

## ANALISI DEI POSSIBILI APPROCCI ALLA VALUTAZIONE DELLE FREQUENZE DI RILASCIO DA UNA TUBAZIONE A SEGUITO DI UN SISMA

Marcello Ciampoli\*, Barbara Mazzarotta, Antonio Stamegna

Dipartimento di Ingegneria Chimica, Università di Roma "La Sapienza", Via Eudossiana 18, 00184, Roma.  
Tel. 06-44585-590; Fax. 06-4827453; E-mail: [mazzarot@ingchim.ing.uniroma1.it](mailto:mazzarot@ingchim.ing.uniroma1.it)

\* Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "La Sapienza", Via Eudossiana 18, 00184, Roma.

La valutazione del rischio sismico di un impianto chimico richiede la stima delle probabilità di accadimento degli eventi incidentali da esso originati e la convoluzione di tali probabilità con il rischio sismico del sito in cui sorge l'impianto. La caratterizzazione probabilistica degli eventi incidentali può, in linea teorica, essere effettuata sulla base di un'analisi statistica degli eventi verificatisi nel passato (analisi storica) ovvero utilizzando le tecniche degli alberi dei guasti e degli eventi che permettono di ricostruire le catene di eventi associate a condizioni di funzionamento ritenute inammissibili. Poiché i dati storici disponibili sono assai scarsi, l'unica possibilità consiste nell'impiego di queste due tecniche, che, in questo lavoro, sono confrontate in termini di semplicità di utilizzo ed affidabilità dei risultati, con riferimento, a titolo di esempio, al caso di un evento incidentale tipico dei sistemi di tubazioni presenti negli impianti chimici.

### 1. INTRODUZIONE

Le problematiche che sorgono nella progettazione e nella gestione degli impianti dell'industria di processo per effetto dei rischi derivanti da eventi di origine naturale (rischio idrogeologico, vulcanico e sismico) stanno acquisendo notevole interesse soprattutto in Italia, date le caratteristiche del nostro territorio e la diffusa presenza di insediamenti industriali anche in zone particolarmente esposte. L'analisi delle possibili conseguenze negli impianti industriali di eventi naturali catastrofici, presenta tuttavia numerose difficoltà, sia nella scelta dell'approccio metodologico, sia nelle valutazioni specifiche, che, in generale, richiedono l'intervento di specialisti con competenze estremamente diversificate.

Per quanto riguarda più in particolare il rischio sismico, la maggior parte degli studi presenti in letteratura riguarda l'analisi della risposta sismica di alcuni specifici componenti di impianto (e, segnatamente, dei serbatoi che contengono prodotti allo stato liquido) e la definizione dei criteri progettuali ed operativi che è necessario seguire per prevenire il collasso strutturale, parziale o totale, di questi componenti [1-8]. L'analisi del rischio sismico di un impianto e la scelta delle soluzioni più efficienti per la sua riduzione sono, in ogni caso, limitate allo studio di singoli componenti e strutture. Nella realtà, l'analisi del rischio sismico di un impianto chimico è molto più complessa di quella dei singoli componenti dell'impianto stesso, a causa delle interazioni tra essi: infatti i componenti sono dotati di strutture di sostegno, singole o multiple, e sono tra loro connessi da sistemi di tubazioni, a loro volta dotati di strutture di sostegno, che, nella maggior parte dei casi, ospitano numerosi tronchi che possono connettere componenti con caratteristiche diverse tra loro.

Ad una prima analisi della risposta sismica di un impianto, proprio le tubazioni appaiono come un possibile elemento vulnerabile [1]: infatti esse collegano apparecchiature diverse, che quindi potranno avere una diversa risposta al sisma, ed il loro percorso interessa un certo numero di sostegni, i quali avranno a loro volta proprie modalità di vibrazione. In aggiunta a questo, buona parte delle connessioni tra tubazioni ed apparecchiature sono realizzate per flangiatura, per cui anche modesti disassamenti delle due estremità delle flange possono portare a perdite dalle guarnizioni. Tali perdite, anche se di modesta entità, non vanno sottovalutate: infatti la fuoriuscita di un piccolo getto di fluido infiammabile in pressione, in caso di innesco, forma un getto incendiato che è in grado di scatenare importanti effetti domino se diretto su di un'apparecchiatura od un'altra tubazione [9]. Infine, in conseguenza di un sisma, è possibile la caduta di oggetti ed accessori, per vibrazioni o cambio di vincolo, dalle parti più elevate delle strutture di sostegno e dei componenti di impianto, che possono impattare sulle tubazioni, poste generalmente più in basso. Al riguardo, può essere interessante notare che, a seguito del terremoto di Northridge (U.S.A) del 1994, si verificarono 60 incidenti coinvolgenti materie pericolose nell'area, e che, molto spesso, si verificarono perdite di prodotto anche in assenza di danni significativi alle strutture [10].

L'effettuazione di un'analisi del rischio legato al rilascio di sostanze pericolose in un impianto di processo a seguito di un sisma richiede quindi 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 sostanziali differenze rispetto ad una tradizionale analisi del rischio legato ad eventi incidentali innescati da altre cause (guasti, rotture, ecc.) [9]. Si tratta infatti di caratterizzare lo scenario incidentale che origina la perdita di contenimento del prodotto, valutare la dimensione del foro di uscita, l'entità e le

modalità di fuoriuscita del prodotto, la sua dispersione nell'ambiente, l'eventuale innesco, se si tratta di un prodotto infiammabile, e l'estensione delle zone di danno. Al contrario la valutazione delle frequenze attese per lo scenario incidentale risulta, nel caso di eventi originati da un sisma, decisamente più 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 un approccio semplificato spesso adottato per gli scenari tradizionali dell'industria di processo, non è applicabile in questo caso, data la scarsissima disponibilità di informazioni per eventi che sono, in termini assoluti, piuttosto rari. In linea di principio sono invece applicabili a questo tipo di problema gli approcci classici per la stima delle frequenze incidentali, rappresentati, rispettivamente, dall'albero dei guasti e dall'albero degli eventi. Sinteticamente, la tecnica dell'albero dei guasti (FTA: Fault Tree Analysis) effettua l'analisi a partire dal cosiddetto Top Event, rappresentato dall'evento (o scenario) incidentale considerato, procedendo a ritroso per determinare quali eventi o combinazioni di eventi, possano causare il Top Event; la tecnica dell'albero degli eventi (ETA: Event Tree Analysis), al contrario, effettua l'analisi a partire da eventi origine, andando a determinare le loro conseguenze, fino a raggiungere uno o più scenari incidentali.

In questo lavoro si è inteso confrontare, dal punto di vista dell'efficacia e della semplicità d'uso, questi due approcci al problema della valutazione del rischio sismico di un impianto: a titolo di esempio, si è esaminato il caso della valutazione della frequenza incidentale dell'evento "perdita di continuità in una tubazione", innescato da un sisma.

## 2. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO

L'elemento in studio è costituito da una porzione di impianto di processo, e più precisamente dalla sezione di deetanizzazione dell'unità di frazionamento C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub> di una raffineria. Tale sezione comprende una colonna di distillazione, la struttura di sostegno del condensatore e dell'accumulatore di riflusso, il ribollitore di fondo colonna, le tubazioni di alimentazione, del vapore e del riflusso, le pompe di rilancio e di alimentazione ed i portali di sostegno a dette tubazioni, come illustrato schematicamente nelle Figure 1 e 2.

L'alimentazione è costituita da una miscela di idrocarburi prevalentemente del tipo GPL (C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub>), contenente anche prodotti più leggeri (C<sub>2</sub> e C<sub>1</sub>), che vengono allontanati proprio in questa sezione. L'alimentazione viene inviata mediante la pompa booster P-1 ad un preriscaldamento nello scambiatore di calore a fascio tubiero E3 e quindi alla colonna di deetanizzazione C-1. Nella colonna si separano in testa una corrente distillato ricca di composti più leggeri (essenzialmente etano), ed al fondo una corrente residuo costituita dalla miscela C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub>. Il vapore di testa viene parzialmente condensato nello scambiatore ad aria E-1: si origina una miscela liquido-vapore che passa all'accumulatore di riflusso V-1 dove si separa. La fase vapore costituisce il prodotto di testa, mentre la fase liquida viene inviata nuovamente in testa alla colonna, mediante la pompa P-2, a costituire il riflusso dell'operazione. Il liquido di fondo colonna passa in parte nel ribollitore a termosifone orizzontale E2, dove viene parzialmente vaporizzato mediante scambio termico con vapore d'acqua a bassa pressione, prima di essere reimpresso a fondo colonna. La parte di liquido rimanente costituisce il residuo di fondo e viene avviata al preriscaldatore E3, in cui si raffredda preriscaldando l'alimentazione. Successivamente, il residuo viene diviso in due correnti: la prima costituisce parte dell'alimentazione della successiva sezione di depropanizzazione, mentre la seconda costituisce un prodotto finale che viene avviato al refrigerante E4 dove si raggiunge la temperatura di stoccaggio. Tutte le pompe presenti sono dotate di riserva, collegata mediante tubazione di by-pass, e sono indicate come P-1-A/B e P-2-A/B.

Nella sezione sono quindi presenti le seguenti apparecchiature principali:

- la colonna di distillazione C-1, del diametro di 2 m ed altezza complessiva di 27.5 m;
- il condensatore E1 e l'accumulatore di riflusso V-1, posti su due diversi livelli di una struttura di sostegno comune, realizzata in carpenteria metallica, con dimensioni in pianta di 10 m x 5 m ed altezza di 13.5 m;
- il ribollitore di fondo colonna E2 e gli scambiatori di calore a fascio tubiero E-3 ed E-4, posti a terra e sostenuti individualmente su selle;
- il gruppo pompe di alimentazione P-1A/B ed il gruppo pompe di rilancio P-2A/B.

Le tubazioni che collegano le pompe e le apparecchiature sono sostenute da supporti a portale e da supporti singoli, identificati con un numero nella Figura 1; inoltre, le tubazioni di alimentazione, del vapore di testa e del riflusso corrono in parte lungo la colonna di distillazione a cui sono fissate con appositi supporti. I percorsi delle tubazioni (rappresentati come unifilari) e la posizione degli apparecchi sono schematizzati nelle Figure 1 (vista in pianta) e 2 (sezione): la zona presa in esame ha un'estensione di circa 360 m<sup>2</sup>.

Anche limitando l'analisi della vulnerabilità sismica alle sole tubazioni, nella sezione dell'impianto di processo considerata si possono verificare numerosi eventi incidentali. Tuttavia, in uno studio effettuato in precedenza [11], si è rilevato che l'effetto più probabile di un sisma su un sistema di tubazioni è

rappresentato dall'apertura di una connessione flangiata; in questo studio si è di conseguenza assunta tale tipologia di evento come scenario incidentale. In particolare, tra le diverse connessioni flangiate presenti sulle tubazioni, si è focalizzata l'attenzione sulla flangia a valle del gruppo pompe P-1A/B, poiché è tra quelle potenzialmente più pericolose dal punto di vista delle conseguenze, data l'elevata portata e la presenza del prodotto come gas liquefatto a pressione. Tale punto è schematizzato come un rettangolo di colore rosso nelle Figure 1 e 2.

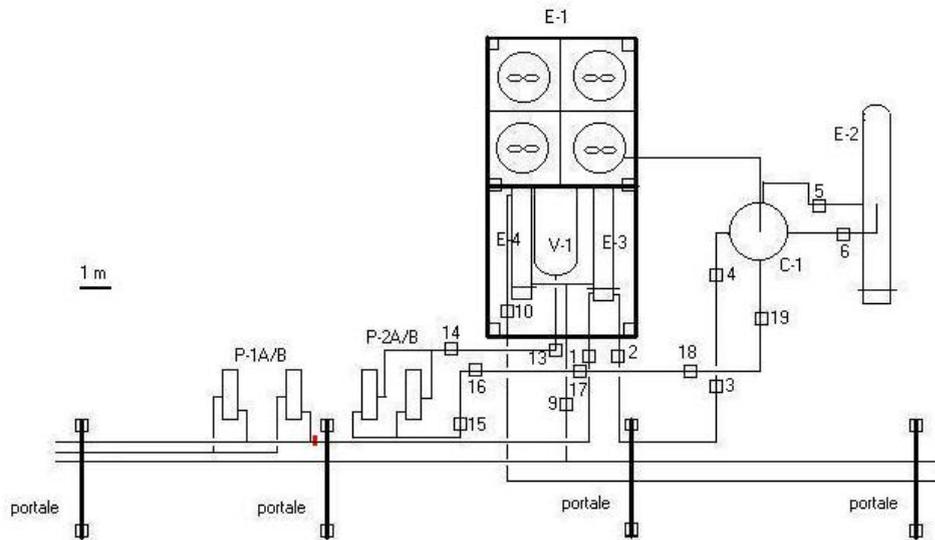


Figura 1. Rappresentazione schematica semplificata della pianta della sezione considerata.

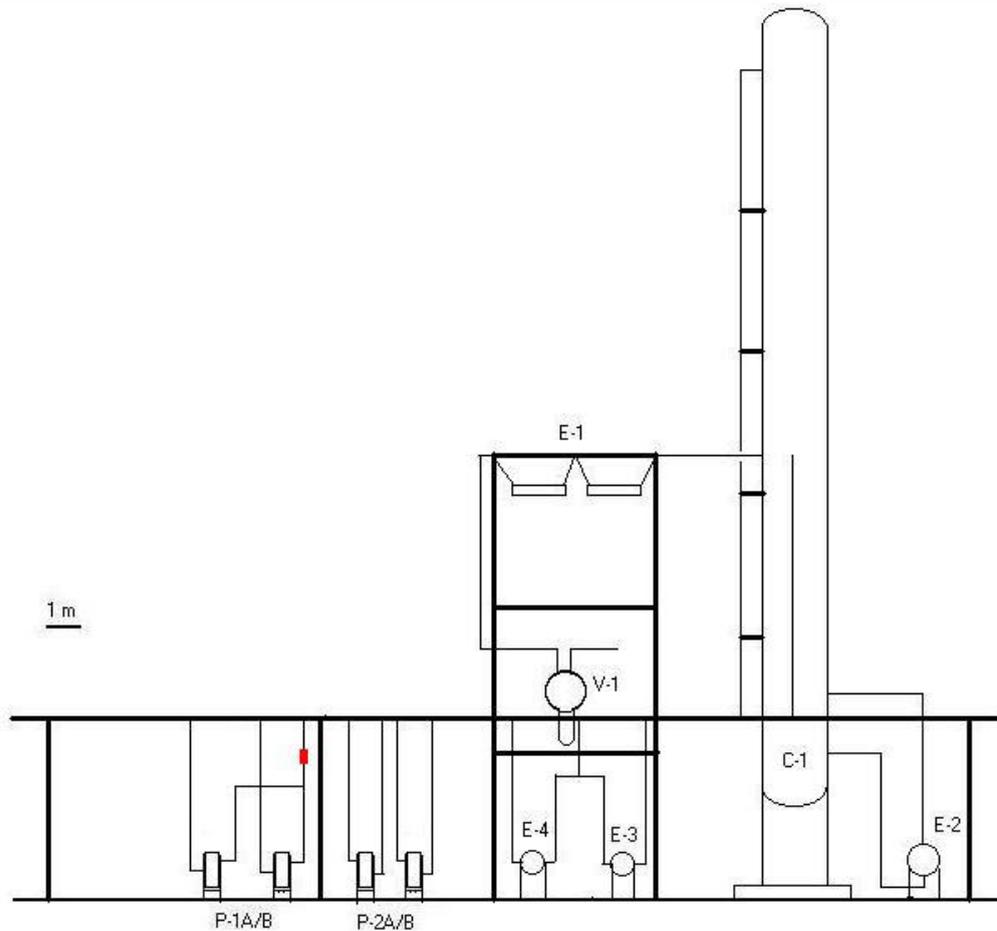


Figura 2. Rappresentazione schematica semplificata della vista in sezione della sezione considerata.

### 3. APPLICAZIONE DELLA TECNICA DELL'ALBERO DEI GUASTI

Come già osservato, questa tecnica consente di determinare attraverso quali meccanismi di guasto il sisma può portare ad un evento incidentale. Nel caso in esame, si è assunto come Top Event l'apertura della connessione flangiata del bocchello d'uscita del gruppo pompe P-1A/B; partendo da tale Top Event, si è proceduto verso il basso, scendendo di livello in livello, fino a raggiungere l'evento elementare, ossia il verificarsi di un sisma di intensità assegnata.

Nel costruire l'albero dei guasti si sono adottate le seguenti semplificazioni:

- la connessione flangiata all'uscita del gruppo pompe P-1A/B costituisce il primo punto in cui può verificarsi una fuoriuscita di fluido dalla tubazione di alimentazione. Si assume quindi che la tubazione resti integra fino a che non si abbia l'apertura del bocchello e non si prendono in considerazione i danni alla tubazione che possano verificarsi successivamente a questo evento;
- tra le possibili cause dell'apertura della flangia sulla tubazione di alimentazione non sono considerate quelle derivanti dalla tubazione stessa (ad esempio, per la caduta del tratto verticale della tubazione);
- poiché l'evento incidentale ipotizzato è tipicamente associato ad un sisma di intensità non catastrofica, tra le possibili cause non sono considerate il collasso del portale, della struttura di sostegno, del condensatore ad aria e dell'accumulatore di riflusso e della colonna;
- i gruppi pompe P-1A/B e P-2A/B (adiacente a quello in esame), ben ancorati al suolo, non subiscono spostamenti se colpiti da supporti, tubi ed oggetti precipitati dall'alto;
- l'apertura del bocchello in esame a seguito della caduta da tubazioni vicine di oggetti relativamente leggeri, come gli accessori di linea (valvole, filtri di linea, ecc.), non può verificarsi.

L'albero dei guasti è stato costruito senza ricorrere a procedimenti automatizzati: la struttura base è riportata in Figura 3 e presenta i seguenti 9 rami principali, che rappresentano altrettante cause primarie in grado di provocare l'apertura del bocchello in esame:

- 1) vibrazione eccessiva del raccordo di collegamento del bocchello stesso;
- 2) vibrazione eccessiva del gruppo pompe P-1A/B;
- 3) spostamento del gruppo pompe P-1A/B;
- 4) caduta del gruppo pompe P-1A/B;
- 5) caduta di oggetti dalla parte alta della colonna;
- 6) caduta del tubo di uscita del vapore dalla colonna;
- 7) caduta del tratto verticale del tubo di riflusso della colonna;
- 8) caduta di oggetti dalla struttura del condensatore;
- 9) cedimento del portale.

Allo scopo di avere una struttura dell'albero più snella e leggibile, si sono utilizzati dei sottoalberi (denominati S1, S2, C, V, R, SC1, SC2), che, di volta in volta, vanno ad innestarsi sul ramo di appartenenza nella struttura principale dell'albero o su un altro sottoalbero.

A titolo di esempio, si riporta la procedura seguita per costruire il primo ramo dell'albero in Figura 3, corrispondente al sottoalbero S1, che è quello che porta a vibrazioni intollerabili dell'elemento di raccordo tra il bocchello di uscita del gruppo pompe P-1A/B e la valvola di non ritorno collocata a valle di quest'ultimo.

Anzitutto, i movimenti del suolo generati dal sisma si trasmettono al gruppo pompe che è ancorato al terreno: il gruppo pompe a sua volta trasmette all'elemento di raccordo ad esso collegato il moto vibratorio. La vibrazione dell'elemento di raccordo può essere generata anche dalla vibrazione del portale e del supporto 1 su cui passa la tubazione, come pure del preriscaldatore E-3, cui essa è collegata. Per valutare l'entità di tali vibrazioni e la loro ammissibilità, è quindi fondamentale valutare gli effetti delle azioni sismiche, in termini di accelerazioni assolute, velocità e spostamenti relativi, nei punti delle singole strutture in cui si connettono altri elementi aggiunti: nel caso delle tubazioni si è fatta per ora l'ipotesi che esse gravino sulle strutture a cui sono connesse unicamente come masse, e non interagiscano con esse nel moto di vibrazione.

Un esempio più complesso è rappresentato dal sesto ramo dell'albero, quello che porta alla caduta del tubo di uscita del vapore dalla colonna; tale tubazione può infatti precipitare sul gruppo pompe P-1A/B e provocare l'apertura del bocchello. Le combinazioni degli eventi in grado di condurre alla caduta del tubo di uscita del vapore dalla colonna sono rappresentate nel sottoalbero V riportato in Figura 4.

La funzione della tubazione è quella di trasferire il vapore uscente dalla sommità della colonna al condensatore ad aria E1. L'estremità superiore del tubo è fissata mediante un bocchello alla sommità della colonna; la tubazione ha un tratto in curva che descrive un angolo di 180° e quindi un tratto rettilineo, fissato mediante supporti a circa 70 cm dalla colonna, da una quota di circa 27.5 m fino a 13.5 m, ovvero alla quota a cui è posto il condensatore ad aria E1, cui la tubazione si congiunge dopo aver percorso un tratto orizzontale. Data questa disposizione della tubazione si può considerare che essa sia soggetta a vincoli equivalenti ad incastri più o meno perfetti, alle due estremità, cioè in corrispondenza degli attacchi alle apparecchiature (colonna e condensatore ad aria) ed a vincoli che consentono alcuni movimenti (traslazioni trasversali, longitudinali, piccole rotazioni) in corrispondenza dei supporti di aggancio alla colonna. Ciò è



dovuto al fatto che la tubazione è una struttura snella soggetta, oltre al peso proprio e del fluido (che pure è molto modesto, trattandosi di vapore), anche a dilatazioni termiche che, se impedisce, possono portare a sollecitazioni eccessive.

La causa prima del distacco del tubo di uscita del vapore dalla colonna, si può individuare nel cedimento di uno o più supporti del tubo alla colonna. Infatti, in tale caso risulterebbero sovraccaricati i supporti di attacco della tubazione in testa alla colonna ed al condensatore ed i supporti rimanenti, con probabile cedimento ed innesco di un pericoloso effetto domino culminante nella caduta della tubazione. Le possibili cause di cedimento di uno o più supporti che collegano la tubazione vapore alla colonna sono:

- la vibrazione eccessiva della colonna, descritta mediante il sottoalbero S1 esaminato in precedenza;
- la vibrazione eccessiva del tubo di uscita del vapore dalla colonna indotta da sollecitazioni trasmesse alla tubazione dalla colonna o dal condensatore ed ancora descritta dal sottoalbero S1;
- la caduta di oggetti dalla parte alta della colonna. Sulla colonna sono infatti presenti numerosi oggetti, quali scalette, mensole, piattaforme, valvole, strumentazione, ecc., che possono danneggiare i supporti della tubazione del vapore: la sequenza di eventi che può portare a tale caduta di oggetti è rappresentata nel sottoalbero C;
- il cambio di vincolo dei supporti alla colonna del tubo di uscita del vapore. I supporti devono consentire alla tubazione sostenuta di deformarsi lungo direzioni trasversali, in modo da ridurre lo stato di sollecitazione indotto dalle dilatazioni termiche contrastate. Una trasformazione nella natura del vincolo, che consenta alla tubazione movimenti e deformazioni diversi da quelli previsti originariamente, potrebbe causare, oltre ad una deformazione della tubazione, il distacco dalla colonna di uno o più elementi di sostegno. All'origine di questo cambio di vincolo si trovano gli eventi di vibrazione eccessiva della colonna, di vibrazione eccessiva del tubo di uscita del vapore dalla colonna e di caduta di oggetti dalla parte alta della colonna, che sono pertanto combinati tra loro a mezzo del cancello logico OR.

Ovviamente, il cedimento dei supporti del tubo di uscita del vapore alla colonna può derivare, oltre che singolarmente dai quattro eventi illustrati, da loro possibili combinazioni, descritte nell'albero di Figura 4 mediante il cancello logico OR.

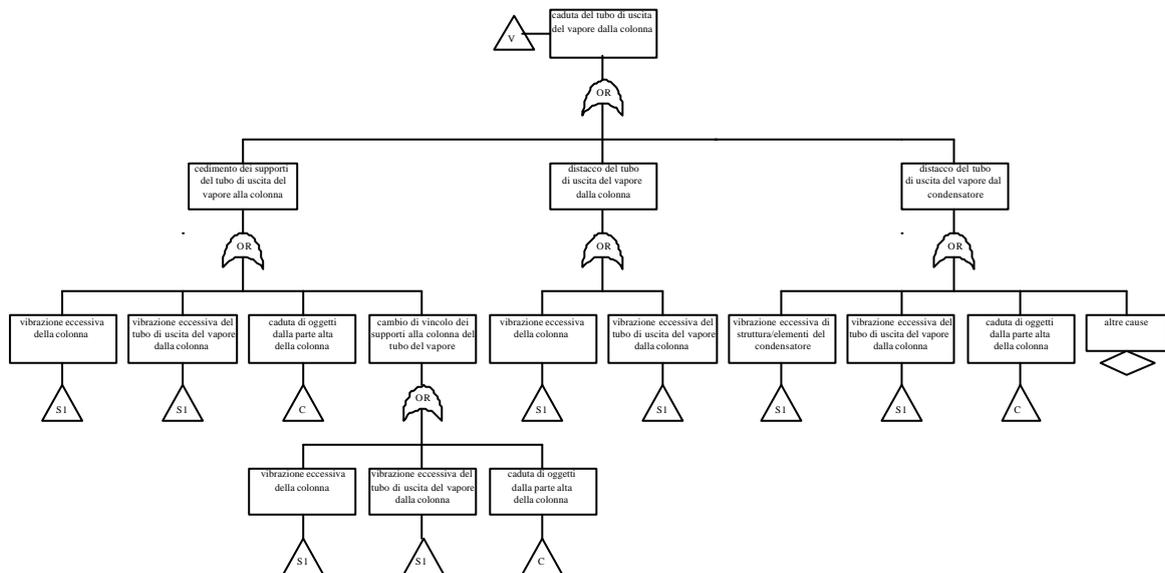


Figura 4. Schema del sottoalbero V, corrispondente alla caduta del tubo di uscita del vapore dalla colonna.

Altre cause di caduta del tubo di uscita del vapore dalla colonna, oltre al cedimento dei supporti, sono il distacco della tubazione dal bocchello di connessione con la colonna o con il condensatore. Nel primo caso infatti il peso della tubazione verrebbe a gravare esclusivamente sui supporti alla colonna e sull'attacco al condensatore, causando il cedimento per sovraccarico. Il distacco del tubo di uscita del vapore dalla colonna può essere dovuto ad una vibrazione eccessiva della colonna e/o del tubo di uscita del vapore dalla colonna (eventi già illustrati in precedenza e alle cui basi si inserisce il sottoalbero S1). Per quanto riguarda il distacco del tubo dal condensatore, analogamente al caso precedente, i supporti della tubazione alla colonna e l'altra connessione alla testa della colonna possono cedere per sovraccarico. Le possibili cause comprendono

la vibrazione eccessiva della struttura del condensatore e/o degli elementi posti su di essa, la vibrazione eccessiva del tubo di uscita del vapore dalla colonna, la caduta di oggetti dalla parte alta della colonna e altri elementi, quali gli urti con macchinari in manovra (ad esempio, il braccio di una gru). Anche in questo caso gli eventi sopra elencati possono provocare, da soli o congiuntamente, il distacco del tubo di uscita del vapore dal bocchello del condensatore, per cui sono stati combinati mediante il cancello logico OR.

Ricapitolando, l'avvenimento finale del sottoalbero V, rappresentato dalla caduta del tubo di uscita del vapore dalla colonna, può scaturire dal cedimento dei supporti del tubo di uscita del vapore alla colonna, dal distacco del tubo di uscita del vapore dalla colonna, dal distacco del tubo di uscita del vapore dal condensatore o da una delle possibili combinazioni di questi eventi.

Per i dettagli relativi alla descrizione completa di tutti i sottoalberi si rimanda a [12].

#### 4. APPLICAZIONE DELLA TECNICA DELL'ALBERO DEGLI EVENTI

Gli effetti del sisma sugli elementi di un impianto chimico sono legati alla vibrazione indotta ed al moto del terreno. Mentre nella costruzione dell'albero dei guasti si sono considerati entrambi questi aspetti, per l'albero degli eventi si è ritenuto di limitare la trattazione alla sola vibrazione indotta, sia per rendere più gestibili le dimensioni dell'albero sia perché l'estensione della tecnica anche all'alterazione dello stato del terreno è concettualmente semplice e non apporta elementi innovativi al confronto che si intende realizzare.

Scelto quindi come evento iniziatore una vibrazione eccessiva (ossia in grado di provocare conseguenze sui componenti dell'impianto considerato) indotta da un sisma di intensità assegnata, si sono individuate le sequenze di eventi che essa è in grado di innescare su ogni componente, focalizzando l'attenzione su quelle che determinano l'apertura del bocchello di uscita del gruppo pompe P-1 A/B. Il risultato finale di ogni ramo dell'albero degli eventi sarà quindi rappresentato da una delle due voci "perdita di fluido" o "nessuna perdita", derivanti rispettivamente dall'apertura del bocchello considerato o dal mantenimento del contenimento.

In pratica, nel costruire l'albero degli eventi si possono percorrere i rami dell'albero dei guasti che originano dalla voce "vibrazione eccessiva". Si è quindi proceduto identificando di volta in volta l'evento che può scaturire dal verificarsi dell'evento precursore: tenendo presente che, a seguito dell'evento precursore, il secondo evento potrà avere luogo o meno, occorre prevedere una biforcazione seguita da due rami, contrassegnati dal SI e dal NO, che indicano, rispettivamente, il verificarsi e il non verificarsi dell'evento. Seguendo il ramo NO, si interrompe la successione di eventi che conduce all'apertura del bocchello del gruppo pompe P-1A/B e si ottiene direttamente il risultato "nessuna perdita". Al contrario, il verificarsi dell'evento permette il prosieguo della sequenza, da cui ne potranno originare altre, attraverso diramazioni del ramo SI.

Anche per l'albero degli eventi, al fine di ottenere una struttura più snella e leggibile, si è proceduto in modo analogo a quanto fatto per l'albero dei guasti, scomponendo l'albero in quattro sottoalberi (R, SC, V, C) che di volta in volta vanno ad innestarsi su di un ramo principale dell'albero o su un altro sottoalbero. Dal punto di vista grafico ciò è stato effettuato indicando in corrispondenza dell'evento considerato il nome del sottoalbero che da esso si diparte.

La struttura principale dell'albero degli eventi è riportata in Figura 5: nella colonna adiacente all'evento iniziatore "vibrazione eccessiva" sono riportati tutti gli eventi che essa è in grado di provocare. Con l'eccezione del primo, rappresentato direttamente dall'apertura del bocchello del gruppo pompe P-1A/B (l'evento incidentale considerato), da ognuno degli eventi primari possono prendere origine uno o più eventi secondari: ciò porta ad individuare quindici rami principali, che sono stati singolarmente esaminati.

A titolo di esempio sarà esaminata la struttura del settimo ramo, riportato in Figura 6, che riguarda il cedimento dei supporti della tubazione di riflusso alla colonna. Tale tubazione parte dal gruppo pompe di rilancio P-2A/B, ha un tratto sostenuto dai supporti da 15 a 19, posti sul terreno, ed un tratto che corre lungo la colonna, ed è fissato ad essa con supporti simili a quelli utilizzati per la tubazione di uscita del vapore; si collega quindi mediante un bocchello alla parete della colonna, nella zona di testa in corrispondenza del primo piatto (vedi Figure 1 e 2).

Il cedimento dei supporti alla colonna del tubo di riflusso può essere innescato da una vibrazione eccessiva trasmessa dalla colonna e/o dal tubo di riflusso ai supporti. Ovviamente, se la vibrazione non è in grado di provocare il cedimento dei supporti, il ramo dell'albero in uscita (contrassegnato dal NO) conduce al risultato finale "nessuna perdita". In caso contrario, il cedimento di uno o più supporti (ramo SI) può portare al sovraccarico del supporto 19, dell'attacco della tubazione alla colonna e dei rimanenti supporti alla colonna.

Se la caduta del tratto verticale del tubo di riflusso della colonna non ha luogo, la successione di eventi innescata dalla vibrazione eccessiva si arresta ed il ramo NO conduce al risultato finale "nessuna perdita". In caso contrario (ramo SI), si possono innescare tre eventi, rappresentati dall'apertura del bocchello del gruppo pompe P-1A/B, dal cedimento del portale tubazioni e dalla caduta di oggetti dalla struttura del condensatore.

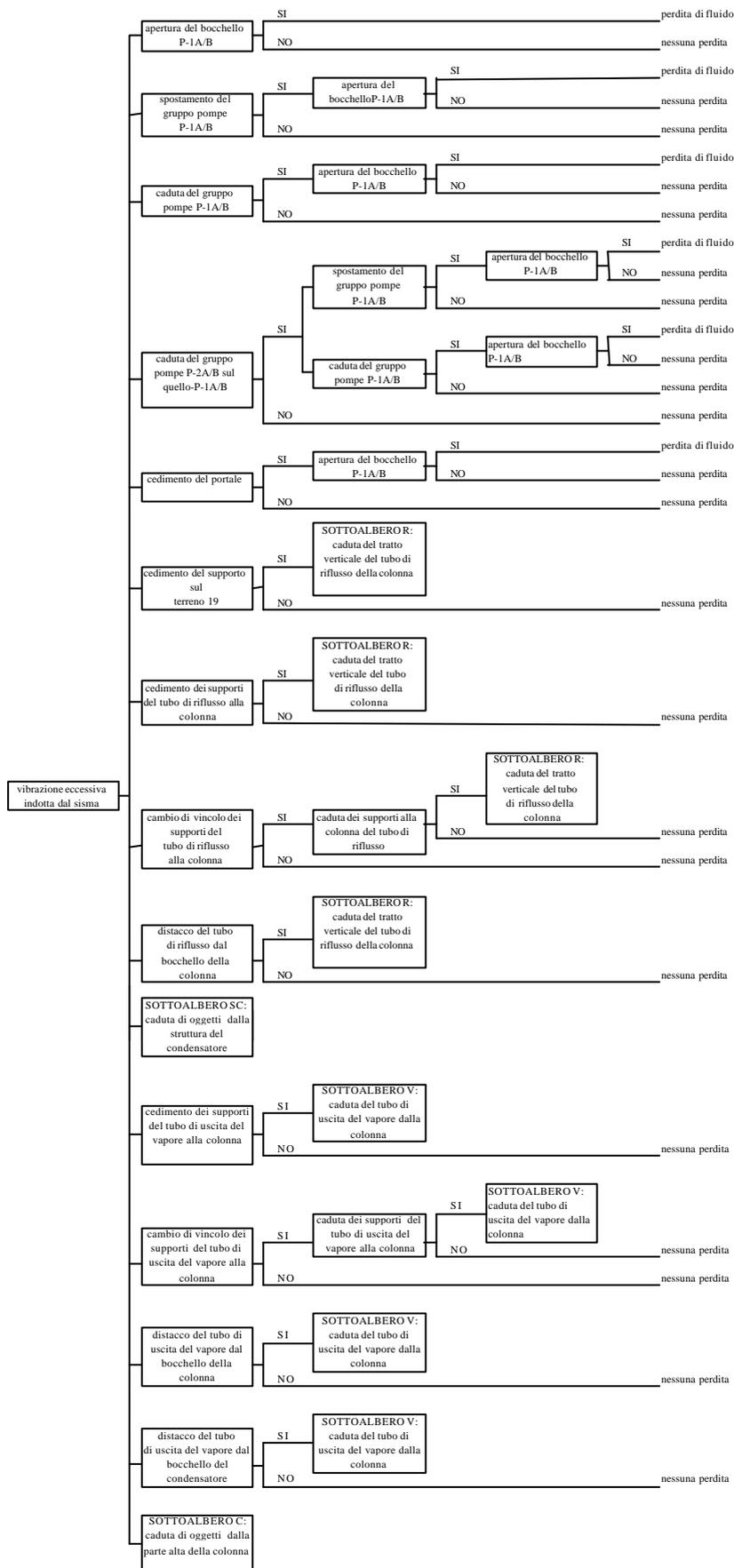


Figura 5. Schema della struttura dell'albero degli eventi.

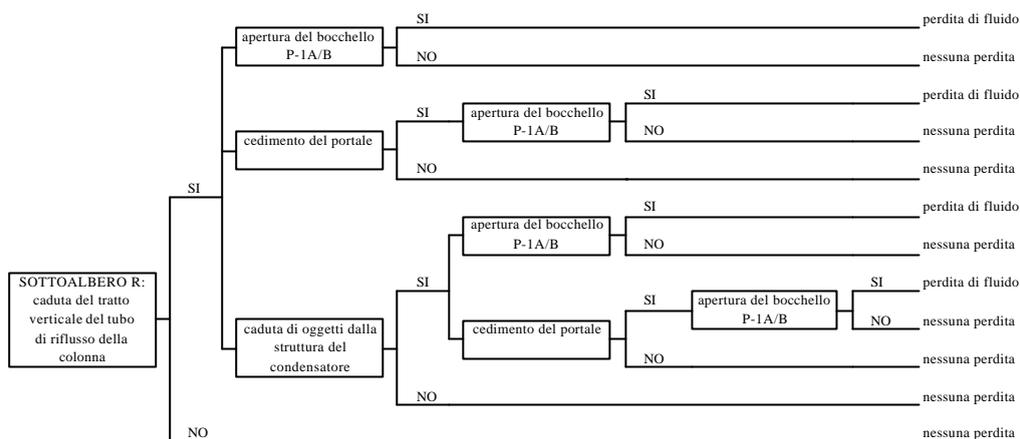


Figura 6. Schema del sottoalbero R.

Il primo evento (apertura del bocchello del gruppo pompe P-1A/B) può essere causato dalla caduta della tubazione di riflusso sul gruppo pompe con conseguente danneggiamento della giunzione: a seconda del verificarsi o meno dell'apertura del bocchello P-1A/B, si giunge quindi ai risultati "perdita di fluido" o "nessuna perdita".

Il secondo evento (cedimento del portale tubazioni) può essere causato dalla caduta della tubazione di riflusso sul portale di sostegno delle tubazioni. Se il portale resiste all'urto senza cedere (ramo NO), la sequenza di eventi si arresta e si ottiene il risultato finale "nessuna perdita"; nel caso contrario (ramo SI), si può avere un incremento dello stato di sollecitazione nella giunzione tra la tubazione di alimentazione ed il gruppo pompe P-1A/B che può portare ad un successivo evento di apertura del bocchello P-1A/B. A sua volta tale evento porterebbe ai risultati finali "nessuna perdita" (ramo NO) e "perdita di fluido" (ramo SI).

Il terzo evento (caduta di oggetti dalla struttura del condensatore) può essere causato dalla caduta del tratto verticale della tubazione di riflusso sulla struttura del condensatore, con conseguenti danni alla struttura stessa ed agli elementi collocati su di essa o comunque ad essa connessi. Possono infatti precipitare verso il basso, ad esempio, profilati metallici, pezzi del condensatore ad aria, tubi, valvole, ecc. Se ciò non avviene (ramo NO), la sequenza di eventi si interrompe e si ottiene il risultato finale "nessuna perdita". In caso contrario (ramo SI), possono avere luogo due eventi: l'apertura del bocchello P-1A/B e il cedimento del portale. Nel primo caso gli oggetti precipitati dalla struttura del condensatore possono colpire e danneggiare la giunzione del gruppo pompe P-1A/B, dando luogo alle alternative "nessuna perdita" (ramo NO) e "perdita di fluido" (ramo SI) già viste in precedenza. Gli oggetti precipitati dal condensatore possono però investire anche il portale sottostante, danneggiandolo al punto da determinarne il cedimento. Se il portale non cede (ramo NO), la sequenza di eventi si arresta e si arriva al risultato finale "nessuna perdita". In caso contrario, si può giungere, come visto in precedenza, all'apertura del bocchello P-1A/B, il cui verificarsi o meno conduce al risultato finale "perdita di fluido" o "nessuna perdita".

Per i dettagli relativi alla descrizione completa di tutti i sottoalberi si rimanda a [12].

## 5. QUANTIFICAZIONE DEGLI ALBERI

Una volta predisposti gli alberi dei guasti e degli eventi si è proceduto alla valutazione delle frequenze (ovvero delle probabilità annuali) di accadimento dei diversi rami. Tale analisi ha comportato grosse difficoltà pratiche, dovute all'assenza di banche dati da cui derivare i valori di frequenza (annuale) e probabilità per gli eventi che si possono verificare in occasione di un sisma.

Nel caso dell'albero degli eventi, i valori necessari sono rappresentati dalle probabilità di accadimento di ognuno degli eventi riportati nei vari rami e dal valore di frequenza dell'evento iniziatore (nel caso esaminato la vibrazione eccessiva indotta dal sisma); nel caso dell'albero dei guasti sono invece necessari i valori di frequenza di tutti gli eventi elementari, i cui valori vengono combinati mediante i cancelli logici AND e OR per descrivere l'evoluzione lungo i rami. La deduzione di valori di frequenza e di probabilità da considerazioni puramente "ingegneristiche", ossia essenzialmente legate all'esperienza degli analisti di rischio, presenta ovvi elementi di incertezza, legati anche al fatto che vengono coinvolte le competenze di diversi specialisti: tuttavia, nella stima dei valori di frequenza è possibile commettere errori anche rilevanti, mentre per quelli delle probabilità le incertezze sono spesso inferiori e ciò è particolarmente vero nelle

valutazioni relative all'albero degli eventi, in cui l'analista può basarsi su considerazioni relative all'ubicazione dei vari elementi all'interno dell'area in esame e sulle loro caratteristiche strutturali.

Si è quindi partiti con l'analisi dell'albero degli eventi, andando a quantificare le probabilità di accadimento di ognuno degli eventi primari e procedendo lungo i rami dell'albero. Per ogni ramo, le probabilità dei risultati finali "nessuna perdita" e "perdita di fluido" sono date dal prodotto delle probabilità di tutti gli eventi che fanno parte della sequenza che porta ad ognuno di essi: le probabilità totali dei risultati finali (la cui somma deve essere pari ad 1) si ottengono quindi sommando i valori relativi ad ogni ramo. Sulla base dei valori assegnati alle probabilità dei singoli eventi (per i dettagli si rimanda al lavoro [12]) si è ottenuta una probabilità di "perdita di fluido" pari a  $5.97 \cdot 10^{-3}$ : la frequenza da assegnare all'evento incidentale si ottiene moltiplicando tale probabilità per la frequenza di accadimento assegnata alla vibrazione eccessiva generata dal sisma. Ipotizzando che tale frequenza sia pari a  $10^{-3}$  eventi/anno, ad esempio, si stima per l'evento incidentale una frequenza di accadimento di  $5.97 \cdot 10^{-6}$  eventi/anno.

La quantificazione dell'albero dei guasti ha presentato maggiori difficoltà e maggiori incertezze nella stima delle frequenze da attribuire agli eventi elementari posti alla base della struttura. Da questi valori iniziali ed eseguendo le operazioni previste dai cancelli AND e OR presenti nella struttura dell'albero, si risale, di livello in livello, fino al Top Event. In questo caso all'evento elementare "sisma" si sono attribuiti valori di frequenza specifici della particolare sequenza di avvenimenti attraverso cui il "sisma" conduce all'apertura del bocchello. Nella valutazione numerica delle probabilità presenti nell'albero dei guasti si sono anche sfruttate le informazioni acquisite nella quantificazione dell'albero degli eventi. Sulla base dei valori di frequenza assegnati ai singoli eventi (per i dettagli si rimanda al lavoro [12]) ed eseguendo le operazioni richieste si è pervenuti ad un valore finale di frequenza per il Top Event (apertura del bocchello del gruppo pompe P-1A/B) pari a  $6.84 \cdot 10^{-6}$  eventi/anno. Tale valore è congruente con quello determinato in precedenza mediante l'albero degli eventi, poiché, mentre nell'albero degli eventi si sono considerati solo gli effetti della vibrazione indotta dal sisma, nell'albero dei guasti sono stati considerati anche gli effetti di alterazione del terreno indotti dal sisma, come pure altre cause indipendenti dal sisma. Va tuttavia osservato che detta congruenza deriva, in buona parte, anche dalla tecnica adottata per attribuire frequenze e probabilità agli eventi dell'albero dei guasti, che sono state poste in relazione con i valori ottenuti dall'albero degli eventi.

## 6. DISCUSSIONE

A prescindere dall'attendibilità dei risultati numerici ottenuti, lo studio svolto ha l'obiettivo di confrontare le tecniche dell'albero dei guasti e dell'albero degli eventi, in modo da evidenziarne pregi e difetti quando vengano applicate alla stima delle frequenze di accadimento di un evento incidentale indotto dal sisma su di un elemento di un impianto chimico.

Un primo aspetto importante evidenziato da questo studio è che lo sviluppo di un'analisi di rischio sismico per un impianto chimico comporta la realizzazione di alberi di dimensioni notevoli, al punto tale da divenire quasi certamente ingestibili se estesi ad un intero impianto. Ciò dà luogo a problemi rilevanti già in fase di costruzione dell'albero, poiché è quasi impossibile visualizzarlo in modo completo, come evidenziato nel presente studio che si riferiva semplicemente all'analisi di un singolo bocchello di una tubazione. Queste difficoltà suggeriscono di effettuare un'analisi preliminare che consenta di selezionare gli eventi incidentali più significativi, per i quali procedere poi alle valutazioni di rischio.

Un secondo aspetto rilevante è rappresentato dal fatto che un'analisi di rischio effettuata mediante gli alberi dei guasti e/o degli eventi, anche in presenza di incertezze sulla quantificazione finale delle frequenze attese per l'evento incidentale, ossia limitata all'aspetto qualitativo della costruzione degli alberi, permette di acquisire importanti informazioni di cui avvalersi, in fase di progettazione, per ridurre il rischio sismico in un impianto chimico. Tra le indicazioni che possono emergere dall'esame degli alberi dei guasti e degli eventi vi sono infatti considerazioni relative all'ubicazione dei vari componenti (strutture, apparecchiature, tubazioni), all'individuazione di elementi chiave il cui cedimento avrebbe conseguenze disastrose ed a cui va quindi garantita una maggiore resistenza meccanica, alla scelta sia del tipo di connessione da impiegare per collegare i tubi ai bocchelli delle apparecchiature, sia del tipo di supporti da utilizzare, ecc.

Un terzo aspetto riguarda la possibilità di individuare con una qualche precisione i più frequenti punti di innesco del meccanismo di guasto che porta all'evento incidentale. Nell'applicazione studiata non è stato possibile evidenziare con sicurezza questi punti di innesco, ma è comunque emerso chiaramente che il maggior peso sui valori di frequenza finale dell'evento incidentale è legato alle sequenze di eventi meno articolate cui corrisponde una minore attenuazione dell'effetto sismico. In altre parole, più complessa è la sequenza di eventi in grado di condurre all'evento incidentale e maggiore è l'attenuazione che si ha su questo effetto.

Per quanto riguarda invece un confronto tra le due tecniche analizzate si è evidenziato come l'albero dei guasti sia particolarmente adatto a fornire informazioni di tipo "qualitativo" poiché consente di indagare con una certa completezza i meccanismi di guasto indotti dal sisma che possono portare all'evento incidentale.

Questa caratteristica dell'albero dei guasti è legata principalmente al fatto che esso (a differenza di quello degli eventi) utilizza cancelli logici AND e OR in grado di esprimere le relazioni esistenti tra gli eventi. Tuttavia, da un punto di vista quantitativo, la frequenza del Top Event viene a dipendere dalla combinazione di un gran numero di valori di frequenza la cui stima risulta molto difficoltosa, limitando l'attendibilità del risultato numerico che si ottiene. L'albero degli eventi, invece, anche se fornisce informazioni meno accurate da un punto di vista qualitativo, sembra garantire una maggiore affidabilità dal punto di vista della quantificazione numerica della frequenza dell'evento incidentale. Infatti, il suo valore viene a dipendere essenzialmente da valori di probabilità attribuiti ai singoli eventi della sequenza e queste probabilità sono di valutazione più semplice (e più intuitiva) rispetto a quelli delle frequenze richieste per la quantificazione dell'albero dei guasti. Il valore finale della frequenza dell'evento incidentale determinato con l'albero degli eventi richiede infatti la stima del solo valore di frequenza dell'evento iniziatore, legato al sisma, di cui possono essere effettuate valutazioni abbastanza attendibili.

## 7. CONCLUSIONI

Tanto la tecnica dell'albero dei guasti che quella dell'albero degli eventi consentono la valutazione delle frequenze di eventi incidentali indotti da un sisma in un impianto chimico. Tuttavia, data la complessità delle possibili interazioni tra i vari componenti tra loro connessi, in entrambi i casi la predisposizione degli alberi risulta molto laboriosa e le ragguardevoli dimensioni che essi raggiungono, anche in casi relativamente semplici, comporta grosse difficoltà pratiche per una loro visualizzazione efficace.

Dal punto di vista qualitativo, la tecnica dell'albero dei guasti sembra offrire dei vantaggi rispetto a quella dell'albero degli eventi, poiché rende più agevole una indagine completa dei meccanismi di danneggiamento e delle loro possibili interazioni. Dal punto di vista quantitativo, invece, essa si dimostra soggetta a notevoli incertezze, poiché la sua applicazione richiede una stima delle frequenze dei numerosi "eventi base", che potrebbe essere affetta da errori significativi. Al contrario, la tecnica dell'albero degli eventi, che richiede la stima di un unico valore di frequenza per l'evento iniziatore, dà luogo ad incertezze minori nella stima finale, poiché i valori di probabilità coinvolti si possono derivare sulla base di considerazioni legate alla disposizione delle apparecchiature ed alle loro caratteristiche. Tale tecnica risulta quindi maggiormente adatta alla valutazione numerica delle frequenze dell'evento incidentale.

I risultati qui ottenuti mettono comunque in evidenza la necessità di maggiori approfondimenti delle problematiche di valutazione delle frequenze degli eventi incidentali innescati da sismi, sia dal punto di vista meramente metodologico, che da quello applicativo, relativo al reperimento di dati affidabili.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] ASCE, Guidelines for seismic evaluation and design of petrochemical facilities, New York, ASCE, 1996.
- [2] G.Parisi, Il rischio sismico. Il quadro normativo italiano e comunitario, VGR2K, Pisa 24-26/10/2000.
- [3] G.Petrangeli, Verifiche sismiche per impianti a rischio di incidente rilevante, VGR 98, Pisa 6-8/10/1998.
- [4] T.Sanò, Criteri di protezione sismica degli impianti, VGR 98, Pisa 6-8/10/1998.
- [5] S.Marsella, Il rischio sismico. Valutazione del danno e protezione di impianti e di elementi non strutturali: rassegna degli indirizzi di ricerca, VGR2K, Pisa 24-26/10/2000.
- [6] G.Petrangeli, La verifica sismica di serbatoi di gas di petrolio liquefatto, VGR2K, Pisa 24-26/10/2000.
- [7] A.Martelli, M.Forni, A.Poggianti, T.Sanò, A.Pugliese, V.Ciampi, D.Addressi, Un caso studio di un sistema di isolamento sismico per un serbatoio di stoccaggio di un gas liquefatto, VGR2K, Pisa 24-26/10/2000.
- [8] V.Ciampi, M.Ciucci, G.Guidi, Sistemi innovativi per la protezione sismica di impianti a rischio di incidente rilevante, VGR2K, Pisa 24-26/10/2000.
- [9] CCPS, Guidelines for chemical process quantitative risk analysis, New York, AIChE, (2000).
- [10] M.K.Lindell, R.W.Perry, Identifying and managing conjoint threats: Earthquake-induced hazardous material releases in the US, Journal of hazardous materials, 50, pp.31-46 (1996).
- [11] G.Zuccaro, Analisi di rischio sismico in una unità industriale, Tesi di laurea in Ingegneria Chimica, Università di Roma "La Sapienza", A.A. 1999-00.
- [12] A.Stamegna, Metodologie per la valutazione del rischio sismico negli impianti chimici, Tesi di laurea in Ingegneria Chimica, Università di Roma "La Sapienza", A.A. 2000-01.