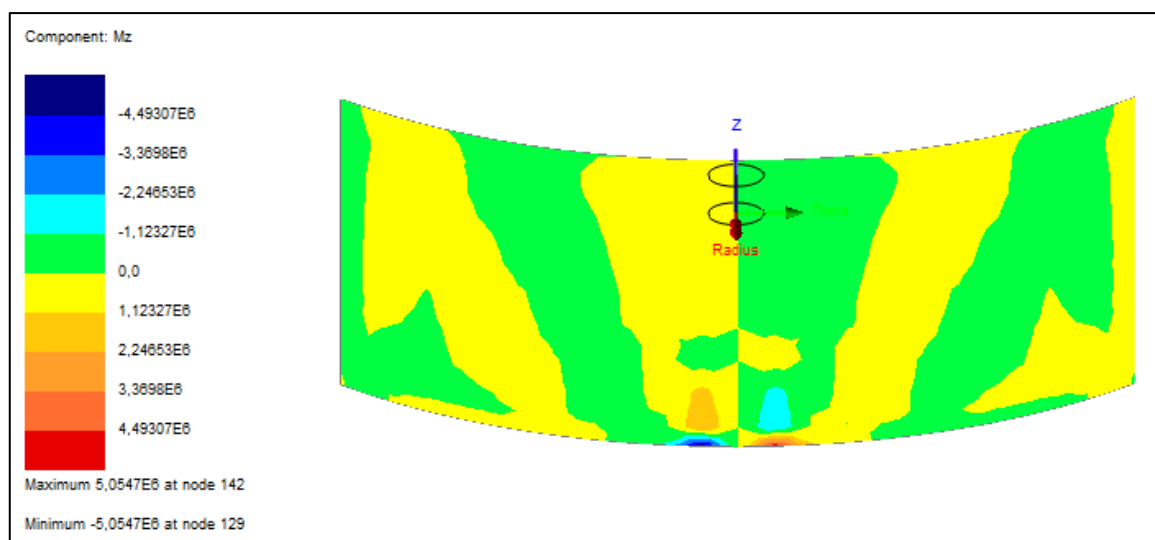


Figura 4.3.25 – Momento flettente attorno assi circolferenziali

Si può osservare come il momento attorno gli assi circolferenziali sia presente nella porzione superiore, con due zone simmetriche, rendendo lecita l'assunzione discussa in precedenza.

In conclusione è possibile riassumere i gradi di libertà bloccati lungo i bordi laterale e lungo il bordo superiore per uno spostamento imposto in direzione circonferenziale.

- Bordo superiore, gradi di libertà bloccati:
 1. Traslazione verticale;
 2. Rotazione attorno asse verticale;
 3. Rotazione attorno asse circonferenziale.
- Bordi laterali, gradi di libertà bloccati:
 1. Traslazione verticale;
 2. Traslazione circonferenziale;
 3. Rotazione attorno asse verticale;
 4. Rotazione attorno asse circonferenziale.

Infine in figura 4.3.26 si riporta il nodo con i gradi di libertà bloccati, in accordo con quanto riportato sopra, ed infine la deformata corrispondente.

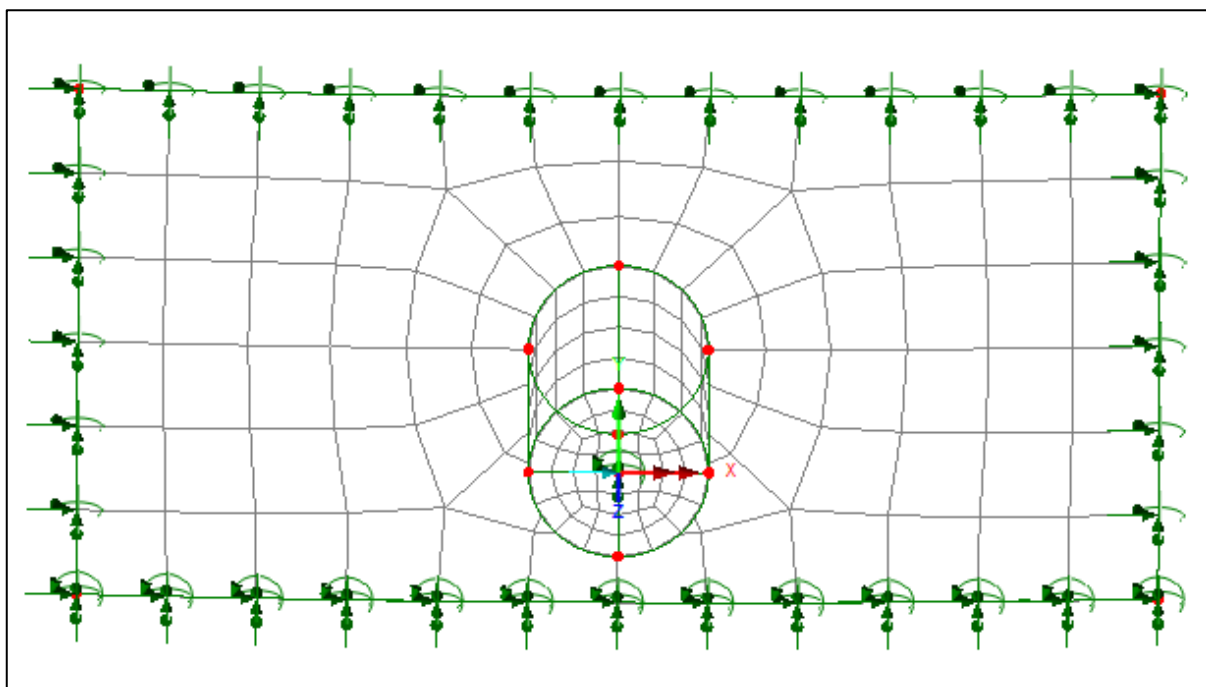


Figura 4.3.26 – Modello di calcolo con vincoli

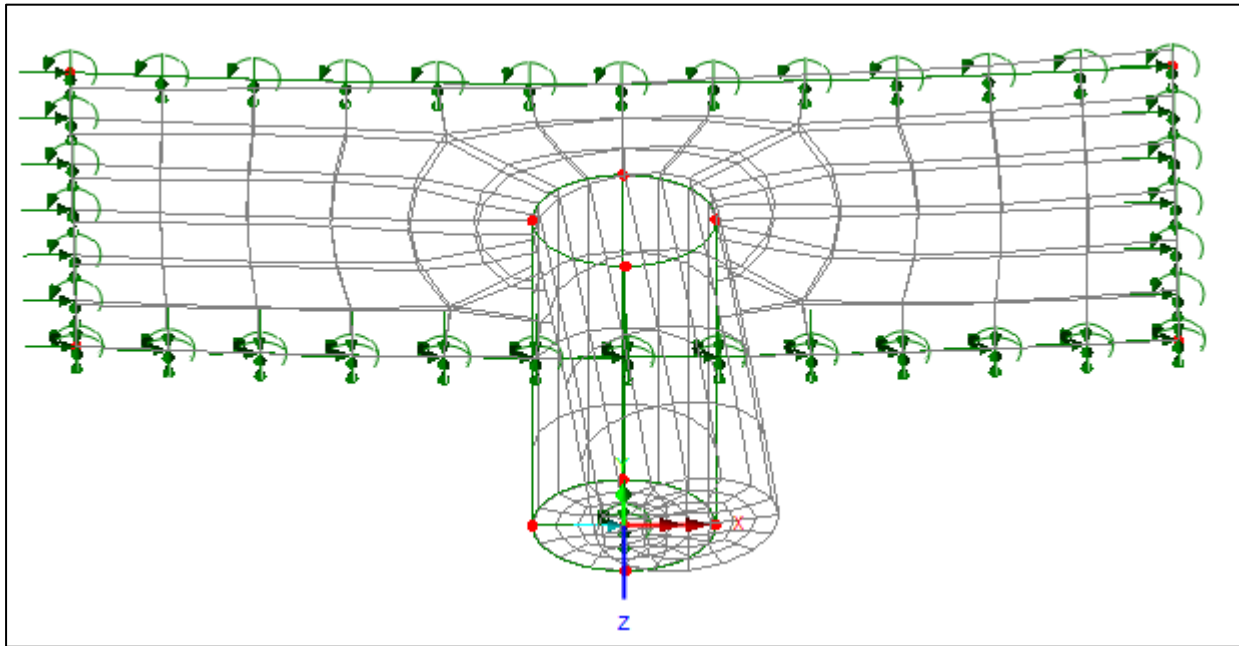


Figura 4.3.27 – Deformata

C. Rotazione attorno all'asse verticale.

In ultimo si effettua l'analisi per attribuire correttamente le condizioni di vincolo dovute alla rotazione attorno all'asse verticale nel punto di ingresso della tubazione.

Si inizia analizzando le traslazioni dovute alla coppia applicata, ed in particolare la traslazione in direzione radiale.

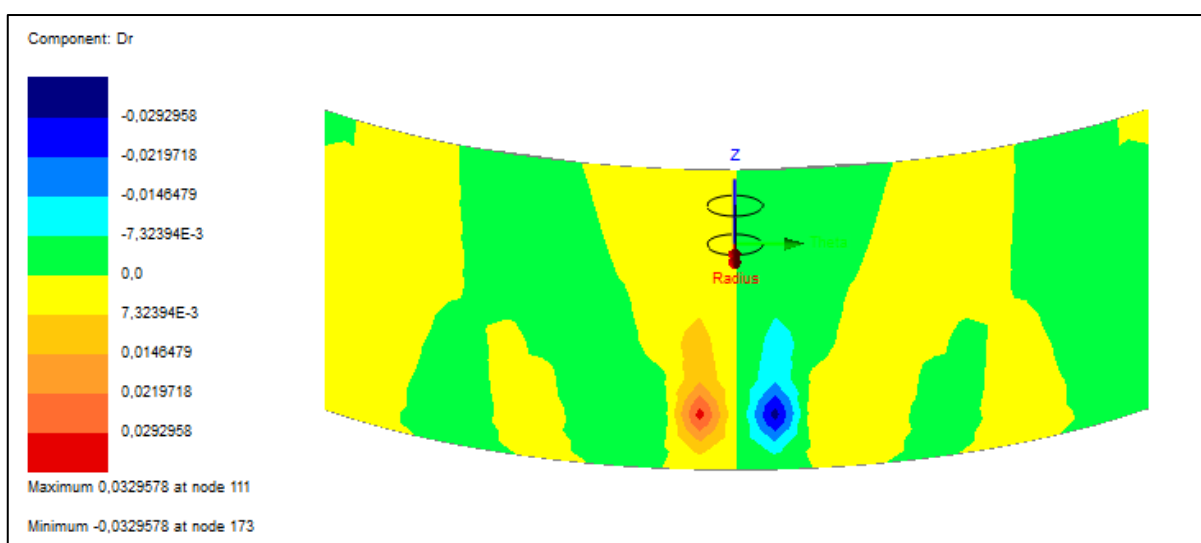


Figura 4.3.28 – Spostamento in direzione radiale

Osservando il contour (4.3.28) si può osservare come lo spostamento radiale tenda a ridursi molto rapidamente, in particolare muovendosi lateralmente l'area interessata; si ritiene corretto, quindi, bloccare tale movimento lungo i bordi laterali. Per quanto riguarda la zona superiore si può notare come la riduzione sia più graduale verso il bordo libero. Si opta per il bloccaggio di tale grado di libertà anche lungo il contorno superiore, proprio per evidenziare il comportamento differente rispetto alle condizioni di carico analizzate in precedenza; infatti in entrambe le situazioni lo spostamento radiale non diminuiva repentinamente come in questa circostanza.

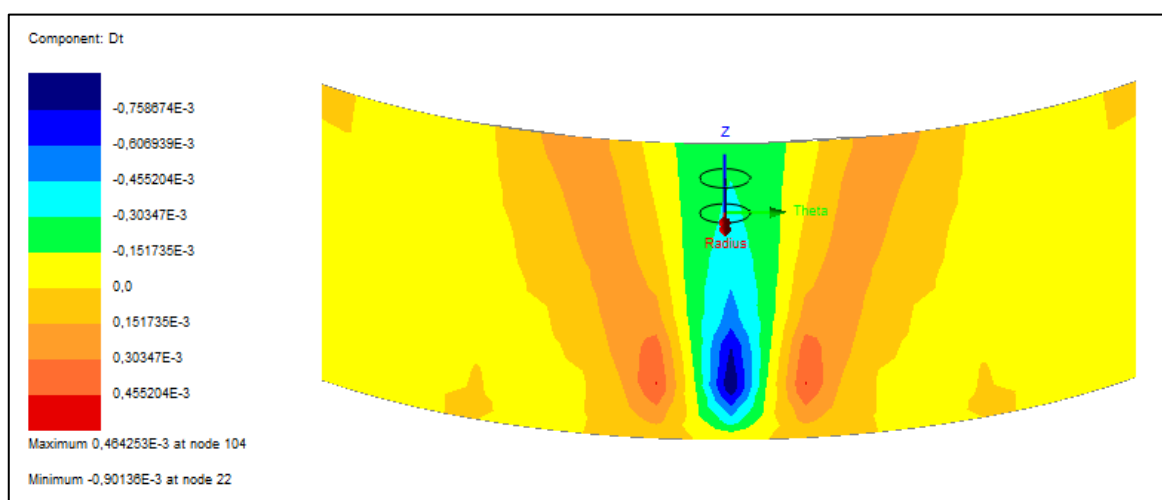


Figura 4.3.29 – Spostamento in direzione tangenziale

Si prosegue analizzando lo spostamento in direzione tangenziale rispetto la superficie (4.3.29). Si osserva come vi sia una riduzione del movimento lungo il parallelo inferiore, seguito da una successiva crescita (zone di tonalità arancione); prima di bloccare il grado di libertà in oggetto, si riporta il contour relativo a N_θ , ovvero lo sforzo membranale in direzione tangenziale, duale allo spostamento in oggetto (fig. 4.3.30).

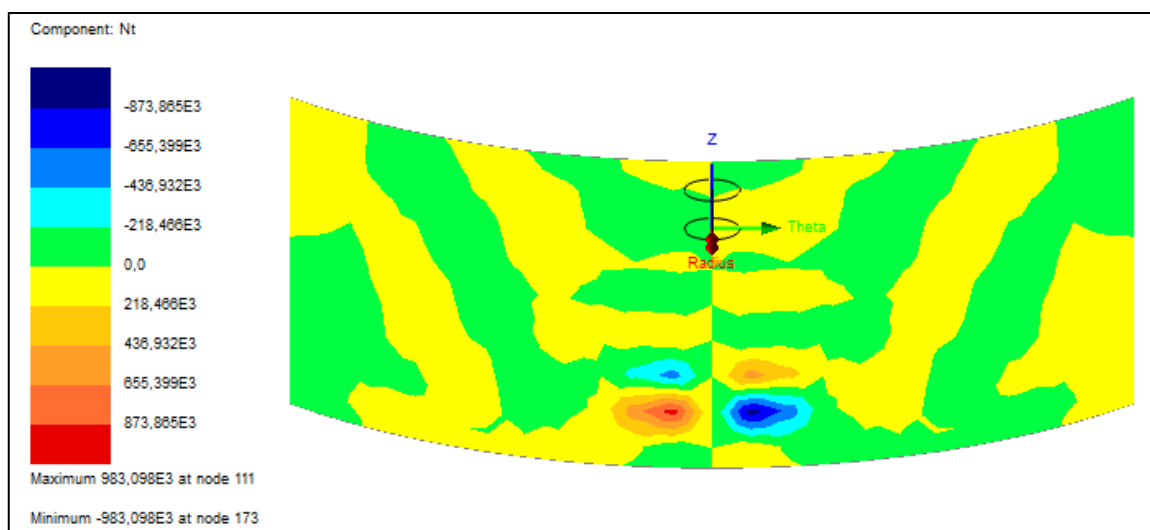


Figura 4.3.30 – Sforzo membranale lungo il parallelo

Vista la presenza di due picchi laterali rispetto l'area interessata, si opta per il bloccaggio del grado di libertà in direzione tangenziale, lungo i bordi laterali. Sul contorno superiore, diversamente, non si blocca tale movimento, visto l'andamento del contour relativo lo spostamento in oggetto.

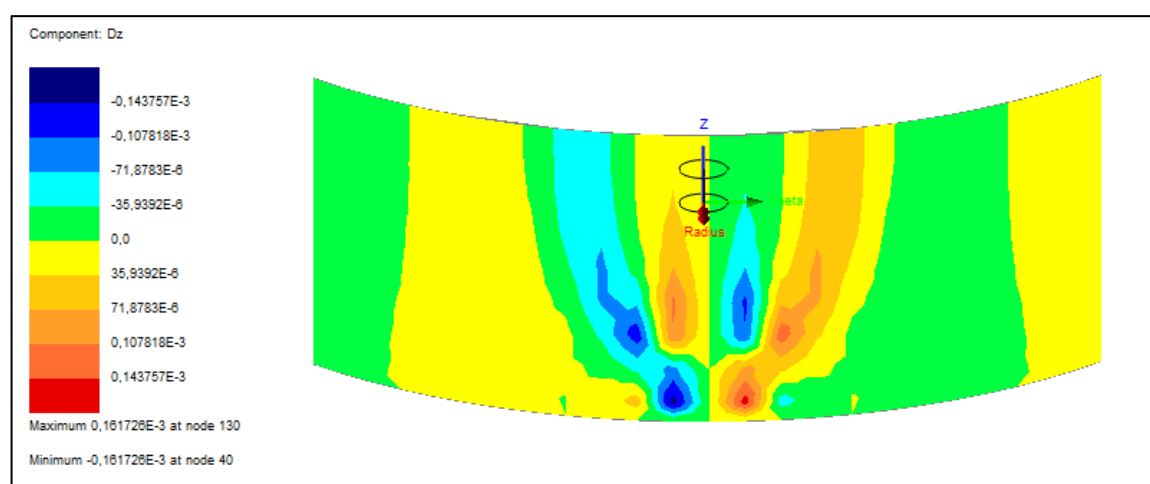


Figura 4.3.31 – Spostamento in direzione verticale

In ultimo, per quanto riguarda i gradi di libertà traslazionali, si osserva il contour relativo lo spostamento in direzione verticale (fig 4.3.31). Lateralmente l'area interessata si nota la presenza di due picchi di spostamento, perciò non si aggiungono vincoli lungo i bordi verticali. Nella porzione superiore è presente una zona in cui lo spostamento si riduce fino ad annullarsi per cambiare segno; per maggiore chiarezza si riporta successivamente il

contour relativo all'azione interna duale al movimento (in corrispondenza del bordo superiore), ovvero lo sforzo membranale N_z .

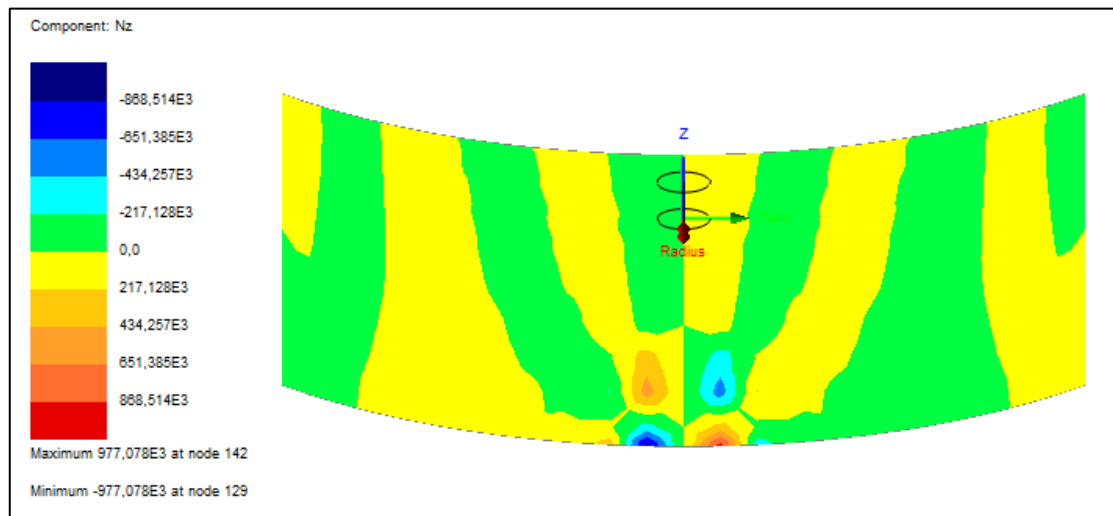


Figura 4.3.32 – Sforzo membranale in direzione verticale

Vista la presenza di due picchi di sforzo, duale al movimento considerato, si opta per il bloccaggio della traslazione verticale alla luce delle considerazioni effettuate.

Si procede con l'analisi delle rotazioni partendo da quella attorno gli assi verticali degli elementi, e si osserva come queste ultime tendano ad annullarsi rapidamente nei pressi dell'area interessata dalla tubazione. Perciò si ritiene corretto bloccare i gradi di libertà considerati lungo tutti i bordi, superiore e laterali.

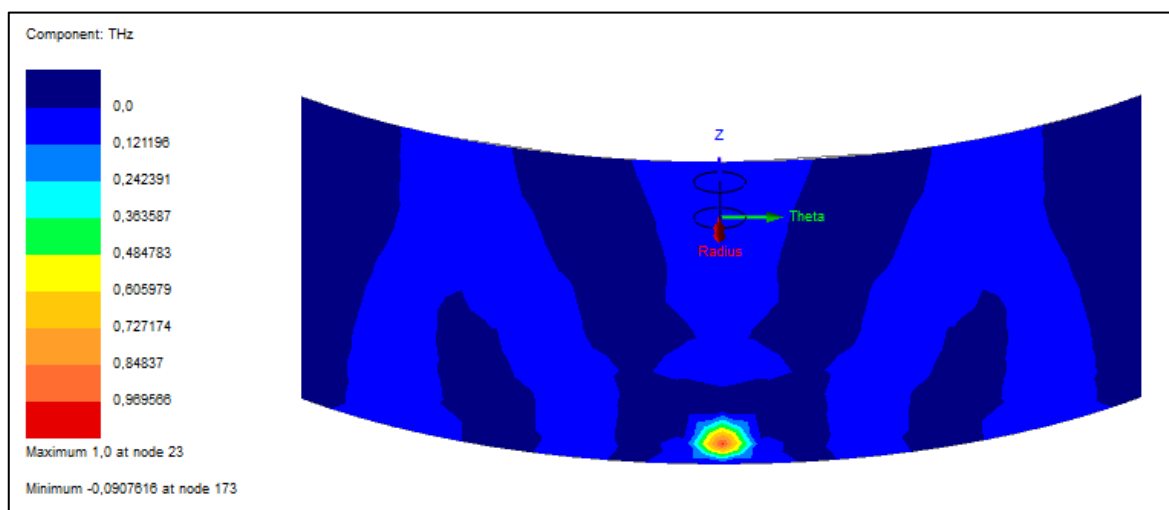


Figura 4.3.33 – Rotazione attorno assi verticali

A conferma di ciò si osservi il contour relativo a M_θ (presenza di picchi laterali l'area interessata, fig. 4.3.34).

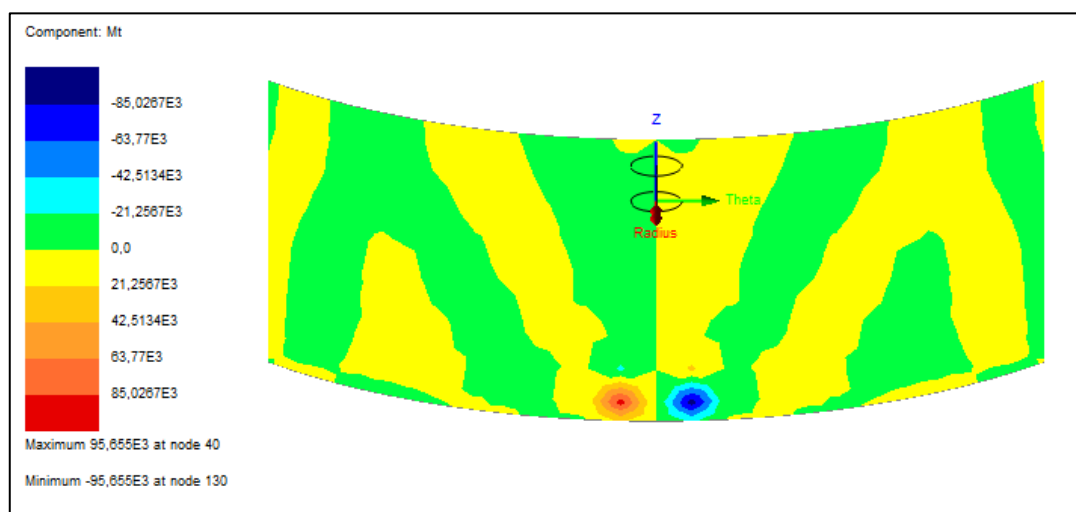


Figura 4.3.34 – Momento flettente circonferenziale

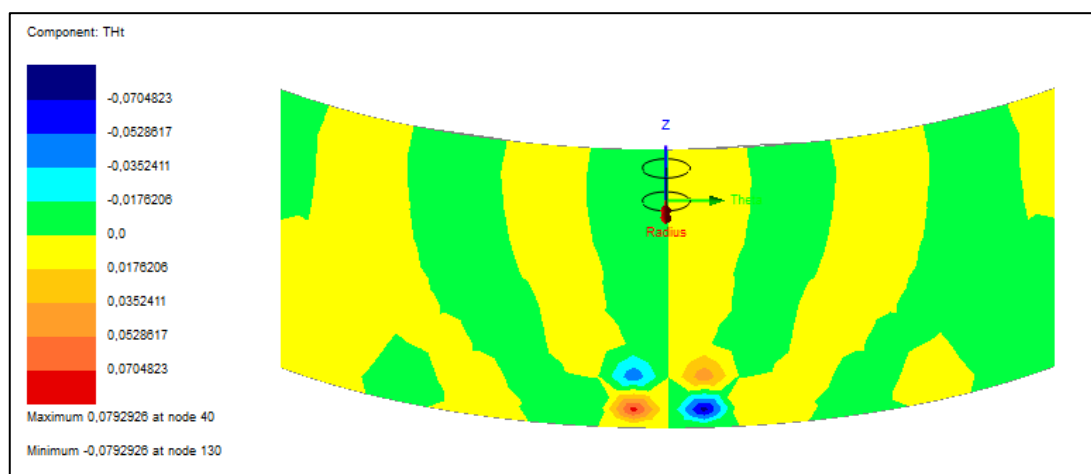


Figura 4.3.35 – Rotazione attorno ad assi circonferenziali

In ultimo si considera la rotazione attorno ad assi circonferenziali (4.3.35), tangenti la superficie. È possibile osservare la presenza di quattro picchi in prossimità dell'area di interazione tra tubazione e serbatoio. Tali picchi tendono a smorzarsi spostandosi lateralmente o superiormente; si riportano, per considerazioni più dettagliate, le azioni interne duali alla rotazione considerata ovvero M_z (4.3.36) sul bordo superiore, e $M_{z\theta}$ (4.3.37) per quanto riguarda i bordi laterali.

Osservando il contour di M_z si decide di non bloccare la rotazione sul contorno superiore; diversamente sul contorno laterale si opta per bloccare la rotazione torsionale visto il contour di $M_{z\theta}$, il quale tende ad avere valori significativi nei pressi dell'area interessata.

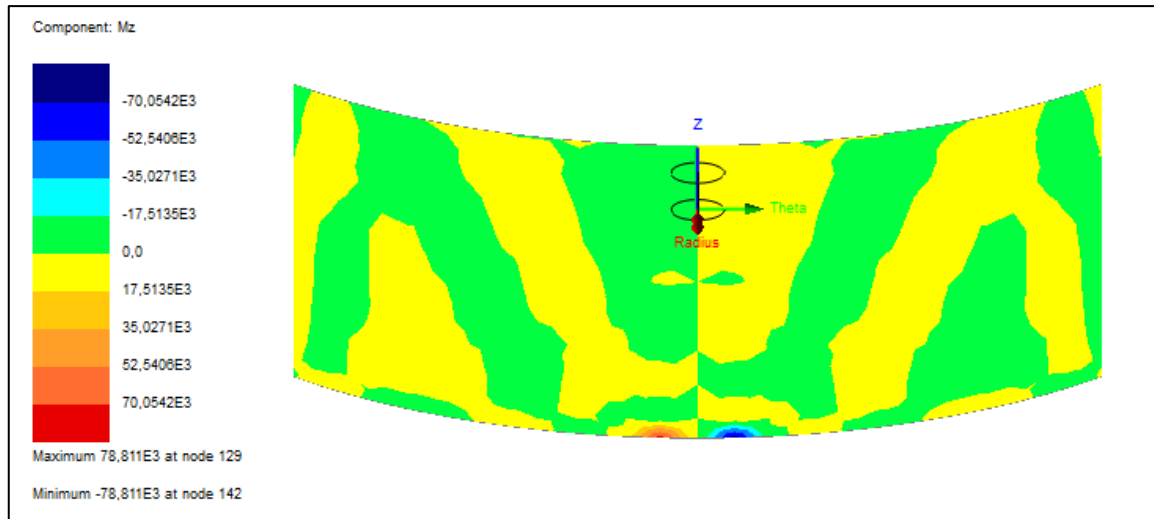


Figura 4.3.36 – Momento flettente attorno assi circolari

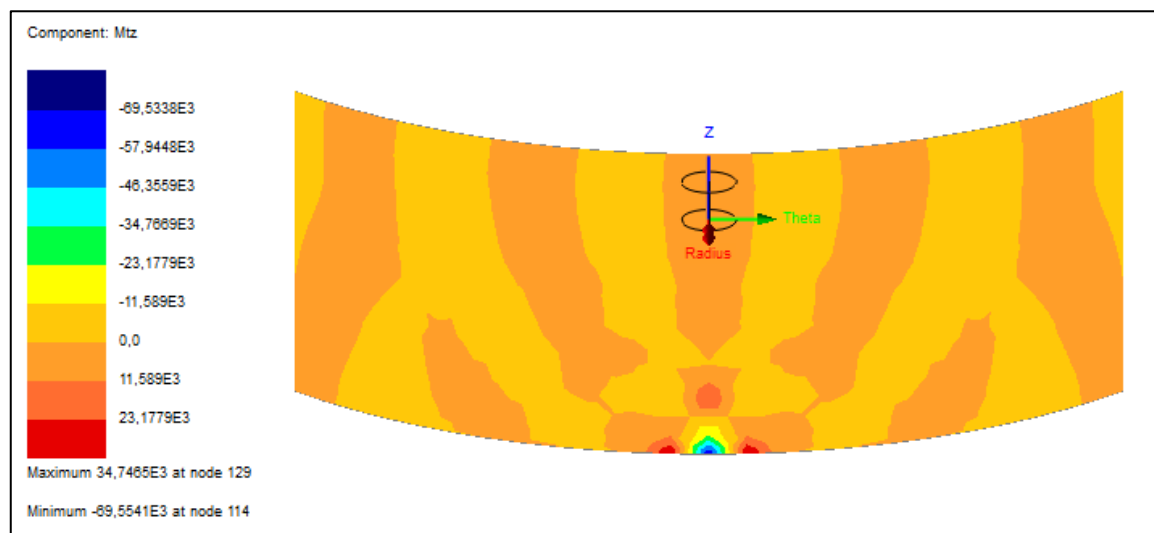


Figura 4.3.37 – Momento torcente $M_{z\theta}$

In conclusione è possibile riassumere i gradi di libertà bloccati lungo i bordi laterale e lungo il bordo superiore per una rotazione imposta in un punto appartenente all'asse verticale.

- Bordo superiore, gradi di libertà bloccati:
 1. Traslazione radiale;
 2. Traslazione verticale;
 3. Rotazione attorno asse verticale;
- Bordi laterali, gradi di libertà bloccati:
 1. Traslazione radiale;
 2. Traslazione circonferenziale;
 3. Rotazione attorno asse verticale;
 4. Rotazione attorno asse circonferenziale.

Infine in figura si riporta il nodo con i gradi di libertà bloccati, in accordo con quanto riportato sopra, e in ultimo la deformata corrispondente.

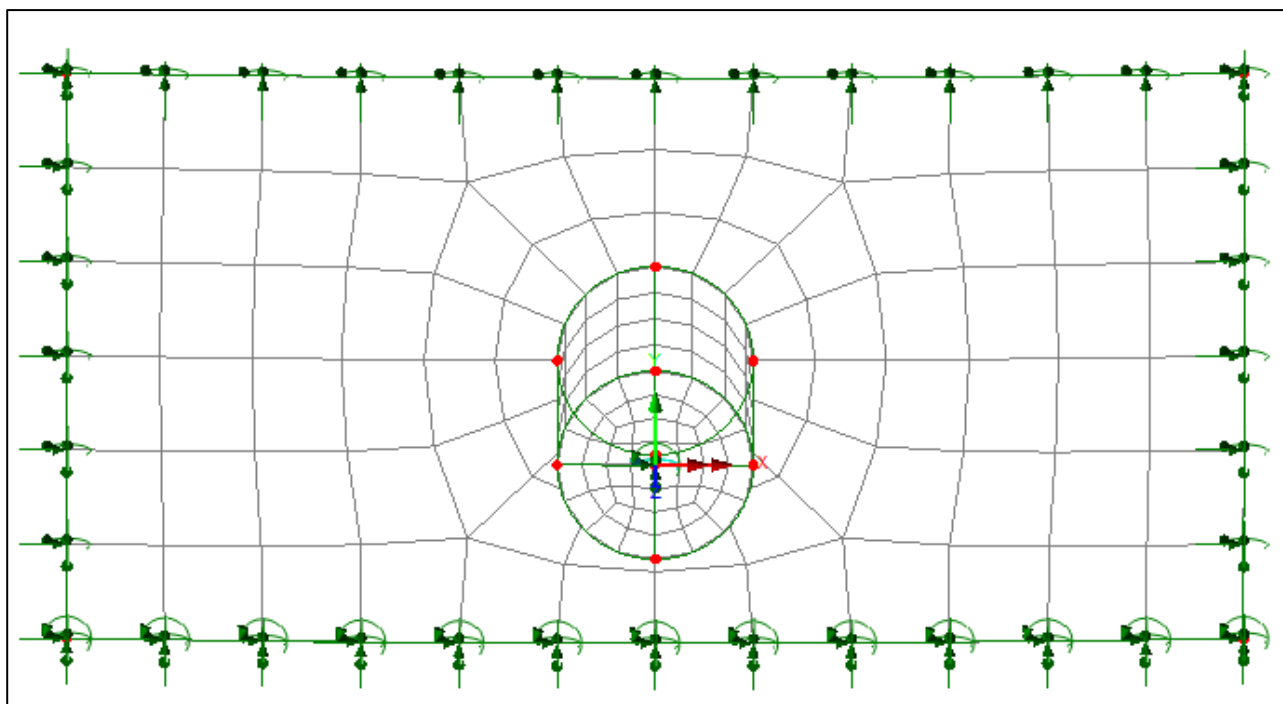


Figura 4.3.38 – Modello di calcolo con vincoli

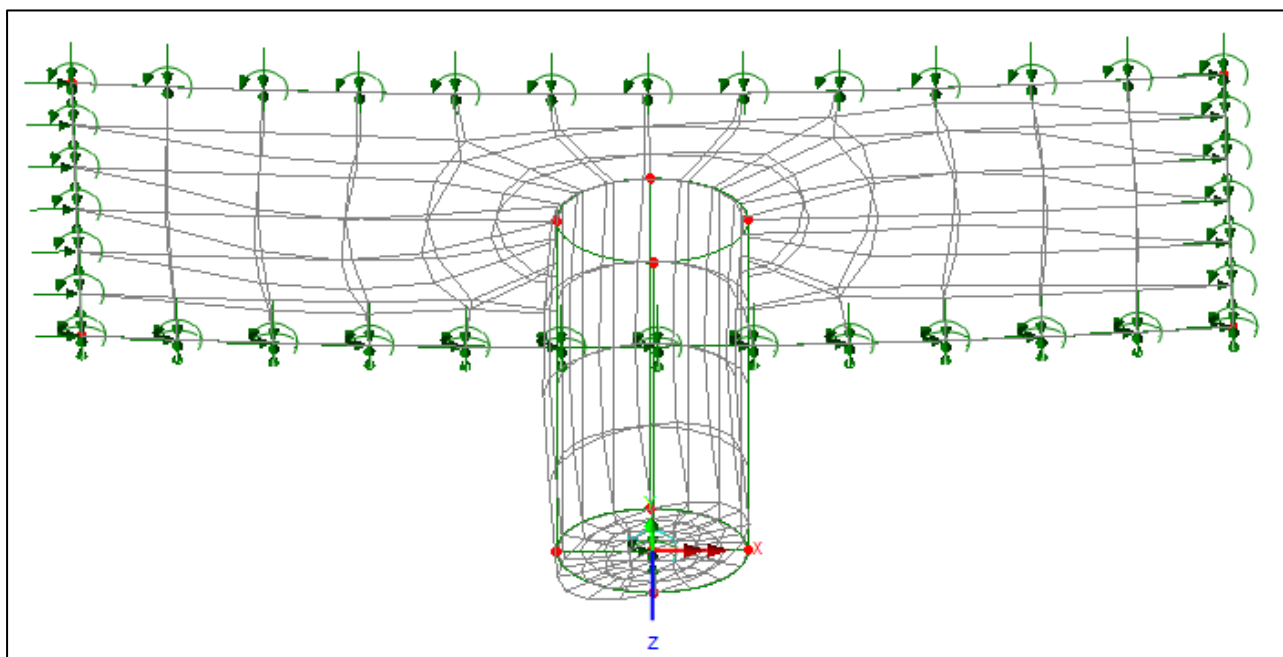


Figura 4.3.39 - Deformata

4.4 Influenza numerica dei vincoli sul modello di calcolo

In conclusione del capitolo si riportano i risultati ottenuti dalla modellazione del nodo, soggetto a tre differenti condizioni di carico, ciascuna caratterizzata da condizioni di vincolo distinte, determinate nel paragrafo precedente. Nella tabella successiva si riportano i valori di spostamenti e rotazioni necessari per determinare la rigidezza del nodo. Come detto in precedenza è possibile applicare spostamenti unitari oppure forze esploratrici unitarie al fine di ottenere rispettivamente cedevolezza e rigidezze (uno il reciproco dell'altro); dalle rigidezze è possibile passare alle cedevolezza e viceversa, si ottengono, ovviamente, gli stessi risultati a meno di piccoli errori numerici del tutto trascurabili.

Per quanto riguarda la geometria del problema si è fatto riferimento ad una situazione specifica, come riportato in precedenza, con raggio di curvatura del serbatoio pari a 20 m e spessore della parete uguale a 15 mm; mentre per la tubazione un diametro di 406,6 mm per 10 mm di spessore.

Successivamente si riportano i valori degli spostamenti/rotazioni derivanti dalle tre condizioni di carico, distinguendo per ciascuna situazione, tre condizioni di vincolo differenti al fine di comprendere meglio l'influenza numerica di quest'ultimi sul modello:

- Condizione di vincolo 1: modello vincolato solo sul bordo inferiore, mediante incastri (vincolo dovuto alla saldatura con le lastre del fondo);
- Condizione di vincolo 2: modello vincolato su tutti i bordi mediante incastri;
- Condizione di vincolo 3: modello vincolato mediante i vincoli studiati per ciascuna condizione di carico.

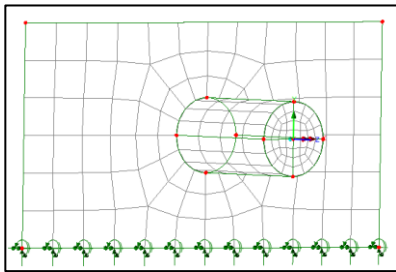


Figura 4.4.1 – CV 1

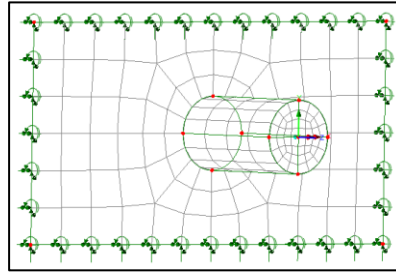


Figura 4.4.2 – CV 2

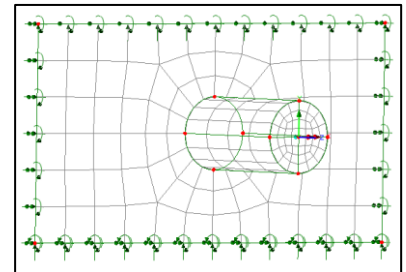


Figura 4.4.3 – CV 3

Si osservi come le prime due condizioni di vincolo rappresentino dei casi limite, all'interno dei quali è situata la condizione di vincolo più corretta, derivata dallo studio effettuato nel paragrafo precedente.

Si riportano successivamente i risultati relativi alle condizioni di carico, considerando le differenti tipologie di vincolo applicate, come descritto precedentemente. In tabella gli spostamenti si sono valutati utilizzando elementi guscio sottili, trascuranti la deformabilità a taglio.

	Spostamento radiale [m] (A)	$\Delta\%$	Spostamento tangenziale [m] (B)	$\Delta\%$	Rotazione attorno asse verticale [-] (C)	$\Delta\%$
Condizione di vincolo 1	5,31E-07	**	2,38E-06	**	4,15E-06	**
Condizione di vincolo 2	1,76E-07	202,2%	1,48E-06	60,5%	2,58E-06	60,2%
Condizione di vincolo 3	2,27E-07	133,9%	1,77E-06	34,5%	2,94E-06	41,3%

Tabella 4.4.1 – Spostamenti e rotazioni ottenute dal modello di calcolo

La seconda colonna contiene i valori degli spostamenti dovuti ad una forza applicata ortogonalmente al nodo; analogamente la quarta colonna riporta i valori degli spostamenti causati da una forza unitaria applicata in direzione tangenziale. La sesta colonna contiene i valori delle rotazioni causate da una coppia attorno all'asse verticale; ciascuna condizione di carico è subordinata ad una condizione di vincolo.

Le colonne contenenti le percentuali indicano le variazioni percentuali (aumenti) degli spostamenti, o rotazioni, delle condizioni 2 e 3 (rispettivamente bordi incastrato e bordi correttamente vincolati) rispetto alla condizione 1 (solo bordo inferiore incastrato).

Osservando le percentuali è possibile notare come i vincoli influenzino i risultati in ciascuno dei tre casi di carico. Confrontando la prima condizione di vincolo con la seconda (le due situazioni limite) è possibile notare come i risultati derivanti dal primo loadcase (forza applicata in direzione radiale al modello) risultino particolarmente influenzati dai vincoli applicati (incremento tra i due casi del 202,2%), rispetto alle altre due situazioni, le quali mostrano un'influenza pressoché uguale (incremento prossimo al 60%).

Quest'ultimo aspetto è dovuto principalmente alla natura dello spostamento che viene applicato nel primo loadcase. Nelle condizioni di carico B e C entra in gioco prevalentemente la rigidità nel piano della parete costituente il serbatoio, diversamente da quanto accade nel primo caso (A) nel quale il guscio viene sollecitato ortogonalmente a se stesso, chiamando in causa principalmente la rigidità fuori dal piano. In quest'ultima situazione la lastra lavora in condizioni ottimali, e la sua risposta, in termini di spostamento, dipende principalmente dalla disposizione dei vincoli sui bordi, da qui una spiegazione di quanto discusso precedentemente.

Un ulteriore confronto può essere effettuato tra le condizioni di carico A e B, infatti in entrambi i casi si hanno delle traslazioni come output del modello di calcolo. Si può osservare come vi sia all'incirca un ordine di grandezza di differenza tra i risultati (considerando la condizione di vincolo corretta ovvero la 3); da questa considerazione traspare una maggiore rigidità del nodo per sollecitazioni applicate in direzione assiale.

In generale ogni condizione di carico porta una serie di problematiche alla parete del serbatoio, ad esempio nei casi B e C potrebbe nascere un'instabilità del mantello a causa dello sforzo compressivo che si origina. In questa fase ci si limita comunque alle considerazioni sopra riportate.

In ultimo si riporta una tabella contenente spostamenti e rotazioni ottenuti con elementi thin shell, trascuranti la deformabilità a taglio, e medesime grandezze ottenute utilizzando elementi thick shell, consideranti il contributo del taglio. Per entrambe le situazioni si farà riferimento alla condizione di vincolo ottenuta dall'analisi riportata nel precedente paragrafo.

	Spostamento radiale [m] (A)	$\Delta\%$	Spostamento tangenziale [m] (B)	$\Delta\%$	Rotazione attorno asse verticale [-] (C)	$\Delta\%$
Thin shell	2,27E-07	**	1,77E-06	**	2,94E-06	**
Thick shell	1,57E-07	44,31%	1,39E-06	27,17%	2,69E-06	9,19%

Tabella 4.4.2 – Spostamenti e rotazioni ottenute dal modello di calcolo

Dalla tabella 3.4.2 si può osservare come l'influenza del taglio si percepisca in tutte e tre le condizioni di carico, anche se con incidenze diverse come si può osservare dalle percentuali di aumento riportate per ciascun caso. In particolare l'influenza del taglio sulla risposta del modello è particolarmente marcata nel primo caso ovvero l'applicazione di una forza unitaria in direzione radiale. Negli altri due casi gli aumenti percentuali tendono a ridursi, passando dal 44,31% del primo loadcase per arrivare al 27,17% e al 9,19%.

Gli elementi utilizzati non presentano problemi di bloccaggio per taglio in quanto vengono utilizzate tecniche di integrazione ridotta della matrice di rigidezza contenente il contributo tagliante, al fine di scongiurare la presenza di rigidezze fittizie a livello numerico. Ovviamente il contributo relativo alla deformabilità tagliante va preso in considerazione nel caso di gusci moderatamente spessi; successivamente si riportano i limiti geometrici per considerare un guscio sottile o meno (da una ricerca in letteratura):

- Guscio "sottile":

$$\max\left(\frac{h}{R_{min}}, \frac{h}{L_{min}}\right) < \frac{1}{20}$$

Con "h" spessore del guscio, "R_{min}" raggio di curvatura minimo, "L_{min}" lunghezza minima.

- Guscio "moderatamente spesso" (stesso significato dei simboli):

$$\max\left(\frac{h}{R_{min}}, \frac{h}{L_{min}}\right) < \frac{1}{10}$$

I gusci per i quali non è verificata nessuna delle condizioni precedenti vengono denominati "spessi". Applicando le definizioni sopra riportate alla porzione di serbatoio considerata ricadiamo abbondantemente nella definizione di guscio sottile (raggio di curvatura = 20 m, dimensione minima pari a 1,2 m a fronte di uno spessore di 15 mm). Nel caso del tubo ci troviamo a metà tra le due definizioni ($\frac{h}{R_{min}} = \frac{10}{200} = \frac{1}{20}$); da qui l'importanza di considerare l'influenza del taglio per una trattazione più completa del problema in esame.

4.5 Conclusioni

Nel capitolo si è introdotta la modellazione del collegamento tra serbatoio e tubazione di mandata. Come si è visto in precedenza, dall'analisi sui danni riportati a causa dell'azione sismica, tale nodo risulta spesso critico in quanto mette in comunicazione due elementi, serbatoi e tubazioni, aventi caratteristiche meccaniche e dinamiche totalmente differenti.

Vista l'elevata criticità del collegamento si è ritenuto opportuno effettuare una modellazione di questo tipo, con particolare attenzione a tutti gli aspetti che ne influenzassero i risultati: condizioni di vincolo sui bordi della lastra, tipo di elemento utilizzato per realizzare la mesh, spessori degli elementi. Infatti le rigidezze ottenute verranno utilizzate nei prossimi capitoli per schematizzare il nodo considerato, attraverso un incastro "cedevole", con molle traslazionali e rotazionali, allo scopo di simulare al meglio l'interazione tra la tubazione ed il serbatoio.

5. MODELLAZIONE DELLE TUBAZIONI E DEI SOSTEGNI ALL'INTERNO DELLE VASCHE DI CONTENIMENTO

5.1 Introduzione e ipotesi di calcolo

Il passo successivo della trattazione riguarda l'analisi sismica delle tubazioni. In particolare nel presente capitolo si determineranno i modi di vibrare delle tubazioni e rispettive frequenze e periodi associati. Si analizzeranno differenti configurazioni geometriche partendo dal caso più elementare rappresentato da tubazioni rettilinee per arrivare a configurazioni ad "L", entrambe molto comuni all'interno delle vasche di contenimento dei serbatoi. Per ciascuna tipologia analizzata si considereranno differenti lunghezze al fine di comprendere l'influenza di tale parametro sulla risposta sismica della tubazione. Di seguito si riportano le ipotesi di calcolo effettuate:

- Metodo di calcolo: analisi lineare dinamica, consistente in:
 1. Determinazione dei modi di vibrare della tubazione (analisi modale);
 2. Calcolo degli effetti dell'azione sismica, rappresentata dallo spettro di risposta di progetto, per ciascuno dei modi di vibrare individuati;
 3. Combinazione degli effetti.
- Materiale con legge elastica e lineare, Acciaio strutturale (S235) avente modulo elastico pari a 210 GPa e densità pari a 7850 kg/m³;
- Diametro della tubazione pari a 406,6 mm con spessore di 10 mm;
- Differenti configurazioni geometriche considerate;
- Vincolo serbatoio tubazione modellato in accordo con quanto riportato nel cap. 4;
- Supporti tubazione modellati come vincoli rigidi, i quali non offrono resistenze di attrito a scorrimento;

- La tubazione è incastrata nel paramento in calcestruzzo armato della vasca di contenimento (o nel rilevato nel caso di vasche in terreno costipato e modellato);
- Tubazioni modellate con elementi “Beam” nello spazio, includenti la deformabilità tagliante;
- Confronto tra le condizioni di tubo “pieno” e tubo “vuoto”.

5.2 Caratteristiche meccaniche e geometriche dei modelli di calcolo

Nel presente paragrafo si riportano le caratteristiche meccaniche e geometriche comuni ai diversi modelli di calcolo presentati successivamente.

Vincoli tubazione

I modelli di calcolo realizzati sono tridimensionali, perciò ciascun punto nello spazio possiede sei gradi di libertà ovvero tre rotazioni e tre traslazioni. È necessario quindi definire i vincoli da applicare alla tubazione e stabilire i corrispondenti gradi di libertà bloccati da ciascuno di essi. Per quanto riguarda il collegamento in corrispondenza del serbatoio si fa riferimento a quanto riportato nel capitolo precedente; il mantello ha uno spessore pari a 25 mm (per tener conto di elementi irrigidenti aggiuntivi) ed un raggio di curvatura di 20 m, mentre la tubazione ha diametro pari a 406 mm ovvero DN 16” e spessore uguale a 10 mm. Nella tabella successiva si riportano i valori delle reazioni ottenute applicando spostamenti unitari, al fine di ottenere la rigidezza delle molle simulanti il collegamento tra parete e tubazione (a tale scopo si sono utilizzati elementi guscio spessi).

	Spostamento radiale	Spostamento tangenziale	Rotazione attorno asse verticale
Valore reazione	5,16E+07 N	6,77E+06 N	3,30E+06 Nm

Tabella 5.2.1 – Valori reazioni dovute a spostamenti unitari

Partendo dai valori delle reazioni è possibile ottenere le rigidezze delle molle corrispondenti:

1. Rigidezza della molla traslazionale in direzione radiale (ortogonale alla superficie del mantello):

$$K_{\perp} = \frac{F_{\perp}}{1\text{ m}} = \frac{5,16E + 07\text{ N}}{1\text{ m}} = 5,16E + 07\text{ N/m}$$

2. Rigidezza della molla traslazionale in direzione tangenziale:

$$K_{\parallel} = \frac{F_{\parallel}}{1\text{ m}} = \frac{6,77E + 06\text{ N}}{1\text{ m}} = 6,77E + 06\text{ N/m}$$

3. Rigidezza della molla rotazionale attorno l'asse verticale:

$$K_{rot} = \frac{M}{1\text{ rad}} = \frac{3,30E + 06\text{ Nm}}{1\text{ rad}} = 3,30E + 06\text{ Nm/rad}$$

In figura è riportata la schematizzazione del vincolo tra serbatoio e tubazione mediante molle aventi rigidezza sopra riportata. Si osservi come restino da vincolare ancora tre gradi di libertà in corrispondenza di tale nodo, ovvero una traslazione e due rotazioni. Tali spostamenti vengono bloccati rigidamente in quanto il verificarsi di uno di essi comporterebbe lo strappo

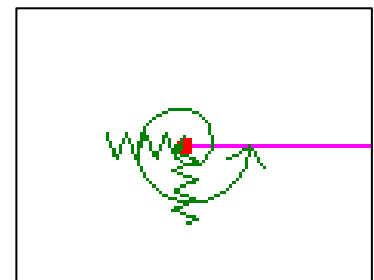


Figura 5.2.1 – Incastro cedevole

del primo corso di virole dal fondo del serbatoio (tali gradi di libertà hanno una rigidezza associata molto maggiore).

Per quanto riguarda il vincolo tra tubazione e muro della vasca di contenimento si opta per un incastro spaziale; trattandosi di un muro in c.a. nel quale la tubazione entra (particolarmente rigido grazie al suo spessore). Gli ultimi vincoli da schematizzare sono i supporti verticali sui quali la tubazione scarica il suo peso. La distanza massima tra di essi dipende essenzialmente dal diametro della condotta, nel caso in oggetto risulta essere pari a 7 m.

Esistono differenti tipologie di supporti, fissi o mobili, i quali possono bloccare diversi gradi di libertà a seconda delle necessità. Nell'immagine sottostante si riportano diverse tipologie di supporti esistenti in commercio.

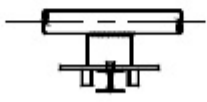
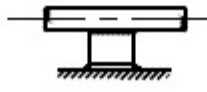
SUPPORT CLASSIFICATION (FUNCTIONS)	BASIC CONSTRUCTION	* SYMBOL	RESTRAINTS
LOOSE SUPPORT			$(+) Y$
LONGITUDINAL GUIDE			$(\pm) Y \text{ \& } (\pm) X$
TRANSVERSE GUIDE			$(+) Y \text{ \& } (\pm) X$
FIXED POINT (NON-WELDED TYPE)			$(\pm) X, (\pm) Y \text{ \& } (\pm) Z$
FIXED POINT (ANCHOR) (WELDED TYPE)			ALL DISPLACEMENT ALL ROTATIONS

Figura 5.2.2 – Tipologie di supporti disponibili in commercio

Nel caso in esame si farà riferimento alla tipologia di vincolo più semplice ed economica, che fornisce massima flessibilità alla tubazione, della quale si possono osservare i dettagli nelle immagini sottostanti.



Figura 5.2.3 – Supporti all'interno delle vasche di contenimento

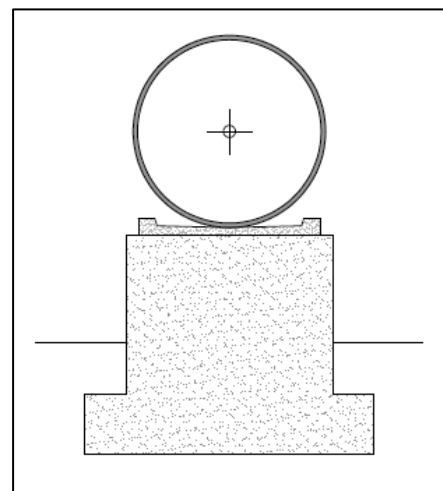


Figura 5.2.4 – Supporto verticale

Si tratta quindi di supporti costituiti da un plinto in cemento armato, sporgente di circa 30/40 cm dal terreno; la tubazione poggia su un tondino d'acciaio opportunamente sagomato, il quale non offre resistenze ad attrito a scorrimento né longitudinalmente, né trasversalmente l'asse del tubo (la tubazione risulta piuttosto flessibile in quanto i vincoli permettono i movimenti citati). Per evitare il ribaltamento il piatto in acciaio presenta dei fine corsa laterali. Per quanto riguarda il modello di calcolo, gli appoggi vengono modellati come vincoli rigidi bilateri in direzione verticale, seppur la tipologia di sostegni considerata in fig. 5.2.4 non si opponga ad un sollevamento del tubo. Quest'ultima scelta permette di mantenere un comportamento lineare di tutto il modello di calcolo, ed inoltre non inficia la bontà dei risultati ottenuti in quanto, come si vedrà in seguito, i modi di vibrare delle tubazioni sono prevalentemente contenuti nel piano orizzontale.

Successivamente si riportano, a titolo esemplificativo, ulteriori tipologie di vincoli comunemente utilizzati.



Figura 5.2.5 – Supporti verticali, caso 1



Figura 5.2.6 – Supporti verticali, caso 2

Materiale e caratteristiche sezione trasversali

Per quanto riguarda il materiale si ipotizza Acciaio strutturale S235 avente densità pari a 7850 kg/m^3 , corrispondente ad una massa di $96,18 \text{ kg}$ per metro lineare di tubazione, ottenuta come di seguito:

$$m_{TUBO/m} = \rho \cdot V = 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0122 \text{m}^3 = 96,18 \text{ kg/m}$$

Dove “V” è il volume della tubazione al metro lineare; 7850 kg/m³ è la densità dell'acciaio (da considerare in caso di tubo vuoto).

Successivamente è necessario calcolare la densità a tubo pieno, essendo anche quest'ultima necessaria per la risoluzione del problema agli autovalori, che consiste nel calcolo delle frequenze proprie delle tubazioni e delle rispettive forme modali associate. Ipotizzando un contenuto di acqua è possibile valutare la massa totale del tubo per metro lineare:

$$m_{tot} = m_{acciaio} + m_{liquido} = 96,18 \frac{kg}{m} + 113,41 \frac{kg}{m} = 209,59 \frac{kg}{m}$$

Dove la massa del liquido è stata calcolata moltiplicando semplicemente la densità dell'acqua per il volume interno della tubazione.

In ultimo, dividendo la massa totale per il volume della tubazione (al metro lineare) si ottiene la densità a tubo pieno (la massa complessiva è stata ripartita sulla sezione della tubazione, ovvero la parte resistente dal punto di vista elastico):

$$\rho_{tubo\ pieno} = \frac{m_{tot}}{V_{tubo}} = \frac{209,59 \text{ kg}}{0,0122 \text{ m}^3} = 17106,41 \frac{kg}{m^3}$$

Calcolati i due valori di densità a tubo pieno e tubo vuoto è possibile calcolare le frequenze proprie di vibrazione (punto 5.3).

Si riportano di seguito le caratteristiche geometriche della condotta.

Usage

3D Thick Beam

Definition

☒ From Library

Rotation about centroid 0°

☐ Enter Properties

EU Sections

Pipes (EN10210)

406.4x10 CHS

Cross sectional area (A)
Second moment of area about y axis (Iyy)
Second moment of area about z axis (Izz)
Product moment of area (Iyz)
Torsion constant (Jxx)
Effective shear area in y direction (Asy)
Effective shear area in z direction (Asz)
Offset in y direction (Ry)
Offset in z direction (Rz)

Value
0,0125
0,2448E-3
0,2448E-3
0,0
0,4895E-3
6,22664E-3
6,22664E-3
0,0
0,0

Figura 5.2.7 – Caratteristiche geometriche sezione

In conclusione si riportano le caratteristiche dell'elemento finito utilizzato ovvero elementi "beam" tridimensionali con inclusa deformabilità a taglio. Tali elementi sono caratterizzati da 6 azioni interne compressive ovvero sforzo normale, taglio lungo i due assi principali, momento torcente e momenti flettenti attorno i due assi principali.

5.3 Calcolo degli autovalori e delle corrispondenti forme modali

Il seguente paragrafo è dedicato alla risoluzione del problema agli autovalori e al calcolo delle corrispettive forme modali, considerando inizialmente la tubazione vuota e successivamente includendo il peso del liquido contenuto. Si analizzano differenti condotte, partendo dalle tubazioni rettilinee per arrivare alle tubazioni ad “L”, aventi un lato fisso e l’atro variabile.

5.3.1 Tubazioni rettilinee

Per quanto riguarda le tubazioni rettilinee si analizzano 7 differenti configurazioni facendo variare di volta in volta la lunghezza della condotta:

1. $L = 5 \text{ m}$;
2. $L = 10 \text{ m}$;
3. $L = 15 \text{ m}$;
4. $L = 20 \text{ m}$;
5. $L = 30 \text{ m}$;
6. $L = 40 \text{ m}$;
7. $L = 50 \text{ m}$.

Si riporta a titolo esemplificativo lo schema strutturale delle connessioni per la tubazione lunga 10 m. La “x” posta a metà condotta indica la presenza di un appoggio verticale.

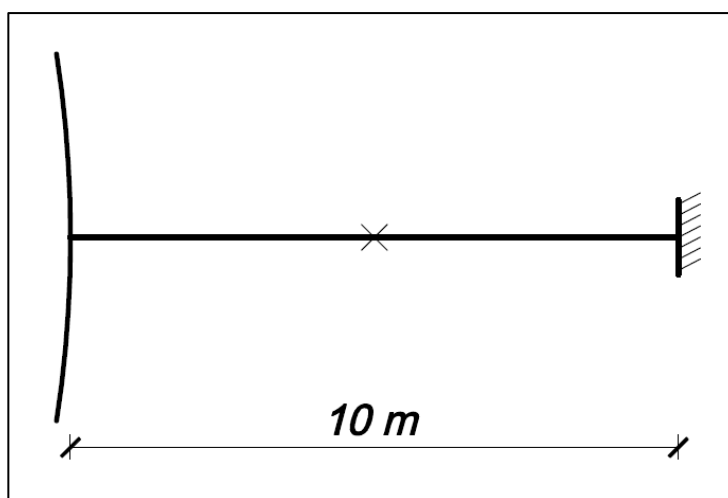


Figura 5.3.5-1 - Schema strutturale della tubazione

Successivamente si riportano i modelli di calcolo realizzati per lunghezze pari rispettivamente a 5 m, 15 m e 40 m.

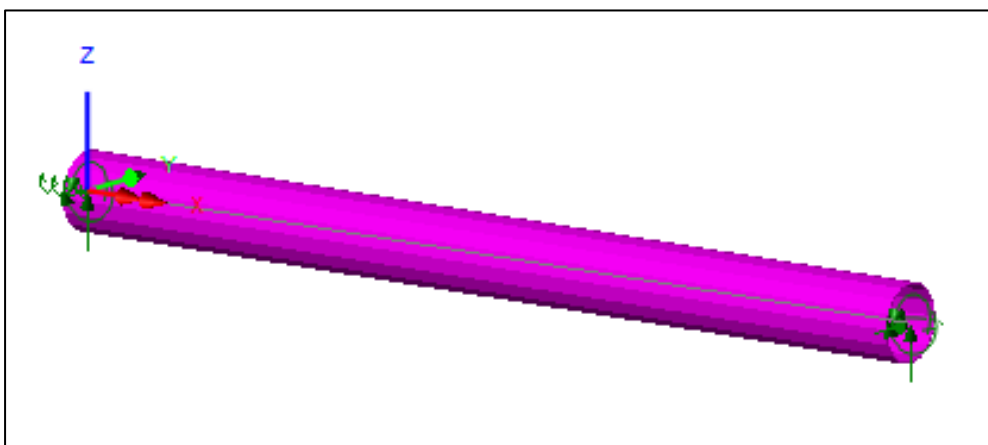


Figura 5.3.2 – Tubazione $L = 5\text{ m}$

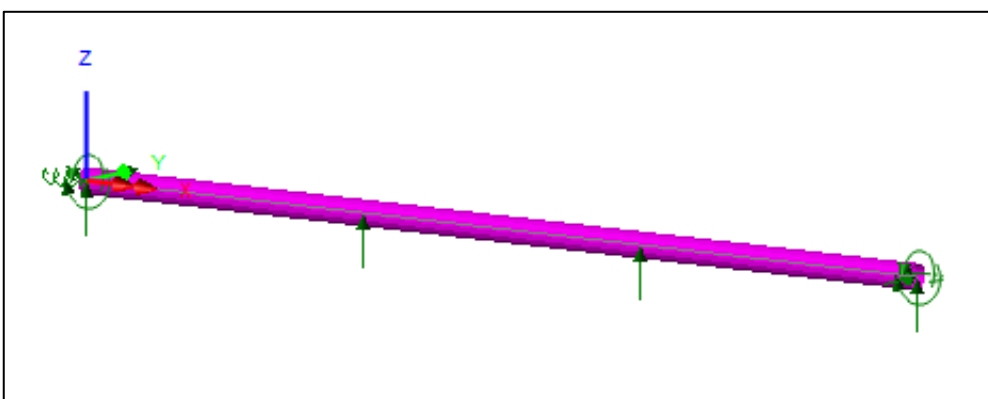


Figura 5.3.3 – Tubazione $L = 15\text{ m}$

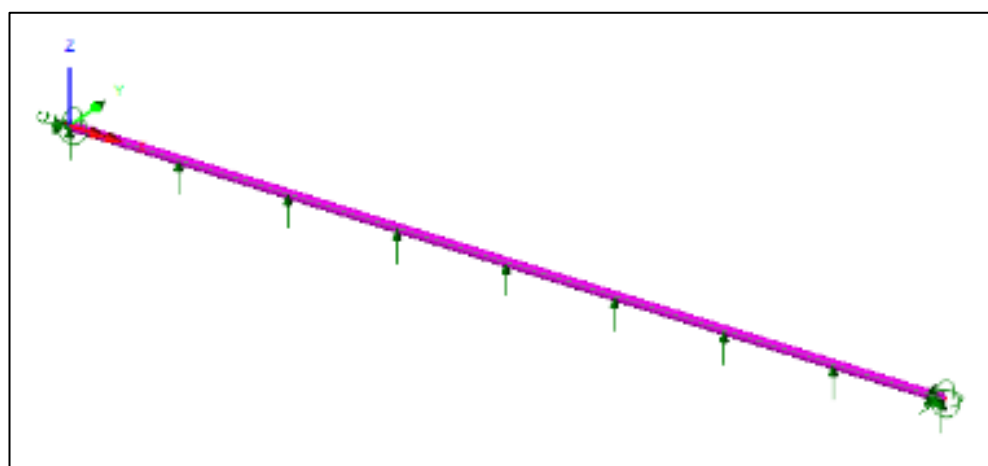


Figura 5.3.4 – Tubazione $L = 40\text{ m}$

Nella tabelle successive si riportano i periodi di vibrazione e le frequenze proprie delle tubazioni, calcolati mediante risoluzione del problema agli autovalori. In particolare sono stati riportati i valori relativi ai primi 12 modi di vibrare delle condotte (analogamente a quanto si verifica negli edifici, sono i primi modi ad essere maggiormente eccitati dall'azione sismica). Per ciascuna tubazione analizzata si riportano periodi e frequenze ottenuti in caso di tubazione piena e in caso di tubazione vuota, allo scopo di valutare la differente incidenza di tale parametro sui risultati ottenuti.

	L = 5 m		L = 10 m		L = 15 m		L = 20 m		L = 30 m		L = 40 m		L = 50 m	
	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO
	PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]	
MODO 1	0,039	0,027	0,092	0,063	0,186	0,126	0,317	0,215	0,684	0,463	1,185	0,802	1,814	1,229
MODO 2	0,016	0,011	0,038	0,026	0,066	0,045	0,108	0,073	0,228	0,155	0,398	0,269	0,614	0,416
MODO 3	0,014	0,010	0,022	0,015	0,037	0,025	0,057	0,038	0,114	0,077	0,197	0,133	0,303	0,205
MODO 4	0,006	0,004	0,020	0,013	0,026	0,018	0,036	0,025	0,070	0,047	0,118	0,080	0,180	0,122
MODO 5	0,006	0,004	0,016	0,011	0,023	0,015	0,029	0,020	0,048	0,032	0,079	0,054	0,120	0,081
MODO 6	0,005	0,004	0,011	0,008	0,019	0,013	0,025	0,017	0,035	0,024	0,057	0,039	0,086	0,058
MODO 7	0,005	0,003	0,011	0,007	0,016	0,011	0,022	0,015	0,031	0,021	0,044	0,030	0,065	0,044
MODO 8	0,004	0,002	0,009	0,006	0,015	0,010	0,020	0,014	0,029	0,019	0,037	0,025	0,051	0,035
MODO 9	0,003	0,002	0,007	0,005	0,015	0,010	0,018	0,012	0,028	0,019	0,037	0,025	0,046	0,031
MODO 10	0,003	0,002	0,007	0,005	0,014	0,009	0,017	0,012	0,027	0,018	0,035	0,024	0,044	0,030
MODO 11	0,002	0,002	0,006	0,004	0,010	0,007	0,017	0,012	0,026	0,018	0,032	0,022	0,042	0,028
MODO 12	0,002	0,002	0,005	0,003	0,008	0,005	0,016	0,011	0,022	0,015	0,029	0,020	0,035	0,023

Tabella 5.3.1 – Periodi di vibrazione delle condotte rettilinee

	L = 5 m		L = 10 m		L = 15 m		L = 20 m		L = 30 m		L = 40 m		L = 50 m	
	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO
	FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]	
MODO 1	25,43	37,55	10,82	15,98	5,39	7,95	3,16	4,66	1,46	2,16	0,84	1,25	0,55	0,81
MODO 2	63,38	93,57	26,05	38,45	15,04	22,21	9,30	13,73	4,38	6,46	2,51	3,71	1,63	2,41
MODO 3	70,27	103,74	45,45	67,09	27,04	39,92	17,70	26,12	8,78	12,95	5,09	7,51	3,30	4,87
MODO 4	157,34	232,26	50,52	74,58	37,84	55,86	27,63	40,78	14,38	21,23	8,50	12,55	5,55	8,19
MODO 5	166,55	245,87	63,38	93,57	43,94	64,86	34,69	51,20	20,87	30,80	12,66	18,69	8,34	12,31
MODO 6	181,91	268,54	89,57	132,22	53,59	79,11	40,63	59,98	28,31	41,80	17,43	25,73	11,63	17,16
MODO 7	217,29	320,76	94,07	138,86	63,38	93,57	45,45	67,09	32,22	47,56	22,74	33,56	15,36	22,67
MODO 8	274,33	404,97	108,64	160,38	64,64	95,43	49,84	73,57	34,86	51,46	27,16	40,09	19,47	28,75
MODO 9	287,87	424,96	135,09	199,42	67,61	99,80	54,32	80,19	36,21	53,46	27,23	40,20	21,73	32,08
MODO 10	399,99	590,47	139,36	205,72	72,43	106,92	57,33	84,64	37,26	55,01	28,70	42,37	22,56	33,31
MODO 11	418,05	617,14	157,34	232,27	96,80	142,90	57,47	84,84	37,84	55,86	31,31	46,22	23,98	35,40
MODO 12	434,61	641,58	196,67	290,33	124,52	183,82	63,39	93,57	45,45	67,10	34,69	51,21	28,95	42,74

Tabella 5.3.2 – Frequenze proprie delle condotte rettilinee

Dai risultati ottenuti nelle tabelle è possibile effettuare le seguenti considerazioni:

- Per tutte le lunghezze considerate è possibile osservare la differenza tra i periodi (frequenze) di vibrazione a tubo pieno e a tubo vuoto. Infatti in tutti i casi i periodi in condizioni di tubo pieno sono maggiori, essendo maggiore la massa associata (circa il doppio per metro lineare). Questo aspetto influenza quindi la risposta sismica della tubazione a seconda che quest'ultima sia piena o vuota.
- Spostandosi da sinistra verso destra è possibile osservare come i periodi aumentino al crescere della lunghezza e quindi della flessibilità della tubazione. Tale aspetto è piuttosto rilevante, in quanto determina una maggiore o minore suscettibilità all'azione sismica. Infatti, nel caso in esame, le tubazioni aventi lunghezza intermedia (20 m – 30 m) saranno particolarmente vulnerabili; infatti i primi modi di vibrare cadono nella zona di massima amplificazione dello spettro di risposta. Tale comportamento è del tutto analogo a quanto si verifica negli edifici, come mostra la figura sotto riportata.

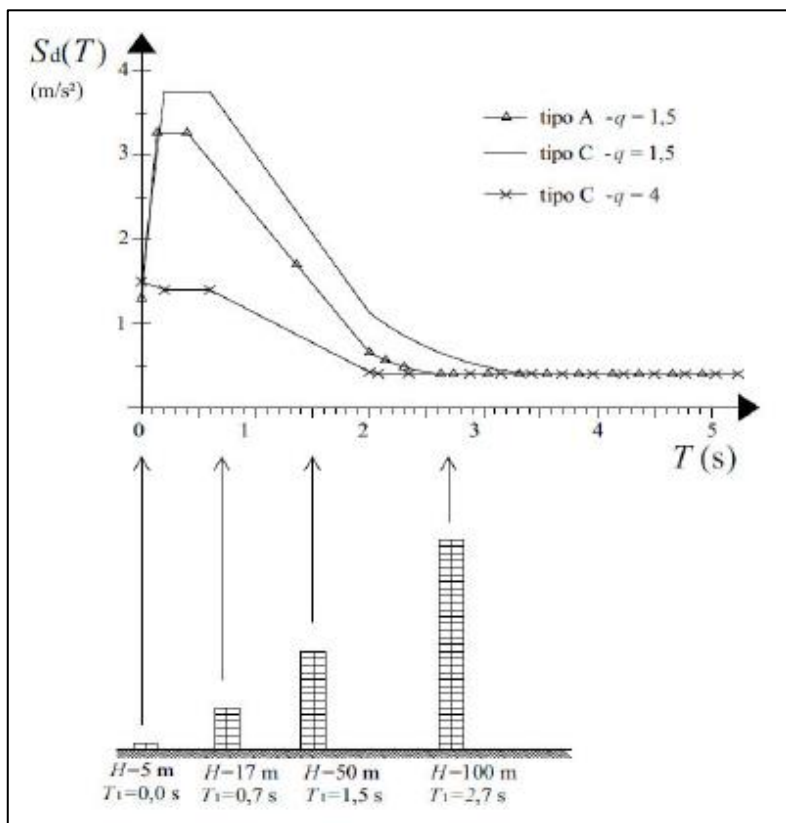


Figura 5.3.5 – Influenza delle caratteristiche geometriche nella risposta al sisma

Per quanto riguarda le forme modali si riportano per ciascun caso le prime sei deformate. In particolare sarà possibile osservare la presenza di modi di vibrare sia nel piano (prevalenti) che fuori dal piano, nel quale la tubazione è contenuta. Non si osservano differenze tra deformate modali in caso di tubo pieno e vuoto infatti l'andamento è il medesimo (gli autovettori sono comunque definiti a meno di una costante).

1. $L = 5 \text{ m}$;

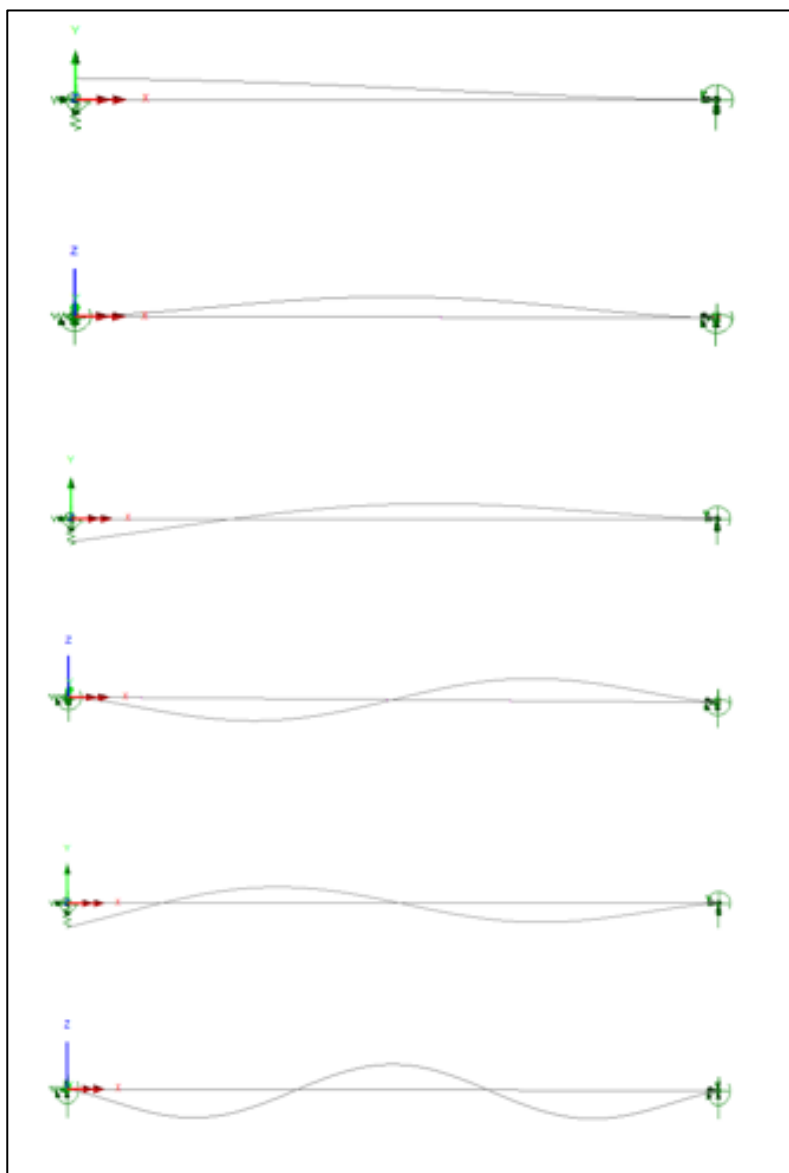


Figura 5.3.6 – Forme modali

Dall'immagine è possibile notare come i modi 1, 3, 5 siano contenuti nel piano della tubazione diversamente da quanto accade per i modi 2, 4 e 6.

2. $L = 10 \text{ m}$;

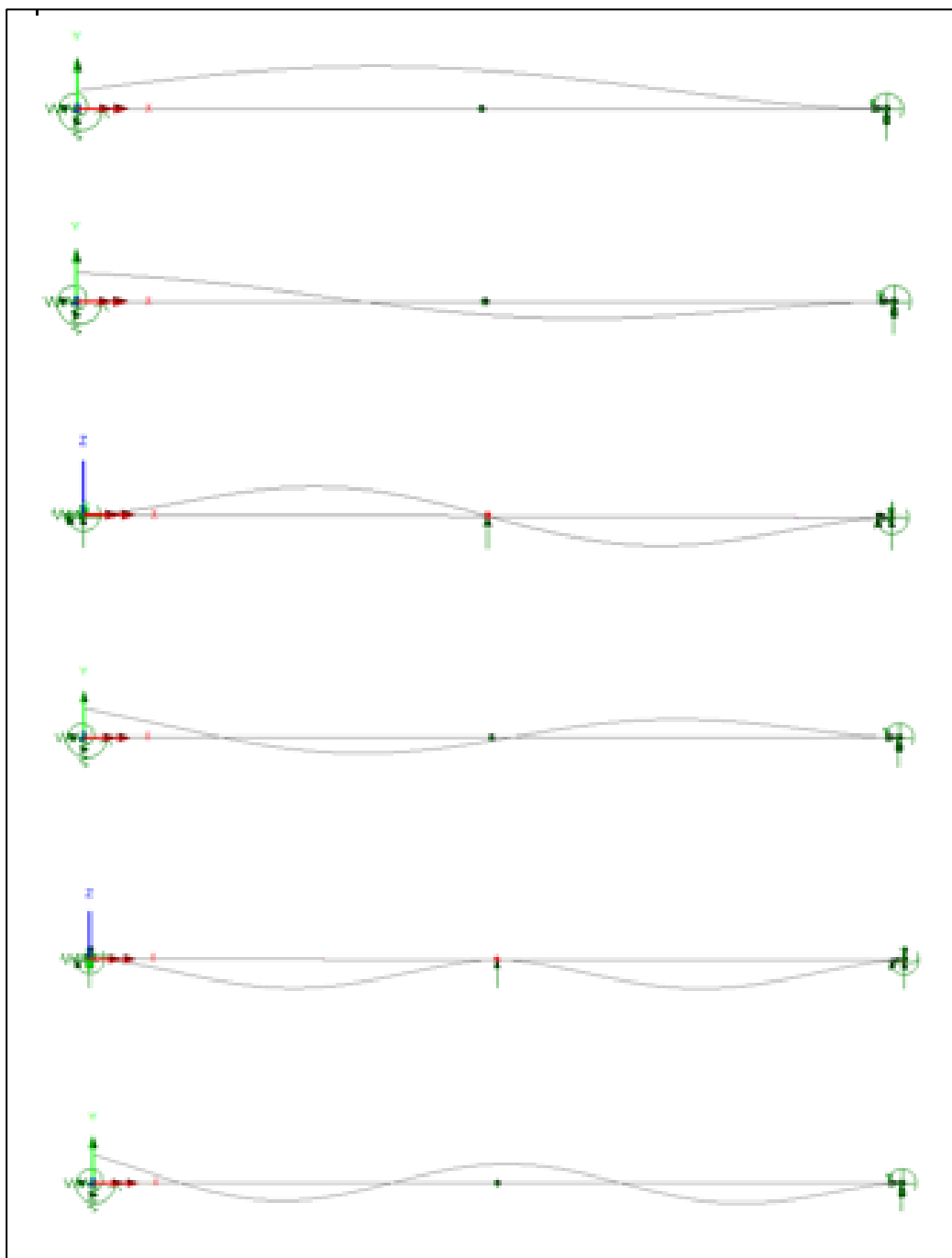


Figura 5.3.7 – Forme modali

Analogamente al caso precedente si osservano modi di vibrare nel piano (1, 2, 4, 6) e fuori piano (3 e 5)

3. $L = 15 \text{ m}$;

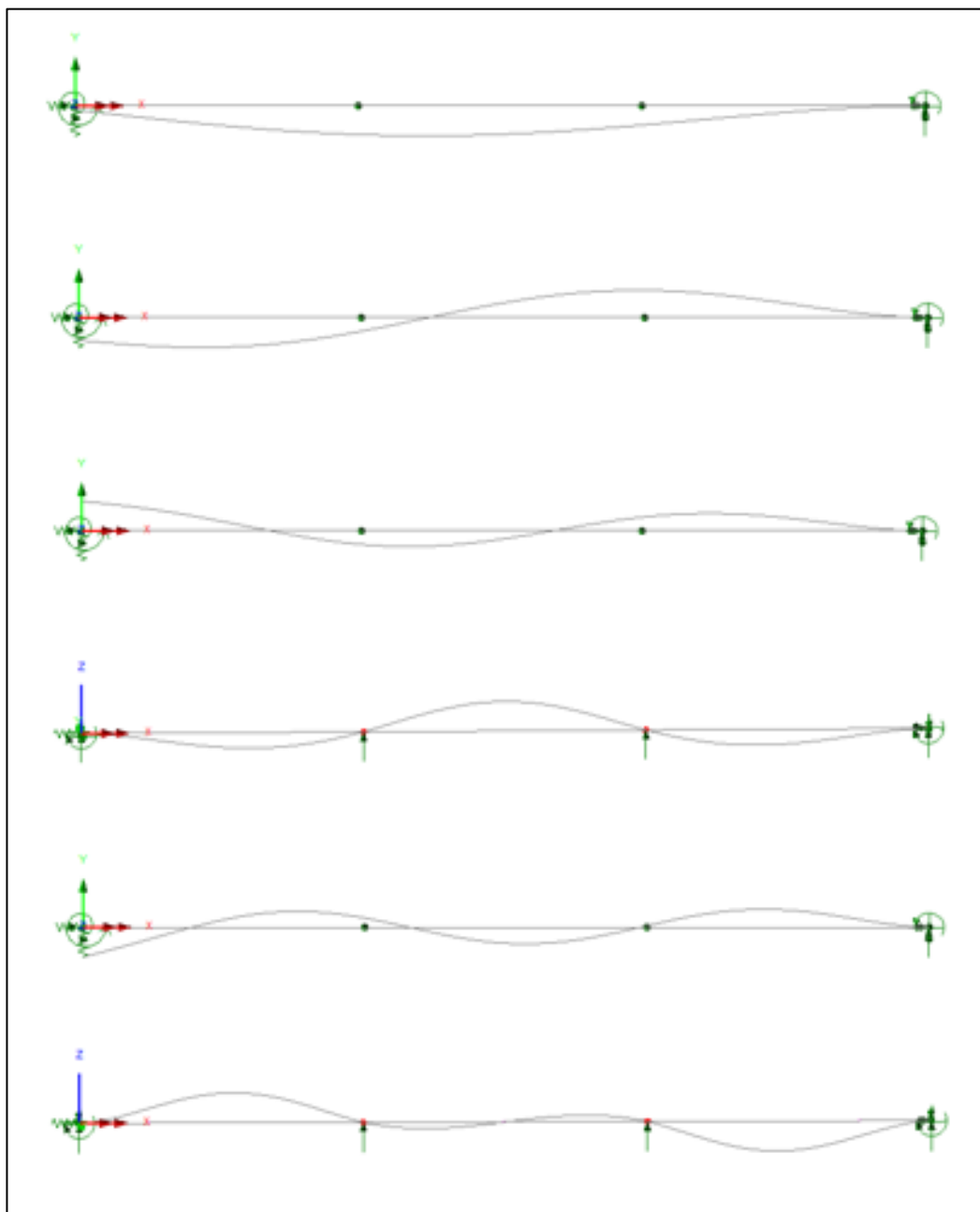


Figura 5.3.8 – Forme modali

È possibile osservare come, aumentando la lunghezza della tubazione, vi sia una prevalenza di modi contenuti nel piano, infatti in questo caso lo sono le prime tre deformate modali.

4. $L = 20 \text{ m}$;

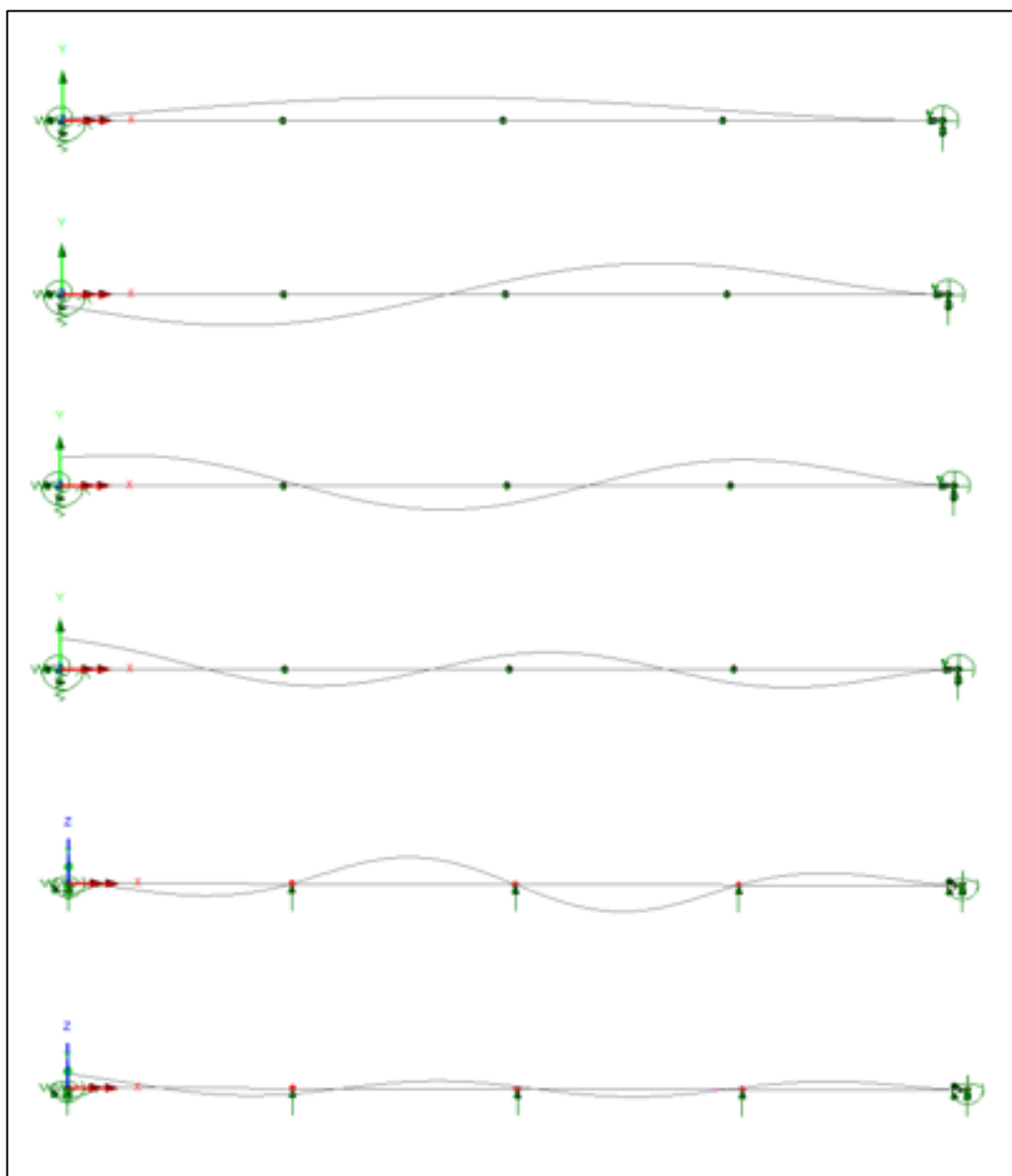


Figura 5.3.9 – Forme modali

È possibile osservare anche in questo caso un aumento dei modi contenuti nel piano (primi quattro modi).

5. $L = 30 \text{ m}$;

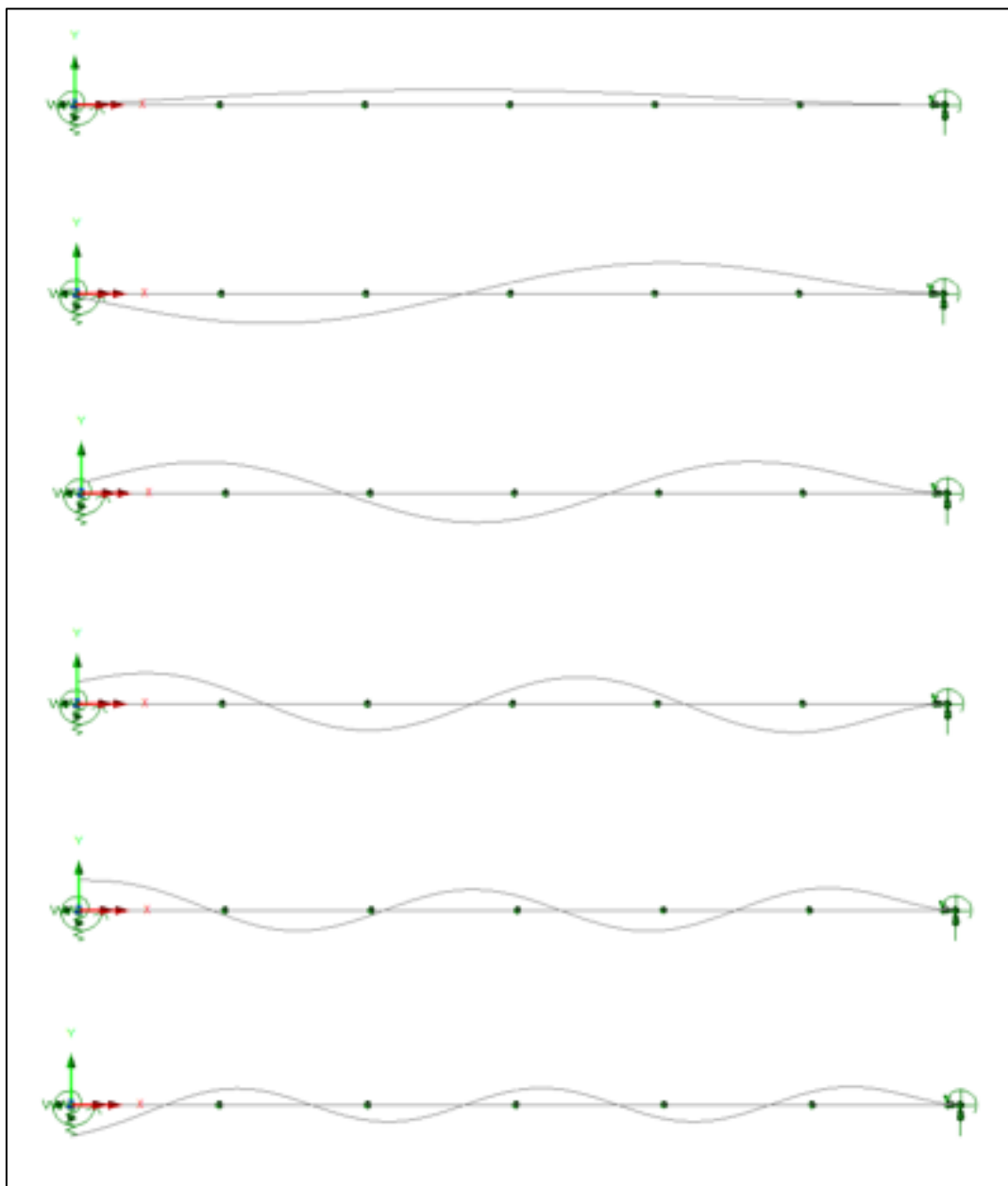


Figura 5.3.10 – Forme modali

Si osserva come in questo caso tutti i modi di vibrare sono contenuti nel piano della tubazione, e come incrementi di volta in volta il numero di semionde della deformata.

6. $L = 40 \text{ m}$;

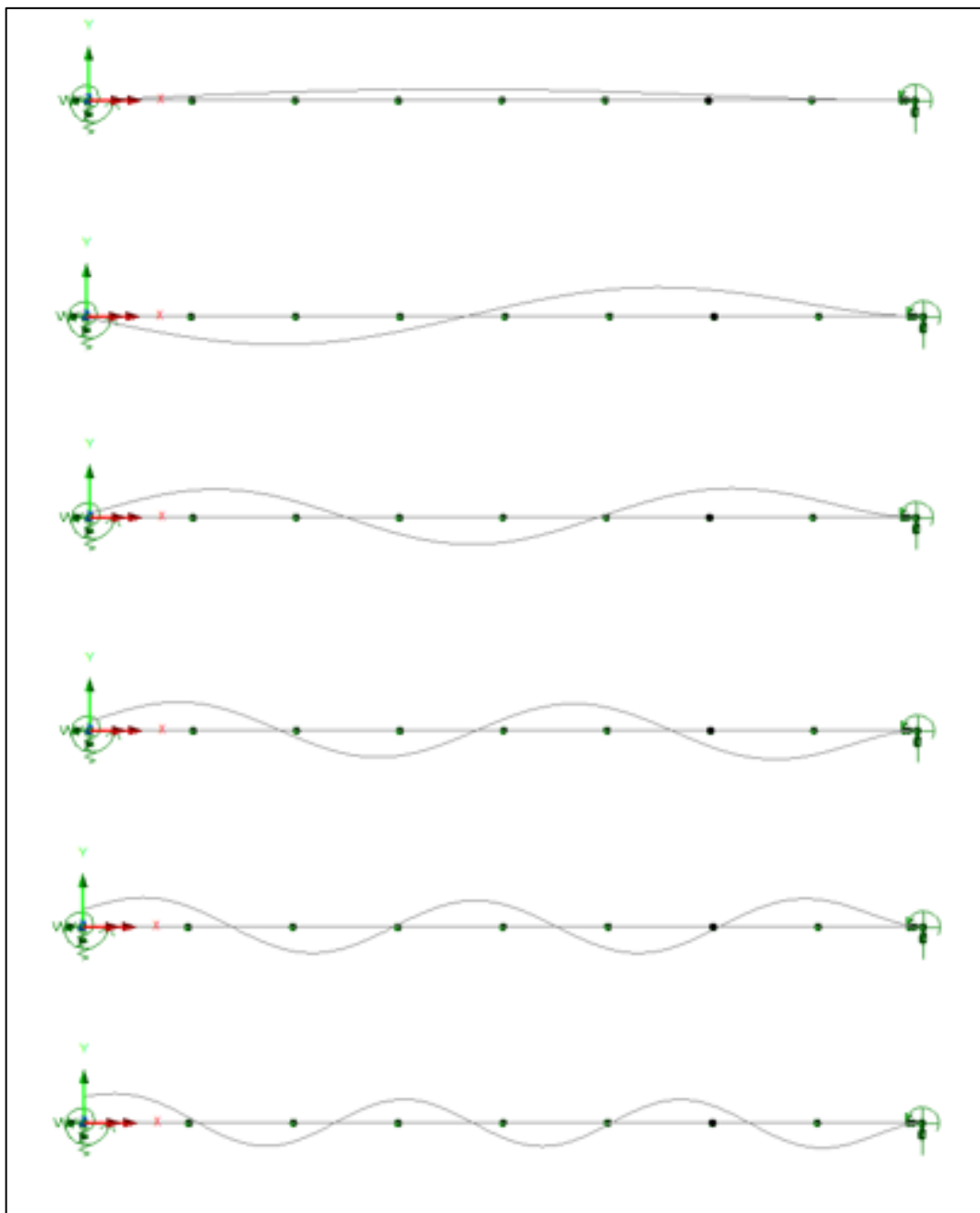


Figura 5.3.11 – Forme modali

Si osserva come anche in questo caso tutti i modi di vibrare sono contenuti nel piano della tubazione.

7. $L = 50 \text{ m}$;

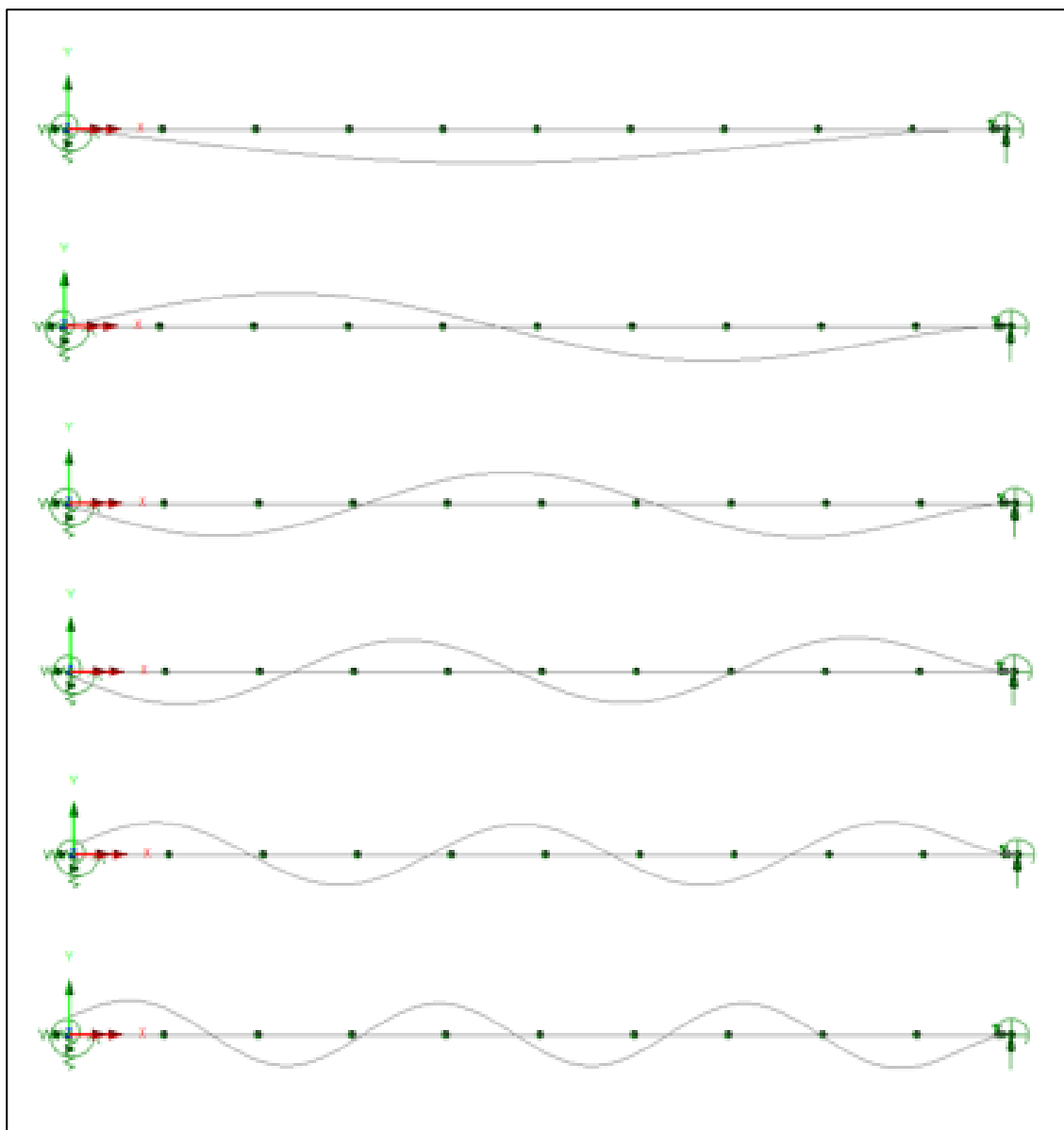


Figura 5.3.12 – Forme modali

Si osserva come in questo caso tutti i modi di vibrare sono contenuti nel piano della tubazione, e come incrementi di volta in volta il numero di semionde della deformata.

5.3.2 Tubazioni a “L”

Per quanto riguarda le tubazioni a “L” si analizzano 14 differenti configurazioni facendo variare di volta in volta la lunghezza della condotta. In particolare nelle prime sette configurazioni si mantiene fisso il lato orizzontale L_1 a 20 m, e si varia la lunghezza del ramo verticale L_2 secondo il seguente schema (caso 1):

1. $L_2 = 5$ m;
2. $L_2 = 10$ m;
3. $L_2 = 15$ m;
4. $L_2 = 20$ m;
5. $L_2 = 30$ m;
6. $L_2 = 40$ m;
7. $L_2 = 50$ m;

Successivamente si mantiene fissa L_2 a 20 m e si varia L_1 con lo stesso schema riportato nell'elenco soprastante (caso 2). Di seguito si riportano gli schemi strutturali delle tubazioni nei due casi.

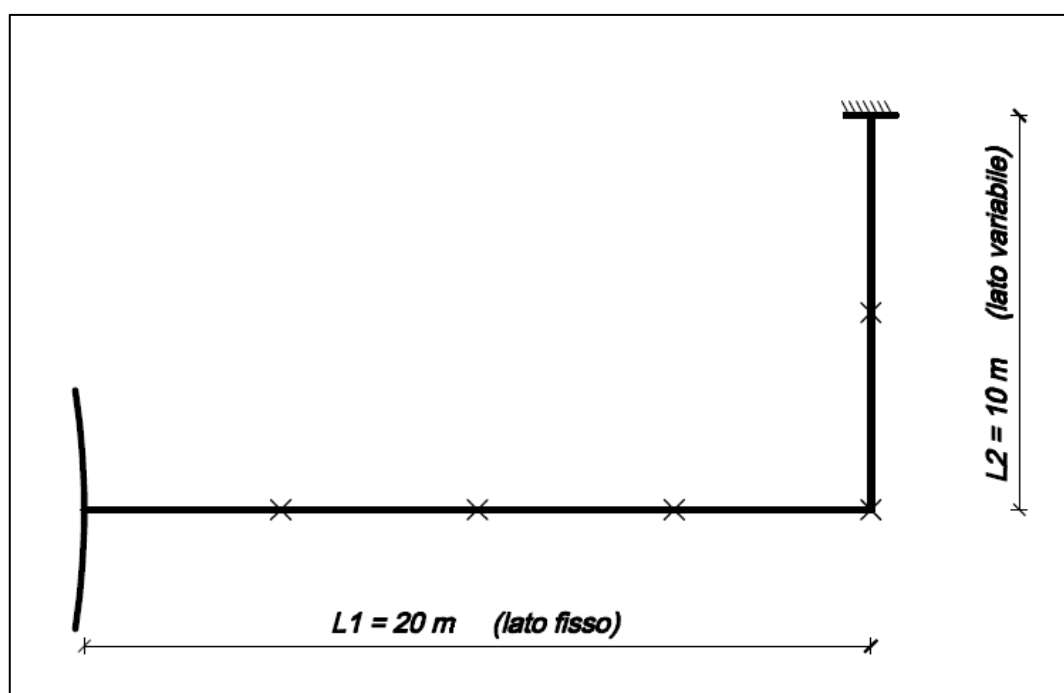


Figura 5.3.13 – Schema strutturale tubazione (caso 1)

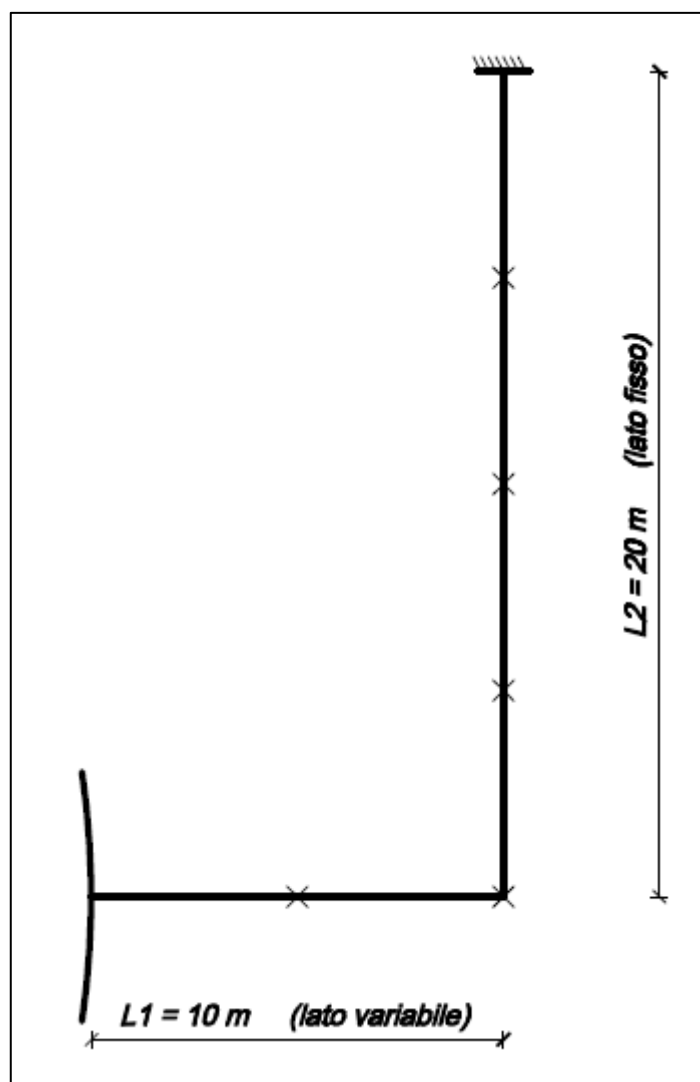


Figura 5.3.14 – Schema strutturale tubazione (caso 2)

Di seguito si riportano a titolo esemplificativo alcune configurazioni oggetto dell'analisi.

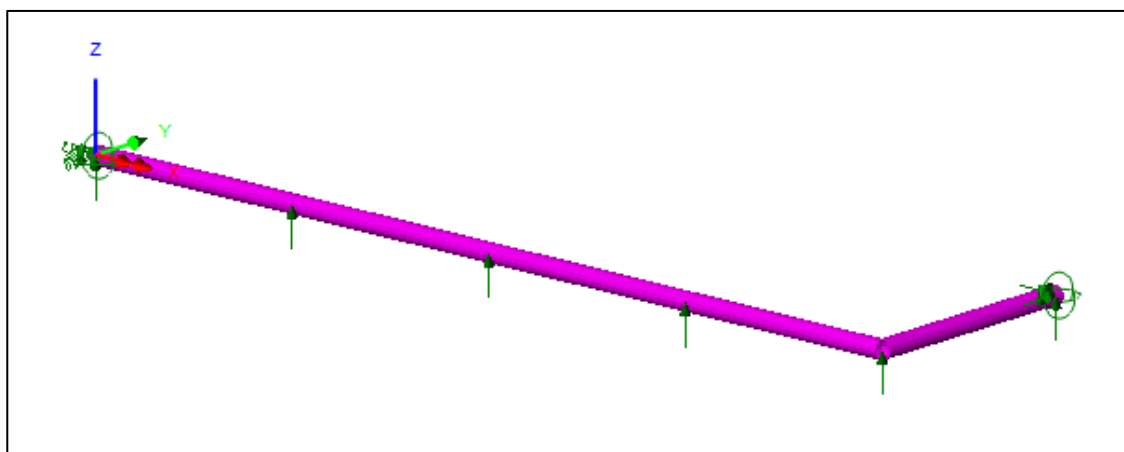


Figura 5.3.15 – $L1 = 20\text{ m}$; $L2 = 5\text{ m}$

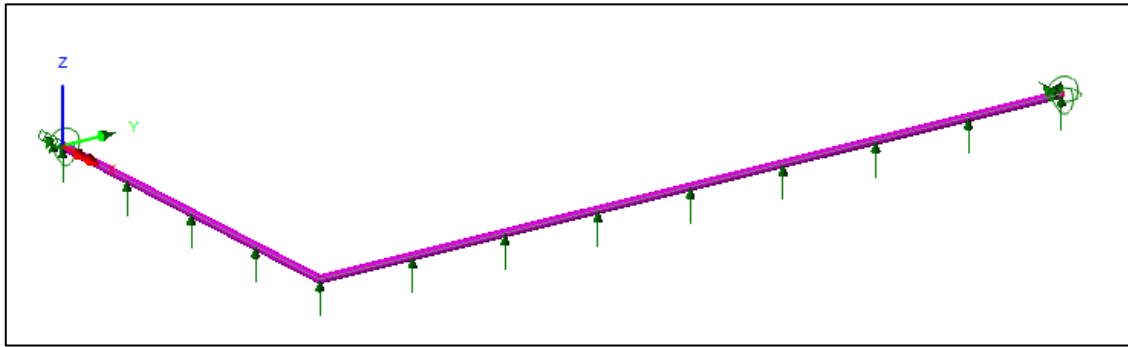


Figura 5.3.16 – $L_1 = 20\text{ m}$; $L_2 = 40\text{ m}$

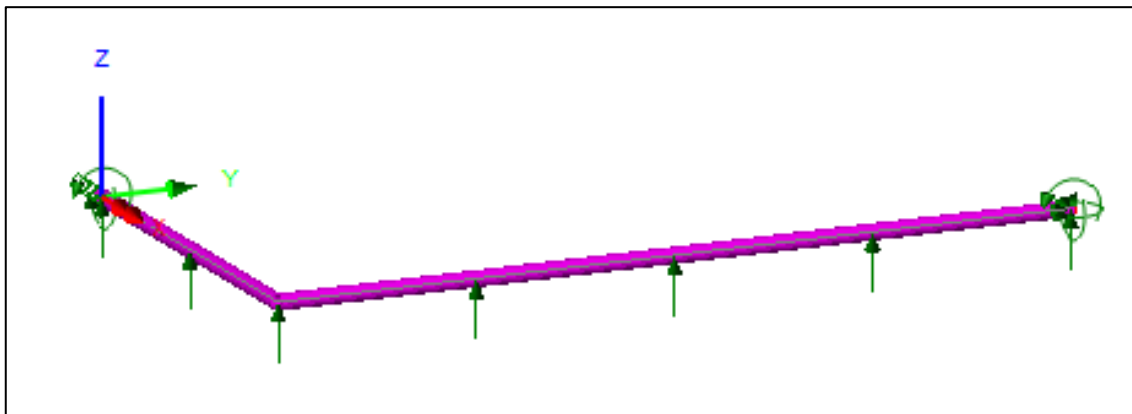


Figura 5.3.17 – $L_1 = 10\text{ m}$; $L_2 = 20\text{ m}$

Nelle tabelle successive si riportano i periodi di vibrazione e le frequenze proprie calcolati mediante risoluzione del problema agli autovalori. Analogamente al caso precedente si considerano i primi 12 modi di vibrare. Per ciascuna tubazione analizzata si riportano periodi e frequenze ottenuti in caso di tubazione piena e in caso di tubazione vuota, allo scopo di valutare la differente incidenza di tale parametro sui risultati ottenuti.

L1 = 20 m CASO 1	L2 = 5 m		L2 = 10 m		L2 = 15 m		L2 = 20 m		L2 = 30 m		L2 = 40 m		L2 = 50 m	
	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO
	PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]	
MODO 1	0,349	0,236	0,368	0,250	0,388	0,263	0,420	0,284	0,657	0,445	1,100	0,745	1,671	1,132
MODO 2	0,116	0,079	0,122	0,083	0,163	0,110	0,257	0,174	0,372	0,252	0,437	0,296	0,604	0,409
MODO 3	0,063	0,042	0,077	0,052	0,113	0,077	0,123	0,083	0,207	0,140	0,327	0,221	0,387	0,262
MODO 4	0,059	0,040	0,062	0,042	0,066	0,045	0,092	0,063	0,123	0,084	0,184	0,125	0,275	0,187
MODO 5	0,038	0,026	0,054	0,036	0,062	0,042	0,064	0,043	0,100	0,068	0,124	0,084	0,172	0,116
MODO 6	0,030	0,021	0,038	0,025	0,049	0,033	0,060	0,041	0,068	0,046	0,105	0,071	0,125	0,084
MODO 7	0,026	0,017	0,031	0,021	0,038	0,025	0,045	0,030	0,062	0,042	0,075	0,051	0,108	0,073
MODO 8	0,024	0,016	0,028	0,019	0,031	0,021	0,038	0,025	0,056	0,038	0,063	0,043	0,081	0,055
MODO 9	0,022	0,015	0,026	0,018	0,030	0,021	0,031	0,021	0,041	0,028	0,061	0,041	0,065	0,044
MODO 10	0,019	0,013	0,024	0,016	0,027	0,018	0,031	0,021	0,039	0,026	0,050	0,034	0,064	0,044
MODO 11	0,018	0,012	0,022	0,015	0,024	0,016	0,028	0,019	0,034	0,023	0,047	0,032	0,058	0,039
MODO 12	0,018	0,012	0,019	0,013	0,024	0,016	0,026	0,018	0,032	0,022	0,039	0,027	0,054	0,037

Tabella 5.3.3 – Periodi di vibrazione delle condotte (caso 1)

L1 = 20 m CASO 1	L2 = 5 m		L2 = 10 m		L2 = 15 m		L2 = 20 m		L2 = 30 m		L2 = 40 m		L2 = 50 m	
	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO
	FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]	
MODO 1	4,24	2,87	2,71	4,01	2,57	3,80	2,38	3,52	1,52	2,25	0,91	1,34	0,60	0,88
MODO 2	12,74	8,63	8,19	12,08	6,14	9,06	3,89	5,75	2,69	3,97	2,29	3,38	1,65	2,44
MODO 3	23,62	16,00	12,97	19,15	8,82	13,03	8,16	12,05	4,83	7,14	3,06	4,52	2,59	3,82
MODO 4	25,23	17,09	16,07	23,72	15,08	22,25	10,82	15,97	8,11	11,97	5,43	8,01	3,63	5,36
MODO 5	39,04	26,45	18,59	27,45	16,25	23,99	15,74	23,24	9,95	14,70	8,06	11,91	5,82	8,59
MODO 6	48,56	32,90	26,60	39,26	20,60	30,41	16,58	24,47	14,75	21,77	9,50	14,03	8,02	11,85
MODO 7	57,27	38,79	32,40	47,84	26,64	39,32	22,31	32,94	16,07	23,72	13,36	19,72	9,23	13,62
MODO 8	61,99	41,99	35,27	52,06	32,14	47,44	26,64	39,33	18,00	26,58	15,82	23,36	12,28	18,13
MODO 9	66,20	44,85	38,04	56,16	32,81	48,44	31,89	47,08	24,25	35,79	16,48	24,33	15,29	22,56
MODO 10	78,02	52,85	41,50	61,26	37,00	54,62	31,89	47,08	25,90	38,24	19,99	29,52	15,55	22,96
MODO 11	81,73	55,36	44,66	65,93	41,18	60,79	35,95	53,07	29,54	43,60	21,32	31,47	17,18	25,36
MODO 12	83,74	56,73	53,33	78,73	41,20	60,82	38,38	56,66	30,80	45,46	25,51	37,65	18,43	27,21

Tabella 5.3.4 – Frequenze proprie (caso 1)

L2 = 20 m CASO 2	L1 = 5 m		L1 = 10 m		L1 = 15 m		L1 = 20 m		L1 = 30 m		L1 = 40 m		L1 = 50 m	
	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO
	PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]		PERIODO [s]	
MODO 1	0,263	0,178	0,278	0,189	0,311	0,211	0,420	0,284	0,826	0,559	1,380	0,935	2,066	1,400
MODO 2	0,095	0,064	0,118	0,080	0,203	0,138	0,257	0,174	0,307	0,208	0,459	0,311	0,688	0,466
MODO 3	0,051	0,035	0,087	0,059	0,097	0,065	0,123	0,083	0,229	0,155	0,280	0,190	0,348	0,236
MODO 4	0,043	0,029	0,051	0,034	0,071	0,048	0,092	0,063	0,124	0,084	0,203	0,138	0,265	0,179
MODO 5	0,033	0,022	0,044	0,030	0,056	0,038	0,064	0,043	0,096	0,065	0,126	0,085	0,187	0,127
MODO 6	0,030	0,021	0,039	0,026	0,045	0,030	0,060	0,041	0,078	0,053	0,102	0,069	0,126	0,086
MODO 7	0,025	0,017	0,031	0,021	0,038	0,026	0,045	0,030	0,071	0,048	0,088	0,060	0,111	0,075
MODO 8	0,024	0,017	0,028	0,019	0,031	0,021	0,038	0,025	0,051	0,034	0,079	0,053	0,094	0,064
MODO 9	0,024	0,016	0,027	0,018	0,030	0,021	0,031	0,021	0,044	0,030	0,059	0,040	0,084	0,057
MODO 10	0,022	0,015	0,025	0,017	0,027	0,019	0,031	0,021	0,036	0,025	0,047	0,032	0,066	0,045
MODO 11	0,018	0,012	0,024	0,016	0,026	0,017	0,028	0,019	0,032	0,022	0,043	0,029	0,053	0,036
MODO 12	0,018	0,012	0,020	0,014	0,024	0,016	0,026	0,018	0,032	0,022	0,039	0,026	0,047	0,032

Tabella 5.3.5 – Periodi di vibrazione delle condotte (caso 2)

L2 = 20	L1 = 5 m		L1 = 10 m		L1 = 15 m		L1 = 20 m		L1 = 30 m		L1 = 40 m		L1 = 50 m	
	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO	TUBO PIENO	TUBO VUOTO
	FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]		FREQUENZA [Hz]	
MODO 1	3,81	5,62	3,59	5,30	3,22	4,75	2,38	3,52	1,21	1,79	0,72	1,07	0,48	0,71
MODO 2	10,56	15,59	8,46	12,49	4,92	7,27	3,89	5,75	3,26	4,81	2,18	3,21	1,45	2,15
MODO 3	19,47	28,74	11,43	16,88	10,36	15,29	8,16	12,05	4,36	6,44	3,57	5,27	2,87	4,24
MODO 4	23,24	34,30	19,66	29,03	13,99	20,65	10,82	15,97	8,03	11,86	4,92	7,26	3,77	5,57
MODO 5	30,18	44,55	22,93	33,85	17,76	26,22	15,74	23,24	10,40	15,35	7,96	11,75	5,35	7,90
MODO 6	32,90	48,56	25,78	38,06	22,37	33,03	16,58	24,47	12,90	19,05	9,82	14,49	7,91	11,68
MODO 7	39,34	58,08	32,40	47,84	26,00	38,38	22,31	32,94	14,06	20,76	11,37	16,78	8,98	13,26
MODO 8	40,94	60,44	35,27	52,06	32,14	47,44	26,64	39,33	19,64	28,99	12,72	18,78	10,63	15,69
MODO 9	41,99	61,99	37,21	54,93	32,81	48,44	31,89	47,08	22,56	33,30	16,86	24,89	11,96	17,65
MODO 10	44,85	66,20	40,04	59,11	36,50	53,88	31,89	47,08	27,59	40,73	21,13	31,19	15,04	22,20
MODO 11	54,77	80,85	41,50	61,26	39,11	57,74	35,95	53,07	30,80	45,46	23,17	34,20	18,88	27,87
MODO 12	55,36	81,73	49,69	73,36	41,20	60,82	38,38	56,66	31,21	46,08	25,91	38,25	21,11	31,16

Tabella 5.3.6 – Frequenze proprie (caso 2)

Dalle tabelle è possibile effettuare le seguenti considerazioni:

- Per tutte le lunghezze considerate è possibile osservare la differenza tra i periodi di vibrazione a tubo pieno e a tubo vuoto. Infatti in tutti i casi i periodi a tubo pieno sono maggiori, essendo maggiore la massa associata (circa il doppio per metro lineare). Questo aspetto influenza quindi la risposta sismica della tubazione a seconda che quest'ultima sia piena o vuota.
- Spostandosi da sinistra verso destra è possibile osservare come i periodi aumentino al crescere della lunghezza e quindi della flessibilità della tubazione. Di per sé anche la tubazione avente un lato pari a 5 m possiede una certa flessibilità, dovuta alla geometria della condotta. In generale è possibile osservare come le tubazioni a "L" siano maggiormente suscettibili all'azione sismica (rispetto alle tubazioni rettilinee), in quanto i periodi di vibrazione dei primi modi ricadono nella zona di amplificazione dello spettro di risposta. Inoltre al crescere della lunghezza delle condotte aumenta la massa complessiva in oscillazione; tale aspetto produce maggiori spostamenti e quindi maggiori sollecitazioni (nonostante i periodi dei primissimi modi tendano ad essere esterni alla zona di amplificazione dello spettro).

Per quanto riguarda le forme modali si riportano le prime sei deformate per il caso 1. In particolare sarà possibile osservare la presenza di modi di vibrare sia nel piano (prevalenti) che fuori dal piano, nel quale la tubazione è contenuta. Non si osservano differenze tra deformate modali in caso di tubo pieno e vuoto infatti l'andamento è il medesimo (gli autovettori sono comunque definiti a meno di una costante). Successivamente si riportano le forme modali principali relativi al caso 1 (le deformate del caso 2 non vengono riportate in quanto del tutto analoghe).

1. $L_1 = 20 \text{ m}$, $L_2 = 5 \text{ m}$.

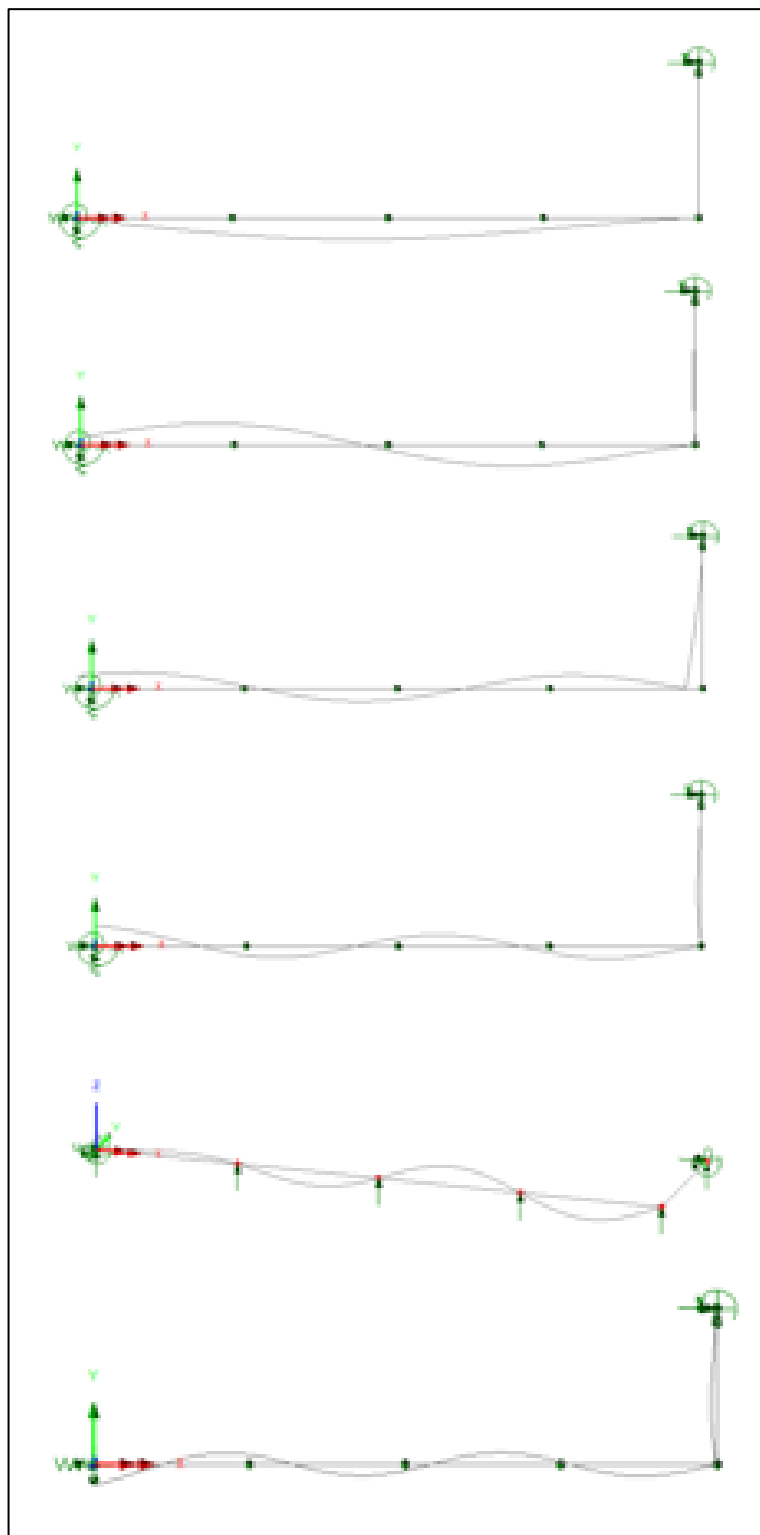


Figura 5.3.18 – Forme modali

Dall'immagine è possibile osservare come tutti i modi di vibrare siano contenuti nel piano ad eccezione del quinto.

2. $L_1 = 20 \text{ m}$, $L_2 = 10 \text{ m}$.

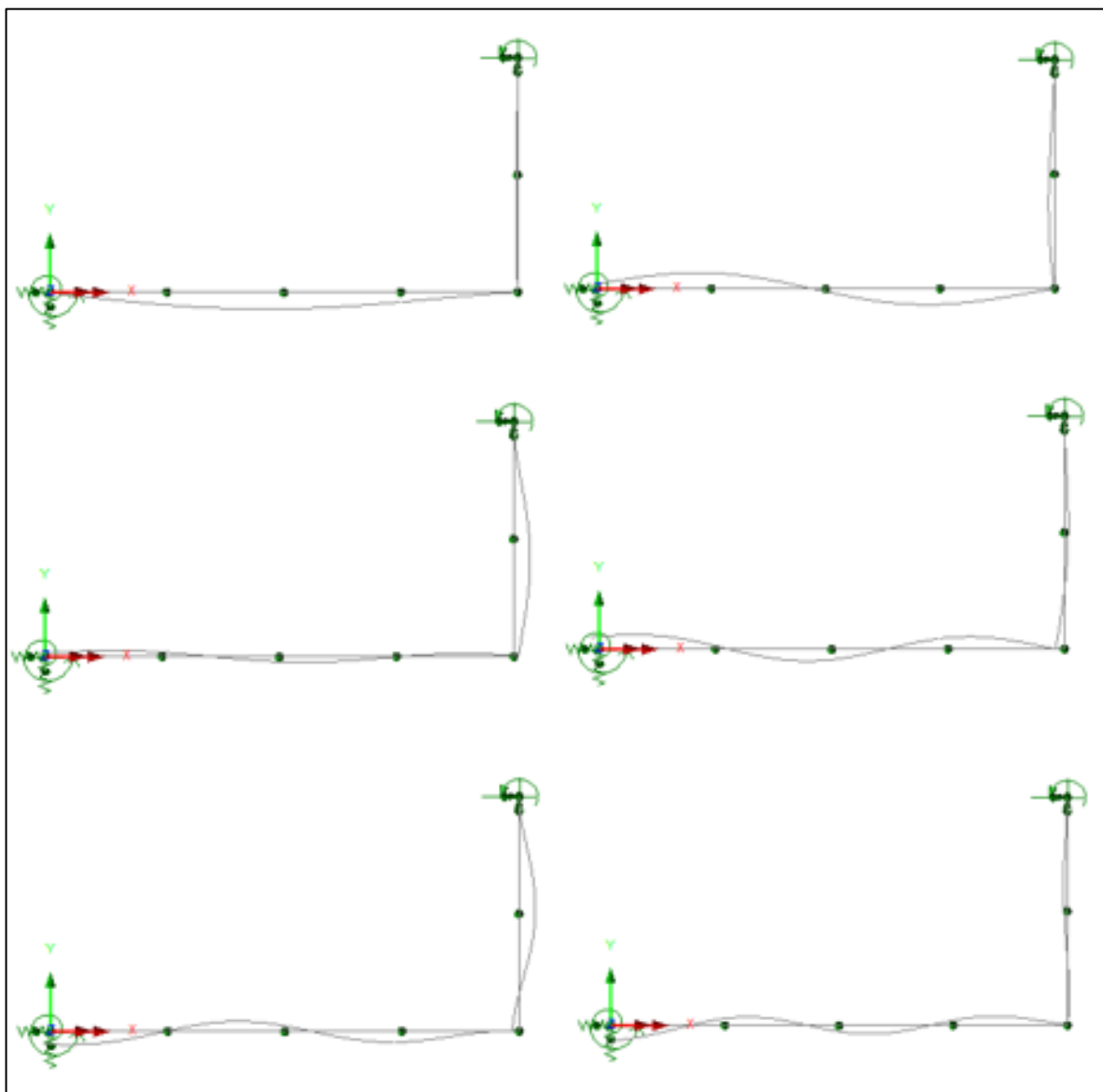


Figura 5.3.19 –Forme modali

Si osserva come tutte le deformate sono contenute nel piano della tubazione, inoltre si nota l'aumento del numero di semionde al crescere del modo di vibrare.

3. $L_1 = 20 \text{ m}$, $L_2 = 15 \text{ m}$.

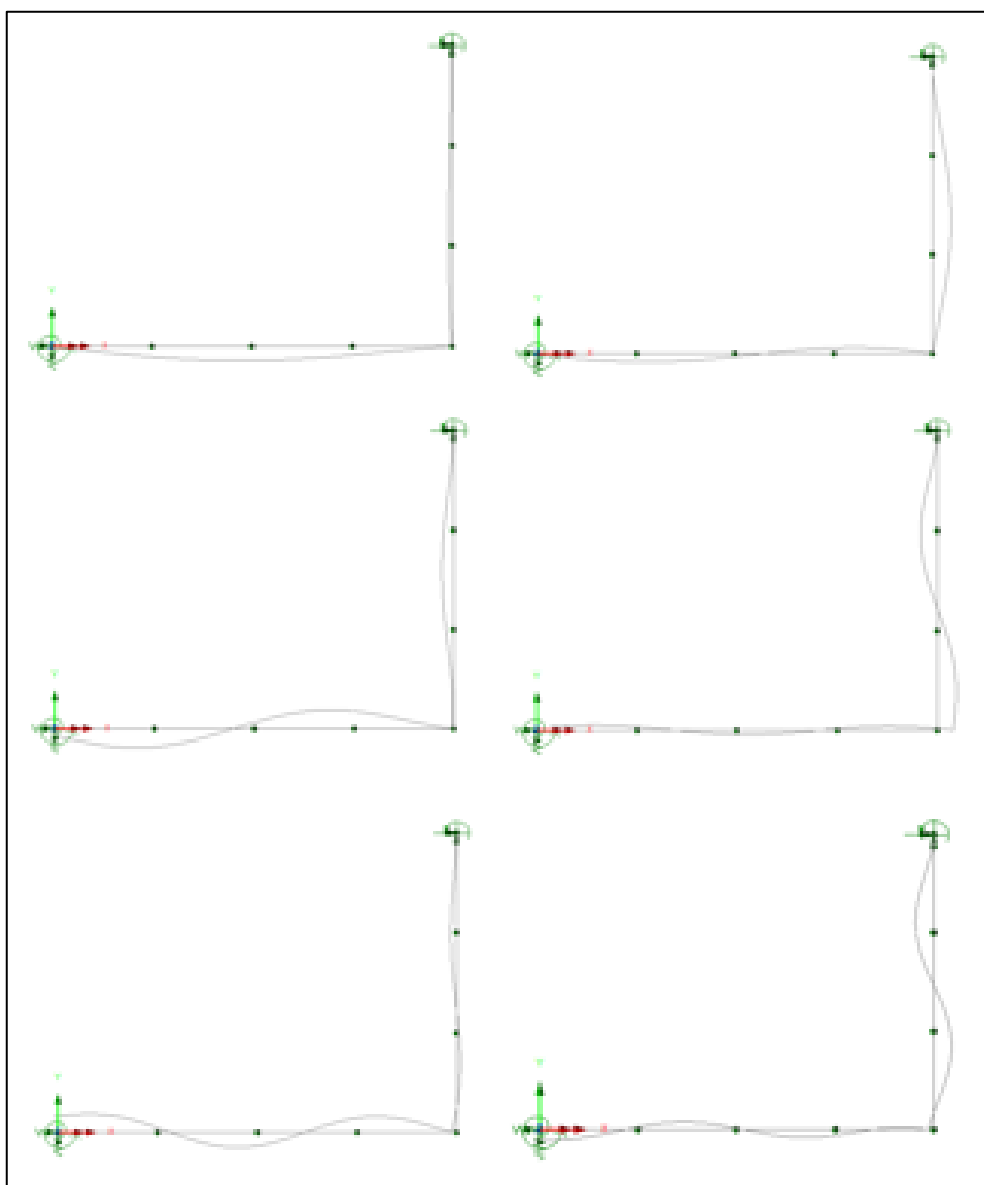


Figura 5.3.19 –Forme modali

Si osserva, anche in questo caso, come tutte le deformate sono contenute nel piano della tubazione, inoltre si nota l'aumento del numero di semionde al crescere del modo di vibrare.

4. $L_1 = 20 \text{ m}$, $L_2 = 20 \text{ m}$.

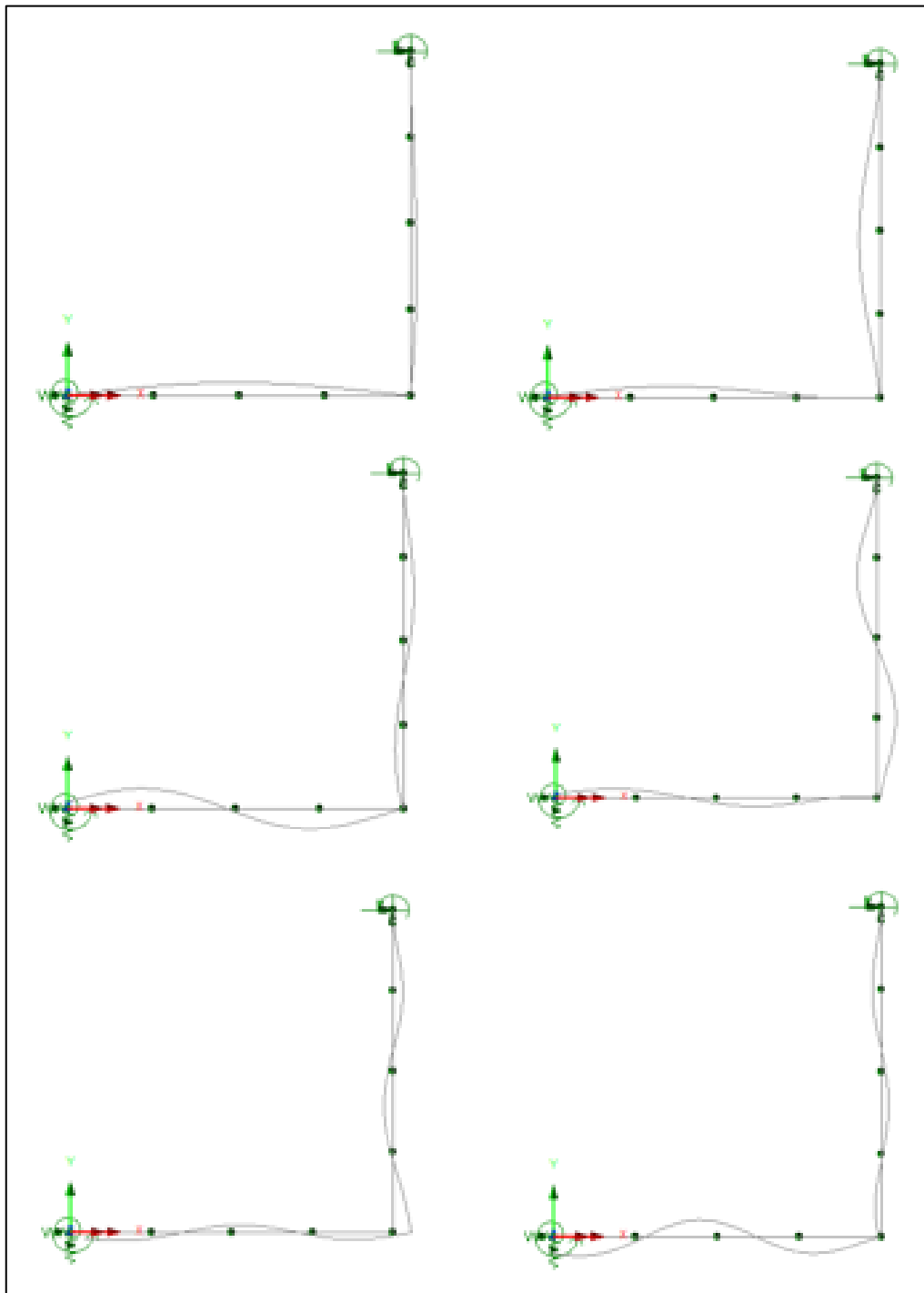


Figura 5.3.20 –Forme modali

Si osserva, anche in questo caso, come tutte le deformate sono contenute nel piano della tubazione, inoltre si nota l'aumento del numero di semionde al crescere del modo di vibrare.

5. $L_1 = 20 \text{ m}$, $L_2 = 30 \text{ m}$.

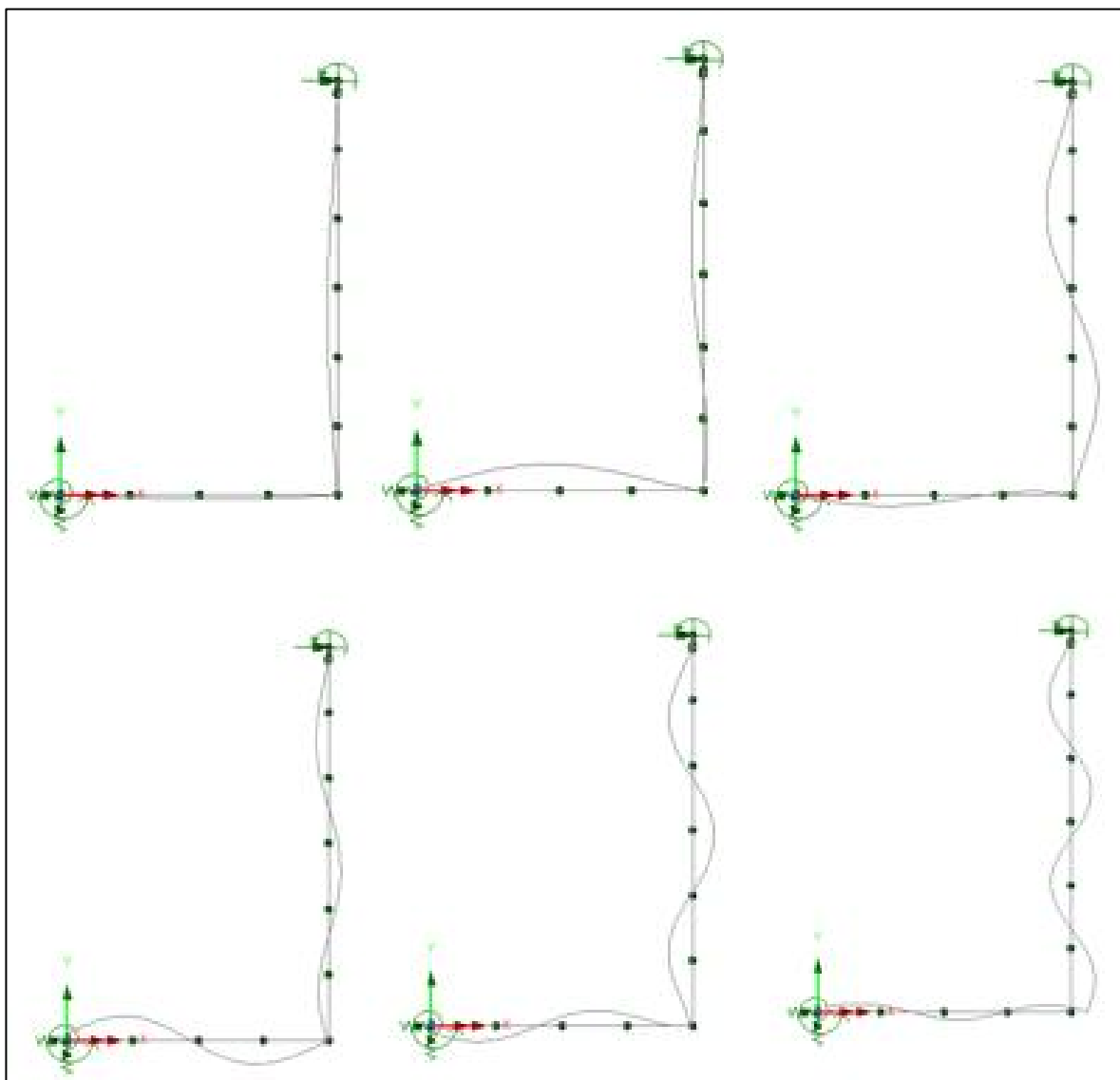


Figura 5.3.21 –Forme modali

Si osserva, anche in questo caso, come tutte le deformate sono contenute nel piano della tubazione, inoltre si nota l'aumento del numero di semionde al crescere del modo di vibrare.

6. $L_1 = 20 \text{ m}$, $L_2 = 40 \text{ m}$.

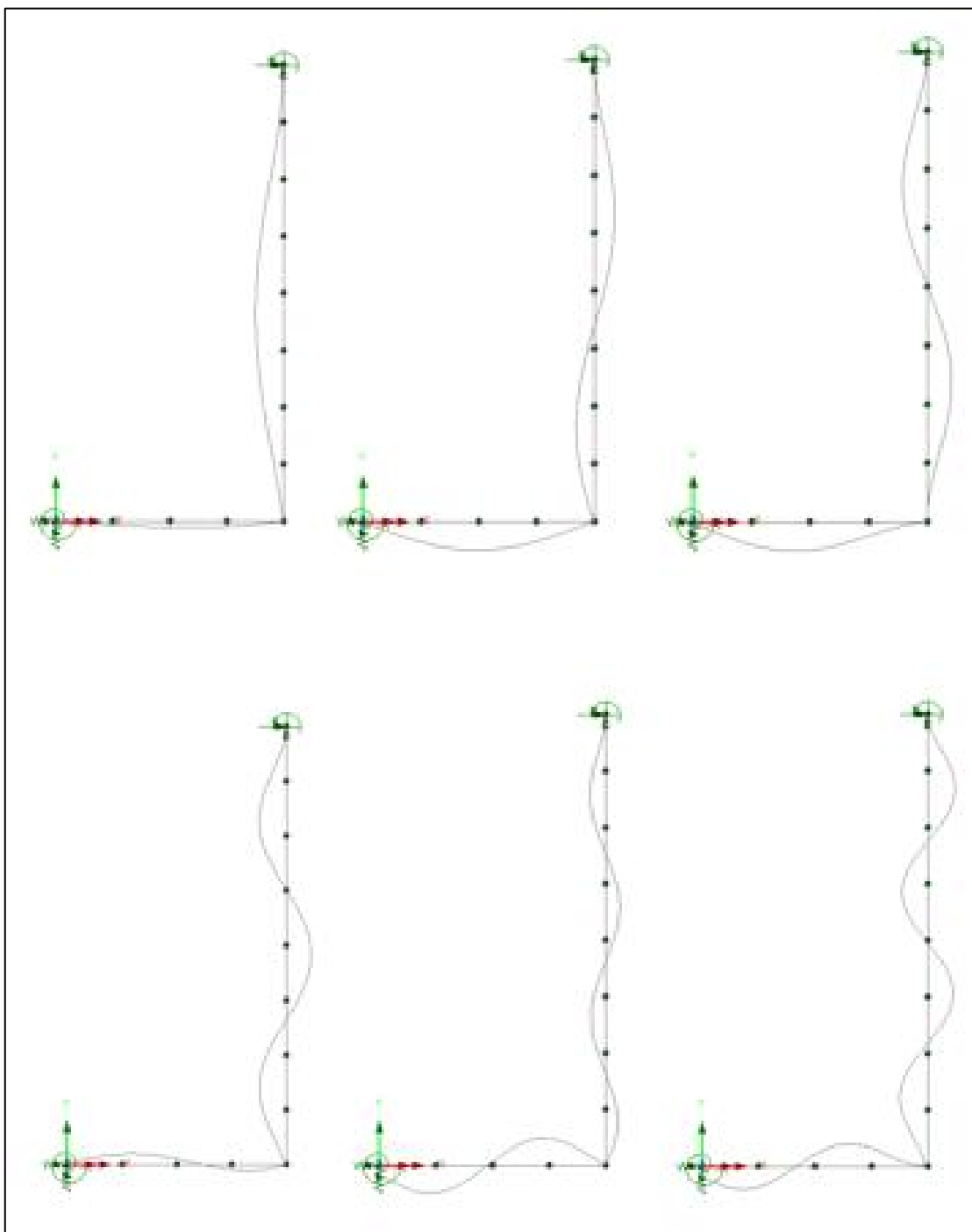


Figura 5.3.22 –Forme modali

Si osserva, anche in questo caso, come tutte le deformate sono contenute nel piano della tubazione, inoltre si nota l'aumento del numero di semionde al crescere del modo di vibrare.

7. $L_1 = 20 \text{ m}$, $L_2 = 50 \text{ m}$.

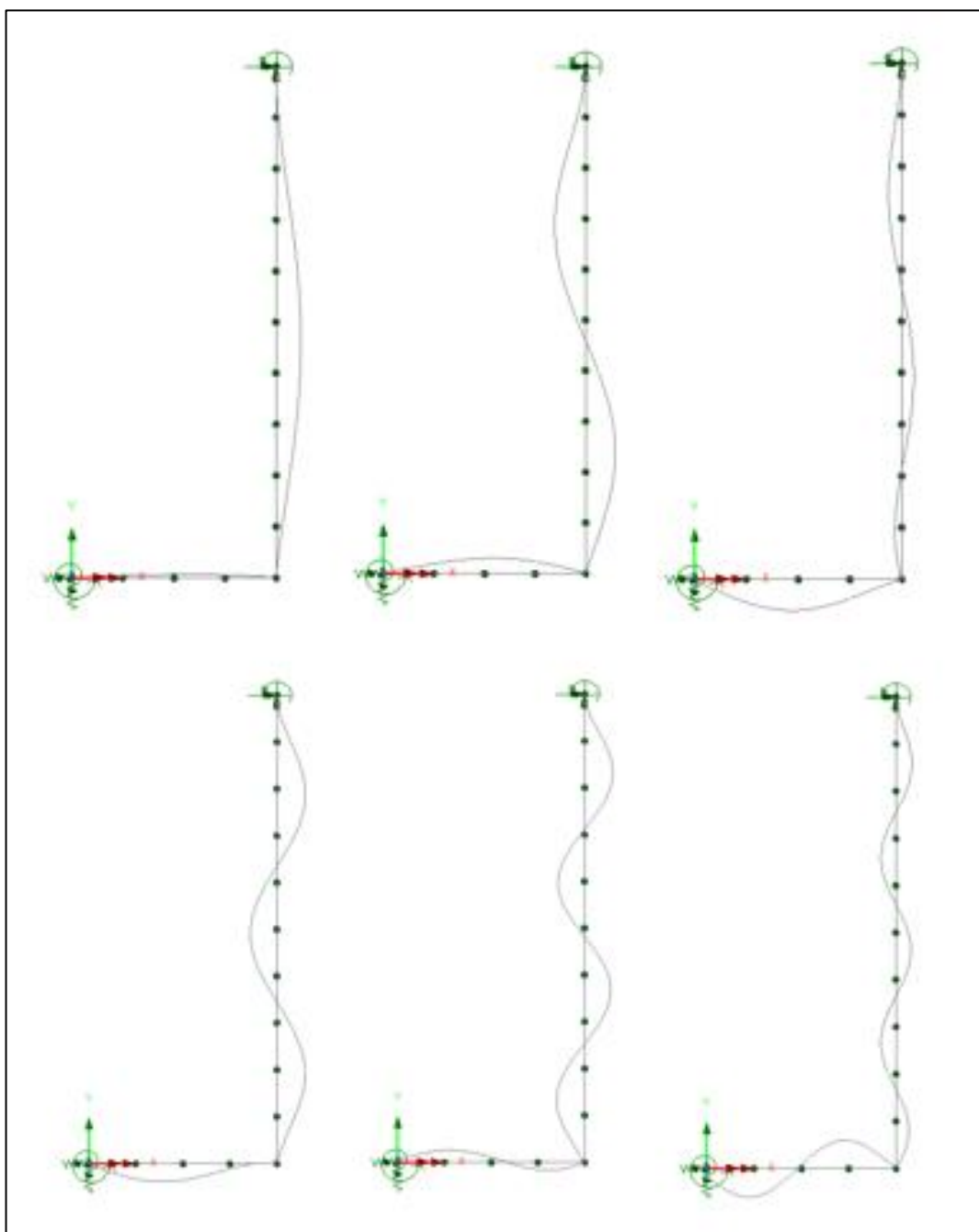


Figura 5.3.23 – Forme modali

Si osserva, anche in questo caso, come tutte le deformate sono contenute nel piano della tubazione, inoltre si nota l'aumento del numero di semionde al crescere del modo di vibrare.

5.4. Conclusioni

Nel capitolo si sono poste la basi per effettuare il calcolo sismico delle tubazioni mediante l'utilizzo dello spettro di risposta. Infatti si sono ricavati i modi di vibrare per tre differenti sistemi di tubazioni, ciascun sistema caratterizzato da sette lunghezze variabili; tutto questo per comprendere meglio l'influenza di tale parametro sulla risposta sismica delle condotte, oggetto del prossimo capitolo.

Si sono analizzati tutti gli aspetti critici in input al problema, in particolare la scelta relativa ai tipi di vincolo da adottare e la loro relativa modellazione all'interno del programma di calcolo. Successivamente si sono calcolate le frequenze proprie di vibrazione delle varie tubazioni considerando le condotte rispettivamente "piene" e "vuote" andando a modificare la densità del materiale. In particolare si è notata l'influenza di quest'ultima variabile sui periodi di vibrazione delle tubazioni, infatti a parità di lunghezza i tubi vuoti mostrano sempre periodi minori (rispetto agli stessi contenenti liquido al loro interno).

In ultimo si sono confrontati i periodi di vibrazione delle varie tubazioni valutando l'influenza della lunghezza; si è osservato come le condotte ad "L" siano maggiormente vulnerabili all'azione sismica indipendentemente dalla lunghezza del ramo variabile, questo principalmente a causa della loro configurazione geometrica. Diversamente, condotte rettilinee molto corte mostrano periodi di vibrazione molto bassi risultando quindi poco eccitate dall'azione sismica. In genere in tutti i casi al crescere dello sviluppo delle tubazioni consegue un incremento complessivo della massa oscillante e quindi maggiori spostamenti e maggiori sollecitazioni.

6. ANALISI SISMICA DELLE TUBAZIONI

6.1 Introduzione

In questo paragrafo si calcoleranno gli effetti causati dal sisma sulle tubazioni analizzate in precedenza, in termini di sollecitazioni interne e spostamenti. Avendo utilizzato elementi “beam” nello spazio vi sono complessivamente sei azioni interne da valutare ovvero: sforzo normale, due azioni taglianti dirette secondo i due assi principali (y e z), due momenti flettenti attorno gli stessi assi ed infine il momento torcente attorno all’asse della tubazione stessa.

Per quanto riguarda gli spostamenti verranno valutati in particolare in corrispondenza del collegamento tra serbatoio e tubazione. In questa fase il comportamento dinamico del serbatoio, e gli spostamenti che ne conseguono a causa del liquido contenuto, non vengono presi in considerazione, ma viene modellata semplicemente la rigidità del collegamento con la tubazione, come riportato precedentemente.

L’analisi sismica delle tubazioni viene svolta mediante l’utilizzo dello spettro di risposta in termini di accelerazione, in maniera del tutto analoga a quanto si applica agli edifici. Per questo tipo di analisi si farà riferimento a quanto riportato nelle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008), e all’Eurocodice 8 parte 4 (UNI ENV 1998-4), dedicata ai componenti degli impianti industriali: silos, serbatoi e tubazioni.

All’analisi classica con spettro di risposta verrà affiancata una verifica prevista dalle Norme Americane API 650. Il capitolo E al paragrafo 7.3 parla della flessibilità delle tubazioni collegate con i serbatoi, indicando dei valori specifici in termini di spostamenti imposti ai quali la tubazione deve resistere. Tali spostamenti verranno impressi in corrispondenza del collegamento tra tubo e serbatoio e vogliono simulare il comportamento dinamico del serbatoio stesso, il quale sottoposto ad azione sismica tende a trascinare nel suo movimento la condotta ad esso collegata.

6.2 Analisi sismica con spettro di risposta

Il primo step necessario per effettuare l'analisi delle tubazioni riportate in precedenza riguarda la definizione dell'azione sismica da applicare. A tal fine si utilizza il foglio Excel delle NTC 2008, il quale definisce l'azione sismica mediante spettro di risposta in termini di accelerazione, per Comune selezionato.

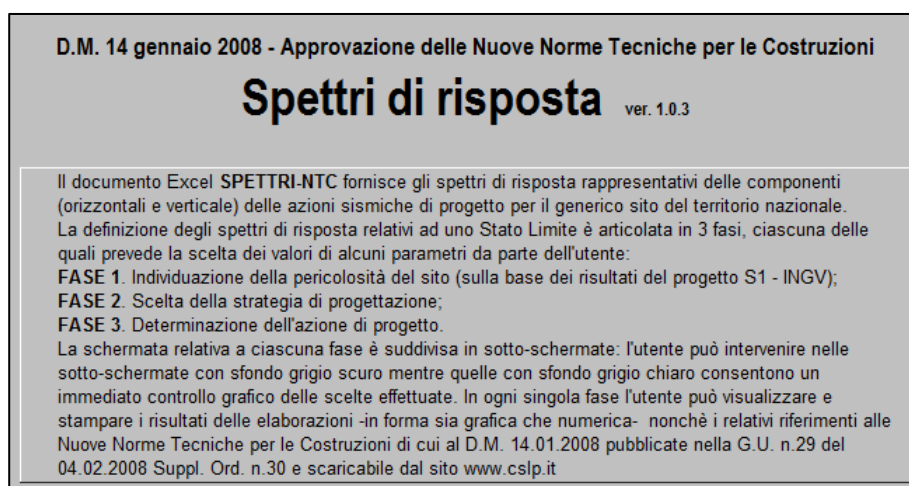


Figura 6.2.1 – Software per il calcolo dello spettro di risposta

In particolare per queste analisi si utilizza lo spettro di risposta del comune di L'Aquila, in quanto l'azione sismica risulta essere di elevata entità. Successivamente si riportano le schermate relative alla definizione dello spettro.

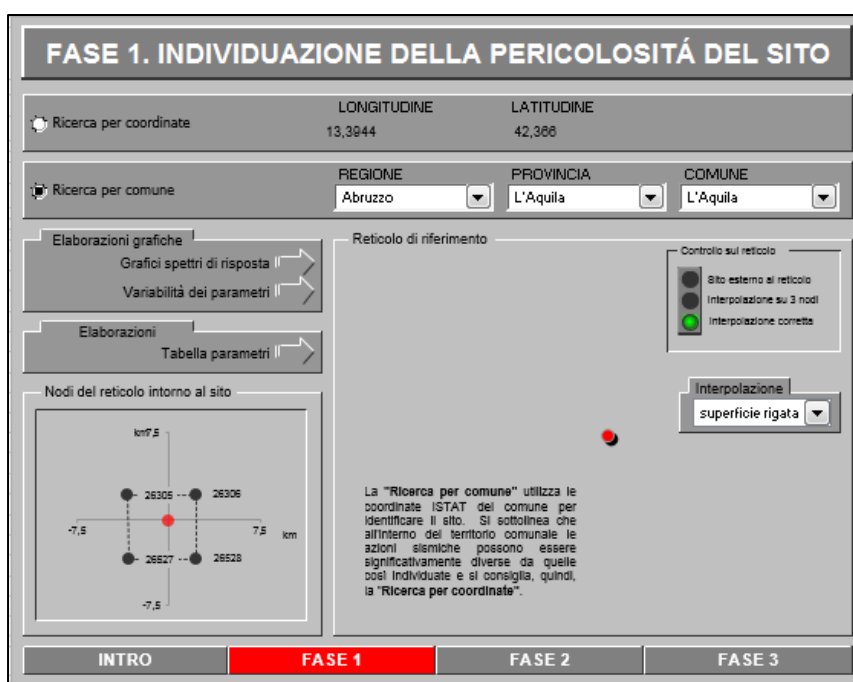


Figura 6.2.2 – Pericolosità del sito

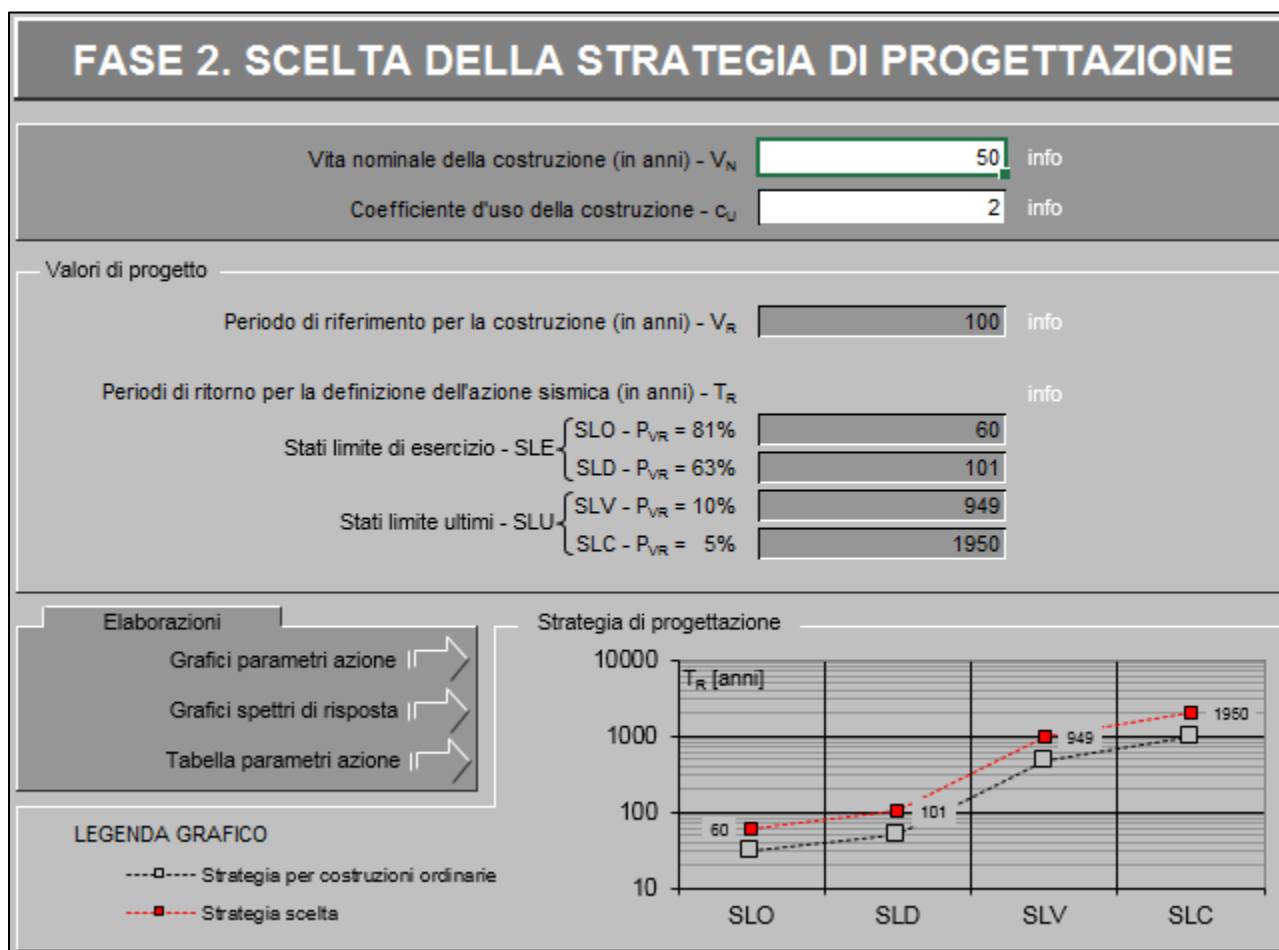


Figura 6.2.3 – Definizione classe d'uso

Per l'analisi si utilizza lo spettro a Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC) scegliendo come classe d'uso la IV (industrie con attività particolarmente pericolose), alla quale corrisponde un coefficiente d'uso pari a 2. A tale stato limite è associata una probabilità di superamento pari al 5% nel periodo di riferimento V_R ; mentre il periodo di ritorno per la definizione dell'azione sismica è pari a 1950 anni.

Per quanto riguarda la categoria di sottosuolo si ipotizza la "B", ovvero depositi di terreno a grana grossa molto addensati; per la categoria topografia si sceglie la T1 corrispondente a terreno pianeggiante.

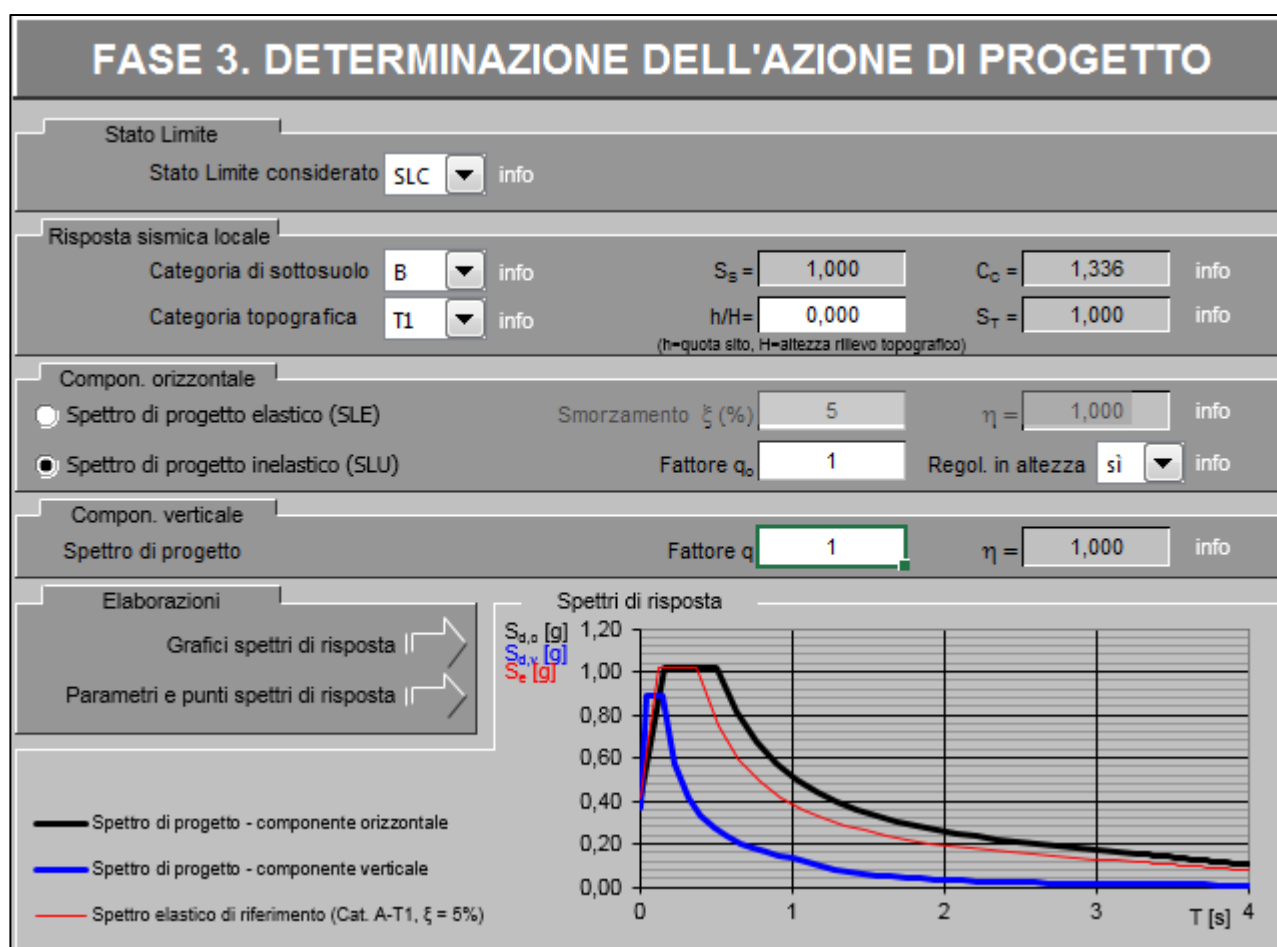


Figura 6.2.4 – Determinazione dell'azione di progetto

Per quanto riguarda il fattore di struttura si sceglie un valore unitario per entrambe le componenti, orizzontale e verticale, in quanto la capacità di dissipazione di una tubazione, qualora sia presente, è ristretta alla sua struttura di supporto. Vista la tipologia di supporti ipotizzata e modellata si opta per la scelta sopra riportata (la tubazione di per sé non è in grado di dissipare energia).

Successivamente si riportano gli spettri ottenuti sia per la componente orizzontale che per la componente verticale.

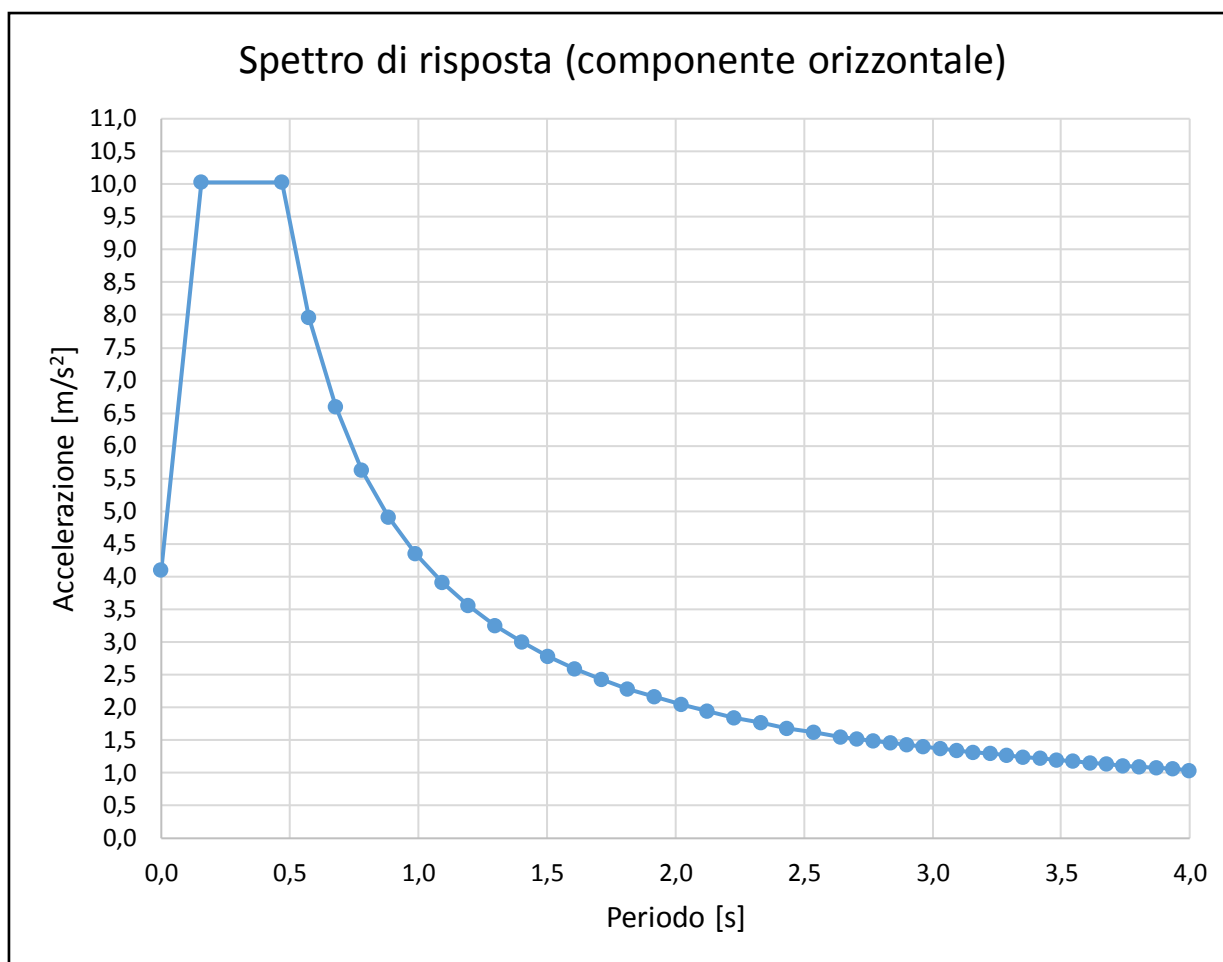


Figura 6.2.5 – Spettro di risposta, componente orizzontale

Nelle immagini 6.2.5 e 6.2.6 sono riportati rispettivamente lo spettro di risposta, componente orizzontale, e i parametri per la costruzione dello spettro.

Parametri indipendenti	
STATO LIMITE	SLC
a_g	0,418 g
$F_{o,1}$	2,443
T_C	0,379 s
S_S	1,000
C_C	1,336
S_T	1,000
q	1,000

Parametri dipendenti	
S	1,000
η	1,000
T_B	0,169 s
T_C	0,506 s
T_D	3,274 s

Figura 6.2.6 – Parametri spettro

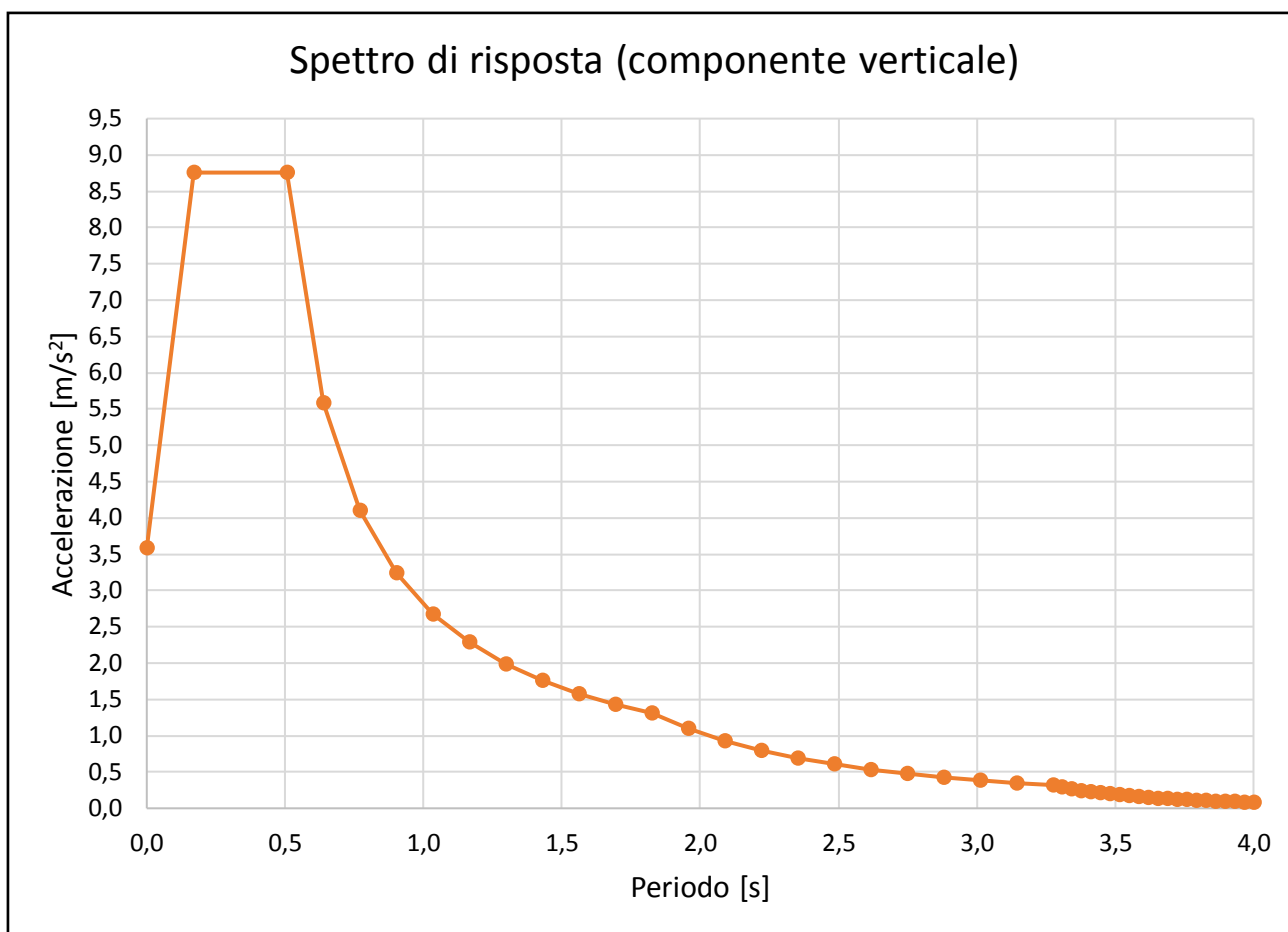


Figura 6.2.7 – Spettro di risposta, componente verticale

Nelle immagini 6.2.7 e 6.2.8 sono riportati rispettivamente lo spettro di risposta, componente verticale, e i parametri per la costruzione dello spettro.

Parametri indipendenti	
STATO LIMITE	SLC
a_{qv}	0,365 g
S_S	1,000
S_T	1,000
q	1,000
T_B	0,050 s
T_C	0,150 s
T_D	1,000 s

Parametri dipendenti	
F_v	2,133
S	1,000
η	1,000

Figura 6.2.8 – Parametri spettro

Definiti gli spettri è necessario scegliere la modalità per combinare gli effetti dei vari modi, CQC o SRSS. Visti i valori dei periodi di vibrazione si opta per la CQC (combinazione quadratica completa), meno conservativa, in quanto alcuni periodi differiscono di pochi punti percentuali. Inoltre il numero di modi considerato in precedenza permette di raggiungere una massa partecipante superiore all'85%, in tutti i casi ed in entrambe le direzioni, come richiesto da normative.

L'Eurocodice, nel capitolo dedicato alle tubazioni, non specifica nel calcolo l'applicazione della componente verticale di accelerazione (in genere meno problematica, in quanto le strutture sono progettate per resistere alle azioni verticali). In tale sede, per una maggiore completezza si considera anche la direzione verticale combinata con le altre direzioni secondo la seguente (NTC 2008, cap. 7):

Gli effetti sulla struttura (sollecitazioni, deformazioni, spostamenti, ecc.) sono combinati successivamente, applicando la seguente espressione:

$$1,00 \cdot E_x + 0,30 \cdot E_y + 0,30 \cdot E_z \quad (7.3.15)$$

con rotazione dei coefficienti moltiplicativi e conseguente individuazione degli effetti più gravosi.

Figura 6.2.9 – Combinazione direzione azione sismica

Successivamente l'azione sismica viene combinata con le altre azioni secondo la seguente (NTC, cap. 3):

3.2.4 COMBINAZIONE DELL'AZIONE SISMICA CON LE ALTRE AZIONI

Nel caso delle costruzioni civili e industriali le verifiche agli stati limite ultimi o di esercizio devono essere effettuate per la combinazione dell'azione sismica con le altre azioni già fornita in § 2.5.3 e che qui si riporta:

$$G_1 + G_2 + P + E + \sum_j \psi_{2j} Q_{kj} \quad (3.2.16)$$

Figura 6.2.10 – Combinazione dell'azione sismica con le altre azioni

Gli effetti del sisma, derivando da combinazione quadratica, hanno valore positivo perciò dovranno essere combinati (sommati o sottratti) con le altre azioni presenti al fine di ottenere gli effetti più sfavorevoli ai fini delle verifiche. Le azioni statiche agenti sulla tubazione sono il peso proprio e il peso del liquido in esso contenuto.

6.3 Verifiche di flessibilità della tubazione secondo API 650

Il capitolo E delle Norme Americane API 650 riguarda il calcolo sismico dei serbatoi e delle componenti ad essi associate. In particolare nella tabella E-8 sono riportati gli spostamenti da applicare al punto di ingresso o uscita delle tubazioni di mandata. Si tratta di spostamenti imposti da applicare nelle tre direzioni: tangenziale, radiale e verticale rispetto al serbatoio. Tali spostamenti vogliono simulare l'effetto dinamico del serbatoio causato dalla presenza del liquido contenuto.

Nella tabella E-8 sotto riportata si fa riferimento a diversi spostamenti imposti a seconda del rapporto di ancoraggio del serbatoio, dipendente appunto dal tipo di collegamento e dal tipo di fondazione presente.

Table E-8—Design Displacements for Piping Attachments

Condition	ASD Design Displacement mm (in.)
Mechanically-anchored tanks Upward vertical displacement relative to support or foundation: Downward vertical displacement relative to support or foundation: Range of horizontal displacement (radial and tangential) relative to support or foundation:	25 (1) 13 (0.5) 13 (0.5)
Self-anchored tanks Upward vertical displacement relative to support or foundation: Anchorage ratio less than or equal to 0.785: Anchorage ratio greater than 0.785: Downward vertical displacement relative to support or foundation: For tanks with a ringwall/mat foundation: For tanks with a berm foundation: Range of horizontal displacement (radial and tangential) relative to support or foundation	25 (1) 100 (4) 13 (0.5) 25 (1) 50 (2)

Figura 6.3.1 – Spostamenti imposti API 650

Per le tubazioni in esame si ipotizza un rapporto di ancoraggio maggiore di 0,785, secondo il quale la tubazione deve essere in grado di sostenere i seguenti spostamenti imposti in corrispondenza del collegamento con il serbatoio:

- Uno spostamento tangenziale (al mantello del serbatoio) pari a 50 mm;
- Uno spostamento radiale (normale al mantello del serbatoio) pari a 50 mm;
- Uno spostamento verticale pari a 25 mm.

Il calcolo degli effetti dello spostamento è eseguito imprimendo uno spostamento alternativamente in una delle direzioni interessate (tangenziale, radiale, verticale).

6.4 Risultati delle analisi e confronto dei risultati

Nel seguente paragrafo si riportano i risultati delle analisi, nonché gli output del programma di calcolo, per le tubazioni rettilinee e per le tubazioni a “L” precedentemente riportate. La variabile principale è rappresentata dalla lunghezza delle varie configurazioni, con l’obiettivo di valutarne l’influenza sull’analisi con spettro di risposta e sulle verifiche previste dalla Norma API 650.

6.4.1 Tubazioni rettilinee

Di seguito si riportano i dati raccolti in tabelle per le 7 differenti configurazioni aventi le seguenti lunghezze: 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m. Per quanto riguarda l’analisi modale con spettro di risposta si riportano i valori di sforzo normale e di momento flettente (minimi e massimi) attorno ai due assi principali derivanti dall’involuppo delle sollecitazioni, considerando le varie combinazioni. Inoltre si riportano gli spostamenti massimi del punto di ingresso della tubazione nel serbatoio, e gli spostamenti massimi lungo la tubazione. Per quanto concerne gli spostamenti imposti delle API 650 si riportano le sollecitazioni massime e minime come effettuato per l’analisi con spettro. I risultati faranno riferimento alla condizione di tubo pieno (più gravosa ai fini delle verifiche).

Nella pagina successiva si riporta la convenzione di segno per gli elementi utilizzati; avendo scelto come asse verticale l’asse “z”, M_y e M_z sono invertiti rispetto all’immagine 6.4.1 (stesso discorso per i tagli).

End Forces and Rotations

Positive end forces and rotations for 3D engineering beams are those acting on the element nodes in local directions, and are as follows:

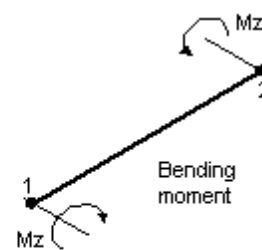
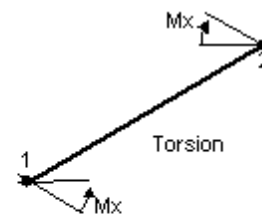
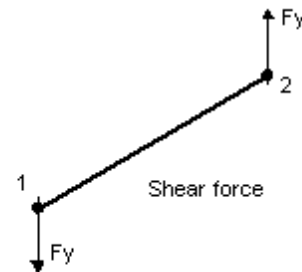
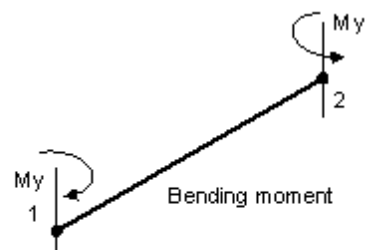
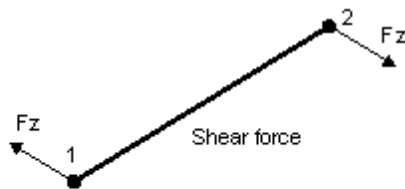
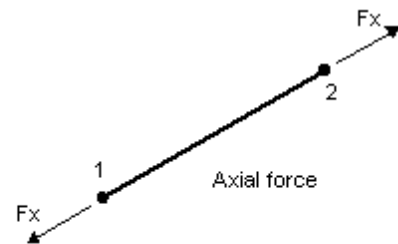
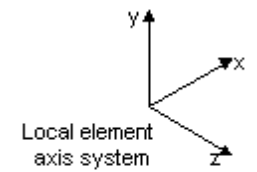


Figura 6.4.1 – Convenzioni di segno per gli elementi costituenti la tubazione

TUBAZIONE RETTILINEA - L = 5 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,00	3,53	-4,67	2,80	0,10	4,25	-26250,23	-26250,23	-4,36	2,18	0,00	0,00
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
4,12E-03		0,29		0,00		0,00	0,00	-4,36	2,18	0,00	304,71
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
4,12E-03		0,29		-0,10		0,00	0,00	-289,65	289,39	0,00	0,00

Tabella 6.4.1 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione rettilinea

È possibile osservare come spostamenti e sollecitazioni abbiano valori limitati nel caso di analisi con spettro di risposta; ciò è dovuto al fatto che la tubazione è particolarmente rigida e i modi di vibrare hanno periodi contenuti. Al contrario nel caso di spostamenti imposti (API) le sollecitazioni hanno valori elevati (tubazione molto rigida a causa della contenuta lunghezza).

TUBAZIONE RETTILINEA - L = 10 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,00	7,03	-5,38	2,01	0,12	17,74	-13125,11	-13125,11	-4,36	2,18	0,00	0,00
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
1,59E-02		0,86		0,00		0,00	0,00	-4,36	2,18	0,00	76,87
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
1,59E-02		2,00		-0,10		0,00	0,00	-93,65	58,69	0,00	0,00

Tabella 6.4.2 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione rettilinea

Si può osservare come vi sia una leggera crescita delle sollecitazioni derivanti dall'analisi con spettro, in quanto l'incremento della lunghezza porta all'aumento della flessibilità della tubazione; per la stessa ragione si nota una diminuzione delle sollecitazioni dovute agli spostamenti imposti.

TUBAZIONE RETTILINEA - L = 15 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,00	10,52	-4,67	2,81	0,58	51,66	-8750,12	-8750,12	-4,36	2,18	0,00	0,00
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
3,45E-02		1,64		0,00		0,00	0,00	-4,36	2,18	0,00	34,22
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
3,45E-02		11,34		-0,10		0,00	0,00	-73,66	24,58	0,00	0,00

Tabella 6.4.3 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione rettilinea

Si può osservare anche in questo caso la crescita dell'entità delle sollecitazioni derivanti dall'analisi con spettro, in quanto l'incremento della lunghezza porta all'aumento della flessibilità della tubazione; per la stessa ragione si nota una diminuzione delle sollecitazioni dovute agli spostamenti imposti.

TUBAZIONE RETTILINEA - L = 20 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,00	14,67	-4,68	2,80	0,52	88,99	-6562,55	-6562,55	-4,36	2,18	0,00	0,00
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
5,83E-02		2,14		0,00		0,00	0,00	-4,36	2,18	0,00	28,56
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
5,83E-02		33,34		-0,10		0,00	0,00	-73,52	24,69	0,00	0,00

Tabella 6.4.4 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione rettilinea

Si può osservare anche in questo caso la crescita dell'entità delle sollecitazioni derivanti dall'analisi con spettro, in quanto l'incremento della lunghezza porta all'aumento della flessibilità della tubazione (i periodi dei modi principali rientrano nella zona di amplificazione dello spettro); per la stessa ragione si nota una diminuzione delle sollecitazioni dovute agli spostamenti imposti.

TUBAZIONE RETTILINEA - L = 30 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,00	21,04	-4,37	2,19	1,56	143,88	-4375,45	-4375,45	-4,36	2,18	0,00	0,00
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,12		2,42		0,00		0,00	0,00	-4,36	2,18	0,00	19,26
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,12		77,56		-0,10		0,00	0,00	-73,53	24,69	0,00	0,00

Tabella 6.4.5 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione rettilinea

Si può osservare anche in questo caso la crescita dell'entità delle sollecitazioni derivanti dall'analisi con spettro, in quanto l'incremento della lunghezza porta all'aumento della flessibilità della tubazione (i periodi dei modi principali rientrano nella zona di amplificazione dello spettro); per la stessa ragione si nota una diminuzione delle sollecitazioni dovute agli spostamenti imposti.

TUBAZIONE RETTILINEA - L = 40 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,00	28,21	-4,36	2,18	3,64	144,23	-3281,25	-3281,25	-4,36	2,18	0,00	0,00
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,20		1,98		0,00		0,00	0,00	-4,36	2,18	0,00	4,81
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,20		139,23		-0,10		0,00	0,00	-73,53	24,70	0,00	0,00

Tabella 6.4.6 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione rettilinea

Si nota anche in questo caso la crescita dell'entità delle sollecitazioni derivanti dall'analisi con spettro, in quanto l'incremento della lunghezza porta all'aumento della flessibilità della tubazione (incremento meno marcato in quanto i periodi principali sono esterni alla zona amplificazione dello spettro).

TUBAZIONE RETTILINEA - L = 50 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,00	35,56	-4,36	2,18	13,52	146,32	-2625,54	-2625,54	-4,36	2,18	0,00	0,00
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,30		1,78		0,00		0,00	0,00	-4,36	2,18	0,00	3,08
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,30		210,24		-0,10		0,00	0,00	-73,51	24,70	0,00	0,00

Tabella 6.4.7 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione rettilinea

Si può osservare anche in quest'ultimo caso la crescita dell'entità delle sollecitazioni derivanti dall'analisi con spettro, in quanto l'incremento della lunghezza porta all'aumento della flessibilità della tubazione (incremento meno marcato in quanto i periodi principali sono esterni alla zona amplificazione dello spettro).

Si procede ora al confronto dei risultati ottenuti mediante l'utilizzo di grafici che permettono di visualizzare l'andamento sia delle sollecitazioni (le più gravose) che degli spostamenti, al variare della lunghezza della tubazione.

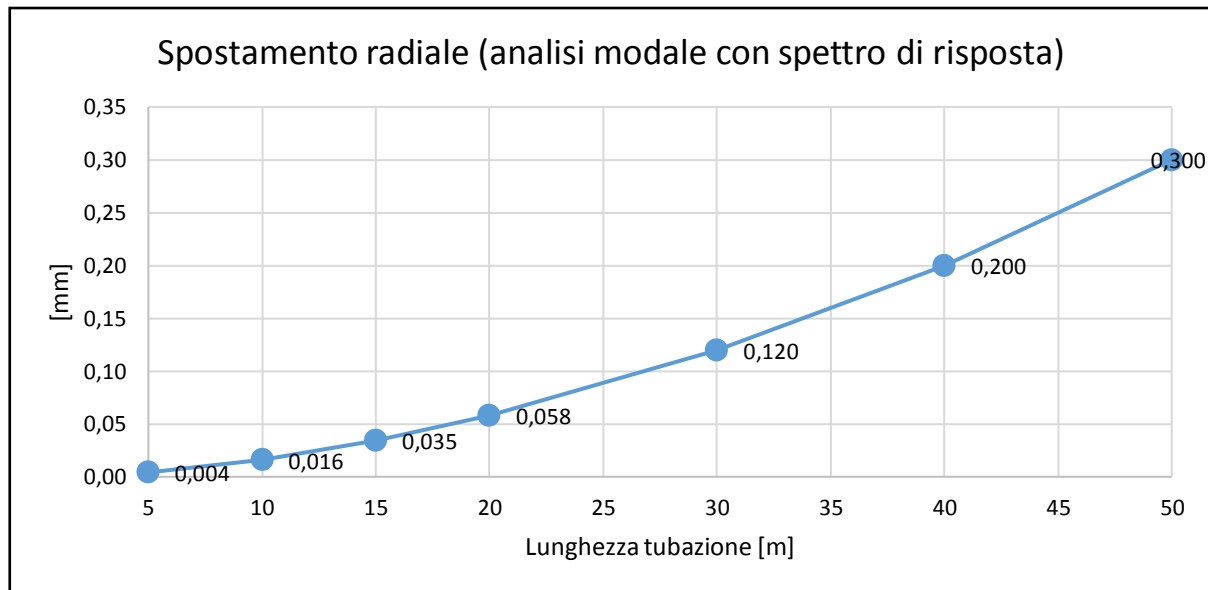


Figura 6.4.2 – Spostamento radiale

In figura 6.4.2 è riportato l'andamento dello spostamento in direzione radiale in corrispondenza del punto di uscita della tubazione dal serbatoio, derivante dall'analisi modale con spettro di risposta. È possibile osservare l'andamento monotono del grafico, in quanto i valori aumentano al crescere della lunghezza della tubazione. Ciò è dovuto sostanzialmente al settimo modo di vibrare delle tubazioni stesse; si tratta infatti di un modo traslazionale lungo l'asse del tubo (movimento reso possibile dall'incastro cedevole caratterizzante il collegamento con il serbatoio). Tale modo di vibrare ha un'elevata massa partecipante in questa direzione. Al crescere della lunghezza aumenta la massa coinvolta e quindi l'ampiezza del movimento considerato.

A conferma di quanto sopra, si riporta il grafico dello sforzo normale lungo la tubazione, derivante sempre da analisi con spettro (il valore positivo dell'azione significa trazione, ed è sempre positivo in quanto deriva da una combinazione quadratica, CQC). Si nota come l'andamento del grafico sia pressoché lineare all'aumentare della lunghezza della tubazione.

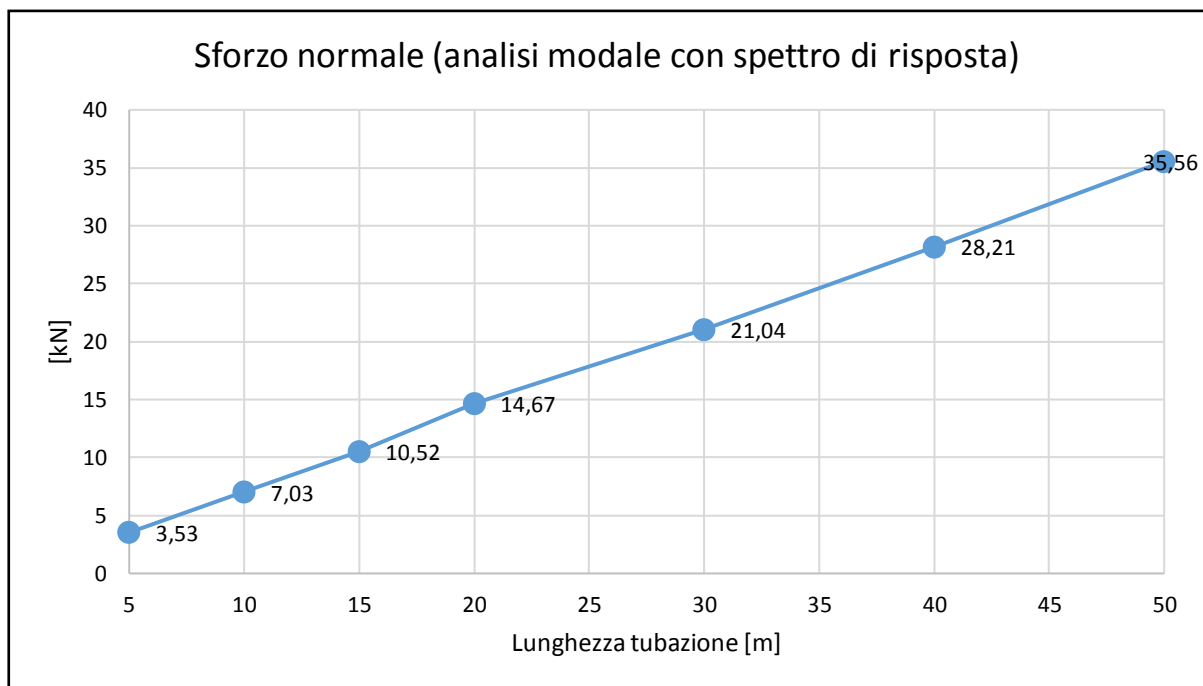


Figura 6.4.3 – Sforzo normale

Successivamente si riporta l'andamento dello spostamento tangenziale della tubazione nel punto di attacco del serbatoio, ottenuto da analisi con spettro.

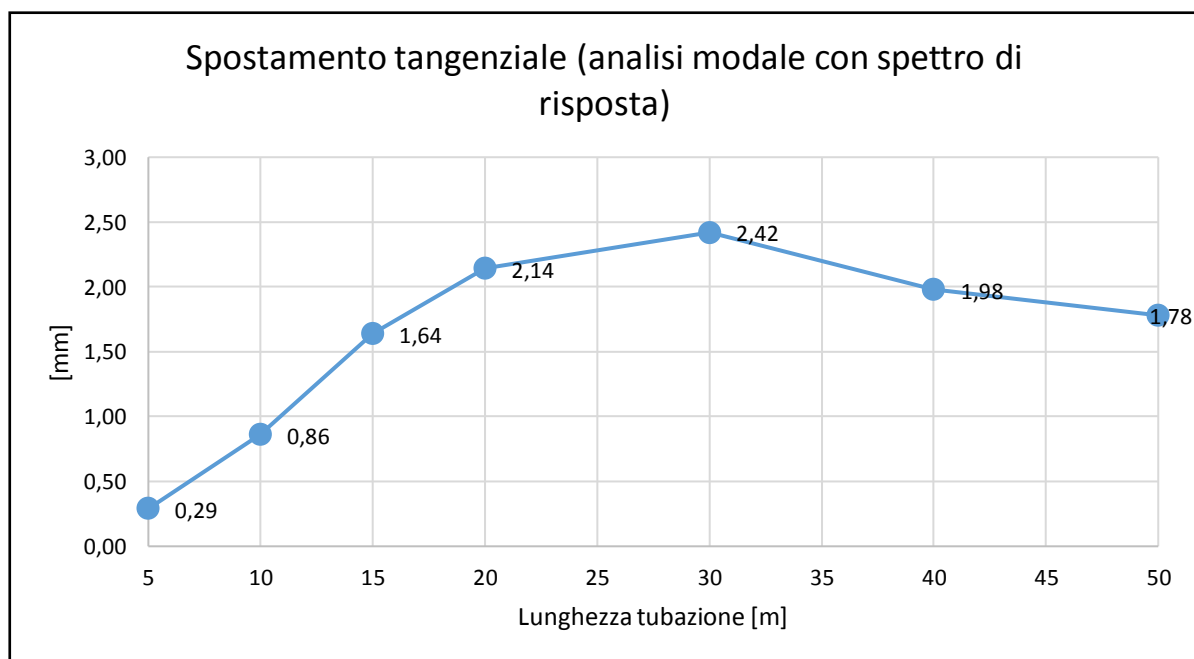


Figura 6.4.4 – Spostamento tangenziale

Osservando l'andamento dello spostamento tangenziale nel punto di attacco del serbatoio è possibile notare come vi sia un massimo in corrispondenza della tubazione avente lunghezza pari a 30 m.

Tale aspetto dipende dalle caratteristiche dinamiche del tubo stesso, infatti i primi due modi di vibrare di tale configurazione ricadono nella zona di massima amplificazione dello spettro. Al crescere della lunghezza della tubazione aumentano i periodi di vibrazione, i primi modi vanno quindi a cadere a destra del plateau dello spettro, e risultano meno eccitati dall'azione sismica. A conferma di quanto riportato si osservi nella figura sottostante l'andamento del momento attorno all'asse z ; tali valori sono raggiunti nell'incastro in corrispondenza dell'ingresso della tubazione nel muro della vasca di contenimento del serbatoio.

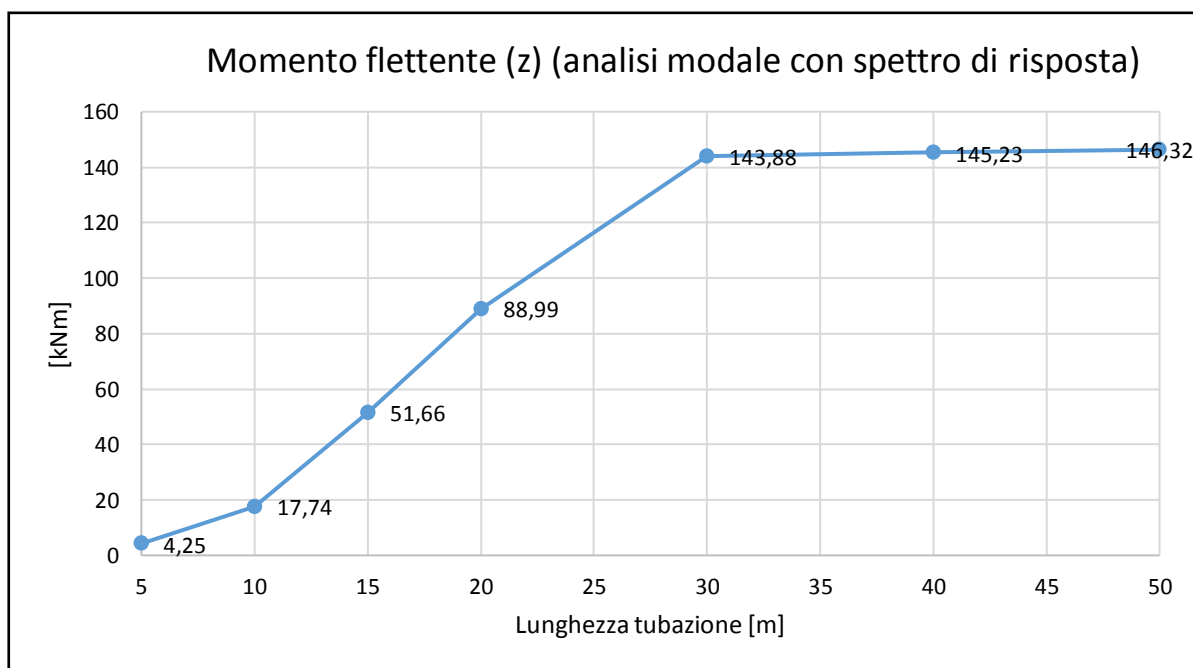


Figura 6.4.5 – Momento flettente attorno a z

Per quanto riguarda il momento flettente attorno all'asse y non si osservano particolari variazioni, segno del fatto che la componente verticale del sisma risulta essere poco influente anche sulle tubazioni. I valori pressoché costanti di tale sollecitazione dipendono dalla presenza del peso proprio e del liquido contenuto.

Successivamente (fig 6.4.6) si riporta l'andamento dello sforzo normale nella tubazione causato da uno spostamento imposto in direzione radiale rispetto al serbatoio, come previsto da norme API 650. Si nota l'entità di tali azione, che difficilmente soddisferà le verifiche per le tubazioni (in particolare le più corte). I valori tendono a diminuire in quanto l'accorciamento elastico è distribuito su una lunghezza maggiore.

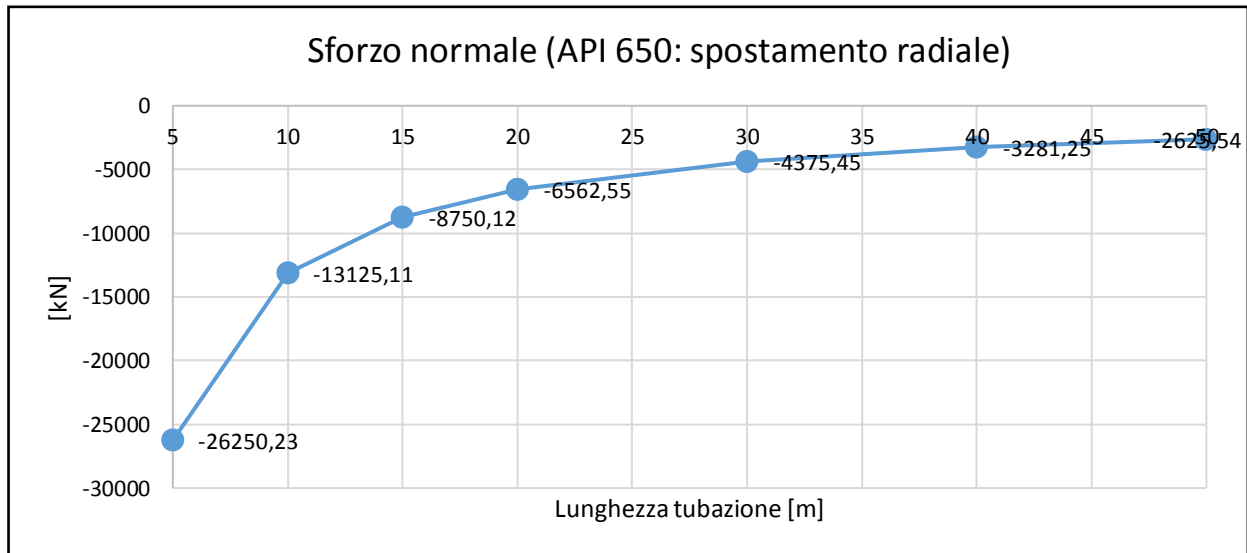


Figura 6.4.6 – Sforzo normale

Successivamente è riportato l'andamento del momento flettente attorno a z generato da uno spostamento imposto in direzione tangenziale rispetto al serbatoio. Si osserva come tale sollecitazione diminuisca al crescere della lunghezza e quindi della flessibilità della tubazione in oggetto (azione valutata in corrispondenza della vasca di contenimento).

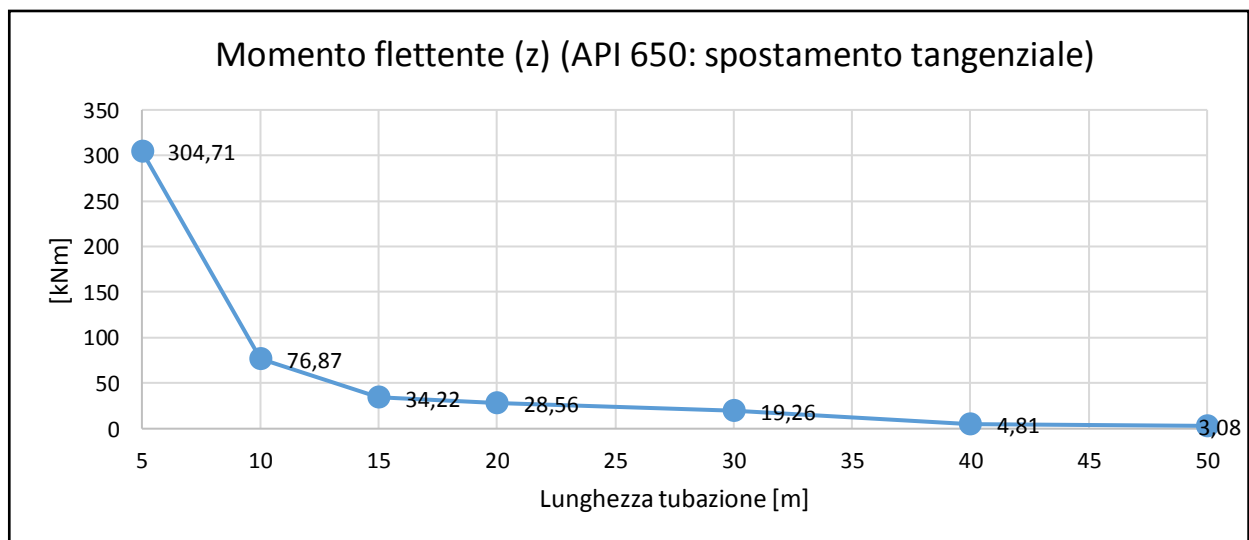


Figura 6.4.7 – Momento flettente attorno a z

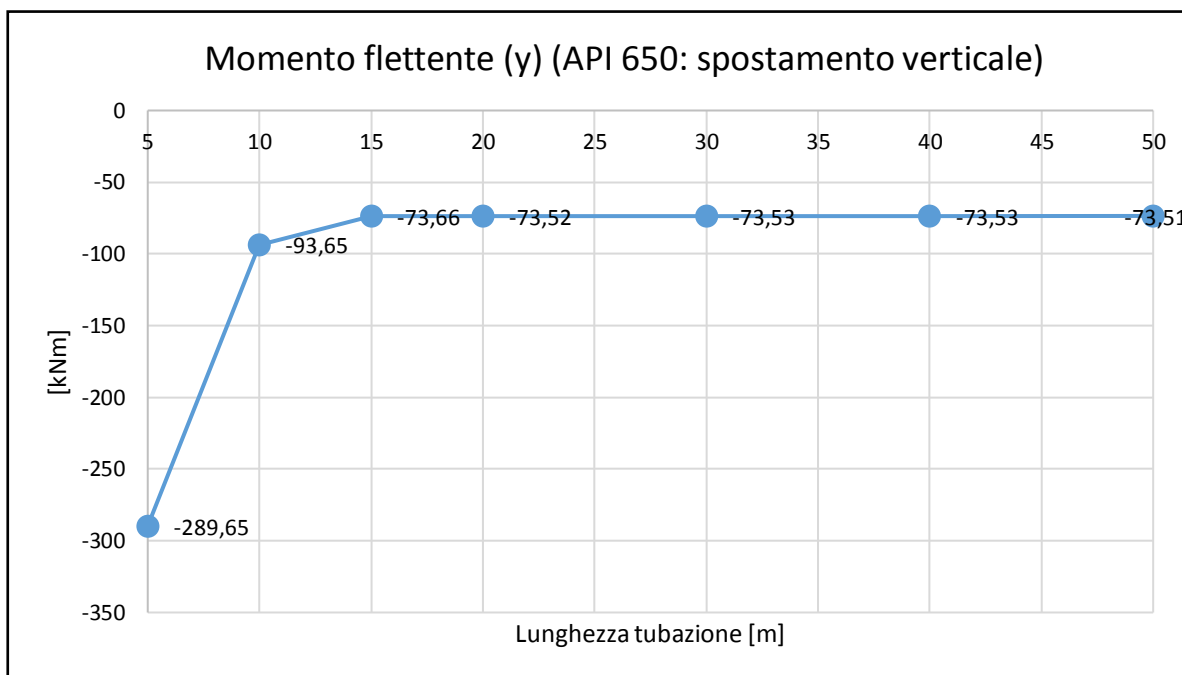


Figura 6.4.8 – Momento flettente attorno a y

In ultimo si riporta (fig 6.4.8) l'andamento del momento flettente dovuto ad uno spostamento verticale imposto. Si osserva come tenda ad assestarsi attorno ad un valore costante al crescere della lunghezza (oltre i 15 m). Ciò dipende dal fatto che la tubazione tenda a sollevarsi dai primi due appoggi mantenendo la stessa deformata indipendentemente dall'aumento della lunghezza (azione valutata in corrispondenza del serbatoio).

Successivamente si riportano in tabella i valori massimi e minimi delle reazioni verticali in corrispondenza dei supporti lungo le tubazioni, allo scopo di valutare se le condotte, a causa della componente verticale dell'accelerazione, tendano o meno a sollevarsi.

TUBAZIONI RETTILINEE						
VALORI REAZIONI VERTICALI NEI SUPPORTI [kN]						
Valore	L = 10 m	L = 15 m	L = 20 m	L = 30 m	L = 40 m	L = 50 m
min	9,58	9,87	10,11	10,48	10,48	10,48
max	11,39	10,87	10,69	10,48	10,48	10,48

Tabella 6.4.8 – Reazioni verticali

Dalla tabella sopra riportata è possibile osservare come tutte le reazioni assumano valore positivo. Ciò significa che la tubazione non tende a sollevarsi da nessun supporto, in tutte le combinazioni derivanti da analisi modale con spettro di risposta. Inoltre si osserva come la variazione dei valori sia piuttosto contenuta (al crescere della lunghezza in particolare), segno del fatto che la componente verticale dell'azione sismica non influenza in modo significativo i risultati ottenuti. Tale aspetto dipende dal fatto che il problema sia essenzialmente piano come dimostrato al punto 5.3.

In conclusione si riporta una considerazione relativa all'entità degli spostamenti trasversali lungo le tubazioni. Si noti che i supporti verticali per come sono stati modellati offrono la possibilità di scorrimento trasversale. Essi presentano inoltre dei "fine corsa" laterali aventi la funzione di evitare la caduta della tubazione dal sostegno. In genere per tubazioni fino a 20 m gli spostamenti trasversali assumono valori contenuti (3,3 cm nel caso della tubazione rettilinea di 20 m). Per lunghezze superiori, difficilmente utilizzate nelle vasche di contenimento, ma schematizzate precedentemente al fine di avere una panoramica completa circa l'influenza della lunghezza delle condotte sui risultati, è necessario utilizzare supporti diversi (i quali limitino i movimenti trasversali, si vedano le tipologie riportate al punto 5.2).

6.4.2 Tubazioni a "L"

Di seguito si riportano i dati raccolti in tabelle per le 14 differenti configurazioni analizzate, aventi un lato fisso e l'altro variabile con le seguenti lunghezze: 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m. Per quanto riguarda l'analisi modale con spettro di risposta si riportano i valori di sforzo normale e di momento flettente attorno ai due assi principali (minimi e massimi) derivanti dall'involuppo delle sollecitazioni, considerando le varie combinazioni. Inoltre si riportano gli spostamenti massimi del punto di ingresso della tubazione del serbatoio. Per quanto concerne gli spostamenti imposti delle API 650 si riportano le sollecitazioni massime e minime come effettuato per l'analisi con spettro. Si procede mostrando i risultati del caso 1 (lato orizzontale fisso pari a 20 m).

TUBAZIONE, L1 = 20 m - L2 = 5 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
6,46	19,31	-7,67	3,56	1,07	36,07	-61,23	0,00	-6,42	3,72	0,00	305,57
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,54		2,40		0,00		-0,55	0,00	-6,42	3,72	0,00	11,56
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,54		40,26		0,00		0,00	0,00	-73,38	24,49	0,00	0,00

Tabella 6.4.8 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a “L” caso 1

Osservando i valori derivanti dall'analisi con spettro è possibile notare come già in questo primo caso le sollecitazioni non siano trascurabili come nel primo caso di tubazione rettilinea. Infatti i primi modi di vibrare cadono nella zona di massima amplificazione dello spettro.

TUBAZIONE, L1 = 20 m - L2 = 10 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
6,87	19,11	-5,94	3,75	1,55	40,63	-7,70	0,00	-4,92	2,24	0,00	77,12
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,50		2,47		0,00		-0,38	0,00	-4,92	2,24	0,00	7,71
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,50		44,91		-0,14		0,00	0,00	-73,21	23,93	0,00	0,00

Tabella 6.4.9 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a "L" caso 1

Si nota come le sollecitazioni derivanti dall'applicazione degli spostamenti imposti (API) tendono a diminuire al crescere della lunghezza della tubazione e quindi della sua flessibilità.

TUBAZIONE, L1 = 20 m - L2 = 15 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
4,11	19,07	-5,76	3,38	2,58	51,45	-2,28	0,00	-5,44	4,00	0,00	34,26
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,48		2,58		0,00		-0,28	0,00	-5,44	4,00	0,00	5,93
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,48		50,34		-0,15		0,00	0,00	-73,34	24,46	0,00	0,00

Tabella 6.4.10 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a “L” caso 1

Si nota anche in questo caso come le sollecitazioni derivanti dall'applicazione degli spostamenti imposti (API) tendono a diminuire al crescere della lunghezza della tubazione e quindi della sua flessibilità.

TUBAZIONE, L1 = 20 m - L2 = 20 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
4,09	19,83	-5,51	3,85	2,96	81,34	-0,92	0,00	-5,43	4,00	0,00	19,27
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,51		2,52		0,00		-0,24	0,00	-5,43	4,00	0,00	4,82
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,51		53,96		-0,15		0,00	0,00	-73,32	24,46	0,00	0,00

Tabella 6.4.11 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a "L" caso 1

Si nota anche in questo caso come le sollecitazioni derivanti dall'applicazione degli spostamenti imposti (API) tendono a diminuire al crescere della lunghezza della tubazione e quindi della sua flessibilità. Diversamente, per quanto riguarda l'analisi con spettro, si nota un incremento delle sollecitazioni, dovute all'aumento della massa oscillante.

TUBAZIONE, L1 = 20 m - L2 = 30 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
6,56	24,67	-5,59	4,00	1,75	144,34	-0,28	0,00	-5,43	4,00	0,00	8,56
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,49		2,46		0,00		-0,17	0,00	-5,43	4,00	0,00	3,60
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,49		78,23		-0,15		0,00	0,00	-73,31	24,46	0,00	0,00

Tabella 6.4.12 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a “L” caso 1

Si nota anche in questo caso come le sollecitazioni derivanti dall'applicazione degli spostamenti imposti (API) tendono ad avere valori piuttosto limitati. Diversamente, per quanto riguarda l'analisi con spettro, si nota un incremento delle sollecitazioni, dovute all'aumento della massa oscillante.

TUBAZIONE, L1 = 20 m - L2 = 40 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
3,35	33,12	-5,46	4,06	1,93	156,34	-0,12	0,00	-5,46	4,06	0,00	4,82
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,54		2,39		0,00		-0,14	0,00	-5,46	4,06	0,00	2,75
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,54		138,45		-0,16		0,00	0,00	-73,33	24,56	0,00	0,00

Tabella 6.4.13 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a “L” caso 1

Si nota anche in questo caso come le sollecitazioni derivanti dall'applicazione degli spostamenti imposti (API) tendono ad avere valori piuttosto limitati. Diversamente, per quanto riguarda l'analisi con spettro, si nota un incremento delle sollecitazioni, dovute all'aumento della massa oscillante (incrementi sempre meno marcati in quanto i primi modi di vibrare hanno periodi elevati, oltre la zona di amplificazione dello spettro).

TUBAZIONE, L1 = 20 m - L2 = 50 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
3,81	37,64	-5,47	4,07	2,35	158,23	-0,06	0,00	-5,46	4,07	0,00	3,08
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,53		2,43		0,00		-0,11	0,00	-5,46	4,07	0,00	2,26
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,53		196,00		-0,16		0,00	0,00	-73,36	24,67	0,00	0,00

Tabella 6.4.14 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a “L” caso 1

Si nota anche in questo caso come le sollecitazioni derivanti dall'applicazione degli spostamenti imposti (API) tendono ad avere valori piuttosto limitati. Diversamente, per quanto riguarda l'analisi con spettro, si nota un incremento delle sollecitazioni, dovute all'aumento della massa oscillante (incrementi sempre meno marcati in quanto i primi modi di vibrare hanno periodi elevati, oltre la zona di amplificazione dello spettro).

Si procede ora al confronto dei risultati ottenuti mediante l'utilizzo di grafici che permettono di visualizzare l'andamento sia delle sollecitazioni (le più gravose) che degli spostamenti, al variare della lunghezza della tubazione. Si riportano in successione gli andamenti degli spostamenti radiali e tangenziali della tubazione nel punto di attacco con il serbatoio (derivanti da analisi con spettro di risposta).

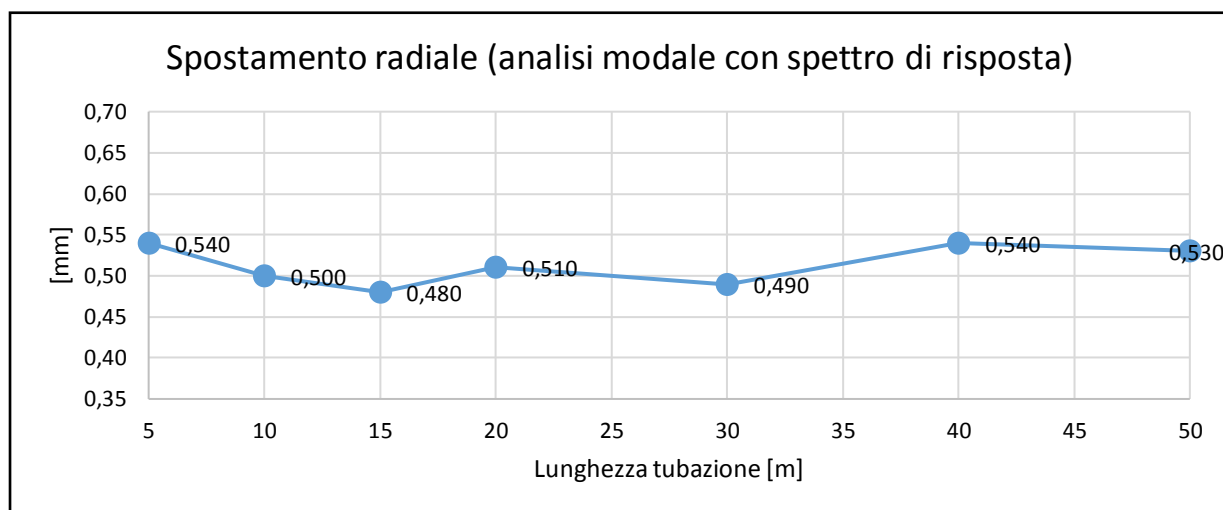


Figura 6.4.9 – Spostamento radiale

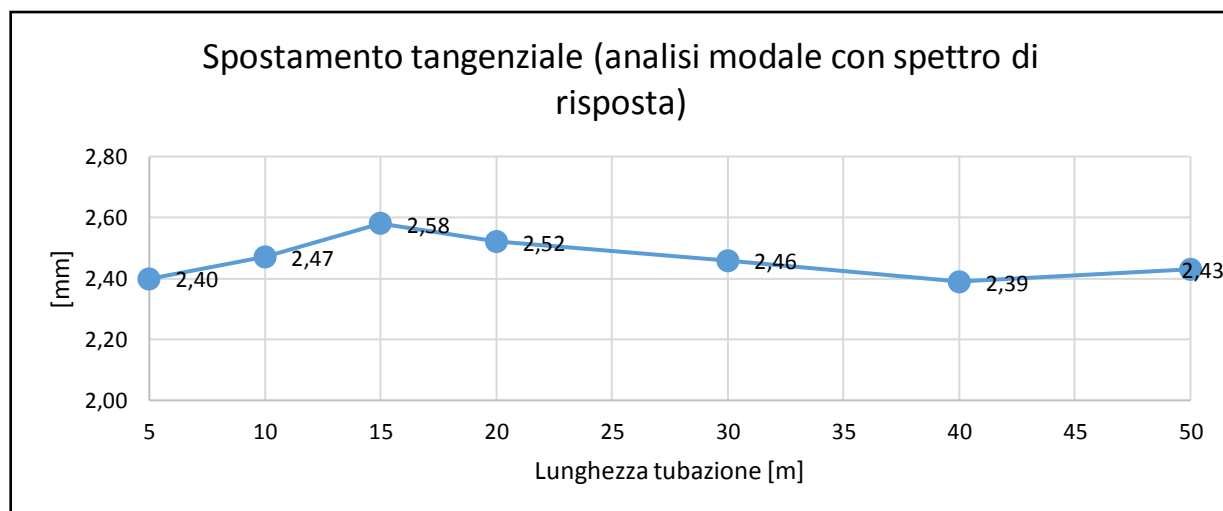


Figura 6.4.10 – Spostamento tangenziale

In generale non si notano degli andamenti ben definiti come nel caso delle tubazioni rettilinee, ma la tendenza ad assestarsi attorno a valori medi, principalmente per due aspetti: il primo dipende dal fatto che L_1 ha lunghezza costante pari a 20 m, perciò l'incremento di lunghezza di L_2 non causa particolare effetto al ramo uscente direttamente dal serbatoio.

Il secondo aspetto dipende dalla natura geometrica delle configurazioni ad “L”, infatti anche geometrie limitate in estensione possiedono di per sé una maggiore flessibilità, risultando sensibili fin da subito all’azione sismica. Viceversa, per quanto riguarda le verifiche API, risultano meno suscettibili agli spostamenti imposti proprio per le motivazioni esposte.

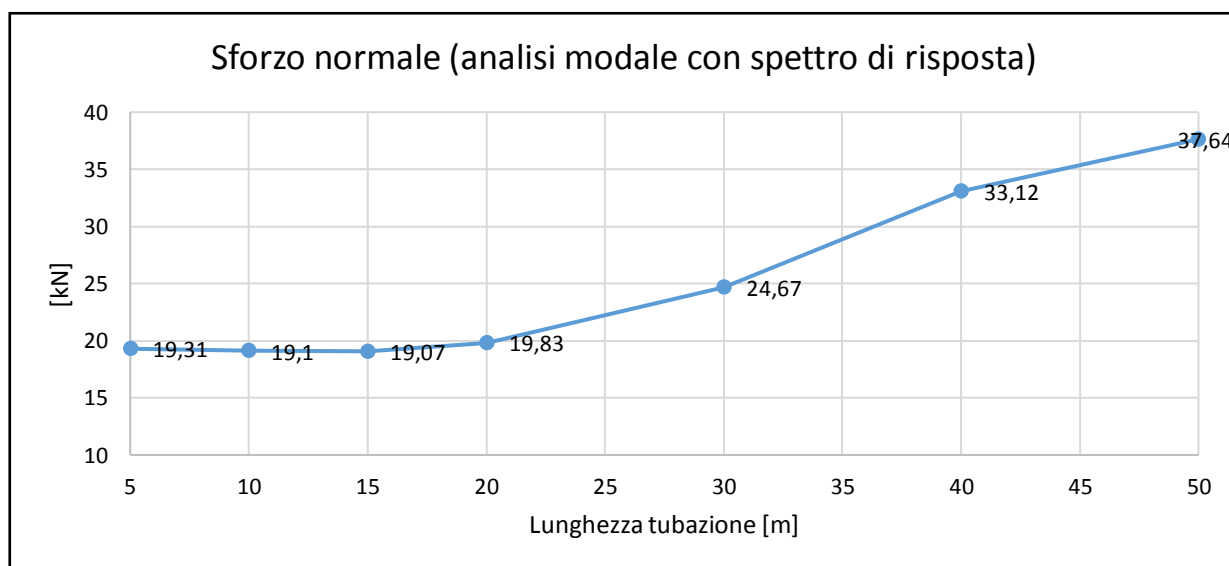


Figura 6.4.11 – Sforzo normale

In figura 6.4.11 è riportato l’andamento dello sforzo normale massimo lungo la tubazione (valutato in corrispondenza della vasca di contenimento); si osserva un incremento dell’azione interna considerata, generata dall’aumento della lunghezza del ramo verticale della tubazione. In tali circostanze si verifica una crescita della massa partecipante in tale direzione che, unita all’incremento di flessibilità della condotta, causa maggiori spostamenti e maggiori sollecitazioni.

Successivamente si riporta l’andamento del momento flettente massimo attorno a z derivante da analisi con spettro (valutato in corrispondenza della vasca di contenimento). Si nota una crescita all’aumentare della lunghezza dovuta sostanzialmente all’incremento dell’oscillazione lungo il ramo verticale, che causa a sua volta un incremento del momento flettente attorno a z.

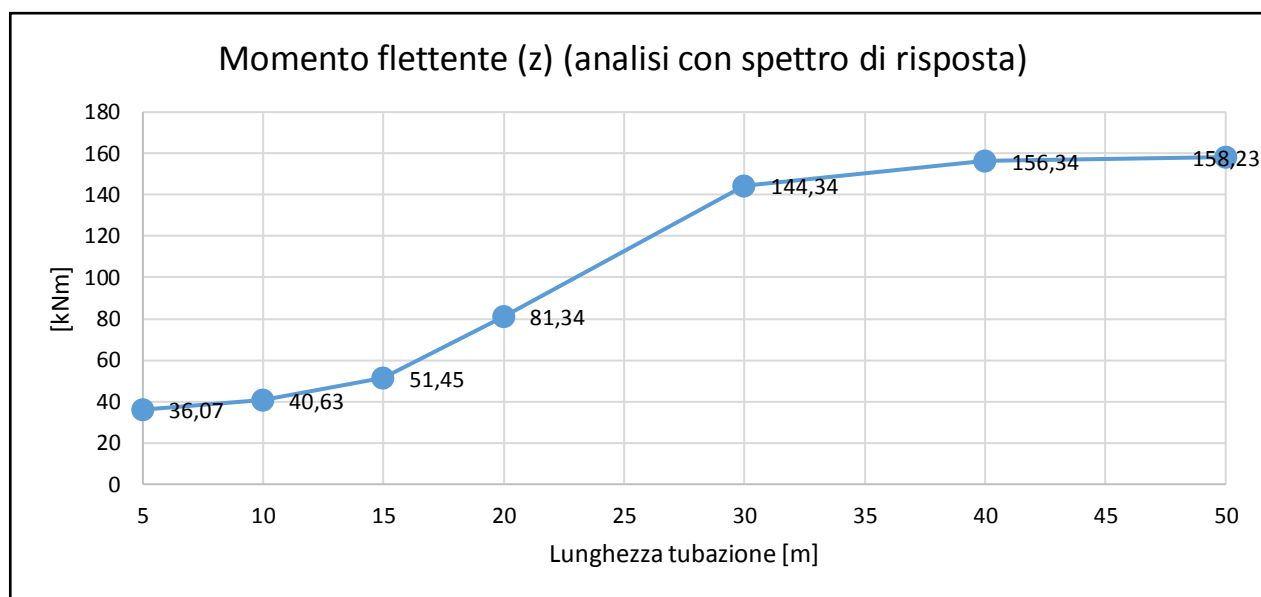


Figura 6.4.12 – Momento flettente attorno a z

Successivamente si riportano gli andamenti dello sforzo normale (nel ramo orizzontale) e del momento flettente attorno a z (vasca di contenimento) generati da uno spostamento imposto in direzione radiale, rispetto al serbatoio, di 50 mm, come previsto da norme API.

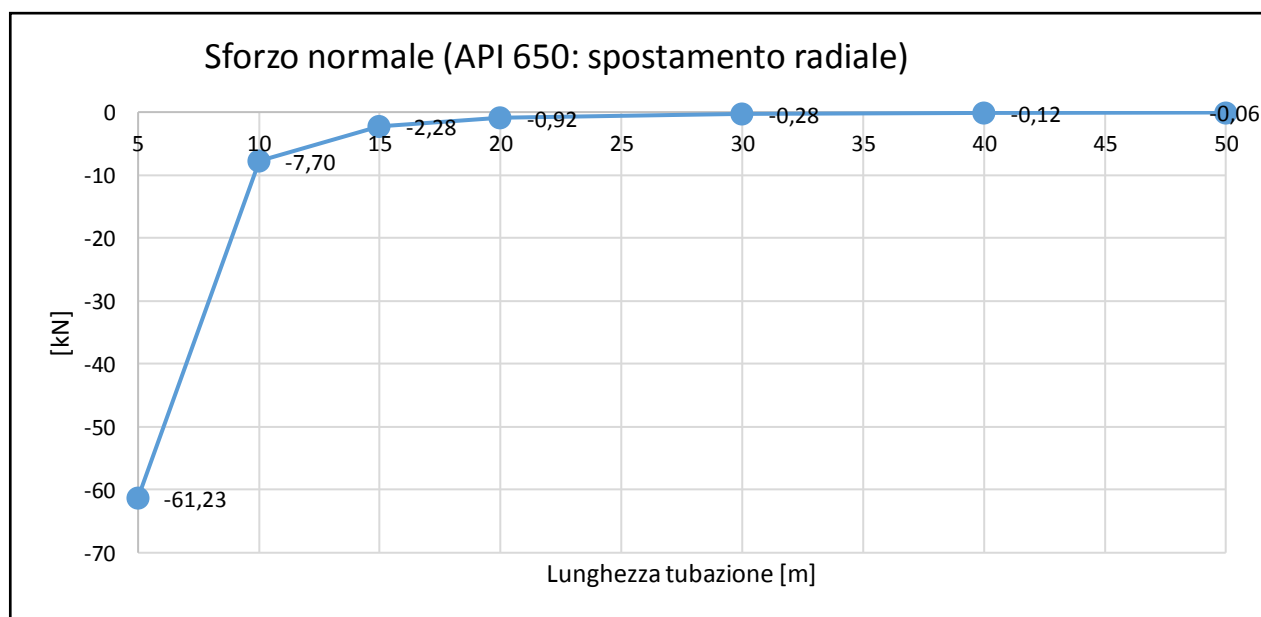


Figura 6.4.13 – Sforzo normale

Si può osservare come in entrambi i grafici (6.4.13-14) l'andamento sia monotono, infatti abbiamo un decremento delle sollecitazioni all'aumentare della lunghezza della tubazione, dovuto sostanzialmente all'aumento di flessibilità della stessa.

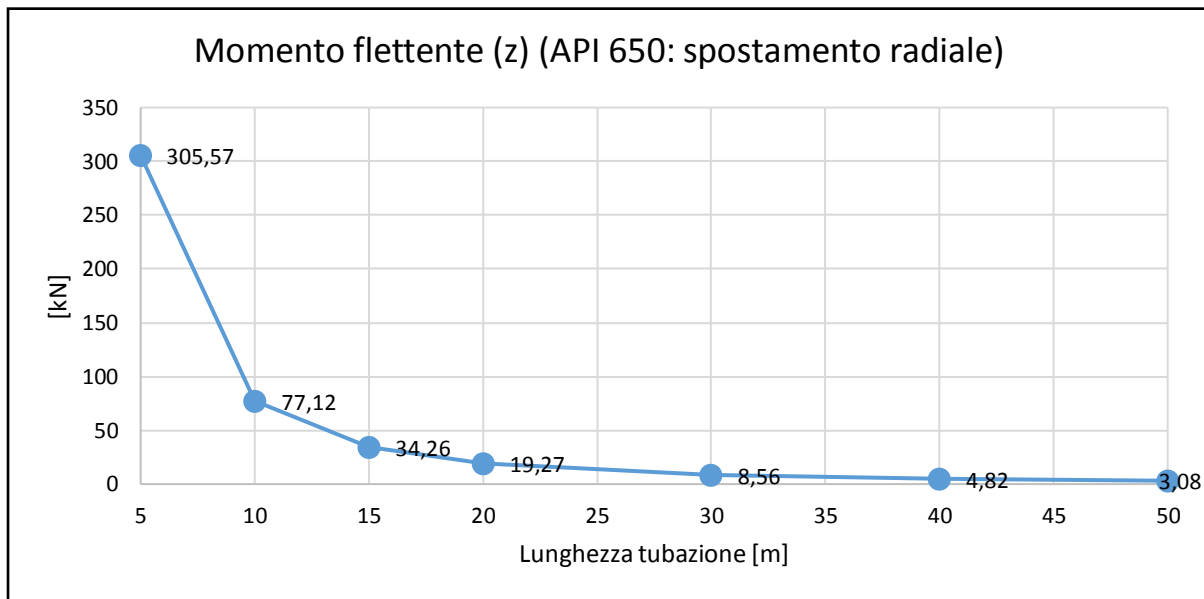


Figura 6.4.14 – Momento flettente attorno a z

Successivamente si riporta sempre l'andamento del momento flettente attorno a z (vasca di contenimento), dovuto però ad uno spostamento imposto tangenziale alla superficie del serbatoio.

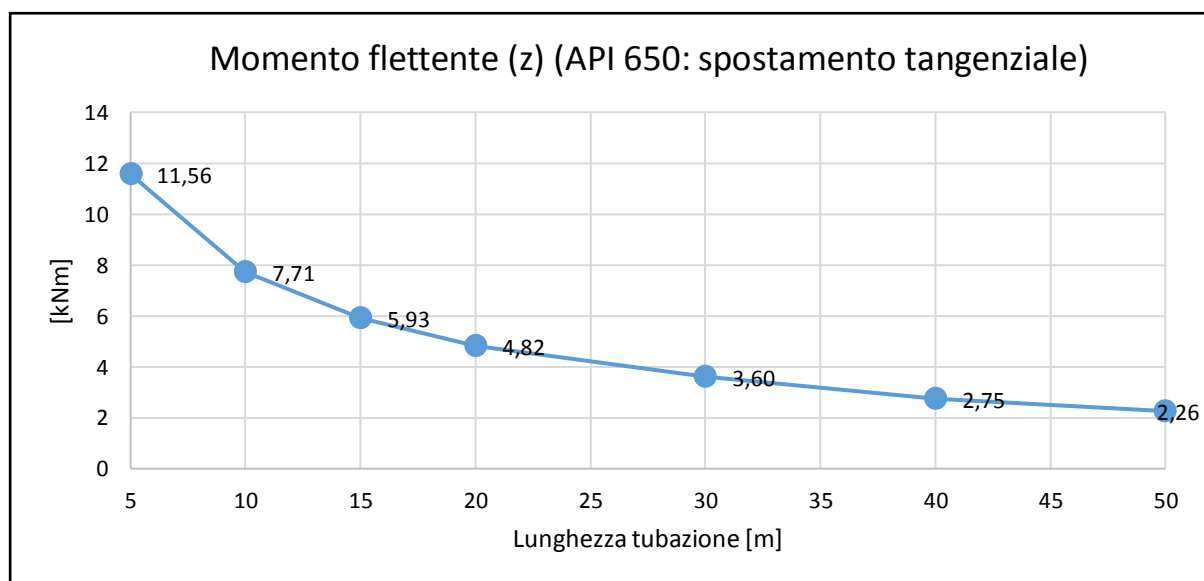


Figura 6.4.15 - Momento flettente attorno a z

Anche in questo caso si verifica un andamento del tutto analogo (entità minore in genere delle sollecitazioni), con riduzione delle sollecitazioni causato dall'incremento di flessibilità della tubazione.

In ultimo si riporta l'andamento del momento flettente attorno all'asse y generato da uno spostamento verticale di 25 mm (valutato in corrispondenza del serbatoio). Si può osservare come in tutti i casi tale valore sia pressoché costante, infatti la tubazione tende a sollevarsi dai primi due appoggi mantenendo la stessa deformata in tutti i casi; inoltre l'incremento di lunghezza non influenza il risultato in quanto il ramo collegato al serbatoio resta costante pari a 20 m.

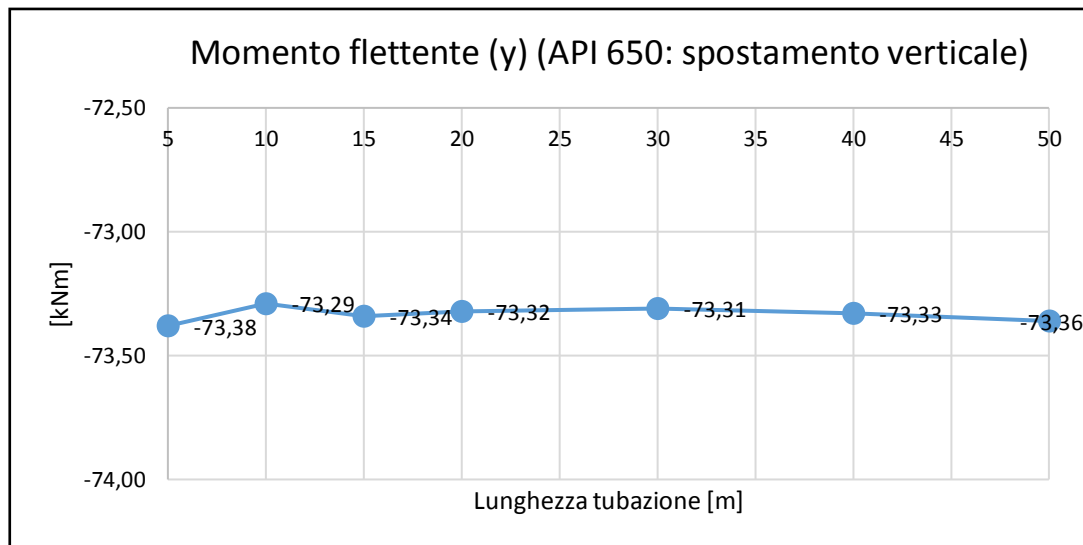


Figura 6.4.16 – Momento flettente attorno a y

Successivamente si riportano in tabella i valori massimi e minimi delle reazioni verticali in corrispondenza dei supporti lungo le tubazioni (in particolare nel supporto d'angolo, il meno caricato), allo scopo di valutare se le condotte, a causa della componente verticale dell'accelerazione, tendano o meno a sollevarsi.

$L_1 = 20 \text{ m}$	TUBAZIONI A "L", CASO 1						
	VALORI REAZIONI VERTICALI NEL SUPPORTO D'ANGOLO						
	$L_2 = 5 \text{ m}$	$L_2 = 10 \text{ m}$	$L_2 = 15 \text{ m}$	$L_2 = 20 \text{ m}$	$L_2 = 30 \text{ m}$	$L_2 = 40 \text{ m}$	$L_2 = 50 \text{ m}$
min	7,57	7,76	7,83	7,72	8,08	8,35	8,35
max	8,10	8,31	8,05	7,93	8,12	8,35	8,35

Tabella 6.4.15 – Reazioni verticali

Dalla tabella sopra riportata è possibile osservare come tutte le reazioni assumano valore positivo. Ciò significa che la tubazione non tende a sollevarsi da nessun supporto, in tutte le combinazioni derivanti da analisi modale con spettro di risposta.

Inoltre si osserva come la variazione dei valori sia piuttosto contenuta (in particolare al crescere della lunghezza), segno del fatto che la componente verticale dell'azione sismica non influenza in modo significativo i risultati ottenuti. Tale aspetto dipende dal fatto che il problema sia essenzialmente piano come dimostrato al punto 5.3.

In conclusione si riporta una considerazione relativa all'entità degli spostamenti trasversali lungo le tubazioni. Si noti che i supporti verticali per come sono stati modellati offrono la possibilità di scorrimento trasversale. Essi presentano inoltre dei "fine corsa" laterali aventi la funzione di evitare la caduta della tubazione dal sostegno. In genere per tubazioni fino a 20 m gli spostamenti trasversali assumono valori contenuti (5,3 cm nel caso della tubazione di 20 m). Per lunghezze superiori, difficilmente utilizzate nelle vasche di contenimento, ma schematizzate precedentemente al fine di avere una panoramica completa circa l'influenza della lunghezza delle condotte sui risultati, è necessario utilizzare supporti diversi (i quali limitino i movimenti trasversali, si vedano le tipologie riportate al punto 5.2).

Di seguito si riportano i dati raccolti in tabelle per le 7 differenti configurazioni analizzate del caso 2, aventi lato verticale fisso e lato orizzontale variabile con le seguenti lunghezze: 5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m. Per quanto riguarda l'analisi modale con spettro di risposta si riportano i valori di sforzo normale e di momento flettente attorno ai due assi principali derivanti dall'involuppo delle sollecitazioni, considerando le varie combinazioni. Inoltre si riportano gli spostamenti massimi del punto di ingresso della tubazione del serbatoio. Per quanto concerne gli spostamenti imposti delle API 650 si riportano le sollecitazioni massime e minime come effettuato per l'analisi con spettro.

TUBAZIONE, L2 = 20 m - L1 = 5 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
2,58	19,36	-7,60	3,18	0,34	74,67	-0,96	0,00	-6,41	3,72	0,00	19,27
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,37		1,69		0,00		-4,74	0,00	-6,41	3,72	0,00	23,7
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,37		23,43		-0,14		0,00	0,00	-98,14	35,89	0,00	0,00

Tabella 6.4.15 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a “L” caso 2

Osservando i valori derivanti dall'analisi con spettro è possibile notare come già in questo primo caso le sollecitazioni non siano trascurabili come nel primo caso di tubazione rettilinea. Infatti i primi modi di vibrare cadono nella zona di massima amplificazione dello spettro di risposta.

TUBAZIONE, L2 = 20 m - L1 = 10 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
1,87	19,07	-5,93	3,74	0,46	78,87	-0,96	0,00	-5,50	3,97	0,00	19,28
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,39		1,59		0,00		-1,10	0,00	-5,50	3,97	0,00	11,67
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,39		26,2		-0,14		0,00	0,00	-78,44	7,97	0,00	0,00

Tabella 6.4.16 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a “L” caso 2

Si nota come le sollecitazioni derivanti dall'applicazione degli spostamenti imposti (API) tendono a diminuire al crescere della lunghezza della tubazione e quindi della sua flessibilità.

TUBAZIONE, L2 = 20 m - L1 = 15 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
4,01	25,25	-5,75	3,81	0,71	79,83	-0,96	0,00	-5,44	4,01	0,00	19,27
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,48		1,87		0,00		-0,46	0,00	-5,44	4,01	0,00	6,85
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,48		27,23		-0,15		0,00	0,00	-75,41	26,59	0,00	0,00

Tabella 6.4.17 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a “L” caso 2

Si nota anche in questo caso come le sollecitazioni derivanti dall'applicazione degli spostamenti imposti (API) tendono a diminuire al crescere della lunghezza della tubazione e quindi della sua flessibilità.

TUBAZIONE, L2 = 20 m - L1 = 20 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
4,09	31,69	-5,49	4,48	1,25	81,45	-0,93	0,00	-5,46	3,97	0,00	19,28
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,51		2,49		0,00		-0,26	0,00	-5,46	3,97	0,00	4,81
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,51		53,96		-0,15		0,00	0,00	-73,38	24,45	0,00	0,00

Tabella 6.4.18 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a “L” caso 2

Si nota anche in questo caso come le sollecitazioni derivanti dall'applicazione degli spostamenti imposti (API) tendono a diminuire al crescere della lunghezza della tubazione e quindi della sua flessibilità. Diversamente, per quanto riguarda l'analisi con spettro, si nota un incremento delle sollecitazioni, dovute all'aumento della massa oscillante.

TUBAZIONE, L2 = 20 m - L1 = 30 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
3,21	37,14	-5,40	4,04	1,55	82,06	-0,96	0,00	-5,45	4,04	0,00	19,27
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,72		2,59		0,00		-0,10	0,00	-5,45	4,04	0,00	2,85
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,71		97,85		-0,15		0,00	0,00	-73,63	24,71	0,00	0,00

Tabella 6.4.19 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a “L” caso 2

Si nota anche in questo caso come le sollecitazioni derivanti dall'applicazione degli spostamenti imposti (API) tendono a diminuire al crescere della lunghezza della tubazione e quindi della sua flessibilità. Diversamente, per quanto riguarda l'analisi con spettro, si nota un incremento delle sollecitazioni, dovute all'aumento della massa oscillante.

TUBAZIONE, L2 = 20 m - L1 = 40 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
3,96	47,23	-5,54	4,00	2,52	83,22	-0,96	0,00	-5,49	4,06	0,00	19,27
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,92		2,16		0,00		-0,05	0,00	-5,49	4,06	0,00	1,92
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
0,92		163,45		-0,15		0,00	0,00	-73,65	24,74	0,00	0,00

Tabella 6.4.20 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a “L” caso 2

Si nota anche in questo caso come le sollecitazioni derivanti dall'applicazione degli spostamenti imposti (API) tendono ad avere valori piuttosto limitati. Diversamente, per quanto riguarda l'analisi con spettro, si nota un incremento delle sollecitazioni, dovute all'aumento della massa oscillante (incrementi sempre meno marcati in quanto i primi modi di vibrare hanno periodi elevati, oltre la zona di amplificazione dello spettro).

TUBAZIONE, L2 = 20 m - L1 = 50 m - (TUBO PIENO)											
ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA						FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
						SOLLECITAZIONI					
INVILUPPO SOLLECITAZIONI						SPOSTAMENTO RADIALE (50 mm)					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max	Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
3,75	74,50	-5,51	4,01	3,78	85,91	-0,96	0,00	-5,47	4,07	0,00	19,27
SPOSTAMENTI MASSIMI (COLLEGAMENTO TUBO-SERBATOIO)						SPOSTAMENTO TANGENZIALE (50 mm)					
RADIALE		TANGENZIALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
1,44		1,95		0,00		0,00	0,00	-5,47	4,07	0,00	1,40
SPOSTAMENTI MASSIMI LUNGO LA TUBAZIONE						SPOSTAMENTO VERTICALE (25 mm)					
ASSIALE		TRASVERSALE		VERTICALE		Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[mm]		[mm]		[mm]		[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
1,44		209,23		-0,15		0,00	0,00	-73,65	24,7	0,00	0,00

Tabella 6.4.21 – Sollecitazioni e spostamenti, tubazione a “L” caso 2

Si nota anche in questo caso come le sollecitazioni derivanti dall'applicazione degli spostamenti imposti (API) tendono ad avere valori piuttosto limitati. Diversamente, per quanto riguarda l'analisi con spettro, si nota un incremento delle sollecitazioni, dovute all'aumento della massa oscillante (incrementi sempre meno marcati in quanto i primi modi di vibrare hanno periodi elevati, oltre la zona di amplificazione dello spettro).

Si procede ora al confronto dei risultati ottenuti mediante l'utilizzo di grafici che permettono di visualizzare l'andamento sia delle sollecitazioni (le più gravose) che degli spostamenti, al variare della lunghezza della tubazione. Si riportano in successione gli andamenti degli spostamenti radiali e tangenziali della tubazione nel punto di attacco con il serbatoio (derivanti da analisi con spettro di risposta).

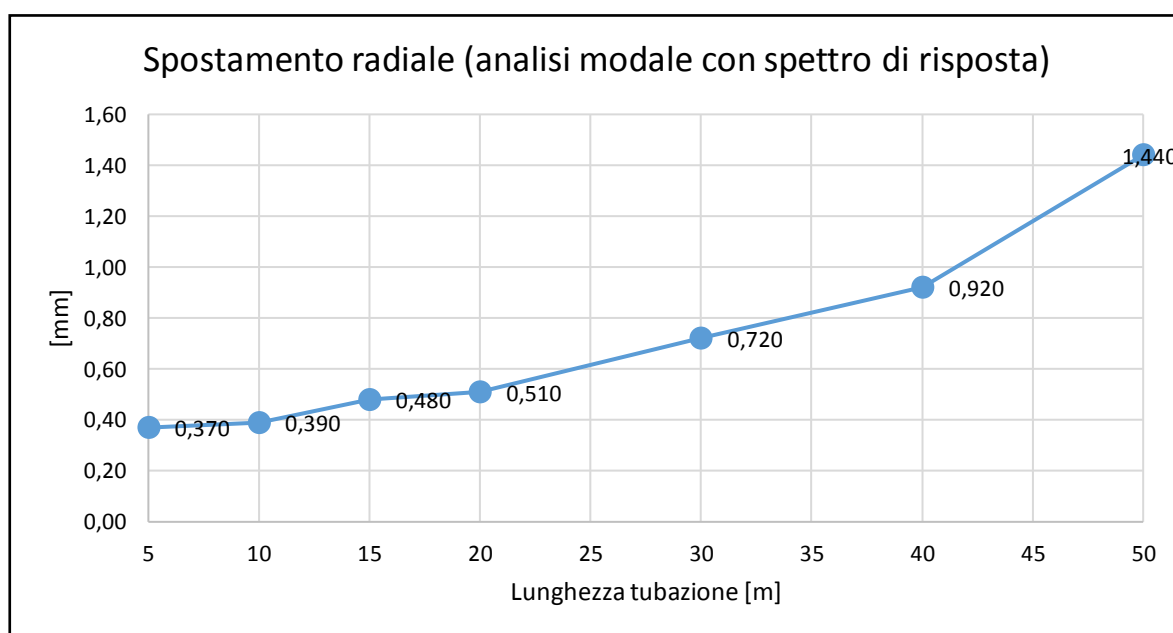


Figura 6.4.17 – Spostamento radiale

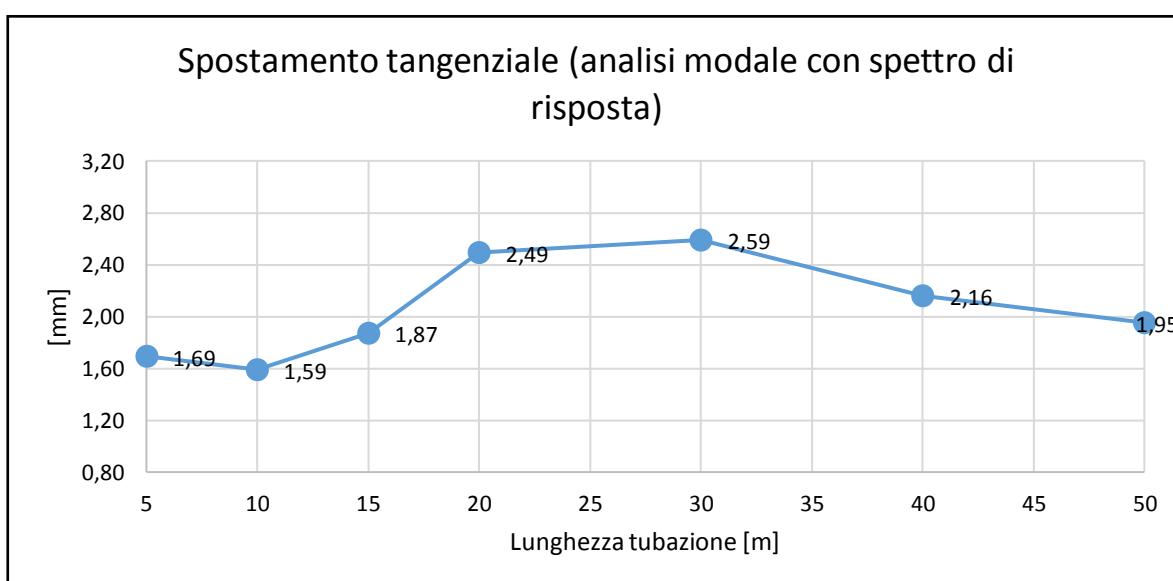


Figura 6.4.18 - Spostamento tangenziale

Per quanto riguarda lo spostamento in direzione radiale si osserva un andamento monotono, dovuto sostanzialmente all'incremento di massa partecipante in caso di sisma parallelo a L_1 . Diversamente per lo spostamento tangenziale si osserva la presenza di un picco per le tubazioni aventi il lato variabile compreso tra 20 m e 30 m, aventi i primi modi di vibrare ricadenti nella zona di amplificazione dello spettro.

Successivamente si riporta l'andamento dello sforzo normale derivante sempre da analisi modale, valutato in corrispondenza dell'uscita della tubazione dal serbatoio. Si può osservare come tenda a crescere all'aumentare della lunghezza della tubazione (motivazioni analoghe a quanto riportato per lo spostamento in direzione radiale).

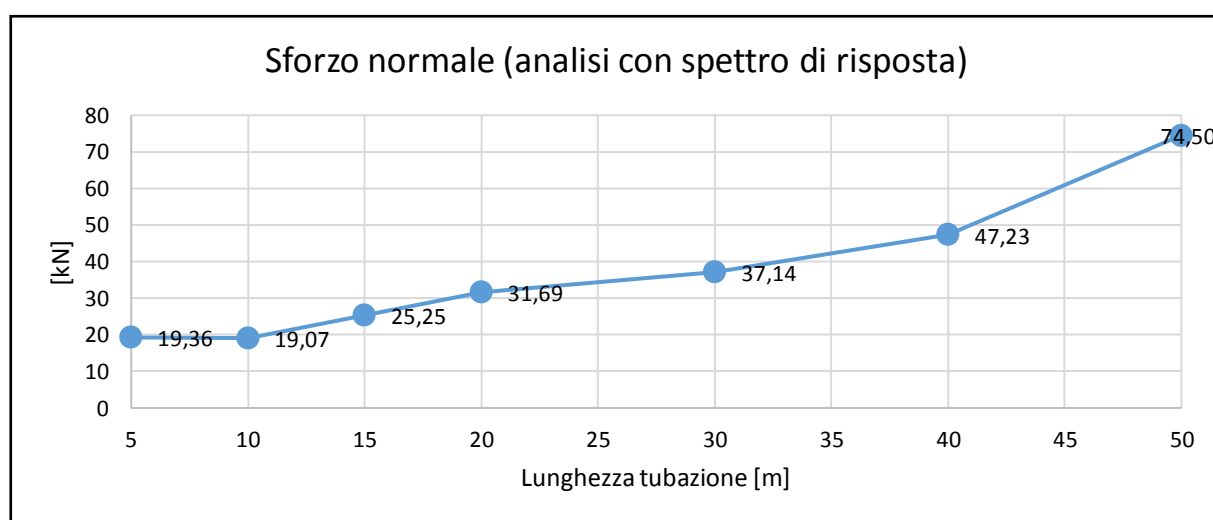


Figura 6.4.19 – Sforzo normale

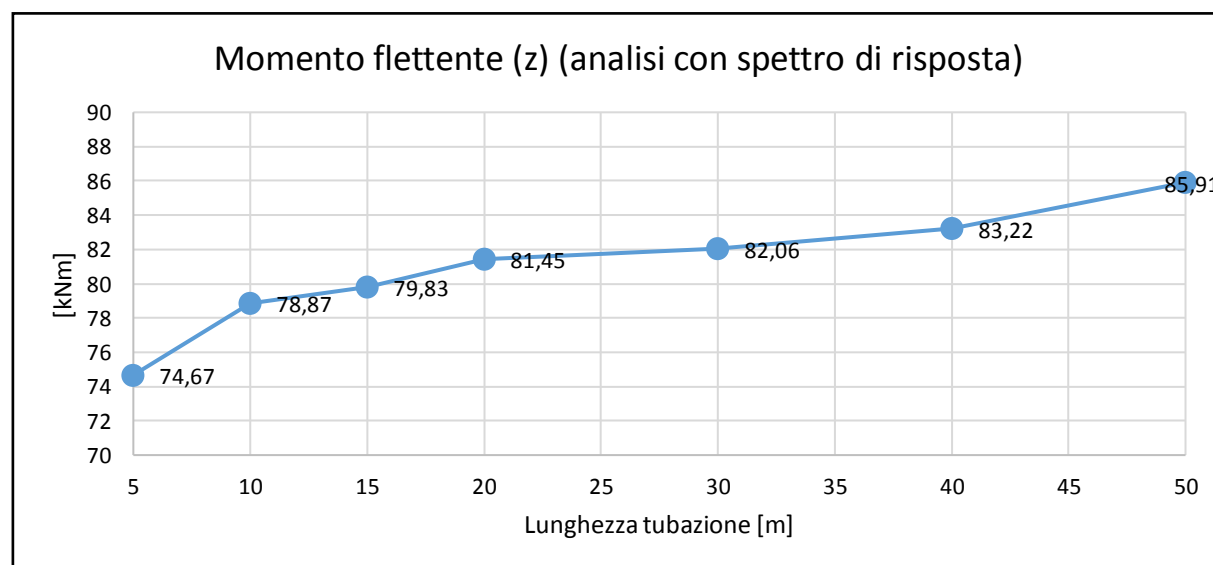


Figura 6.4.20 – Momento flettente attorno a z

In figura 6.4.20 è riportato l'andamento del momento flettente attorno a z derivante da analisi con spettro (valutato in corrispondenza della vasca di contenimento). Si nota una crescita all'aumentare della lunghezza dovuta sostanzialmente all'incremento dell'ampiezza di oscillazione lungo il ramo orizzontale.

Successivamente si riporta l'andamento dello sforzo normale causato da uno spostamento in direzione radiale rispetto al serbatoio di 50 mm (valutato sulla condotta orizzontale). Si nota come l'andamento sia pressoché costante attorno a 0,96 kN. Tale valore è molto contenuto in quanto uno spostamento in direzione assiale inflette la parte verticale della tubazione avente lunghezza costante pari a 20 m.

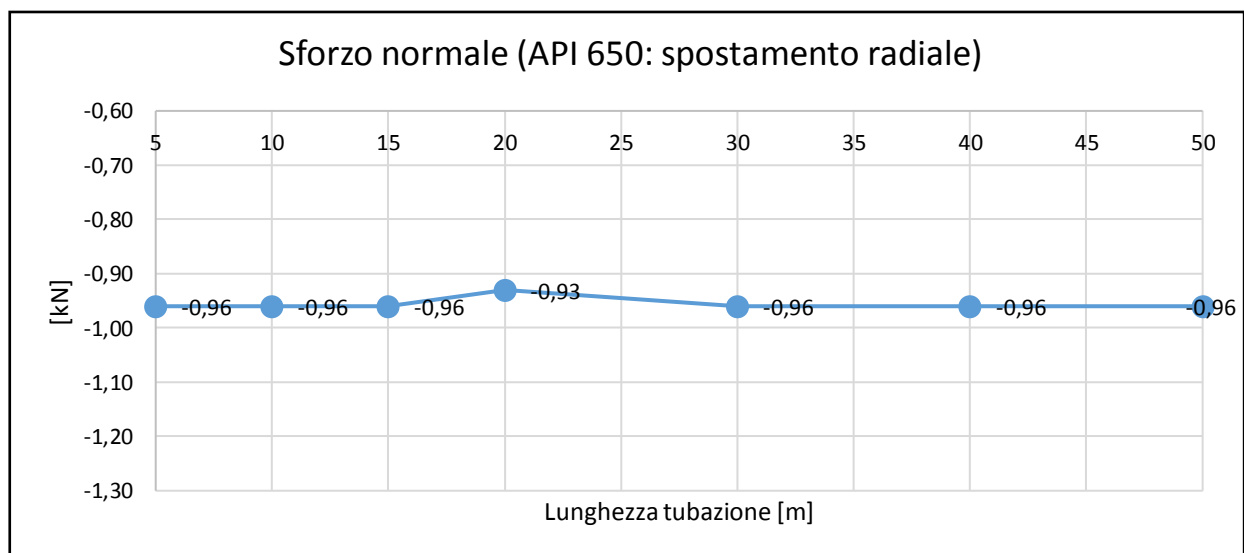


Figura 6.4.21 – Sforzo normale

Si riporta in figura 6.4.22 l'andamento del momento flettente attorno a z (sulla vasca di contenimento), dovuto ad uno spostamento imposto tangenziale alla superficie del serbatoio. Anche in questo caso si verifica un andamento del tutto analogo, con riduzione delle sollecitazioni causato dall'incremento di flessibilità della tubazione.

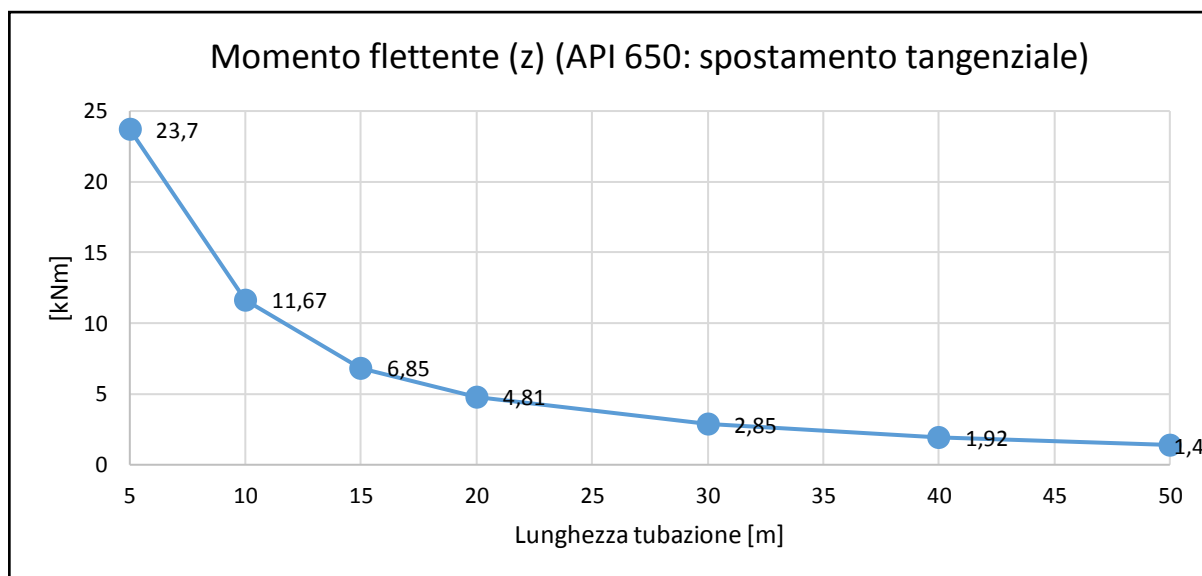


Figura 6.4.22 – Momento flettente attorno a z

In ultimo si riporta l'andamento del momento flettente attorno all'asse y (valutato in corrispondenza della vasca di contenimento) generato da uno spostamento verticale di 25 mm. Si può osservare come il valore tenda a ridursi a causa dell'aumento di flessibilità della tubazione, per poi assestarsi attorno ad un valore costante.

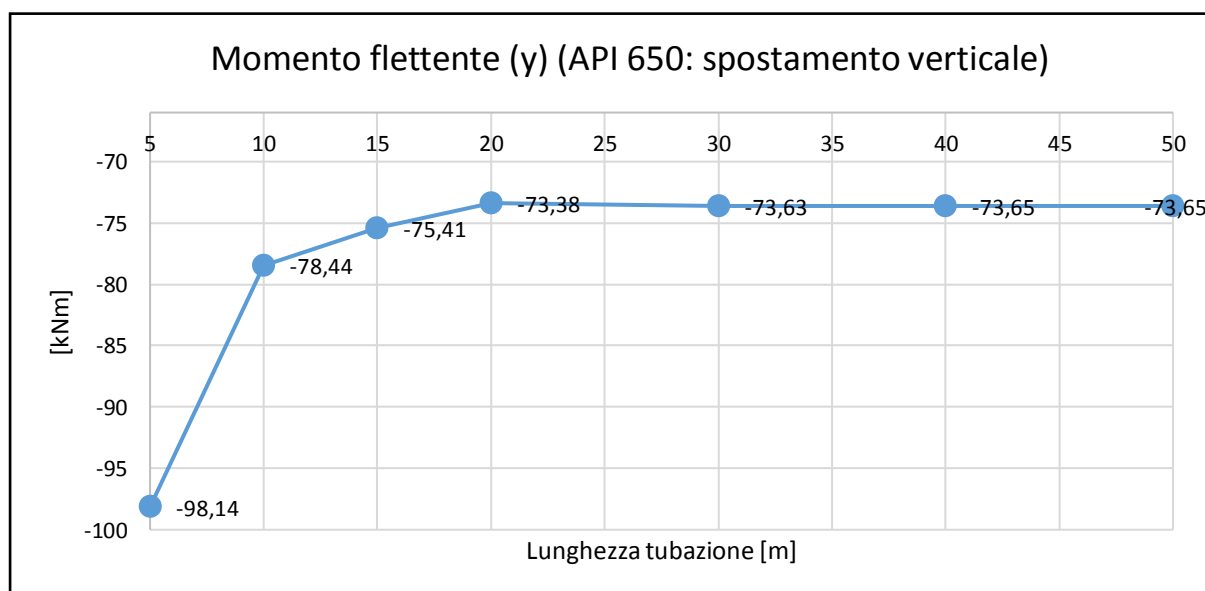


Figura 6.4.23 – Momento flettente attorno a y

Successivamente si riportano in tabella i valori massimi e minimi delle reazioni verticali in corrispondenza dei supporti lungo le tubazioni (nel supporto d'angolo in questo caso), allo scopo di valutare se le condotte, a causa della componente verticale dell'accelerazione, tendano o meno a sollevarsi.

$L_2 = 20 \text{ m}$	TUBAZIONI A "L", CASO 2						
	VALORI REAZIONI VERTICALI NEL SUPPORTO D'ANGOLO						
	$L_1 = 5 \text{ m}$	$L_1 = 10 \text{ m}$	$L_1 = 15 \text{ m}$	$L_1 = 20 \text{ m}$	$L_1 = 30 \text{ m}$	$L_1 = 40 \text{ m}$	$L_1 = 50 \text{ m}$
min	7,64	7,76	7,83	7,72	7,99	8,32	8,35
max	8,21	8,08	7,94	7,93	8,09	8,38	8,37

Tabella 6.4.22 – Reazioni verticali

Dalla tabella sopra riportata è possibile osservare come tutte le reazioni assumano valore positivo. Ciò significa che la tubazione non tende a sollevarsi da nessun supporto, in tutte le combinazioni derivanti da analisi modale con spettro di risposta. Inoltre si osserva come la variazione dei valori sia piuttosto contenuta (in particolare al crescere della lunghezza), segno del fatto che la componente verticale dell'azione sismica non influenza in modo significativo i risultati ottenuti. Tale aspetto dipende dal fatto che il problema sia essenzialmente piano come dimostrato al punto 5.3.

Successivamente si riporta una considerazione relativa all'entità degli spostamenti trasversali lungo le tubazioni. Si noti che i supporti verticali per come sono stati modellati offrono la possibilità di scorrimento trasversale. Essi presentano inoltre dei "fine corsa" laterali aventi la funzione di evitare la caduta della tubazione dal sostegno. In genere per tubazioni fino a 20 m gli spostamenti trasversali assumono valori contenuti. Per lunghezze superiori, difficilmente utilizzate nelle vasche di contenimento, ma schematizzate precedentemente al fine di avere una panoramica completa circa l'influenza della lunghezza delle condotte sui risultati, è necessario utilizzare supporti diversi (i quali limitino i movimenti trasversali, si vedano le tipologie riportate al punto 5.2).

In conclusione del punto 6.4 si riportano, a titolo esemplificativo, i diagrammi delle azioni interne relative a due condizioni di carico differenti: la prima relativa ai risultati derivanti da analisi sismica con spettro di risposta su una tubazione ad "L", mentre la seconda relativa all'applicazione di uno spostamento imposto previsto dalla API ad una tubazione rettilinea. Per ovvie ragioni non si riportano gli andamenti delle azioni interne per tutti i casi analizzati; i risultati sono stati sintetizzati nelle tabelle riportate in precedenza.

Di seguito si riporta il primo caso riportato, ovvero una tubazione a “L” con lato orizzontale L_1 pari a 20 m, e lato verticale L_2 pari a 5 m. Le azioni interne riferiscono all’analisi sismica con spettro di risposta, con azione prevalente in direzione Y. Successivamente si riportano i diagrammi delle azioni interne (unità di misura: N e m).

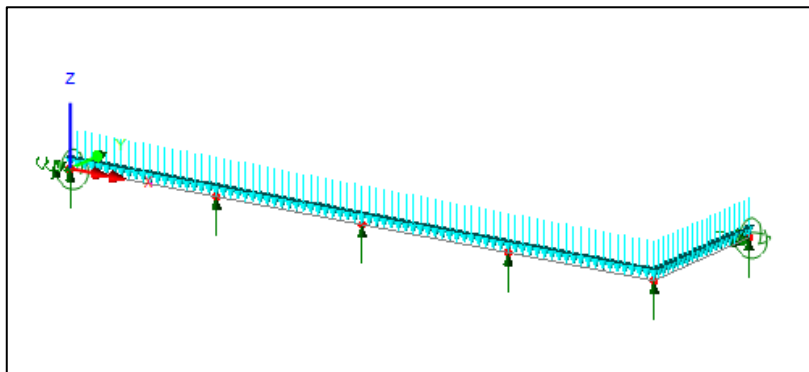


Figura 6.4.24 – Modello di calcolo tubazione

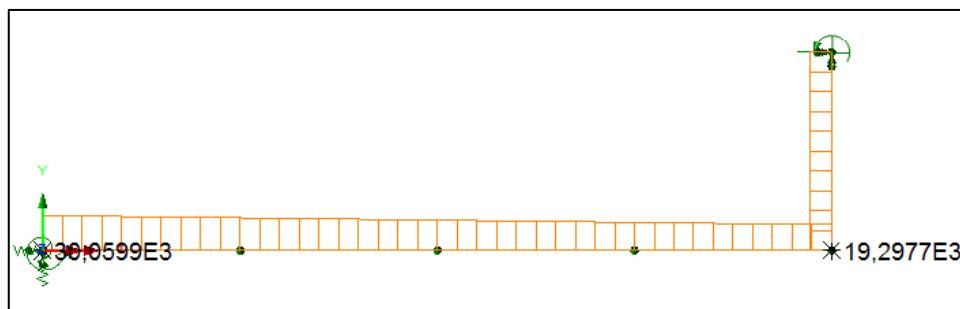


Figura 6.4.25 – Sforzo Normale

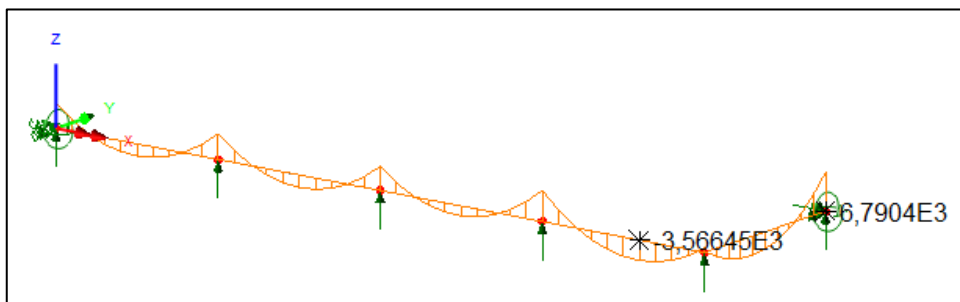


Figura 6.4.26 – Momento flettente attorno a y

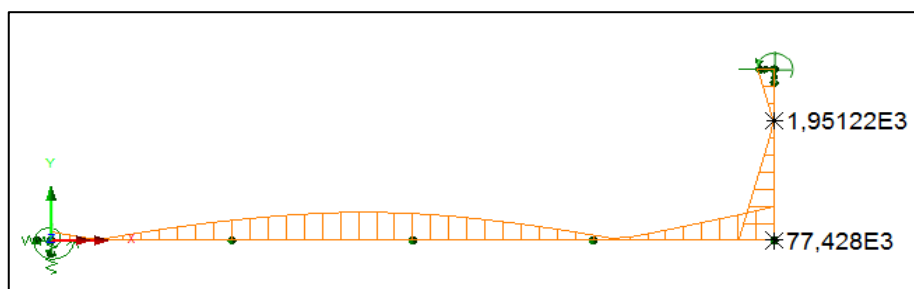


Figura 6.4.27 – Momento flettente attorno a z

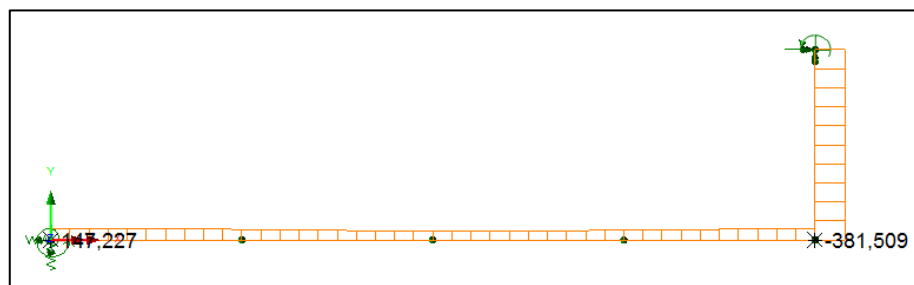


Figura 6.4.28 – Momento torcente

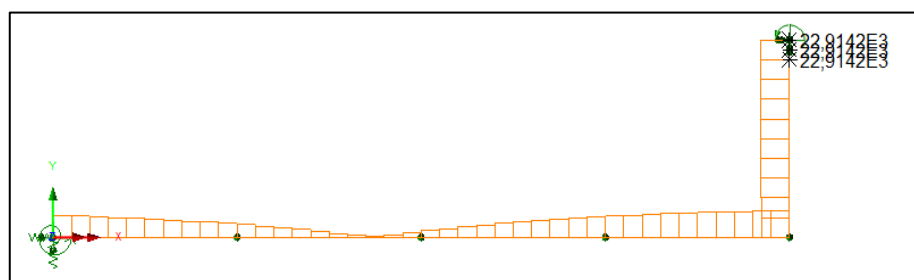


Figura 6.4.29- Azione tagliante lungo y

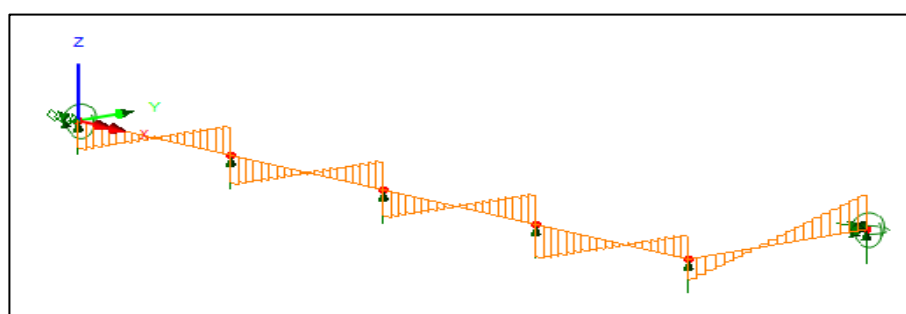


Figura 6.4.30- Azione tagliante lungo z

Per quanto riguarda il momento flettente attorno a y e il corrispondente sforzo tagliante si nota un andamento tipico di trave continua su più appoggi. In questa situazione i segni delle azioni sono alterni, in quanto l'effetto sismico è combinato con l'effetto del peso proprio della tubazione.

Comportamento diverso per quanto riguarda le altre azioni interne, infatti i valori risultano positivi derivando da combinazione quadratica CQC, e non essendo combinati con altri carichi statici. Ai fini delle verifiche verrà considerato il segno più sfavorevole (ad esempio lo sforzo normale in compressione). Si nota anche la presenza di momento torcente seppur l'entità sia contenuta.

In ultimo si riportano le azioni interne di una tubazione rettilinea soggetta a spostamento imposto in corrispondenza del suo punto di attacco con il serbatoio. Di seguito modello di calcolo e azioni interne derivanti (unità di misura: N e m).

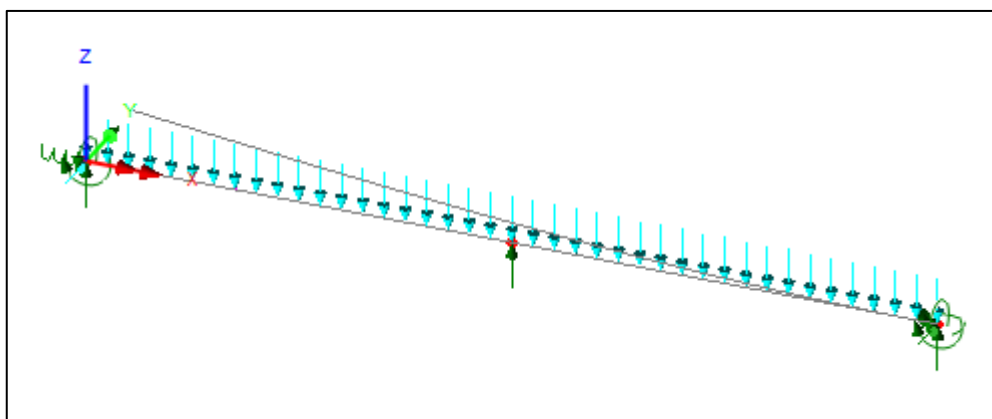


Figura 6.4.31 – Modello di calcolo e deformata corrispondente

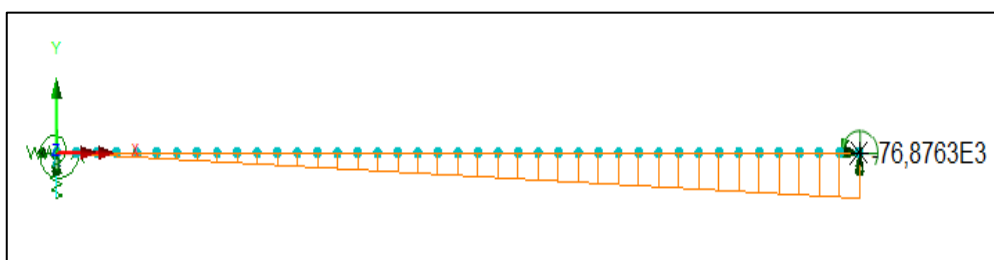


Figura 6.4.32 – Momento attorno a z

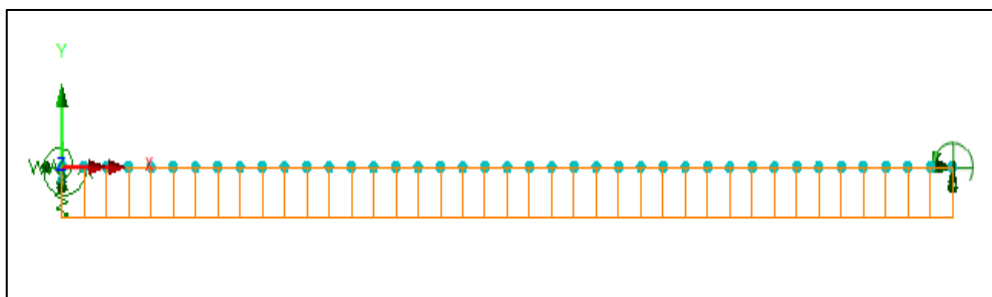


Figura 6.4.33 – Taglio lungo y (valore massimo 7,34 kN)

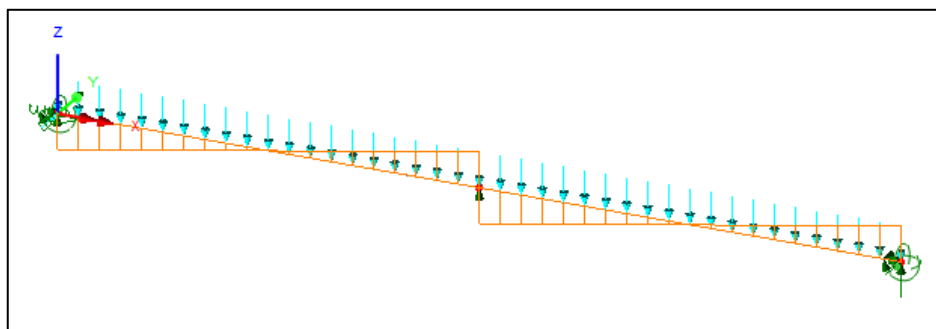


Figura 6.4.34 - Taglio lungo z (valore massimo 5,24 kN)

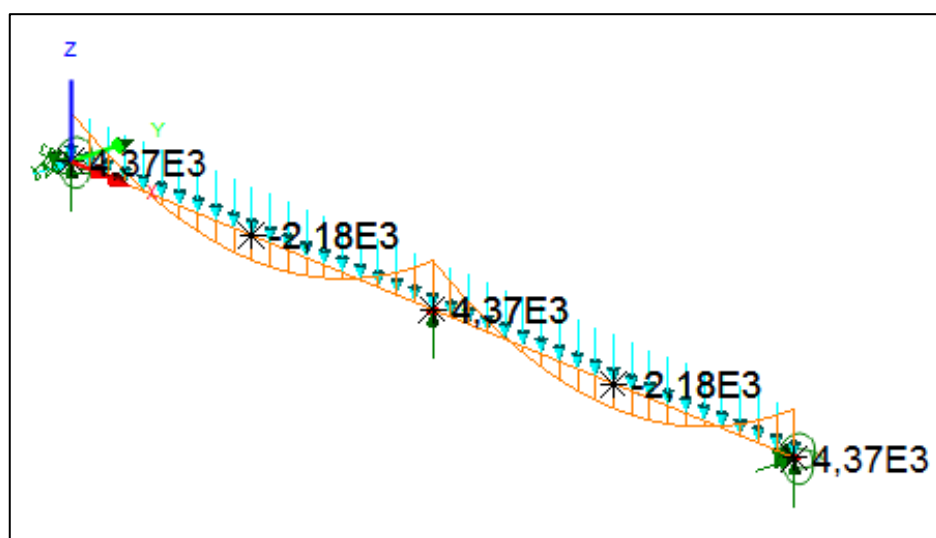


Figura 6.4.35 – Momento flettente attorno a y

Nelle figura soprastanti sono riportate le sollecitazione che nascono all'interno della tubazione rettilinea con lato pari a 10 m, soggetta a spostamento imposto in direzione tangenziale secondo quanto previsto dalle norme API.

6.5 Verifiche di resistenza sulle tubazioni

Il presente paragrafo è dedicato alle verifiche di resistenza sulle tubazione analizzate in precedenza. Si farà riferimento a quanto previsto dall'Eurocodice 3 dedicato alle strutture in acciaio. Come di consueto alle verifiche di resistenza (di tipo sezionale nei punti più sollecitati delle strutture) si affiancheranno le verifiche di instabilità (trattasi di verifiche di membratura, che coinvolgono le sollecitazioni massime lungo l'elemento). Le verifiche verranno effettuate per le condizioni di carico analizzate in precedenza, derivanti da analisi sismica con spettro di risposta e da spostamenti imposti come previsto da API 650.

Per quanto riguarda le verifiche di resistenza si farà riferimento al seguente criterio, si tratta di un'approssimazione conservativa:

$$(A) \quad \frac{N_{sd}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,sd}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,sd}}{M_{z,Rd}} < 1$$

Dove a numeratore si riportano le sollecitazioni derivanti dalle analisi, mentre a denominatore le resistenze della sezione, dipendenti dalla classe della stessa. Per quanto riguarda la classificazione del profilo si riporta quanto previsto dalle Norme. (EC 3):

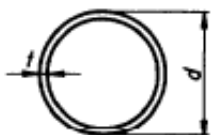
(e) Sezioni tubolari:				
				
Classe	Sezione in flessione e/o compressione			
1	$d/t \leq 50\epsilon^2$			
2	$d/t \leq 70\epsilon^2$			
3	$d/t \leq 90\epsilon^2$			
$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	f_y	235	275	355
	ϵ	1	0,92	0,81
	ϵ^2	1	0,85	0,66

Figura 6.5.1 – Classificazione sezioni tubolari (prospetto 5.31 EC 3)

Nel caso in esame l'acciaio risulta essere S235, perciò il parametro ϵ è pari all'unità mentre il rapporto geometrico d/t è pari a 40,64. Ne consegue che la sezione risulta in classe 1 per semplice compressione, come indicato in tabella (sezione in flessione e/o compressione). Ipotizzando semplice compressione il profilo è in classe 1, perciò sarà in classe 1 anche in caso di pressoflessione semplice o deviata (caso delle tubazioni). Stabilita la classe della sezione è possibile calcolare le resistenze plastiche da utilizzare nelle verifiche.

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLA SEZIONE					
Diametro	Spessore	Area	Momento d'inertia flessionale	Modulo resistenza plastico	Momento inerzia torsionale
[mm]	[mm]	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ⁴
406,4	10	125	24476	1572	48952

Tabella 6.5.1 - Caratteristiche geometriche sezione

RESISTENZE PLASTICHE SEZIONE		
Profilato circolare cavo 406,4 x 10 UNI 7807		
Classe profilato: 1 - Acciaio S235		
N _{pl,rd}	2797,62	kN
M _{y,pl,rd}	351,83	kNm
M _{z,pl,rd}	351,83	kNm
V _{y,pl,rd}	1028,27	kN
V _{z,pl,rd}	1028,27	kN

Tabella 6.5.2 – Resistenze plastiche della sezione

Alla verifica di resistenza a presso flessione deviata riportata in precedenza va affiancata una verifica di resistenza a taglio, in genere indipendente.

$$V_{pl,rd} = \frac{A_V \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

L'espressione sopra riportata permette di valutare la resistenza tagliante plastica della sezione. Tale resistenza è la stessa lungo i due assi vista la tipologia di sezione. Il termine A_v riferisce all'area resistente a taglio, che nel caso delle sezioni circolari risulta essere pari a:

$$A_v = \frac{2 \cdot A}{\pi}$$

La verifica a taglio è indipendente dalla verifica a pressoflessione se il taglio sollecitante è minore del 50% di $V_{pl,rd}$. In caso di contemporanea presenza di taglio e torsione, l'interazione tra le due componenti provoca una riduzione della resistenza a taglio come segue:

$$V_{pl,T,rd} = V_{pl,rd} \cdot \left(1 - \frac{\tau_{t,ed}}{\frac{1}{\gamma_{M0}} \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)} \right)$$

Dove la tensione tangenziale relativa alla torsione viene calcolata con la formula di Bredt, visto il tipo di sezione in esame.

Successivamente è necessario effettuare la verifica di instabilità per elementi pressoflessi, caso biassiale:

$$(B) \quad \frac{N_{sd}}{\frac{\chi_y \cdot N_{RK}}{\gamma_{M1}}} + K_{yy} \cdot \frac{M_{y,sd}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,RK}}{\gamma_{M1}}} + K_{yz} \cdot \frac{M_{z,sd}}{\frac{M_{z,RK}}{\gamma_{M1}}} < 1$$

$$(C) \quad \frac{N_{sd}}{\frac{\chi_z \cdot N_{RK}}{\gamma_{M1}}} + K_{zy} \cdot \frac{M_{y,sd}}{\frac{\chi_{LT} \cdot M_{y,RK}}{\gamma_{M1}}} + K_{zz} \cdot \frac{M_{z,sd}}{\frac{M_{z,RK}}{\gamma_{M1}}} < 1$$

Dove χ_y , χ_z , χ_{LT} rappresentano fattori di riduzione, rispettivamente legati all'instabilità per compressione e all'instabilità flessione-torsionale. Si considerano ovviamente i due piani al fine di considerare lunghezze diverse di libera inflessione. I coefficienti K_{ii} tengono conto dell'interazione delle varie azioni interne e dipendono dalla distribuzioni di sollecitazioni lungo l'elemento. Si riportano successivamente le tabelle per il calcolo dei coefficienti di interazione.

	Tipo di sezione	Ipotesi progettuali	
		Sezioni elastiche di classi 3 e 4	Sezioni plastiche di classi 1 e 2
k_{yy}	I, RHS	$C_{my} \left[1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{my} \left[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
k_{yz}	I, RHS	k_{zz}	$0,6 \cdot k_{zz}$
k_{zy}	I, RHS	$0,8 \cdot k_{yy}$	$0,6 \cdot k_{yy}$
k_{zz}	I	$C_{mz} \left[1 + 0,6 \cdot \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left[1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	RHS		$C_{mz} \left[1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right]$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
I = profilo con sezione a I		RHS = profilo con sezione rettangolare cava	
Con sezioni a I e RHS in presenza di azione assiale di compressione e di azione flettente mono-assiale $M_{y,Ed}$ il coefficiente k_{zy} può essere assunto pari a $k_{yz} = 0$.			

Figura 6-5.2 – Tabella 1, EC-3, calcolo coefficienti

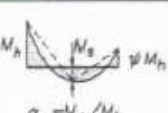
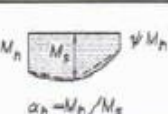
Diagramma dei momenti	Campo di variazione	C_{my} e C_{mz} e C_{mLT}		
		Carico uniformemente distribuito	Carico concentrato	
	$1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4 \cdot \psi \geq 0,4$		
	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8 \alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8 \alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s \leq 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8 \alpha_s \geq 0,4$	$-0,8 \alpha_s \geq 0,4$
		$-1 \leq \psi \leq 0$	$0,1(1 - \psi) - 0,8 \alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8 \alpha_s \geq 0,4$
	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05 \alpha_h$	$0,90 + 0,10 \alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h \leq 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05 \alpha_h$	$0,90 + 0,10 \alpha_h$
		$-1 \leq \psi \leq 0$	$0,95 + 0,05 \alpha_h (1 + 2\psi)$	$0,90 + 0,10 \alpha_h (1 + 2\psi)$
Per membrature soggette alla modalità di instabilità dei telai a nodi mobili, il coefficiente di momento equivalente dovrebbe essere assunto $C_{my}=0,9$ o $C_{mz}=0,9$				
C_{my} , C_{mz} e C_{mLT} dovrebbero essere valutati in accordo al diagramma dei momenti flettenti tra i punti critici della controventatura come:				
Fattore di momento	Asse di flessione		Direzione dei punti di controventamento	
C_{my}	y-y		z-z	
C_{mz}	z-z		y-y	
C_{mLT}	y-y		y-y	

Figura 6.5.3 – Tabella 3, EC-3, calcolo coefficienti

In tabella si riportano le formule necessarie per il calcolo dei coefficienti legati alle varie instabilità che possono insorgere.

Calcolo coefficienti per instabilità a compressione	Calcolo coefficienti per instabilità flessotorsionale
$N_{CR,y,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{l_0^2}$	$M_{cr} = \frac{C_1(\pi^2 EI_z)}{L^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 GI_z}{\pi^2 EI_z}}$
$\bar{\lambda}_{y,z} = \sqrt{(A \cdot f_y)/N_{cr}}$	$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{(W_y \cdot f_y)/M_{cr}}$
$\phi_{y,z} = 0,5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$	$\phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2]$
$\chi_{y,z} = \frac{1}{(\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2})} \leq 1$	$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1$

Tabella 6.5.3 – Calcolo coefficienti

Si riporta successivamente un'osservazione relativa al calcolo delle lunghezze libere di inflessione per instabilità a compressione. È possibile calcolare tali lunghezze mediante un metodo approssimato utilizzato anche per le colonne dei telai in acciaio. Si effettua un'analisi di buckling valutando il moltiplicatore dei carichi che instabilizza in compressione l'elemento considerato. Noto lo sforzo normale in partenza è possibile risalire al carico critico e per inversione della formula (prima riga, prima colonna tabella 6.5.2) ricavare la lunghezza libera di inflessione.

In ultimo si riporta il calcolo del coefficiente di instabilità flessotorsionale allo scopo di dimostrare che nel caso in esame risulta essere sempre maggiore dell'unità in quanto la sezione ha un'elevata resistenza torsionale. Il coefficiente C_1 viene imposto pari all'unità in quanto risulta la condizione più sfavorevole (momento costante lungo la trave) e la distanza tra i ritegni torsionali pari a 50 m ovvero la massima lunghezza di condotta analizzata.

INSTABILITA' FLESSO-TORSIONALE		
C₁	1,00	[-]
L	50000	[mm]
M_{cr}/C₁	2832,50	[kNm]
M_{cr}	2832,50	[kNm]
λ_{LT}	0,361	[-]
α_{LT}	0,34	curva B
Φ_{LT}	0,54	[-]
χ_{LT}	1,01	[-]

Tabella 6.5.4 – Calcolo coefficiente di instabilità flessio-torsionale

In tabella sono riportati i risultati del calcolo del coefficiente di instabilità flessio-torsionale, ed essendo nella condizione più gravosa maggiore dell'unità, nei calcoli successivi si trascurerà tale verifica.

6.5.1 Tubazioni rettilinee

Di seguito si riportano i risultati delle verifiche sulle tubazioni rettilinee, secondo quanto esposto al punto precedente. In particolare si considerano 4 condizioni di carico (per ciascuna tubazione) derivanti da:

- Analisi sismica con spettro di risposta, dal quale si ricava l'involuppo delle sollecitazioni, considerando le differenti direzioni in cui il sisma prevale;
- Spostamento in direzione radiale rispetto al serbatoio pari a 50 mm;
- Spostamento in direzione tangenziale rispetto al serbatoio pari a 50 mm;
- Spostamento in direzione verticale pari a 50 mm.

Per ciascuna condizione vengono effettuate le verifiche di resistenza sulla sezione maggiormente sollecitata mentre le verifiche di instabilità lungo la membratura più sollecitata.

Per quanto riguarda le lunghezze di libera inflessione si considerano i due piani di possibile sbandamento:

- Instabilità attorno all'asse Y ("asse forte" richiamando le sezioni ad "I" o "H"): sbandamento nel piano verticale;
- Instabilità attorno all'asse Z ("asse debole" richiamando le sezioni ad "I" o "H"): sbandamento nel piano orizzontale.

Considerando l'instabilità attorno a "Y" si considera come lunghezza libera d'inflessione la distanza tra i sostegni verticali, ipotizzando uno schema cautelativo in semplice appoggio. Ovviamente l'instabilità può avvenire in direzione opposta, verso l'alto, dove lo schema statico tra serbatoio e vasca di contenimento risulterebbe incastro-incastro, con lunghezza libera pari al 50% della lunghezza complessiva della condotta. Nonostante vi sia questa possibilità si opta per impostare 5 m come lunghezza libera, infatti un'instabilità di questo tipo difficilmente si verificherà, in quanto la tubazione dovrebbe sollevarsi e vincere la forza di gravità a cui è soggetta. In genere l'instabilità si verificherà nel piano orizzontale attorno all'asse "Z", essendo la condotta libera di traslare trasversalmente in corrispondenza dei supporti. In tale piano lo schema statico è incastro-incastro con molle sul serbatoio, perciò non è possibile definire a priori la lunghezza di libera inflessione. Per ricavarla si utilizza il metodo descritto al punto precedente. In figura si riporta la prima deformata critica derivante da analisi di buckling, alla quale corrisponde il primo sforzo normale critico.

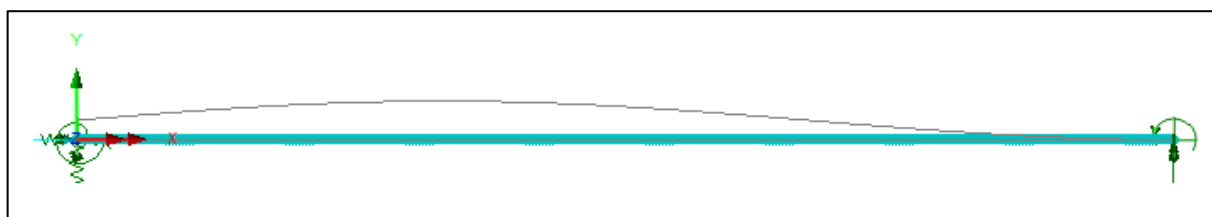


Figura 6.5.4 – Deformata critica per carico di punta (vista in pianta), lunghezza tubazione pari a 10 m

Noto lo sforzo normale sollecitante la condotta è possibile risalire al carico critico moltiplicando tale valore per il moltiplicatore dei carichi λ fornito dal programma, ricavando la lunghezza critica dalla seguente:

$$l_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{N_{CR}}}$$

Per tutte le tubazioni rettilinee si è ottenuta una lunghezza libera di inflessione prossima a 0,7 L, corrispondente alla condizione di vincolo incastro-carrello.

Prima di procedere con le verifiche di resistenza e instabilità si riporta il valore del taglio massimo agente sulle tubazioni rettilinee, derivante dallo spostamento imposto in direzione tangenziale al serbatoio (API 650) il quale crea uno sforzo tagliante pari a 60,94 kN. Tale azione risulta essere la massima per tutte le tubazioni rettilinee, ed è possibile osservare come sia ben inferiore al 50% del taglio plastico pari a 514,136 kN. Perciò la verifica a taglio risulta abbondantemente soddisfatta per tutte le tubazioni, ed inoltre non vi è interazione tra azione tagliante e momento flettente.

Successivamente si riportano le verifiche di resistenza e instabilità per la tubazione rettilinea avente lunghezza pari a 5 m.

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3				
VERIFICHE DI RESISTENZA - Analisi modale con spettro di risposta				
Tubazione rettilinea - L = 5 m				
Sollecitazioni (incastro con vasca di contenimento)				
Nsd [Kn]	My,sd [kNm]	Mz,sd [kNm]		
-3,53	-4,67	2,80	Verifica	
Nsd/Npl,rd	My,sd/Mpl,y rd	Mz,sd/Mpl,z,rd	Somma contributi	Verifica: < 1?
0,001	0,013	0,008	0,02	ok

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3				
VERIFICHE DI RESISTENZA - API 650: Spostamento in direzione radiale (50 mm)				
Tubazione rettilinea - L = 5 m				
Sollecitazioni (incastro con vasca di contenimento)				
Nsd [Kn]	My,sd [kNm]	Mz,sd [kNm]		
-26250,23	-4,37	0,00	Verifica	
Nsd/Npl,rd	My,sd/Mpl,y rd	Mz,sd/Mpl,z,rd	Somma contributi	Verifica: < 1?
9,383	0,012	0,000	9,40	no

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3				
VERIFICHE DI RESISTENZA - API 650: Spostamento in direzione tangenziale (50 mm)				
Tubazione rettilinea - L = 5 m				
Sollecitazioni (incastro con vasca di contenimento)				
Nsd [Kn]	My,sd [kNm]	Mz,sd [kNm]		
0,00	-4,37	304,71	Verifica	
Nsd/Npl,rd	My,sd/Mpl,y rd	Mz,sd/Mpl,z,rd	Somma contributi	Verifica: < 1?
0,000	0,012	0,866	0,88	ok

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3				
VERIFICHE DI RESISTENZA - API 650: Spostamento in direzione verticale (25 mm)				
Tubazione rettilinea - L = 5 m				
Sollecitazioni (incastro con serbatoio)				
Nsd [Kn]	My,sd [kNm]	Mz,sd [kNm]		
0,00	289,65	0,00	Verifica	
Nsd/Npl,rd	My,sd/Mpl,y rd	Mz,sd/Mpl,z,rd	Somma contributi	Verifica: < 1?
0,000	0,823	0,000	0,82	ok

Tabella 6.5.5 – Verifiche di resistenza per tubazione rettilinea con L pari a 5 m

È possibile osservare come le verifiche di resistenza siano soddisfatte ad eccezione dello spostamento imposto in direzione radiale rispetto al serbatoio. Si procede con le verifiche di instabilità riportate in seguito.

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3							
VERIFICHE DI INSTABILITA' - Analisi modale con spettro di risposta							
Tubazione rettilinea - L = 5 m							
Sollecitazioni massime lungo la membratura							
Nsd [kN]		My,sd [kNm]		Mz,sd [kNm]			
-3,53		-4,67		2,80			
Calcolo coefficiente di riduzione per instabilità a compressione							
Asse	L0,y [m]	Ncr [kN]	λ_y [-]	ϕ_y [-]	χ_y [-]		
Y	2,50	81166,99	0,19	0,52	1,00		
Asse	L0,z [m]	Ncr [kN]	λ_z [-]	ϕ_z [-]	χ_z [-]		
Z	3,02	55621,87	0,23	0,53	0,99		
Verifica - Caso generale biassiale							
Coefficienti d'interazione [-]				kyy	kzz	kyz	kzy
				0,870	0,830	0,498	0,522
Contributi separati [-]							
y	0,001		0,012		0,004		
z	0,001		0,007		0,007		
Somma contributi			y	0,0168	Verifica: < 1?		ok
			z	0,0148	Verifica: < 1?		ok

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3						
VERIFICHE DI INSTABILITA' - API 650: Spostamento in direzione radiale (50 mm)						
Tubazione rettilinea - L = 5 m						
Sollecitazioni massime lungo la membratura						
Nsd [kN]		My,sd [kNm]		Mz,sd [kNm]		
-26250,23		-4,37		0,00		
Calcolo coefficiente di riduzione per instabilità a compressione						
Asse	L0,y [m]	Ncr [kN]	λ_y [-]	ϕ_y [-]	χ_y [-]	
Y	2,50	81166,99	0,19	0,52	1,00	
Asse	L0,z [m]	Ncr [kN]	λ_z [-]	ϕ_z [-]	χ_z [-]	
Z	3,02	55621,87	0,23	0,53	0,99	
Verifica - Caso generale biassiale						
Coefficienti d'interazione [-]			kyy	kzz	kyz	kzy
			0,800	0,000	0,000	0,480
Contributi separati [-]						
y	9,363		0,010		0,000	
z	9,445		0,006		0,000	
Somma contributi			y	9,3730	Verifica: < 1?	no
			z	9,4510	Verifica: < 1?	no

Tabella 6.5.6 - Verifiche di instabilità per tubazione rettilinea con L pari a 5 m

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3					
VERIFICHE DI INSTABILITA' - API 650: Spostamento in direz. tangenziale (50 mm)					
Tubazione rettilinea - L = 5 m					
Sollecitazioni massime lungo la membratura					
Nsd [kN]		My,sd [kNm]		Mz,sd [kNm]	
0,00		-4,37		304,71	
Calcolo coefficiente di riduzione per instabilità a compressione					
Asse	L0,y [m]	Ncr [kN]	λ_y [-]	ϕ_y [-]	χ_y [-]
Y	2,50	81166,99	0,19	0,52	1,00
Asse	L0,z [m]	Ncr [kN]	λ_z [-]	ϕ_z [-]	χ_z [-]
Z	3,02	55621,87	0,23	0,53	0,99
Verifica - Caso generale biassiale					
Coefficienti d'interazione [-]			kyy	kzz	kzy
			0,860	0,900	0,540
Contributi separati [-]					
y	0,000		0,011		0,468
z	0,000		0,006		0,779
Somma contributi			y	0,4784	Verifica: < 1? ok
			z	0,7859	Verifica: < 1? ok

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3						
VERIFICHE DI INSTABILITA' - API 650: Spostamento in direz. verticale (25 mm)						
Tubazione rettilinea - L = 5 m						
Sollecitazioni massime lungo la membratura						
Nsd [kN]		My,sd [kNm]		Mz,sd [kNm]		
0,00		289,65		0,00		
Calcolo coefficiente di riduzione per instabilità a compressione						
Asse	L0,y [m]	Ncr [kN]	λ_y [-]	ϕ_y [-]	χ_y [-]	
Y	2,50	81166,99	0,19	0,52	1,00	
Asse	L0,z [m]	Ncr [kN]	λ_z [-]	ϕ_z [-]	χ_z [-]	
Z	3,02	55621,87	0,23	0,53	0,99	
Verifica - Caso generale biassiale						
Coefficienti d'interazione [-]			kyy	kzz	kzy	
			0,600	0,000	0,000	0,360
Contributi separati [-]						
y	0,000		0,494		0,000	
z	0,000		0,296		0,000	
Somma contributi			y	0,4940	Verifica: < 1?	ok
			z	0,2964	Verifica: < 1?	ok

Tabella 6.5.7 - Verifiche di instabilità per tubazione rettilinea con L pari a 5 m

Dalle tabelle è possibile osservare come anche le verifiche di instabilità siano soddisfatte, ad eccezione della condizione di spostamento imposto in direzione assiale rispetto alla tubazione. Si osserva come tale condizione di carico sia critica per tutte le tubazioni rettilinee, infatti nessuno dei casi analizzati soddisfa le verifiche previste in quanto il valore minimo dello sforzo normale in compressione viene raggiunto nella tubazione con lato pari a 50 m; in tale circostanza lo sforzo di compressione è pari a -2625,54 kN, il quale risulta di per sé prossimo alla resistenza plastica a compressione del profilo, senza aver ancora scontato le riduzioni per considerare il fenomeno dell'instabilità.

Per quanto riguarda le altre due condizioni di carico previste dalle API non si segnalano particolari criticità al crescere della lunghezza, in quanto le sollecitazioni tendono a smorzarsi, come dimostrato in precedenza. Diversamente le azioni interne derivanti da analisi con spettro tendono ad incrementarsi, perciò si riportano in seguito le verifiche effettuate sulla tubazione avente lunghezza pari a 50 m, la quale risulta essere la più sollecitata da questo punto di vista (inoltre la lunghezza libera è maggiore).

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3				
VERIFICHE DI RESISTENZA - Analisi modale con spettro di risposta				
Tubazione rettilinea - L = 50 m				
Sollecitazioni (incastro con vasca di contenimento)				
Nsd [Kn]	My,sd [kNm]	Mz,sd [kNm]	Verifica	
-35,56	-4,37	146,32		
Nsd/Npl,rd	My, sd/Mpl,y,rd	Mz,sd/Mpl,z,rd	Somma contributi	Verifica: < 1?
0,013	0,012	0,416	0,44	ok

Tabella 6.5.8 – Verifiche di resistenza per tubazione rettilinea con L pari a 50 m

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3						
VERIFICHE DI INSTABILITA' - Analisi modale con spettro di risposta						
Tubazione rettilinea - L = 50 m						
Sollecitazioni massime lungo la membratura						
Nsd [kN]		My, sd [kNm]		Mz, sd [kNm]		
-35,56		-4,37		146,32		
Calcolo coefficiente di riduzione per instabilità a compressione						
Asse	L0,y [m]	Ncr [kN]	λ_y [-]	ϕ_y [-]	χ_y [-]	
Y	5,00	20291,75	0,38	0,59	0,96	
Asse	L0,z [m]	Ncr [kN]	λ_z [-]	ϕ_z [-]	χ_z [-]	
Z	35,69	398,26	2,72	4,45	0,13	
Verifica - Caso generale biassiale						
Coefficienti d'interazione [-]			kyy	kzz	kzy	
			0,882	1,054	0,633	0,529
Contributi separati [-]						
y	0,013		0,011		0,263	
z	0,101		0,007		0,438	
Somma contributi			y	0,2873	Verifica: < 1?	ok
			z	0,5465	Verifica: < 1?	ok

Tabella 6.5.9 – Verifiche di instabilità per tubazione rettilinea con L pari a 50 m

Si può osservare come le sollecitazioni derivanti da analisi con spettro, sulla condotta lunga 50 m, siano entro i limiti. Di seguito si riassumono i risultati delle verifiche eseguite su tutte le condotte analizzate.

VERIFICHE DI RESISTENZA SULLE CONDOTTE RETTILINEE								
	Verifica	L = 5 m	L = 10 m	L = 15 m	L = 20 m	L = 30 m	L = 40 m	L = 50 m
ANALISI MODALE CON SPETTRO	Resistenza	0,02	0,07	0,16	0,27	0,43	0,43	0,44
	Instabilità (y)	0,02	0,04	0,09	0,15	0,23	0,25	0,29
	Instabilità (z)	0,01	0,05	0,14	0,23	0,38	0,44	0,55
API 650 (SPOST. RADIALE)	Resistenza	9,40	4,70	3,14	2,36	1,58	1,19	0,95
	Instabilità (y)	9,37	4,92	3,28	2,46	1,65	1,24	0,99
	Instabilità (z)	9,45	5,10	3,95	4,01	4,78	6,15	7,50
API 650 (SPOST. TANGENZ.)	Resistenza	0,88	0,23	0,11	0,09	0,07	0,03	0,02
	Instabilità (y)	0,48	0,12	0,06	0,05	0,04	0,02	0,02
	Instabilità (z)	0,79	0,19	0,09	0,07	0,05	0,02	0,01
API 650 (SPOST. RADIALE)	Resistenza	0,82	0,27	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
	Instabilità (y)	0,49	0,16	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	Instabilità (z)	0,30	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Tabella 6.5.10 – Verifiche di resistenza per tubazioni rettilinee

In tabella sono riportati i risultati delle verifiche effettuate applicando le formule (A), (B), (C); in verde sono evidenziate le verifiche soddisfatte (< 1) mentre in rosso le verifiche non soddisfatte (> 1). Si può osservare come l'applicazione di uno spostamento imposto in direzione assiale alla tubazione sia particolarmente critico, infatti nessuna delle tubazioni soddisfa le tre verifiche previste. Al crescere della lunghezza delle tubazioni aumenta anche la lunghezza libera, e tale aspetto prevale rispetto alla diminuzione dello sforzo normale. Per ovviare al problema si potrebbero introdurre dei soffietti, oppure deviare leggermente il percorso della tubazione allo scopo di aumentarne la flessibilità (vedi capitolo 7). Un'ulteriore soluzione riguarda l'utilizzo di supporti verticali che blocchino le traslazioni delle tubazioni, riducendo così le lunghezze di libera inflessione nel piano all'interasse dei sostegni. Per quanto riguarda gli altri spostamenti imposti previsti dalle API non si notano particolari criticità, in particolare all'incremento della lunghezza delle condotte. Comportamento opposto per quanto riguarda l'analisi con spettro di risposta, infatti è possibile osservare come cresca "l'impegno strutturale" richiesto alla tubazione.

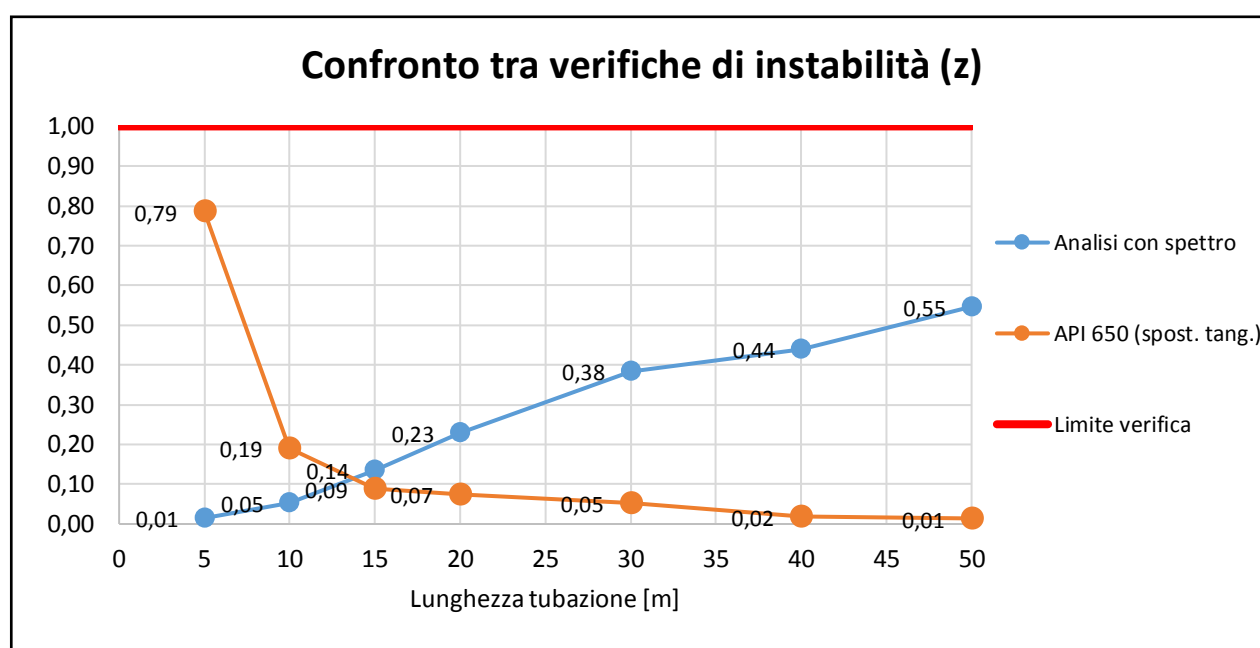


Figura 6.5.5 – Confronto tra verifiche di instabilità

Nel grafico soprastante è riportato il confronto tra due verifiche di instabilità, ed è possibile osservare come vi sia una sorta di transizione di comportamento tra spostamenti imposti (API) e analisi sismica con spettro, in termini di impegno strutturale complessivo (transizione tra 10 e 15 m).

6.5.2 Tubazioni a "L"

Di seguito si riportano i risultati delle verifiche effettuate sulle tubazioni a "L" partendo dal caso 1, secondo quanto esposto al punto 6.5. In particolare si considerano 4 condizioni di carico (per ciascuna tubazione) derivanti da:

- Analisi sismica con spettro di risposta, dal quale si ricava l'involuppo delle sollecitazioni, considerando le differenti direzioni in cui il sisma prevale;
- Spostamento in direzione radiale rispetto al serbatoio pari a 50 mm;
- Spostamento in direzione tangenziale rispetto al serbatoio pari a 50 mm;
- Spostamento in direzione verticale pari a 50 mm.

Per ciascuna condizione vengono effettuate le verifiche di resistenza sulla sezione maggiormente sollecitata mentre le verifiche di instabilità lungo la membratura più sollecitata.

Per quanto riguarda le lunghezze di libera inflessione si considerano i due piani di possibile sbandamento:

- Instabilità attorno all'asse Y ("asse forte" richiamando le sezioni ad "I" o "H"): sbandamento nel piano verticale;
- Instabilità attorno all'asse Z ("asse debole" richiamando le sezioni ad "I" o "H"): sbandamento nel piano orizzontale.

Considerando l'instabilità attorno a "Y" si considera come lunghezza libera d'inflessione la distanza tra i sostegni verticali, ipotizzando uno schema cautelativo in semplice appoggio, come nel caso di tubazioni rettilinee. Molto probabilmente l'instabilità si verificherà nel piano orizzontale attorno all'asse "Z", essendo la condotta libera di traslare trasversalmente in corrispondenza dei supporti. In tale piano è necessario considerare i due rami della condotta (verticale e orizzontale) in quanto i vincoli risultano essere diversi.

Per ricavare le lunghezze libere si opera analogamente al caso di condotte rettilinee, caricando di punta i due rami (in maniera separata) e valutando il moltiplicatore critico tramite analisi di buckling. Per quanto riguarda il ramo verticale si ottiene una lunghezza libera all'incirca pari a $0,7-0,8 L$; tale tratto è caratterizzato da un incastro e da un estremo vincolato alla porzione di tubazione orizzontale (che funge come una sorta di carrello equivalente, infatti $0,7 L$ è la lunghezza libera incastro-carrello). Diversamente il ramo orizzontale è vincolato con un incastro cedevole (schematizzante il collegamento con il serbatoio), mentre all'altro estremo vi è l'incrocio con il tratto verticale. In questo caso la lunghezza libera è prossima alla lunghezza della tubazione.

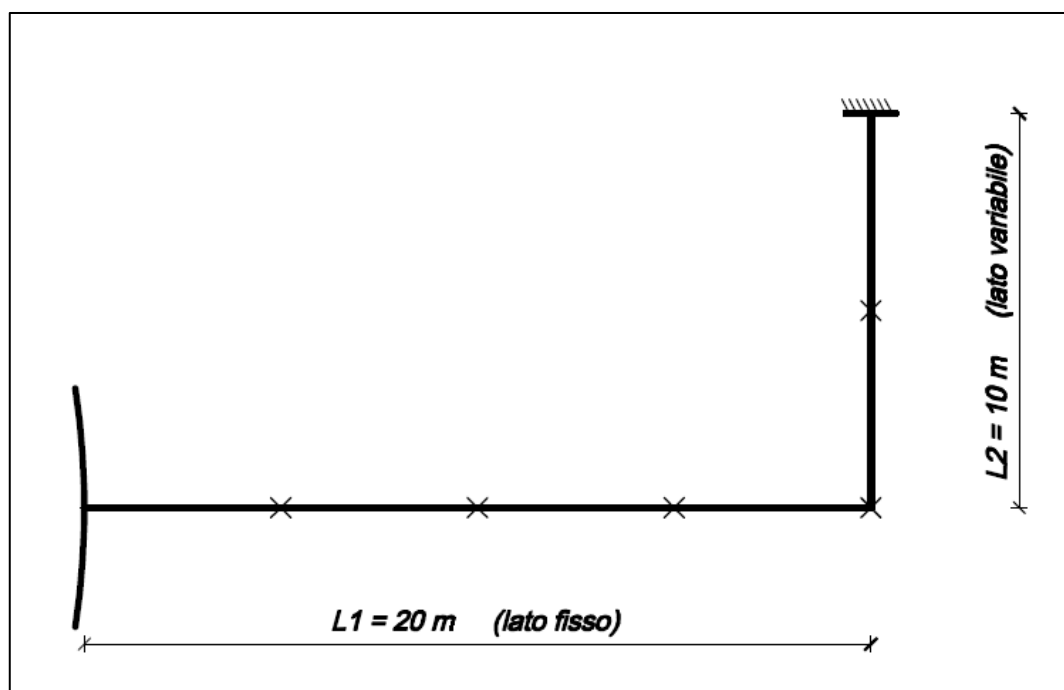


Figura 6.5.6 – Schema strutturale tubazione, caso 1

Prima di procedere con le verifiche di resistenza e instabilità si riporta il valore del taglio massimo agente sulle tubazioni a "L" per entrambi i casi, derivante dallo spostamento imposto in direzione radiale al serbatoio (API 650, caso 1, $L_2 = 10\text{ m}$) il quale genera uno sforzo tagliante pari a $61,14\text{ kN}$. Tale azione risulta essere la massima per tutte le tubazioni, ed è possibile osservare come sia ben inferiore al 50% del taglio plastico pari a $514,136\text{ kN}$ (si trascura il momento torcente presente in quanto non riduce la resistenza a taglio in modo significativo: $T = 0,39\text{ kNm}$). Perciò la verifica a taglio risulta abbondantemente soddisfatta per tutte le tubazioni, ed inoltre non vi è interazione tra azione tagliante e momento flettente.

Successivamente si riportano le verifiche di resistenza e instabilità per la tubazione a "L", avente lunghezza variabile L_2 pari a 5 m.

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3				
VERIFICHE DI RESISTENZA - Analisi modale con spettro di risposta				
Tubazione a "L" - $L_1 = 20$ m - $L_2 = 5$ m				
Sollecitazioni (incastro con vasca di contenimento)				
Nsd [Kn]	My,sd [kNm]	Mz,sd [kNm]	Verifica	
-19,31	-7,67	36,07		
Nsd/Npl,rd	My,sd/Mpl,y,rd	Mz,sd/Mpl,z,rd	Somma contributi	Verifica: < 1?
0,007	0,022	0,103	0,13	ok

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3				
VERIFICHE DI RESISTENZA - API 650: Spostamento in direzione radiale (50 mm)				
Tubazione a "L" - $L_1 = 20$ m - $L_2 = 5$ m				
Sollecitazioni (incastro con vasca di contenimento)				
Nsd [Kn]	My,sd [kNm]	Mz,sd [kNm]	Verifica	
-61,23	-6,42	305,57		
Nsd/Npl,rd	My,sd/Mpl,y,rd	Mz,sd/Mpl,z,rd	Somma contributi	Verifica: < 1?
0,022	0,018	0,869	0,91	ok

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3				
VERIFICHE DI RESISTENZA - API 650: Spostamento in direzione tangenziale (50 mm)				
Tubazione a "L" - $L_1 = 20$ m - $L_2 = 5$ m				
Sollecitazioni (incastro con vasca di contenimento)				
Nsd [Kn]	My,sd [kNm]	Mz,sd [kNm]	Verifica	
-0,55	-6,42	11,56		
Nsd/Npl,rd	My,sd/Mpl,y,rd	Mz,sd/Mpl,z,rd	Somma contributi	Verifica: < 1?
0,000	0,018	0,033	0,05	ok

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3				
VERIFICHE DI RESISTENZA - API 650: Spostamento in direzione verticale (25 mm)				
Tubazione a "L" - $L_1 = 20$ m - $L_2 = 5$ m				
Sollecitazioni (incastro con serbatoio)				
Nsd [Kn]	My,sd [kNm]	Mz,sd [kNm]	Verifica	
0,00	-73,38	0,00		
Nsd/Npl,rd	My,sd/Mpl,y,rd	Mz,sd/Mpl,z,rd	Somma contributi	Verifica: < 1?
0,000	0,209	0,000	0,21	ok

Tabella 6.5.11 – Verifiche di resistenza per tubazione a "L", caso 1

È possibile osservare come le verifiche di resistenza siano soddisfatte. Si procede con le verifiche di instabilità riportate in seguito.

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3					
VERIFICHE DI INSTABILITA' - Analisi modale con spettro di risposta					
Tubazione a "L" - L1 = 20 m - L2 = 5 m					
Sollecitazioni massime lungo la membratura					
Nsd [kN]		My, sd [kNm]		Mz, sd [kNm]	
-19,31		-4,67		36,07	
Calcolo coefficiente di riduzione per instabilità a compressione					
Asse	L0,y [m]	Ncr [kN]	λ_y [-]	ϕ_y [-]	χ_y [-]
Y	5,00	20291,75	0,38	0,59	0,96
Asse	L0,z [m]	Ncr [kN]	λ_z [-]	ϕ_z [-]	χ_z [-]
Z	3,43	43119,25	0,26	0,54	0,99
Verifica - Caso generale biassiale					
Coefficienti d'interazione [-]			kyy	kzz	kzy
			0,871	0,830	0,498
Contributi separati [-]					
y	0,007	0,012		0,051	
z	0,007	0,007		0,085	
Somma contributi		y	0,0698	Verifica: < 1?	ok
		z	0,0991	Verifica: < 1?	ok

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3					
VERIFICHE DI INSTABILITA' - API 650: Spostamento in direzione radiale (50 mm)					
Tubazione a "L" - L1 = 20 m - L2 = 5 m					
Sollecitazioni massime lungo la membratura					
Nsd [kN]		My, sd [kNm]		Mz, sd [kNm]	
-61,23		-6,42		305,57	
Calcolo coefficiente di riduzione per instabilità a compressione					
Asse	L0,y [m]	Ncr [kN]	λ_y [-]	ϕ_y [-]	χ_y [-]
Y	5,00	20291,75	0,38	0,59	0,96
Asse	L0,z [m]	Ncr [kN]	λ_z [-]	ϕ_z [-]	χ_z [-]
Z	3,43	43119,25	0,26	0,54	0,99
Verifica - Caso generale biassiale					
Coefficienti d'interazione [-]			kyy	kzz	kzy
			0,884	0,901	0,541
Contributi separati [-]					
y	0,023		0,016		0,470
z	0,022		0,010		0,783
Somma contributi			y	0,5086	Verifica: < 1?
			z	0,8146	Verifica: < 1?

Tabella 6.5.12 - Verifiche di instabilità per tubazione a "L", caso 1

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3					
VERIFICHE DI INSTABILITA' - API 650: Spostamento in direz. tangenziale (50 mm)					
Tubazione a "L" - L1 = 20 m - L2 = 5 m					
Sollecitazioni massime lungo la membratura					
Nsd [kN]		My, sd [kNm]		Mz, sd [kNm]	
-0,55		-6,42		11,56	
Calcolo coefficiente di riduzione per instabilità a compressione					
Asse	L0,y [m]	Ncr [kN]	λ_y [-]	ϕ_y [-]	χ_y [-]
Y	5,00	20291,75	0,38	0,59	0,96
Asse	L0,z [m]	Ncr [kN]	λ_z [-]	ϕ_z [-]	χ_z [-]
Z	3,43	43119,25	0,26	0,54	0,99
Verifica - Caso generale biassiale					
Coefficienti d'interazione [-]			kyy	kzz	kzy
			0,860	0,900	0,540
Contributi separati [-]					
y	0,000		0,016		0,018
z	0,000		0,009		0,030
Somma contributi			y	0,0336	Verifica: < 1?
			z	0,0392	Verifica: < 1?

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3					
VERIFICHE DI INSTABILITA' - API 650: Spostamento in direz. verticale (25 mm)					
Tubazione a "L" - L1 = 20 m - L2 = 5 m					
Sollecitazioni massime lungo la membratura					
Nsd [kN]		My, sd [kNm]		Mz, sd [kNm]	
0,00		-73,38		0,00	
Calcolo coefficiente di riduzione per instabilità a compressione					
Asse	L0,y [m]	Ncr [kN]	λ_y [-]	ϕ_y [-]	χ_y [-]
Y	5,00	20291,75	0,38	0,59	0,96
Asse	L0,z [m]	Ncr [kN]	λ_z [-]	ϕ_z [-]	χ_z [-]
Z	20,00	1268,23	1,52	1,80	0,36
Verifica - Caso generale biassiale					
Coefficienti d'interazione [-]			kyy	kzz	kzy
			0,600	0,000	0,360
Contributi separati [-]					
y	0,000		0,125		0,000
z	0,000		0,075		0,000
Somma contributi			y	0,1251	Verifica: < 1?
			z	0,0751	Verifica: < 1?

Tabella 6.5.13 - Verifiche di instabilità per tubazione a "L", caso 1

Dalle tabelle è possibile osservare come anche le verifiche di instabilità siano soddisfatte con un certo margine, sia per le sollecitazioni derivanti da analisi con spettro, sia per le sollecitazioni derivanti dagli spostamenti imposti dalle API 650.

Per quanto riguarda le condizioni di carico previste dalle API non si segnalano particolari criticità al crescere della lunghezza, in quanto le sollecitazioni tendono a smorzarsi, come dimostrato in precedenza. Diversamente le azioni interne derivanti da analisi con spettro tendono ad incrementarsi, perciò si riportano in seguito le verifiche effettuate sulla tubazione avente lunghezza pari a 50 m, la quale risulta essere la più sollecitata da questo punto di vista (inoltre la lunghezza di libera inflessione è maggiore; la membratura più sollecitata ricade nel tratto verticale, da qui la scelta di L_0).

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3				
VERIFICHE DI RESISTENZA - Analisi modale con spettro di risposta				
Tubazione a "L" - $L_1 = 20$ m - $L_2 = 5$ m				
Sollecitazioni (incastro con vasca di contenimento)				
Nsd [Kn]	My,sd [kNm]	Mz,sd [kNm]	Verifica	
-37,64	-5,47	158,23		
Nsd/Npl,rd	My,sd/Mpl,y,rd	Mz,sd/Mpl,z,rd	Somma contributi	Verifica: < 1?
0,013	0,016	0,450	0,48	ok

Tabella 6.5.14 – Verifiche di resistenza per tubazione a "L", caso 1

VERIFICHE STRUTTURALI SECONDO EC-3							
VERIFICHE DI INSTABILITA' - Analisi modale con spettro di risposta							
Tubazione a "L" - L1 = 20 m - L2 = 5 m							
Sollecitazioni massime lungo la membratura							
Nsd [kN]		My, sd [kNm]		Mz, sd [kNm]			
-37,64		-5,47		158,23			
Calcolo coefficiente di riduzione per instabilità a compressione							
Asse	L0,y [m]	Ncr [kN]	λ_y [-]	ϕ_y [-]	χ_y [-]		
Y	5,00	20291,75	0,38	0,59	0,96		
Asse	L0,z [m]	Ncr [kN]	λ_z [-]	ϕ_z [-]	χ_z [-]		
Z	35,69	398,26	2,72	4,45	0,13		
Verifica - Caso generale biassiale							
Coefficienti d'interazione [-]				kyy	kzz	kzy	kzy
				0,882	1,067	0,640	0,529
Contributi separati [-]							
y	0,014		0,014		0,288		
z	0,107		0,008		0,480		
Somma contributi			y	0,3157	Verifica: < 1?		ok
			z	0,5954	Verifica: < 1?		ok

Tabella 6.5.15 – Verifiche di instabilità per tubazione a "L", caso 1

Si può osservare come le sollecitazioni derivanti da analisi con spettro, sulla condotta lunga 50 m, siano entro i limiti. Di seguito si riassumono i risultati delle verifiche eseguite su tutte le condotte analizzate (caso 1).

VERIFICHE DI RESISTENZA SULLE CONDOTTE A "L" (L1 = 20 m, L2 variabile)								
ANALISI MODALE CON SPETTRO	Verifica	L ₂ = 5 m	L ₂ = 10 m	L ₂ = 15 m	L ₂ = 20 m	L ₂ = 30 m	L ₂ = 40 m	L ₂ = 50 m
	Resistenza	0,13	0,14	0,17	0,26	0,43	0,47	0,48
	Instabilità (y)	0,07	0,08	0,09	0,14	0,24	0,24	0,32
	Instabilità (z)	0,10	0,11	0,14	0,22	0,39	0,39	0,60
API 650 (SPOST. RADIALE)	Resistenza	0,91	0,24	0,11	0,07	0,04	0,03	0,02
	Instabilità (y)	0,51	0,14	0,07	0,04	0,03	0,03	0,02
	Instabilità (z)	0,81	0,21	0,10	0,06	0,03	0,03	0,02
API 650 (SPOST. TANGENZ.)	Resistenza	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
	Instabilità (y)	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	Instabilità (z)	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
API 650 (SPOST. RADIALE)	Resistenza	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,21	0,21
	Instabilità (y)	0,13	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	Instabilità (z)	0,08	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Tabella 6.5.16 – Verifiche di resistenza per tubazioni a "L", caso 1

In tabella sono riportati i risultati delle verifiche effettuate applicando le formule (A), (B), (C); in verde sono evidenziate le verifiche soddisfatte (< 1) mentre in rosso le verifiche non soddisfatte (> 1). Si può osservare come tutte le verifiche siano soddisfatte: per quanto riguarda gli spostamenti imposti della API si nota una diminuzione dell'impegno strutturale richiesto alle condotte al crescere della lunghezza delle stesse. Comportamento opposto per quanto riguarda le verifiche derivanti da analisi con spettro di risposta. Si riporta successivamente un confronto grafico tra verifiche di instabilità.

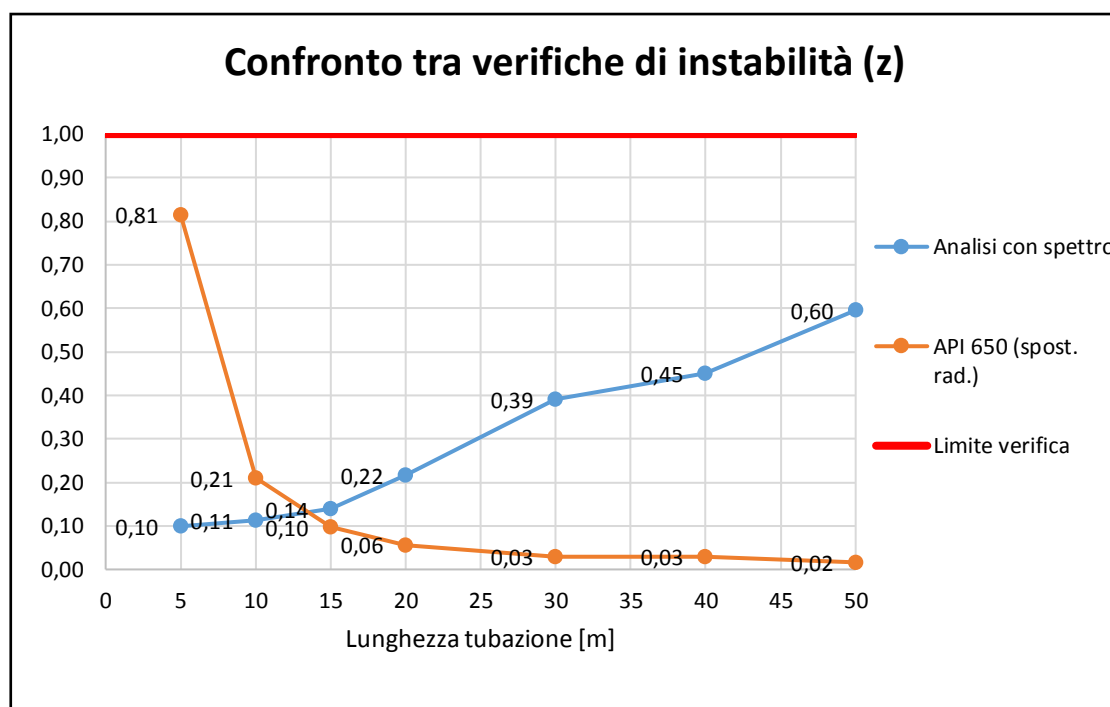


Figura 6.5.7 – Confronto tra verifiche di instabilità

Nel grafico soprastante è riportato il confronto tra due verifiche di instabilità, ed è possibile osservare come vi sia una sorta di transizione di comportamento tra spostamenti imposti (API) e analisi sismica con spettro, in termini di impegno strutturale complessivo. Tale transizione si verifica in corrispondenza di tubazioni aventi lunghezza compresa tra 10-15 m.

Per concludere le verifiche di resistenza si riportano i risultati del secondo caso analizzato, ovvero tubazioni a "L" con L_1 variabile ed L_2 fisso.

VERIFICHE DI RESISTENZA SULLE CONDOTTE A "L" ($L_2 = 20$ m, L_1 variabile)								
ANALISI MODALE CON SPETTRO	Verifica	$L_1 = 5$ m	$L_1 = 10$ m	$L_1 = 15$ m	$L_1 = 20$ m	$L_1 = 30$ m	$L_1 = 40$ m	$L_1 = 50$ m
	Resistenza	0,24	0,25	0,25	0,25	0,30	0,31	0,33
	Instabilità (y)	0,13	0,14	0,14	0,15	0,19	0,20	0,23
	Instabilità (z)	0,20	0,21	0,21	0,22	0,35	0,42	0,46
API 650 (SPOST. RADIALE)	Resistenza	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	Instabilità (y)	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
	Instabilità (z)	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
API 650 (SPOST. TANGENZ.)	Resistenza	0,09	0,05	0,04	0,04	0,02	0,02	0,02
	Instabilità (y)	0,05	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	Instabilità (z)	0,07	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
API 650 (SPOST. RADIALE)	Resistenza	0,28	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
	Instabilità (y)	0,17	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
	Instabilità (z)	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08

Tabella 6.5.17 – Verifiche di resistenza per tubazioni a "L", caso 2

Osservando la tabella è possibile notare un andamento del tutto analogo al caso 1.

6.6 Calcolo degli spostamenti del serbatoio soggetto ad azione sismica

6.6.1 Introduzione e ipotesi di calcolo

Nei punti precedenti del presente capitolo si sono calcolati gli spostamenti in corrispondenza del punto di ingresso della tubazione di mandata. Tali spostamenti sono stati valutati mediante analisi modale con spettro di risposta sulle differenti configurazioni di condotte. Nello svolgimento di queste analisi si è trascurato il comportamento dinamico del serbatoio, infatti si è tenuto conto solo della rigidezza del collegamento mediante l'utilizzo di molle traslazionale e rotazionali. Ovviamente le pareti del serbatoio, a causa delle oscillazioni del liquido contenuto, tendono a spostarsi mettendo in movimento le tubazioni di mandata ad esso collegate. Le condotte devono possedere quindi una certa

flessibilità allo scopo di evitare strappi e rotture nel mantello con conseguente perdita di fluido: proprio a questo aspetto sono legati gli spostamenti imposti dalla Norme API.

La tabella E-8 delle API, riportata in precedenza, è ispirata proprio all'aspetto sopra citato, infatti contiene al suo interno l'entità degli spostamenti alle quali le tubazioni devono essere in grado di resistere, a seconda del tipo di ancoraggio del serbatoio. In conclusione di questo capitolo si riporta un'analisi sismica del serbatoio considerato in precedenza, mediante analisi modale con spettro di risposta, allo scopo di valutare l'ordine di grandezza degli spostamenti in corrispondenza del punto di attacco della tubazione, confrontandoli successivamente con quelli imposti dalle API.

SPOSTAMENTI MASSIMI COLLEGAMENTO SERBATOIO-TUBAZIONE (ANALISI MODALE CON SPETTRO DI RISPOSTA)				
Direzione spostamento	API 650 [mm]	Tubazioni rettilinee [mm]	Tubazioni a "L" caso 1 [mm]	Tubazioni a "L" caso 2 [mm]
Spostamento radiale	50	0,30	0,54	1,44
Spostamento tangenziale	50	2,42	2,58	2,59
Spostamento verticale	25	0,00	0,00	0,00

Tabella 6.6.1 – Spostamenti massimi in corrispondenza del collegamento serbatoio-tubazione

Osservando i valori riportati in tabella si può notare la differenza tra gli spostamenti previsti dalle API 650 e quelli ricavati sulle tubazioni. Perciò l'obiettivo di questa parte è il calcolo degli spostamenti del serbatoio in corrispondenza del collegamento al fine di comprendere quale sia la loro entità (ovviamente non si vuole mettere in discussione la Norma ma comprendere meglio la provenienza di tali valori).

Per quanto riguarda il calcolo del serbatoio si prenderà spunto dal modello semplificato proposto dall'Eurocodice 8-4. Quest'ultimo si basa sul modello proposto da Malhotra, in cui gli effetti idrodinamici sono semplificati con un modello dinamico discreto (figura 6.6.1). In genere è possibile dimostrare come questo modello semplificato fornisca stime (del taglio e

del momento alla base) più cautelative, rispetto ai risultati di un'analisi modale dettagliata. Il modello dinamico discreto assume che una certa porzione di liquido (detta “massa impulsiva”) posta nella parte inferiore del serbatoio agisca come una massa rigidamente attaccata al serbatoio, e si muova all'unisono con esso, mentre la restante parte superiore di liquido (detta “massa convettiva”) si muova in modo indipendente, mostrando fenomeni di sbattimento (“sloshing”).

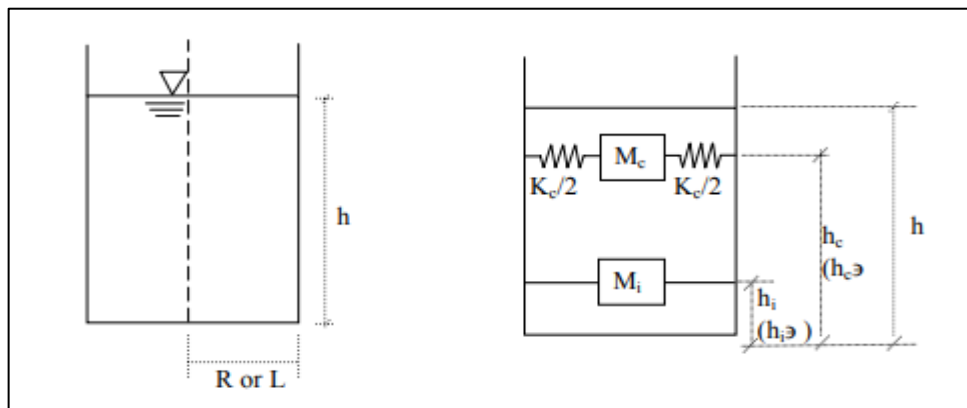


Immagine 6.6.1 – Modello semplificato serbatoio

Il modello permette di valutare momento e taglio alla base della parete fornendo formule semplificate per la valutazione dei primi periodi della massa impulsiva e convettiva (quest'ultime determinate per via grafica). Noti i due periodi è possibile ricavare l'accelerazione corrispondente entrando nello spettro. Dai prodotti tra masse e accelerazioni si ottengono delle forze dalle quali ricavare facilmente taglio e momento alla base.

Per l'analisi sismica del serbatoio si prende spunto da quanto riportato sopra, con l'obiettivo di valutare non forze e tagli ma spostamenti del serbatoio sottoposto ad azione sismica, in corrispondenza del punto di ingresso della tubazione. Si valuteranno gli spostamenti nelle tre direzioni considerate dalla API, ovvero radiale, tangenziale e verticale. A tale scopo si realizza un modello di calcolo FEM del serbatoio analizzato in precedenza (stesse caratteristiche in termini di analisi e mesh utilizzata, si faccia riferimento al capitolo 3), caratterizzato da un raggio pari a 20 m e un'altezza della parete di 10 m. Lo spessore del mantello viene assunto costante e pari a 15 mm; per quanto riguarda il grado di riempimento si ipotizza pari al 90%.

H/R	C_1	C_c	m_i/m	m_c/m	h_i/H	h_c/H	h_{i1}/H	h_{c1}/H
0,3	9,28	2,09	0,176	0,824	0,400	0,521	2,640	3,414
0,5	7,74	1,74	0,300	0,700	0,400	0,543	1,460	1,517
0,7	6,97	1,60	0,414	0,586	0,401	0,571	1,009	1,011
1,0	6,36	1,52	0,548	0,452	0,419	0,616	0,721	0,785
1,5	6,06	1,48	0,686	0,314	0,439	0,690	0,555	0,734
2,0	6,21	1,48	0,763	0,237	0,448	0,751	0,500	0,764
2,5	6,56	1,48	0,810	0,190	0,452	0,794	0,480	0,796
3,0	7,03	1,48	0,842	0,158	0,453	0,825	0,472	0,825

Tabella 6.6.2 – Prospetto A.1 EC8-4

Con i dati riportati è possibile entrare nella tabella dell'Eurocodice (prospetto A.1) e ricavare i parametri necessari. Nel caso in esame H/R (H = altezza del fluido) è pari a 0,45, perciò si fa riferimento al valore più prossimo ovvero 0,5 evidenziato in tabella 6.6.2. Da quest'ultima è possibile ricavare le masse associate ai fenomeni impulsivi e convettivi, in funzione della massa complessiva contenuta, con le rispettive altezze di applicazione.

Il genere quando si modella un serbatoio tramite codice FEM, si utilizzano elementi finiti appositi per modellare il liquido contenuto, per poterne visualizzare spostamenti ed effetti sulla parete del contenitore. Nel caso in esame si realizza un modello più semplice che tiene conto degli effetti della sola componente impulsiva, rappresentante l'azione del fluido vicino alla base del serbatoio che si muove rigidamente con la parete flessibile dello stesso (tale componente è responsabile della maggior parte degli spostamenti del mantello). La componente convettiva invece viene trascurata, in quanto generalmente è sfalsata rispetto alla precedente e possiede un periodo di vibrazione prossimo ai 4 secondi, esterno quindi alla zona di amplificazione dello spettro (dove ricade generalmente la componente impulsiva; si ipotizza il contenuto di acqua).

Parametro		Unità di misura	Descrizione
H	10	m	Altezza serbatoio
R	20	m	Raggio curvatura
h	9	m	Altezza liquido contenuto
h/R	0,45	[-]	Rapporto
V	11309,73	m ³	Volume liquido
ρ	1000	kg/m ³	Densità liquido
M	11309733,6	kg	Massa totale liquido
M _i /M	0,3	[-]	Rapporto di massa
M _c /M	0,7	[-]	Rapporto di massa
M _i	3392920,1	kg	Massa impulsiva
M _c	7916813,5	kg	Massa convettiva
h _i /h	0,4	[-]	Rapporto di altezze
h _i	3,6	m	Altezza massa impulsiva

Tabella 6.6.3 – Caratteristiche del serbatoio per la realizzazione del modello FEM

Nella tabella 6.6.3 sono riportati i dati utili alla schematizzazione del problema. Come detto verrà modellata solo la componente impulsiva; in particolare quest'ultima verrà applicata alla parete del serbatoio in modo indiretto aumentando la densità del materiale per un'altezza pari a 3,6, come da calcolo in tabella. La massa del liquido viene quindi ripartita ed applicata alla parete calcolando una densità equivalente.

Parametro		Unità di misura	Descrizione
R _{est}	20	m	Raggio esterno
R _{int}	19,98	m	Raggio interno
V _{parete}	25,12	m ³	Volume parete acciaio
ρ	7850	kg/m ³	Densità acciaio
m _{parete serbatoio}	197193,40	kg	Massa acciaio totale
h _i	3,60	m	altezza massa impulsiva
m _{parete serbatoio, 3,6 m}	70989,60	kg	Massa acciaio (3,6 m)
M _i	3392920,10	kg	Massa impulsiva
M _{tot}	3463909,70	kg	Massa totale (liquido più acciaio)
V _{parete serbatoio, 3,6 m}	9,04	m ³	Volume acciaio (3,6 m)
ρ_{mod}	383037,60	kg/m ³	Densità modificata

Tabella 6.6.4 – Calcoli effettuati

In tabella sono riassunti i calcoli effettuati al fine di valutare la densità equivalente da applicare alla porzione inferiore del mantello per un'altezza pari a 3,6 m. Si è valutata la massa complessiva costituita dalla massa delle virole ($h = 3,6$ m) e dalla massa impulsiva, dividendo tale valore per il volume della parete del serbatoio (sempre per un'altezza pari a 3,6 m). La densità così calcolata è stata applicata al serbatoio per l'altezza di competenza della componente impulsiva, mentre alla restante parte è stata semplicemente applicata la densità dell'acciaio.

6.6.2 Calcolo degli spostamenti in corrispondenza del collegamento tra serbatoio e tubazione

Nella figura successiva è riportata un'immagine del modello di calcolo realizzato, in accordo con quanto riportato al punto precedente. Il passaggio successivo riguarda il calcolo dei periodi di vibrazione propri del serbatoio, che considera la massa impulsiva applicata.

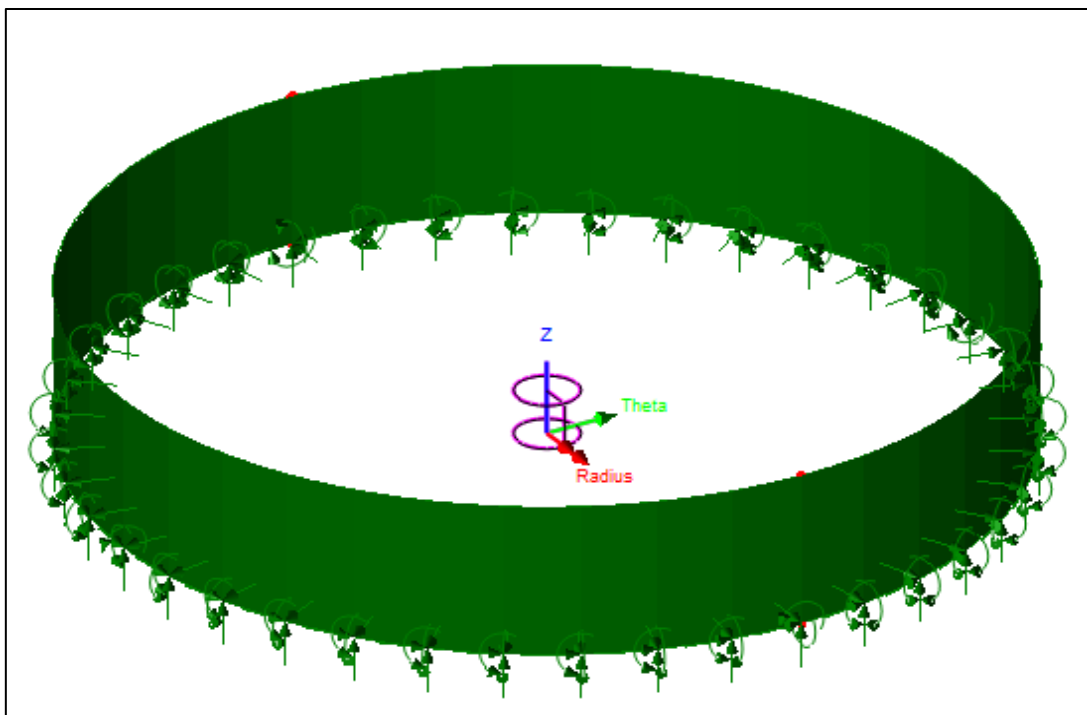


Figura 6.6.2 – Modello di calcolo

Di seguito si riportano le frequenze e i periodi di vibrazione dei primi 10 modi del serbatoio, necessari per effettuare l'analisi con spettro di risposta.

	Frequenze	Periodi
MODO 1	[Hz]	[s]
MODO 2	2,05	0,49
MODO 3	2,11	0,47
MODO 4	2,11	0,47
MODO 5	2,24	0,45
MODO 6	2,24	0,45
MODO 7	2,41	0,41
MODO 8	2,41	0,41
MODO 9	2,63	0,38
MODO 10	2,63	0,38

Tabella 6.6.5 – Frequenze e periodi di vibrazione

Si può osservare come i periodi siano molto contenuti e vicini tra loro (CQC) in quanto la struttura schematizzata è piuttosto rigida. Successivamente è possibile applicare lo spettro di risposta nelle tre direzioni come effettuato per le tubazioni (per la componente verticale è stato utilizzato l'apposito spettro), considerando una direzione prevalente del

sisma per ciascuna combinazione. Ottenuti i valori degli spostamenti da analisi modale con spettro è necessario sommarli con gli spostamenti derivanti dai carichi statici agenti, ovvero la spinta statica del liquido contenuto. Nella tabella riportata successivamente si riportano i risultati ottenuti.

SPOSTAMENTI IN CORRISPONDENZA DEL COLLEGAMENTO TRA TUBAZIONE E SERBATOIO						
Componente di spostamento considerata	CONTRIBUTO STATICO [mm]	ANALISI MODALE CON SPETTRO			COMBINAZIONE SISMICA (SPOSTAMENTI MASSIMI) [mm]	API 650
		DIREZIONE SISMA				
		X [mm]	Y [mm]	Z [mm]		
RADIALE	3,17	5,18	0,36	0,10	8,49	50
TANGENZIALE	0,00	4,83E-03	0,21	1,22E-04	0,21	50
VERTICALE	-1,41E-03	8,40E-04	6,20E-04	1,98E-02	0,03	25

Tabella 6.6.6 – Spostamenti derivanti da combinazione sismica

In tabella sono riportate le componenti di spostamento considerate e i diversi contributi derivanti rispettivamente dalla spinta statica del liquido e dall'applicazione dello spettro separatamente per ciascuna direzione. La penultima colonna riporta i risultati derivanti dalla combinazioni sismica, combinando opportunamente i vari contributi, mentre nell'ultima i valori imposti dalle API.

Generalmente è possibile osservare come vi sia una notevole differenza tra gli spostamenti ottenuti da analisi sismica e tra gli spostamenti da imporre alla tubazione secondo API 650. In particolare nei casi delle componenti tangenziali e verticali. Da ricerche bibliografiche è emersa la motivazione riguardo tali differenze, infatti l'obiettivo principale delle Norme è la tutela dell'integrità del serbatoio, perciò si richiede una notevole flessibilità alle condotte, allo scopo di scongiurare possibili danneggiamenti al mantello in occasione di fenomeni quali deformazioni per instabilità elasto-plastica oppure in caso di sollevamento del serbatoio dal fondo su cui poggia. Questi danneggiamenti creano spostamenti di entità elevata in corrispondenza del collegamento con la tubazione.

Ipotizzando di non conoscere le Norme Americane risulta comunque necessario applicare tali spostamenti ottenuti alle tubazioni studiate, al fine di verificare il rispetto o meno delle verifiche previste da normativa. Osservando i risultati ottenuti dalle verifiche precedenti si ritiene opportuno applicare alle sole tubazioni rettilinee lo spostamento in direzione radiale (assiale per il tubo), in quanto risulta la verifica più critica; infatti nessuna condotta rettilinea rientrava nelle verifiche in tale circostanza.

SFORZO NORMALE [kN]	API 650	ANALISI SERBATOIO
Spostamento imposto	50 mm	8,49 mm
L = 5 m	-26250,23	-4462,50
L = 10 m	-13125,11	-2231,25
L = 15 m	-8750,12	-1487,50
L = 20 m	-6562,55	-1115,63
L = 30 m	-4375,45	-743,75
L = 40 m	-3281,25	-557,81
L = 50 m	-2625,54	-446,25

Tabella 6.6.7 – Confronto sforzo normale

In tabella è riportato il confronto tra lo sforzo normale in caso di spostamento imposto pari a 50 mm (API) e lo sforzo normale derivante da analisi sismica sul serbatoio, pari a 8,49 mm. Successivamente si riporta l'esito delle verifiche di instabilità e resistenza per entrambe le condizioni di carico.

VERIFICHE DI RESISTENZA SULLE CONDOTTE RETTILINEE								
ANALISI SISMICA SERBATOIO (SPOST. RADIALE)	Verifica	L ₁ = 5 m	L ₁ = 10 m	L ₁ = 15 m	L ₁ = 20 m	L ₁ = 30 m	L ₁ = 40 m	L ₁ = 50 m
	Resistenza	1,61	0,81	0,54	0,41	0,28	0,21	0,17
	Instabilità (y)	1,60	0,85	0,57	0,43	0,29	0,22	0,18
	Instabilità (z)	1,61	0,87	0,68	0,69	0,82	1,05	1,28
API 650 (SPOST. RADIALE)	Resistenza	9,40	4,70	3,14	2,36	1,58	1,19	0,95
	Instabilità (y)	9,37	4,92	3,28	2,46	1,65	1,24	0,99
	Instabilità (z)	9,45	5,10	3,95	4,01	4,78	6,15	7,50

Tabella 6.6.8 – Verifiche sulle condotte

Osservando la tabella 6.6.8 è possibile osservare come lo spostamento derivante da analisi sismica sul serbatoio (direzione radiale) riduca le criticità in numerose situazioni. La condotta avente lunghezza pari a 5 m mostra problematiche anche in questa occasione, a causa della sua elevata rigidità. Le tubazioni aventi lunghezza rispettivamente pari a 40 e 50 m non superano la verifica di instabilità intorno all'asse z , a causa dell'aumento della lunghezza libera d'inflessione che tende a sovrastare rispetto alla diminuzione di sforzo normale nella condotta.

6.7 Conclusioni

Nel capitolo in oggetto si è calcolato l'effetto del sisma sulle tubazioni mediante il metodo classico utilizzato in ingegneria sismica ovvero l'analisi modale con spettro di risposta, come suggerito peraltro dalla Norme Europee. Tale tipo di analisi necessita del calcolo dell'azione sismica riferita al sito in cui ci si trova, allo scopo di poter applicare lo spettro di risposta alle tubazioni analizzate. Si è visto come le condotte rispondano in maniera differente all'input sismico, a seconda della loro geometria e a seconda della loro lunghezza. In particolare le tubazioni con sviluppo limitato risultano poco sollecitate, mentre al crescere della lunghezza generalmente si osserva un aumento degli spostamenti in direzione trasversale all'asse delle stesse con conseguente incremento delle sollecitazioni.

Parallelamente all'analisi modale con spettro di risposta si sono affiancate le verifiche di flessibilità della tubazione previste dalle Norme API 650. Tali norme impongono degli spostamenti di differente entità in corrispondenza del collegamento tra tubazione e serbatoio allo scopo di verificare che la condotta sia sufficientemente flessibile, evitando possibili danneggiamenti sul mantello dello stesso.

Dall'applicazione di queste due tipologie di analisi sono emerse differenti criticità al variare sia della geometria che della lunghezza delle condotte. In particolare le tubazioni rettilinee si sono dimostrate particolarmente suscettibili agli spostamenti imposti previsti dalle API, soprattutto in caso di sviluppo limitato in lunghezza. Si è notata dunque una sorta

di transizione in quanto le Norme API creano elevate sollecitazioni in particolare nelle condotte “corte”, diversamente l’analisi con spettro tende a sollecitare maggiormente le condotte “lunghe”. Per quanto riguarda le tubazioni aventi configurazione geometrica a “L” si sono osservate in genere poche criticità in quanto possiedono flessibilità maggiore.

Successivamente si sono svolte le verifiche di resistenza sulle tubazioni secondo quanto previsto da EC-3. Generalmente l’applicazione dello spettro non crea particolari problematiche, infatti tutte le tubazioni analizzate rispettano i limiti previsti sia dalle verifiche di resistenza che dalla verifiche di instabilità. Ciò è essenzialmente dovuto alla poca massa associata alle stesse, infatti si nota una maggiore criticità al crescere della lunghezza delle condotte in quanto aumenta la massa oscillante. Diversamente l’applicazione degli spostamenti imposti previsti dalle API ha creato maggiori problematiche in particolare alle condotte “corte” a causa della loro elevata rigidità, sia in termini assiali che flessionali.

In ultimo è stata effettuata un’analisi sismica semplificata sul serbatoio in esame al fine di cogliere l’ordine di grandezza degli spostamenti nel punto di ingresso/uscita delle tubazioni. Si sono ottenuti generalmente risultati intermedi tra quanto ottenuto con l’analisi con spettro e tra quanto previsto dalle Norme API. Da ricerche bibliografiche è emerso come le Norme API impongano spostamenti di elevata entità al fine di prevenire eventuali danneggiamenti del mantello ad opera delle tubazioni ad esso collegate, in particolare in caso di fenomeni di danneggiamento del serbatoio quali sollevamento oppure instabilità elasto-plastica. Entrambi fenomeni che causano spostamenti di elevata entità in direzione radiale, tangenziale e verticale.

7. DISPOSITIVI ANTISISMICI PER LE TUBAZIONI

7.1 Introduzione

Il presente capitolo tratta le varie tipologie di dispositivi in commercio utilizzati per migliorare il comportamento sismico delle tubazioni. Per quanto riguarda la protezione sismica delle strutture negli ultimi anni ha preso sempre più piede la tecnica dell'isolamento alla sismico.

L'isolamento sismico, con la sua capacità di abbattere significativamente le accelerazioni orizzontali e di rendere uniforme il moto della sovrastruttura durante il terremoto, è certamente una tecnologia molto attrattiva anche per gli impianti industriali. Fra l'altro, l'isolamento sismico consente di standardizzare il progetto, rendendolo praticamente indipendente dal



Figura 7.1.1 – Serbatoio isolato con dispositivi a pendolo scorrevole

sito di costruzione (e questo è certamente utile per impianti destinati a essere realizzati in tutte le parti del mondo). Dal punto di vista strettamente tecnico, lo svantaggio dell'isolamento sismico è principalmente dato dallo spostamento relativo tra la parte isolata ed il terreno e la conseguente necessità di prevedere un opportuno spazio (gap) fra le due parti. Negli impianti industriali, il gap sismico è spesso attraversato da reti impiantistiche, in particolare tubazioni, contenenti fluidi infiammabili o pericolosi, spesso anche in temperatura e pressione. Per limitare questo problema, per il quale sono comunque già disponibili giunti di dilatazione per ogni esigenza, conviene estendere il più possibile la zona isolata.

Le reti impiantistiche che attraversano il gap dovranno essere dotate di appositi giunti di espansione in grado di assorbire gli spostamenti relativi fra le due parti in caso di sisma. Ovviamente cavi elettrici e piccole tubazioni (tipiche degli edifici civili) non creano

particolari difficoltà. Diverso è il caso di grosse tubazioni contenenti liquidi infiammabili/tossici o ad elevata temperatura e pressione, tipici degli impianti industriali.

Di seguito verranno analizzate le principali tipologie di giunti di espansione presenti in commercio (alcuni utilizzati anche per assorbire le dilatazioni termiche delle condotte):

1. Compensatori a “omega” od a “lira”;
2. Compensatori a soffietto;
3. Giunti antisismici per le tubazioni.

7.2 Compensatori a “omega” od a “lira”

Tali dispositivi assorbono le dilatazioni assiali di tubazioni rettilinee. Non richiedono manutenzione ma presentano degli ingombri maggiori rispetto ad altre tipologie. In genere è necessario utilizzare dei vincoli diversi rispetto a quelli utilizzati nelle analisi precedenti, come riportato nell’immagine sottostante.

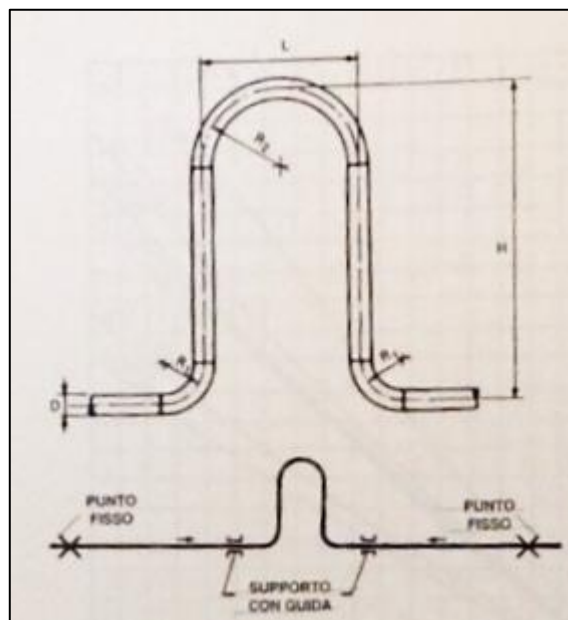


Figura 7.2.1 – Compensatore a “lira”

Si tratta di una tipologia molto diffusa in quanto consiste in una semplice modifica del percorso della condotta, in genere realizzata nel piano della tubazione. Come detto nasce principalmente per assorbire le dilatazioni termiche.

Di seguito si riporta l'applicazione del compensatore a "lira" ad una condotta rettilinea studiata in precedenza, allo scopo di constatare se l'applicazione di tale dispositivo comporti il rispetto o meno delle verifiche di resistenza e instabilità. In particolare si analizza la tubazione rettilinea con lunghezza pari a 15 m (per motivi di ingombro) applicando lo spostamento imposto in direzione assiale (50 mm) come previsto dalle API. Tale condizione di carico era risultata particolarmente critica per tutte le condotte rettilinee, infatti nessuna di esse soddisfaceva le verifiche effettuate. Di seguito si riporta la geometria del problema.

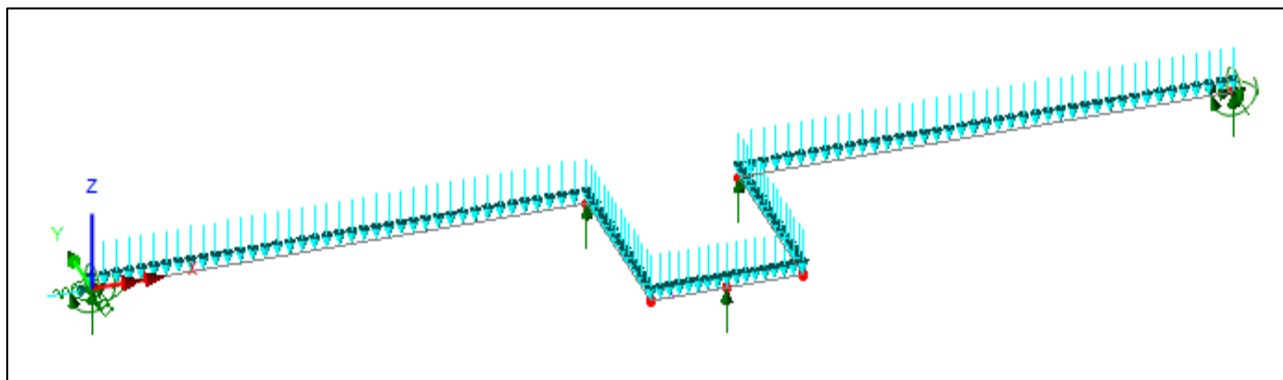


Figura 7.2.2 – Geometria tubazione analizzata

Nell'immagine è possibile osservare il modello realizzato con il compensatore, in maniera semplificata (con tratti rettilinei di tubazione). Il compensatore ha le seguenti dimensioni: L pari a 2 m mentre H (la profondità) pari a 2,5 m. Applicando lo spostamento imposto e lanciando l'analisi si ottengono i seguenti risultati in termini di sollecitazioni, tabella 7.7.2

FLESSIBILITA' TUBAZIONE - API 650					
SOLLECITAZIONI (SPOSTAMENTO RADIALE, 50 mm)					
Tubazione rettilinea					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
-8750,12	-8750,12	-4,36	2,18	0,00	0,00
Tubazione rettilinea con compensatore					
Nmin	Nmax	My,min	My,max	Mz,min	Mz,max
[kN]	[kN]	[kNm]	[kNm]	[kNm]	[kNm]
-148,56	-148,56	-10,11	5,50	0,00	0,00

Tabella 7.2.2 – Confronto tra sollecitazioni

In tabella 7.7.2 è possibile osservare il confronto tra le sollecitazioni massime lungo la tubazione in caso di presenza o assenza del compensatore a “lira”. In particolare si sottolinea l’entità dello sforzo normale nella condotta con il compensatore, infatti esso risulta pari a -148,56 kN, contro -8750,12, (rapporto prossimo a 60). I momenti flettenti risultano essere maggiori in quanto è aumentata leggermente la distanza tra i supporti verticali (i vincoli in prossimità della “lira” bloccano anche il movimento trasversale della tubazione). In tabella si riportano i risultati, in forma sintetica, delle verifiche effettuate (stessa formulazione riportata nel capitolo precedente). Si può osservare come in questo caso le verifiche siano ampiamente soddisfatte, diversamente da quanto accadeva in precedenza.

VERIFICHE DI RESISTENZA TUBAZIONE (L = 15 m)			
API 650 (SPOST. RADIALE)	Verifica	Tubazione rettilinea	Tubazione + compensatore
	Resistenza	3,14	0,081
	Instabilità (y)	3,28	0,081
	Instabilità (z)	3,95	0,083

Tabella 7.2.3 – Confronto tra verifiche di resistenza

7.3 Compensatori a soffiutto

I compensatori a soffiutto sono elementi metallici ad alta flessibilità a tenuta di pressione. Sono composti da una serie di ondulazioni parallele a forma di “U”, ottenute con metodo di formatura a freddo partendo da cilindri di acciaio inossidabile austenitico saldati longitudinalmente con metodo T.I.G. Per ottenere la massima flessibilità unita ad una adeguata resistenza alla pressione, si formano soffiutti a parete multipla utilizzando più cilindri concentrici di nastro inox ciascuno saldato longitudinalmente. In tal modo tutte le pareti collaborano per resistere alla pressione mentre la flessibilità è assicurata dallo spessore ridotto della singola parete.

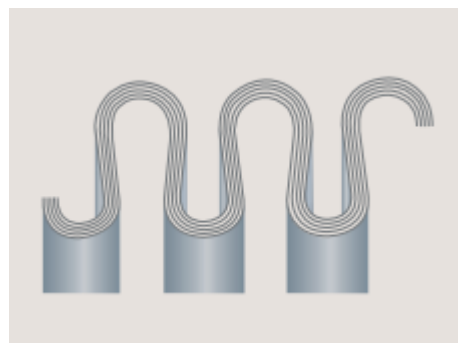


Figura 7.2.3 – Parete soffiutto

In commercio esistono differenti tipologie di compensatori a soffiutto:

- Il compensatore assiale è costituito da un soffiutto con terminali flangiati o a saldare. Può assorbire solamente movimenti assiali e deve essere sempre installato tra due punti fissi;
- Il compensatore angolare è composto da un soffiutto a cui è consentito il solo movimento angolare, tramite due articolazione a perni contrapposti che fungono da cerniera. Tali articolazioni sono dimensionate per sopportare la spinta di fondo della pressione;
- Il compensatore angolare cardanico si ottiene aggiungendo all'angolare semplice una coppia di perni che gli permettono di orientarsi in tutte le direzioni. Questo compensatore consente movimenti angolari su due piani tra loro perpendicolari;
- Il compensatore laterale è formato da due soffiutti uniti da un tubo rigido intermedio, compresi tra due tiranti esterni incernierati alle estremità del compensatore ed aventi lo scopo di assorbire la spinta di fondo della pressione;

- Il compensatore laterale sferico differisce da quello laterale per il fatto che le cerniere dei tiranti sono vincolate con snodo sferico anziché con perno. Pertanto, i movimenti laterali da assorbire possono appartenere a qualsiasi piano;
- Il compensatore universale è costituito da due soffietti uniti tra loro da un tubo rigido intermedio e consente di assorbire sia i movimenti laterali sia qualsiasi combinazione di movimenti laterali e assiali;
- Il compensatore a spinta eliminata può essere realizzato nelle tipologie costruttive assiale o universale. Ha la peculiarità di non scaricare la spinta di fondo sulle condotte in cui è installato.

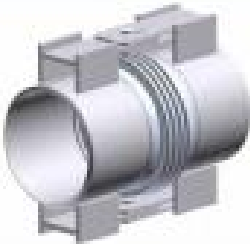
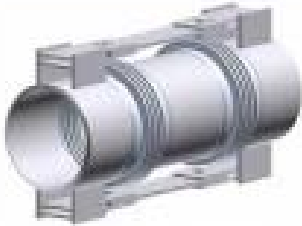
COMPENSATORE ASSIALE	COMPENSATORE ANGOLARE SEMPLICE
	
COMPENSATORE ANGOLARE CARDANICO	COMPENSATORE LATERALE
	
COMPENSATORE LATERALE SFERICO	COMPENSATORE UNIVERSALE
	
COMPENSATORE A SPINTA ELIMINATA	COMPENSATORE A SPINTA ELIMINATA CON CURVA
	
GIUNTO DI SMONTAGGIO	
	

Figura 7.2.4 – Compensatori a soffiello disponibili in commercio

In figura sono riportate le tipologie di compensatori descritte in precedenza. Di seguito si riportano i vincoli necessari per la corretta messa in opera del compensatore assiale.

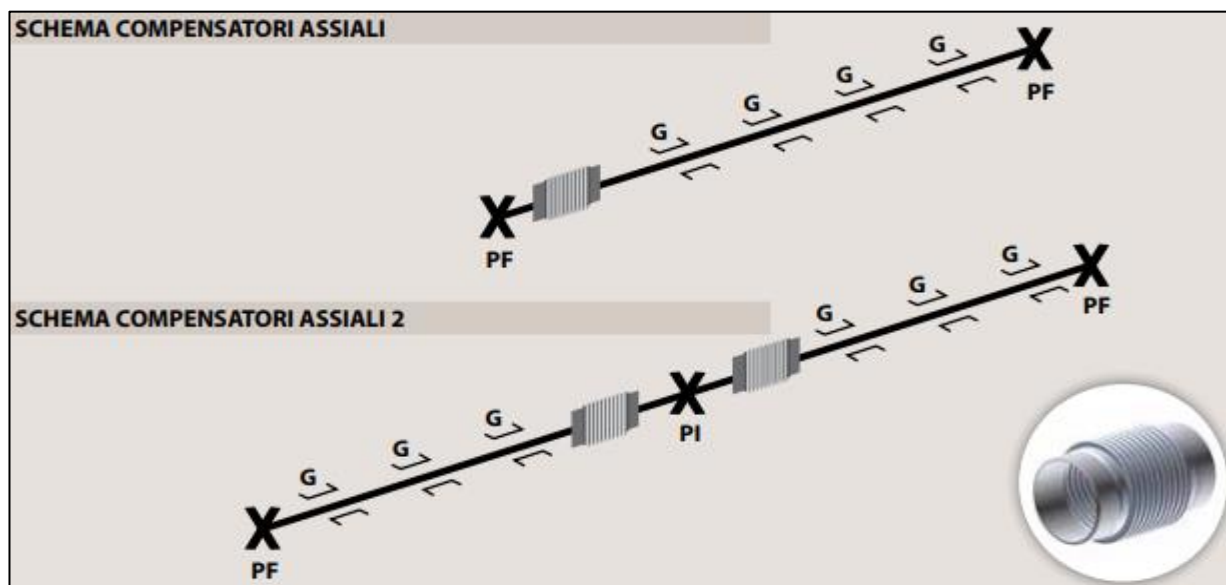


Figura 7.2.4 – Compensatori a soffiutto, corretto vincolamento

Il compensatore assiale può assorbire solo movimenti lungo il suo asse e deve essere sempre installato tra due punti fissi. Quindi, se la tratta rettilinea è molto lunga può accadere che la variazione di lunghezza ΔL da compensare richieda più di un compensatore assiale; in tal caso si suddivide la tratta in questione in più sotto-tratte inserendo punti fissi intermedi in modo da avere sempre un solo compensatore tra due punti fissi successivi. È bene che il compensatore assiale sia installato il più vicino possibile al punto fisso. In tal modo, una sua estremità risulta fissa aumentando così la stabilità.

Di seguito si riporta l'applicazione ad uno dei casi precedentemente studiato, ovvero alla tubazione rettilinea avente lunghezza pari a 5 m. Tale configurazione risultava particolarmente vulnerabile nei confronti dello spostamento imposto in direzione assiale previsto dalle API. Si utilizza un soffiutto di tipo assiale, il quale necessita di almeno una guida al fine di bloccare lo spostamento in direzione trasversale. Le indicazioni per il progetto del soffiutto sono state ricavate dal prontuario di una ditta specializzata nella produzione di tali dispositivi (Emiflex Italia). Per il corretto dimensionamento del soffiutto è necessario entrare nelle tabelle conoscendo la pressione nominale a cui è soggetta la tubazione, e l'entità dello spostamento massimo al quale il dispositivo sarà sottoposto (si

opta per la scelta del primo dispositivo che garantisce i 50 mm di spostamento previsto dalle Norme API). Successivamente è possibile ricavare la rigidezza assiale del compensatore dalle tabelle di progettazione; nel caso in esame risulta pari a 90 N/mm.

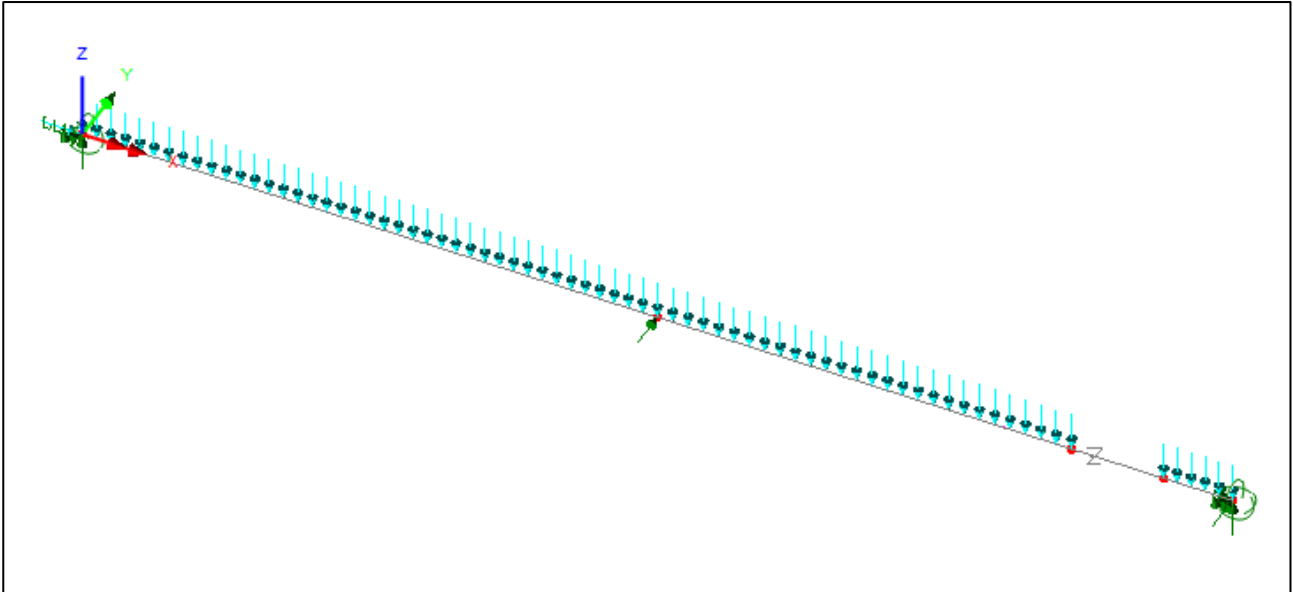


Figura 7.2.5 – Modello di calcolo

In figura è riportato il modello di calcolo realizzato modellando il soffietto con un elemento “joint”, avente rigidezza assiale pari a 90 N/mm. Moltiplicando tale valore per lo spostamento imposto (50 mm) si ottiene la reazione elastica interna al soffietto che risulta essere di -4,50 kN (compressione). Ovviamente dall’analisi con Lusas si ottiene un’azione interna uguale a tale valore (contro i -26250 kN in assenza di compensatore). Perciò risulta superflua ogni verifica di resistenza e di instabilità della tubazione (si osservi come la soluzione ideale sia rappresentata dall’applicazione di un soffietto laterale sferico in grado di assorbire spostamenti anche in direzione trasversale, per tenere conto di tutte le richieste delle Norme API).

7.4 Giunti antisismici per le tubazioni

In ultimo si riportano le immagini di due differenti tipologie di giunti utilizzati appositamente per fini sismici (si noti come i precedenti compensatori siano nati allo scopo di assorbire le dilatazioni termiche di lunghe condotte).

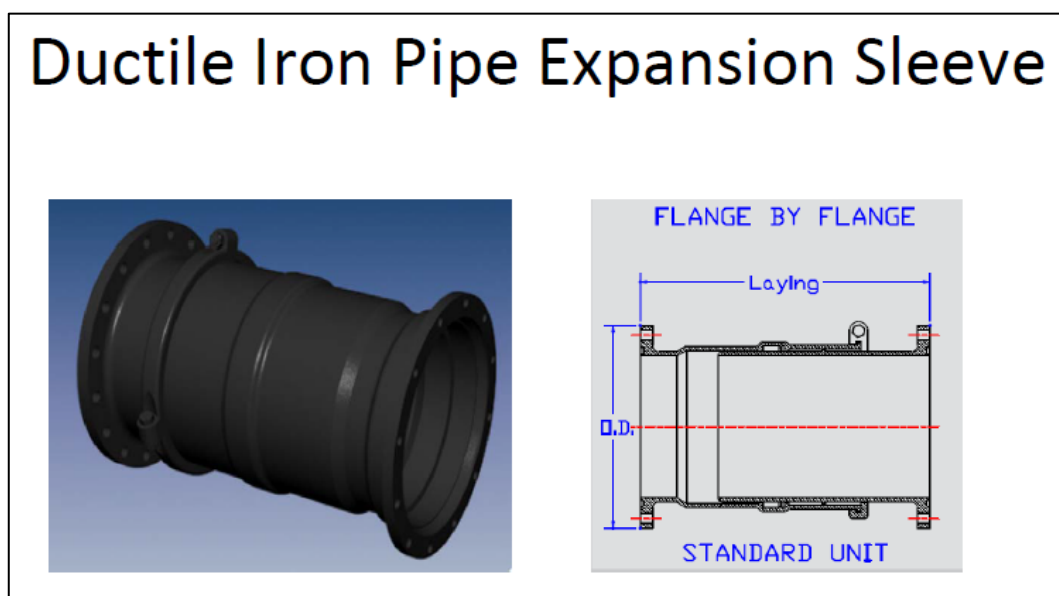


Figura 7.2.7 – Manicotto di espansione

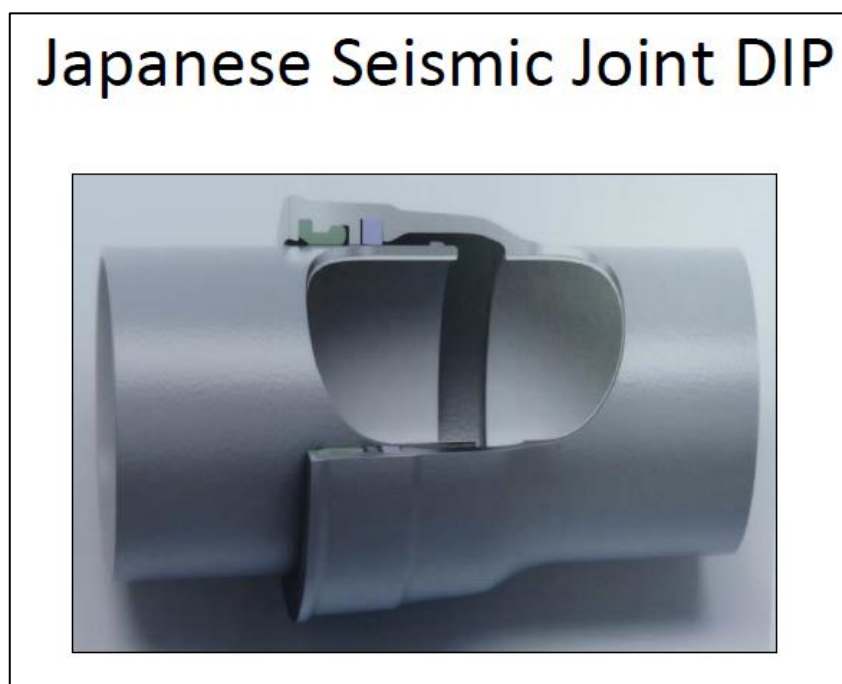


Figura 7.2.8 – Giunto sismico sviluppato in Giappone

7.5 Conclusioni

Nel presente capitolo si sono riportate le maggiori tipologie di dispositivi antisismici utilizzati nei sistemi di condotte in impianti industriali. Con l'avvento della tecnica dell'isolamento sismico anche in campo industriale risulta di fondamentale importanza garantire un opportuno "gap" tra le parti collegate, al fine di coprire gli spostamenti relativi tra parti isolate e non.

In particolare si sono riportati una carrellata di compensatori assiali disponibili in commercio, già largamente utilizzati anche per altri scopi quali ad esempio l'assorbimento delle dilatazioni termiche nelle condotte. Successivamente sono stati modellati sulle tubazioni rettilinee, con lunghezza pari a 5 e 15 m, rispettivamente compensatore a soffietto e compensatore a "lira", osservando come tali dispositivi consentano una drastica riduzione dell'azione assiale nelle condotte, portando così le verifiche entro i limiti. In particolare è stata analizzata la condizione di spostamento imposto (API 650) in direzione assiale in quanto era risultata la più critica ai fini delle verifiche strutturali.

8. CONCLUSIONI

Nella prima parte della tesi sono concentrati i risultati relativi alla ricerca bibliografica svolta sull'argomento, partendo da considerazioni molto generali riguardanti il rischio industriale nel nostro Paese, e di quanto esso sia fortemente correlato al rischio sismico. Infatti da indagini statistiche è emerso come vi sia un elevato numero di impianti industriali, di vario tipo, in zona 1 e in zona 2.

Successivamente l'attenzione si è spostata sulla ricerca delle modalità di danneggiamento più diffuse all'interno degli impianti industriali, causate ovviamente dall'azione sismica. Infatti un punto di partenza essenziale per analizzare le criticità degli impianti riguarda l'osservazione dei danneggiamenti occorsi durante i terremoti, con la finalità di identificare, per una determinata tipologia strutturale, delle grandezze di riferimento da monitorare e dei relativi indicatori di pericolo.

Conclusa la ricerca bibliografica nel capitolo 4 si è introdotta la modellazione del collegamento tra serbatoio e tubazione di mandata. Infatti, dall'analisi dei danni riportati a causa dell'azione sismica, tale collegamento risulta spesso critico in quanto mette in comunicazione due elementi, serbatoi e tubazioni, aventi caratteristiche meccaniche e dinamiche totalmente differenti. Vista l'elevata criticità del giunto si è ritenuto opportuno effettuare una modellazione particolarmente dettagliata, con attenzione rivolta a tutti gli aspetti che ne influenzassero i risultati: condizioni di vincolo sui bordi della lastra, tipologia di elemento utilizzato per realizzare la mesh, spessori degli elementi. Infatti le rigidezze ottenute verranno utilizzate per schematizzare il vincolo considerato, attraverso un incastro "cedevole" (non perfetto), con molle traslazionali e rotazionali, allo scopo di simulare al meglio l'interazione tra la tubazione ed il serbatoio.

Nel capitolo 5 si sono poste la basi per effettuare il calcolo sismico delle tubazioni mediante l'utilizzo dello spettro di risposta. Infatti si sono ricavati i modi di vibrare per tre differenti sistemi di tubazioni, ciascun sistema caratterizzato da sette lunghezze variabili;

tutto questo per comprendere meglio l'influenza di tale parametro sulla risposta sismica delle condotte. In tale sede si sono analizzati tutti gli aspetti critici in input al problema, in particolare la scelta relativa ai tipi di vincolo da adottare e la loro relativa modellazione all'interno del programma di calcolo. Successivamente si sono calcolate le frequenze proprie di vibrazione delle varie tubazioni considerando le condotte rispettivamente "piene" e "vuote" andando a modificare la densità del materiale. In particolare si è notata l'influenza di quest'ultima variabile sui periodi di vibrazione delle tubazioni, infatti a parità di lunghezza i tubi vuoti mostrano sempre periodi minori (rispetto agli stessi contenenti liquido al loro interno). In ultimo si sono confrontati i periodi di vibrazione delle varie tubazioni valutando l'influenza della lunghezza; si è osservato come le condotte ad "L" siano maggiormente vulnerabili all'azione sismica indipendentemente dalla lunghezza del ramo variabile, questo principalmente a causa della loro configurazione geometrica. Diversamente, condotte rettilinee molto corte mostrano periodi di vibrazione molto bassi risultando quindi poco eccitate dall'azione sismica.

Nel capitolo successivo (6) si è calcolato l'effetto del sisma sulle tubazione mediante il metodo classico utilizzato in ingegneria sismica ovvero l'analisi modale con spettro di risposta, come suggerito peraltro dalla Norme Europee. Si è visto come le condotte rispondano in maniera differente all'input sismico, a seconda della loro geometria e a seconda della loro lunghezza. In particolare le tubazioni con sviluppo limitato risultano poco sollecitate, mentre al crescere della lunghezza generalmente si osserva un aumento degli spostamenti in direzione trasversale all'asse delle stesse con conseguente incremento delle sollecitazioni.

Parallelamente all'analisi modale con spettro di risposta si sono affiancate le verifiche di flessibilità della tubazione previste dalle Norme API 650. Tali norme impongono degli spostamenti di differente entità in corrispondenza del collegamento tra tubazione e serbatoio allo scopo di verificare che la condotta sia sufficientemente flessibile, evitando possibili danneggiamenti sul mantello dello stesso.

Dall'applicazione di queste due tipologie di analisi sono emerse differenti criticità al variare sia della geometria che della lunghezza delle condotte. In particolare le tubazioni rettilinee si sono dimostrate particolarmente suscettibili agli spostamenti imposti previsti dalle API, soprattutto in caso di sviluppo limitato in lunghezza. Si è notata dunque una sorta di transizione in quanto le Norme API creano elevate sollecitazioni in particolare nelle condotte "corte", diversamente l'analisi con spettro tende a sollecitare maggiormente le condotte "lunghe". Per quanto riguarda le tubazioni aventi configurazione geometrica a "L" si sono osservate in genere poche criticità in quanto possiedono una flessibilità maggiore.

Successivamente si sono svolte le verifiche di resistenza sulle tubazioni secondo quanto previsto da EC-3. Generalmente l'applicazione dello spettro non crea particolari problematiche, infatti tutte le tubazioni analizzate rispettano i limiti previsti sia dalle verifiche di resistenza che dalla verifiche di instabilità. Ciò è essenzialmente dovuto alla poca massa associata alle stesse, infatti si nota una maggiore criticità al crescere della lunghezza delle condotte in quanto aumenta la massa oscillante. Diversamente l'applicazione degli spostamenti imposti previsti dalle API ha creato maggiori problematiche in particolare alle condotte "corte" a causa della loro elevata rigidità, sia in termini assiali che flessionali.

Nell'ultimo capitolo si sono riportate le maggiori tipologie di dispositivi antisismici utilizzati nei sistemi di condotte all'interno degli impianti industriali. Con l'avvento della tecnica dell'isolamento sismico anche in campo industriale risulta di fondamentale importanza garantire un opportuno "gap" tra le parti collegate (mediante giunti scorrevoli), al fine di coprire gli spostamenti relativi tra parti isolate e non.

9. BIBLIOGRAFIA

PUBBLICAZIONI

- Vathi, Karamanos, Kapogiannis, Spiliopoulus: Performance Criteria for Liquid Storage Tanks and Piping Systems Subjected to Seismic Loading;
- Paolacci, Giannini, De Angelis, Ciampi: Studio sulla applicabilità dell'isolamento sismico mediante l'utilizzo di isolatori per la protezione sismica di componenti di impianti industriali situati in aree ad elevato rischio Sismico;
- NIST GCR 97-720: A study of the performance of petroleum storage tanks during earthquakes, 1993-1995;
- Villani, Mogorovich, Marotta, Mossa Verre: Il rischio sismico negli stabilimenti a RIR: le novità introdotte dalla "Seveso iii";
- Paolacci, Reza, Bursi: Seismic analysis and component design of refinery piping system.

TESTI

- IL PIPING: Cavalieri, Ferrari, Raimondi;
- GUIDA ALLA PROGETTAZIONE DEGLI IMPIANTI PETROLCHIMICI E DI RAFFINAZIONE: L. di G. Pirola, Milano.

NORMATIVE

- Direttiva 82/501/CEE, Controllo pericoli incidenti rilevanti sostanze pericolose, cd. Seveso I;
- Direttiva 96/82/CE, Controllo rischi da incidente rilevante sostanze pericolose, cd. Seveso II;
- Direttiva 2003/105/CE , Controllo rischi da incidente rilevante sostanze pericolose, cd. Seveso III
- D.lgs. 17 agosto 1999 n. 334, Attuazione della direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose;
- D.Lgs. 21 settembre 2005, n.238, Attuazione della direttiva 2003/105/CE, sul controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose;
- EN 1998-4. Eurocode 8. Design Provisions of Earthquake Resistance of Structure. Part 4: Silos, Tanks and Pipeline, European Committee for Standardization, Brussel, 2006;
- API Standard 650, Welded Steel Tanks for Oil Storage, Addendum 3, 11th Edition, API, American Petroleum Institute, Washington D.C., USA, 2012;

SITOLOGIA

- Protezione Civile: <http://www.protezionecivile.gov.it>;
- Portale di ricerca: www.researchgate.net
- Catalogo soffietti “Emiflex Italia”: www.emiflex.eu