

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria della Sicurezza
Civile e Industriale**



Tesi di Laurea Magistrale

**Rischi industriali indotti da eventi
sismici. Analisi QRA probabilistica ed
interventi di mitigazione.**

*Relatore: Prof. Giuseppe Maschio
Correlatore: Ing. Paolo Mocellin*

Laureando/a: SILVIA GIOFFRE'

Anno Accademico 2017/2018

Sommario

CAPITOLO 1 - Evento NaTech e analisi del rischio	9
1.1 Il concetto <i>NaTech</i>	9
1.1.1 Definizioni	9
1.1.2 La casistica storica	10
1.1.3 Lezioni imparate dagli eventi <i>NaTech</i>	13
1.1.4 Effetto domino	14
1.2 Valutazione del rischio NaTech	15
1.2.1 Definizione generale di rischio	15
1.2.2 Definizione di rischio nel contesto NaTech	18
1.2.3 Metodologie di identificazione e quantificazione del rischio	19
1.2.3.1 HazId – Hazard Identification	20
1.2.3.2 LoPA – Layer of Protection Analysis	20
1.2.3.3 FTA – Fault Tree Analysis e ETA – Event Tree Analysis	22
CAPITOLO 2 - Valutazione della pericolosità sismica	25
2.1 Legge di ricorrenza di Gutenberg-Richter	25
2.2 Ground motion prediction equation - GMPE	26
2.3 Probabilistic seismic hazard assessment – PSHA	29
2.4 Deterministic seismic hazard assessment – DSHA	31
2.5 Il concetto di vulnerabilità sismica	32
CAPITOLO 3 - Spettro di risposta sismica	35
3.1 Definizione di spettro in relazione ai parametri dell'evento sismico	35
3.2 Spettro di risposta elastico – <i>Eurocode 8</i>	36
3.3 Spettro di risposta elastico: Disposizioni NERPH – Standard ASCE 7	39
3.4 Spettro NTC 2008	42
CAPITOLO 4 - Serbatoio di stoccaggio	45
4.1 L'effetto sismico e il parco serbatoi	45
4.2 Caratteristiche di un comune serbatoio di stoccaggio	47
4.3 Caratteristiche del serbatoio per i casi studio	49
CAPITOLO 5 - Metodologia di analisi	51
5.1 Analisi quantitativa del rischio	51
5.2 Top Event ed eventi NaTech sismici	52
5.3 Metodologia FTA e ETA	53
5.4 Implementazione delle misure di prevenzione e mitigazione	55
CAPITOLO 6 - Primo caso studio: FTA e ETA	57
6.1 Albero dei guasti tradizionale	57
6.2 Primo caso studio - a) albero dei guasti con evento sismico, n-pentano	63
6.3 Primo caso studio - b) albero dei guasti con evento sismico, acetato di metile	69
6.4 Primo caso studio - albero degli eventi con evento sismico	74
CAPITOLO 7 - Secondo caso studio: Inserimento di isolamento suolo – serbatoio	83
7.1 Tecnica dell'isolamento sismico	83
7.2 Secondo caso studio a) Albero dei guasti con evento sismico, n-pentano con isolamento serbatoio - suolo	87
7.3 Secondo caso studio – b) Albero dei guasti con evento sismico, acetato di metile con isolamento serbatoio – suolo	92
7.4 Secondo caso studio - albero degli eventi con evento sismico	96
CAPITOLO 8 - Terzo caso studio: Inserimento ancoraggi antisismici HILTI	101
8.1 Presidi antisismici: ancoraggi	101

8.2 Terzo caso studio a) Albero dei guasti con evento sismico, n-pentano con isolamento serbatoio – suolo e ancoraggi antisismici	103
8.3 Terzo caso studio b) Albero dei guasti con evento sismico, acetato di metile con isolamento serbatoio – suolo e ancoraggi antisismici	110
8.4 Terzo caso studio a) – b) albero degli eventi con evento sismico	116
Capitolo 9 - Quarto caso studio: serbatoio sferico pressurizzato	123
9.1 Quarto caso studio: albero dei guasti con sisma	123
9.2 Quarto caso studio: albero degli eventi con sisma	129
9.3 Quarto caso studio: albero dei guasti e degli eventi con isolatori sismici	131
Capitolo 10 - Sloshing	135
10.1 Analisi del fenomeno	135
10.2 Periodo di vibrazione impulsivo e convettivo	136
Conclusioni	141
Appendice: Script Matlab	145
Bibliografia	147

Abstract

Gli eventi catastrofici naturali sono importanti iniziatori di incidenti industriali poiché conducono al rilascio di sostanze pericolose da impianti. Gli incidenti che vengono a svilupparsi a seguito di queste cause vengono denominati eventi *NaTech*, il cui nome ricorda la doppia composizione, naturale e tecnologica. Questi incidenti comportano un incremento del rischio, in quanto la presenza simultanea degli effetti dell'evento naturale contribuisce ad aumentare la probabilità di accadimento di un *Top Event* che si può trasformare in incidente rilevante.

L'obiettivo del presente elaborato è di indagare sui rischi *NaTech* scatenati da fenomeni naturali, in particolare di natura sismica. Sono state considerate l'analisi dell'Albero dei Guasti (*FTA*) e dell'Albero degli Eventi (*ETA*) per poter fare un'analisi quantitativa dei possibili guasti che portano allo sviluppo del *Top Event* e dei vari scenari che possono delinearsi.

Sono stati ricavati dalla letteratura i tassi di guasto meccanico dei vari componenti di un tipico serbatoio industriale, per poter individuare la probabilità di accadimento del *Top Event* preso in considerazione. In seguito, prendendo in considerazione il tempo di vibrazione della struttura, calcolata mediante le disposizioni ASCE, e lo spettro di risposta elastica basato sull'Eurocode 8 è stata calcolata l'accelerazione spettrale S_a , intesa come limite oltre la quale si ha la rottura del serbatoio o di altri componenti.

Combinando accelerazione spettrale, magnitudo e distanza sorgente-sito è stata calcolata la probabilità di accadimento di un sisma che comporterebbe danni alle strutture dell'impianto. Quest'ultimo dato, inserito nell'Albero dei Guasti ha consentito di calcolare la frequenza di accadimento del *Top Event* tenendo in considerazione anche l'influenza del sisma. Il valore ottenuto è stato poi utilizzato per lo sviluppo dell'Albero degli Eventi, in cui si individuano gli scenari possibili. La metodologia appena descritta è stata applicata per serbatoi di stoccaggio di n-pentano e acetato di metile e successivamente, viene svolta l'analisi sugli stessi serbatoi applicando una tecnica di isolamento del suolo e presidi antisismici.

L'analisi mostra come l'implementazione di un serbatoio con presidi antisismici consenta di diminuire la probabilità di accadimento del *Top Event* in alcuni casi anche del 50 %. Stessa metodologia di studio è stata applicata su un serbatoio pressurizzato sferico contenente ammoniaca e Gpl.

In ultimo, è stata affrontata la problematica dei serbatoi soggetti ad un evento sismico che comportano il fenomeno dello “sloshing”, ovvero l’interazione tra fluido e struttura che causa delle deformazioni strutturali e onde di liquido che possono fuori uscire dal contenitore.

Introduzione

Nel marzo 2011, il mondo intero dovette osservare, incredulo, una catastrofe che si realizzò in Giappone. Erano le 14.46 dell'11 marzo, quando un terremoto di magnitudo 8.9 colpì il Giappone settentrionale. L'epicentro era localizzato in mare, a 130 km dalla costa nord orientale di Honsu, l'isola più grande del Giappone, a circa 140 km dalla città di Sendai e 373 km da Tokio. La scossa innescò uno tsunami con onde di oltre dieci metri che colpì la costa. Le zone maggiormente colpite furono quelle di Iwate, Miyage e Fukushima. I morti superarono le 10 mila persone, i dispersi furono ancora maggiori. I danni causati alle infrastrutture furono ingenti. Undici centrali nucleari vennero disattivate automaticamente a causa del sisma. L'impianto di Fukushima Dai-Chi subì i danni maggiori, con rilascio di sostanze radioattive nell'atmosfera e nelle acque terrestri. I pericoli naturali più severi, che hanno già causato eventi *Natech* in passato, sono i terremoti, le alluvioni, le valanghe e le eruzioni vulcaniche e il loro effetto su un impianto industriale può provocare esiti severi e sfociare in effetti domino.

Negli anni passati, sono avvenuti diversi disastri naturali accompagnati da conseguenti danni alle strutture industriali o altre infrastrutture. Le catastrofi naturali creano un rischio che non dipende unicamente dagli effetti diretti su persone e strutture ma comprende anche effetti dovuti a rilasci accidentali di sostanze pericolose stoccate in apparecchiature colpite dagli eventi naturali.

L'esempio poco fa riportato, esplicita chiaramente quale sia il potenziale degli eventi naturali che possono portare allo scoppio di incendi, esplosioni o rilasci di sostanze pericolose in strutture industriali.

Gli incidenti che si generano in queste condizioni sono stati definiti *NaTech* per indicare la doppia composizione naturale e tecnologia (Showalter e Myers, 1994).

L'evento *Natech* è dato da questi effetti tecnologici secondari, causati da eventi naturali che possono causare molteplici conseguenze, come rilasci simultanei di sostanze ricoprendo vaste aree, danneggiamenti delle barriere di contenimento oppure mettendo fuori uso i sistemi di protezione.

Il controllo e la gestione di un incidente *Natech* risulta molto difficile, se non impossibile a meno che non vi sia una corretta pianificazione preliminare dell'attività industriale. Questo è un tema di grande attualità a causa dell'enorme industrializzazione che sta avendo luogo in molti paesi, come il Giappone, a cui si aggiunge una non corretta pianificazione preliminare ed ultimo aspetto, da non dimenticare, i cambiamenti climatici

che non consentono più di prevedere con relativa certezza il clima in una determinata area.

Caratterizzare un evento *Natech* in questo momento storico è una necessità. Negli ultimi anni si è posta sempre maggiore attenzione a questa tipologia di problematiche; sono stati svolti numerosi studi con il fine di evidenziare le caratteristiche principali e per dare una base allo sviluppo di metodi e strategie di gestione specifiche.

Il rischio di incidenti *NaTech* ha iniziato ad essere riconosciuto nella valutazione quantitativa del rischio di impianti industriali nell'ultimo decennio (Young et al., 2004; Cruz and Okada, 2008; Antonioni et al., 2009; Krausmann et al. 2011).

Per prevenire e/o diminuire gli effetti di eventi *NaTech* è necessario un approccio multi-rischio, il quale permetta di identificare le diverse sequenze di accadimenti che, concatenandosi, potrebbero portare all'evento incidentale rilevante. La maggior parte dei tentativi nel campo della valutazione del rischio *NaTech* sono stati incentrati nella valutazione della vulnerabilità delle strutture industriali.

La combinazione tra le catastrofi naturali e gli impianti industriali produce un incremento della frequenza e dell'intensità degli scenari incidentali.

Questo elaborato si incentra sull'analisi degli eventi sismici che potrebbero essere potenzialmente la causa di incidenti industriali, effettuando un'analisi sui metodi di quantificazione del rischio applicati ad infrastrutture sottoposte a grandi eventi rari, analizzando i metodi tradizionali e/o nuove metodologie.

Il nucleo dell'elaborato è stato quello di stimare l'effetto del sisma includendo nell'analisi secondo albero dei guasti e in quello degli eventi. Ciò è stato affrontato effettuando una valutazione del rischio sismico (*SHA, Seismic hazard assessment*), che si occupa di descrivere ed analizzare le caratteristiche fondamentali delle sorgenti sismiche, stimando il livello di intensità di movimento al suolo e la probabilità di accadimento, mediante i parametri di accelerazione di picco del terreno (*PGA*), velocità di picco (*PGV*) e accelerazione spettrale a diversi periodi di vibrazione (S_a).

Nel proseguo dell'elaborato, verranno affrontati i modelli di ricorrenza dei terremoti (legge di Gutenberg-Richter), che saranno usati nella valutazione del rischio sismico probabilistico (*PSHA*) e nella valutazione del rischio deterministico (*DSHA*).

È stato analizzato lo spettro di risposta elastico proveniente da diversi approcci quali: Eurocode 8 (CEN 2004), *NEHRP (Natural Earthquake Hazard Reduction Program)* e codici ASCE (*American Society of CivilEngineers*), NTC08 (Norme Tecniche per le

Costruzioni). Questi approcci si differenziano tra loro per i tempi di ritorno di riferimento e le ordinate spettrali per il calcolo dello spettro di progetto.

L'analisi è stata condotta facendo riferimento a metodologie standard, quali FTA e ETA in cui è stato inserito il rischio sismico, calcolato con l'approccio di valutazione sismica di natura probabilistica che tiene conto di diversi parametri, uno di questi è l'accelerazione di picco al suolo (PGA, *peak ground acceleration*).

In particolare si vuole stimare l'incremento del rischio dovuto dalla presenza di una catastrofe naturale in un'apparecchiatura industriale e provvedere ad eventuali accorgimenti in fase di progettazione per mitigarlo.

CAPITOLO 1

Evento NaTech e analisi del rischio

Questo capitolo ha lo scopo di illustrare il tema dei rischi *NaTech* (*Natural-Technological event*) indotti da catastrofi naturali, in particolare di natura sismica. La materia necessita ancora di molti studi e come primo passo è fondamentale analizzare al meglio gli eventi *NaTech* avvenuti nel passato attraverso l'analisi storica.

Per effettuare un'analisi quantitativa dei pericoli e degli scenari che si possono venire a sviluppare si considerano diverse metodologie standard come l'Albero dei Guasti e l'Albero degli Eventi.

1.1. Il concetto *NaTech*

1.1.1. Definizioni

La prima definizione di evento *NaTech* in letteratura è stata formulata da due ricercatrici americane: un disastro naturale che crea una catastrofica calamità tecnologica (Showaler e Myers, 1992). Questa prima definizione si riferisce a diversi eventi tecnologici quali: la possibile esplosione di una bombola di propano trasportata dalle acque durante un'alluvione, i rilasci di gasolio o altre sostanze infiammabili da serbatoi danneggiati da un terremoto, il mal funzionamento o la rottura della linea elettrica durante uragani che portano a rilasci ed inneschi di sostanze chimiche non più opportunamente refrigerate o agitate.

Altri esempi *NaTech* sono l'inquinamento di aria, suolo e acqua e la conseguente alterazione delle condizioni ambientali e i casi appena citati vengono definiti eventi *NaTech* di tipo "lento", invece tra quelli veloci sono intesi quelli causati dai terremoti, alluvioni e uragani. Spesso il loro intreccio provoca eventi complessi e di difficile previsione.

In generale, nell'opinione pubblica i fenomeni *NaTech* non sembrano essere conosciuti e, di conseguenza di importanza rilevante; questo fatto è principalmente dovuto alla cattiva informazione dei media che, in occasione di eventi catastrofici, accomunano i danni tecnologici a quelli dell'evento naturale. In altre parole, quelle che si rivelano delle conseguenze amplificate dall'evento *NaTech*, vengono accumulate alle conseguenze dell'evento catastrofico. Quando avvengono catastrofi naturali che portano ad ingenti conseguenze anche a impianti industriali, i media non spiegano che le conseguenze potevano essere ridotte o contenute se vi fosse stata una corretta progettazione. Per questo

motivo, non viene resa possibile la presa di coscienza di un fenomeno che sta diventando sempre più rilevante ed è in costante crescita. Prima di riportare qualche evento *NaTech* del passato, è giusto affermare che negli ultimi 30 anni si ha avuto un aumento del numero delle calamità naturali e alcuni studiosi affermano che il cambiamento climatico globale sta determinando un aumento dell'intensità distruttiva di tali fenomeni naturali (Sperling e Szekely, 2005).

1.1.2. La casistica storica

Negli ultimi anni, come precedentemente affermato si è notato l'aumento del numero e della gravità degli eventi *NaTech* in tutto il mondo. Nella Figura 1.1 è stato riportato un grafico che mostra il numero degli incidenti, con cause naturali, accaduti in Europa nel periodo 1980-2009.

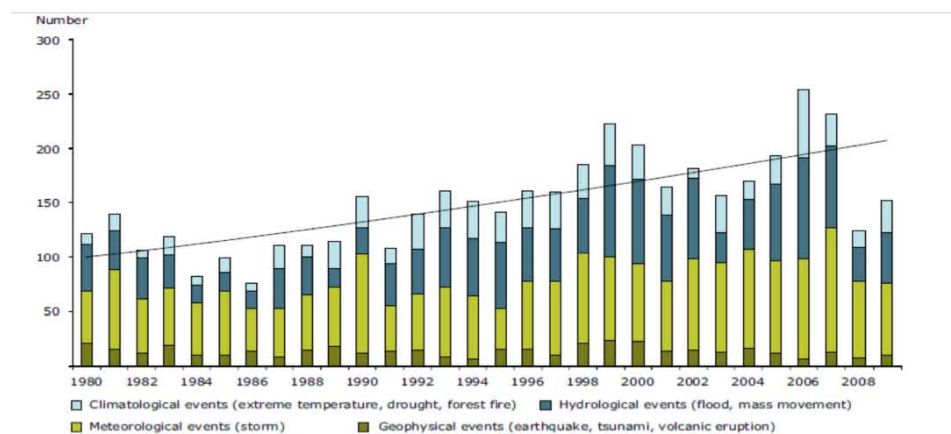


Figura 1.1.2.1: Incidenti per cause naturali in Europa nel periodo 1980-2009

La Banca dati MHIDAS afferma che tra 7109 incidenti accaduti in siti industriali, 215 sono stati causati da eventi naturali, quindi circa il 3%. Sono catalogati nelle cause principali che si dividono in:

- terremoti;
- alluvioni;
- frane;
- forte vento;
- fulmini.

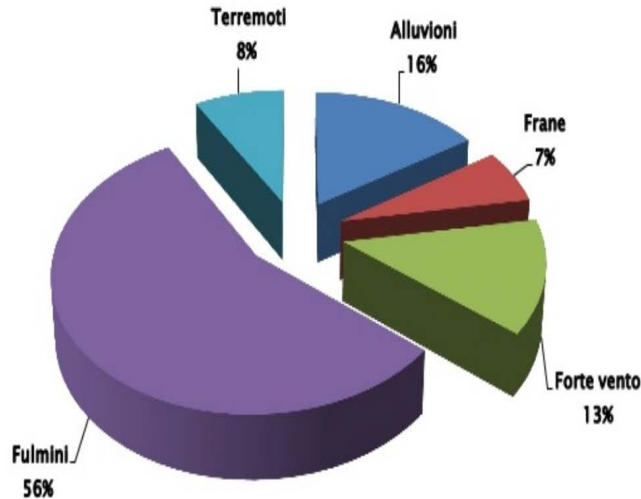


Figura 1.1.2.2: Cause principali degli eventi Natech

La Banca dati MHDAS divide anche le conseguenze degli eventi NaTech nelle varie tipologie:

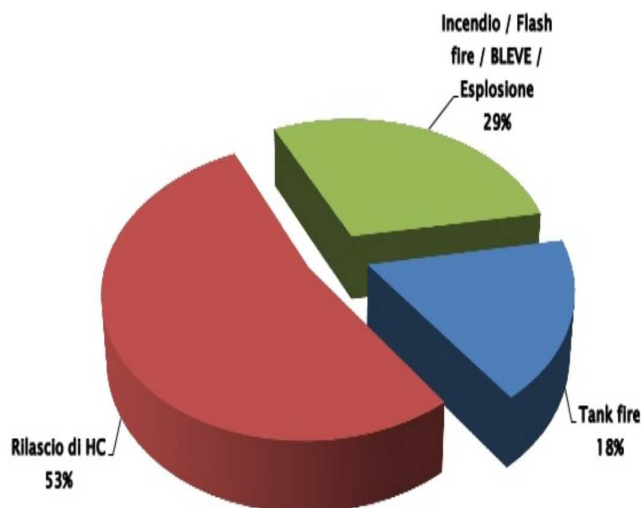


Figura 1.1.2.3: Conseguenze più rilevanti a seguito di eventi Natech. (MHIDAS).

I primi studi su questo rischio emergente si sono basati sugli eventi *NaTech* del passato, in linea con l'analisi del rischio che inizia con il primo step dell'analisi storica.

Tra gli eventi disastrosi più recenti, si possono citare il terremoto nel mar di Marmara del 1999, l'alluvione nell'Europa centrale del 2002 e l'uragano Katrina del 2005, senza dimenticare il già citato maremoto che colpì Fukushima del 2011.

Piogge incessanti di quattro giorni, causarono l'alluvione del 2002 nella Repubblica Ceca, l'altezza dell'acqua raggiunse livelli corrispondenti a un evento meteorologico con periodo di ritorno di 300 anni, mentre le opere di contenimento degli argini erano state progettate per un periodo di ritorno di 100 anni (Danihelka, 2006). Durante l'alluvione

circa quattrocento chilogrammi di cloro furono rilasciati nell'aria dallo stabilimento di Spolana che obbligò all'evacuazione la popolazione e causò ingenti danni ambientali.

Nel terremoto avvenuto in Turchia nel 1999, fu severamente colpito un centro industriale che comportò diversi danni alle strutture industriali, senza dimenticare che causò 17000 morti e oltre 44000 feriti. Il terremoto causò significativi danni strutturali e la distruzione di attrezzature e impianti industriali con lo sviluppo di diversi eventi *NaTech* contemporanei. Vi furono rilasci di 6.500 tonnellate di acrilonitrile da tre su otto serbatoi, presso lo stabilimento di AKSA, causando l'inquinamento di acqua, aria e suolo; l'altro evento degno di nota è stato dato dalle 50 tonnellate di gasolio che vennero rilasciate nella baia di Izmit e gli incendi ed esplosioni dalla raffineria Tupras che furono spenti dopo 5 giorni con aiuti internazionali. Il terremoto causò anche l'interruzione di linee di corrente elettrica, dell'acqua per spegnere gli incendi e frane che non consentivano di raggiungere il centro industriale da parte dei soccorsi. (Steinberg et al., 2001).

Si ricorda l'uragano Katrina che ha colpito New Orleans e vi furono 250 casi di rilasci di materiale tossico tra i quali una quantità pari a 35 milioni di litri di greggio di petrolio.

Con l'espressione *NaTech* ci si può riferire anche all'influenza delle attività antropiche sulle condizioni di pericolosità naturale in un certo territorio. Al giorno d'oggi l'uomo, con la propria attività dettata dai bisogni e dagli interessi, sta modificato il reale assetto del luogo in cui vive, modificando anche le risposte proprie del territorio in caso di eventi naturali catastrofici.

Le attività di antropizzazione del suolo sono:

- attività agricole;
- costruzione di case, ospedali, scuole e delle infrastrutture;
- costruzione di reti di trasporto del suolo;
- costruzione di stabilimenti industriali.

L'agricoltura può portare ad effetti negativi come la deforestazione, utilizzo delle acque sotterranee e della contaminazione di suolo e acqua.

L'ambiente costruito prevede l'insieme delle realizzazioni umane che trasformano l'ambiente natura, rimodellandolo secondo le esigenze umane, che determinano molti effetti negati sull'ambiente come l'alterazione e distruzione dell'habitat per lo sbancamento del terreno, deviazione dei corsi d'acqua sotterranea, prosciugamento delle zone umide e produzione dei rifiuti.

Le conseguenze dell'attività antropica portano a processi di alterazione degli equilibri ambientali che portano l'accentuarsi di effetti catastrofici.

1.1.3. Lezioni imparate dagli eventi *NaTech*

L'analisi storica degli eventi incidentali del passato viene considerata come il primo step dell'analisi del rischio e in assenza di una metodologia standardizzata di valutazione del rischio NaTech, può essere d'aiuto l'elaborazione degli eventi avvenuti in passato per poter apprendere di eventuali errori di progettazione e gestione che hanno aggravato le conseguenze di un evento.

Prendendo come riferimento l'incendio alla raffineria Tupras, in Turchia, di cui è stato precedentemente parlato, è stato possibile ricostruire la successione dell'evento, mezzi e modalità di intervento, le criticità connesse all'azione sismica e le lezioni apprese. I dettagli sono riportati in Tabella 1.1.3.1

Successione eventi	Mezzi e modalità di intervento	Criticità connesse all'azione sismica	Lezione apprese
<ul style="list-style-type: none"> - Primo incendio si è innescato nel magazzino chimico (dimensioni limitate) in seguito al sisma. - Secondo incendio: scoppiò nell'impianto di trasformazione del petrolio greggio. Il terremoto fece crollare una parte dell'impianto causando il danneggiamento dei tubi di collegamento. - Terzo incendio: prese fuoco il serbatoio di nafta che si trovava al centro della raffineria e il fuoco divampò nei serbatoi circostanti. 	<p>Attività di spegnimento: riserva d'acqua in sito contenuta in serbatoi scoperti e a causa dello "sloshing" una quantità significativa fu persa. Furono usate pompe alimentate a diesel a causa della mancanza di energia elettrica ma di capacità insufficiente.</p>	<p>La mancanza di energia elettrica e l'assenza di schiuma che ha la funzione di soffocare le fiamme, ha comportato l'abbandono delle attività di spegnimento e l'ordine di evacuazione in un'area circostante di estensione pari a 5 km.</p>	<p>Dall'analisi è emerso che: il crollo dell'apparecchiatura dell'impianto non è stato causato da errori progettuali, ma a causa di giunti di rinforzo nella zona in cui è avvenuta la rottura. La problematica dello "sloshing" ha distrutto la maggior parte dei tetti dei serbatoi.</p>

Tabella 1.1.3.1: *Elaborazione scheda incendio alla raffineria Tupras*

A questo punto si analizza l'altra conseguenza grave avvenuta in seguito al terremoto ovvero la fuoriuscita di acrilonitrile dalla fabbrica di AKSA.

Successione eventi	Mezzi e modalità di intervento	Criticità connesse all'azione sismica
Danneggiamento di tre serbatoi di stoccaggio di acrilonitrile: tetto e tubazioni. Rilascio di 6500 tonnellate di acrilonitrile nelle dighe di contenimento poste attorno ai serbatoi. Straripamento del liquido e dispersione in atmosfera a seguito di processi evaporativi.	Furono chieste schiume speciali ma risultarono insufficienti. Fu consigliata l'evacuazione che avvenne in ritardo a causa dei problemi di comunicazione. I soccorsi esterni non poterono arrivare a causa dell'ambiente altamente tossico.	L'elettricità non era disponibile, le condotte dell'acqua antincendio inutilizzabili. Il sistema di contenimento contro eventuali sversamenti non operò correttamente a causa del mal funzionamento del sistema di soppressione del vapore. A causa della sua vicinanza ai serbatoi di stoccaggio, non poté essere utilizzato il generatore d'emergenza per il rischio di innesco di atmosfere esplosive. La mancanza di comunicazione aveva impedito ai medici di ricevere informazioni sulle proprietà della sostanza e sui più efficaci interventi sanitari.

Tabella 1.1.3.2: *Elaborazione scheda incendio alla raffineria Aksa*

È stato dimostrato che la mancanza di energia elettrica e l'insufficiente fornitura di acqua sono stati importanti fattori aggravanti in quanto gli impianti di spegnimento e le infrastrutture di risposta all'emergenza erano stati progettati sotto l'ipotesi di funzionamento ottimale solo con disponibilità di alimentazione elettrica. I sistemi di emergenza non erano comunque adeguati all'emergenza, inoltre il personale non era addestrato per la gestione dell'emergenza di un evento *NaTech*.

A tal ragione, è importante introdurre già nella fase di progettazione la previsione delle conseguenze indotte da fenomeni anche poco usuali quali *sloshing*, *buckling*¹, rotture interfaccia fondo-mantello dei serbatoi, cedimenti localizzati del terreno limitrofo ai serbatoi.

1.1.4. Effetto domino

Una delle caratteristiche intrinseche dell'evento *NaTech* è l'aspetto dell'effetto domino, ovvero la propagazione di un singolo evento incidentale che può essere causa di altri. Il rischio dell'effetto domino viene riconosciuto, e la sua importanza viene sottolineata nella Direttiva Seveso III², vi è la necessità di valutare l'effetto domino tra stabilimenti, in particolare in aree industriali ad elevata concentrazione di attività a rischio di incidente

¹ Il fenomeno del "*buckling*" viene definito come il fenomeno dell'instabilità a carico di punta. È causato da azioni sollecitanti di compressione.

² La Direttiva Europea 2012/18/UE e recepimento italiano D.LGS 105/2015.

rilevante. Tuttavia anche la valutazione dell'effetto domino in ogni stabilimento è importante perché rappresenta il completamento dell'analisi di sicurezza dello stabilimento.

Per "effetto domino" si intende in generale un effetto di propagazione di un incidente, a cui è associata un'amplificazione ed un aggravio dei danni causati.

Si è deciso di riportare una sezione contenente questa tematica, in quanto un evento *NaTech* ha la potenzialità di aumentare le conseguenze e facilitare l'effetto domino.

L'analisi dell'effetto domino all'interno dello stabilimento può rappresentare il completamento dell'analisi di sicurezza dell'impianto, ma come si evince dalla sezione 1.2, le conseguenze di un incidente industriale possono essere amplificate anche a causa di una non idonea progettazione dei sistemi di spegnimento o di un'interruzione delle linee elettriche.

Un aspetto degno di nota, anch'esso legato all'evento *NaTech* e all'effetto domino è il concetto di vulnerabilità ed in particolare di vulnerabilità strutturale, intesa come capacità di fronteggiare i danni e di recuperare funzionalità a seguito di un evento *NaTech* (Watts et al., 1993).

Un serbatoio, silos o barriera di contenimento con una alta vulnerabilità, a causa di materiali non idonei, di una realizzazione non a regola d'arte o per altri motivi, soggetto ad un evento *NaTech* subirà conseguenze maggiori, incrementando di fatto l'eventualità di un effetto domino.

A questo punto, è possibile affermare che gli incidenti *NaTech* sono tipici eventi a cascata (o domino) nei quali la causa di origine naturale, innesca una serie di incidenti che amplificano gli effetti dell'evento naturale. Appare chiaro, come sia necessario un approccio *multi-risk* per poter affrontare l'analisi di tutte queste tematiche, per comprendere tutti gli scenari in ordine di priorità e per analizzare le cause e le conseguenze in modo complessivo.

1.2. Valutazione del rischio NaTech

1.2.1. Definizione generale di rischio

Una valutazione del rischio su uno stabilimento o un sito industriale a rischio di incidente rilevante, come previsto dalla Direttiva Seveso III e recepita in Italia con il decreto legislativo del 26 giugno 2015, prevede i seguenti passaggi:

- determinazione delle caratteristiche dello scenario di danno interno al perimetro dell'attività in funzione dei fattori di frequenza, probabilità e stima delle dimensioni; si intende considerare un evento e le sue conseguenze associando la probabilità di accadimento, ovvero stimare la probabilità che sia raggiunto il livello potenziale di danno considerando anche il layout dello stabilimento.
- valutazione degli effetti (danni) agli impianti ed alle strutture.

La combinazione della probabilità di un evento indesiderato e della severità delle sue possibili conseguenze è data dall'equazione (1.2):

$$R = P \cdot M^{\alpha} \quad (1.2)$$

essendo:

- R = indice di rischio;
- P = probabilità dell'evento iniziatore (incidente);
- M = gravità delle conseguenze dell'evento (nessun danno materiale, danni materiali, feriti, morti);
- α = fattore di peso delle conseguenze (in funzione della percezione sociale della gravità dell'evento).

Il concetto di rischio viene illustrato nella Figura 1.2.1.2, in cui merita un approfondimento il concetto di rischio accettabile e non accettabile. Nella valutazione del rischio per poter identificare i livelli di rischio bisogna in primo luogo associare sia a magnitudo che probabilità dei valori che variano da 1 a 4 e incrociandoli tra loro si è in grado di costruire la matrice del rischio.

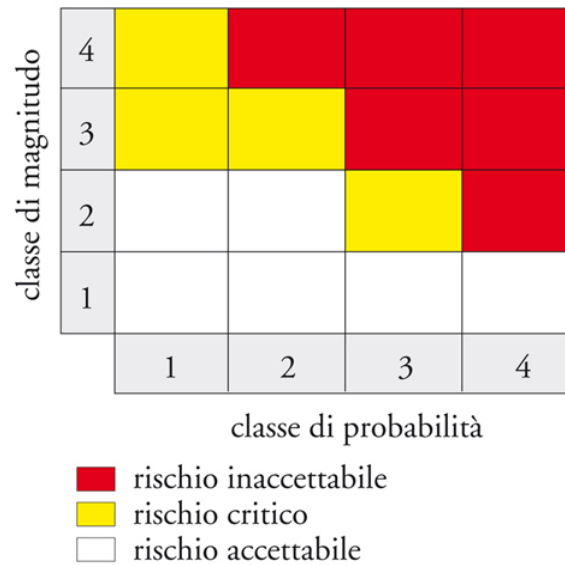


Figura 1.2.1.1: *Illustrazione grafica delle classi di rischio*

Vengono quindi individuati i seguenti parametri:

- rischio accettabile (livello medio-basso o basso) comporta danni fisici di lieve entità o soltanto danni economici;
- rischio tollerabile (livello medio) danni fisici di entità grave, anche potenzialmente mortale;
- rischio inaccettabile (livello alto o medio-alto) probabilità non trascurabile di eventi mortali o danni all'ambiente.

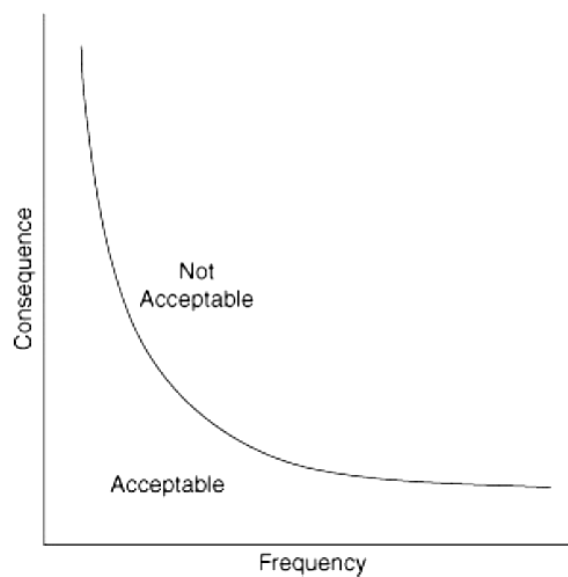


Figura 1.2.1.2: *Illustrazione grafica del concetto di rischio in funzione della frequenza dell'evento e dell'impatto atteso.*

1.2.2. Definizione di rischio nel contesto NaTech

Il rischio associato ad un evento incidentale derivante da “cause naturali” (*NaTech*), quali il sisma deve tener conto anche:

- della probabilità associata al verificarsi dell’evento naturale di determinata intensità (P);
- della propensione delle apparecchiature/tubazioni a subire danneggiamenti (Vulnerabilità V);
- dell’estensione dei danni con particolare riferimento al numero di persone, beni, infrastrutture servizi potenzialmente coinvolti dagli effetti degli eventi incidentali (Esposizione E).

A tal scopo, l’equazione (1.3) fornisce la relazione concettuale tra queste grandezze:

$$\text{Rischio } NaTech = f(P \cdot E \cdot V) \quad (1.3)$$

Tenendo sempre in considerazione come causa naturale il sisma, una delle metodologie utilizzate è quella della probabilità di eccedenza, ovvero che un dato valore di PGA (accelerazione di picco) superi uno specifico valore di soglia in un intervallo di tempo (normalmente 50 anni, ma comunque arbitrario). Per le apparecchiature critiche si stima la probabilità associata ad una determinata tipologia di danno (lieve, moderato, grave, catastrofico) per ciascun valore di *PGA* di riferimento e si procede con la stima delle conseguenze associate a ciascuna tipologia di danno.

Si procede poi con l’identificazione di tutte le combinazioni credibili di eventi (contemporaneità di eventi, compresi effetti domino) e stima delle relative frequenze di accadimento.

Stima delle conseguenze di tutte le combinazioni credibili di eventi e valutazione della Vulnerabilità, per poi concludere con la valutazione del rischio.

Ad oggi, nella maggior parte delle industrie non viene effettuata l’analisi del rischio *NaTech* nella valutazione del rischio industriale.

L’analisi degli incidenti avvenuti in passato dev’essere uno dei punti principali e di partenza dell’analisi per poter individuare le cause, l’evoluzione e le possibili conseguenze di un evento *NaTech*. L’analisi storica rappresenta anche un efficace

strumento di prevenzione e di stimolo per l'approfondimento degli eventi avversi plausibili e dei rimedi adottabili.

In tal senso, lo scopo è quello di creare una *checklist* di misure da adottare per ridurre la vulnerabilità delle strutture e limitare l'entità del danno.

La valutazione del rischio viene completata da metodologie quantitative quali:

- analisi tramite albero dei guasti (FTA – *Fault Tree Analysis*);
- analisi secondo albero degli eventi (ETA – *Event Tree Analysis*).

Queste due analisi verranno dettagliate in seguito.

1.2.3. Metodologie di identificazione e quantificazione del rischio

I metodi per la valutazione quantitativa del rischio di incidente rilevante si basano su diverse fasi, comprendenti:

- individuazione dei possibili scenari incidentali;
- determinazione delle frequenze degli scenari incidentali;
- determinazione dell'intensità degli effetti e delle gravità delle conseguenze;
- individuazione delle possibili cause che portano ai differenti scenari;
- ricomposizione delle informazioni in forma di indici rischio.

Il rischio industriale viene determinato utilizzando l'analisi quantitativa del rischio (QRA, *Quantitative Risk Analysis*) oppure quella secondo i gusci di protezione (LOPA, *Layer of Protection Analysis*).

La valutazione quantitativa di rischio o *Quantitative Risk Analysis* (QRA) prevede diverse metodologie utili a descrivere e a quantificare il rischio ed è una stima del livello di rischio mediante una valutazione della frequenza attesa e della gravità degli eventi critici. Questa analisi è uno strumento per la selezione degli eventi più critici, che poi potranno essere approfonditi conducendo una successiva analisi quantitativa.

L'analisi quantitativa del rischio è uno strumento a supporto dell'ottimizzazione delle risorse impiegate per la sicurezza di un determinato sistema che consente, in particolare di:

- scegliere l'intervento di mitigazione più efficace ovvero caratterizzato da un ottimale rapporto costo-beneficio;
- definire l'entità di risorse disponibili da investire sulla specifica infrastruttura.

La valutazione del rischio viene svolta tramite procedure analitiche che consentono di identificare le relazioni funzionali (causa-effetto) esistenti tra l'evento considerato e le conseguenze.

Tale procedura si avvale di diverse metodologie quantitative e qualitative. Tra queste ultime, figurano principalmente le seguenti:

- Albero dei guasti (*Fault Tree Analysis* – FTA);
- Albero degli eventi (*Event Tree Analysis* – ETA)

1.2.3.2 HazId – Hazard Identification

La tecnica di identificazione del pericolo (*HazId*) è una tecnica qualitativa per l'identificazione precoce di potenziali pericoli e minacce che colpiscono persone, ambiente e beni. Ha l'obiettivo di identificare i potenziali rischi e ridurre la probabilità e le conseguenze di un incidente nel sito che avrebbe un impatto negativo sull'impianto. Questa metodologia viene svolta con una combinazione di identificazione, analisi e *brainstorming*, al fine di evidenziare e identificare possibili effetti potenzialmente pericolosi. La tecnica di identificazione del pericolo ha i seguenti vantaggi:

- identificare gli scenari
- consentire la pianificazione della fase progettuale
- individuare punti di fallimento del sistema nella fase iniziali
- individuazione dei pericoli in ciascuna apparecchiatura.

1.2.3.1 LoPA – Layer of Protection Analysis

Si passa a questo punto ad analizzare l'analisi semi-quantitativa *Layer of Protection Analysis* (LOPA), che è una tecnica di valutazione e gestione dei rischi, che permette di fornire una valutazione semi-quantitativa più dettagliata dei rischi e degli strati di protezione associati agli scenari di pericolo.

L'utilizzo della tecnica *Layer of Protection Analysis* è stata introdotta nell'industria di processo chimici alla fine degli anni '90 per determinare il livello di integrità della sicurezza richiesto (*SIL*) rispetto al livello strumentale di sicurezza del sistema (*SIS*) che rispettivamente rappresentano l'obiettivo da raggiungere in materia di sicurezza (*SIL*), invece *SIS* rappresenta un sistema strumentale utilizzato per implementare una o più funzioni di sicurezza. Questa metodologia viene utilizzata per comprendere come una

deviazione del processo possa portare a conseguenze pericolose. Dal punto di vista concettuale, LOPA consiste nell'introdurre diversi livelli di protezione per poter ridurre la frequenza di sviluppo di conseguenze indesiderate.

Lo scopo principale di LOPA è quello di identificare le contromisure disponibili contro le potenziali conseguenze di un particolare rischio. Partendo dalla quantificazione della probabilità di un particolare pericolo, lo studio analizza il sistema e identifica, utilizzando un approccio quantitativo, le misure di mitigazione contro il rischio oggetto di studio. Le contromisure o "Strati protettivi" devono essere indipendenti per essere efficaci, nel senso che il fallimento di uno *Layers of Protection* non deve comportare il fallimento "a catena" degli altri sistemi di mitigazione del rischio.

Come *Layers of Protection* vengono definiti una serie indipendente di elementi relativi alla progettazione e alla manutenzione del processo, per esempio:

- processo (design intrinsecamente maggiormente sicuro);
- azione di allarme/ operatore;
- azione automatica;
- protezione attiva / passiva;
- risposta di emergenza dell'impianto;
- procedura di emergenza dell'impianto.

Lo sviluppo di LOPA, come molte altre analisi di valutazione del rischio, è costituito da una serie di fasi.

I passaggi fondamentali per la valutazione del rischio LOPA sono i seguenti e distinti in Figura 1.2.3 genere:

1. identificazione delle conseguenze;
2. definizione dei criteri di tolleranza al rischio;
3. definizione dello scenario di incidente rilevante;
4. determinazione della frequenza dell'evento iniziante;
5. identificazione delle condizioni e i modificatori condizionali ovvero gli elementi che possono modificare le condizioni di analisi di un possibile scenario
6. stima della frequenza intermedia delle conseguenze non attenuate;
7. stimare della probabilità di fallimento su richiesta per ciascun livello;
8. determinazione della frequenza della conseguenza attenuata;
9. valutazione della necessità di ulteriori strati di protezione.

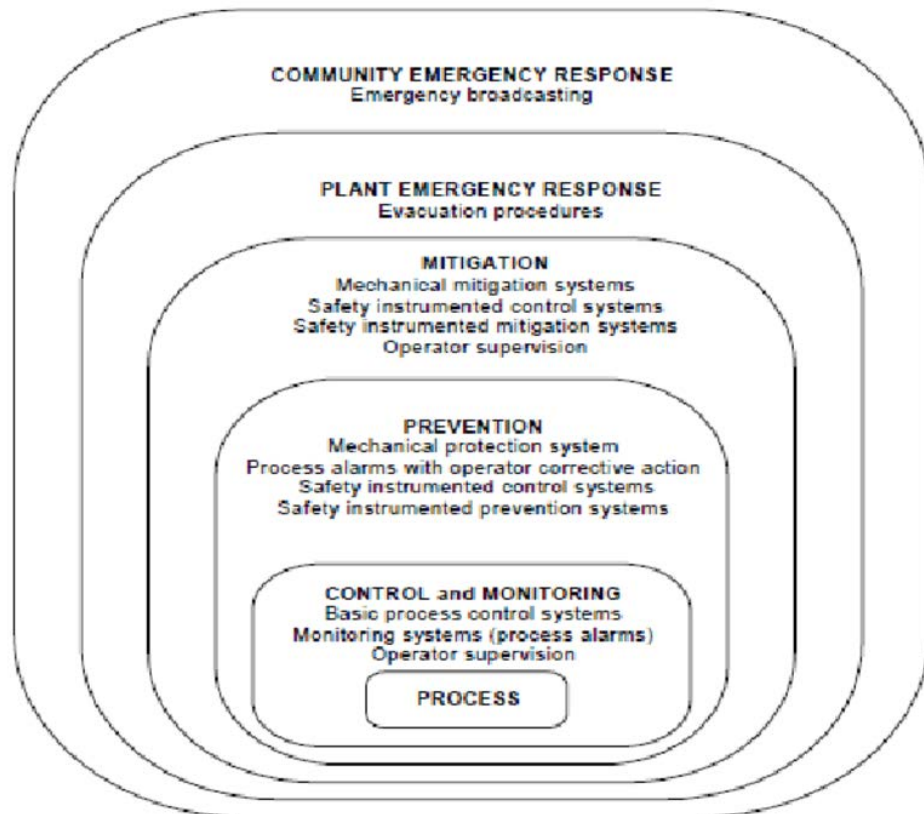


Figura 1.2.3.2: Schematizzazione concettuale dell'analisi LOPA – Layer of Protection Analysis.

1.2.3.3 FTA – Fault Tree Analysis e ETA – Event Tree Analysis

Una delle metodologie utilizzate nell'analisi quantitativa di rischio è *Fault Tree Analysis* (FTA), che è una tecnica quantitativa deduttiva che consente, partendo da un'analisi generale complessiva del tipo di guasto (o evento indesiderato) sul sistema, consente di individuare i guasti imputabili ai suoi componenti. Alla base di questa analisi, si ha un evento accidentale che è la conseguenza di uno o più eventi casuali di guasti e/o di errori umani e/o di fenomeni esterni.

L'analisi FTA permette quindi, in modo grafico e logico, di collegare fra loro i guasti dei componenti di un sistema. Lo scopo principale è partire da un guasto sul sistema (evento indesiderato) e metterlo in relazione funzionale con i guasti sui componenti (evento base) mediante delle porte logiche OR e AND.

L'operatore AND prevede che il verificarsi del *Top Event* sia determinato da verificarsi di tutti gli eventi sottostanti simultaneamente, invece la porta OR prevede che sia almeno uno degli eventi intermedi a verificarsi per determinare il *Top Event*.

Un evento base è anche primario quando non necessita di ulteriori indagini sulle cause determinanti. Gli eventi intermedi, invece, sono causati da combinazione degli eventi base.

L'evento indesiderato o *Top Event*, rappresenta il guasto relativo al sistema funzionale sotto esame e il suo accadimento è legato alla combinazione di diverse cause. Un certo numero di eventi ne determina le cause mentre nessun evento lo segue, essendo all'apice dell'evoluzione incidentale.

È causato da eventi intermedi e base legati a cause operative (guasti primari), cause esterne ovvero in situazioni di anomalie (guasti secondari) e guasti di comando causati da errori umani.

Una tipica rappresentazione grafica di un albero dei guasti, con i principali elementi costruttivi, è fornita in Figura 1.5.3.

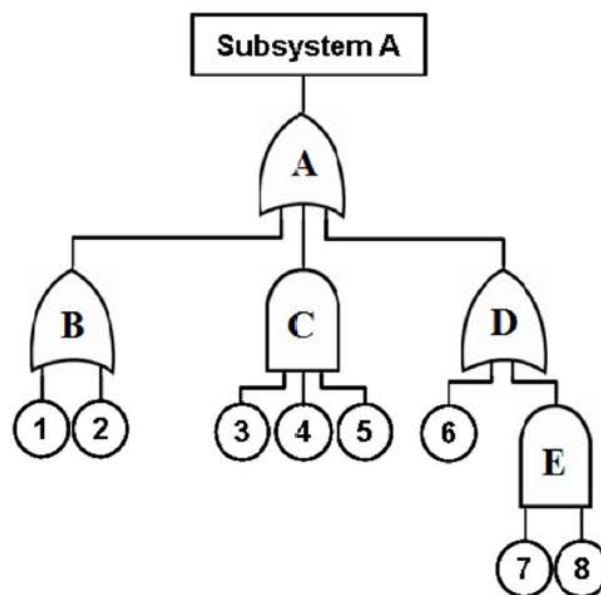


Figura 1.2.3.3: Esempio di un albero di guasti.

Oltre all'analisi secondo albero dei guasti, si ha anche la metodologia secondo albero degli eventi, *Event Tree Analysis* (ETA), il cui processo logico è l'inverso a quello di quello secondo albero dei guasti. Si ipotizza che si sia verificato un determinato evento (evento iniziatore) e sono indagate tutte le possibili diramazioni evolutive, a seconda che intervengano i diversi gradi di protezione o che vi siano particolari condizioni esterne che

comportino delle conseguenze. La Figura 1.5.4 dà rappresentazione di un albero degli eventi.

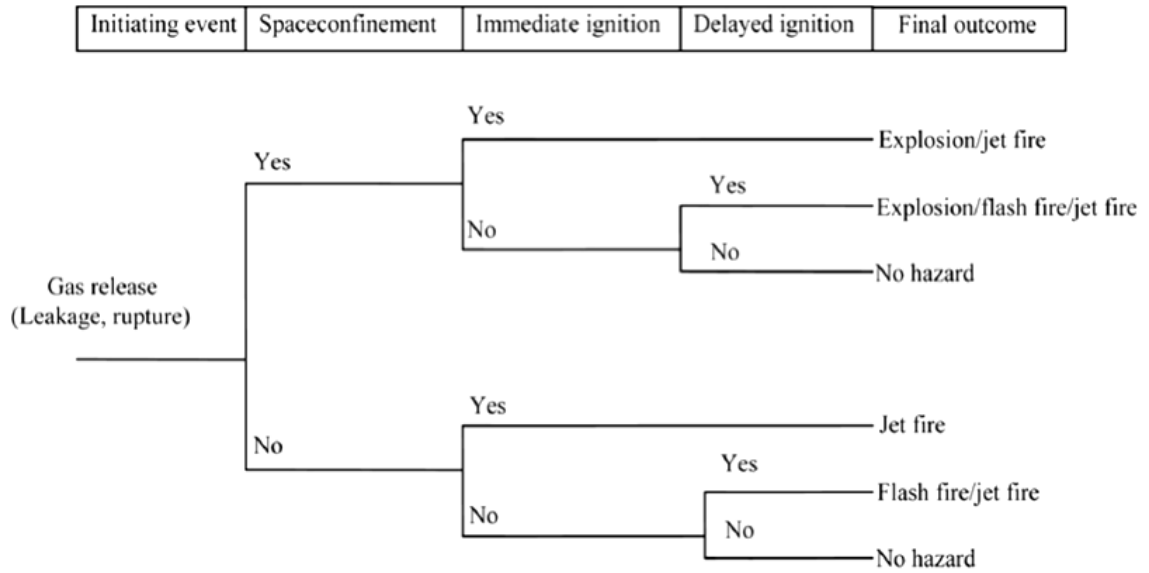


Figura 1.2.3.4: Esempio di albero degli eventi.

CAPITOLO 2

Valutazione della pericolosità sismica

Il rischio sismico è un indicatore, frutto di un'analisi matematico-ingegneristica, che permette di valutare gli effetti in termini di danni che un evento sismico può causare in una determinata area.

L'analisi di pericolosità sismica consente di individuare il periodo di ritorno di eventi sismici di diversa intensità in un dato sito. L'analisi viene svolta in modo probabilistico (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis-PSHA*), individuando uno o più parametri rappresentativi del moto del suolo associati alla probabilità di superamento. I parametri più significativi, che sono stati utilizzati sono: l'accelerazione di picco del terreno (*PGA*), la velocità di picco del terreno (*PGV*) e l'accelerazione spettrale a diversi periodi di vibrazione (S_a).

Nella valutazione probabilistica del rischio sismico probabilistico verrà utilizzato il modello di ricorrenza dei terremoti e la valutazione del rischio deterministico (*DSHA, deterministic seismic hazard analysis*).

2.1 Legge di ricorrenza di Gutenberg-Richter

L'approccio probabilistico, chiamato *Probabilistic seismic hazard analysis (PSHA)*, è basato sul modello di ricorrenza. Tra questi, largamente utilizzata è la legge statistica di *Gutenberg-Richter* (eq. 2.1) che fornisce la frequenza di un certo sisma (numero di terremoti in un anno) in relazione alla loro magnitudo:

$$\log_{10} v_m = a - b \cdot m \quad (2.1)$$

dove:

v_m = frequenza dei terremoti con magnitudo almeno pari ad un valore m preso come soglia (eventi/periodo di tempo);

m = magnitudo del terremoto;

a, b = costanti definite dal trattamento statistico dei dati provenienti dalle registrazioni dei terremoti passati.

L'equazione (2.1) invertita consente di individuare il valore della frequenza ovvero:

$$v_m = 10^{a-b \cdot m} \quad (2.2)$$

L'equazione (2.2) prevede un andamento di potenza per il calcolo della probabilità dei tassi di superamento medi annui di terremoti nell'area di studio. I parametri indicano:

a = il numero medio annuale media di eventi con magnitudo superiore a quella di soglia che viene stabilita mediante un'analisi probabilistica e che permette di descrivere il tasso minimo di attività sismica nell'area di studio. L'attività sismica è direttamente proporzionale al valore di a .

b = rappresenta il rapporto tra eventi di piccola e grande magnitudo.

Congiuntamente alla legge di Gutenberg-Richter, l'approccio probabilistico si basa sulla legge statistica di distribuzione di Poisson per gli eventi rari. La distribuzione di Poisson considera eventi tra loro indipendenti e quindi viene considerata la possibilità che questi possano accadere anche ravvicinati, inoltre l'inverso della frequenza è pari a al tempo di ritorno di un terremoto con una determinata magnitudo.

La probabilità dipende dall'intervallo di tempo di riferimento in cui è noto il numero medio di accadimenti dell'evento casuale, anche se lo studio della sismologia afferma che il verificarsi di terremoti non è indipendente l'uno dall'altro. Tuttavia la stazionarietà e la mancanza di memoria tra gli eventi che sono avvenuti consente di utilizzare la distribuzione di Poisson per lo studio dei terremoti.

Considerato un evento sismico e utilizzando la distribuzione di Poisson, con tasso medio di superamento di eventi a magnitudo superiori a m^* , $v_m(M > m^*)$, la probabilità di osservare n eventi con magnitudo superiore a m^* , nell'intervallo di tempo t considerato (pari al tempo tipico di vita di una struttura industriale), ovvero di 50 anni, si ottiene la seguente distribuzione di Poisson che vale (2.3):

$$P(M > m^*) = \frac{\exp(-t \cdot v_m(M > m^*)) \cdot (t \cdot v_m(M > m^*))^n}{n!} \quad (2.3)$$

Da evidenziare, per la trattazione della PSHA, è il calcolo probabilistico dell'accadimento di almeno un evento sismico con magnitudo superiore al valore soglia m^* considerato. La probabilità viene quantificata con l'equazione (2.4):

$$P(M > m^*) = 1 - \exp(-t \cdot v_m(M > m^*)) \quad (2.4)$$

2.2 Ground motion prediction equation - GMPE

Le equazioni di previsione del movimento del suolo (GMPE), chiamate anche modelli di moto del suolo (GMM), stimano lo scuotimento del terreno che si può verificare se avviene un terremoto di una certa intensità in luogo vicino. Le equazioni di previsione sono fondamentali per l'ingegneria sismica in quanto vengono utilizzate per valutare il rischio sismico, fornendo una stima del carico che una struttura potrebbe subire durante un terremoto.

Le equazioni di previsione (GMPE) consentono di stimare parametri, in una certa area considerata, necessari all'analisi come il picco di accelerazione al suolo (*PGA*), il picco di velocità al suolo (*PGV*) e le ordinate spettrali (S_a) utilizzando in input variabili quali la magnitudo (M), la distanza sorgente-sito (R), la classe del sito (SC) e la tipologia di faglia (SoF).

La funzione GMPE utilizzata assume un andamento esponenziale data dall'equazione (2.5):

$$Y = \exp[f(M) \cdot f(R) \cdot f(SC) \cdot f(SoF)] \quad (2.5)$$

I modelli di previsione di movimento del suolo sono stati sviluppati su base statistica di dati empirici di movimento del terreno.

I modelli GMPE prevedono, in generale, un'equazione generica per il calcolo del movimento del suolo che combina gli effetti di $f(M)$, $f(R)$, $f(SC)$ e $f(SoF)$, tenendo in considerazione anche μ che rappresenta la media logaritmica di $\ln(Y)$, $\sigma_{\ln y}$ che indica la deviazione standard di $\ln(Y)$ e ε che rappresenta la variabilità osservata in $\ln(Y)$. Queste variabili vengono definite nell'equazione (2.6):

$$\ln(Y) = \theta(M, R, SC, SoF) + \varepsilon \cdot \sigma_{\ln y} \quad (2.6)$$

Dato che il logaritmo di una variabile log-normale segue una distribuzione normale, la probabilità di superamento di Y è calcolata dalla funzione di densità di probabilità normale con l'equazione (2.7):

$$P(M > m^*) = \int_y^{\infty} \frac{1}{\sigma_{\ln Y} \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\ln(y) - \mu}{\sigma_{\ln Y}} \right)^2 \right] y \geq 0 \quad (2.7)$$

Quando ε ha un valore pari 0, si ha il 50 % di probabilità di superamento della soglia e per questo motivo viene definita nel capitolo successivo come “curva mediana”. Con il valore di ε pari a 1 la probabilità di superamento è pari circa al 16 %. Quanto appena affermato si può notare nella figura 2.1.

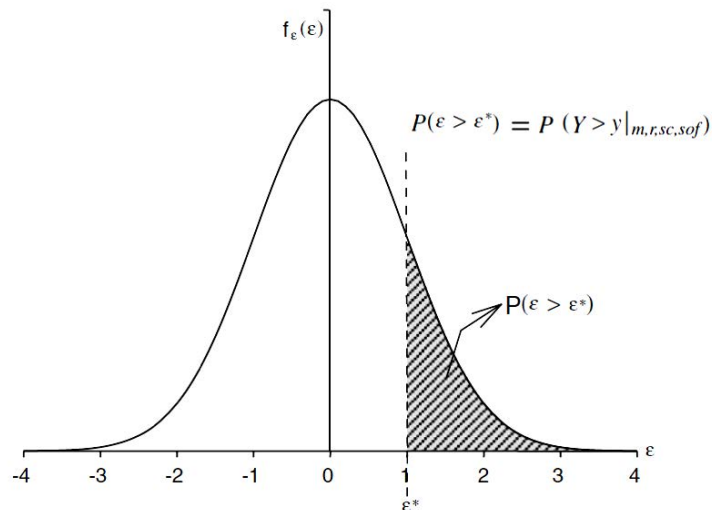


Figura 2.2.1: *Distribuzione normale di probabilità di ε alla base della stima della probabilità di superamento in GMPE.*

Per la stima del PGA si utilizza un modello di previsione basato sui valori di PGA individuati in una determinata area con terreno rigido. Dalla Figura 2.2 si ottengono, a partire da diversi accelerogrammi di movimento di magnitudo compresi tra 6.0 e 7.0, il valore desiderato. Va osservato come il valore di PGA varia in funzione delle distanze. Le curve tratteggiate mostrano le stime di $PGA (R \pm \sigma)$. La probabilità di superamento del valore di PGA stimato è del 16% per la curva $PGA (R + \sigma)$, mentre la probabilità è dell'84% per la curva $GA (R - \sigma)$.

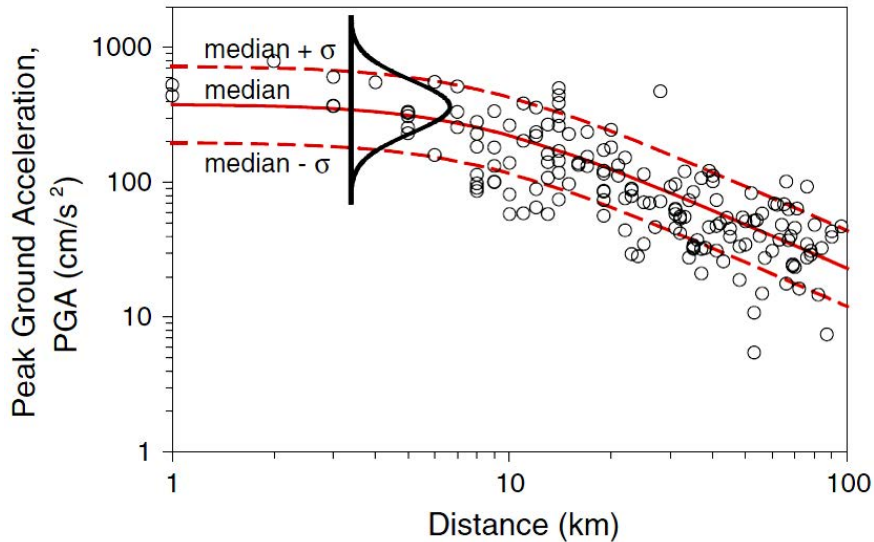


Figura 2.2.2: Curve mediana e mediana \pm sigma del PGA. I punti di dispersione sono i valori PGA del sito rigido osservati tali che $6.0 < M < 7.0$.

Un'altra formulazione di GMPE è data dalla formula:

$$\log y = a + b \cdot M + c \cdot \log(R^2 + h^2)^{\frac{1}{2}} + e_1 \cdot S_1 + e_2 \cdot S_2 \mp \sigma \quad (2.8)$$

dove:

- y: misura del moto sismico del suolo (il valore di *PGA*, *PGV*, oppure dell'ordinata dello spettro di risposta per un prefissato valore del periodo proprio);
- M: magnitudo;
- R: distanza sorgente-sito;
- H: termine di correlazione con la profondità dell'ipocentro;
- S_1, S_2 : variabile logica che può valere 0 o 1, in funzione delle condizioni di sito (0 per siti rocciosi o rigidi, 1 per depositi alluvionali);
- a, b, c, e_1, e_2 : coefficienti numerici determinati mediante analisi di regressione
- σ = scarto dell'errore residuo.

2.3 Probabilistic seismic hazard assessment – PSHA

Nella procedura di Probabilistic Seismic Hazard Assessment (PSHA), le probabilità vengono associate al verificarsi di ogni possibile scenario sismico caratterizzato da una propria magnitudo e distanza al fine di valutare la pericolosità sismica di un'area. I livelli di movimento del suolo sono determinati da un intervallo di ampiezza $-\sigma$ e $+\sigma$ rispetto

al valore mediano al suolo. La PSHA consente di calcolare la frequenza annuale relativa ad un determinato parametro del sisma rispetto ad un valore di soglia.

Il tasso medio di superamento può essere considerato come una probabilità per un tempo di esposizione ipotizzando che i parametri seguano la distribuzione di Poisson, ovvero che un evento, in un determinato intervallo di tempo possa verificarsi più volte. Dato un terremoto, il calcolo del tasso medio annuo γ di intensità Y che supera un livello di soglia y si può calcolare con l'equazione (2.9):

$$\gamma(Y > y) = v_m(M > m_{min}) \int_{m_{min}}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} f_M(m) \cdot f_R(r) \cdot P(Y > y_{m,r}) dm dr \quad (2.9)$$

con v_m tasso medio annuo di superamento del valore di magnitudo (m_{min}).

La funzione di densità di probabilità della ricorrenza del terremoto e quella relativa alla distanza tra sorgente e sito sono descritte rispettivamente da $f_M(m)$ e $f_R(r)$.

Il termine $P(Y > y_{m,r})$ determina la variabilità dell'intensità del moto al suolo di riferimento, le cui caratteristiche, quali le condizioni del terreno del sito del progetto e la tipologia di sorgente sismica, sono mantenute costanti. L'equazione (2.9) viene discretizzata considerando l'incidenza di un certo numero n_s di sorgenti attive nel determinare il sisma nell'area di interesse così come espresso nella (2.10):

$$\gamma(Y > y) = \sum_{i=1}^{n_s} v_{mi}(M_i > m_{min}) \sum_{j=1}^{n_m} \sum_{k=1}^{n_r} P(Y > y_{m,r}) \cdot P(M = m_j) \cdot P(R = r_k) \quad (2.10)$$

Dal punto di vista operativo, la metodologia per l'analisi probabilistica del rischio sismico si divide in quattro fasi:

1. sviluppo di possibili scenari aventi causa il sisma oggetto dello studio, tenendo in considerazione l'attività sismica della sorgente nell'area in questione. Segue l'individuazione della magnitudo minima e massima che consente di individuare un range di magnitudo di riferimento.
2. calcolo della probabilità degli scenari discreti di magnitudo, $P(M=m_j)$. Viene stimata la lunghezza della rottura (l_{rup}) con l'equazione (2.11):

$$\log_{10}(l_{rup}) = a + b \cdot Mw \quad (2.11)$$

3. Per calcolare il tasso medio di eccedenza annuale $\gamma(Y > y)$ viene usato il contributo di ogni possibile combinazione di distanza sorgente-sito e successivamente viene calcolato il tasso medio annuale che supera il valore di soglia, come nell'eq. (2.12):

$$\gamma(Y > y) = \sum_{i=1}^{n_s} \gamma_i(Y > y) \quad (2.12)$$

4. Al fine di costruire la “curva di pericolosità” questo procedimento si itera per i diversi valori di soglia.

La curva di pericolosità è fondamentale per la progettazione perché consente di descrivere i diversi livelli di movimento del terreno per diversi tassi di eccedenza annuale.

2.4 Deterministic seismic hazard assessment – DSHA

La metodologia di *Deterministic Seismic Hazard Assessment (DSHA)* può essere considerata una situazione particolare dell'analisi probabilistica (PSHA), in quanto prevede come ipotesi di partenza un particolare scenario, considerato costante per il sisma considerato. Viene analizzato il massimo movimento al suolo generato dal terremoto di riferimento nell'area di studio, che è il terremoto di controllo e che va a determinare il pericolo sismico di progetto. Questo parametro di massima viene usato sia per la progettazione sia per la valutazione delle prestazioni sismiche delle strutture.

L'analisi deterministica del rischio sismico associa il livello di controllo del terremoto alla mediana ($\varepsilon=0$) o alla mediana sommata alla deviazione standard ($\varepsilon=1$). La metodologia DSHA si basa sullo scenario del terremoto di controllo e per questo motivo non viene considerato il periodo di ritorno in quanto non viene fornita nessuna probabilità di occorrenza del terremoto essendo esso assunto come evento certo.

La metodologia *DSHA* si divide in quattro fasi:

1. individuazione della sorgente sismica con relative informazioni sulla natura della faglia e sul valore di magnitudo massima attesa;
2. determinazione della distanza tra la sorgente e il sito;
3. stima del movimento al suolo sulla base delle equazioni di previsioni del suolo GMPE;

4. analisi dei valori ottenuti dei parametri di movimento del suolo. Scelta di quello rappresentativo da utilizzare nella valutazione delle prestazioni sismiche delle strutture.

Lo scenario è rappresentativo del terremoto di controllo preso come riferimento per la progettazione. Se si sceglie il movimento al suolo corrispondente alla mediana, il movimento al suolo ha il 50% di possibilità di superamento. Qualora si considerasse la mediana sommata alla deviazione standard, si avrebbe il 16% di possibilità di superamento, a condizione che l'evento di controllo raggiunga il sito del progetto dalla posizione in cui viene calcolata la distanza più breve tra sorgente e sito (*Sucuoğlu et al., 2014*).

2.5 Il concetto di vulnerabilità sismica

La vulnerabilità sismica di un edificio è la suscettibilità dell'edificio stesso a subire danni per effetto di un terremoto. Viene suddivisa in:

- vulnerabilità diretta: definisce la propensione di un singolo elemento fisico a subire danni per effetto di un terremoto;
- vulnerabilità indotta: avviene quando la crisi di un elemento è dovuta ad un collasso;
- vulnerabilità differita: definisce gli effetti che si manifestano nelle fasi successive all'evento.

Il rischio sismico, come visto in precedenza, viene determinato da diversi parametri, dal momento che il rischio sismico di un territorio può essere schematicamente valutato come combinazione di pericolosità (P), vulnerabilità (V) ed esposizione (E):

$$R = P \cdot V \cdot E \quad (2.5)$$

La pericolosità sismica (P) è definita come la probabilità che, in una certa area e in un certo intervallo di tempo, si verifichi un terremoto che superi una soglia di intensità, magnitudo o accelerazione di picco fissata. Questo parametro è una caratteristica fisica del territorio e tiene in considerazione la frequenza e la forza con cui si manifestano i terremoti (sismicità del sito).

L'esposizione (E) indica la possibilità che un territorio subisca un danno più o meno elevato in termini di perdita di vite umane e danni materiali.

La vulnerabilità sismica (V) è la predisposizione di una struttura a subire danneggiamenti e crolli. Quanto più un edificio è ritenuto vulnerabile (per tipologia, progettazione inadeguata, qualità scadente dei materiali, errata modalità di manutenzione e scarsa manutenzione), tanto maggiori saranno le conseguenze sulla struttura. Per fare in modo che gli edifici abbiano una bassa vulnerabilità la normativa italiana³ impone che gli edifici vengano costruiti nel rispetto dei criteri antisismici, in modo tale che le strutture abbiano una risposta duttile alle sollecitazioni.

Ricapitolando uno dei parametri che influenza il rischio sismico è appunto la vulnerabilità, infatti se da un lato non è possibile agire per modificare la pericolosità sismica, dall'altro si hanno maggiori possibilità di ridurre la vulnerabilità delle costruzioni e di attuare politiche di prevenzione e messa in sicurezza degli edifici.

La vulnerabilità sismica di una struttura è rappresentata da un indicatore che mette in relazione la capacità di resistenza della struttura e la richiesta in termini di resistenza e/o spostamento relativamente ad un certo sisma.

L'iter progettuale per la valutazione della vulnerabilità sismica di un edificio segue quanto indicato alla voce di "Valutazione della sicurezza", paragrafo 8.5 delle NTC (Norme Tecniche per le Costruzioni) che viene sintetizzato nei seguenti punti:

- indagine conoscitiva: viene definito lo stato attuale della costruzione attraverso rilievi plano-altimetrici e strutturali;
- analisi storico-critica: è un'analisi delle sollecitazioni che può subire la struttura alla luce degli eventi del passato;
- caratterizzazione dei materiali: valutazione delle capacità di resistenza dei materiali;
- analisi strutturale e determinazione della vulnerabilità del sistema strutturale esistente.

I metodi utilizzati per la classificazione sono: metodi diretti, indiretti e convenzionali.

I metodi diretti forniscono in un solo passo il risultato come previsione del danno sismico, i metodi indiretti consentono la determinazione di un indice di vulnerabilità V in relazione ai danni e terremoti e i metodi convenzionali forniscono soltanto un indice della vulnerabilità a cui non associano una previsione di danno, questo metodo viene utilizzato per confrontare strutture ubicate in aree diverse caratterizzate da una stessa sismicità.

³ Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008 (G.U. n. 47 del 26/02/2009) – Supplemento ordinario n. 27) "Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. del 14 gennaio 2008".

Per poter comprendere meglio quanto esplicitato nell'analisi preliminare, tutte le informazioni raccolte e riguardanti le caratteristiche della struttura e dei materiali devono essere tradotte in un "modello di calcolo" che non è standardizzato a causa della vastità delle tipologie e tecniche costruttive. È necessario tradurre le componenti strutturali più influenti in condizioni sismiche in corretti schemi di calcolo.

CAPITOLO 3

Spettro di risposta sismica

I terremoti sono fenomeni aleatori e quelli di severa entità sono molto rari rispetto ad altre catastrofi naturali. Nel mondo la frequenza dell'attività sismica, basata sulle osservazioni dal 1900, è pari ad un evento sismico annuo per magnitudo pari o maggiore a 8.

Non è possibile stabilire quale sarà il prossimo terremoto in un dato sito. Conoscendo però una serie di informazioni sul sito (terreno, storia dei terremoti passati, etc), è possibile prevedere che tipo di terremoto si avrà in un fissato intervallo di tempo.

Ad oggi, gli edifici sono progettati e costruiti seguendo le normative o codici standard che si differenziano tra loro in base ai tempi di ritorno di riferimento per la progettazione e le ordinate spettrali per il calcolo dello spettro di progetto.

3.1 Definizione di spettro in relazione ai parametri dell'evento sismico

Il concetto di spettro di risposta elastico $S_a(T)$ è un diagramma che fornisce, per diversi periodi T di oscillazione, il valore massimo della pseudo-accelerazione, che corrisponde al massimo spostamento relativo suolo/solaio del terreno o struttura soggetti ad una sollecitazione sismica. Gli spettri di risposta elastici forniscono i valori massimi di risposta di strutture che si mantengono in campo elastico, anche quando sono soggette al terremoto della massima intensità prevedibile nel periodo di riferimento.

Dagli spettri di risposta è possibile ricavare gli spettri di progetto, che forniscono l'entità delle azioni da considerare a garanzia dei criteri di progettazione antisismica.

Lo scopo è quello di progettare e costruire strutture che devono subire danni molto limitati (campo elastico) nel caso di eventi sismici frequenti. Invece, a fronte di eventi sismici rari e di elevata intensità le strutture possono subire un danneggiamento (campo plastico) purché non raggiungano il collasso.

Il primo studioso a scoprire il concetto di spettro di risposta elastico fu K. Suheiro nel 1926, il quale è riuscito a descrivere il massimo valore di qualsiasi parametro della risposta di un sistema ad un grado di libertà soggetto ad una specifica componente di moto al terreno. Fino agli anni '80, gli sviluppi si basavano su una sola registrazione del terremoto. In altre parole, veniva rappresentato graficamente il movimento di un solo sisma che veniva preso come riferimento per costruire uno spettro di risposta del suolo.

Più tardi, si è giunti alla forma più comune in cui viene rappresentato lo spettro di risposta elastica, che esprime l'accelerazione, in funzione dei parametri locali e del periodo di

ritorno del moto che si desidera rappresentare, vengono definiti i punti B, C e D e la forma spettrale risultante è ancorata alla massima accelerazione al terreno (PGA) al punto A.

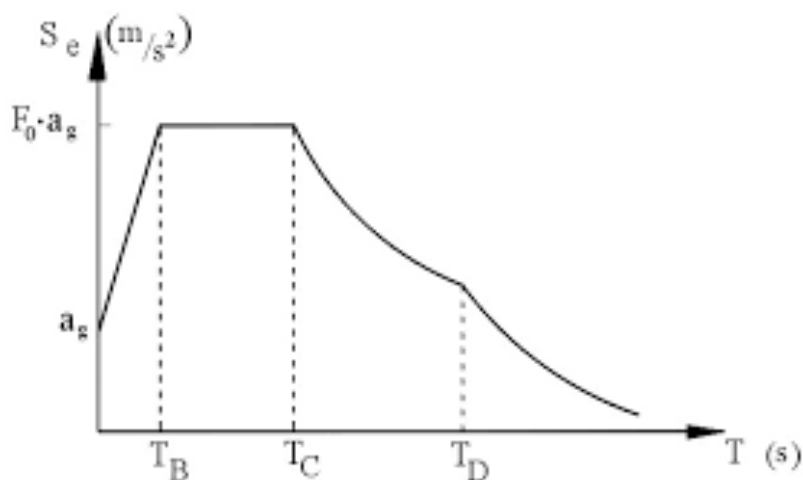


Figura 3.1: Illustrazione dei punti A, B, C, D.

I diversi codici e le normative di riferimento si differenziano per le diverse probabilità di eccedenza, per i diversi periodi di ritorno a seconda del tempo di riferimento considerato e le diverse ordinate spettrali

Nei seguenti paragrafi verranno esplicitate le caratteristiche dei diversi spettri di risposta elastica.

3.2 Spettro di risposta elastico – *Eurocode 8*

L'Eurocode 8⁴ contiene la normativa sismica per gli edifici e per le opere di ingegneria civile fatta eccezione per opere speciali come centrali nucleari.

Nella parte I vengono definiti i requisiti prestazionali delle opere, ed i criteri per verificarli:

- *No-collapse requirement*, ovvero la struttura deve essere in grado di sopportare azioni sismiche “gravose” senza arrivare al collasso. Questa prestazione di progetto viene individuata dalla combinazione della probabilità di superamento (10%) in un periodo di riferimento di 50 anni, ovvero un periodo di ritorno pari a 475 anni, e un secondo parametro detto il fattore di importanza γ , che tiene conto della variabilità del tempo di ritorno.

⁴ UN 1998-1:2004 “Eurocodice 8: Progettazione delle strutture per la resistenza sismica – Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici.

- *Damage-limitation requirement*: ovvero la struttura deve sopportare le azioni senza subire alcun danno e questo requisito sarà applicato per strutture con P_{DLR} (Probabilità di eccedenza) pari al 10% in 10 anni e il corrispondente tempo di ritorno pari a 95 anni.

Proseguendo, l'Eurocode 8, individua 7 diversi tipi di sottosuolo (A, B, C, D, E, S1, S2) e per ciascuno di essi vengono elencati i parametri meccanici rilevanti ai fini progettuali. La classificazione distingue sottosuoli a rigidità via via decrescente, a partire dal tipo A costituito da roccia fino ai sottosuoli S1 e S2 che sono molto deformabili.

Lo spettro di risposta elastico al suolo è la rappresentazione principale dell'azione sismica e le sue componenti orizzontali $S_E(T)$ sono definite dalle seguenti equazioni:

$$S_E(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} (\eta \cdot 2.5 - 1) \right]; \quad 0 \leq T \leq T_B \quad (3.1 \text{ a})$$

$$S_E(T) = a_g \cdot S \cdot \eta; \quad T_B \leq T \leq T_C \quad (3.1 \text{ b})$$

$$S_E(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right]; \quad T_C \leq T \leq T_D \quad (3.1 \text{ c})$$

$$S_E(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2.5 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]; \quad T_C \leq T \leq 4.0 \text{ s} \quad (3.1 \text{ d})$$

Dove:

- T : periodo proprio di vibrazione di un oscillatore semplice (struttura);
- a_g : *design ground acceleration on type A ground*;
- S : *soil factor*, che dipende dal tipo di sottosuolo;
- T_B, T_C : estremi dell'intervallo dei periodi cui corrisponde il ramo costante della funzione spettrale $S_e(T)$;
- T_D : periodo a partire dal quale la funzione spettrale $S_e(T)$ è tale da produrre uno spostamento costante;
- η : fattore di correzione dello smorzamento (pari a 5%).

I valori dei periodi T_B, T_C, T_D e del *soil factor* S influenzano la forma dello spettro.

La norma suggerisce di utilizzare due tipi di spettri, Tipo 1 e Tipo 2, in funzione della magnitudo dei terremoti: in particolare per valori di magnitudo inferiori o uguali a 5.5 si raccomanda l'utilizzo dello spettro di Tipo 2 e altrimenti di Tipo 1.

Tipo di sottosuolo	S	$T_B(T)$	$T_C(T)$	$T_D(T)$
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	1,2	0,15	0,5	2,0
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

Tabella 3.2.1: Valori dei parametri dello spettro di risposta elastico consigliati per Tipo 1 ($m > 5.5$).

Tipo di sottosuolo	S	$T_B(T)$	$T_C(T)$	$T_D(T)$
A	1,0	0,05	0,25	1,2
B	1,35	0,05	0,25	1,2
C	1,5	0,10	0,25	1,2
D	1,8	0,10	0,30	1,2
E	1,6	0,05	0,25	1,2

Tabella 3.2.2: Valori dei parametri dello spettro di risposta elastico consigliati per Tipo 2 ($m < 5.5$).

In seguito, viene esplicita il legame tra lo spettro elastico orizzontale e verticale, le equazioni 3.2 rappresentano lo spettro di progettazione verticale proposto nell'Eurocode 8. Lo spettro di progetto verticale è basato sulla componente verticale della PGA (a_{vg}) che è una frazione di quella orizzontale (a_g), come mostrato in Tab. 3.2.3.

Spettro	a_{vg}/a_g	$T_B (s)$	$T_C (s)$	$T_D (s)$
Tipo 1	0.90	0.05	0.15	1.0
Tipo 2	0.45	0.05	0.15	1.0

Tabella 3.2.3: Rapporti PGA verticale-orizzontale proposti dall'Eurocode 8 per stabilire lo spettro di progettazione verticale con sottosuolo di tipo A.

Va osservato che i periodi d'angolo dello spettro di progettazione verticale sono più brevi rispetto a quelli dello spettro di progetto orizzontale e raggiungono gli stessi valori per gli spettri di Tipo 1 e di Tipo 2 come riportato in Tab. 3.2.3 (CEN, 2004).

$$\begin{aligned}
S_{va}(T) &= a_{vg} \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} (\eta \cdot 3.0 - 1) \right]; & 0 \leq T \leq T_B \\
S_{va}(T) &= a_{vg} \cdot S \cdot \eta; & T_B \leq T \leq T_c \\
S_{va}(T) &= a_{vg} \cdot S \cdot \eta \cdot 3.0 \cdot \left[\frac{T_c}{T} \right]; & T_c \leq T \leq T_D \\
S_{va}(T) &= a_{vg} \cdot S \cdot \eta \cdot 3.0 \cdot \left[\frac{T_c \cdot T_D}{T^2} \right]; & T_c \leq T \leq 4.0
\end{aligned} \tag{3.2}$$

3.3 Spettro di risposta elastico: Disposizioni NERPH – Standard ASCE 7

Fino al 1997, le disposizioni del NEHRP (*National Earthquake Hazard Reduction Program*), come poi successivamente adottate dall'Eurocodice 8, utilizzavano mappe di pericolosità sismica con probabilità di superamento pari al 10% in un tempo di 50 anni e quindi con un periodo di ritorno di 475 anni. Il relativo spettro prevedeva uno smorzamento del 5%.

Successivamente, l'obiettivo del programma statunitense è stato quello di evitare il collasso della struttura con il terremoto di magnitudo massimo (*Maximum Considered Earthquake - MCE*) (BSSC 1997, 2000, 2003).

Il sisma massimo considerato MCE è associato ad un movimento al suolo definito da una probabilità di superamento pari al 2% in 50 anni, che corrisponde ad un tempo di ritorno di 2475 anni. Lo spettro MCE ha ordinate di accelerazioni spettrale a $T = 0,2$ s e $T = 1,0$. Lo spettro di risposta cambia a seconda del periodo (breve o lungo) e per esemplificare quanto appena affermato i terreni morbidi amplificano le ordinate spettrali a lungo periodo con ampiezze ridotte. Al contrario, invece, per le ordinate spettrali a breve periodo che vengono smorzate e si ha un aumento dell'ampiezza del movimento al suolo a causa del comportamento non lineare.

Successivamente è stato proposto un terzo periodo spettrale (T_L), combinando le disposizioni NEHRP e lo standard ASCE 7, che definisce l'inizio del plateau di spostamento in regime di MCE.

Il calcolo dello spettro di progettazione elastico (S_a) suggerito dalle disposizioni NEHRP 2003 e dallo standard ASCE 7 (2005) è descritto dalle seguenti eq. 3.3:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS}; \quad S_{MS} = F_A \cdot S_S; \quad S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1}; \quad S_{M1} = F_V \cdot S_1; \quad (3.3 \text{ a})$$

$$S_a = 0.6 \cdot \frac{S_{DS}}{T_0} \cdot T + 0.4 \cdot S_{DS}; \quad T_0 = 0.2 \cdot \frac{S_{D1}}{S_{DS}}; \quad 0 \leq T \leq T_0 \quad (3.3 \text{ b})$$

$$S_a = S_{DS}; \quad T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}; \quad T_0 \leq T \leq T_S \quad (3.3 \text{ c})$$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T}; \quad T \leq T_L \quad (3.3 \text{ d})$$

con:

- S_S rappresenta l'accelerazione spettrale MCE a $T = 0,2$ s per il sito di classe B determinato dalle mappe di accelerazione spettrale USGS.
- S_1 l'accelerazione spettrale MCE a $T = 1,0$ s per il sito di classe B determinato dalle mappe di accelerazione spettrale USGS.
- S_{MS} l'accelerazione spettrale MCE a $T = 0,2$ s modificata per la specifica classe del sito NEHRP.
- S_{M1} l'accelerazione spettrale MCE a $T = 1,0$ s modificata per la specifica classe del sito NEHRP.
- S_{DS} l'accelerazione spettrale di progettazione a $T = 0,2$ s.
- S_{D1} l'accelerazione spettrale di progettazione a $T = 1,0$ s.

Nelle equazioni (3.4 a) è stato inserito il fattore moltiplicativo $2/3$, che lega lo spettro di progettazione alle ordinate spettrali MCE e che rappresenta il margine di sicurezza contro il collasso.

L'approccio che considera l'MCE è stato sostituito da quello basato su MCE_R (*massimo terremoto considerato mirato al rischio*) formulato tramite delle disposizioni NEHRP e degli standard ASCE 7-10 (BSSC, 2009; ASCE, 2010) che considera la distribuzione di probabilità dei movimenti al suolo e la probabilità di cedimento strutturale. La struttura è progettata utilizzando accelerazioni spettrali che forniscono una probabilità di collasso uniforme dell'1% in 50 anni e la sua determinazione si articola in tre passaggi:

1. vengono innanzitutto prese a riferimento le mappe sismiche (ad esempio fornite da USGS *Earthquake Hazard Program*) probabilistiche per il rischio di collasso strutturale facendo uso delle equazioni (3.4):

$$S_S = C_{RS} \cdot S_{SUH}; \quad S_1 = C_{R1} \cdot S_{1UH}; \quad (3.4)$$

Dove C_{RS} e C_{R1} definiscono dei coefficienti di rischio.

2. Tramite le mappe di rischio, si ottengono le accelerazioni spettrali deterministiche a $T = 0,2$ s (S_{SD}) e $T = 1,0$ s (S_{1D}).
3. Vengono inseriti i fattori di sito F_A e F_V che tengono in considerazione le specifiche condizioni del sito tramite l'equazione (3.5):

$$S_{MS} = F_A \cdot S_S; \quad S_{M1} = F_V \cdot S_1 \quad (3.5)$$

I movimenti del terreno di progetto sono 2/3 dei movimenti del terreno MCE_R .

Le equazioni usate per il calcolo dello spettro di progettazione (S_a) sono pertanto:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS}; \quad S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1}; \quad (3.6 \text{ a})$$

$$S_a = 0.6 \cdot \frac{S_{DS}}{T_0} \cdot T + 0.4 \cdot S_{DS}; \quad T_0 = 0.2 \cdot \frac{S_{D1}}{S_{DS}}; \quad 0 \leq T \leq T_0 \quad (3.6 \text{ b})$$

$$S_a = S_{DS}; \quad T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}}; \quad T_0 \leq T \leq T_S \quad (3.6 \text{ c})$$

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T}; \quad T_S \leq T \leq T_L \quad (3.6 \text{ d})$$

$$S_a = \frac{S_{D1} \cdot T_L}{T^2}; \quad T \geq T_L \quad (3.6 \text{ e})$$

Per il calcolo dello spettro verticale S_{va} viene inserito il coefficiente C_V che rappresenta il rapporto spettrale tra a direzione verticale e quella orizzontale e si calcola tramite le equazioni (3.7), partendo dai valori dello spettro di progettazione (S_a):

$$S_{va} = 0.6 \cdot C_V \cdot S_{DS}; \quad T \leq 0.025 \text{ s} \quad (3.7 \text{ a})$$

$$S_{va} = 20 \cdot C_V \cdot S_{DS} \cdot (T - 0.025) + 0.3 \cdot C_V \cdot S_{DS}; \quad 0.025 \text{ s} \leq T \leq 0.05 \text{ s} \quad (3.7 \text{ b})$$

$$S_{va} = 0.8 \cdot C_V \cdot S_{DS}; \quad 0.05 \text{ s} \leq T \leq 0.15 \text{ s} \quad (3.7 \text{ c})$$

$$S_{va} = 0.8 \cdot C_V \cdot S_{DS} \cdot \left(\frac{0.15}{T}\right)^{0.75}; \quad 0.15 \text{ s} \leq T \leq 2.0 \text{ s}; \quad (3.7 \text{ d})$$

Secondo la normativa, lo spettro verticale ottenuto non deve essere inferiore alla meta dello spettro di progettazione orizzontale corrispondente, S_a .

3.4 Spettro NTC 2008

Il DM 14/01/2008 “Norme Tecniche per le Costruzioni” contiene le prescrizioni da adottare nella progettazione di edifici od opere di ingegneria del territorio italiano e indica i relativi criteri di verifica.

Come primo passo è necessario calcolare l’azione sismica che subisce la struttura a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione, definita dall’accelerazione massima al suolo a_g attesa. La norma, sul territorio nazionale italiano, indica i parametri necessari per caratterizzare lo spettro di risposta elastico:

- a_g : accelerazione orizzontale massima su suolo rigido;
- F_0 : massimo fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T_C^* : periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Lo spettro elastico di progetto viene espresso in forma spettrale con uno smorzamento convenzionale pari al 5% e viene calcolato tramite le formule di equazione (3.8):

$$\begin{aligned}
 S_e(T) &= a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right]; & 0 \leq T \leq T_B \\
 S_e(T) &= a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0; & T_B \leq T \leq T_C \\
 S_e(T) &= a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right]; & T_C \leq T \leq T_D \\
 S_e(T) &= a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]; & T_D \leq T
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

con:

- T : periodo di vibrazione;
- S_a : accelerazione spettrale in direzione orizzontale;
- S : coefficiente che tiene conto della categoria del sottosuolo e delle condizioni topografiche;
- S_S : coefficiente di amplificazione stratigrafica;
- S_T : coefficiente di amplificazione topografica;

- η : fattore correttivo per modificare lo spettro nel caso in cui lo smorzamento sia diverso dal 5%;
- T_C : periodo corrispondente all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro, calcolato come: $T_C = C_C \cdot T_C^*$;
- T_B : periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante, pari a $T_B = T_C/3$;
- T_D : periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro, calcolato: $T_D: 4,0 \cdot \left[\frac{a_g}{g}\right] + 1,6$.

In figura 3, invece, viene rappresentato il relativo spettro elastico in accordo con NTC 2008.

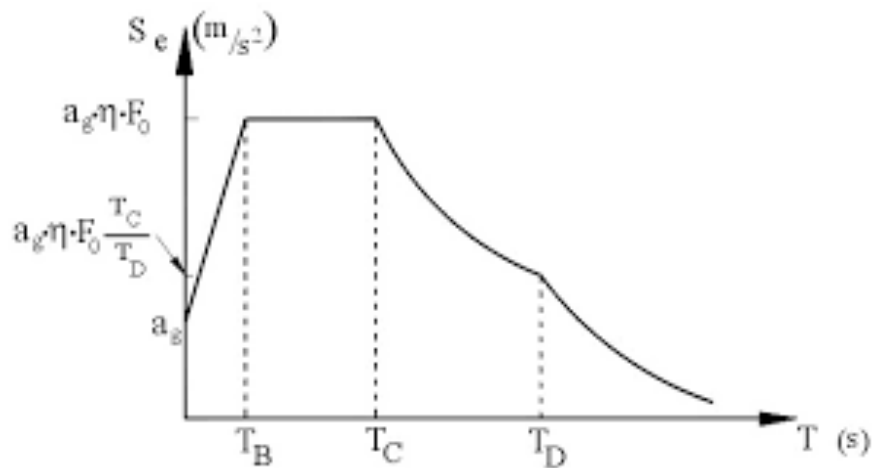


Fig. 3.4: Spettro di risposta elastico (NTC 2008)

CAPITOLO 4

Serbatoio di stoccaggio

Le diverse catastrofi naturali hanno evidenziato, nell'ultimo ventennio, il loro potenziale distruttivo nel provocare danni di notevole importanza agli impianti industriali, che causano nella maggior parte dei casi il rilascio di sostanze pericolose e conseguenti situazioni di severa emergenza.

Per questo motivo si ritiene necessario adeguare le procedure di analisi del rischio applicate alle strutture industriali anche per gli eventi naturali. In questo modo la gestione del rischio viene approfondita e riconsiderata includendo anche il rischio *NaTech*. Un'ideale progettazione e gestione dell'impianto, che comprende anche la parte dei parchi serbatoi, consente di mitigare il rischio della propagazione di incidenti industriali che potrebbero portare a conseguenze difficilmente incontrollabili.

4.1 L'effetto sismico e il parco serbatoi

Gli impianti industriali sono composti da opere complesse che richiedono particolare attenzione dati gli elevati quantitativi di sostanze tossiche ed infiammabili processate. I parchi di serbatoi di stoccaggio devono essere oggetto di particolare considerazione in quanto i suoi componenti possono subire rotture e perdite legate al deterioramento delle strutture, alla cattiva manutenzione, ma anche a causa di fenomeni di instabilità delle coperture, del mantello (*elephant foot*) e nei casi più gravi di collasso a causa delle azioni naturali, quali il vento o un sisma.

Il parco serbatoi deve essere gestito con un'attività di manutenzione programmata per garantire la durabilità e l'efficienza delle strutture. Di fondamentale importanza è l'aspetto della corretta gestione dei parchi serbatoio, in quanto come visto in precedenza, un incendio causato da un terremoto ha portato al collasso di un serbatoio di stoccaggio nella raffineria di Tupras comportando conseguenze molto gravi. In generale, il collasso di un serbatoio può implicare a catena il collasso di altri serbatoi adiacenti creando in questo modo quello che viene definito un "effetto domino".

La maggiore vulnerabilità riscontrabile negli impianti industriali è dovuta alla sua complessità che si realizza in un layout molto fitto di connessioni, apparecchiature e componistica varia.

Peculiare di un parco di serbatoi è la presenza di diversi recipienti di stoccaggio affiancati e ancorati al suolo. Queste apparecchiature solitamente subiscono danneggiamenti tipici

osservati come la deformazione tetto-mantello, il cedimento della saldatura fondo-parete, il fenomeno di *elephant foot buckling*, cedimento del terreno di sostegno.

Quando la causa è di natura sismica, i danneggiamenti possono essere ridotti o eliminati con l'isolamento sismico tra serbatoio e suolo che può ridurre le sollecitazioni (De Angelis et al. 2009).

Altri incidenti nei serbatoi possono avvenire a causa del fenomeno dello *sloshing*, che però non giova dell'intervento di isolamento sismico. Un altro scenario possibile (come nel caso raffineria Tupras di Izmit) è dato dall'attrito o dall'urto tra il tetto galleggiante e il mantello di uno o più serbatoi che ha comportato l'innesco di scintille, causa di incendi di vapori di nafta. L'incendio poi, ha determinato per irraggiamento ai serbatoi vicini, aggravando di fatto lo scenario incidentale.

Anche la componentistica di connessione ovvero le tubazioni e i relativi supporti possono subire l'azione sismica. Nonostante la loro vulnerabilità sia inferiore, non è da escludere che lo spostamento e il collasso delle strutture collegate determini effetti anche su di essi.



Fig. 4.1: Fotografia di un incendio in un Parco serbatoi – Raffineria di Chiba della Cosmo Oil, Terremoto di Sendai 11 marzo 2011.

4.2 Caratteristiche di un comune serbatoio di stoccaggio

Esistono diverse tipologie di serbatoi a seconda della funzione:

- serbatoio di stoccaggio, in cui vengono accumulate le materie prime e i prodotti finiti;
- serbatoio di processo che serve per l'accumulo temporaneo per successive lavorazioni.

Lo studio è incentrato sui serbatoi di stoccaggio, la cui tipologia è stata selezionata sulla base delle condizioni chimico-fisiche della sostanza da contenere.

Lo stoccaggio di sostanze liquide individua diverse tipologie di serbatoio a seconda del fatto che la sostanza contenuta sia volatile o meno. Per lo stoccaggio di liquidi molto volatili, che possono formare pericolose sovrappressioni dovute allo sviluppo dei vapori della sostanza stessa, vengono utilizzati serbatoi a pressione atmosferica e bassa temperatura (criogenici), condizioni di stoccaggio che consentono di contenere alcuni gas (come metano, propano, butano) allo stato liquido in serbatoi criogenici, dopo esser stati raffreddati con opportuni sistemi di raffreddamento. Per liquidi volatili il serbatoio, deve essere fornito di un tetto galleggiante o tetto fisso in modo tale da non consentire la fuoriuscita di vapori. Lo stoccaggio di liquidi non volatili non comporta eccessivi problemi in quanto possono essere utilizzati serbatoi di varie dimensioni aperti o chiusi.

I serbatoi a tetto fisso sono serbatoi cilindrici e possono essere ad asse verticale e orizzontale, con tetto conico, bombato o fisso e il fondo piano o bombato appoggiato sul terreno, su una platea o sostenuto da pilastri.

Per lo stoccaggio di gas pressurizzati liquefatti vengono utilizzati serbatoi sferici, in quanto la sfera consente al serbatoio di raggiungere la massima pressione possibile in base al materiale dal quale è costituito.

La progettazione e il dimensionamento dei serbatoi avviene seguendo lo standard API 620 (API standard 620, 2002), che prevede, al fine di minimizzare il rischio di rilascio di sostanze, di dotare i serbatoi di un doppio fondo, oltre a bacini di contenimento, valvole e canali di scolo. Sotto al serbatoio e dei componenti viene solitamente posizionata una membrana impermeabile che ha lo scopo di creare un isolamento tra il serbatoio e il terreno sempre nel caso in cui vi siano perdite della sostanza stoccata.

Per lo svolgimento dell'analisi, è stato individuato un esempio di serbatoio pressurizzato (Fig. 4.2), dotato dei seguenti presidi sicurezza e sistemi di controllo:

- due misuratori di pressione (P1, P2);

- due indicatori di livello (L1, L2);
- due sensori di monitoraggio della temperatura (T1, T2).

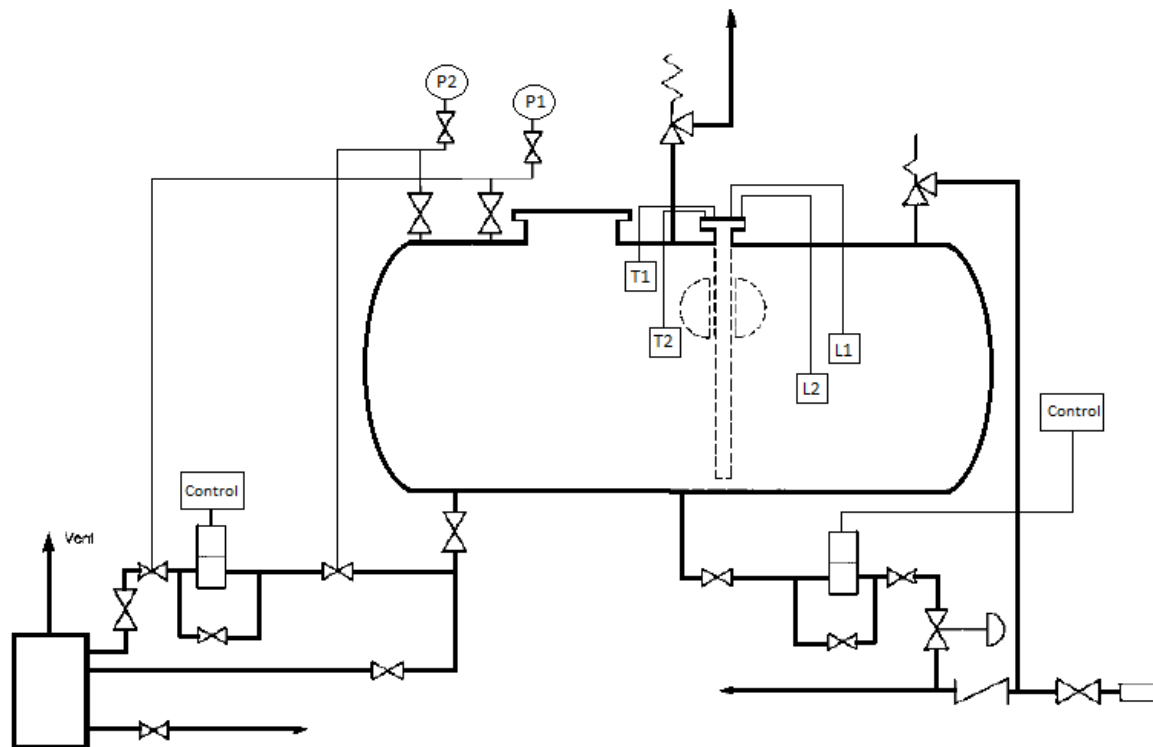


Fig. 4.2: Schema generale di un serbatoio di stoccaggio pressurizzato e relativi sistemi di esercizio (Lees, 1996).

La funzionalità dell'apparecchiatura viene monitorata dai sistemi di controllo che ne verifica i valori di pressione, temperatura e livello del liquido; inoltre dato il contenuto, nel caso in esame, di sostanze stoccate volatili, il serbatoio è dotato di un sistema di raffreddamento per mantenere la temperatura del liquido bassa. Il serbatoio è dotato di valvole di emergenza, che consentono lo scarico in caso di sovrappressioni non accettabili, inoltre sono presenti valvole di sfogo e un disco di rottura.

Il serbatoio è altresì dotato di una barriera di contenimento che ha la funzione di evitare le infiltrazioni, avente altezza massima dal fondo di 4 m e capacità di contenimento pari al 100% della capacità del maggiore dei serbatoi contenuti (API 620, 2002). La barriera di contenimento è costruita con una leggera pendenza in modo tale da consentire il deflusso nel bacino di scolo, in cui saranno presenti anche valvole per il drenaggio all'impianto di trattamento delle acque.

4.3 Caratteristiche del serbatoio per i casi studio

Il serbatoio utilizzato nella sezione (6.2) per lo stoccaggio di *n*-pentano presenta i seguenti dati strutturali, in accordo alla normativa API 620:

- Dimetro esterno $D_{ext} = 2,50 \text{ m}$
- Dimetro interno $D_{int} = 2,48 \text{ m}$
- Altezza Fasciame $H = 4,00 \text{ m}$
- Altezza Totale $H_{tot} = 4,520 \text{ m}$
- Volume interno $V_{int} = 20 \text{ m}^3$

Mentre il serbatoio utilizzato nella sezione (6.3) per lo stoccaggio di acetato di metile presenta i seguenti dati strutturali secondo la normativa API 620:

- Dimetro esterno $D_{ext} = 1,84 \text{ m}$
- Dimetro interno $D_{int} = 1,80 \text{ m}$
- Altezza Fasciame $H = 3,5 \text{ m}$
- Altezza Totale $H_{tot} = 4,75 \text{ m}$
- Volume interno $V_{int} = 9 \text{ m}^3$

I serbatoi presi in analisi sono costruiti in acciaio al carbonio con densità $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$.

Relativamente allo studio in oggetto, sono stati considerati diversi gradi di riempimento r , intesi come frazione di volume di serbatoio riempito dal liquido: un riempimento quasi totale del serbatoio pari a $r = 0.8$ ed un riempimento parziale del serbatoio pari a $r = 0.2$. In relazione all'evento sismico, infatti, la massa complessiva soggetta a sisma rappresenta un parametro determinante per indagarne la risposta strutturale.

Nella sezione (9.1) per lo stoccaggio di ammoniaca, è stato utilizzato come riferimento un serbatoio sferico con i seguenti dati strutturali, estrapolati dal testo *ASCE "Guidelines for seismic evaluation and Design of Petrochemical Facilities"*:

- $W = 1500 \text{ kips} = 680388,44 \text{ kg}$
- $L = 36' = 36 \text{ ft} = 10,97 \text{ m}$
- $p = 12'' = 0,305 \text{ m}$
- $l = 20' = 6,096 \text{ m}$
- $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
- $D = 40' = 12,2 \text{ m}$

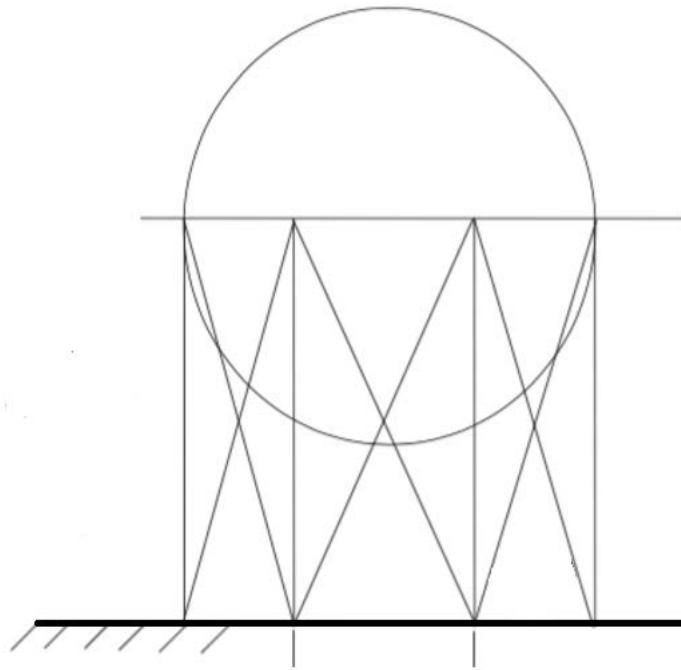


Fig. 4.3: *Schema generale di un serbatoio di stoccaggio pressurizzato sferico con sistema di Horton.*

CAPITOLO 5

Metodologia di analisi

5.1 Analisi quantitativa del rischio

In questa sezione viene affrontato lo sviluppo dell'albero dei guasti tenendo in considerazione l'evento sismico. Ad oggi, la letteratura non fornisce dati statistici riguardanti le probabilità di guasto e rispettivi tassi di guasto dei componenti del serbatoio per causa sismica, per questo motivo la probabilità di guasto dovuta dal sisma è stata calcolata partendo dai dati strutturali del serbatoio e dalla sostanza contenuta per individuare le sollecitazioni causate dal terremoto.

Dal codice ASCE (*Committee of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers*) sono stati calcolati i tempi di vibrazione delle strutture con i diversi gradi di riempimento, che come si potrà notare dai risultati ottenuti riportati nella sezione 6.2 per il caso del serbatoio contenente n-pentano e nella sezione 6.3 per il serbatoio di stoccaggio di acetato di metile.

Il calcolo del periodo di vibrazione avviene tramite l'espressione:

$$T = \frac{7.78}{10^6} \cdot \left(\frac{H}{D}\right)^2 \cdot \sqrt{\frac{W \cdot D \cdot 12}{t}} \quad (5.1)$$

Nell'equazione 5.1 sono stati considerati dati strutturali come il diametro, l'altezza, lo spessore e il peso (sia del serbatoio che della sostanza stoccata comprendente della parte liquida e della fase vapore) ed è stato dunque calcolato il periodo caratteristico di vibrazione T mediante lo script Matlab@*periodo_vibrazione_tank* (App.1.2).

Questo valore rappresenta la soglia oltre la quale il serbatoio subisce dei danni a seguito di un evento sismico perché i componenti entrano in risonanza con la frequenza di scuotimento indotta dall'evento sismico. Il valore del tempo di risonanza viene inserito e confrontato con lo spettro di risposta elastica calcolato con le equazioni dell'Eurocodice 8 affrontate nella sezione 3.2, oppure con le disposizioni NEHRP e standard ASCE 7 sviluppate nella sezione 3.3. È stato possibile individuare l'accelerazione soglia corrispondente al periodo di vibrazione del serbatoio tramite lo script Matlab@*spettro_orizzontale* (App.1.1).

In seguito, applicando le equazioni di previsione di movimento al suolo (*ground motion prediction equation, GMPE*) e la deviazione standard è possibile calcolare con lo script

Matlab@*probabilità_sisma* (App.1.3) inserendo l'accelerazione di soglia riferita al periodo di vibrazione della struttura, la magnitudo e la distanza sorgente – sito considerata, la probabilità di accadimento del relativo evento sismico. Nel caso considerato, l'equazione di previsione del movimento al suolo ha la seguente forma⁵:

$$\ln(Sa) = -4.769 + 2.229 \cdot M - 0.182 \cdot M^2(-2.493 + 0.218 \cdot M) \ln \sqrt{R^2 + 8.219^2} \quad (5.4)$$

Quest'ultimo script fornisce la probabilità di accadimento che verrà inserita nell'albero dei guasti.

5.2 Top Event ed eventi NaTech sismici

L'elaborato si incentra sulle conseguenze di eventi *NaTech* sismici che possono causare gravi danni strutturali e possono provocare ingenti danni ambientali. La casistica storica ha evidenziato che le criticità, in ambito industriale, maggiormente ricorrenti riguardano i serbatoi di stoccaggio, provocando danni al mantello e/o alle giunzioni tra i vari collegamenti determinando uno scenario LOC (*Loss of Containment*). Il terremoto non porta quasi mai al collasso della struttura ma spesso si verificano danneggiamenti gravi che provocano il rilascio della sostanza stoccata.

A causa delle vibrazioni innescate dal sisma sul serbatoio vi è la possibilità che si creino, all'interfaccia tra liquido-gas, onde superficiali a bassa frequenza che possono incrementare gli effetti sull'integrità strutturale del serbatoio. Le oscillazioni provocano spinte orizzontali e verticali sugli apparecchi provocando gravi danni o in alcuni casi hanno causato il crollo della struttura.

Il collasso della struttura viene raggiunto in particolar modo quando si hanno le crisi sismiche nelle quali si ripetono più scosse di magnitudo medio-alta e le azioni che si ripetono, producono danni notevoli (fino al collasso).

Si evidenzia come dagli eventi *NaTech* avvenuti nel passato, nel 70 % dei casi l'incidente avviene con perdita di contaminante (*LOC*), nel 18 % dei casi si è creato un tank fire e nel 29 % dei casi si sviluppa uno dei seguenti scenari:

- *Flash fire*;
- *BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)*;
- esplosioni.

⁵ Equazione di previsione del movimento al suolo di Akkar and Bonner (2010).

Queste statistiche confermano la scelta fatta sul *Top Event* preso in riferimento per l'elaborato, ma anche gli altri incidenti elencati meritano qualche considerazione ulteriore. Gli scenari che si possono venire a delineare possono essere correlati ad un mal funzionamento di sistemi di raffreddamento, al sistema di controllo contro le sovrappressioni, ad un ritardo nella segnalazione dell'allarme a causa di un blackout elettrico.

La magnitudo di tali incidenti viene amplificata nel caso in cui i sistemi di mitigazione vengano messi fuori uso a causa per esempio di una rottura di tubazione per il reintegro di acqua finalizzata all'antincendio e con conseguente impossibilità di contenere gli eventi di incendio, causando in questo modo la sua propagazione o comportando ad esplosioni di altri serbatoio se surriscaldati per irraggiamento.

L'evento sismico può essere alla base di questo tipo di malfunzionamenti agendo indistintamente sulla struttura e sui suoi presidi di sicurezza come spiegato oltre.

5.3 Metodologia FTA e ETA

Le tecniche utilizzate per quantificare il *Top Event* sono l'albero dei guasti e l'albero degli eventi.

Per poter tenere in considerazione la presenza dell'evento sismico, nell'albero dei guasti, è stata ipotizzata la rottura sismica in tutti i rami considerati che portano all'accadimento del *Top Event*.

In mancanza di dati statistici a riguardo, è stato applicato quanto descritto nella sezione 5.1 per la quantificazione della probabilità di accadimento di una rottura sismica che prevede un superamento della soglia di accelerazione che può sopportare la struttura. Dopo aver evidenziato come siano maggiormente probabili i *Top Event* indotti dall'evento sismico, si è ipotizzato di implementare delle misure di prevenzione e mitigazione del rischio, di cui si parlerà nella sezione 5.4. L'inserimento di presidi antisismici ha comportato modifiche dello spettro di risposta elastica e di conseguenza, avendo mantenuto uguale la struttura e quindi il suo tempo di vibrazione ha permesso di individuare accelerazioni diverse. Entrando nello specifico, lo spettro del sisma è stato amplificato del 20 %, come illustrato nella sezione 7.1 e 7.2, e ha portato all'individuazione di accelerazioni spettrali maggiori.

È stato verificato come accelerazioni spettrali maggiori corrispondano a minori probabilità di accadimento del sisma. Nell'albero dei guasti quindi viene inserita la nuova

probabilità di rottura per causa sismica che comporta una diminuzione degli accadimenti annuo dell'evento indesiderato.

In maniera parallela, si procede con l'elaborazione dell'albero degli eventi e, in primo luogo è stato sviluppato quello relativo alla presenza di un evento sismico. Per lo sviluppo dell'albero degli eventi, è stato preso in considerazione il rilascio di sostanza infiammabile come *Top Event* così come:

- la presenza delle funzioni o misure di protezione;
- la compresenza di circostanze avverse;
- la natura degli esiti finali attesi.

Le funzioni o misure di protezione che vengono considerate sono i sistemi antincendio e i sistemi antincendio *sprinkler* a schiuma, polvere estinguente secca e biossido di carbonio (CO₂). Altra misura di protezione è la barriera di contenimento, in grado di contenere lo sversamento di sostanze pericolose ed inquinanti, inoltre ha lo scopo di mitigare il rischio di incendio.

L'analisi delle circostanze avverse che sono state individuate sono: l'innescò immediato o ritardato e il caso in cui la miscela si trovi in campo esplosivo.

Gli esiti finali individuati possono essere:

- incendio controllato e confinato;
- incendio controllato e non confinato;
- incendio confinato;
- *jetfire*;
- esplosione confinata;
- UVCE (*unconfined vapor cloud explosion*);
- *flash fire* confinato;
- *flash fire* non confinato;
- nessun effetto.

I sistemi di protezione e le condizioni possono influenzare l'evolversi del fenomeno e costituiscono il nodo dell'albero, che può avere due uscite, positiva o negativa, indicanti l'accadimento o meno dell'evento. Al termine del diagramma si individuano gli esiti finali a cui viene associata una probabilità di accadimento, che può rappresentare l'esito finale di un'analisi basata sull'albero dei guasti. L'albero degli eventi viene invece utilizzato per quantificare l'accadimento di un determinato esito finale, rispetto all'evento iniziatore.

Un parametro necessario ai fini della quantificazione degli eventi è il concetto di disponibilità che corrisponde ad una frequenza ed enumera i successi dell'intervento di una specifica funzione rispetto al numero totale di richieste di intervento (ad esempio, un tasso di successo pari a 0.50 significa che su 100 chiamate, nella metà dei casi la funzione di sicurezza interviene positivamente).

I dati di successo dei sistemi di mitigazione e di accadimento di eventi avversi sono stati recuperati in database del *National Fire Protection Association, 2017*.

I dati a disposizione non tengono in considerazione della presenza dell'evento sismico che potrebbe comportare ad una diminuzione dell'affidabilità dei sistemi antincendio e della barriera di contenimento. È stato deciso di diminuire il valore del tasso di successo di un valore pari alla probabilità di accadimento individuata, in modo tale da considerare la diminuzione di affidabilità dei sistemi di mitigazione nel caso di evento sismico. In altre parole se il tasso di successo di un sistema di protezione ha un valore x in condizioni di normalità, in caso di evento sismico che ha una probabilità di accadimento calcolata e pari a p si prevede che il tasso di successo, in condizioni anomali, come quelle che si possono verificare in caso di un evento sismico sia pari a $x-p$.

5.4 Implementazione delle misure di prevenzione e mitigazione

Nello sviluppo dell'albero dei guasti, dopo l'individuazione del *Top Event*, sono stati identificate le principali apparecchiature che possono subire danni dall'evento sismico, che sono:

- Valvola in ingresso e in uscita al serbatoio. L'evento sismico può comportare delle disconnessioni delle tubazioni che sono collegate alla valvola, a causa del cedimento degli ancoraggi oppure un guasto alla linea di cablaggio del sistema di gestione automatica o manuale delle valvole. L'evento sismico può causare un'interruzione della linea elettrica causando un mancato funzionamento del sistema di allarme;
- Tubazione ingresso e in uscita dal serbatoio. L'evento sismico potrebbe causare una disconnessione delle tubature oppure si potrebbero creare cricche a causa di sollecitazioni eccessive;
- Rottura del serbatoio. La rottura del serbatoio può essere dovuta alla rottura degli ancoraggi che non sono stati progettati per resistere alla forza orizzontale e verticale. Si possono creare cricche o fori nel mantello del serbatoio in seguito ad

un evento sismico e sarebbe necessario dimensionare la struttura del serbatoio in modo da garantire la tenuta sotto la massima azione sismica registrata nei siti di interesse.

- Guasto al sistema di raffreddamento. Il sisma può provocare un guasto al sistema di raffreddamento ed un conseguente aumento della temperatura e pressione della sostanza stoccata nel serbatoio. Inoltre l'evento sismico può comportare disconnessioni delle tubature che trasportano il fluido di raffreddamento.

Valutando quali apparecchiature sono maggiormente soggette a rotture o mal funzionamenti e le relative cause, si è ipotizzato di implementare delle misure di prevenzione e protezione della rottura di tipo sismico.

Per esempio, nel caso di serbatoi costruiti in zona sismica è stato previsto l'utilizzo di giunti flessibili per le tubature in ingresso/uscita. Sono già stati testati giunti prototipici installati su un segmento di una grossa tubazione, in grado di compensare spostamenti tri-direzionali fino ad 80 cm. Nell'elaborato (Capitolo 8) verrà valutato il beneficio in termini di diminuzione della probabilità di accadimento mediante l'utilizzo di ancoraggi antisismici.

Altra misura di protezione adottata nel corso dell'elaborato è l'utilizzo di isolatori suolo-serbatoio, che devono essere numerosi e robusti a causa della massa rilevante, consentono di diminuire le probabilità di rottura sismica della struttura del serbatoio.

CAPITOLO 6

Primo caso studio: *FTA e ETA*

In questo capitolo verranno affrontati i casi studio, a dimostrazione dell'incidenza dell'evento sismico nello sviluppo dell'albero dei guasti e nell'albero degli eventi.

6.1 Albero dei guasti tradizionale

L'albero dei guasti, come affrontato in precedenza nelle sezioni 1.5 e 5.3, è una metodologia quantitativa e deduttiva di analisi del rischio che consente di individuare le sequenze che conducono allo sviluppo di un *Top Event* individuato. Il *Top Event* considerato è il rilascio di una sostanza infiammabile volatile dal serbatoio, provocato da diverse cause che in seguito verranno individuate e analizzate.

La procedura di analisi inizia con l'individuazione dei sistemi coinvolti nell'analisi e le loro parti, continuando con i sottosistemi e gli apparati, fino ad arrivare al guasto dei componenti singoli (guasto primario), ovvero l'elemento base, il cui malfunzionamento dipende solo dall'elemento in sé e non da guasti di ulteriori componenti o apparecchi.

Questa metodologia consente di individuare anche il contributo derivante dagli errori umani, così come guasti comuni a più sottosistemi, per poter focalizzare l'attenzione su misure preventive e per ridurre la probabilità di incidente.

Procedendo con lo sviluppo dell'analisi e dopo aver individuato i guasti primari che combinati determinano i guasti intermedi, sono stati individuati i possibili guasti che possono portare al rilascio di una sostanza dal serbatoio.

I guasti individuati sono:

- rottura della tubazione in ingresso e/o in uscita dovuta a motivi meccanici, come una cricca o foro che possono causare perdite. L'altra causa individuata è dovuta all'evento sismico che con il movimento del suolo può causare disconnessioni dei giunti oppure comportare rotture a causa della caduta di pezzi di struttura o apparecchiature.
- guasto della valvola in ingresso che può modificare il flusso della sostanza causando una quantità maggiore rispetto al massimo o minimo consentito. Il guasto di questo componente può essere dovuto da un malfunzionamento della valvola di controllo, un guasto al sistema manuale dovuto all'errore umano o al

malfunzionamento dei sistemi di allarme collegati al sistema di misurazione L1 o L2 o della valvola solenoidale

- guasto della valvola di controllo in uscita può causare uno svuotamento minore della condotta in uscita dal serbatoio e quindi di conseguenza un livello di liquido maggiore del previsto al suo interno. Può essere dovuto da un guasto alla valvola di controllo, ad un errore dell'operatore, ad un guasto al sistema di svuotamento di emergenza 2, un malfunzionamento del sistema di controllo L2 o della valvola solenoidale.
- la rottura del serbatoio per sovrappressioni a causa del sistema di svuotamento di emergenza 1 che può essere dato dai misuratori di pressione o ad un guasto al disco di rottura. La rottura per sovrappressione può essere dovuta anche ad un guasto del sistema di raffreddamento che porterebbe ad un aumento della temperatura all'interno del serbatoio. Un'ulteriore tipologia di rottura del serbatoio può essere data dal sisma.

Di seguito, sono stati quantificati e riportati i tassi di guasto dei componenti per poter quantificare, tramite gli operatori logici OR e AND, la probabilità di accadimenti annui del Top Event. La probabilità di guasto viene calcolata tramite la relazione di *Weibull*:

$$P(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (6.1)$$

Per ogni componente e modalità di guasto, viene calcolata la probabilità di guasto, partendo dal tasso di guasto fornito dalla letteratura e dalla vita utile del serbatoio considerata pari a 50 anni (Tab. 6.1).

Componente e modalità di guasto	Tasso di Guasto (1/t)	Probabilità di guasto in 50 anni
1.Tubo		
1.1 Perdita	2,01E-06	1,00E-04
1.2 Rottura	2,98E-07	1,49E-05
2 Valvola bloccata	2,29E-02	6,82E-01
2.1 Guasto valvola solenoidale		
2.1.1 Guasto Meccanico	2,28E-03	0,11
2.2 Guasto svuotamento emergenza		
2.2.1 Mancato intervento	5,90E-02	0,95
2.2.2 Intervento fuori specifica	8,32E-03	0,34
2.3 Valvola di sicurezza		
2.3.1 Mancato intervento	5,43E-04	0,027
2.3.2 Valvola otturata	7,53E-03	0,31
2.3.3 Guasto taratura	2,19E-02	0,66

3 Guasto misuratore pressione P1, P2		
3.1 Mancato intervento	5,52E-03	0,24
3.2 Intervento fuori specifica	5,78E-03	0,25
4 Guasto misuratore temperatura T1, T2		
4.1 Mancato intervento	2,27E-02	0,68
4.2 Intervento fuori specifica	8,76E-03	0,35
5 Guasto misuratore livello L1, L2	1,06E-02	0,41
6 Guasto PRV		
6.1 Mancato intervento	5,43E-04	0,027
6.2 Valvola otturata	7,53E-03	0,31
6.3 Guasto taratura	2,19E-02	0,66
7 Guasto disco di rottura	1,00E-02	0,39
8 Errore umano	1,00E-03	0,049
9 Guasto allarme	4,40E-02	0,89
10 Guasto linea elettrica	3,07E-01	1,00
10 Guasto meccanico pompa	1,93E-01	0,99
11 Guasto allarme pompa	4,40E-02	0,89
12 Rottura serbatoio	9,64E-06	4,82E-04
13 Control valve, intervento fuori specifica	7,27E-03	3,05E-01

Tab. 6.1: Tassi di guasto e probabilità dei componenti del serbatoio in 50 anni.

Il tasso di guasto, in funzione del tempo, vengono suddivisi in:

- “infantili”: dovuti a difetti ed imperfezioni, che se presenti si rilevano nella prima fase di vita del componente;
- “casuali”: avvengono durante il periodo di vita utile;
- “da usura”: durante l’ultimo periodo di vita del componente a causa del suo deterioramento.

Un parametro legato al tasso di guasto e chiamato tempo medio fra due guasti consecutivi di un componente (in inglese *mean time between failures*, abbreviato MTBF) è il parametro che consente di individuare l’affidabilità di dispositivi meccanici ed elettronici.

Viene calcolato mediante l’equazione (6.2):

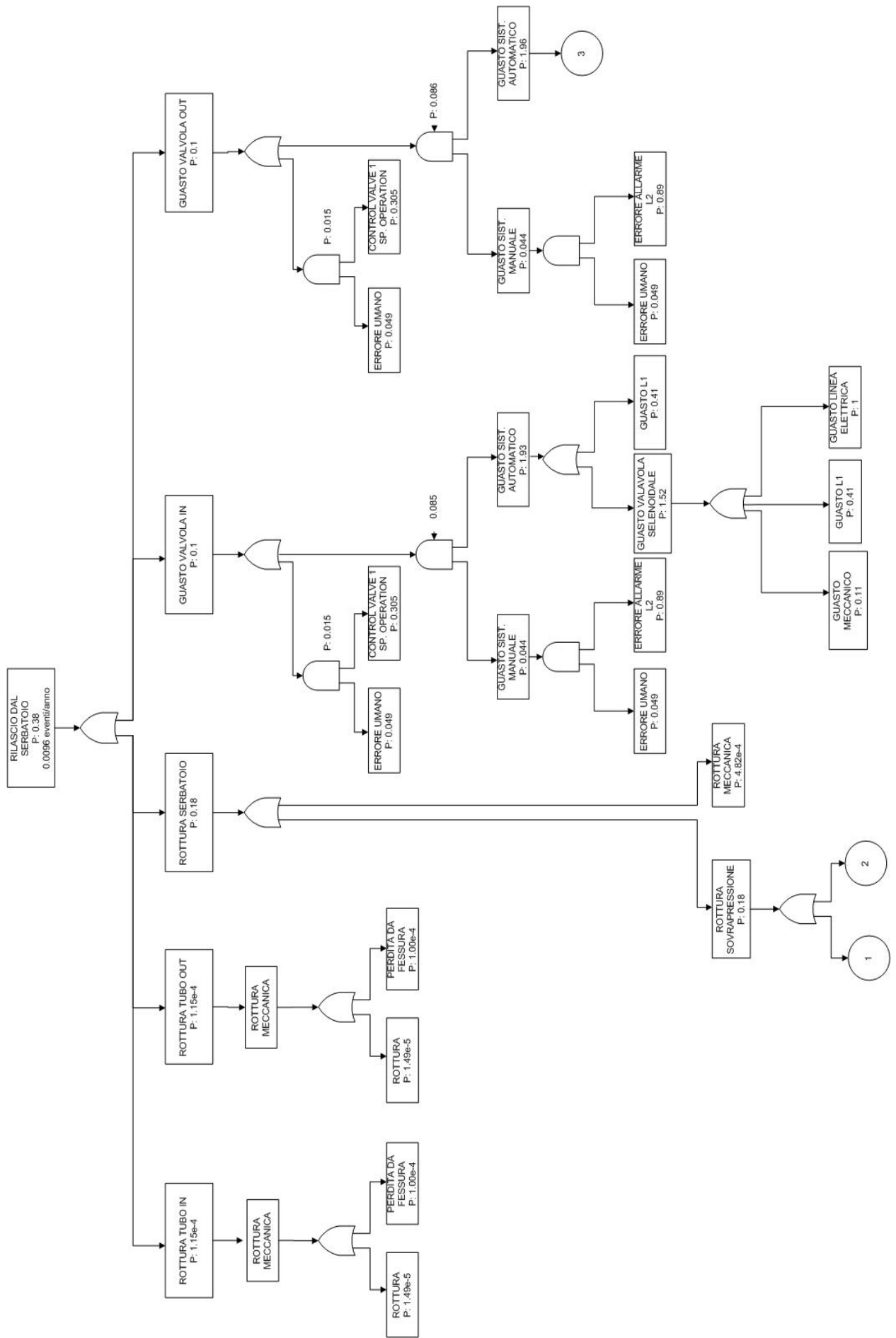
$$MTBF = 1/\mu \quad (6.2)$$

Nell'elaborazione dell'albero sono stati considerati tutte le tipologie di guasto meccanico, manuale ed elettrico, senza considerare l'incremento dovuto dal guasto a causa del sisma, ottenendo un valore di probabilità pari a 0.38 e 0.0096 eventi/anno.

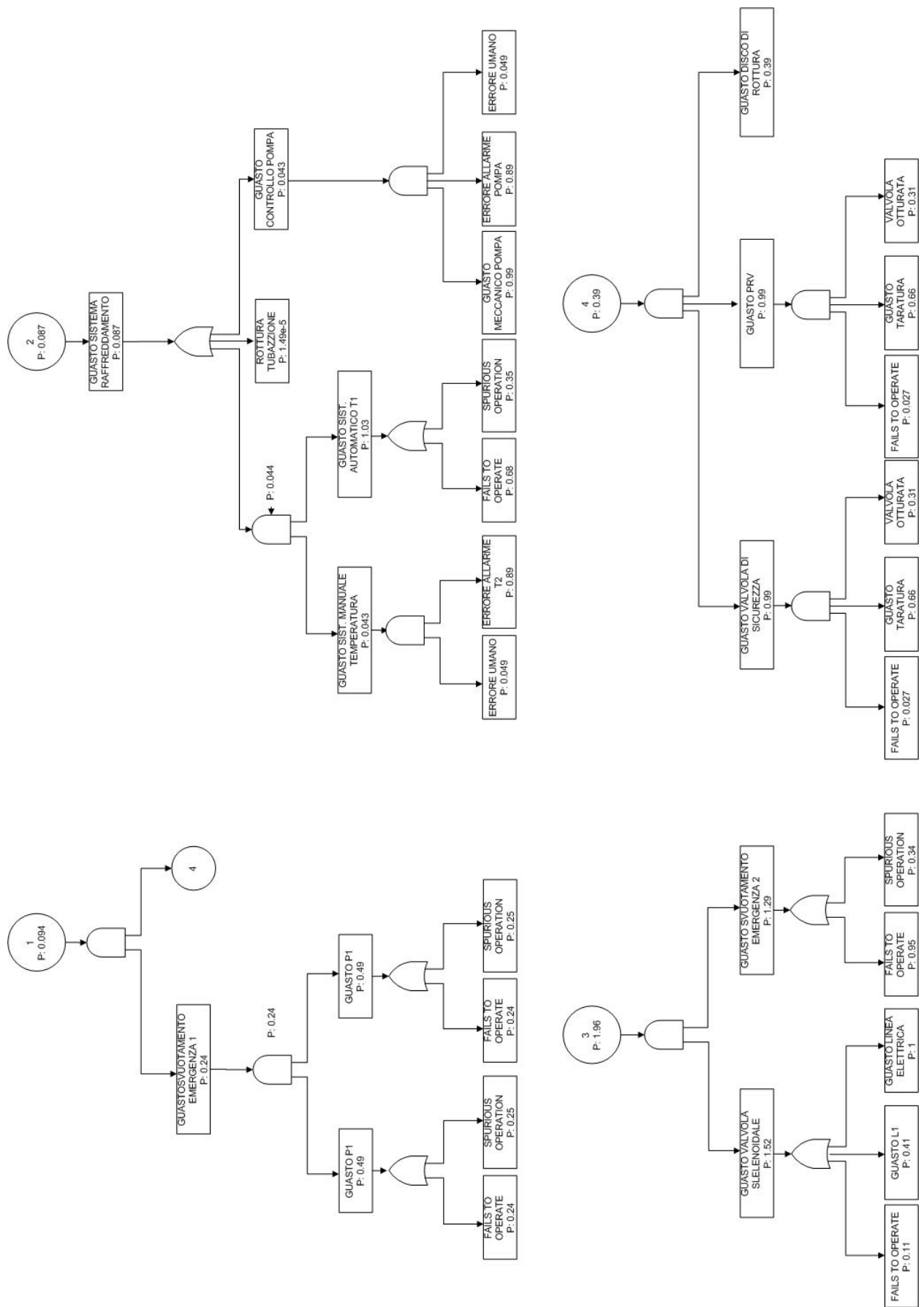
Nello sviluppo dell'albero dei guasti è possibile notare in quale dei rami si ha una maggiore probabilità di accadimento; nel caso analizzato, si può individuare quale di questi sia il più vulnerabile e quindi necessita maggiormente di presidi di sicurezza.

In tal modo, l'analisi consente di individuare anche gli interventi più idonei per agire sulla vulnerabilità di questi rami così come illustrato in seguito.

Nella figura 6.1 si può notare lo sviluppo dell'albero dei guasti del *Top Event* considerato, con l'individuazione dei possibili componenti che si possono guastare e le varie cause. Ad ogni evento base è stata associata la probabilità di guasto e sommandole o moltiplicandole tra loro si calcola la probabilità degli eventi intermedi fino ad arrivare alla probabilità di accadimento del *Top Event*.



(a)



(b)

Figura 6.1: Albero dei guasti (a) e (b) di un serbatoio pressurizzato criogenico contenente una sostanza infiammabile volatile escludendo l'effetto del sisma

6.2 Primo caso studio - a) albero dei guasti con evento sismico, n-pentano

Per procedere con l'analisi quantitativa dell'albero dei guasti del serbatoio, come affermato nella sezione 5.1, è stato necessario calcolare lo spettro di risposta elastico per un sito, le cui ordinate di accelerazione spettrale probabilistica e deterministica a breve e lungo periodo sono rispettivamente $T = 0,2$ s e $T = 1,0$ s (NEHRP 2009; ASCE 7-10). I valori riportati nella tabella 6.2.1, sono stati inseriti nello script *Matlab spettro_orizzontale* (App1.1) per il calcolo dello spettro orizzontale riportato nella figura 6.2 di seguito inserita.

Grandezza	Simbolo	Valore
Ordinate spettrali di rischio uniforme USGS	S_{SUH}	1.31 g
	S_{1UH}	0.55 g
Coefficienti di rischio a breve periodo	CRS	0.99
	$CR1$	0.96
Periodo di transizione di lungo periodo	TL	6 s
Fattori correttivi di sito	SS	1
	$S1$	1.3

Tab. 6.2.1: Dati per il calcolo dello spettro di design elastico

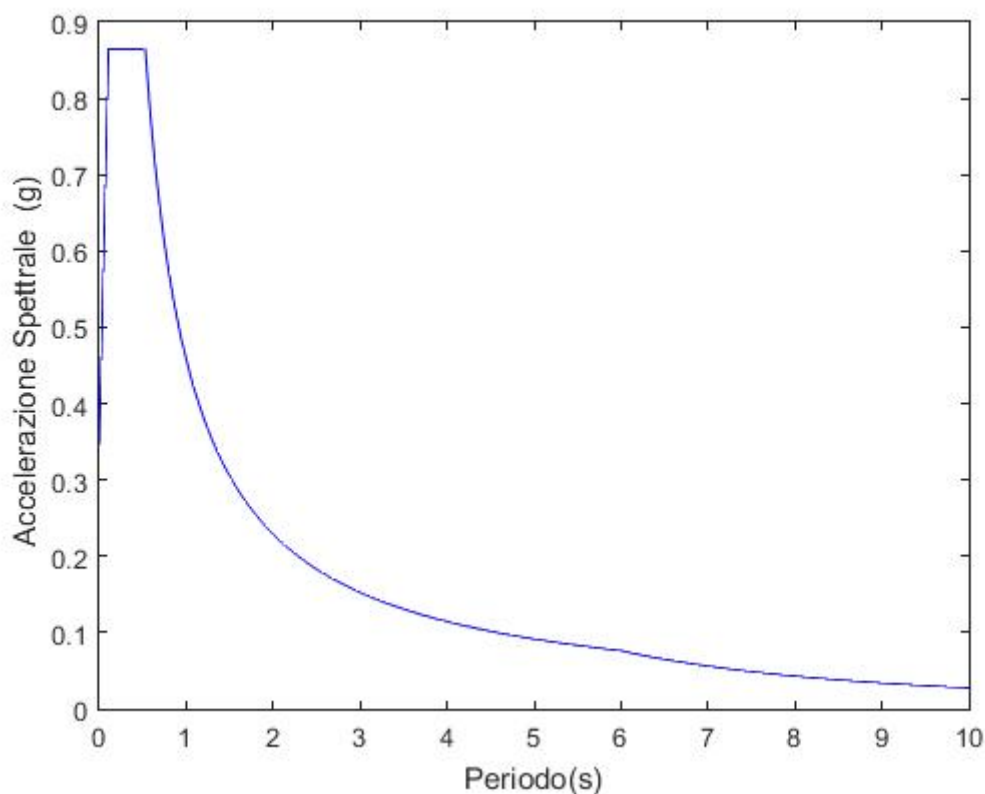


Figura 6.2.1: *Spettro di design elastico orizzontale su disposizioni NEHRP e standard ASCE 7*

Si procede calcolando il tempo di vibrazione della struttura (periodo caratteristico, T). I dati strutturali sono per il caso in esame, sono riportati nella sezione 4.3.

La sostanza infiammabile e volatile che è stoccata all'interno del serbatoio alla pressione di 1,8 atm e 283 K è il n -pentano (C_5H_{12}). I relativi valori di densità delle due fasi sono di seguito riportati:

$$\rho_{n-C_5,v} = 2.49 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{n-C_5,l} = 629.86 \text{ kg/m}^3.$$

Inserendo i dati e utilizzando lo script Matlab® *periodo_vibrazione_tank* (appendice 1.2), si ottengono i due tempi di vibrazione per due differenti gradi di riempimento, ovvero 0.2 (20% del volume) e 0.8 (80% del volume).

Riempimento	Periodo T(s)
0.2	0.1265
0.8	0.1282

Tabella 6.2.2: *Periodo di vibrazione del serbatoio in funzione del grado di riempimento.*

Dai risultati ottenuti, confermati anche per il caso di serbatoio contenente acetato di metile della sezione 6.3, il periodo di vibrazione del serbatoio non dipende dal contenuto del serbatoio, ma principalmente dalla massa della struttura.

Avendo calcolato il tempo di risonanza della struttura e precedentemente lo spettro di risposta elastica si è potuto individuare l'accelerazione di soglia pari a 0.88g. Con il valore dell'accelerazione spettrale è stato possibile calcolare la probabilità di accadimento del sisma, che come si può notare dal grafico Fig. 6.2.2, subisce una diminuzione della probabilità di accadimento all'aumentare della distanza dalla sorgente.

Inizialmente si è deciso di considerare un sisma con un valore di magnitudo pari a 7, in quanto lo si ritiene sufficientemente alto per un terremoto, in quanto corrisponde ad un parametro di accelerazione spettrale del suolo pari a 0.761g.

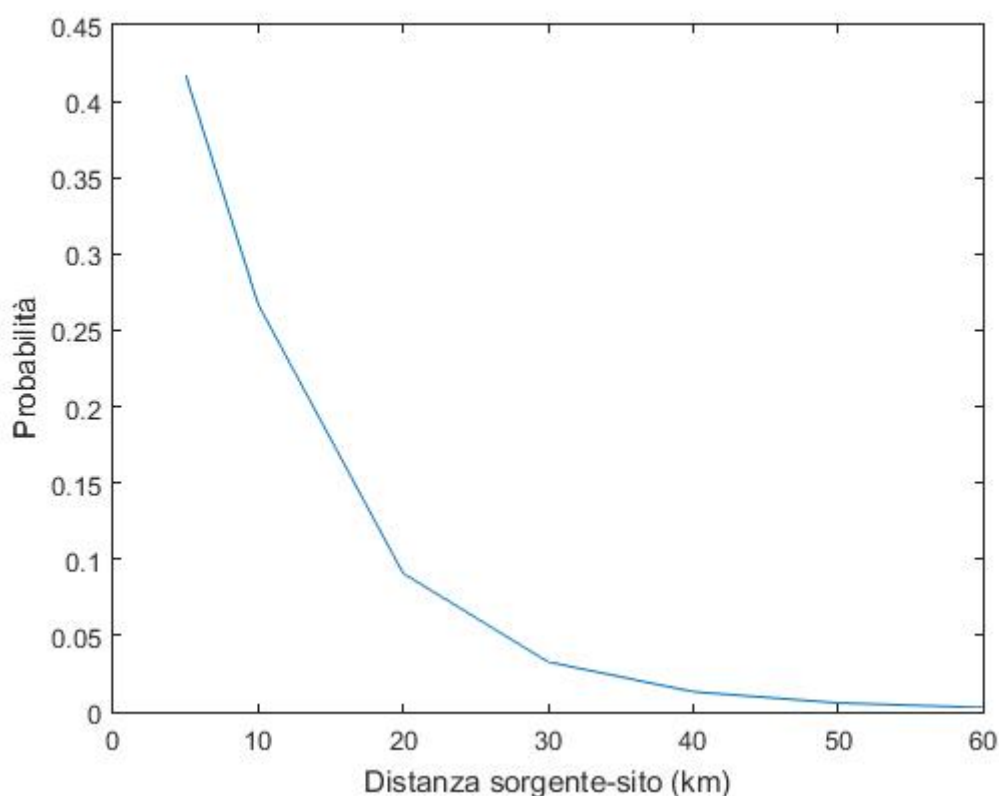


Figura 6.2.2: Grafico relativo alla probabilità di accadimento di un terremoto di magnitudo 7 con una distanza sorgente-sito da 2 a 60 km.

Sono state considerate le probabilità del sisma considerando la distanza sito-sorgente pari a 20 km e 50 km con le probabilità che valgono rispettivamente 0.0908 e 0.00585. Queste

probabilità verranno inserite nello sviluppo dell'albero dei guasti nelle voci indicati dalla rottura sismica.

Nella tabella 6.2.3 sono stati riportate le probabilità di accadimento del *Top Event* per eventi sismici che si sviluppano alla distanza dallo stabilimento di 20 e 50 chilometri.

	Probabilità di accadimento senza evento sismico	Probabilità di accadimento con evento sismico
Distanza sorgente-sito 50 km		
<i>Top Event</i>	0.38	0.42
Guasto valvola in ingresso	0.1	0.11
Guasto valvola in uscita	0.1	0.11
Guasto tubazione entrata	1.15 e-4	0.006
Guasto tubazione uscita	1.15 e-4	0.006
Rottura serbatoio	0.18	0.19
Distanza sorgente-sito 20 km		
<i>Top Event</i>	0.38	0.83
Guasto valvola in ingresso	0.1	0.19
Guasto valvola in uscita	0.1	0.19
Guasto tubazione entrata	1.15 e-4	0.09
Guasto tubazione uscita	1.15 e-4	0.09
Rottura serbatoio	0.18	0.27

Tab. 6.2.3: *Probabilità di accadimento del Top Event e dei guasti intermedi degli alberi dei guasti relativi al caso studio del n-pentano con distanza tra sorgente e sito di 20 e 50 km.*

Utilizzando la relazione del MTBF riportata nell'espressione 6.2 si è potuto calcolare gli anni che statisticamente dovrebbero trascorrere tra l'accadimento di questi due *Top Event*:

Distanza (Km)	Probabilità accadimento <i>Top Event</i>	Accadimenti/ 50 anni <i>Top Event</i>	MTBF (anni)
20	0.83	1.77	28.25
50	0.42	0.53	91.8

Tab. 6.2.4: *Probabilità di accadimento del Top Event con distanza epicentro-sito di 20 e 50 km.*

La tabella 6.2.4 mostra come il *Top Event*, ad una distanza di 20 chilometri dovrebbe accadere 1.77 volte ogni 50 anni con un tempo di ritorno di 28.25 anni, invece per una

distanza maggiore tra sorgente e sito, ovvero pari a 50 km dovrebbe accadere con una probabilità di 0.53 ogni 50 anni e succedere ogni 91.8 anni.

Nella Figura 6.2.3 è illustrato lo sviluppo dell'albero dei guasti di un serbatoio che contiene n-pentano, è stato riportato solo il grafico 6.2.3 (a), in quanto lo sviluppo del grafico 6.2.3 (b) coincide con l'albero dei guasti riportato alla figura 6.1 (b).

Si è deciso di calcolare la probabilità di accadimento del *Top Event* anche per valori di magnitudo più bassi, ovvero pari a 6 e 4 che corrispondono rispettivamente a valori di accelerazioni spettrali pari a 0.204g per una distanza sorgente sito di 20 km e 0.024 g per la medesima distanza.

Nel caso di un sisma con magnitudo pari a 6 si può notare un significativo incremento della probabilità di accadimento del *Top Event* (Fig. 6.2.5).

Considerando l'evento sismico con una magnitudo pari a 4, la probabilità di accadimento alla distanza tra sorgente e sito di 20 km si ha un valore pari a $9.53 \cdot 10^{-8}$ che non va a modificare il valore finale di accadimento del *Top Event*.

	Probabilità di accadimento con evento sismico (M=6)	Probabilità di accadimento con evento sismico (M= 4)
Distanza sorgente-sito 50 km		
<i>Top Event</i>	0.382	0.38
Guasto valvola in ingresso	0.1	0.1
Guasto valvola in uscita	0.1	0.1
Guasto tubazione entrata	3.1 e-4	1.15 e-4
Guasto tubazione uscita	3.1 e-4	1.15 e-4
Rottura serbatoio	0.181	0.18
Distanza sorgente-sito 20 km		
<i>Top Event</i>	0.48	0.38
Guasto valvola in ingresso	0.12	0.1
Guasto valvola in uscita	0.12	0.1
Guasto tubazione entrata	0.018	1.15 e-4
Guasto tubazione uscita	0.018	1.15 e-4
Rottura serbatoio	0.20	0.18

Tab. 6.2.5: Probabilità di accadimento del *Top Event* e dei guasti intermedi degli alberi dei guasti relativi al caso studio del n-pentano con distanza tra sorgente e sito di 20 e 50 km e magnitudo pari a 6 e 4.

6.3 Primo caso studio - b) albero dei guasti con evento sismico, acetato di metile

Si considera il serbatoio contenente acetato di metile ($C_3H_6O_2$), sostanza estremamente infiammabile e volatile, stoccata alla temperatura di 283 K e alla pressione di 1.8 atm, con due densità delle due fasi pari a:

$$\rho_{C_3H_6O_2,v} = 2.6 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{C_3H_6O_2,l} = 947.7 \text{ kg/m}^3$$

Si calcola il periodo di vibrazione del serbatoio per poter individuare l'accelerazione spettrale soglia che porta alla risonanza della struttura, calcolato con lo script Matlab® *periodo_vibrazione_tank* (App.1.2) inserendo in input i dati inseriti nella sezione 4.3, compreso di grado di riempimento, densità del liquido e del vapore.

Grado di Riempimento	Periodo T (s)	Accelerazione Spettrale (g)
0.2	0.0683	0.6813
0.8	0.0687	0.6823

Tab. 6.3.1: *Periodo di vibrazione serbatoio e accelerazione spettrale in funzione del grado di riempimento.*

Con i dati ottenuti in tabella 6.3.1 dell'accelerazione spettrale, è possibile calcolare la probabilità di accadimento del sisma con lo script Matlab® *probabilita_sisma* utilizzando, come affermato nella sezione 6.2, le equazioni di previsioni del moto riportata nell'espressione 5.4, la deviazione standard, la magnitudo desiderata e la distanza sorgente-sito desiderata.

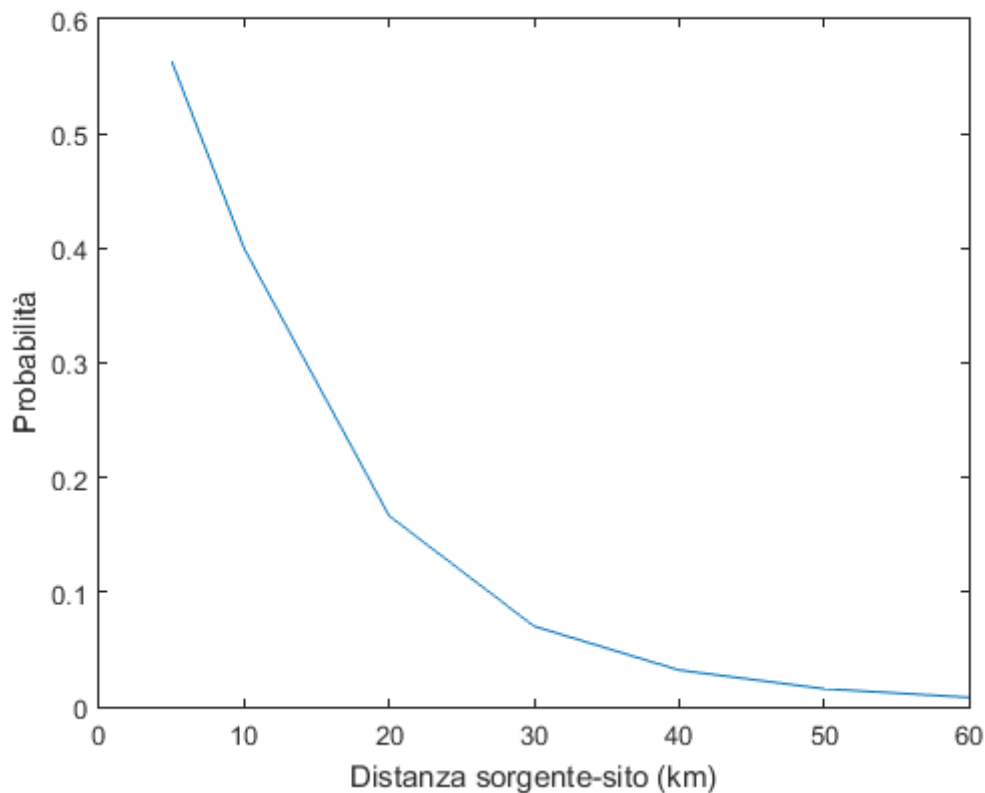


Fig. 6.3.1: *Probabilità di accadimento di un terremoto di magnitudo 7 con una distanza sorgente-sito da 2 a 60 km.*

Nella figura 6.3, si può notare come la probabilità di accadimento diminuisca con la distanza tra sorgente e sito. I valori che si ottengono riguardanti la probabilità di accadimento valgono 0.11 e 0.02 rispettivamente per distanze pari a 25 e 50 km.

Le probabilità di accadimento vengono inserite all'interno dell'albero dei guasti andando a modificare il valore di eventi annui del Top Event, come si può vedere in Tab. 6.3.2.

	Probabilità di accadimento senza evento sismico	Probabilità di accadimento Con evento sismico
Distanza sorgente-sito 50 km		
<i>Top Event</i>	0.38	0.48
Guasto valvola in ingresso	0.1	0.12
Guasto valvola in uscita	0.1	0.12
Guasto tubazione entrata	1.15 e-4	0.02
Guasto tubazione uscita	1.15 e-4	0.02
Rottura serbatoio	0.18	0.2
Distanza sorgente-sito 25 km		
<i>Top Event</i>	0.38	0.93
Guasto valvola in ingresso	0.1	0.21
Guasto valvola in uscita	0.1	0.21
Guasto tubazione entrata	1.15 e-4	0.11
Guasto tubazione uscita	1.15 e-4	0.11
Rottura serbatoio	0.18	0.29

Tabella 6.3.2: Probabilità di accadimento del Top Event e dei guasti intermedi degli alberi dei guasti relativi al caso studio dell'acetato di metile con distanza tra sorgente e sito di 25 e 50 km.

Nella Figura 6.3.1 (a), sono stati inseriti nei rami dell'albero dei guasti la componente che conteggia la probabilità della rottura sismica; è stata conteggiata la rottura di tipo sismico nei rami delle tubazioni, del serbatoio e delle valvole. Come precedentemente riportato, si inserisce il confronto in Tabella 6.3.3 della probabilità di accadimento del *Top Event*, con evento sismico, alle distanze di 25 e 50 chilometri tra lo stabilimento e l'epicentro.

Distanza (km)	Probabilità accadimento <i>Top Event</i>	Accadimenti/ 50 anni <i>Top Event</i>	MTBF (anni)
25	0.77	1.47	34.0
50	0.48	0.65	76.46

Tabella 6.3.3: *Probabilità di accadimento del Top Event con distanza epicentro-sito di 25 e 50 km.*

Nella Tabella 6.3.3 sono evidenziati gli accadimenti del *Top Event* ogni 50 anni, che per un evento sismico che colpisce uno stabilimento ad una distanza di 25 chilometri ogni 34,0 anni, ovvero 1.47 volte ogni 50 anni.

6.4 Primo caso studio - albero degli eventi con evento sismico

L'analisi dell'albero degli eventi è una metodologia quantitativa e deduttiva (ETA – *Event Tree Analysis*) che consente di individuare la probabilità di accadimento di un esito previsto partendo da un evento iniziatore.

L'evoluzione temporale viene rappresentata in forma grafica e il suo flusso verso gli altri esiti finali segue una determinata sequenza che tiene in considerazione l'intervento o meno di determinate circostanze. L'albero degli eventi è stato costruito considerando il *Top Event* o evento iniziatore (coincidente all'albero dei guasti precedentemente trattato), le misure di protezione, le circostanze avverse e gli esiti finali.

Per poter dare un confronto completo dei vari casi, si partirà dallo sviluppo dell'albero degli eventi senza la presenza del sisma. In tabella 6.4.1 sono stati riportate i tassi di successo delle funzioni di successo e degli eventi avversi.

	Tasso di successo senza evento sismico μ
<i>Top Event</i>	0.48 (accadimenti/50anni)
Innesco Immediato	0.05
Innesco ritardato	0.18
Sistemi Antincendio (<i>sprinkler</i>)	0.88
Campo esplosivo (VCE)	0.16
Barriera di Contenimento	0.50

Tabella 6.4.1: *Tassi di successo albero degli eventi senza evento sismico⁶.*

La quantificazione degli esiti finali avviene componendo i tassi riportati in Tabella 6.4.1, relativi alle funzioni di sicurezza e agli eventi avversi, partendo dall'evento iniziatore.

Ogni ramificazione dell'albero degli eventi avrà il proprio valore di accadimento ogni 50 anni e il procedimento di raggiungimento di questo risultato si ha moltiplicando tutti i tassi di guasto tra loro.

Ad esempio, per il ramo dell'innescio immediato, sistema antincendio e barriera di contenimento corrisponderà un tasso di guasto ottenuto dal seguente calcolo:

⁶ U.S. Experience with Sprinklers. National Fire Protection Association (luglio 2017).

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_{TopEvent} \cdot \mu_{innescoimmediato} \cdot \mu_{sistemiantincendio} \\ &\quad \cdot \mu_{barrieradicontenimento} \end{aligned} \tag{6.4}$$

$$= 0.48 \cdot 0.05 \cdot 0.88 \cdot 0.50 = 0.01 \text{ accadimenti/ 50 anni}$$

Il risultato dell'equazione 6.4 esprime il concetto che l'esito finale della catena relativa al successo degli eventi seguenti al *Top Event* potrà statisticamente accadere 0.01 volte/ 50 anni.

Nella Figura 6.4.1 è stato riportato lo sviluppo dell'albero degli eventi senza tenere in considerazione la presenza del sisma.

Dall'analisi dell'albero degli eventi è possibile osservare che, nel periodo di 50 anni, gli scenari di incendio controllato confinato e incendio controllato non confinato presentano probabilità di accadimento di circa l'1%, l'esplosione controllata confinata e l'*UVCE* presentano una probabilità dello 0.08 %, il *flash fire* confinato e non confinato presentano invece una probabilità del 4.2 % maggiore rispetto agli altri scenari ipotizzati mentre si ha la probabilità del 38% che nell'arco dei 50 anni non accada nessun effetto conseguente al *Top Event*.

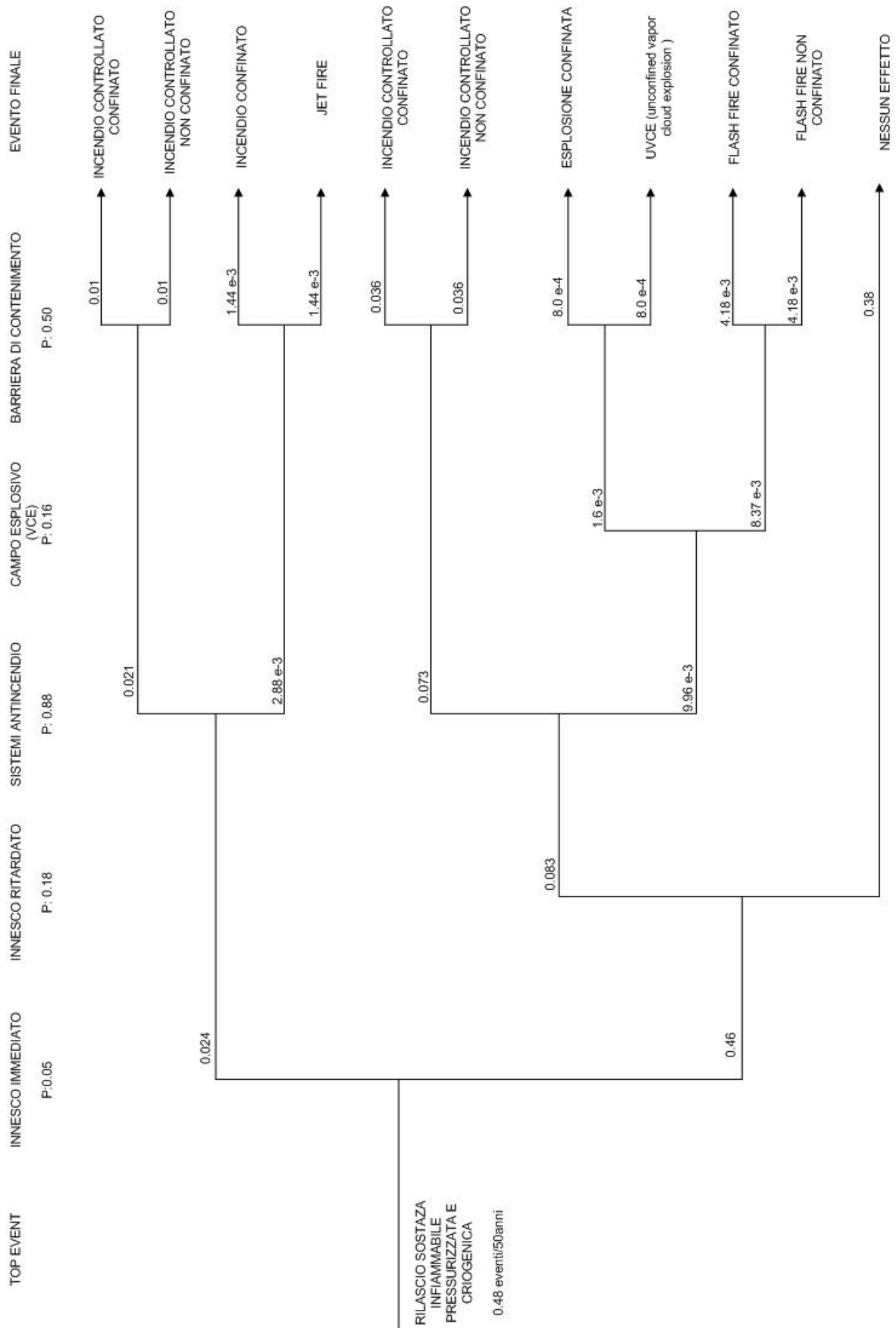


Figura 6.4.1: Albero degli eventi relativo al serbatoio pressurizzato criogenico contenete un liquido infiammabile volatile in assenza di sisma.

Vengono ora analizzati i casi sviluppati nelle sezioni 6.2 e 6.3, che indagano la probabilità di accadimento del Top Event per serbatoi contenenti n-pentano e acetato di metile.

I tassi di successo presenti nell'albero degli eventi sono sensibili al contesto che li circonda. In particolare con questa affermazione ci si riferisce ai tassi di successo legati ai sistemi antincendio e alla barriera di contenimento, in quanto si ipotizza che i tassi successi relativi all'incendio immediato e ritardato e del campo esplosivo rimangano invariati.

L'evento sismico può contribuire all'accadimento del *Top Event*, ovvero il rilascio, ma anche condizionare l'evoluzione incidentale, causando danni anche ai sistemi di prevenzione e protezione come:

- danneggiare le condotte di alimentazione degli *sprinkler* e di conseguenza renderli inutilizzabili;
- danneggiare la barriera di contenimento, costituito da muro in cemento e non garantendone l'isolamento dal terreno;
- danneggiare le valvole, normalmente chiuse, per il drenaggio all'impianto trattamento acque, le pompe di trasferimento e i pertinenti sistemi di intercettazione.

Dato che non sono disponibili statistiche relative ai guasti in seguito ad un evento sismico, si è ipotizzato, come nello sviluppo dell'albero dei guasti, che la probabilità di guasto sia pari alla probabilità di accadimento del terremoto con magnitudo 7 e con l'accelerazione spettrale individuata per il caso specifico analizzato.

In Tabella 6.4.2 sono stati riportati i tassi di successo nel caso di un serbatoio contenente n-pentano in cui si può notare una diminuzione dei tassi di successo pari alla probabilità di accadimento del sisma considerato.

I tassi di successo che subiscono una modifica in caso di evento sismico sono quelli relativi al sistema antincendio e alla barriera di contenimento. Dato che la probabilità di accadimento di una rottura di tipo sismico è stata associata alla probabilità di accadimento del sisma ed è inversamente proporzionale all'aumento della distanza, si avranno valori di tasso di guasto prossimi alle condizioni standard per grandi distanze tra sorgente-sito oppure per magnitudo medio-piccole, così come indicato in Tabella 6.2.5.

	Tasso di successo con evento sismico μ Distanza 20 km	Tasso di successo con evento sismico μ Distanza 50 km
<i>Top Event</i>	1.84 (accadimenti/50anni)	0.53(accadimenti/50anni)
Innesco Immediato	0.05	0.05
Innesco ritardato	0.18	0.18
Sistemi Antincendio (<i>sprinkler</i>)	0.7892	0.874
Campo esplosivo (VCE)	0.16	0.16
Barriera di Contenimento	0.409	0.494

Tabella 6.4.2: *Tassi di successo albero degli eventi con evento sismico*

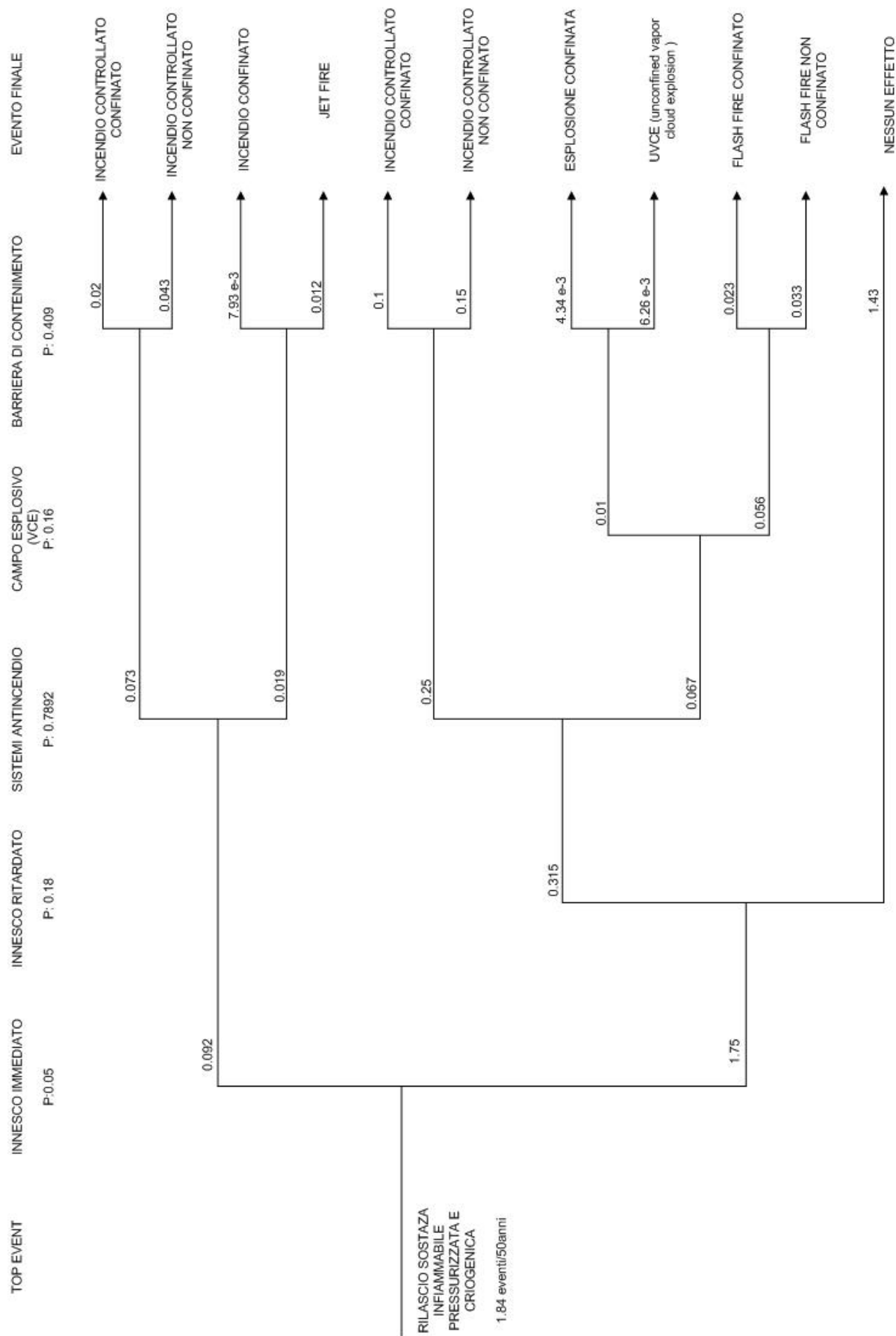


Figura 6.4.2: Albero degli eventi con l'effetto del sisma relativo al serbatoio di stoccaggio contenente n-pentano con distanza sorgente sito di 20 km.

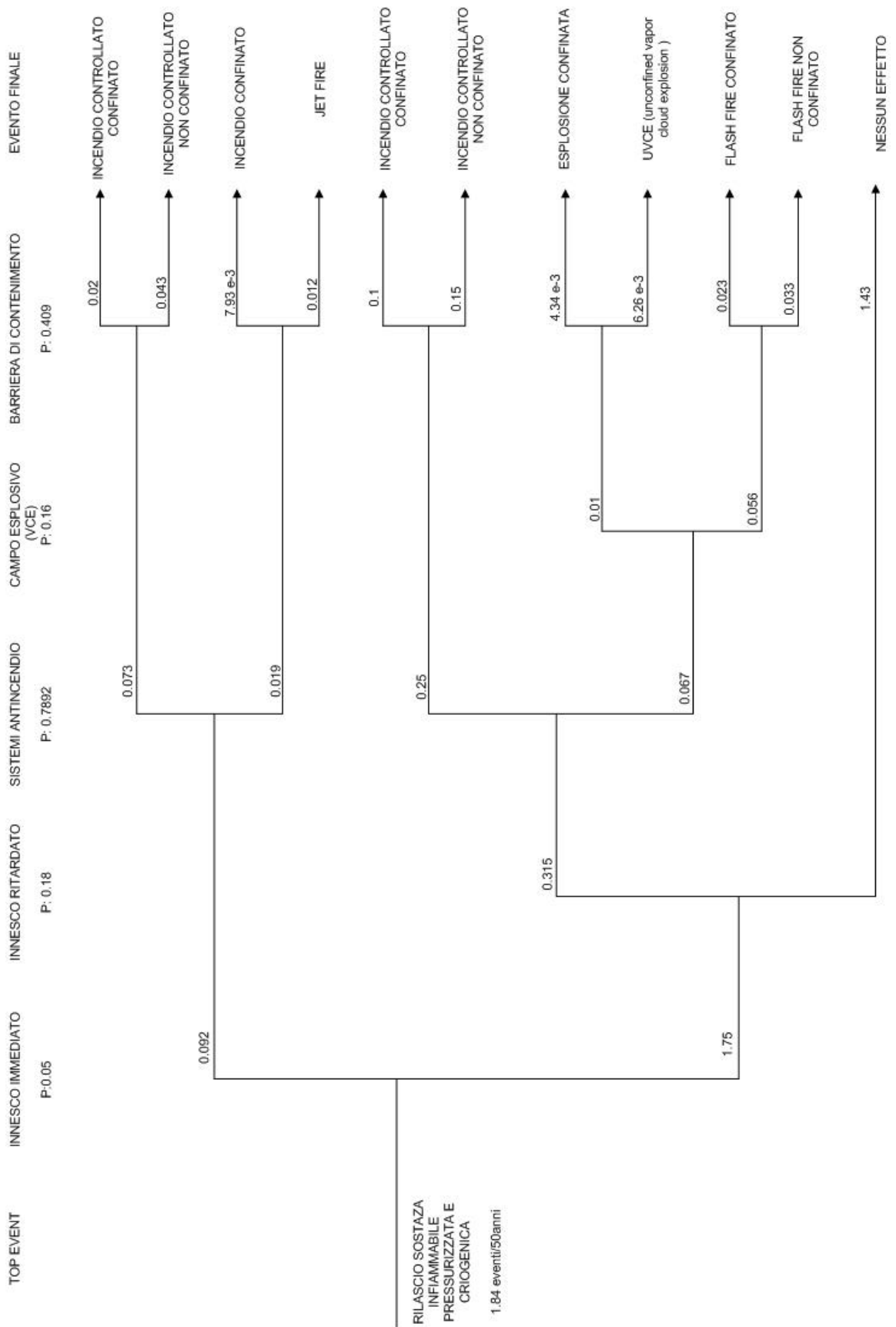


Figura 6.4.3: Albero degli eventi contenente l'effetto del sisma relativo al serbatoio di stoccaggio contenente n-pentano con distanza sorgente sito di 50 km

Si può notare dall'analisi dei due alberi riportati in figura 6.4.2 e 6.4.3, nei quali si considera anche la presenza del sisma, che nello sviluppo dell'albero ad una distanza sorgente-sito di 50 km esiste una differenza tollerabile rispetto allo sviluppo dell'albero degli eventi svolto in figura 6.4.1 in cui non si ha la presenza del sisma. Maggiormente accentuata è la probabilità di accadimento nel caso considerato con una distanza tra sorgente e sito pari a 20 km.

Allo stesso modo si procede con lo sviluppo dello studio per il caso del serbatoio di stoccaggio contenente acetato di metile, i cui tassi di successo vengono riportati in Tabella 6.4.3 che considerano la presenza del sisma ipotizzando che la probabilità di guasto sia pari alla probabilità di accadimento del terremoto con magnitudo 7, distanza sorgente sito pari a 25 e 50 km e con un'accelerazione spettrale pari a 0.68 g.

	Tasso di successo con evento sismico μ Distanza 25 km	Tasso di successo con evento sismico μ Distanza 50 km
<i>Top Event</i>	2.66 (accadimenti/50anni)	0.65(accadimenti/50anni)
Innesco Immediato	0.05	0.05
Innesco ritardato	0.18	0.18
Sistemi Antincendio (<i>sprinkler</i>)	0.77	0.86
Campo esplosivo (VCE)	0.16	0.16
Barriera di Contenimento	0.39	0.48

Tabella 6.4.3: *Tassi di successo albero degli eventi con evento sismico*

CAPITOLO 7

Secondo caso studio: Inserimento di isolamento suolo – serbatoio

In questo capitolo è stato affrontato il primo step di un sistema di implementazione di misure di mitigazione del rischio sismico per un serbatoio industriale. È stata prevista l'applicazione di un sistema di isolamento tra il suolo e il serbatoio che consente di diminuire le sollecitazioni a cui sono soggetti sia la struttura e che le apparecchiature ausiliarie collegate.

7.1 Tecnica dell'isolamento sismico

L'isolamento sismico è una strategia di protezione che viene usualmente denominata “controllo passivo delle vibrazioni”. È una soluzione progettuale ormai adottata, oltre che in Italia, anche in Giappone, gli Stati Uniti e la Nuova Zelanda. Questa metodologia viene ritenuta importante anche a livello legislativo, tanto che l'argomento viene esplicitato nelle NTC08. La strategia dell'isolamento sismico ha la peculiarità di essere sia di adeguamento per le costruzioni esistenti sia per le nuove costruzioni⁷.

La progettazione si basa sulla consueta e nota disequazione di cui all'equazione 7.1:

$$R_d \geq E_d \quad (7.1)$$

dove:

- R_d : è la resistenza di progetto;
- E_d : è il valore di progetto dell'effetto delle azioni che coinvolgono la struttura.

La costruzione, sia civile che industriale, deve essere dimensionata per garantire la sicurezza dei suoi occupanti durante il terremoto, ma contemporaneamente, a seconda della classe d'uso (C_U) dell'edificio e della vita nominale della costruzione (V_N) che definiscono l'importanza della costruzione, si ammette il verificarsi di danni più o meno gravi.

Il valore di resistenza di progetto deve essere maggiore delle azioni che possono coinvolgere la struttura di un valore soglia di sicurezza che è raggiunta incrementando la capacità resistente e la duttilità delle sovrastrutture affinché questa contrasti l'azione sismica trasmessa dal suolo di fondazione alla sovrastruttura.

⁷ NTC08, 7.10: Costruzioni e ponti con isolamento e/o dissipazione.

L'isolatore sismico viene posto come intermedio tra suolo e struttura: anziché contrastare gli effetti del terremoto con opere di adeguamento sulla costruzione esistente, filtra all'origine l'azione sismica limitandone l'incidenza locale. Consente di creare una sconnessione orizzontale tra la struttura in elevazione e il suolo di fondazione, limitando così la trasmissione degli spostamenti indotti.

La funzione principale dell'isolatore sismico è quella di consentire il disaccoppiamento della sovrastruttura dalla sotto struttura, ovvero nella diversificazione del comportamento dinamico delle due parti di costruzione.

Durante l'evento sismico, il moto oscillatorio causa deformazioni di modesta entità dipendentemente dalla sua rigidezza e la sovrastruttura compie oscillazioni tanto più ampie quanto minore è la sua rigidezza e la resistenza degli isolatori. Le oscillazioni sono dovute per la maggior parte alla deformazione degli isolatori collocati al di sotto della sovrastruttura e solo una in misura minore alle deformazioni della sovrastruttura stessa.

Le NTC08 individuano diverse tipologie di dispositivi antisismici che devono sostenere adeguatamente elevati carichi verticali ed avere una bassa rigidezza o resistenza in direzione orizzontale al fine di accogliere gli spostamenti orizzontali.

L'obiettivo dei dispositivi di isolamento è quello di creare due elementi indipendenti e sconnettere l'edificio dalla fondazione, in modo tale da consentire all'edificio e alla fondazione di oscillare con due frequenze diverse, in quanto sono due corpi separati e liberi. Un edificio a base isolata dissipa molta più energia sismica di quello a base fissa, il quale assorbe totalmente il sisma.

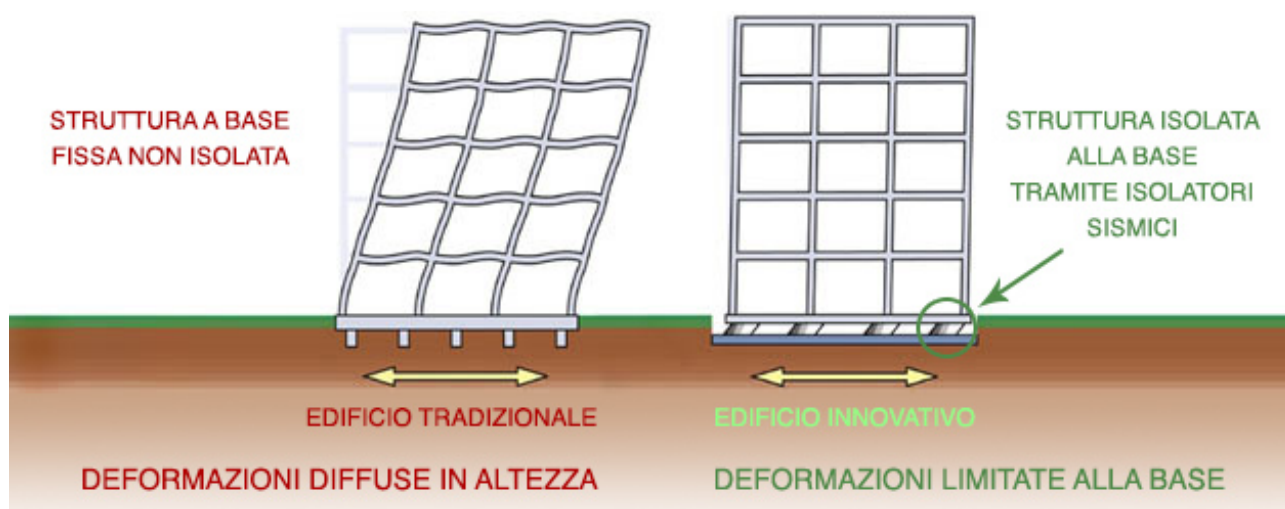


Fig. 7.1.1: *Illustrazione delle deformazioni di una struttura a seguito di un evento sismico.*

L'inserimento di isolatori antisismici del tipo a pendolo scorrevole hanno lo scopo di aumentare il periodo naturale della struttura isolata comportando una dissipazione dell'energia sismica.

Questi dispositivi sono essenzialmente di tre tipologie:

- Con una superficie di scorrimento sferica che può essere superiore o inferiore, accoppiata ad un'articolazione a calotta sferica (Fig. 7.1.2);
- Con due superfici principali di scorrimento sferiche tra le quali è posta un'articolazione a contatto puntuale (Fig.7.1.3);
- Con due superfici cilindriche ortogonali, una superiore e una inferiore tra le quali sono poste due articolazioni a sella cilindrica ortogonali (Fig.7.1.4):

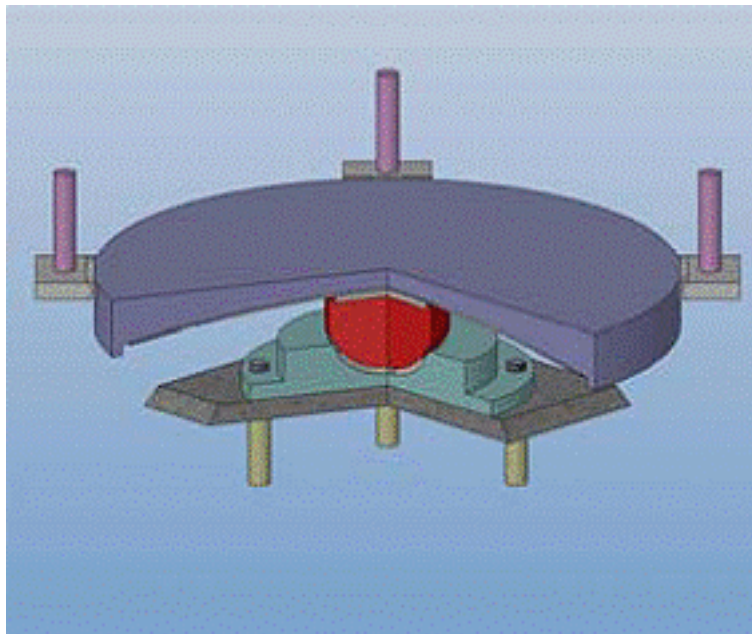


Figura 7.1.2: *Isolatore a pendolo scorrevole con una superficie di scorrimento.*

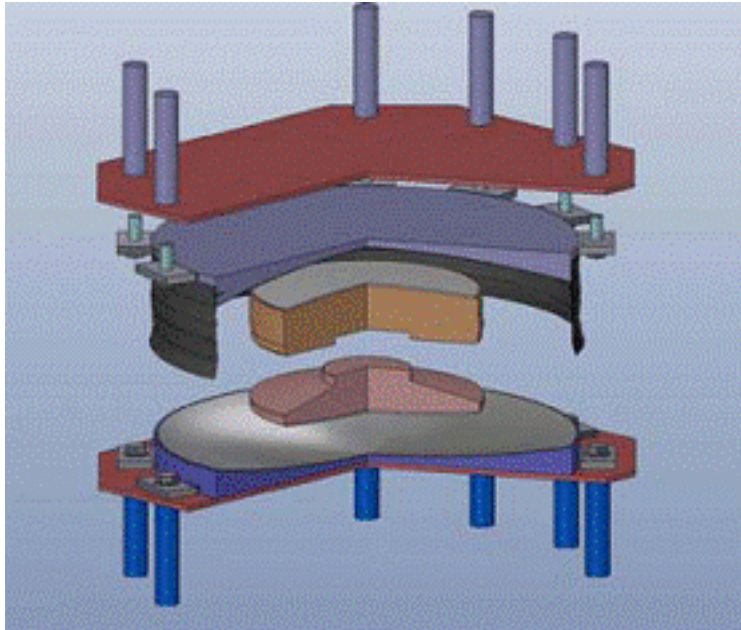


Figura 7.1.3: *Isolatore a pendolo scorrevole con due superfici di scorrimento.*

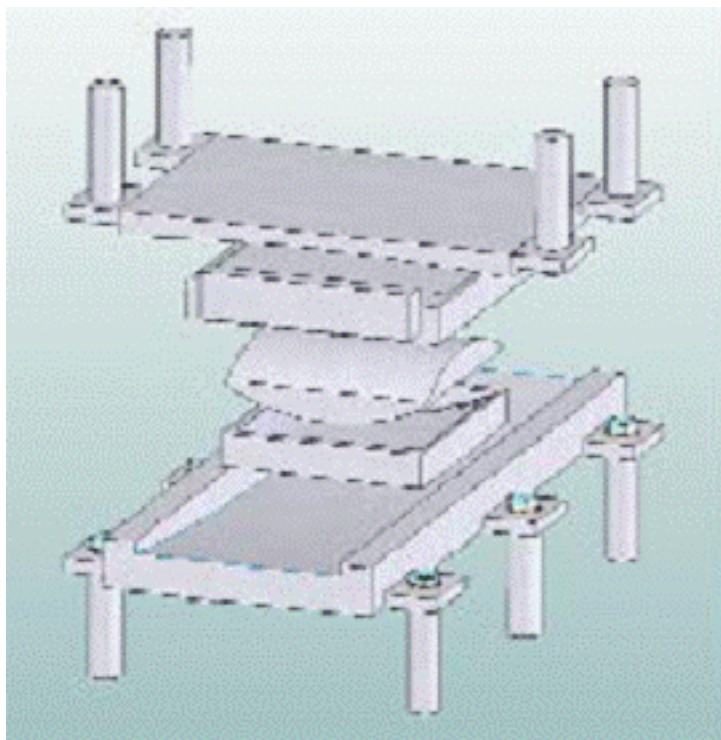


Figura 7.1.4: *Isolatore a pendolo scorrevole con due superfici di scorrimento cilindrico ortogonali.*

Da progetti effettuati da ENEA (*Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile*) si deduce che per accelerazioni del suolo inferiori a 0.25 g, risulta ancora conveniente (in termini economici) ancorare i serbatoi al terreno ed

umentare lo spessore delle pareti. In condizioni differenti, in cui l'accelerazione del suolo è compresa in valori tra 0.25 g e 0.50 g, l'isolamento sismico diviene competitivo nei confronti dell'irrobustimento tradizionale. È da notare che il costo dell'isolamento sismico non è dovuto solo agli isolatori (che comunque devono essere numerosi e piuttosto grossi a causa del notevole peso da sostenere), ma anche alla necessità di realizzare una spessa base rigida in cemento armato su cui appoggiare il serbatoio (non necessaria nel caso di fondazione convenzionale, che è sempre piuttosto blanda in questo tipo di strutture).

L'Allegato 2 delle "Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici" afferma che la verifica degli isolatori deve essere effettuata considerando uno spettro di risposta incrementato del 20 % rispetto a quello adottato per le strutture non isolate.⁸ Per questo motivo, in assenza di letteratura in questo settore, si è deciso di amplificare del 20 % lo spettro elastico orizzontale, in precedenza ottenuto con lo script *Matlab spettro_orizzontale* (App1.1) per poter procedere nell'analisi probabilistica di questa tecnica di mitigazione del sisma.

Quanto appena affermato ha consentito di calcolare la probabilità di accadimento di una rottura sismica di un serbatoio isolato dal terreno o dei suoi componenti procedendo con lo sviluppo dell'albero dei guasti per il medesimo Top Event considerato alle sezioni 6.2 e 6.3.

7.2 Caso studio II a) Albero dei guasti con evento sismico, n-pentano con isolamento serbatoio – suolo

L'applicazione di isolatori antisismici a scorrimento, come primo step di implementazione di misure antisismiche per il serbatoio, permette di evidenziarne gli effetti positivi. Sono state considerate le stesse ipotesi nella formulazione dello spettro di design elastico riportate alla sezione 6.2, tabella 6.2.1.

Utilizzando lo script *Matlab spettro_orizzontale* (App1.1), sono stati individuati i due spettri che rappresentano lo spettro standard (blu) e quello amplificato del 20 % per la verifica degli isolatori antisismici (rosso).

⁸ Giornata di studio "Sicurezza sisma degli impianti chimici a rischio di incidente rilevante, Roma, 7 Febbraio 2013;

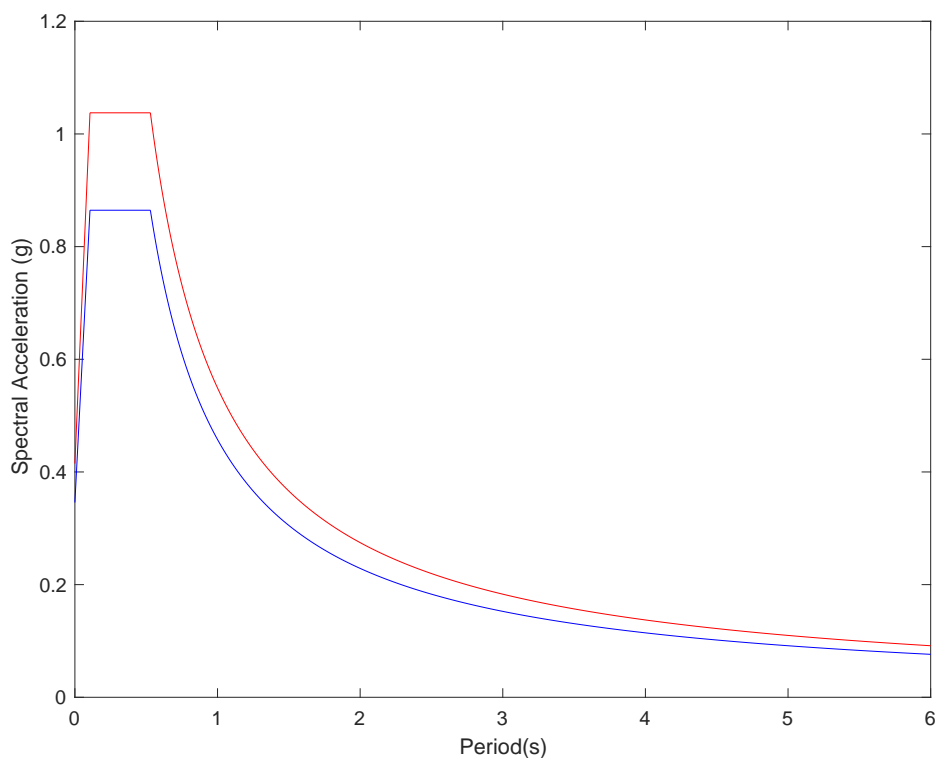


Figura 7.2.1: Spettro di design elastico orizzontale su disposizioni NEHRP e standard ASCE 7 e spettro amplificato del 20%.

Nel grafico 7.2.1 in ascissa è rappresentato il periodo in secondi e in ordinata le accelerazioni spettrali.

Dopo aver determinato lo spettro di design è necessario calcolare il periodo di vibrazione che coincide con quello calcolato nella sezione 6.2 e pari a 0.1265 s, calcolato con lo script Matlab®*periodo_vibrazione_tank* (appendice 1.2).

Dai dati ottenuti utilizzando lo script Matlab®*spettro_orizzontale* è stata calcolata l'accelerazione spettrale dello spettro amplificato, che per il caso in esame è pari a:

Grado di Riempimento	Periodo T (s)	Accelerazione Spettrale_amplificata (g)
0.2	0.1265	1.0375
0.8	0.1282	1.0375

Tabella 7.2.1: Periodo di vibrazione serbatoio e accelerazione spettrale in funzione del grado di riempimento.

Dopo aver determinato l'accelerazione spettrale è necessario calcolare la probabilità di accadimento del terremoto tramite lo script Matlab®*probabilita_sisma* all'interno del quale vengono implementati i concetti relativi alla sezione 2.2. Viene considerato il valore

7 di magnitudo, inteso come magnitudo massima che si potrebbe verificare nella zona di interesse.

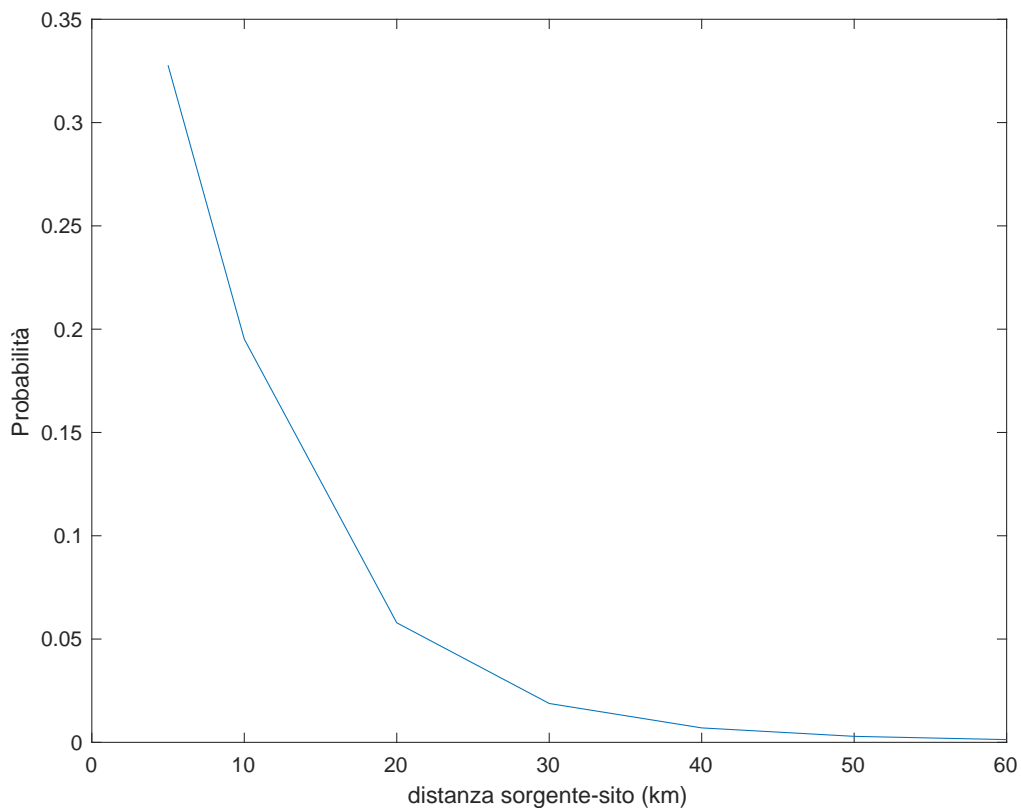


Figura 7.2.2: Grafico relativo alla probabilità di accadimento di un terremoto di magnitudo 7 con una distanza sorgente-sito da 2 a 60 km con accelerazione spettrale pari a 1.04 g.

Dalla figura 7.2.2 sono state individuate le probabilità di accadimento che, come indicato, diminuiscono all'aumentare della distanza sorgente-sito.

Nell'analisi tramite albero di guasto viene considerata la probabilità del sisma considerando la distanza tra ipocentro e sito pari a 20 km, distanza minima, e 50 km distanza massima. Le probabilità valgono rispettivamente 0.058 e 0.0029. Tali dati andranno a completare l'analisi secondo l'albero dei guasti essendo complementari ai guasti indotti dal sisma.

Nella seguente figura 7.2.3 è stato riportato lo sviluppo dell'albero dei guasti per il Top Event "rilascio di sostanza dal serbatoio" (*Loss of Containment*) nel quale è stato implementato l'isolamento del serbatoio dal terreno tramite dei pendoli a scorrimento. A scopo di chiarezza, è stato riportata solo la ramificazione relativa all'azione sismica.

	Probabilità di accadimento con evento sismico	Probabilità di accadimento con evento sismico e isolamento suolo-serbatoio
Distanza sorgente-sito 50 km		
<i>Top Event</i>	0.42	0.22
Guasto valvola in ingresso	0.11	0.018
Guasto valvola in uscita	0.11	0.018
Guasto tubazione entrata	0.006	0.003
Guasto tubazione uscita	0.006	0.003
Rottura serbatoio	0.19	0.18
Distanza sorgente-sito 20 km		
<i>Top Event</i>	0.83	0.68
Guasto valvola in ingresso	0.19	0.16
Guasto valvola in uscita	0.19	0.16
Guasto tubazione entrata	0.09	0.06
Guasto tubazione uscita	0.09	0.06
Rottura serbatoio	0.27	0.24

Tabella 7.2.2: *Probabilità di accadimento del Top Event e dei guasti intermedi degli alberi dei guasti relativi al caso studio del n-pentano con distanza tra sorgente e sito di 20 e 50 km.*

La tabella 7.2.2, compara l'incidenza dell'installazione del presidio antisismico sulle probabilità di accadimento degli eventi avversi indicati.

Dai valori in tabella 7.2.2 si può notare una diminuzione della probabilità di accadimento dall' 83 % al 68 % per sisma di magnitudo pari a 7 e distanza sorgente-sito pari a 20 km e il dimezzamento della probabilità di accadimento per la distanza sorgente sito pari a 50 km.

Il presidio antisismico, nel caso della rottura del serbatoio ha un'incidenza maggiore nel caso di una distanza sorgente – sito inferiore, infatti nel caso maggiormente sfavorevole con distanza pari a 20 km, l'inserimento degli isolatori antisismici consente una diminuzione della probabilità di accadimento dal 27 % al 24%, risultato che, invece, potrebbe essere ritenuto trascurabile per il caso con una distanza tra l'epicentro e lo stabilimento di 50 km in quanto si ha una diminuzione di un punto percentuale, ovvero dal 19 % al 18%.

Si calcola il valore MTBF per i due casi considerati e trattati con sistema antincendio:

Distanza (km)	Probabilità accadimento <i>Top Event</i>	Accadimenti/ 50 anni <i>Top Event</i>	MTBF (anni)
20	0.68	1.14	43.9
50	0.22	0.25	201.24

Tabella 7.2.3: *Probabilità di accadimento del Top Event con distanza epicentro-sito di 20 e 50 km.*

Nella Tabella 7.2.3 sono evidenziati gli accadimenti del *Top Event* ogni 50 anni, che per un evento sismico che colpisce uno stabilimento ad una distanza di 20 chilometri ogni 43,9 anni, ovvero 1.14 volte ogni 50 anni. Confrontando i valori ottenuti in tabella 6.3.3, i valori di MTBF aumenta di circa 3 volte il caso considerato che ha una distanza sorgente – sito pari a 50 km.

7.3 Secondo caso studio – b) Albero dei guasti con evento sismico, acetato di metile con isolamento serbatoio – suolo

Si procede con l'implementazione di un serbatoio antisismico anche per la struttura che contiene acetato di metile. L'amplificazione del 20 % dello spettro in figura 7.2.1, viene utilizzato anche per questo caso nel calcolo dell'accelerazione spettrale amplificata.

Partendo dal tempo di vibrazione della struttura si calcola l'accelerazione spettrale amplificata.

Grado di Riempimento	Periodo T (s)	Accelerazione Spettrale amplificata (g)
0.2	0.0683	0.8169
0.8	0.0687	0.8176

Tabella 7.3.1: *Periodo di vibrazione serbatoio e accelerazione spettrale in funzione del grado di riempimento.*

L'accelerazione spettrale amplificata presa in riferimento è pari a 0.82 g che inserita nello script Matlab@*probabilita_sisma* permette di calcolare la probabilità di accadimento della rottura sismica.

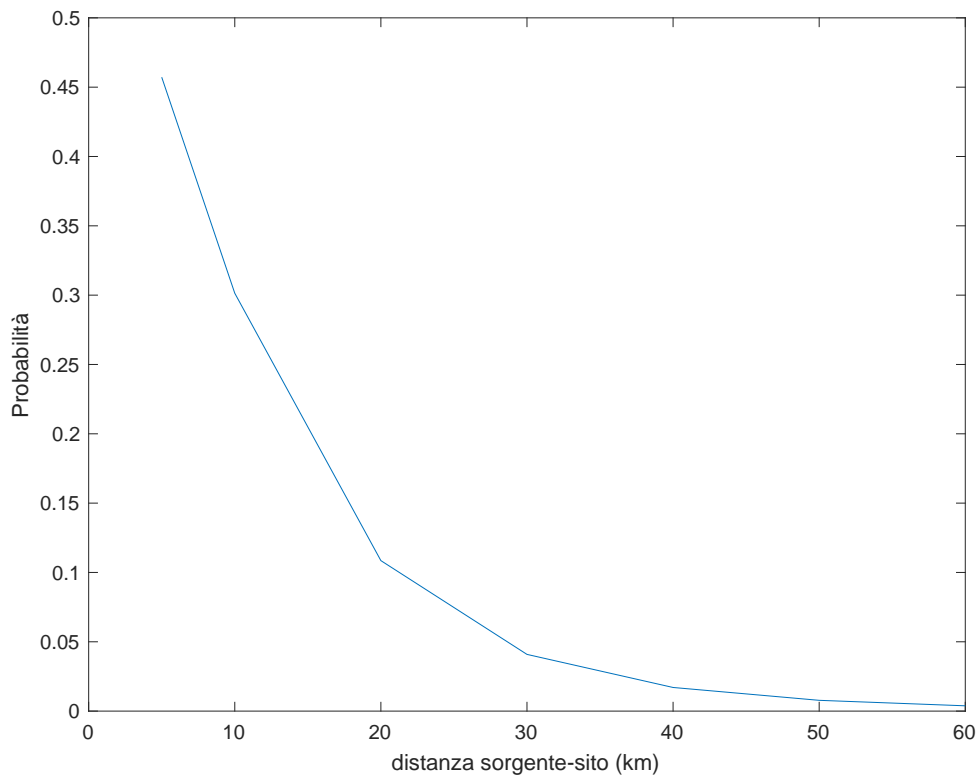


Figura 7.3.1: Grafico relativo alla probabilità di accadimento di un terremoto di magnitudo 7 con una distanza sorgente-sito da 2 a 60 km con accelerazione spettrale 0.82 g.

Il grafico relativo fornisce i valori di probabilità di accadimento alla distanza di 25 e 50 km che sono rispettivamente 0.07 e 0.008.

Nella seguente figura 7.3.2 è stato riportato lo sviluppo dell'albero dei guasti per il Top Event "rilascio di sostanza dal serbatoio" nel quale è stato implementato l'isolamento del serbatoio dal terreno tramite dei pendoli a scorrimento.

È stata riportata solo la parte dell'albero che contiene la rottura sismica.

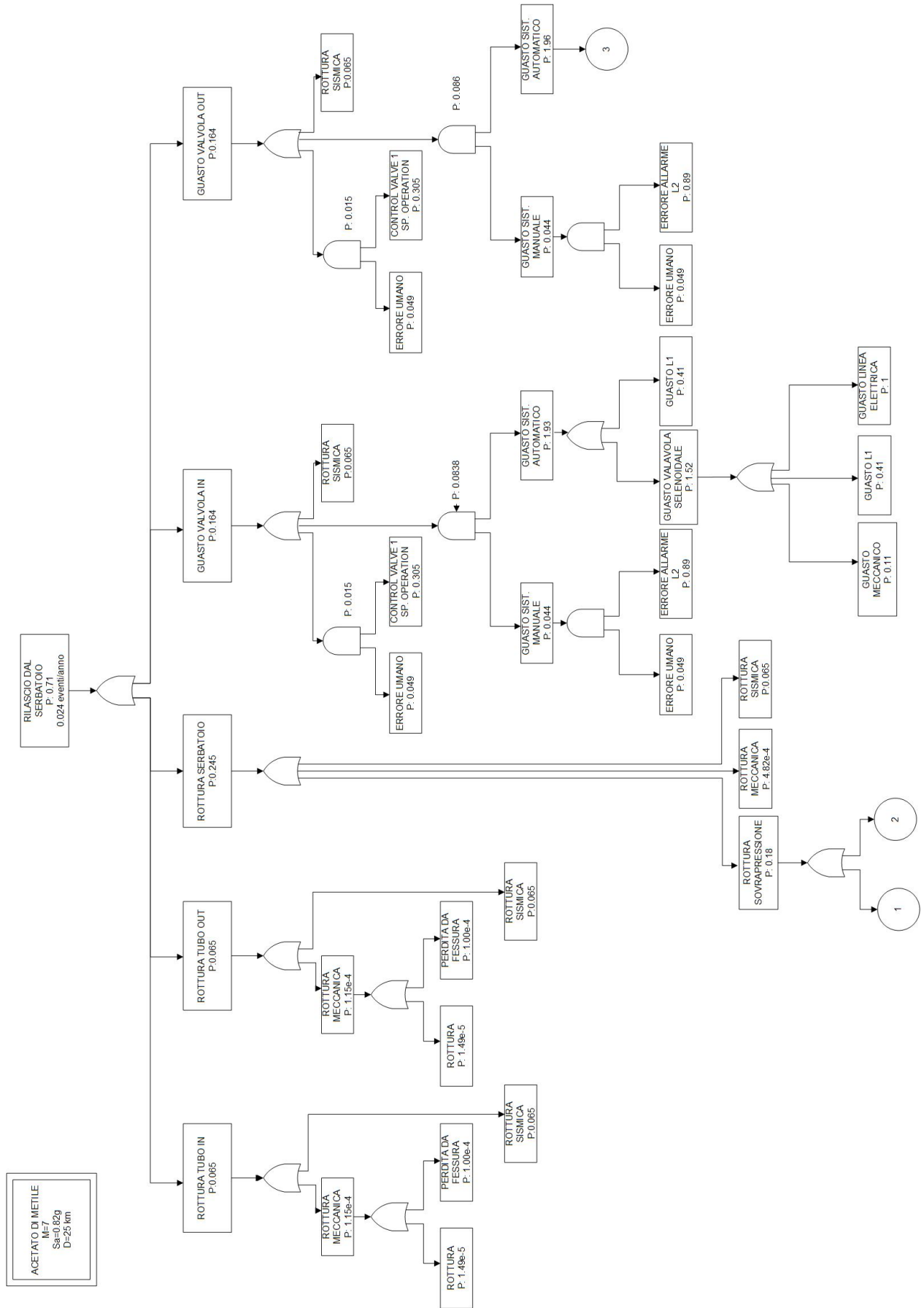


Figura 7.3.2: Albero dei guasti (a) di un serbatoio contenente acetato di metile con isolatore antisismico con l'effetto del sisma.

	Probabilità di accadimento con evento sismico	Probabilità di accadimento con evento sismico e isolamento suolo-serbatoio
Distanza sorgente-sito 50 km		
<i>Top Event</i>	0.48	0.43
Guasto valvola in ingresso	0.12	0.11
Guasto valvola in uscita	0.12	0.11
Guasto tubazione entrata	0.02	0.008
Guasto tubazione uscita	0.02	0.008
Rottura serbatoio	0.2	0.19
Distanza sorgente-sito 25 km		
<i>Top Event</i>	0.93	0.71
Guasto valvola in ingresso	0.21	0.16
Guasto valvola in uscita	0.21	0.16
Guasto tubazione entrata	0.11	0.07
Guasto tubazione uscita	0.11	0.07
Rottura serbatoio	0.29	0.25

Tabella 7.3.2: *Probabilità di accadimento del Top Event e dei guasti intermedi degli alberi dei guasti relativi al caso studio dell'acetato di metile con distanza tra sorgente e sito di 25 e 50 km.*

Si può notare una diminuzione maggiormente evidente nel caso più sfavorevole, cioè quello che considera la distanza sorgente – sito a 25 km. Questo risultato è dovuto al fatto che avendo associato la probabilità di accadimento del sisma alla rottura sismica, sia del serbatoio che delle apparecchiature ausiliarie, si ottengono valori di probabilità maggiori per distanze inferiori; quindi i presidi antisismici daranno maggior beneficio laddove le probabilità sono maggiori e risultati positivi trascurabili per probabilità di accadimento meno significative.

Dai valori in tabella 7.3.2 si può notare una diminuzione della probabilità di accadimento dal 93 % al 71 % per sisma di magnitudo pari a 7 e distanza sorgente-sito pari a 25 km e una leggera diminuzione della probabilità di accadimento per la distanza sorgente sito pari a 50 km dal 48 % al 43%.

Gli accadimenti del *Top Event* ogni 50 anni, che per un evento sismico che colpisce uno stabilimento ad una distanza di 25 chilometri ogni 40.7 anni, ovvero 1.23 volte ogni 50 anni.

7.4 Secondo caso studio - albero degli eventi con evento sismico

Per concludere l'analisi quantitativa si procede con lo sviluppo dell'albero degli eventi a completamento dell'albero dei guasti. Il *Top Event* rimane la perdita di contenuto dal serbatoio (*Loss of Containment*).

I tassi di successo dei sistemi di mitigazione del rischio saranno influenzati dalla probabilità di accadimento del sisma. In tabella 7.4.1 sono riportati i tassi di successo utilizzati per il caso del serbatoio di stoccaggio di n-pentano illustrato in figura 7.4.1.

	Tasso di successo senza evento sismico μ
<i>Top Event</i>	0.48 (accadimenti/50anni)
Innesco Immediato	0.05
Innesco ritardato	0.18
Sistemi Antincendio (<i>sprinkler</i>)	0.82
Campo esplosivo (VCE)	0.16
Barriera di Contenimento	0.44

Tabella 7.4.1: Tassi di successo albero degli eventi con evento sismico per il serbatoio dotato di isolatori contenente n-pentano.

Dall'analisi dell'albero degli eventi è possibile osservare che, nel periodo di 50 anni, gli scenari di incendio controllato confinato e incendio controllato non confinato presentano probabilità di accadimento di circa l'2%, l'esplosione controllata confinata e l'*UVCE* presentano una probabilità dello 0.2 % e 0,3 %, il *flash fire* confinato e non confinato presentano invece una probabilità del 1.3 % e 1.6 %, mentre si ha la probabilità del 89% che nell'arco dei 50 anni non si abbia alcun effetto conseguente al *Top Event*.

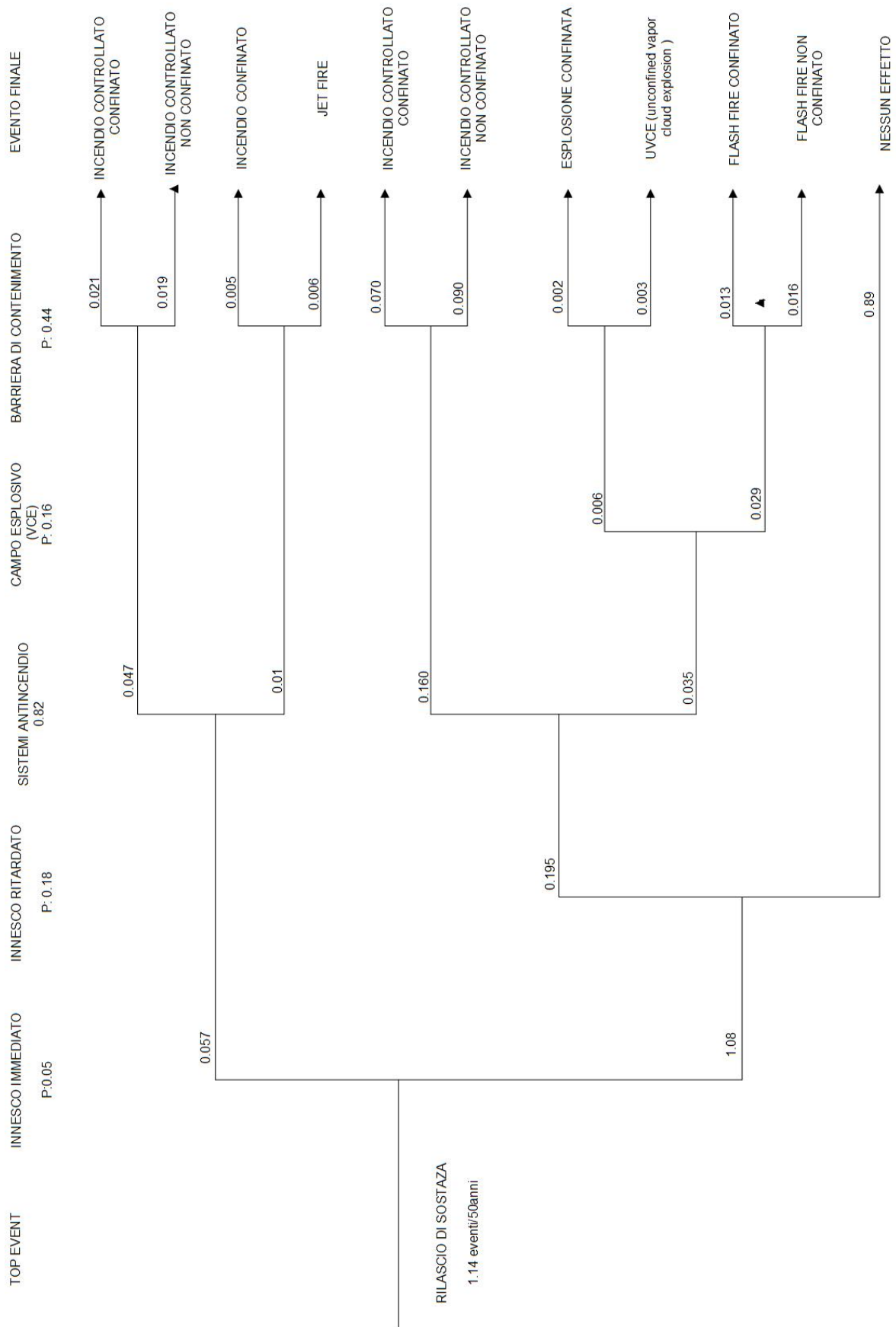


Figura 7.4.1: Albero degli eventi con l'effetto del sisma relativo al serbatoio di stoccaggio dotato di isolatori antisismici, contenente n-pentano con distanza sorgente sito di 20 km.

Si procede con l'analisi del serbatoio di stoccaggio contenente acetato di metile. I tassi di successo relativi all'evoluzione vengono riportati in tabella 7.4.2 e lo sviluppo dell'albero degli eventi in figura 7.4.2.

	Tasso di successo senza evento sismico μ
<i>Top Event</i>	0.48 (accadimenti/50anni)
Innesco Immediato	0.05
Innesco ritardato	0.18
Sistemi Antincendio (<i>sprinkler</i>)	0.82
Campo esplosivo (VCE)	0.16
Barriera di Contenimento	0.44

Tabella 7.4.2: Tassi di successo albero degli eventi con evento sismico per il serbatoio dotato di isolatori contenente acetato di metile.

Dall'analisi dell'albero degli eventi si osserva che, nel periodo di 50 anni, gli scenari di incendio controllato confinato e incendio controllato non confinato presentano probabilità di accadimento del 2 %, l'esplosione controllata confinata e l'UVCE presentano una probabilità, rispettivamente, dello 0.3 % e 0,4 %, il *flash fire* confinato e non confinato presentano invece una probabilità del 1.4 % e 1.9 %, mentre si ha la probabilità del 97% che nell'arco dei 50 anni non accada nessun effetto conseguente al *Top Event*.

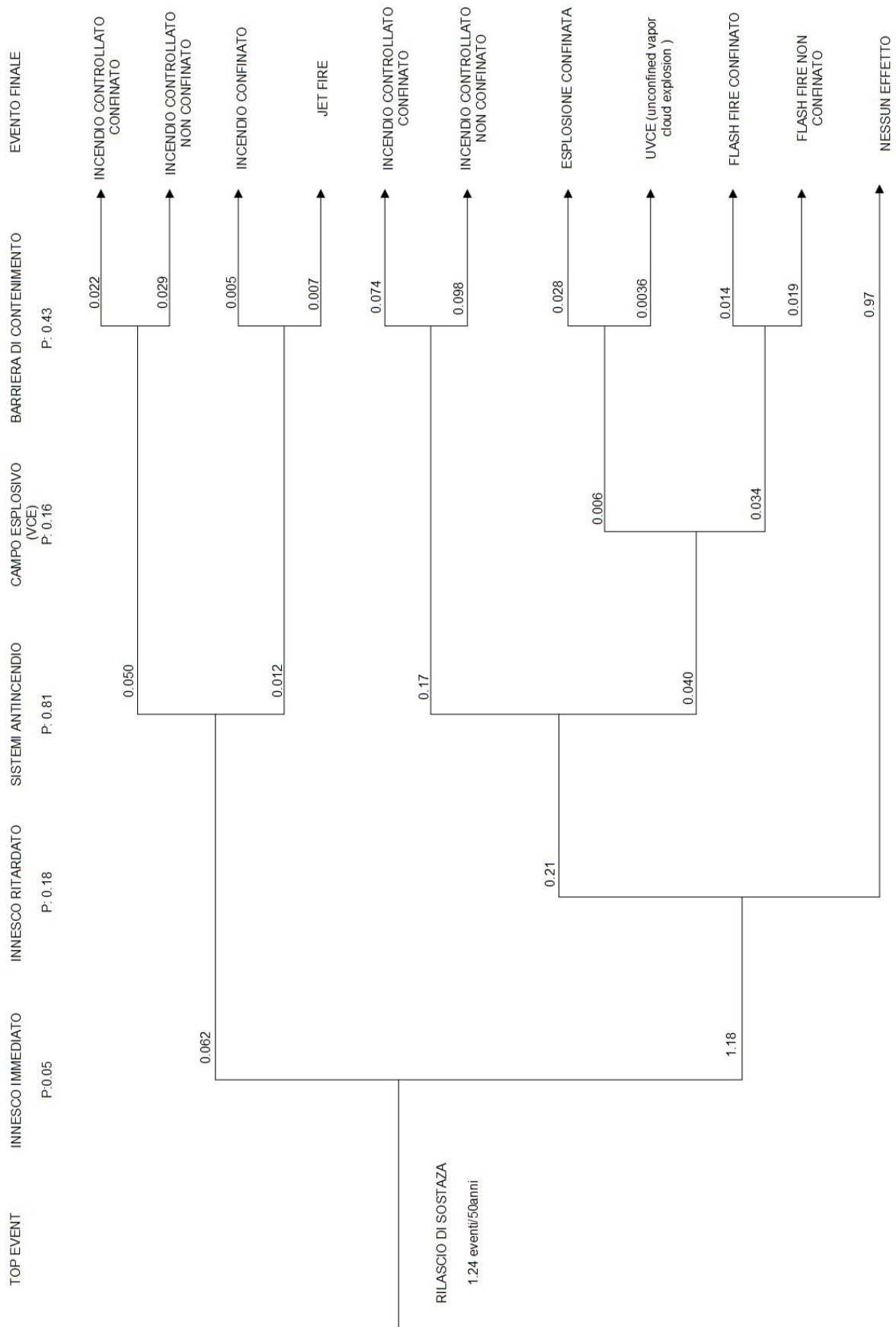


Figura 7.4.2: Albero degli eventi con l'effetto del sisma relativo al serbatoio di stoccaggio dotato di isolatori antisismici, contenente acetato di metile con distanza sorgente sito di 25 km.

CAPITOLO 8

Terzo caso studio: Inserimento ancoraggi antisismici HILTI

8.1 Presidi antisismici: ancoraggi

In Italia, i requisiti degli edifici in relazione all'azione sismica, sono regolati dall'Eurocode 8, norma europea sulla Progettazione delle Strutture per la Resistenza Sismica, noto anche come EN 1998, e dalle Norme Tecniche delle Costruzioni NTC, stabilite dal D.M. 14 gennaio 2008. Nel territorio italiano circa 22 milioni di persone e 12 milioni di edifici sono ubicati in zone ad elevato rischio sismico. (Consiglio Nazionale Ingegneri, 2016).

I terremoti oltre a danneggiare gli elementi strutturali di una costruzione, comportano gravi danni agli elementi non strutturali, come impianti elettrici, impianti meccanici e gli impianti antincendio.

In passato l'obiettivo principale dei progettisti, in caso di evento sismico, era quello di impedire il crollo dell'edificio, oggi l'orientamento invece prevede a garantire il funzionamento ininterrotto di servizi come l'erogazione di acqua ed energia elettrica (distribuite tramite tubazioni e cavi), servizi di emergenza (impianti di allarme), protezione antincendio passiva (compartimentazione) e attiva (sprinkler).

Dopo aver previsto una misura di prevenzione del rischio della struttura nel suo complesso, si procede analizzando la probabilità degli eventi connessi al sisma in un serbatoio dotato di isolamento rispetto al suolo e di ancoraggi antisismici a slitta nelle tubazioni.

Nell'analisi che si andrà a svolgere nelle sezioni 8.2 e 8.3, innanzitutto è stata calcolata l'accelerazione del suolo nel caso di terremoti di diverse magnitudo Richter e distanze, creando in questo modo una mappa puntuale dei diversi valori di accelerazione spettrali del suolo.

L'accelerazione spettrale del suolo è stata calcolata tramite lo script Matlab@*accelerazione_suolo* (appendice 1.4) che ha permesso, inserendo in input magnitudo e la distanza sorgente – sito di ottenere la tabella 8.1.1.

I valori riportati rappresentano il logaritmo naturale dell'accelerazione spettrale sul suolo ($\ln S_a$) e nello script Matlab è stata utilizzata la medesima equazione GMPE usata per il calcolo dello spettro (sez. 6.2).

Magnitudo	Distanza sorgente – sito						
	5 km	10 km	20 km	30 km	40 km	50 km	60 km
7	-0.2732	-0.5601	-1.0563	-1.4080	-1.6711	-1.8798	-2.0522
6,5	-0.4059	-0.7253	-1.2774	-1.6686	-1.9615	-2.1937	-2.3855
6	-0.6297	-0.9814	-1.5894	-2.0203	-2.3428	-2.5985	-2.8098
5,5	-0.9445	-1.3285	-1.9924	-2.4630	-2.8152	-3.0944	-3.3251
5	-1.3502	-1.7666	-2.4865	-2.9967	-3.3785	-3.6813	-3.9314
4,5	-1.8470	-2.2957	-3.0715	-3.6213	-4.0328	-4.3591	-4.6287
4	-2.4348	-2.9158	-3.7476	-4.3370	-4.7782	-5.1280	-5.4170

Tabella 8.1.1: Valori di $\ln S_a$ calcolati in funzione della magnitudo e della distanza sorgente – sito.

I valori riportati in tabella 8.1.1 sono stati trasformati in accelerazioni spettrali S_a risolvendo il logaritmo naturale e i risultati ottenuti sono stati riportati in tabella 8.1.2.

Magnitudo	Distanza sorgente – sito						
	5 km	10 km	20 km	30 km	40 km	50 km	60 km
7	0,761g	0,571g	0,348g	0,245g	0,188g	0,153g	0,128g
6,5	0,666g	0,484g	0,279g	0,189g	0,141g	0,112g	0,092g
6	0,533g	0,375g	0,204g	0,133g	0,096g	0,074g	0,060g
5,5	0,389g	0,265g	0,136g	0,085g	0,059g	0,045g	0,036g
5	0,259g	0,171g	0,083g	0,050g	0,034g	0,252g	0,020g
4,5	0,158g	0,101g	0,046g	0,027g	0,018g	0,0128g	0,010g
4	0,088g	0,054g	0,024g	0,013g	0,008g	0,006g	0,004g

Tabella 8.1.2: Valori di S_a calcolati in funzione della magnitudo e della distanza sorgente – sito.

Giunti a questo punto, si è preso a riferimento un ancoraggio della ditta Hilti®, produttrice di presidi antisismici per elementi non strutturali, per individuare l'accelerazione soglia che l'ancoraggio è in grado di sopportare senza raggiungere lo stato di rottura e comportare il danneggiamento delle tubazioni.

Ad oggi, mancando i tassi di successo dei presidi antisismici, come del resto degli isolatori usati in precedenza, si è deciso di calcolare un'accelerazione soglia in funzione della massa del serbatoio e della forza orizzontale a cui resiste l'ancoraggio.

Il cedimento degli ancoraggi si raggiunge se viene soddisfatta l'equazione 8.1:

$$S_a \geq a_{presidio} \quad (8.1)$$

L'adeguamento antisismico prevede una progettazione degli staffaggi antisismici che procede parallelamente all'installazione delle linee (Figura 8.1).

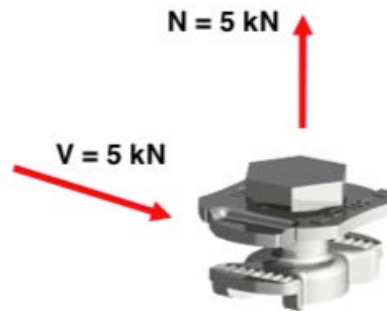


Figura 8.1: Esempio di ancoraggio antisismico Hilti.

Ipotizzando le masse dei serbatoi e le relative tubazioni, si sono ottenuti i valori soglia che determineranno e influenzeranno lo sviluppo degli alberi dei guasti trattati alle sezioni 8.2 e 8.3.

8.2 Terzo caso studio a) Albero dei guasti con evento sismico, n-pentano con isolamento serbatoio – suolo e ancoraggi antisismici

Il terzo caso studio analizza il caso in cui un serbatoio sia dotato di isolamento sismico tra suolo e serbatoio e le tubature in ingresso e in uscita dalla struttura siano ancorate con presidi antisismici.

Come primo passo è necessario calcolare la massa del serbatoio, della sostanza stoccata e della parte di tubazione sorretta dall'ancoraggio.

I dati strutturali del serbatoio contenente n-pentano si riferiscono alla sezione 4.3, che permettono di calcolare la massa totale del serbatoio a cui bisogna aggiungere il peso proprio della condotta.

È stato preso come riferimento di condotta un profilo di tubo metallico circolare le cui dimensioni sono:

- diametro: 60.3 mm
- spessore: 2.9 mm
- peso: 4.140 kg/m

Considerando che la distanza tra i vari ancoraggi è pari a 2 m, la massa della condotta viene ritenuta trascurabile rispetto al peso del serbatoio.

L'esempio di ancoraggio, illustrato alla figura 8.1, mostra come il presidio sia in grado di resistere a forze orizzontali locali pari a 5000 N. Quest'ultimo dato, sfruttando anche la massa totale consente di ottenere l'accelerazione soglia del presidio.

SOSTANZA	N-PENTANO
MASSA SERBATOIO VUOTO	2776 kg
MASSA LIQUIDO (r=0,8)	10080 kg
MASSA GAS (r=0,2)	9,96 kg
MASSA TOTALE	12866 kg
ACC. SOGLIA PRESIDIO	0,389 m/s ²
ACC. SOGLIA PRESIDIO (g)	0,381 g m/s ²

Tabella 8.2.1: Dati per il calcolo dell'accelerazione soglia del presidio.

Dopo aver individuato l'accelerazione soglia nel caso considerato, si individua in tabella 8.2.1 un valore di accelerazione spettrale inferiore alla soglia e uno superiore.

A_g soglia (g)	0,381 g
S_a < A_g soglia (g)	0.375 g
S_a > A_g soglia (g)	0.533 g

Tabella 8.2.2: Valori di accelerazioni spettrale inferiori e superiori alla soglia del presidio.

Il valore di accelerazione pari a 0.375 g è dato da un sisma di magnitudo 6 con distanza sorgente – sito pari a 10 km; il valore pari a 0.533 g corrisponde ad un valore di magnitudo 6 con distanza sorgente – sito pari a 5 km.

La tabella 8.2.2 mostra come ci saranno due diagrammi dell'albero dei guasti, il primo considererà accelerazioni spettrali che sono al di sotto della soglia del presidio, invece il secondo avrà accelerazioni oltre la soglia e comporterà la rottura del presidio con il conseguente danneggiamento delle tubazioni e possibile rilascio della sostanza contenutavi all'interno. Inoltre gli ancoraggi antisismici possono garantire l'erogazione dell'acqua e dell'energia elettrica necessaria per l'impianto antincendio, sistema di raffreddamento e impianto di segnalazione allarme.

In tabella 8.2.3 vengono riportati i valori di probabilità che si riferiscono alle diverse rotture sismiche di serbatoio, valvole e tubature. La probabilità di accadimento del sisma, ipotizzata coincidente con la probabilità di guasto, per i rami che si riferiscono a serbatoio e valvole è stata calcolata con lo script Matlab®*probabilita_sisma* inserendo in input l'accelerazione pari a 1.04 g, in quanto il serbatoio è dotato di isolatori, magnitudo 6 e distanza sorgente – sito pari a 10 km.

La probabilità di rottura della condotta viene considerata trascurabile in quanto il presidio antisismico è in grado di resistere alle sollecitazioni esterne.

Prob. Rottura serbatoio	0.07
Prob. Rottura condotte	N.C.
Prob. Rottura Valvole	0.07

Tabella 8.2.3: Valori di probabilità per le diverse apparecchiature $S_a < A_g$ soglia (g).

In figura 8.2.1, viene illustrato lo sviluppo dell'albero dei guasti per valori di accelerazioni spettrali inferiori alla soglia.

Si ottiene un valore di probabilità di accadimento del *Top Event* pari a 0.586, pari a 0.017 eventi/ anno.

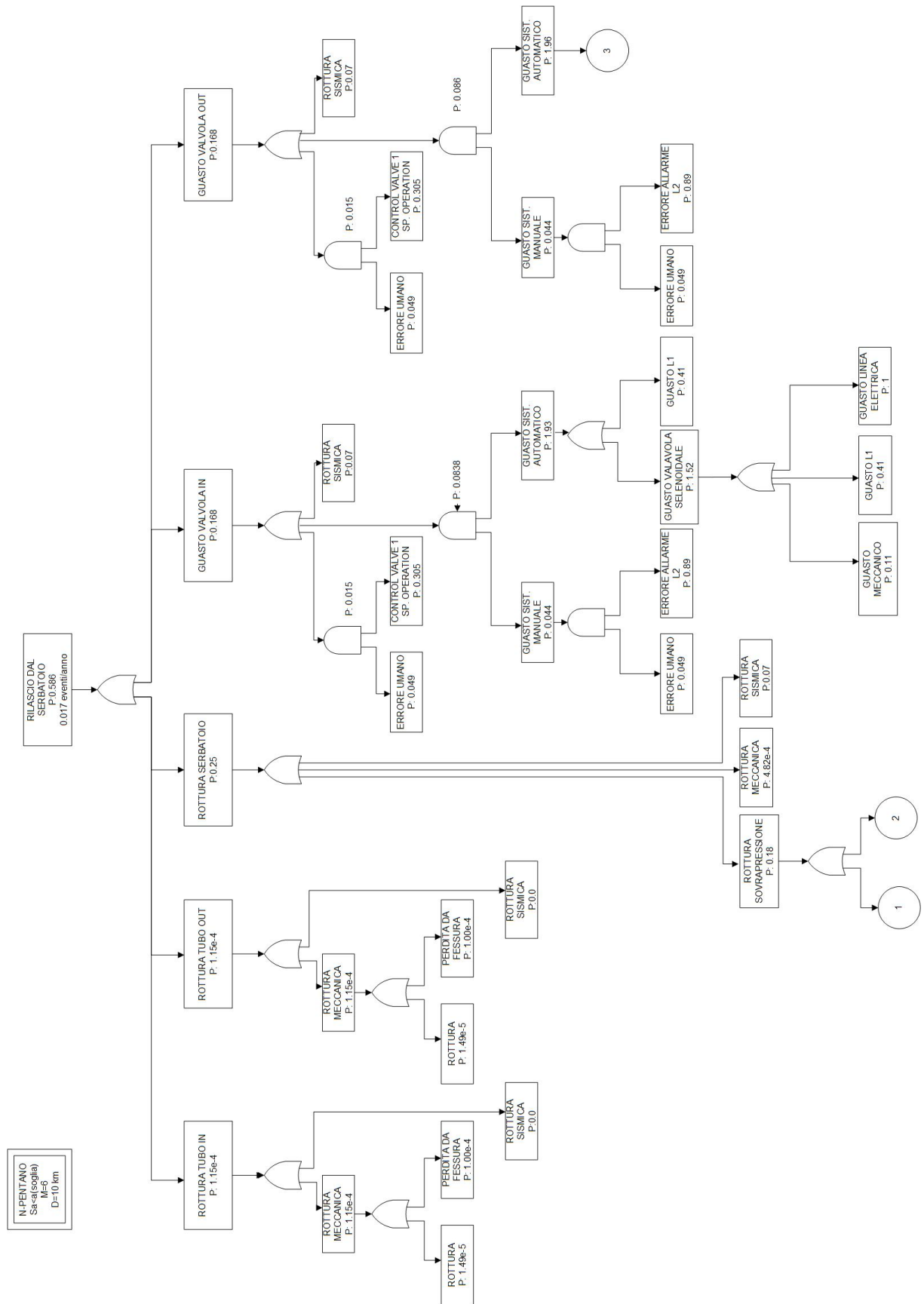


Figura 8.2.1: Albero degli eventi con l'effetto del sisma relativo al serbatoio di stoccaggio dotato di isolatori antisismici e ancoraggi Hilti, contenente n-pentano, $S_a < A_g$ soglia (g).

A questo punto si passa all'analisi del caso con accelerazioni spettrali superiori al valore di soglia. Si prende come riferimento il valore pari a 0.533 g che corrisponde ad un valore di magnitudo 6 con distanza sorgente – sito pari a 5 km. Per quanto riguarda il calcolo della probabilità di rottura delle tubature, si è ipotizzato che gli ancoraggi antisismici abbiano totale affidabilità per accelerazioni spettrali inferiori alla soglia e quindi la probabilità di rottura per le tubature non viene considerata, pur avendo la propria probabilità di accadimento. Analizzando invece i valori oltre la soglia, dove i presidi non sono più efficaci, la probabilità di accadimento non viene considerata per intero perché comprenderebbe anche la probabilità relative a valori di accelerazioni sotto la soglia. Dunque, superata la soglia, il valore di probabilità che coinvolge le strutture dell'impianto viene corretto con la differenza tra le due probabilità di accadimento del sisma, dal momento che per valori inferiori a quello di soglia, essa viene trascurata.

Prob. Rottura condotte (SOPRA SOGLIA)	0.550
Prob. Rottura condotte (SOGLIA)	0.500
Prob. Rottura condotte (EFFETTIVA)	0.05

Tabella 8.2.4: Valori di probabilità dei diversi componenti del sistema di rottura delle condotte per $S_a > A_g$ soglia (g) per il terzo caso b)

Prob. Rottura serbatoio	0.17
Prob. Rottura condotte	0.05
Prob. Rottura Valvole	0.17

Tabella 8.2.5: Valori di probabilità per le diverse apparecchiature per $S_a > A_g$ soglia (g) per il terzo caso b).

In figura 8.2.2 viene illustrato lo sviluppo dell'albero dei guasti per il caso $S_a > A_g$ soglia (g).

La tabella 8.2.4 mostra le probabilità di guasto dei diversi apparecchi che portano ad una probabilità del *Top Event* pari a 0.82. Sviluppando un albero dei guasti con le stesse ipotesi in input, distanza sorgente – sito 5 km e magnitudo del sisma pari a 6, si otterrebbero le seguenti probabilità di accadimento riportato in tabella 8.2.6.

Probabilità di rottura – serbatoio standard (capitolo 6)		Probabilità di rottura – serbatoio con isolatori (capitolo 7)	
Prob. Rottura serbatoio	0.24	Prob. Rottura serbatoio	0.17
Prob. Rottura condotte	0.24	Prob. Rottura condotte	0.17
Prob. Rottura Valvole	0.24	Prob. Rottura Valvole	0.17

Tabella 8.2.6: *Confronto dei valori di probabilità per i diversi serbatoi considerati per il terzo caso a).*

In tabella 8.2.6 sono mostrate le probabilità di guasto di serbatoio, tubature e valvole nei casi precedentemente affrontati. Mettendo a confronto i valori con quelli riportati in tabella 8.2.5, è possibile evidenziare la diminuzione della probabilità di accadimento per ogni ramo che costituisce lo sviluppo del *Top Event*.

La probabilità di rottura delle tubature è il ramo che subisce un maggior calo in quanto oltre all'isolamento sismico del serbatoio che comporta una diminuzione della probabilità di rottura di tutto l'impianto, vengono inseriti presidi antisismici che consentono di aumentare l'affidabilità delle tubazioni evitando disconnessioni di esse anche per terremoti di lieve rilevanza.

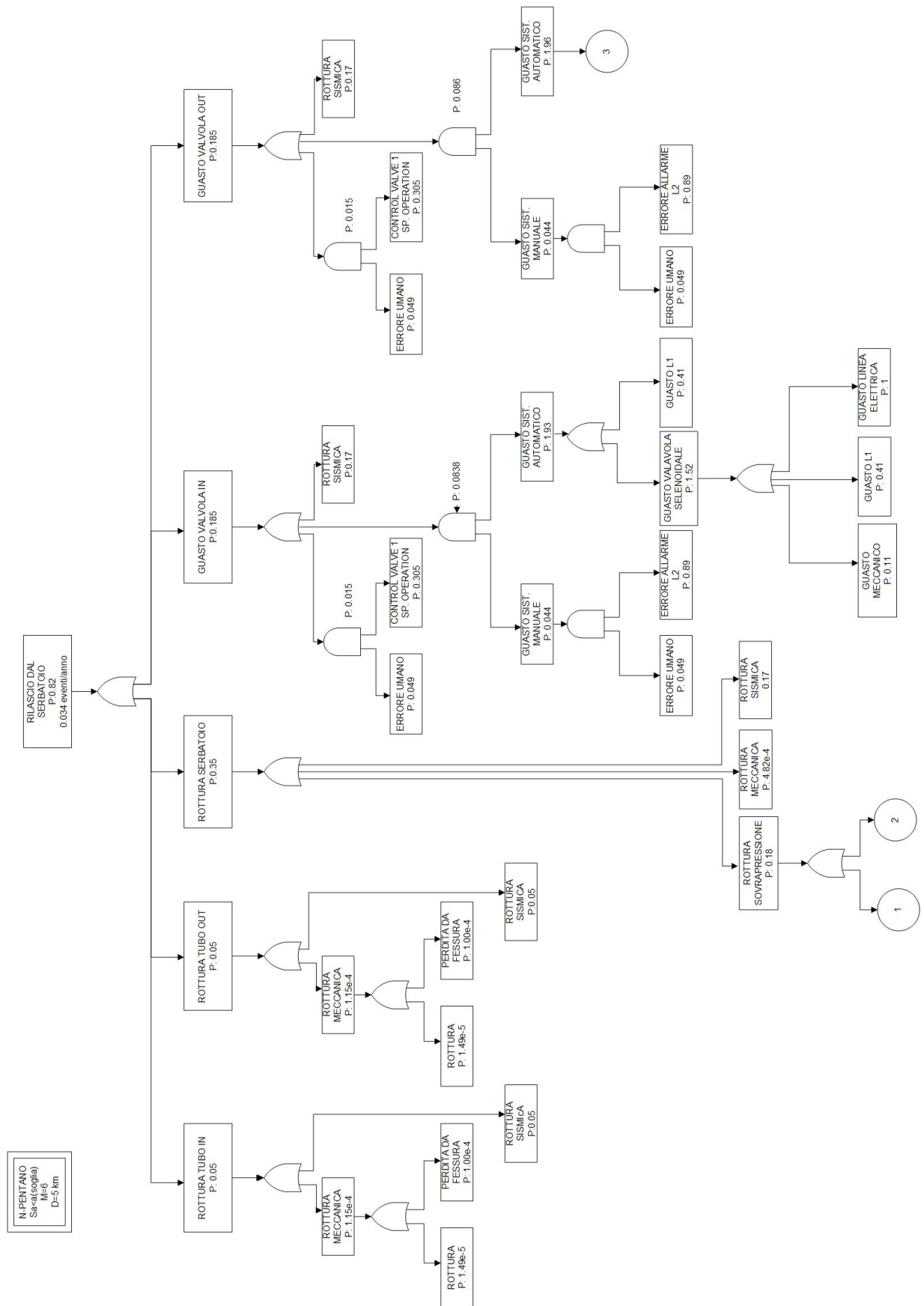


Figura 8.2.2: Albero degli eventi con l'effetto del sisma relativo al serbatoio di stoccaggio dotato di isolatori antisismici e ancoraggi Hilti, contenente n-pentano, $S_a > A_g$ soglia (g)

8.3 Terzo caso studio b) Albero dei guasti con evento sismico, acetato di metile con isolamento serbatoio – suolo e ancoraggi antisismici

Il terzo caso studio riguarda il serbatoio di stoccaggio di acetato di metile.

Il procedimento di analisi adottato nella sezione 8.2 viene ripetuto per il serbatoio contenente acetato di metile. I dati strutturali del serbatoio vengono ripresi dalla sezione 4.3 e viene scelto come profilo metallico per la tubazione il medesimo della sezione 8.2.

SOSTANZA	ACETATO DI METILE
MASSA SERBATOIO VUOTO	4264 kg
MASSA LIQUIDO (r=0,8)	6696 kg
MASSA GAS (R=0,2)	4.98 kg
MASSA TOTALE	10965 kg
ACC. SOGLIA PRESIDIO	0,456 m/s ²
ACC. SOGLIA PRESIDIO (g)	0,447 g

Tabella 8.3.1: *Dati per il calcolo dell'accelerazione soglia del presidio per il terzo caso b).*

Dopo aver individuato l'accelerazione soglia nel caso considerato, si individuano in tabella 8.3.1 due valori relativamente al parametro di soglia.

A_g soglia (g)	0,447 g
S_a < A_g soglia (g)	0.375 g
S_a > A_g soglia (g)	0.484 g

Tabella 8.3.2: *Valori di accelerazioni spettrale inferiori e superiori alla soglia del presidio per il terzo caso b).*

Il valore di accelerazione pari a 0.375 g è dato da un sisma di magnitudo 6 con distanza sorgente – sito pari a 10 km; il valore pari a 0.484 g corrisponde ad un valore di magnitudo 6.5 con distanza sorgente – sito pari a 10 km.

Si procede con lo sviluppo dell'albero dei guasti per il caso inferiore alla soglia dove le probabilità di accadimento del guasto saranno le seguenti (tabella 8.3.3):

Prob. Rottura serbatoio	0.13
Prob. Rottura condotte	N.C.
Prob. Rottura Valvole	0.13

Tabella 8.3.3: Valori di probabilità per le diverse apparecchiature $S_a < A_g$ soglia (g).

In figura 8.3.1, viene illustrato lo sviluppo dell'albero dei guasti per valori di accelerazioni spettrali inferiori alla soglia.

Si ottiene un valore di probabilità di accadimento del *Top Event* pari a 0.77, pari a 0.029 eventi/ anno.

Si passa all'analisi di accelerazioni spettrali superiori al valore di soglia. Si prende come riferimento il valore pari a 0.484 g che corrisponde ad un valore di magnitudo 6.5 con distanza sorgente – sito pari a 10 km. Nella tabella 8.3.4 si calcola il valore effettivo di probabilità di rottura della condotta ancorati con presidi antisismici.

Prob. Rottura condotte (SOPRA SOGLIA)	0.500
Prob. Rottura condotte (SOGLIA)	0.526
Prob. Rottura condotte (EFFETTIVA)	0.026

Tabella 8.3.4: Valori di probabilità di rottura delle condotte per $S_a > A_g$ soglia (g) per il terzo caso b)

Prob. Rottura serbatoio	0.22
Prob. Rottura condotte	0.03
Prob. Rottura Valvole	0.22

Tabella 8.3.5: Valori di probabilità per le diverse apparecchiature per $S_a > A_g$ soglia (g) per il terzo caso b).

In figura 8.3.2 viene illustrato lo sviluppo dell'albero dei guasti per il caso $S_a > A_g$ soglia (g).

La tabella 8.3.4 mostra le probabilità di guasto dei diversi apparecchi che portano ad una probabilità del *Top Event* pari a 0.93. Sviluppando un albero dei guasti con le stesse ipotesi in input, distanza sorgente – sito 10 km e magnitudo del sisma pari a 6.5, si otterrebbero le probabilità di tabella 8.3.6.

Probabilità di rottura – serbatoio standard (capitolo 6)		Probabilità di rottura – serbatoio con isolatori (capitolo 7)	
Prob. Rottura serbatoio	0.31	Prob. Rottura serbatoio	0.22
Prob. Rottura condotte	0.31	Prob. Rottura condotte	0.22
Prob. Rottura Valvole	0.31	Prob. Rottura Valvole	0.22

Tabella 8.3.6: *Confronto dei valori di probabilità per i diversi serbatoi considerati per il terzo caso b)*

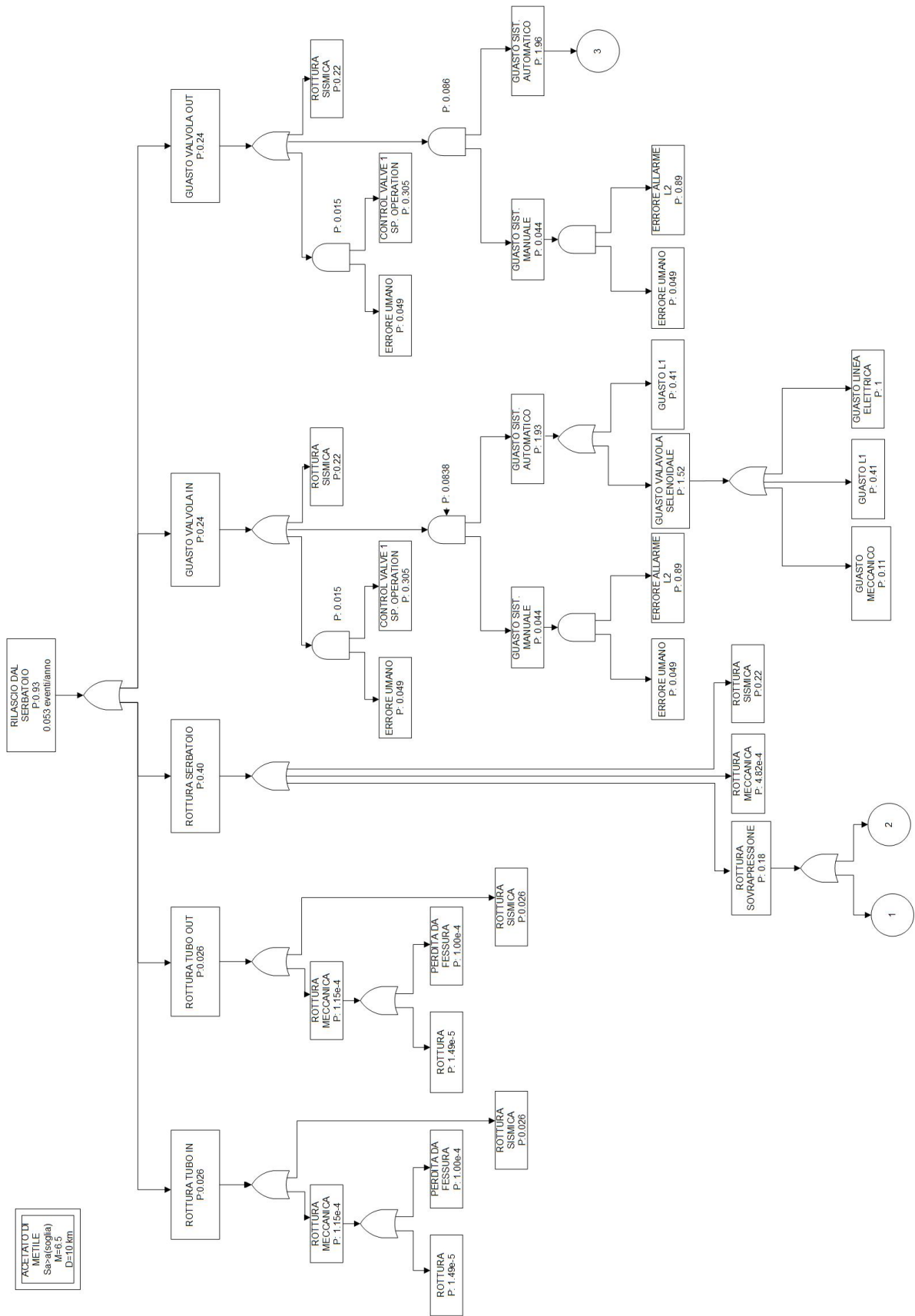


Figura 8.3.2: Albero degli eventi con l'effetto del sisma relativo al serbatoio di stoccaggio dotato di isolatori antisismici e ancoraggi Hilti, contenente acetato di metile, $S_a > A_g$ soglia.

8.4 Terzo caso studio a) – b) albero degli eventi con evento sismico

I sistemi di mitigazione del rischio sono influenzati dalla presenza del sisma, in quanto potrebbero essere messi fuori uso e non intervenire per contenere le conseguenze di eventuali incidenti che si potrebbero venire a creare. Si è ipotizzato di diminuire i tassi di successo del sistema di antincendio e della barriera di contenimento del valore pari alla probabilità di accadimento del sisma.

L'analisi dell'albero dei guasti ha previsto un duplice sviluppo che tiene in considerazione sia il successo che il fallimento degli ancoraggi antisismici, di conseguenza anche lo sviluppo dell'albero degli eventi contemplerà una duplice evoluzione. In tabella 8.4.1 sono riportati i tassi di successo utilizzati per il caso del serbatoio di stoccaggio di n-pentano, illustrato in figura 8.4.1, in cui le accelerazioni spettrali sono inferiori all'accelerazione soglia individuata nella sezione 8.2.

In questo caso i tassi di successo dei sistemi antincendio non sono stati modificati rispetto al caso standard (6.1) che non presenta il possibile aggravio connesso alle conseguenze del sisma.

Il tasso di guasto della barriera di contenimento, invece, subisce una diminuzione pari alla probabilità di accadimento di rottura del serbatoio (tabella 8.4.1).

	Tasso di successo con evento sismico μ
<i>Top Event</i>	0.89 (accadimenti/50anni)
Innesco Immediato	0.05
Innesco ritardato	0.18
Sistemi Antincendio (<i>sprinkler</i>)	0.88
Campo esplosivo (VCE)	0.16
Barriera di Contenimento	0.43

Tabella 8.4.1: Tassi di successo albero degli eventi con evento sismico per il serbatoio dotato di isolatori e ancoraggi antisismici contenente n-pentano, $S_a < A_g$ soglia.

Dall'analisi dell'albero degli eventi è possibile osservare che, nel periodo di 50 anni, gli scenari di incendio controllato confinato e incendio controllato non confinato presentano probabilità di accadimento di circa il 2% mentre,

l'esplosione controllata confinata e l'*UVCE* presentano una probabilità dello 0.1 % e 0,17 %, il *flash fire* confinato e non confinato presentano invece una probabilità dello 0.65% e 0.86 %, mentre si ha la probabilità del 70 % che nell'arco dei 50 anni non accada nessun effetto conseguente al *Top Event*.

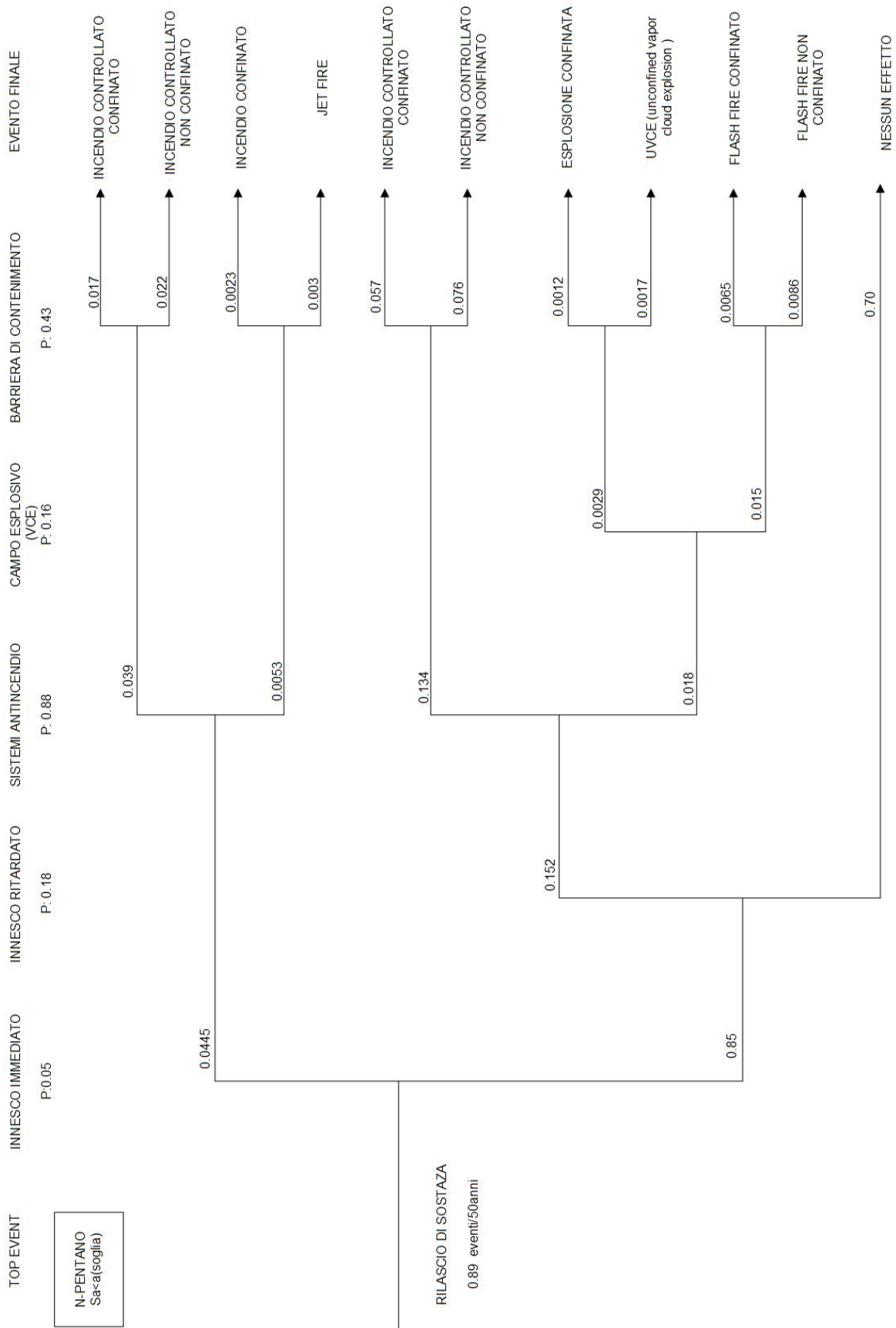


Figura 8.4.1: Albero degli eventi con l'effetto del sisma relativo al serbatoio di stoccaggio dotato di isolatori e ancoraggi antisismici, contenente n-pentano, $S_a < A_g$ soglia.

Nel caso di accelerazioni spettrali maggiori dell'accelerazione di soglia sopportata dal presidio, si ottengono i valori dei tassi di successo che vengono riportati in tabella 8.4.2, in cui il tasso di successo del sistema antincendio viene diminuito della probabilità di guasto della condotta esplicitata alla tabella 8.2.4 e 8.2.5. Per quanto riguarda la barriera di contenimento, il tasso di successo sarà diminuito della probabilità di guasto del serbatoio.

	Tasso di successo con evento sismico μ
<i>Top Event</i>	1.71 (accadimenti/50anni)
Innesco Immediato	0.05
Innesco ritardato	0.18
Sistemi Antincendio (<i>sprinkler</i>)	0.83
Campo esplosivo (VCE)	0.16
Barriera di Contenimento	0.33

Tabella 8.4.2: Tassi di successo albero degli eventi con evento sismico per il serbatoio dotato di isolatori e ancoraggi antisismici contenente n-pentano, $S_a > A_g$ soglia.

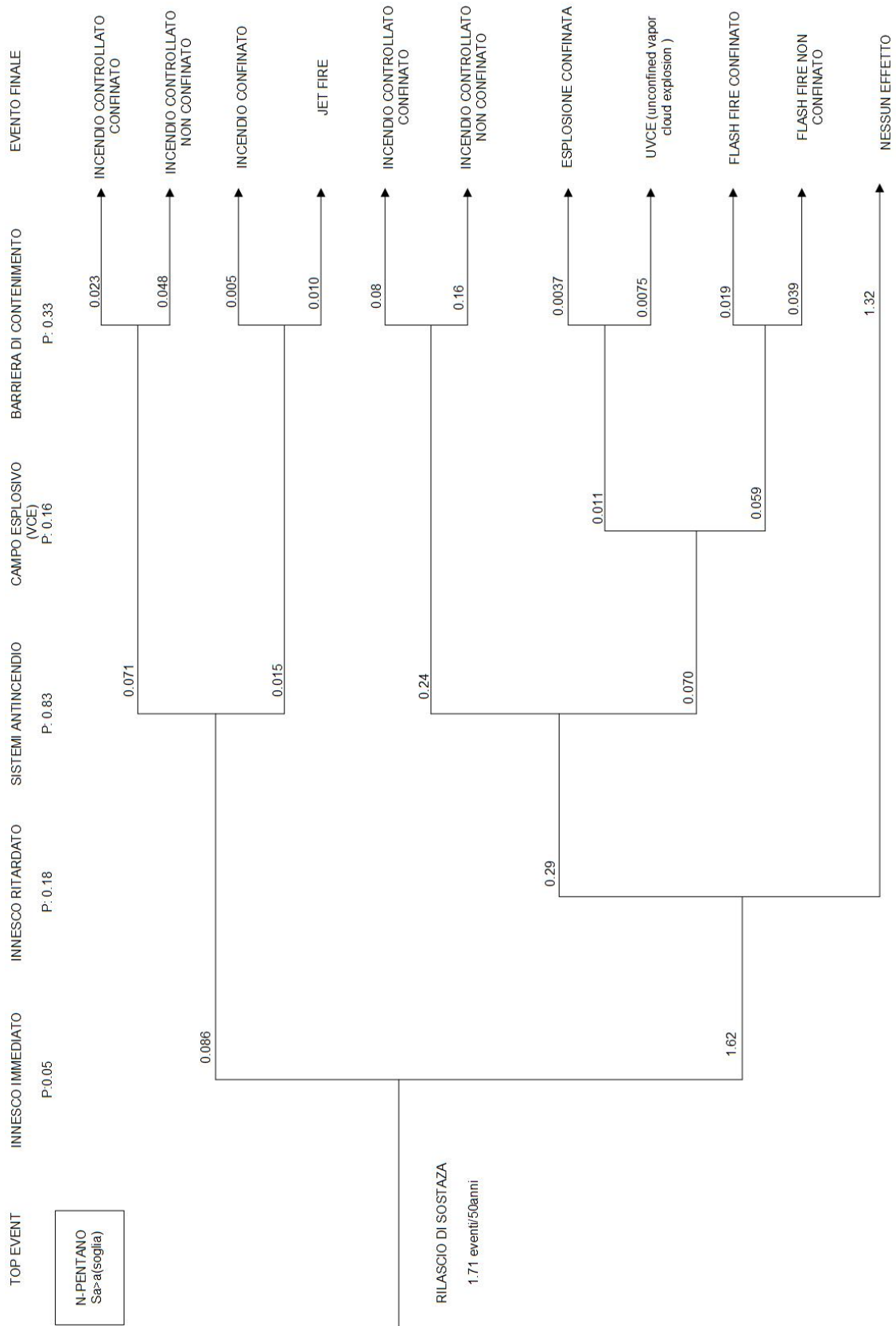


Figura 8.4.2: Albero degli eventi con l'effetto del sisma relativo al serbatoio di stoccaggio dotato di isolatori e ancoraggi antisismici, contenente n-pentano, $S_a > A_g$ soglia.

Si procede passando all'analisi dell'albero degli eventi del terzo caso b), che tratta un serbatoio dotato di isolatori e ancoraggi antisismici, contenente acetato di metile.

Anche in questo caso, sono considerate due eventualità. Nella prima, ovvero con accelerazioni spettrali inferiori alla soglia di accelerazione del presidio, il tasso di successo che viene influenzato dalla presenza del sisma è quello relativo alla barriera di contenimento, la cui probabilità verrà diminuita di un valore pari alla probabilità di guasto del serbatoio. Il sistema di spegnimento *sprinkler* conserva il tasso di successo, come nel caso senza sisma, in quanto gli ancoraggi antisismici sono in grado di evitare disconnessioni o rotture degli stessi che possono portare a danneggiamenti delle tubazioni (tabella 8.4.3).

	Tasso di successo con evento sismico μ
<i>Top Event</i>	1.47 (accadimenti/50anni)
Innesco Immediato	0.05
Innesco ritardato	0.18
Sistemi Antincendio (<i>sprinkler</i>)	0.88
Campo esplosivo (VCE)	0.16
Barriera di Contenimento	0.37

Tabella 8.4.3: Tassi di successo albero degli eventi con evento sismico per il serbatoio dotato di isolatori e ancoraggi antisismici contenente acetato di metile, $S_a < A_g$ soglia.

Analizzando il caso con accelerazioni spettrali maggiori dell'accelerazione soglia, i tassi di guasto che subiscono una variazione rispetto al caso standard analizzato in sezione 6.1, sono i sistemi antincendio e la barriera di contenimento. Il primo diminuirà il suo tasso di successo di un valore pari alla probabilità di guasto della condotta calcolata in tabella 8.3.4, invece il secondo viene diminuito della probabilità di accadimento di rottura del serbatoio (tabella 8.4.4).

	Tasso di successo con evento sismico μ
<i>Top Event</i>	2.66 (accadimenti/50anni)
Innesco Immediato	0.05
Innesco ritardato	0.18
Sistemi Antincendio (<i>sprinkler</i>)	0.85
Campo esplosivo (VCE)	0.16
Barriera di Contenimento	0.28

Tabella 8.4.4: Tassi di successo albero degli eventi con evento sismico per il serbatoio dotato di isolatori e ancoraggi antisismici contenente acetato di metile, $S_a > A_g$ soglia.

Capitolo 9

Quarto caso studio: serbatoio sferico pressurizzato

9.1 Quarto caso studio: albero dei guasti con sisma

Un serbatoio è un recipiente progettato per contenere liquidi o gas ad una pressione anche differente da quella esterna. Quanto pressurizzati, hanno una forma sferica e in genere accolgono lo stoccaggio di GPL, propano, ammoniaca e altri gas liquefatti per pressione (conservati tipicamente tra i 1 - 20 Bar e -40 e i -60 °C).⁹ Questa tipologia di serbatoi viene utilizzata per immagazzinare quantitativi medi di liquidi a pressione molto elevata. La conformazione sferica consente una migliore distribuzione e gestione della pressione anche se non è conveniente perché a parità di ingombro, il volume offerto è modesto e i costi di realizzazione sono maggiori, dall'altra parte però offrono la maggiore superficie esterna e questo è un vantaggio nei casi in cui si volesse minimizzare lo scambio di calore con l'esterno.

I serbatoi possono essere semi-interrati, oppure essere costituiti da forme a sfera, da una struttura reticolare di sostegno e da una fondazione. La struttura metallica di sostegno è composta di piedritti (colonne) generalmente cilindriche e cavi e di controventature inclinate che possono essere anch'esse tubolari o costituite da elementi resistenti. Le fondazioni possono essere a piastra, a plinti o a pali a seconda della natura del terreno e della scelta costruttiva più conveniente.

⁹M. Forni, "L'isolamento sismico degli impianti a rischio di incidente rilevante", Research&Development;



Figura 9.1.1: *Serbatoio sferico nella raffineria di Aspropirgos (Grecia), metodo di Horton.*



Figura 9.1.2: *Apparecchi d'appoggio sferici fissi installati alla testa dei pali di fondazione.*

La configurazione descritta, viene definita a “sfere di Horton”.

Per poter quantificare la probabilità di accadimento del sisma è necessario calcolare il tempo di vibrazione della struttura che, inserito nello spettro di risposta elastico, consente di individuare l’accelerazione spettrale in grado di portare il serbatoio in risonanza con

l'azione locale indotta al terreno. Le equazioni (9.1) utilizzate per il calcolo del periodo di vibrazione di un serbatoio sferico sono state estrapolate dal manuale ASCE "Guidelines for seismic evaluation and Design of Petrochemical Facilities".

$$T = 2\pi\left(\frac{y}{g}\right)^{0.5}$$

$$y = \Delta / \sin\vartheta \quad (9.1)$$

$$\Delta = \frac{PLp}{EA}$$

$$P = \frac{1}{2} * 2 * \frac{W}{6} * \frac{L}{l}$$

Le dimensioni ipotizzate per il serbatoio sono state anch'esse ricavate dal testo ASCE:

- W=1500 kips = 680388,44 kg;
- A = 8.0 sq.in. = 0.005 m³
- L= 36' = 36 ft = 10,97 m;
- p = 12'' = 0,305 m;
- l = 20' = 6,096 m;
- E = 210000 N/mm²;
- D = 40' = 12,2 m.

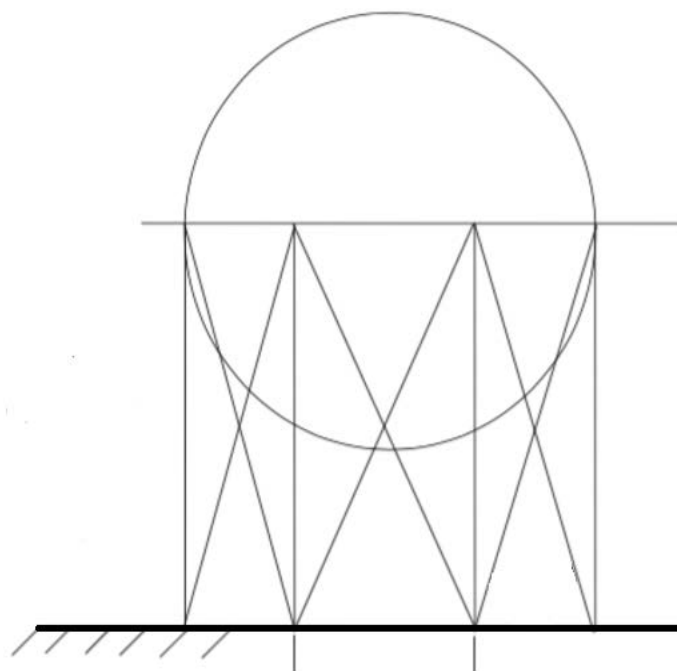


Figura 9.1.3: Schema generale di un serbatoio di stoccaggio pressurizzato sferico con sistema di Horton.

L'analisi del serbatoio di Horton viene sviluppata secondo due casi differenti contemplando un primo recipiente contenente GPL ed un altro con ammoniaca, entrambi stoccati sotto pressione.

La miscela di GPL viene assunta composta da propano commerciale al 90 % e 10 % di butano e il contenuto di gas è pari al 25 % del volume per bombole e serbatoi¹⁰.

MASSA SERBATOIO	680388 kg
MASSA LIQUIDO	302133 kg
MASSA GAS	232.875 kg
TEMPO DI VIBRAZIONE	0.472

Tabella 9.1.1: *Valori delle masse del serbatoio contenente GPL per il calcolo del tempo di vibrazione.*

Il calcolo del periodo di vibrazione del serbatoio contenente ammoniaca, avviene nel medesimo modo compiuto per il GPL. La densità di vapore di questa sostanza ha un valore compreso tra 0.7 e 0.9 kg/m³, invece la densità del liquido è pari a 682.6 kg/m³.

MASSA SERBATOIO	680388 kg
MASSA LIQUIDO	47304.2 kg
MASSA GAS	13.7 kg
MASSA TOTALE	727706.2 kg
TEMPO DI VIBRAZIONE	0.406

Tabella 9.1.2: *Valori delle masse del serbatoio contenente ammoniaca per il calcolo del tempo di vibrazione.*

Si ottiene un periodo di vibrazione pari a 0.406.

I due diversi tempi di vibrazione, inseriti nello spettro di risposta elastica riportato nella figura 6.2.1, ricadono nell'intervallo del tempo T₂, ovvero l'intervallo che corrisponde a valori di accelerazioni spettrali costanti. Quindi per i due diversi periodi di vibrazione si ha lo stesso valore di accelerazione spettrale e pari a 0.86 g.

¹⁰ Novacomtet, Soluzioni innovative per il GPL, <http://www.novacomet.it/>;

Tramite lo script Matlab@*probabilita_sisma* (appendice 1.3), sono state calcolate le diverse probabilità di accadimento del sisma a diverse distanze e per diversi valori di accelerazioni spettrali riportate in tabella 9.1.2.

Magnitudo	Probabilità di accadimento (20 km)	Probabilità di accadimento (50 km)
4	1.09e-07	3.77e-13
4.5	1.28e-05	6.69e-10
5	3.78e-04	1.81e-07
5.5	3.94e-03	1.10e-05
6	1.89e-02	2.08e-04
6.5	0.052	1.60e-03
7	0.096	0.0063

Tabella 9.1.2: *Valori delle probabilità di accadimento del sisma per un serbatoio sferico senza presidi antisismici.*

Con il dato di probabilità di accadimento del sisma, ipotizzato coincidente con il valore di rottura sismica, si procede all’inserimento di questo dato nello sviluppo dell’albero dei guasti (Figura 9.1). La struttura del diagramma coincide con quello visto nei capitoli precedenti in quando è stato costituito dalle stesse apparecchiature e con i medesimi sistemi di sicurezza ed emergenza.

Lo sviluppo dell’albero dei guasti avviene considerando un sisma di accelerazione spettrale pari a 0.86 g, magnitudo 7 e una distanza sorgente – sito di 20 km.

Il valore della probabilità di accadimento del *Top Event* è pari a 0.862, ovvero 0.040 eventi all’anno e 1.98 eventi ogni 50 anni.

9.2 Quarto caso studio: albero degli eventi con sisma

L'analisi dell'incidenza del sisma in serbatoi sferici viene completata dallo svolgimento dell'albero degli eventi. I tassi di successo che hanno una diminuzione nel caso di evento sismico sono il sistema antincendio e la barriera di contenimento.

La probabilità di accadimento di una rottura di tipo sismico è stata associata alla probabilità di accadimento del sisma ed essa diminuisce all'aumentare della distanza dall'epicentro. Il tasso di guasto riscontrato con evento sismico sarà approssimabile a quello senza evento naturale negli scenari caratterizzati da grande distanze dall'epicentro e magnitudo contenute (Tabella 9.2).

	Tasso di successo con evento sismico μ Distanza 20 km
<i>Top Event</i>	1.98 (accadimenti/50anni)
Innesco Immediato	0.05
Innesco ritardato	0.18
Sistemi Antincendio (<i>sprinkler</i>)	0.78
Campo esplosivo (VCE)	0.16
Barriera di Contenimento	0.40

Tabella 9.2: Tassi di successo albero degli eventi con evento sismico

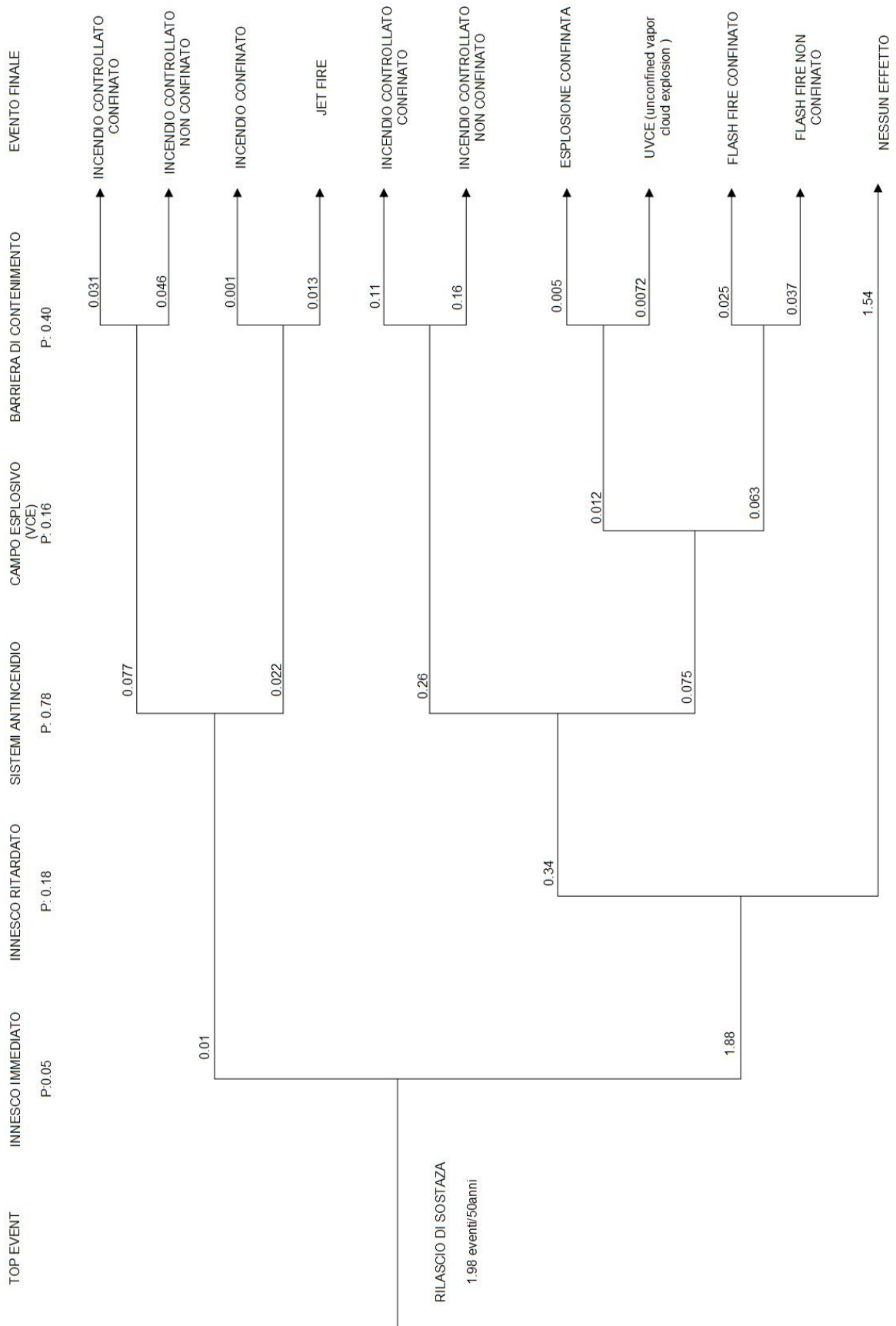


Figura 9.2: Albero degli eventi con l'effetto del sisma relativo al serbatoio sferico con distanza sorgente sito di 20 km.

9.3 Quarto caso studio: albero dei guasti e degli eventi con isolatori sismici

È stato valutato un modo per diminuire la probabilità di accadimento del *Top Event*, che nel caso di un serbatoio sferico di grandi dimensioni e senza presidi antisismici ha una probabilità di accadimento pari all'86%, ovvero 0.040 eventi annui o 1.97 eventi ogni 50 anni.

La tecnica dell'isolamento sismico per i serbatoi sferici è maggiormente problematico in quanto è necessaria una connessione rigida delle basi delle colonne per mezzo di telai o solettoni.

Recentemente sono stati eseguiti molti retrofit sulle sfere Horton, volti ad eliminare le colonne ed appoggiare direttamente la sfera su un unico basamento di grandi dimensioni. A questo punto l'inserimento dell'isolamento sismico al di sotto del basamento è piuttosto semplice e, infatti, è già stato utilizzato in decine di applicazioni.

L'inserimento degli isolatori ha consentito di diminuire la probabilità di un valore pari a 0.2 per quanto riguarda lo scenario di sversamento del contenuto.

Applicando il metodo illustrato nel capitolo 7, è stata individuata la nuova accelerazione spettrale soglia del serbatoio e tramite questo dato sono state calcolate le diverse probabilità di accadimento a diverse distanze sorgente – sito e magnitudo.

Magnitudo	Probabilità di accadimento (20 km)	Probabilità di accadimento (50 km)
4	2.54e-08	5.23e-14
4.5	3.808e-06	1.24e-10
5	1.39e-04	4.32e-08
5.5	1.73e-3	3.26e-06
6	9.56e-03	7.37e-05
6.5	0.029	6.6e-04
7	0.057	0.0029

Tabella 9.3.1: Valori delle probabilità di accadimento del sisma per un serbatoio sferico con presidi antisismici.

Confrontando i valori delle probabilità di accadimento del sisma riportate in tabella 9.3.1 con quelle in tabella 9.1.2 è possibile evidenziare il beneficio che si ottiene tramite i presidi antisismici.

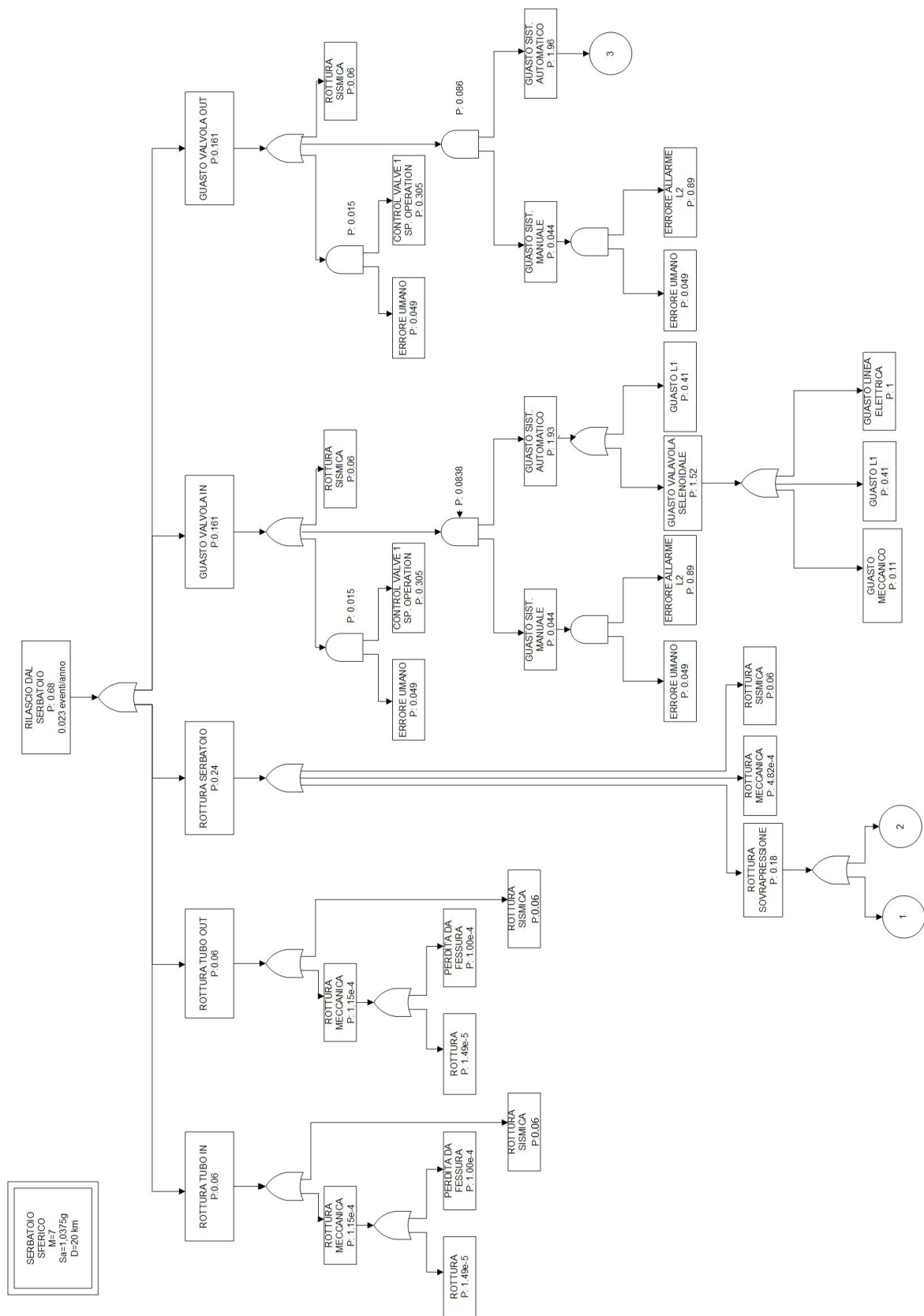


Figura 9.3.1: Albero dei guasti (a) di un serbatoio sferico dotato di isolatori antisismici con l'effetto del sisma.

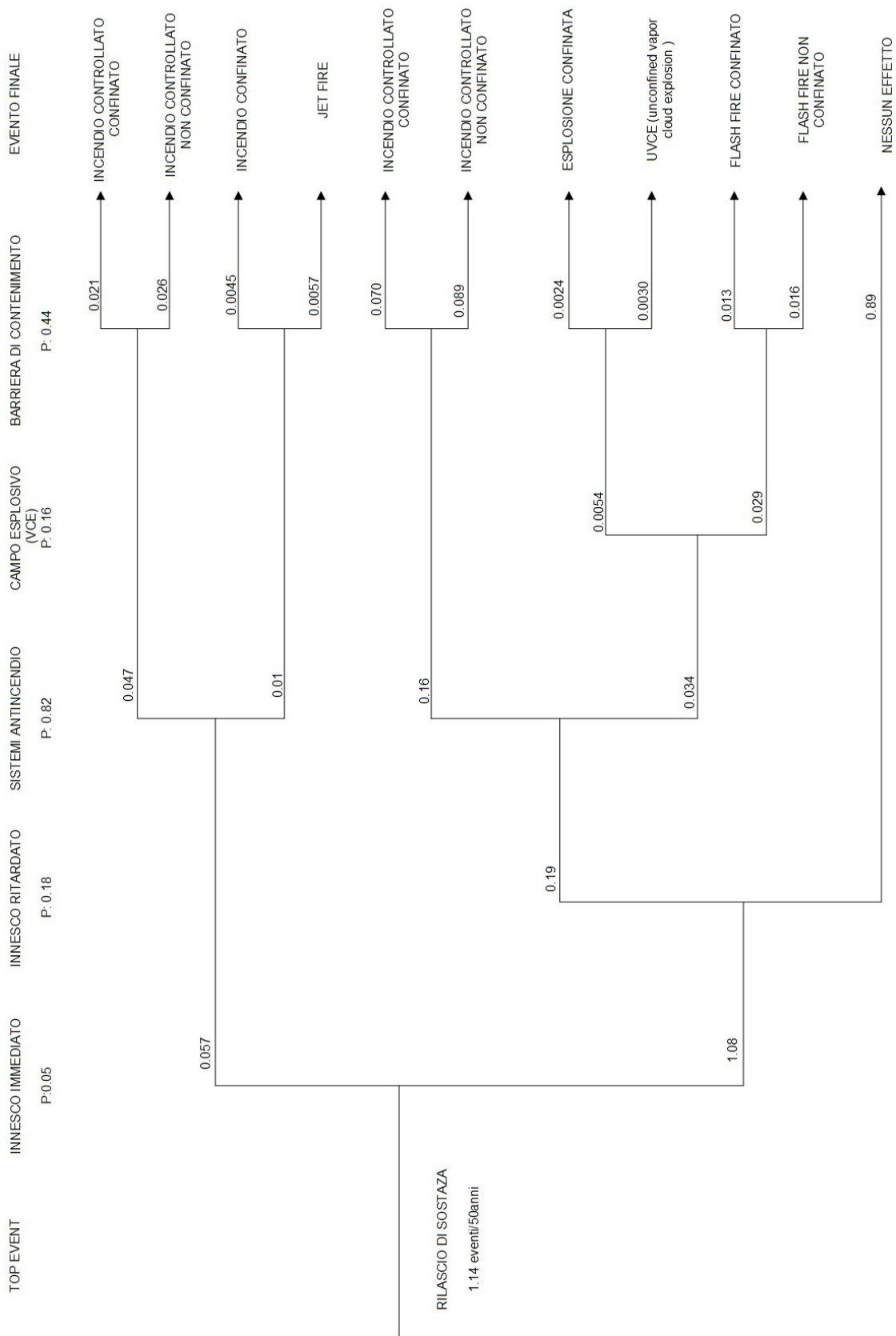


Figura 9.3.2: Albero degli eventi con l'effetto del sisma relativo al serbatoio sferico dotato di isolatori antisismici con distanza sorgente sito di 20 km.

Capitolo 10

Sloshing

10.1 Analisi del fenomeno

Con il termine *sloshing* si fa riferimento al movimento di fluidi all'interno di contenitori rigidi. Nel presente lavoro il fenomeno rappresenta l'oscillazione del liquido contenuto in un serbatoio non pressurizzato, in seguito alla perturbazione indotta dall'evento sismico che provoca un'accelerazione orizzontale nel contenitore.

Il problema dell'interazione fluido - struttura è un tema di grande interesse per una vasta gamma di tipologie strutturali. Questo è un aspetto critico per molte applicazioni che coinvolgono lo stoccaggio di liquido in serbatoi, come ad esempio nel caso del trasporto di carburanti o liquidi pericolosi su strade tramite autocisterne, o alle navi cisterna che attraversano i mari.

Nel caso di serbatoi a tetto galleggiante, potrebbero insorgere problematiche connesse alla formazione di un'onda convettiva che è direttamente connessa all'accelerazione spettrale a cui viene sottoposto il serbatoio.

L'altezza dell'onda, se non opportunamente valutata, potrebbe superare il bordo del serbatoio stesso con conseguente sversamento. La corretta stima di questo fenomeno può supportare la predisposizione di idonee misure di mitigazione dello sversamento.



Figura 10.1: Fuoriuscita di liquido dalla sommità di un serbatoio cilindrico semi-interrato a causa dello sloshing.

È necessario evitare fenomeni di accoppiamento fra la frequenza naturale dello sloshing e quella dell'isolamento sismico, al fine di evitare la formazione di onde di altezza significativa. Il rischio di accoppiamento è maggiore in serbatoi di piccoli o medie dimensioni. Infatti, il periodo naturale dello sloshing in serbatoi di grande dimensioni può arrivare a 7 – 9 s, ben lontano dal periodo di 2 s tipico dell'isolamento sismico¹¹.

In queste situazioni, le azioni idrodinamiche esercitate dal liquido sulle pareti del serbatoio possono essere catalogate in tre tipologie:

- azioni impulsive: dovute alla quota di massa di liquido che si può pensare rigidamente connessa alla struttura. Per quota di massa di liquido si intende la parte inferiore del liquido contenuto nel serbatoio che tende a muoversi con il tempo di vibrazione della struttura.
- azioni convettive dovute all'oscillazioni della massa del liquido;
- azioni impulsive di breve durata: dovute (all'eventuale) deformazione delle pareti del contenitore¹².

D'altra parte, lo *sloshing* ha un aspetto positivo, in quanto evita che tutta la massa partecipi simultaneamente al moto sismico e riduce dunque il carico inerziale sulle pareti che si avrebbe nel caso di serbatoio completamente pieno, confinato e vincolato.

10.2 Periodo di vibrazione impulsivo e convettivo

Le linee guida dell'ASCE “*Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities*” consentono di calcolare l'altezza dell'onda causata dallo *sloshing*.

La formula che permette di calcolare l'altezza dell'onda causata dal moto convettivo dell'onda D_s viene calcolata con la seguente equazione:

$$D_s = 0,42 D_i S_a \quad (10.2)$$

Dove:

- D_i = Diametro di un serbatoio circolare [m];
- S_a = Accelerazione spettrale [$g \text{ m/s}^2$].

¹¹ M. Forni, “L'isolamento sismico degli impianti a rischio di incidente rilevante”, Research&Development;

¹² M. Risa, M. Ciampoli, M. De Angelis, “Valutazione della risposta sismica di serbatoi ad asse orizzontale”, Università di Roma “La Sapienza”, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica;

Prendendo in considerazione entrambi i serbatoi in oggetto, ovvero quelli contenenti n-pentano e acetato di metile, si può calcolare l'altezza dell'onda dovuta al fenomeno di *sloshing* e pertanto il periodo convettivo ed impulsivo.

Calcolo dell'altezza d'onda del liquido.

Serbatoio per lo stoccaggio di n-pentano:

- *Dimetro interno* $D_{int} = 2.48 \text{ m}$
- *Accelerazione spettrale (senza isolatori)* $S_a = 0.88 \text{ g}$
- *Accelerazione spettrale (con isolatori)* $S_a = 1.04 \text{ g}$

Si ottengono: $D_s = 0,91 \text{ m}$ e $D_s' = 1,08 \text{ m}$.

Mentre, per il serbatoio utilizzato per lo stoccaggio di acetato di metile:

- *Dimetro interno* $D_{int} = 1.80 \text{ m}$
- *Accelerazione spettrale (senza isolatori)* $S_a = 0.68 \text{ g}$
- *Accelerazione spettrale (con isolatori)* $S_a = 0.82 \text{ g}$

Si ottengono: $D_s = 0,51 \text{ m}$ e $D_s' = 0,62 \text{ m}$.

Si può notare come il parametro strutturale del serbatoio che influenza è il diametro della struttura stessa, quindi a serbatoi maggiori corrispondono in generale altezze d'onda attese maggiori. Anche un aumento dell'accelerazioni spettrale comporta lo stesso effetto e l'adozione degli isolatori serbatoio-suolo agisce in tal senso.

Applicando questo approccio, è stato verificato che in nessuno dei due serbatoi si verificano le condizioni sufficienti affinché l'onda raggiunga l'altezza massima consentita.

Nel caso in esame i serbatoi non sono a tetto galleggiante quindi non si poneva il problema di un'eventuale fuoriuscita nel caso in cui l'altezza d'onda superasse il bordo del serbatoio, ma sarebbe in ogni caso opportuno rinforzare i serbatoi per evitare che eventuali azioni deformative dell'onda alle pareti.

Il periodo di vibrazione impulsivo è legato alla massa di liquido che si trova nella parte inferiore del serbatoio e che tenderebbe pertanto a muoversi con il serbatoio stesso. Il valore di T_i dovrà pertanto essere un tempo vicino al tempo di risonanza della struttura e calcolato così come da eq. 10.3:

$$T_i = \frac{C_i * H}{27.8 \sqrt{\frac{s}{D}}} \left[\frac{\sqrt{\rho}}{\sqrt{E}} \right] \quad (10.3)$$

Dove:

C_i = Coefficiente di periodo impulsivo;

H = Livello massimo prodotto, ft;

ρ = Densità del liquido stoccato, pcf;

s = Spessore del serbatoio, in;

D = Diametro interno del serbatoio, ft;

E = Modulo elastico, psi.

Il periodo di vibrazione convettivo è legato invece al movimento del liquido e come detto in precedenza l'intervallo varia dai 2 ai 9 secondi. Esso viene calcolato come riportato in eq. 10.4.

$$T_c = 2\pi \sqrt{\frac{D}{3,68 g \tanh(3,68 \frac{H}{D})}} \quad (10.4)$$

Dove:

H = Livello massimo prodotto dal livello, ft;

g = Accelerazione di gravità, 32,2 ft/sec²;

D = Diametro interno del serbatoio, ft.

Considerando il serbatoio di stoccaggio del n-pentano si ottengono i seguenti risultati, riportati in Tabella 10.2.1:

Parametro	Sistema internazionale	Sistema anglosassone
H	4.520 m	14,83 ft
s	0.02 m	0.79 in
ρ	630 kg/ m ³	39,33 lb/ ft ³
D	2,48 m	8,14 ft
E	210000 N/ mm ²	30457917 psi

Tabella 10.2.1: Parametri del serbatoio contenente n-pentano necessari al calcolo del tempo impulsivo.

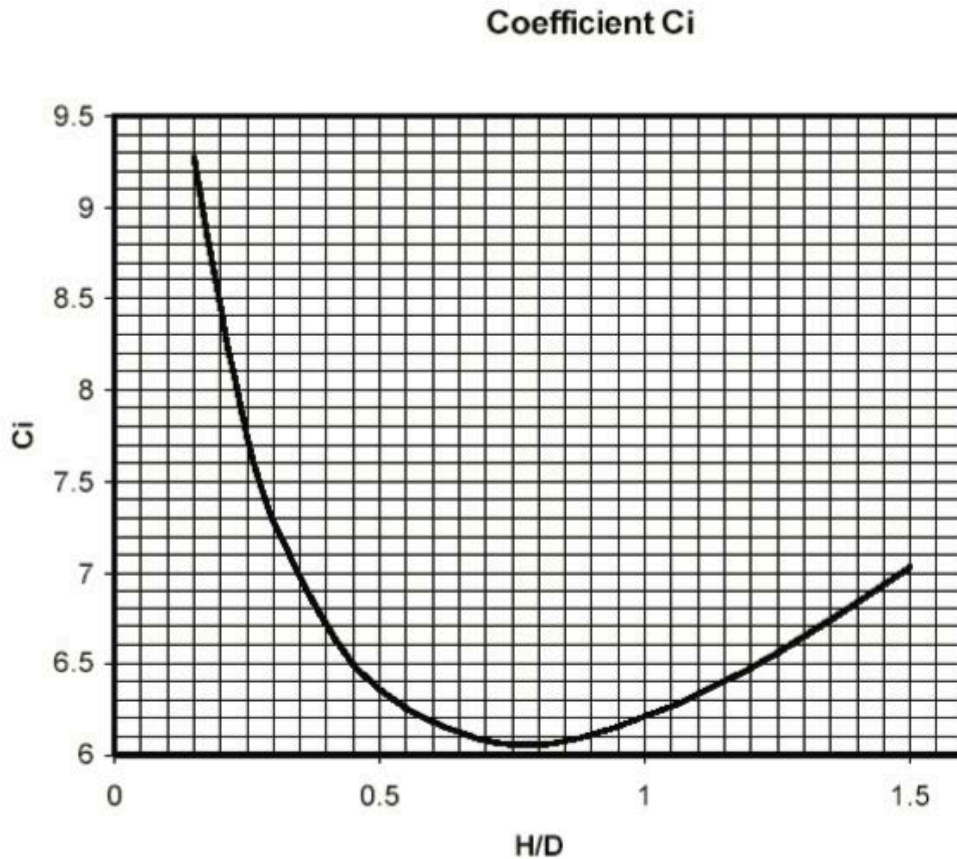


Figura 10.2.1: *Grafico per la valutazione del coefficiente Ci necessario per il calcolo del periodo di vibrazione impulsivo.*

Dal grafico, illustrato in figura 10.2.1, è stato calcolato un valore del coefficiente, pari a 6.3.

Si procede con il calcolo del tempo di vibrazione impulsivo e in seguito con quello convettivo a dare rispettivamente $T_i = 0,0123$ e $T_c = 4,83$ s.

Considerando invece il serbatoio di stoccaggio contenente dell'acetato di metile, i risultati ottenuti in Tabella 10.2.2:

Parametro	Sistema internazionale	Sistema anglosassone
H	4.75 m	15,58 ft
s	0.04 m	0.13 in
ρ	930 kg/ m ³	58.06 lb/ ft ³
D	1,80 m	5,91 ft
E	210000 N/ mm ²	30457917 psi

Tabella 10.2.2: *Parametri del serbatoio contenente acetato di metile necessari al calcolo del tempo impulsivo.*

Dal grafico, illustrato in figura 10.2.1, è stato calcolato un valore del coefficiente, pari a 6.5.

Si procede pertanto con il calcolo del tempo di vibrazione impulsivo e in seguito con quello convettivo:

- $T_i = 0,0339$

- $T_c = 3.43$ s

Dopo aver individuato il tempo convettivo ed impulsivo, ed ancora prima il tempo l'altezza raggiunta dal liquido nel caso in cui il serbatoio subisca un'accelerazione sismica, bisogna sottolineare come le condizioni di calcolo siano basate sull'evento sismico di accelerazione spettrale 0.348 g, magnitudo 7 e distanza sorgente – sito pari a 20 km. L'evento sismico quindi può essere considerato di intensità medio alta.

I tempi calcolati rispettano le indicazioni date da ENEA (*Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile*) sul fatto che i tempi impulsivi si avvicinano, per quanto riguarda l'ordine di grandezza, al periodo di vibrazione; invece i tempi convettivi del liquido hanno periodi che variano dai 3 – 4 s secondi fino ad arrivare ai 9.

Il fenomeno dello *sloshing*, che può essere frequente in uno stabilimento soggetto a scuotimento sismico, richiederà certamente ulteriori indagini. Questo soprattutto per quanto riguarda:

- la massima resistenza attesa alle pareti per evitarne il collasso;
- la soglia di attenzioni per il riempimento dei serbatoi, oltre la quale il fenomeno di *sloshing* potrebbe indurre scenari di rischio addizionali;
- la quantificazione della frequenza di accadimento di questo scenario, allo scopo di includerlo nelle analisi secondo albero dei guasti e degli eventi, in relazione allo scenario di sversamento indesiderato;
- la formulazione di linee guida per la gestione di questa fenomenologia anomala.

Conclusioni

L'obiettivo di questo elaborato è quello di indagare e valutare il rischio sismico di apparecchiature chimiche e di processo situate in aree sismiche, considerando anche le eventuali misure di prevenzione e di mitigazione.

Nello svolgimento dell'elaborato sono state affrontate ed applicate a serbatoi tipo dell'industria di processo alcune metodologie di analisi quantitativa di rischio, includendo l'evento iniziatore sismico.

In generale, si può intervenire sul rischio, anche *NaTech*, mediante:

- misure di prevenzione: ovvero azioni o misure che hanno l'obiettivo di ridurre la frequenza di eventi indesiderati;
- misure di mitigazione ovvero azioni o misure che hanno lo scopo di ridurre l'impatto dello scenario indesiderato.

Nel caso in esame e con riferimento ai serbatoi analizzati, è stato considerato l'evento di rilascio accidentale di sostanza indotto da guasti ordinari (guasto meccanico, sovrappressione, ...) e da eventi iniziatori non convenzionali quali l'evento sismico. Sono state considerate due modalità di gestione del rischio ovvero gli isolatori antisismici e gli ancoraggi per le condotte di servizio al serbatoio.

Le misure di prevenzione del rischio *NaTech*, di cui si è discusso, hanno lo scopo di diminuire la frequenza di accadimento; aspetto necessario per raggiungere questo obiettivo è avere maggior consapevolezza dell'entità del rischio in tutti gli aspetti nella fase di progettazione. Una corretta progettazione prevede anche presidi antisismici che permettano l'utilizzo dei sistemi di mitigazione. Per questo motivo le misure di mitigazione possono essere applicate procedendo con un *retrofit* della struttura o dell'impianto, anche se l'adeguamento progettuale potrebbe diventare economicamente insostenibile. Per tale ragione sia le misure di mitigazione che di prevenzione dovrebbero essere incluse sistematicamente già nella fase di progettazione preliminare orientata alla riduzione dei rischi.

La presente indagine ha consentito di affrontare problematiche inerenti all'individuazione dei tassi di guasto di elementi meccanici indotti anche dal sisma oltretutto da eventi iniziatori tradizionali.

La trattazione dell'evento sismico ha dunque previsto un approccio di tipo probabilistico (equazione di movimento al suolo – GMPE, distribuzione statistica dei parametri

associati, spettri progettuali, ...) allo scopo di includerlo efficacemente delle analisi secondo albero dei guasti e degli eventi.

Gli spettri sono stati ricavati utilizzando le equazioni basate sull'Eurocode 8 e sulle disposizioni NEHRP e standard ASCE 7, individuando l'accelerazione spettrale, relativa al periodo di vibrazione della struttura. Il calcolo del periodo di vibrazione della struttura è stato sulla base delle linee guida dell'ASCE "*Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities*". Il parametro quantificato viene considerato come valore di soglia, oltre il quale si ha rottura della struttura che entrerebbe in risonanza con l'azione sismica indotta al suolo.

I periodi di vibrazione sono stati calcolati per due livelli di riempimento diversi allo scopo di indagare l'effetto sul periodo naturale di vibrazione della struttura. Entrambi ricadono nella zona dello spettro (secondo intervallo dello spettro) in cui l'accelerazione spettrale ha un valore costante perciò è stato possibile assumerla costante. Anche per tale ragione, la probabilità di accadimento del sisma risulta indipendente dal grado di riempimento del serbatoio, pur essendo legata alle proprietà fisiche della sostanza immagazzinata e a quelle strutturali del serbatoio.

L'indagine è stata anche orientata all'analisi dell'influenza delle dimensioni del serbatoio sulla risposta sismica e sul valore finale di probabilità dello scenario di sversamento. A tal riguardo, è stato incluso nell'analisi un secondo serbatoio, dimensionalmente differente e contenente dell'acetato di metile. Il periodo di vibrazione della struttura è stato individuato nel primo intervallo dello spettro, in cui si ha una relazione lineare tra periodo e accelerazione spettrale, quindi sono stati individuati due valori di accelerazione spettrale, pur molto vicini.

Il terzo serbatoio considerato ha una forma differente dai primi due, in quanto è un serbatoio sferico pressurizzato, assunto contenente gas di petrolio liquefatto e Gpl e ammoniacca.

Lo studio mostra che entrambi i periodi di vibrazione della struttura ricadono nel secondo intervallo dello spettro e quindi le due strutture avendo tempi di vibrazione differenti hanno comunque la stessa accelerazione spettrale.

Utilizzando l'accelerazione spettrale relativa al periodo di vibrazione soglia della struttura, usando le equazioni di previsione al suolo (GMPE), la deviazione standard, distanza sorgente - sito e magnitudo fissate, viene calcolata la probabilità di accadimento dell'evento sismico che provocherebbe danni alla struttura. La probabilità di accadimento

viene considerata coincidente alla probabilità di guasto che poi viene inserita nei diagrammi dell'albero dei guasti.

Nell'albero dei guasti sono state quindi inserite le probabilità di rotture per cause meccaniche, elettriche, errori umani e infine la rottura per causa sismica.

In primo luogo, è stato svolto lo sviluppo dell'albero dei guasti senza considerare l'evento sismico in modo tale da capire l'effettivo aggravante portato dall'evento sismico.

Le analisi condotte sui diversi alberi dei guasti mostrano che un serbatoio con capacità inferiori ha un'accelerazione spettrale minore, riferita al periodo di vibrazione. Ciò, selezionato un certo sisma, si riflette su probabilità di accadimento attese maggiori.

Un parametro, rilevante per l'analisi, è l'MTBF (*Mean Time Between Failures*) che mostra valori non trascurabili per eventi sismici che avvengono ad una distanza sito-epicentro inferiore a 25 km. A distanze superiori (fino a 50 km) gli esiti sono pressoché comparabili con lo scenario senza evento sismico.

L'analisi ha previsto anche lo studio dell'incidenza di alcune misure di mitigazione del rischio sull'esito quantitativo probabilistico del *Top Event* e sull'evoluzione incidentale.

In primo luogo, sono stati applicati degli isolatori antisismici che hanno consentito un'importante diminuzione della probabilità di accadimento del sisma per eventi tellurici con distanze sorgente – sito di 50 km. A distanze inferiori, l'effetto è più contenuto (a 20 km, la riduzione è 20 - 25 %).

Gli ancoraggi antisismici agiscono analogamente e danno beneficio (in termini di mitigazione) ai rami pertinenti alla rottura delle tubazioni di servizio.

Infine, è stato studiato preliminarmente il fenomeno dello *sloshing*, che ad oggi crea diverse problematiche, nel campo dello stoccaggio e del trasporto di sostanza. L'analisi, pur richiedendo ulteriori approfondimenti, mostra che innanzitutto una corretta progettazione della struttura (specie nelle dimensioni) è elemento essenziale per prevenire il fenomeno. In aggiunta, l'ispessimento delle pareti può giovare alla gestione delle conseguenze di impatto determinate dall'onda oscillante del liquido, in risposta all'evento sismico.

Appendice: Script Matlab

1.1 spettro_orizzontale

```
%%spettro di progetto orizzontale
Ssuh=input('inserire ordinata accelerazione spettrale breve periodo
probabilistica Ssuh: ');
Sluh=input('inserire ordinata accelerazione spettrale lungo periodo
probabilistica Sluh: ');
Crs=input('inserire il valore mappato del coefficiente di rischio a
T=0.2s: ');
Cr1=input('inserire il valore mappato del coefficiente di rischio a
T=1.0s: ');
TL=input('inserire il periodo di transizione di lungo periodo TL: ');
SS=Crs*Ssuh;
S1=Cr1*Sluh;
Fa=input('inserire il fattore di sito Fa correttivo di SS: ');
Fv=input('inserire il fattore di sito Fv correttivo di S1: ');
%% design spectrum
Sds=2/3*(Fa*SS);
Sd1=2/3*(Fv*S1);
T0=0.2*Sd1/Sds;
Ts=Sd1/Sds;
T1=linspace(0,T0,1000);
Sa1=0.6.*(Sds./T0).*T1+0.4*Sds;
T2=linspace(T0,Ts,1000);
Sa2=ones(1,length(T2)).*Sds;
T3=linspace(Ts,TL,1000);
Sa3=Sd1./T3;
T4=linspace(TL,6,1000);
Sa4=(Sd1*TL)./(T4.^2);
% grafico spettro elastico orizzontale
plot(T1,Sa1,'b',T2,Sa2,'b',T3,Sa3,'b',T4,Sa4,'b')
xlabel('Period(s)')
ylabel('Spectral Acceleration (g)')
```

1.2 periodo_vibrazione_tank

```
%% calcolo periodo di vibrazione
% misure in metri, kilogrammi
h =(input('inserire altezza serbatoio: '))*3.28;%ft
de =(input('inserire il diametro esterno del serbatoio: '))*3.28;%ft
d =(input('inserire il diametro interno del serbatoio: '))*3.28;%ft
t =(de-d)*39.37;%inch
dens=input('inserire la densità liquido : ')*0.062; % lb/ft^3
densa=input('inserire densità acciaio: ')*0.062;
densv =input('inserire densità vapore : ')*0.062;
V= input('inserire il volume interno del serbatoio: ')*35.3146 % ft^3;
r=input('inserire riempimento liquido : ');
rv= 1-r; % riempimento vapore
%% calcolo peso liquido, vapore e materiale serbatoio
wl = pi*(d^2/4)*h*r*dens;
wv = pi*(d^2/4)*h*rv*densv;
wa = pi*((d/2+t)^2-(d/2)^2)*h*densa;
w=wl+wv+wa;
%% natural period serbatoio cilindrico
T1 = (7.78/10^6)*(h/d)^2* sqrt(12*w*d/t)
```

1.3 probabilita_sisma

```
%% Calcolo della probabilità di accadimento del sisma
ag=input('inserire accelerazione spettrale periodo di risonanza: ');
M= input('inserire la magnitudo: ');
sigma= 0.695;
R=[5 10 20 30 40 50 60];
%% calcolo della probabilità
%[lnSa] = equazione di previsione del movimento al suolo
lnSa=((-4.769+2.229.*M-0.182.*(M.^2)+(-
2.493+0.218.*M).*log((R.^2+8.219^2).^0.5)));
p=(1-cdf('normal',log(ag),lnSa, sigma));
disp('La probabilità di accadimento del sisma vale: : ')
num2str(p)
plot (R,p)
xlabel('Probabilità')
ylabel ('distanza sorgente-sito (km)')
```

1.4 accelerazione_suolo

```
%% Calcolo della probabilità di accadimento del sisma
ag=input('inserire accelerazione spettrale periodo di risonanza: ');
M= input('inserire la magnitudo: ');
sigma= 0.695;
R=[5 10 20 30 40 50 60];
%% calcolo della probabilità
%[lnSa] = equazione di previsione del movimento al suolo
lnSa=((-4.769+2.229.*M-0.182.*(M.^2)+(-
2.493+0.218.*M).*log((R.^2+8.219^2).^0.5)));
```

Bibliografia

- F. Dattilo, C. Rafanelli, P. De Nictolis, R. Emmanuele, Luglio 2016 – Vers. 10 “*Le attività a rischio di incidente rilevante in Italia*”, Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco e ARPAV.
- Valutazione e gestione del rischio, 2016, “*Metodologia per la gestione degli eventi NaTech*”.
- R. J. Willey, “*Layer of Protection Analysis*”, Department of Chemical Engineering, Northeastern University, Boston, Mass, ScienceDirect.
- L. Simonelli, “*Eurocodice 8: valutazione delle azioni sismiche al suolo ed effetti sulla spinta dei terreni*”.
- American Society of Civil Engineers, 2005, Minimum design loads for buildings and other structures. ASCE 7-05, Reston.
- American Society of Civil Engineers, 2010, Minimum design loads for buildings and other structures. ASCE 7-10, Reston.
- U.S. Experience with Sprinklers. National Fire Protection Association (luglio 2017) Banca dati MHIDAS.
- Building Seismic Safety Council, 1997, NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. FEMA 303, FEMA, Washington.
- Building Seismic Safety Council, 2000, NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. FEMA 368, FEMA, Washington.
- Krausmann, E., Cruz, A.M., 2013. Impact of the 11 March 2011, Great East Japan earthquake and tsunami on the chemical industry. Nat. Hazards 67 (2), 811–828.
- Krausmann, E., Cruz, E. Salzano, Natech risk assessment and management, reducing the risk of natural – hazard, impact in hazardous installations.
- Laurent, A., 2011. Securite des procedes chimiques Connaissances et methods d'analyse des risques. Lavoisier, France.
- M.J. Watts, H.G. Bohle, Hunger, famine and the space of vulnerability, GeoJournal30 (2) (1993) 117–125.
- NTC08, DM. 14 gennaio 2008 “Norme Tecniche per il progetto, la valutazione e l’adeguamento sismico degli edifici”.

- Building Seismic Safety Council, 2003, NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. FEMA 450, FEMA, Washington.
- Don W. Green, Robert H. Perry, 2008, Perry chemical Engineers' Handbook. 8 TH edition.
- Api standard 620, february 2002, Tenth edition, Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks.
- Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance- Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, 2004, EN-1998-1. European Committee for Standardization, Brussels.
- Halûk Sucuoğlu, Sinan Akkar. 2014, "Basic Earthquake Engineering, From Seismology to Analysis and Design".
- Guidelines for seismic evaluation and design of petrochemical facilities, 1997, *Second Edition*. Prepared By Task Committee on Seismic Evaluation and Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers.

Ringraziamenti

Sembra scontato da dire ma non pensavo sarei riuscita ad essere qui, in questo giorno e festeggiare uno dei traguardi più importanti della mia vita.

A marzo dell'anno scorso, ho intrapreso questo percorso, tra mille dubbi e perplessità, conscia di poter esser in grado, ma ancora nel limbo se il percorso dell'ingegneria fosse a me congeniale.

Questo corso di laurea magistrale, non so in che modo, è riuscito darmi qualche certezza in più. Vorrei ringraziare mio padre, luce silenziosa ma determinante, per avermi consigliato di intraprendere questa strada.

Vorrei dire un "grazie" sincero alla mia mamma, che con il suo travolgente entusiasmo è riuscita a trasmettermi la forza per arrivare a questo traguardo bruciando i tempi.

Ringrazio i miei genitori per avermi sostenuto in tutti questi anni con tutte le loro forze e spero di aver ripagato i loro sforzi e di non averli mai delusi.

Un ringraziamento va a ai miei fratelli Riccardo e Giulio che amo indistintamente più di ogni cosa, anche se delle volte non sembra. Spero un giorno, vicino o più lontano di festeggiare i loro traguardi più importanti.

Ringrazio le mie amiche Teresa e Melanie per esserci state fino ad ora, in ogni momento, in ogni luogo e con tutta la loro energia. Le ringrazio per avermi abbracciato quando necessitavo di un abbraccio, per avermi ascoltato, per avermi consigliato, per avermi fatto ridere e per tutto quello che sono.

Ringrazio le mie amiche di sempre Laura ed Elisa. Crescere insieme e vedervi ancora al mio fianco credo sia uno dei regali più grandi che una persona possa ricevere.

Ringrazio le mie compagne di università, in particolare Veronica e Giulia, per il supporto morale, e non solo, in questi anni di lezioni e esami.

Concludendo, vorrei ringraziare Sofia. Per ultima, non perché meno importante, ma perché come i film più belli si tende a ricordare maggiormente il finale. Sofia sa di avermi tirato fuori da uno dei periodi maggiormente critici della mia vita. Non solo per questo motivo merita queste parole, la ringrazio per avermi ascoltato, capito, supportata e più di qualche volta sopportata.

