

VERIFICA SISMICA DELLE TUBAZIONI DEGLI IMPIANTI INDUSTRIALI

1.0 PREMESSA

L'analisi sismica dei sistemi di tubazioni non risulta allo stato attuale estesamente studiata a livello di ricerca scientifica e la progettazione degli stessi è per lo più guidata dalle prescrizioni dei diversi codici e normative applicabili (EN 13480-3, ASME B31.3). In Italia inoltre si applicano le Norme Tecniche sulle Costruzioni adottate con DM 14/01/2008 (NTC 2008) e specificamente per le tubazioni le norme dell' Eurocodice 8-Parte 4 (EC 8-4).

Diversi studi sono in corso per l'analisi degli effetti sismici sulle condotte interrate, in particolare quelle costruite in conglomerato cementizio.

Per quanto riguarda i sistemi di tubazioni degli impianti industriali, chimici e petrolchimici, lo studio più interessante è quello di F.Paolacci del Dipartimento Strutture dell'Università di Roma 3 [1].

Lo studio esamina il comportamento sotto sisma di un sistema di tubazioni aeree su rack e le reciproche interazioni, confrontando i risultati ottenuti con metodi di modellazione e di analisi diversi; vengono analizzati i modi di vibrare della struttura rack e delle tubazioni e vengono forniti, in termini di sollecitazioni flessionali nelle tubazioni, i risultati del calcolo con analisi statica lineare, con analisi dinamica e con accelerogrammi in campo non lineare. Le tubazioni sono modellate sia come "beam" sia come "shell".

Tuttavia le azioni e gli effetti sulle tubazioni sono essenzialmente considerati in un'ottica meccanica-strutturale. Le sollecitazioni flessionali nelle tubazioni derivano non tanto dalla sollecitazione inerziale propria quanto piuttosto dagli spostamenti relativi degli appoggi sulla struttura rack.

Non è considerata l'interazione tra tubazione ed il fluido contenuto che nel caso di liquidi può produrre effetti rilevanti sulla tubazione stessa e sui relativi supporti ed ancoraggi e quindi sulla struttura rack. Analogamente a quanto si verifica in caso di sisma per i serbatoi di stoccaggio, non si può prescindere dalla azione idrodinamica dei fluidi contenuti che, nel caso dei liquidi, ha come conseguenza il formarsi all'interno delle tubazioni di sovrappressioni e di depressioni che introducono sollecitazioni aggiuntive in tutti i componenti della tubazione stessa e sui relativi supporti ed ancoraggi e quindi sulla struttura rack.

In effetti l'Eurocodice 8-4 (UNI EN 1998-4) nel mentre per i serbatoi prescrive di prendere in considerazione l'azione idrodinamica del fluido contenuto non fornisce alcuna indicazione in proposito per quanto riguarda le tubazioni. Questa sembra una sensibile carenza della norma.

D'altra parte per l'ingegnere impiantista si pone il problema di avere strumenti intellettuali relativamente semplici, seppure conservativi, che permettano di valutare con sufficiente affidabilità il rischio sismico e la vulnerabilità sismica di sistemi di tubazioni, specialmente se soggette PED.

A tal fine, sempre nell'ambito delle prescrizioni delle Norme Tecniche 2008 e dell'Eurocodice 8, un sistema di tubazioni conviene che:

- a) sia considerato come elemento secondario non strutturale secondo EC 8-1 § 4.3.5;
- b) sia analizzato mediante analisi statica lineare con spettro di risposta elastico secondo EC 8-4 § 5.4.2.(3).
- c) che i componenti delle tubazioni siano modellati come "beam"

2.0 CONSIDERAZIONI PRELIMINARI

Il metodo di calcolo delle azioni sismiche mediante analisi statica lineare consiste essenzialmente nell'applicare alla struttura delle forze pari al prodotto delle masse per l'accelerazione sismica di progetto opportunamente calcolata.

In realtà l'effetto del sisma consiste in uno spostamento oscillatorio orizzontale (e verticale) del terreno cui corrisponde una accelerazione massima al suolo (PGA); l'accelerazione sismica di progetto viene derivata dalla PGA per mezzo dello spettro di risposta elastico funzione delle caratteristiche della struttura ed è l'accelerazione necessaria che subisce la struttura per seguire il terreno nel suo movimento.

Come noto (NTC § 3.2.3.1) le azioni sismiche sono caratterizzate da due componenti traslazionali orizzontali fra di loro ortogonali e da una componente verticale. Nel caso di analisi statica lineare gli effetti delle azioni sono calcolati separatamente per le tre componenti e sono quindi fra di loro combinati nella combinazione più gravosa (NTC eq. 7.3.15).

Le due direzioni ortogonali sono scelte arbitrariamente; per una tubazione è conveniente scegliere le due direzioni parallela ed ortogonale all'asse della tubazione.

Per meglio comprendere l'effetto delle azioni sismiche su di un fluido e' opportuno richiamare il principio della quantita' di moto: la variazione del moto, e quindi l'accelerazione, di un fluido, anche se confinato entro una tubazione, puo' avvenire solamente in conseguenza di una differenza di pressione (al netto della differenza di pressione stazionaria necessaria per vincere le perdite di carico).

Nel caso dell'azione sismica ortogonale all'asse della tubazione questa si esplica come leggera differenza di pressione tra il semitubo disposto dal lato di provenienza del moto, che per semplicita' chiameremo lato "soprasisma", ed il semitubo dal lato verso cui si indirizza il moto, lato "sottosisma". Poiche' il moto e' oscillatorio lato "soprasisma" e lato "sottosisma" si alternano e non si devono intendere come riferiti al punto di origine piu' o meno remoto ove si e' prodotto l'evento sismico.

Nel caso dell'azione sismica parallela all'asse del tubo il fluido per seguire la tubazione nel suo moto deve essere sottoposto ad una differenza di pressione tra l'estremita' della tubazione "soprasisma" e l'estremita' della tubazione "sottosisma" tale da imprimere alla massa di fluido compresa fra le due estremita' una accelerazione eguale a quella imposta al sistema esterno, essendo del tutto insufficiente l'attrito fra fluido e pareti della tubazione.

La pressione effettiva che si produce in un punto della tubazione si calcola quindi sommando alla pressione del punto del sistema idraulico a pressione costante e/o controllata (PPC) la differenza di pressione calcolata applicando l'accelerazione di progetto alla massa di fluido per la parte disposta parallelamente alla direzione del moto compresa tra il punto in esame ed il PPC.

La differenza di pressione puo' essere positiva o negativa a seconda che il PPC si trovi "sottosisma" ovvero "soprasisma" rispetto al punto in esame. Ovviamente poiche' il moto sismico e' oscillatorio, in ogni punto si alternano sovrappressioni positive e negative.

Nel caso di linee di trasferimento il PPC e' normalmente costituito dal serbatoio di destinazione, se a pressione atmosferica, ovvero dall'apparecchio di destinazione nel quale il controllo della pressione sia esercitato sul gas o vapore soprastante.

Nel caso di circuiti idraulici di circolazione, quali ad esempio i circuiti termici, il PPC e' costituito per le linee di mandata dalla mandata delle pompe di circolazione e per le linee di ritorno dal vaso di espansione (a pressione atmosferica o a pressione di gas).

Ai fini della presente analisi, in prima approssimazione, potremo ritenere la prevalenza delle pompe di mandata costante rispetto alle perturbazioni transitorie conseguenti agli effetti sismici.

Tuttavia nel momento in cui le pompe di circolazione vengono a trovarsi in posizione "soprasisma" rispetto al PPC e la sovrappressione supera la prevalenza a shut-off delle pompe si produce evidentemente la chiusura piu' o meno istantanea delle valvole di ritegno di mandata.

Viceversa nel momento in cui le pompe vengono a trovarsi in posizione "sottosisma" e la depressione risulta inferiore alla tensione di vapore del fluido, con cavitazione, la portata aumenta transitoriamente fino al valore corrispondente alla ridotta differenza di pressione tra mandata ed aspirazione.

Sono possibili quindi diversi meccanismi per la formazione delle sovrappressioni/depressioni interne alle tubazioni. Per analizzarli e' opportuno riassumere sommariamente come viene descritto il moto sismico secondo le NTC 2008.

3.0 CALCOLO DELLE AZIONI SISMICHE

Nel caso di analisi statica lineare le azioni sismiche di calcolo dipendono in sintesi:

- a) dalla pericolosita' sismica del sito di costruzione;
- b) dallo spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali e verticali.

La pericolosita' sismica del sito e' descritta dai parametri:

- a_g accelerazione massima orizzontale del sito su suolo rigido
- F_o fattore massimo di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- T_c^* periodo di inizio del tratto a velocita' costante dello spettro in accelerazione orizzontale

parametri che dipendono dalle coordinate geografiche del sito e dal tempo di ritorno correlato alla vita nominale della costruzione, al suo uso ed alla probabilita' di superamento connessa allo stato limite ultimo (SLU) preso in considerazione (NTC tab. 3.2.1).

Lo spettro di risposta elastico e quindi l'accelerazione spettrale orizzontale $S_e(T)$ si calcolano con le NTC (3.2.4) e dipendono dai parametri di pericolosita' sismica, dalle caratteristiche del suolo di fondazione S , dal periodo proprio di vibrazione della struttura T e dallo smorzamento viscoso del complesso struttura-terreno di fondazione.

Il valore raccomandato dello smorzamento viscoso per strutture in acciaio saldate e' il 4%; per strutture bullonate il 7% (calcolo agli SLE) [2].

Lo spettro di risposta e' descritto dai seguenti parametri:

- T_B periodo di inizio del tratto ad accelerazione costante
- T_C periodo di inizio del tratto a velocita' costante

- T_D periodo di inizio del tratto a spostamento costante

dipendenti dal T_c^* e dalle caratteristiche del sottosuolo.

Per il calcolo agli SLU dalla accelerazione spettrale orizzontale $S_e(T)$ si passa alla accelerazione di progetto $S_d(T)$ modificando lo spettro di risposta con l'introduzione al posto del fattore di smorzamento viscoso l'inverso del fattore di struttura q e quindi si calcolano le azioni sismiche agenti sulla struttura con la NTC (7.3.6).

Questo calcolo si applica alla struttura portante e cioè al rack per il quale si può convenientemente adottare un fattore di struttura maggiore di 1 per tenere conto delle capacità dissipative anelastiche (NTC § 7.5.2.2).

Il periodo proprio di vibrazione T deve essere analizzato nelle due direzioni ortogonali e per un rack a sviluppo planimetricamente lineare risulta evidentemente notevolmente diverso. Nel calcolo dei periodi di vibrazione devono essere comprese le masse delle tubazioni portate, però in funzione delle tipologie di supporti e vincoli adottati.

Lo spettro di risposta elastico in accelerazione verticale si calcola con la NTC (3.2.10). L'azione sismica verticale per tubazioni orizzontali con luci di campata fra due appoggi dell'ordine di pochi metri può risultare trascurabile (NTC § 7.2.1). Viceversa per tubazioni verticali o subverticali, se vincolate assialmente ad un unico supporto, la componente verticale dell'azione sismica può essere rilevante.

L'accelerazione sismica orizzontale S_a da applicare alle tubazioni considerate come elementi non strutturali si calcola, in quota di linea, con le EC 8-1 (4.24) e (4.25) in funzione della elevazione della linea rispetto al piano di fondazione Z , del periodo fondamentale di vibrazione della tubazione T_a e del fattore di struttura per la tubazione q_a .

Il periodo fondamentale di vibrazione della tubazione T_a , cioè il periodo della 1a armonica, nella direzione ortogonale all'asse della tubazione, si può calcolare rigorosamente con la teoria Eulero-Bernoulli o con la teoria Timoshenko ovvero, con approssimazione sufficiente, con il metodo di Rayleigh [5] mettendo in conto la massa totale tubazione+coibentazione+fluido contenuto e considerando i vincoli di campata come cerniere nel piano orizzontale.

Più problematico è il calcolo del periodo di vibrazione nella direzione parallela all'asse della tubazione. In prima approssimazione si può applicare la EC 8-4 (4.25) con $T_a = 0$; ciò equivale a considerare la tubazione soggetta alla stessa accelerazione in quota della struttura portante ipotizzando nullo il lasco assiale dei punti fissi sull'appoggio.

Il fattore di struttura q_a nella direzione ortogonale si può calcolare in funzione dell'energia di deformazione elastica trasversale della tubazione dissipata in un periodo in base al decremento logaritmico della deformazione correlato allo smorzamento viscoso.

Questo implica considerare le tubazioni sempre in campo elastico escludendo una propria capacità dissipativa in campo anelastico che comporterebbe deformazioni plastiche con riduzione dello spessore resistente ed ovalizzazione; questa ipotesi conservativa è raccomandabile per linee ad alta pressione e temperatura o convoglianti fluidi pericolosi, specialmente se si opera in ambiente soggetto al DLgs 334 (Seveso).

Per la tubazione propria si considera uno smorzamento del 2% per diametri fino a 12" e del 3% per diametri oltre i 12" [2]. Per il fluido contenuto si considera uno smorzamento del 0.5%, appropriato per acqua a temperatura ambiente, modificato in funzione della viscosità effettiva del fluido a condizioni operative. Per la coibentazione si può considerare uno smorzamento del 10% o maggiore considerata la minore massa propria. I tre valori di smorzamento vengono quindi ponderati. Poiché non è impiegabile la metodologia dell'EC 8-6, Annex B, non avendo il fluido una rigidità intrinseca, si può adottare il metodo dell'EC 8-2, 4.1.3.(1) assumendo in prima approssimazione che la energia di deformazione elastica di ciascuna componente sia proporzionale alla massa ed allo smorzamento viscoso propri.

La presenza di laschi trasversali dei supporti ausiliari (pattini o scarpe di scorrimento) nei punti fissi e nelle guide introduce una ulteriore capacità dissipativa per attrito sul supporto principale. L'energia dissipata per attrito si calcola in funzione del minor valore tra il lasco del vincolo e lo scorrimento possibile sul supporto in assenza di vincolo ed in base al fattore di attrito dinamico sul supporto principale.

Il fattore di struttura q_a è quindi dato dal rapporto (energia trasmessa dal supporto in caso di vincolo rigido) / (energia trasmessa - energia dissipata per smorzamento viscoso - energia dissipata per attrito).

Il fattore di struttura q_a nella direzione parallela si può calcolare solamente in relazione all'attrito correlato al lasco assiale nei punti fissi a meno di mettere in conto gli spostamenti assiali relativi fra i punti fissi e sui supporti intermedi ed in tal caso oltre all'attrito si può mettere in conto anche lo smorzamento viscoso e la dissipazione di energia di deformazione elastica assiale.

4.0 SOVRAPRESSIONI SISMICHE

Nel valutare l'effetto meccanico delle sovrappressioni interne conseguenti alle azioni sismiche si deve sempre mettere in conto la pressione relativa operativa nel punto della linea considerata uguale alla **pressione assoluta nel PPC ± differenza in elevazione linea / PPC x la densità del fluido ± la perdita di carico da o per il PPC - la pressione atmosferica esterna.**

Se il sito di installazione è più elevato rispetto al livello del mare medio la pressione atmosferica diminuisce in funzione dell'esponente di $1.1859E-04 \times \text{metri s.l.m.m.}$

Le sovrappressioni devono essere valutate separatamente per le due direzioni ortogonali prescelte per le azioni sismiche.

4.1 Sovrapressione/depressione inerziale

Nel momento in cui l'accelerazione è diretta dal punto della linea in esame verso il PPC, la massima sovrapressione si calcola come prodotto della **accelerazione di progetto S_a x densità del fluido x distanza (orizzontale)** tra il punto in esame ed il PPC.

Nel caso di azione sismica ortogonale all'asse tubazione la distanza è misurata ortogonalmente tra PPC ed asse tubazione.

Nel caso di azione sismica parallela all'asse tubazione la distanza è misurata parallelamente tra PPC e punto in esame.

Al termine della fase di accelerazione sismica la sovrapressione si annulla.

Con l'inversione del moto sismico si genera una depressione di valore uguale e contrario tuttavia limitata dalla tensione di vapore del fluido; il caso è considerato nel par. 4.3 seguente.

Questa impostazione di calcolo presuppone implicitamente che il fluido sia incompressibile, la tubazione intrinsecamente rigida ed il moto del terreno sincrono in corrispondenza delle due estremità della tubazione.

Questo è in prima approssimazione vero solo per lunghezze complessive della tubazione relativamente piccole in quanto la accelerazione del sistema si propaga da una estremità all'altra con la velocità dell'onda di pressione **a_w** normalmente nell'ordine delle migliaia di metri al secondo. Per lunghezze rilevanti tuttavia questa impostazione di calcolo risulta in sovrapressioni inerziali abnormi ed irrealistiche.

Per lunghezze rilevanti è necessario tenere conto della compressibilità del fluido, della elasticità della tubazione e della asincronia e variabilità spaziale del moto in corrispondenza delle due estremità.

Il calcolo è piuttosto complesso e la soluzione analitica è in corso di elaborazione. In prima approssimazione il problema può essere affrontato con l'approccio seguente.

Finché il semiperiodo di oscillazione sismica risulta maggiore del semiperiodo di oscillazione idraulica tutta la massa di fluido viene mobilitata dalla accelerazione del sistema. Il semiperiodo di oscillazione idraulica dipende dalla lunghezza complessiva della tubazione.

Per lunghezze complessive rilevanti durante la fase di accelerazione del sistema questa si propaga progressivamente fino alla distanza raggiunta dall'onda di pressione durante tale fase. Si considera che tutto il fluido ricompreso entro tale distanza venga mobilitato e sia soggetto all'accelerazione del sistema. In prima approssimazione tale distanza limite può essere stimata = $a_w \times T_g/4$.

In tal caso poiché l'accelerazione del sistema viene trasmessa al fluido in senso assiale in corrispondenza della estremità idraulica opposta al PPC le distanze ortogonale e parallela del par. 4.1 devono essere misurate per la parte ricompresa entro la distanza limite rispetto all'estremità idraulica.

Al termine della fase di accelerazione la sovrapressione generata all'estremità idraulica continua a viaggiare verso il PPC con la velocità **a_w** per andare ad esaurirsi entro una distanza dal PPC uguale alla distanza limite suddetta.

Tutte le parti intermedie della tubazione sono soggette al transito dell'onda di sovrapressione anche se sfasato nel tempo.

4.2 Decelerazione dinamica

Nel momento in cui il moto sismico è diretto dal PPC verso il punto in esame, al termine della fase di accelerazione il fluido ha raggiunto la massima velocità di spostamento sismica del sistema (al netto della velocità interna del fluido nella tubazione in regime stazionario).

Prima dell'inversione del moto il sistema deve decelerare fino a velocità nulla. Questa decelerazione produce nel punto del sistema idraulico planimetricamente più lontano dal PPC, e più sfavorito in termini di elevazione rispetto al suolo (più basso), un effetto di colpo di ariete con relativa sovrapressione dinamica che si propaga con la velocità dell'onda di pressione **a_w** a tutto il sistema a monte e quindi anche nel punto della tubazione in esame.

Velocità dell'onda di pressione e sovrapressione dinamica si calcolano con le equazioni del colpo d'ariete [3] e dipendono dalle caratteristiche meccaniche del fluido e della tubazione, dalla massima velocità assoluta di spostamento raggiunta dal fluido e dal tempo di decelerazione del sistema struttura portante-tubazione.

Massima velocità di spostamento e tempo di decelerazione dipendono dall'accelerogramma del sisma di progetto.

Con approccio semplificato si può ipotizzare di sviluppare l'accelerogramma in una serie di Fourier e prendere in considerazione la fondamentale adottando un accelerogramma di tipo pseudo-sinusoidale [6].

La pulsazione **ω_g** ovvero lo pseudo-periodo **T_g** si possono calcolare con la massima velocità di spostamento al suolo **v_g** ed il massimo spostamento **d_g** dati dalla NTC (3.2.15).

La massima velocità di spostamento in quota si può calcolare a partire dalla **v_g** con la stessa NTC (7.2.2) essendo accelerazione e velocità legate dalla stessa pulsazione pseudo-sinusoidale di forzamento ma la quota da prendere in considerazione è quella del punto planimetricamente più sfavorito.

Il tempo di decelerazione è uguale a $T_g/4$.

In via più approssimativa, ma anche più rappresentativa del transitorio iniziale, il tempo di accelerazione si può calcolare mediamente uguale a $T_C - T_B/2$. Il tempo di decelerazione può essere assunto di pari valore ipotizzando una ragionevole simmetria dell'accelerogramma.

Dipendentemente dalle caratteristiche meccaniche e plani-altimetriche del sistema e dinamiche del sisma la sovrapressione per decelerazione può risultare superiore o inferiore alla sovrapressione inerziale.

4.3 Cavitazione dinamica

Nello stesso caso del par. 4.2 precedente, se la depressione inerziale, calcolata come al par. 4.1 ma per il punto planimetricamente piu' lontano dal PPC e piu' sfavorito (piu' alto), produce una pressione assoluta totale inferiore alla tensione di vapore del fluido alla temperatura operativa, si genera una cavitazione diffusa, con evaporazione del fluido nel tratto di tubazione compreso tra il punto planimetricamente piu' lontano ed il punto lungo linea in cui la depressione inerziale rispetto al PPC e' uguale alla differenza tra pressione nel PPC e tensione di vapore.

Al termine della fase di accelerazione, venendo ad annullarsi la depressione inerziale, la cavitazione si richiude sotto la spinta della sola differenza di pressione tra PPC e tensione di vapore del fluido con effetto di colpo d'ariete analogo a quello del punto 4.2 precedente. In questo caso pero' il tempo di richiusura e' istantaneo. La velocita' significativa e' pari alla differenza tra la velocita' del fluido nella tubazione in regime stazionario (non sismico) e la velocita' del fluido massima raggiunta entro la tubazione in fase di riassorbimento della cavitazione. Ai fini del calcolo della cavitazione e' rilevante la velocita' relativa del fluido dentro la tubazione e non la velocita' assoluta rispetto al suolo esterno.

Il calcolo rigoroso e' molto complesso e richiede una integrazione numerica per intervalli di tempo finiti degli spostamenti relativi fra tubazione e fluido contenuto basata su di un accelerogramma di progetto.

In via semplificata, ma conservativa, si possono adottare, e confrontare, due approcci di calcolo diversi.

4.3.1 Calcolo ad accelerazione costante

Si adotta la descrizione del moto sismico indicata al par. 3.0 secondo le NTC 2008 e si ipotizza in via cautelativa che la accelerazione spettrale (nel punto piu' sfavorito) resti costante e pari al valore massimo S_a per un intervallo di tempo pari a $T_C - T_B/2$.

Durante tale intervallo di tempo il fluido entro la tubazione subisce: (a) una accelerazione relativa (se il flusso del fluido e' verso il PPC) o (b) una decelerazione relativa (se il flusso proviene dal PPC) per effetto della differenza tra la depressione inerziale e la differenza (contraria) tra pressione nel PPC e tensione di vapore del fluido. La depressione inerziale si calcola come al par. 4.3 mentre la forza accelerante o decelerante risultante si applica a tutta la massa del fluido compresa tra il PPC ed il punto piu' sfavorito.

La perdita di carico totale della linea, assunta in prima approssimazione costante ed uguale alla perdita di carico stazionaria, si somma (a) o si sottrae (b) alla pressione nel PPC.

L'integrazione della accelerazione (a) o decelerazione (b) relativa per la durata di tempo del tratto ad accelerazione costante dello spettro risulta nella variazione della velocita' relativa, positiva (a) o negativa (b), del fluido entro la tubazione rispetto alla velocita' stazionaria.

L'integrazione della velocita' relativa risulta nello spostamento relativo del fluido entro la tubazione e quindi nel volume di fluido vaporizzato.

Al termine del tratto ad accelerazione costante e durante il tratto a velocita' costante dello spettro viene a cessare la depressione inerziale ed il fluido resta soggetto alla differenza di pressione tra PPC e tensione di vapore decelerante (a) od accelerante (b) che tende a richiudere la cavitazione. Tale depressione dapprima riduce (a) od aumenta (b) la velocita' relativa fino al valore della velocita' stazionaria; durante questo tempo aumenta ulteriormente il volume di fluido vaporizzato.

Il tempo di riassorbimento della cavitazione e' il tempo necessario affinche' l'azione decelerante (a) od accelerante (b) della differenza di pressione sulla massa totale del fluido produca il riassorbimento di tutto il volume di fluido vaporizzato. La velocita' relativa raggiunta dal fluido al termine del tempo di riassorbimento risulta maggiore (b) o contraria (a) rispetto alla velocita' stazionaria. La differenza di velocita' in valore assoluto e' produttiva del colpo d'ariete.

Secondo questo modello di calcolo la cavitazione si manifesta, quando si manifesta, alla fine della fase ad accelerazione costante e si esaurisce durante la fase a velocita' costante; e' quindi antecedente e non contemporanea al colpo d'ariete del punto 4.2 precedente.

Questo calcolo e' piu' rappresentativo del transitorio iniziale quando spostamento, velocita' ed accelerazione del sistema rack-tubazione sono nulli, se si ipotizza che il primo movimento sismico del suolo si presenti con la massima accelerazione spettrale di progetto S_a .

4.3.2 Calcolo pseudo-sinusoidale

Questo metodo di calcolo si basa sulle differenze di spostamento assoluto rispetto al suolo della tubazione e del fluido contenuto.

Per rappresentare il moto del terreno si adotta il modello pseudo sinusoidale con periodo T_g come al par. 4.2 [6].

Lo spostamento del terreno in funzione del tempo $s(t)$ e' quindi descritto dallo spostamento massimo atteso in superficie d_g e dalla pulsazione ω_g .

Da questa funzione si deducono per successive derivazioni la velocita' $v_t(t)$ e la pseudo-accelerazione $a_t(t)$.

La pseudo-accelerazione massima $d_g \times \omega_g^2$ normalmente non coincide con la $a_g.S$ se la ω_g e' calcolata a partire da d_g e v_g .

Spostamento, velocità ed accelerazione sono fra di loro sfasati di $Tg/4$ per cui la cavitazione in realtà si può manifestare a partire dal momento in cui il moto, raggiunto lo spostamento nullo e la velocità massima verso il PPC, comincia a decelerare per inversione della accelerazione.

Per rappresentare il moto relativo della tubazione rispetto al terreno di fondazione si adotta un modello sinusoidale basato sulla prima armonica della struttura con periodo T [4]. Poiché ai fini del calcolo della cavitazione è rilevante il movimento secondo l'asse della tubazione, come già detto al par. 3.0, in prima approssimazione si può considerare il moto relativo della struttura rack come moto relativo della tubazione.

La funzione accelerazione relativa $ap(t)$ è descritta dalla pulsazione ω_p , dalla massima accelerazione relativa Sa e dallo sfasamento ti rispetto al moto del terreno. In primo tentativo si assume lo sfasamento nullo.

Dalla funzione accelerazione si deducono per successive integrazioni la velocità $vp(t)$ e lo spostamento $sp(t)$.

Lo spostamento assoluto della tubazione è quindi uguale a $(st(t) + sp(t))$.

Il moto del fluido è uguale a quello della tubazione fino al momento di inizio cavitazione.

Successivamente il moto del fluido è descritto dalla accelerazione, costante, af pari alla (differenza di pressione tra PPC e tensione di vapore) x (sezione interna della tubazione) / (massa del fluido tra PPC e punto più sfavorito).

Dalla accelerazione af si deducono per successive integrazioni la velocità $vf(t)$ e lo spostamento $sf(t)$, tenuto conto della velocità e dello spostamento raggiunti insieme alla tubazione al momento di inizio cavitazione.

Il momento di inizio cavitazione si calcola come il tempo tic in cui la accelerazione $(at(tic) + ap(tic))$ provoca una depressione pari alla differenza di pressione tra PPC e tensione di vapore.

La differenza di spostamento tra tubazione e fluido $ds(t)$ successivamente a tic è uguale a $(st(t) + sp(t) - sf(t))$. Il tempo di riassorbimento della cavitazione tc si determina come quello in cui $ds(tc)$ torna uguale a zero.

Dipendentemente dalla differenza tra il periodo Tg del suolo ed il periodo T della struttura sono possibili diverse soluzioni per tic e tc anche nell'arco di tempo di un solo periodo (tra cui quella triviale per $t = tic$). È necessario inoltre analizzare diverse ipotesi di sfasamento del moto.

Il colpo d'ariete da cavitazione si determina in base al valore assoluto della massima delle differenze di velocità fluido-tubazione $|vt(tc) + vp(tc) - vf(tc)|$ ai diversi tempi di riassorbimento possibili.

La tensione di vapore del fluido si può calcolare, in prima approssimazione ed a favore della sicurezza, alla temperatura operativa di progetto del fluido. Ma per effetto della cavitazione una parte del fluido vaporizza subendo un flash isoentalpico con raffreddamento della fase liquida e quindi abbassamento della tensione di vapore; questo è un effetto favorevole. Se tuttavia la massima vaporizzazione percentuale (in termini di rapporto volume di vapore/volume di liquido residuo) è superiore a qualche unità ed il calore di vaporizzazione è elevato è necessario individuare per tentativi la corretta corrispondenza tensione di vapore-temperatura di flash.

Il tempo di massima vaporizzazione tv , si determina eguagliando a zero le derivate delle funzioni spostamento: $(st'(tv) + sp'(tv) - sf'(tv)) = 0$ con $tci < tv < tc$.

Il volume massimo vaporizzato è uguale a $(st(tv) + sp(tv) - sf(tv)) \times$ (sezione interna tubazione).

La percentuale di vaporizzazione è uguale al volume vaporizzato diviso per il volume del tratto di tubazione compreso tra il punto planimetricamente più sfavorito ed il punto lungo linea in cui la depressione inerziale rispetto al PPC calcolata per una accelerazione $(at(tv) + ap(tv))$ è uguale alla differenza tra pressione nel PPC e tensione di vapore.

È necessario avere a disposizione un programma di calcolo interattivo, per analizzare le diverse soluzioni di tc per diversi valori di sfasamento, ed equipaggiato con un algoritmo matematico di convergenza interno poiché tci , tc e tv si determinano risolvendo iterativamente equazioni miste algebrico-trigonometriche.

Durante il manifestarsi della cavitazione si produce necessariamente un riflusso transitorio di fluido nel PPC pari al volume di fluido vaporizzato.

Se il punto planimetricamente più sfavorito rispetto al PPC coincide con la mandata delle pompe (posizione "sottosisma") la depressione di cavitazione provoca un aumento della portata delle pompe stesse di cui è necessario tenere conto. La maggiore portata erogata dalle pompe subisce anch'essa il flash isoentalpico, non aumenta il volume vaporizzato (diminuisce il fluido vaporizzato in tubazione) ma si riduce il tempo di riassorbimento come se lo spostamento della tubazione fosse ridotto dallo spazio occupato dal liquido erogato dalle pompe.

Se il PPC coincide con la mandata delle pompe (posizione "soprasisma" ed in tal caso il punto più sfavorito coincide generalmente con una utenza ad es. uno scambiatore) a partire dal tempo tci la portata si riduce progressivamente; se e quando la velocità relativa del fluido nella tubazione verso il PPC $(vf(t) - vg(t) - vp(t))$ diventa maggiore della velocità stazionaria (flusso dal PPC) corrispondente alla prevalenza massima, il flusso si annulla e si chiudono le valvole di ritegno in mandata, la cavitazione si ferma e si raggiunge la massima vaporizzazione. A partire da tale tempo t il fluido torna a muoversi con spostamento, velocità ed accelerazione uguali a quelle della tubazione. Sulle valvole di ritegno si esercita una pressione pari alla tensione di vapore più la sovrappressione inerziale esercitata dalla accelerazione $(ag(t) + ap(t))$ sulla parte di fluido non vaporizzato. La cavitazione comincia ad essere riassorbita nel momento in cui la pressione sulle valvole di ritegno torna ad essere inferiore alla pressione di mandata delle pompe corrispondente alla prevalenza massima e termina al tempo tc come sopra calcolato.

Si rileva come in questo caso, applicabile generalmente ai circuiti termici o similari, il punto planimetricamente

piu' sfavorito si trova alla estremita' opposta del circuito rispetto al PPC. La depressione inerziale che si produce in tale punto e' quindi uguale sia se si prende in considerazione la linea di mandata sia se si prende in considerazione la linea di ritorno ma l'effetto di cavitazione e' diverso sia per la diversa pressione nel PPC (pompe di mandata ovvero vaso di espansione in posizione planimetrica sostanzialmente coincidente), sia per le normalmente diverse temperatura e tensione di vapore del fluido, sia per l'opposto effetto della perdita di carico della linea. In questi casi linea di mandata e linea di ritorno devono essere valutate separatamente.

Il calcolo pseudo-sinusoidale rappresenta meglio il moto successivo al transitorio iniziale.

Nella maggioranza dei casi esaminati il calcolo pseudo-sinusoidale conduce a risultati comparabili con quelli del calcolo ad accelerazione costante.

4.4 Sovrapressioni risultanti

Ai fini delle verifiche di resistenza della tubazione e delle strutture di supporto si assumerà la massima fra le sovrapressioni calcolate come ai par. 4.1, 4.2, 4.3.1 e 4.3.2 precedenti, ciascuna calcolata separatamente per le due direzioni ortogonali prescelte per le azioni sismiche orizzontali. e quindi combinata, secondo la NTC (7.3.15), con gli altri effetti meccanici indotti nella tubazione (NTC § 3.2.4). Tutti i componenti della tubazione, tubi, raccordi, valvole, giunzioni, etc. devono essere verificati per tali effetti.

4.5 Considerazioni sulla variabilità spaziale del moto

Le linee di trasferimento, ma anche i circuiti di circolazione, possono svilupparsi per diverse centinaia di metri sia in termini di lunghezza totale di linea sia in termini di distanze parallela od ortogonale tra PPC e tratto di linea in esame o punto planimetricamente piu' sfavorito.

La variabilità spaziale del moto deve essere presa in considerazione quando i suoi effetti sulle strutture risultino rilevanti (NTC §§ 3.2.5 e 7.3.5) in termini di spostamenti relativi.

Ai fini del calcolo delle sovrapressioni la variabilità spaziale del moto puo' avere influenza sulla misurazione delle distanze parallela od ortogonale sopra dette. Ma gli spostamenti relativi sono correlati alla differenza fra gli spostamenti assoluti d_g (NTC § 3.2.5.2), differenza essenzialmente dipendente da diverse caratteristiche del suolo di fondazione e generalmente relativamente piccola rispetto alla distanza fra i due punti. Inoltre sovrapressioni e depressioni dipendono dalla accelerazione spettrale S_a nel punto di linea in esame o piu' sfavorito.

Si puo' quindi ritenere che la variabilità spaziale del moto del suolo sia ininfluente sul calcolo delle sovrapressioni.

Non altrettanto si puo' dire per gli effetti meccanici degli spostamenti relativi interni della struttura rack sotto sisma [1], e connesse deformazioni delle tubazioni, che devono essere tenuti in conto nelle verifiche di resistenza (v. 6.0).

5.0 ANALISI DEI CARICHI SUI SUPPORTI

Per meglio comprendere gli effetti delle azioni sismiche sulle tubazioni e sulle carpenterie di supporto si analizzano i carichi applicati ai supporti nel caso di una tratta su rack di un tipico circuito termico descritto in figura a pag. 8.

Nella tratta in esame sono presenti due sets di compensatori di dilatazione di tipo assiale non autoequilibrato CD, punti fissi PF1 e PF2, supporti non guidati S3 e guide assiali S4.

Casi di linee di trasferimento piu' semplici sono facilmente analizzabili.

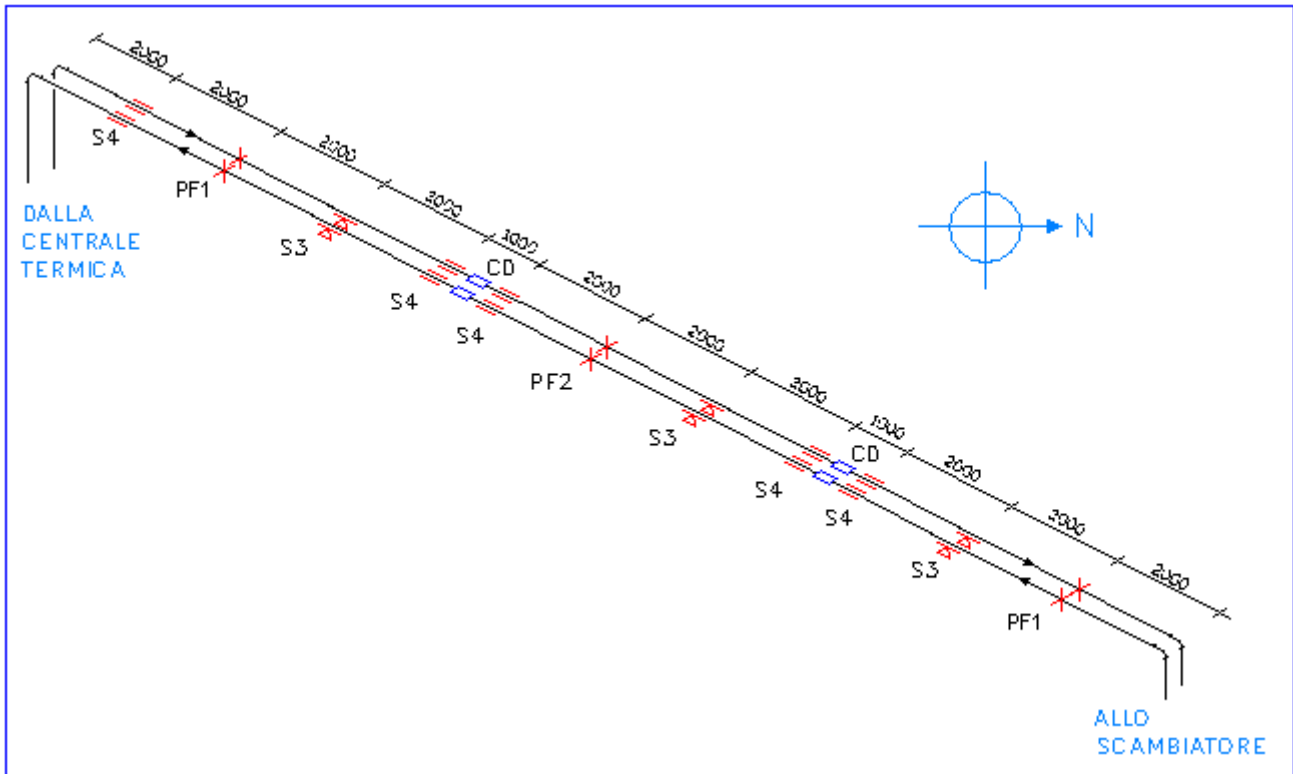
Per ciascun supporto in esame si devono considerare separatamente le azioni permanenti correlate alla configurazione del sistema e le azioni variabili conseguenti alla dinamica sismica. Le azioni variabili devono essere calcolate separatamente per azione sismica parallela ovvero ortogonale all'asse della tubazione.

Linea di mandata e linea di ritorno sono soggette ad azioni permanenti ed azioni variabili differenti e quindi devono essere verificate separatamente. Naturalmente i due effetti sul supporto, se comune, devono essere sommati.

Nel calcolo delle azioni correlate alle masse si fa riferimento alla lunghezza della tubazione di competenza di ciascun supporto.

Se la tubazione si schematizza come trave continua su piu' appoggi, del tipo carrello + cerniera nel piano verticale, la lunghezza di competenza verticale e' eguale alla luce di campata per i supporti intermedi. Per i supporti di estremita' (PF1 a NE e S3 a SW) la lunghezza di competenza e' solo approssimativamente eguale a meta' della luce di campata contigua + la distanza dalla curva di estremita'.

La lunghezza di competenza orizzontale di un supporto coincide con quella verticale solo se i supporti contigui sono del tipo guidato contro lo sbandamento laterale S4, assimilabili al tipo carrello + cerniera nel piano orizzontale; in caso contrario la lunghezza di competenza e' uguale alla semisomma delle distanze dai due supporti opposti vicini del tipo suddetto.



5.1 Punti fissi di estremita' PF1

I punti fissi di estremita' sono due. Dalle considerazioni dei paragrafi precedenti consegue che il punto fisso piu' sollecitato risulta essere quello situato a NE - lato dello scambiatore in quanto planimetricamente piu' lontano dalla centrale termica ed in quanto a servizio di un tratto maggiore di tubazione (m 6.5 vs 4.0)

5.1.2 Azioni permanenti

- .(a) Ortogonali verticali
Sono date dai pesi propri della tubazione + coibentazione + eventuali carichi localizzati quali valvole, flange, raccordi, etc. (carichi fissi) + fluido contenuto calcolati per la lunghezza di competenza del punto fisso.
- .(b) Ortogonali orizzontali: Assenti
- .(c) Assiali

Le azioni assiali permanenti risultano composte da:

- F1: azione della pressione interna stazionaria del fluido non equilibrata per la presenza del compensatore di dilatazione. Si applica alla sezione interna del tubo piu' meta' del soffietto del compensatore assiale = **area efficace** del compensatore.
La pressione interna e' differente tra linea di mandata e linea di ritorno per effetto sia della differenza fra pressione di mandata pompe e pressione nel vaso di espansione sia per effetto delle perdite di carico delle linee.
- F2: spinta del compensatore di dilatazione dovuta alla reazione alla dilatazione termica della tubazione tra temperatura di montaggio e temperatura di esercizio. Si calcola per il tratto di tubazione compreso fra due punti fissi contigui e comprendente un compensatore. Si deve mettere in conto la pretensione al montaggio, eventualmente nulla.
Alla spinta del compensatore deve essere aggiunta la resistenza alla dilatazione per attrito della tubazione sui propri supporti. Tale resistenza e' diretta nello stesso senso della spinta per reazione per cui nel caso di punto fisso compreso fra due compensatori la resistenza netta e' pari alla differenza delle resistenze calcolate per il peso della tubazione sui due lati opposti. Nel caso di punto fisso di estremita' la resistenza e' pari alla differenza fra quella calcolata per la distanza punto fisso-compensatore e quella per la distanza punto fisso-curva terminale.
La resistenza per attrito e' presente sia che i pattini di scorrimento poggino direttamente sulla carpenteria (attrito acciaio-acciaio) sia, ma molto minore, che poggino su rulli (attrito al rotolamento).
- F3: spinta sulla curva terminale per variazione della quantita' di moto conseguente alla deviazione di velocita' del fluido nella curva stessa.

5.1.3 Azioni variabili sismiche

5.1.3.2 Azioni verticali

Le azioni sismiche verticali si calcolano applicando l'accelerazione spettrale verticale di progetto S_{ve} alle masse della tubazione + fluido contenuto comprese nella lunghezza di competenza (verticale) del supporto.

Poiche' per le tubazioni orizzontali le lunghezze di campata non superano i 5 ~ 7 metri l'azione sismica verticale normalmente non viene considerata.

5.1.3.3 Azioni orizzontali ortogonali

- F7: Le azioni sismiche orizzontali sono calcolate applicando l'accelerazione spettrale di progetto S_a ortogonale alle masse della tubazione + fluido contenuto comprese nella lunghezza di competenza orizzontale del supporto. .

5.1.3.4 Azioni orizzontali parallele (assiali)

Le azioni orizzontali parallele sono composte da una parte, solo inerziale, relativa ai carichi fissi della tubazione per la lunghezza di competenza (assiale) del punto fisso pari alla distanza fra compensatore di dilatazione contiguo e curva terminale di estremita' (F6) e da una parte relativa alla azione sismica sul fluido contenuto (F4 ed F5).

La F6 si calcola come la F7 ma con riferimento solo ai carichi fissi della tubazione ed alla accelerazione spettrale di progetto S_a parallela.

L'azione sismica sul fluido si concretizza come visto al par. 4.0 con una sovrappressione nel caso che il moto sia diretto dal punto in esame verso il PPC ovvero con una depressione nel caso contrario.

Gli effetti di queste sovrappressioni sul punto fisso sono analoghi a quelli della pressione di esercizio (F1 precedente) ma si calcolano sulla base della massima delle sovrappressioni inerziale o dinamiche applicata a:

- F4 alla sezione netta della tubazione, agente sulla curva terminale di estremita' e trasmessa al punto fisso dal tratto di tubazione compreso tra punto fisso e curva terminale;
- F5 alla sezione netta del soffierto del compensatore di dilatazione contiguo e trasmessa al punto fisso dalla tubazione compresa fra di esso ed il compensatore.

Se la massima sovrappressione e' dinamica la stessa si applica sia nel calcolo F4 che in F5.

Se la massima sovrappressione e' inerziale la sovrappressione calcolata per F4 e' differente da quella calcolata per F5 per l'incremento (compensatore "sottosisma" rispetto alla curva) o decremento (compensatore "soprasisma") calcolato sulla distanza tra curva terminale e compensatore di dilatazione.

5.1.3.5 Azione assiale risultante

L'azione assiale risultante e' uguale a: $F1 + F2 + F3 + F4 + F5 + F6$.

5.1.3.5.1 Differenti configurazioni

(a). Nel caso che i compensatori di dilatazione siano del tipo a omega, con compensatori a soffierto angolari, ovvero assiali a spinta eliminata, la F1 e' internamente autoequilibrata mentre la F4 e la F5 si applicano solo per differenza nel caso di sovrappressione inerziale. Per compensatori ad omega integrali la F1 e la F5 devono mettere in conto la spinta assiale generata dalla pressione interna e dalle sovrappressioni sismiche (effetto bourdon).

(b). In caso di assenza dei compensatori di dilatazione, con punto fisso unico, le sovrappressioni dinamiche sono autoequilibrate nelle curve terminali, qualunque sia la direzione del moto, quindi il loro effetto si esplica solo come trazione assiale nella tubazione ma non sul punto fisso.

In realta' per l'intervallo di tempo transitorio necessario all'onda di pressione nel fluido per viaggiare dalla curva "sottosisma" alla curva "soprasisma" si ha un momentaneo disequilibrio. L'impulso ricevuto dalla curva "sottosisma" viaggia pero' verso la curva opposta con la velocita' del suono nel metallo molto maggiore e quindi imprime alla tubazione una accelerazione alla sola massa della tubazione (difficile che la coibentazione segua) che si esaurisce al momento che l'onda di pressione nel fluido raggiunge la curva opposta e gli impartisce un impulso contrario. L'effetto sul punto fisso, anche lui di tipo impulsivo, per stese di linea molto lunghe potrebbe essere sensibile e, nel quadro di un affinamento dei calcoli, andrebbe valutato.

La sovrappressione inerziale, nel caso di accelerazione nella direzione dell'asse tubazione, e' differente in corrispondenza delle due curve terminali per il valore corrispondente alla accelerazione spettrale di progetto applicata alla massa di fluido compresa tra le due curve. L'effetto risulta in trazioni assiali opposte nei tratti di tubazione compresi tra curve terminali e punto fisso mentre la loro differenza si esplica come spinta assiale sul punto fisso. L'effetto combinato sul punto fisso e' equivalente al considerare convenzionalmente la massa totale della tubazione soggetta alla accelerazione di progetto.

5.1.4 Carichi trasmessi

In ogni caso devono essere considerati ed aggiunti i carichi, permanenti o variabili, verticali od orizzontali, trasmessi dalla curva terminale e calcolati sulla base della configurazione della tubazione disposta oltre la curva terminale.

La eventuale torsione assiale trasmessa, se non assorbita da un apposito punto fisso di estremità, si trasmette lungo la tubazione e deve equilibrarsi con torsione pari ed opposta trasmessa dalla curva terminale opposta. Questa torsione sollecita tutta la tubazione ma soprattutto i compensatori di dilatazione.

5.2 Punto fisso intermedio PF2

5.2.1 Azioni permanenti

- .(a) Ortogonali verticali
Sono date dai carichi fissi della tubazione + fluido contenuto calcolati per la lunghezza di competenza del punto fisso.
- .(b) Ortogonali orizzontali
Assenti
- .(c) Assiali
Poiché i punti fissi intermedi si collocano tra due compensatori di dilatazione le azioni assiali per pressione F1 si equilibrano e quelle per dilatazione termica ed attrito F2 si equilibrano se le distanze dai due compensatori sono eguali.
L'azione F3 per variazione della quantità di moto agisce solamente sui punti fissi terminali.

5.2.3 Azioni variabili sismiche

5.2.3.2 Azioni verticali

Se da prendersi in considerazione si calcolano come al punto 5.1.3.2.

5.2.3.3 Azioni orizzontali ortogonali

- F7: Come per i punti fissi PF1 le azioni sismiche orizzontali sono calcolate applicando l'accelerazione spettrale di progetto ortogonale S_a alle masse della tubazione + fluido contenuto comprese nella lunghezza di competenza orizzontale del supporto.

5.2.3.4 Azioni orizzontali parallele (assiali)

La parte inerziale relativa ai carichi fissi tubazione + coibentazione (F6) e' calcolata per la lunghezza di competenza (assiale) del punto fisso pari alla distanza fra i due compensatori di dilatazione contigui.

5.2.3.4.1 Sovrapressione inerziale

Nel caso di azione sismica ortogonale all'asse tubazione la sovrappressione inerziale e' uguale lungo tutto il tratto di tubazione di competenza del punto fisso e quindi e' equilibrata dai due compensatori opposti, come la pressione stazionaria.

Viceversa in caso di azione sismica parallela si ha una differente sovrappressione in corrispondenza dei due compensatori per effetto dell'accelerazione sulla massa di fluido compresa tra i due dilatatori; la differenza di pressione applicata alla sola area netta dei soffiati dei compensatori produce una forza che carica il punto fisso (F5).

5.2.3.4.2 Effetti dinamici

Gli effetti dinamici per decelerazione o per cavitazione provocano sovrappressioni eguali lungo tutta la linea che sono equilibrate dai due compensatori opposti.

Poiché gli effetti di pressioni e sovrappressioni si equilibrano i risultati sono eguali sia per la linea di mandata che per la linea di ritorno. Ovviamente i carichi totali sul punto fisso sono eguali al doppio dei carichi trasmessi da una sola linea.

5.3 Supporti S3

Le azioni permanenti verticali sono costituite dai carichi fissi della tubazione + fluido contenuto calcolati per la lunghezza di competenza del supporto e dal carico verticale trasmesso dalla curva terminale se contigua.

Le azioni permanenti orizzontali sono solo assiali e costituite dalla resistenza alla dilatazione per attrito calcolata sulla distanza dal punto fisso.

Le azioni sismiche sono quella verticale, se ritenuta da prendersi in considerazione, e quella orizzontale ortogonale correlata all'attrito dei supporti ausiliari sul supporto principale.

5.4 Guide S4

Le azioni permanenti da prendere in considerazione sono le stesse dei supporti S3 più il carico orizzontale trasmesso dalla curva terminale se contigua.

Le azioni sismiche sono solamente orizzontali ortogonali, al solito calcolate applicando l'accelerazione spettrale di progetto alle masse della tubazione + fluido contenuto comprese nella lunghezza di competenza orizzontale del supporto (F7), e quella verticale se ritenuta da prendersi in considerazione.

6.0 INTERAZIONI CON IL RACK

Come già accennato al par. 4.5 non si possono trascurare gli effetti delle deformazioni della struttura rack sotto sisma.

Cio' vuol dire mettere in conto gli effetti flessionali pseudo-statici indotti nella tubazione dagli spostamenti relativi dei portali del rack. Questi effetti devono combinarsi nella tubazione con quelli indotti dalle azioni permanenti e variabili del par. 4.0 ed agiscono, come reazione vincolare, sulla struttura del rack. Poiché il metodo di analisi è in campo elastico lineare e' lecita la sovrapposizione degli effetti.

Peraltro nelle verifiche di resistenza della tubazione e dei suoi componenti, non si deve sottovalutare il fatto che pressioni e sovrappressioni inducono nella tubazione sollecitazioni assiali che sono di trazione, favorevoli, nei tratti compresi tra i punti fissi e le curve terminali ma sono di compressione, sfavorevoli, nei tratti compresi tra punti fissi e compensatori di dilatazione e possono innescare condizioni di instabilità flessionale assiale.

Nelle considerazioni svolte al par. 4.0 si è supposto implicitamente che anche la struttura rack sia analizzata mediante analisi statica lineare con spettro di risposta elastico. Questo metodo di analisi fornisce però indicazioni sugli spostamenti relativi interni fra portale e portale del rack solo in relazione alla variabilità spaziale del moto al suolo che, considerate le normali distanze fra i portali, è generalmente poco significativa (NTC § 3.2.5.2).

Spostamenti relativi interni significativi si sviluppano nella struttura per le armoniche superiori a 1o modo di vibrare. Per valutare tali spostamenti è quindi necessaria una analisi modale della struttura rack+tubazioni, limitata ai modi che rientrano nel dominio di frequenza dello spettro di risposta, la quale può fornire direttamente gli effetti flessionali indotti nella tubazione [1].

Nel caso della componente sismica orizzontale parallela all'asse della tubazione gli spostamenti relativi del rack in tale direzione rilevanti sono quelli fra i portali in corrispondenza dei punti fissi e l'effetto è una maggiore o minore compressione nei compensatori di dilatazione (considerando come incompressibili i tubi data la notevole differenza dei moduli di elasticità).

Se i portali del rack sono collegati fra di loro mediante controventi o passerelle gli spostamenti relativi dei portali possono essere considerati indipendenti dalla variabilità spaziale del moto al suolo e limitati all'elasticità propria ed ai laschi di montaggio delle passerelle o dei controventi.

Se la tubazione è provvista di un unico punto fisso, senza compensatori di dilatazione, l'effetto degli spostamenti relativi di portali diversi da quello del punto fisso è una maggiore o minore resistenza di attrito tra tubazione e supporto.

Nel caso della componente sismica ortogonale all'asse della tubazione gli spostamenti relativi dei portali del rack in tale direzione possono essere ridotti dei laschi laterali dei punti fissi e delle guide assiali. Se come frequentemente accade i pattini o scarpe di supporto della tubazione sono realizzati mediante profilati T 100 o T 150 rovesciati ed appoggiati direttamente sulla carpenteria o sui rulli di scorrimento, ed il contenimento contro lo sbandamento laterale è ottenuto con angolari avvolgenti l'ala del T, il lasco laterale può essere di molti millimetri. Se il contenimento laterale è ottenuto con due altri profilati a T orizzontali ed un telaio avvolgente il lasco è normalmente molto inferiore.

CONCLUSIONI

La disamina dei problemi connessi agli effetti delle sovrappressioni sismiche all'interno delle tubazioni evidenzia l'importanza di una adeguata conoscenza del comportamento sotto sisma del rack tubazioni e dei fluidi in esse convogliati e della stretta collaborazione e coordinamento tra processista, meccanico tubista e strutturista.

Riferimenti

1. F. Paolacci, *Analisi sismica dei sistemi di tubazioni di raffinerie petrolifere*, Structural Modeling n.6 - 12/2011
2. NRC *Regulatory Guide* 1.60 (1973)
3. R. H. Perry & D. W. Green, *Chemical Engineers' Handbook 7th ed.*, sec. 6-44
4. EN 1998-1, *Informative annex - Elastic Displacement Response Spectrum*
5. E. Carvalho et al., "*EC8 Seismic design of buildings*" paper, sec.2.6.2, Lisbon Workshop 02/2011, E.C. J.R.C.
6. Newmark, N. M. 1967, *Problems In Wave Propagation In Soil And Rock*, Proc. Intl. Symp. on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, Univ. of New Mexico, Albuquerque, New Mexico, 7-26.

Il presente documento e' di proprieta' della Societa' Italiana Costruzioni Industriali e viene concesso, per consultazione, a documentazione delle metodologie e procedure di calcolo adottate dalla societa' nell'analisi dello specifico tecnico.
Questo documento non puo' essere ceduto o divulgato a terzi senza il consenso scritto della Societa' Italiana Costruzioni Industriali ne' puo' essere utilizzato per scopi diversi da quello per il quale e' stato rilasciato.