

**POLITECNICO DI MILANO**

Facoltà di Ingegneria dei Processi Industriali

Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “Giulio Natta”



**DEFINIZIONE DI UN APPROCCIO  
SEMPLIFICATO PER LA VALUTAZIONE DEL  
RISCHIO NATECH DETERMINATO DA SISMI**

Tesi di Laurea Specialistica in Ingegneria della Prevenzione e  
della Sicurezza nell'Industria di Processo

Relatore:

**Valentina BUSINI**

Correlatore:

**Enrico MARZO**

Candidato:

**Andrea CALLIONI**

**Matr. 720221**

**Anno Accademico 2009-2010**

Abstract.....	11
Keywords: NaTech – Terremoti – Incidenti industriali – Analisi rischio – <i>Analytic Hierarchy Process</i> - Sostanze pericolose - Probabilità di guasto - Effetto domino.	
<b>1. INTRODUZIONE .....</b>	<b>30</b>
<b>2. STATO DELL'ARTE .....</b>	<b>32</b>
2.1. Incidenza di catastrofi naturali .....	32
2.1.1. Valutazione e gestione del rischio naturale .....	32
2.2. Rischio NaTech .....	33
2.2.1. Valutazione e gestione del rischio NaTech .....	34
2.2.1.1. Valutazione quantitativa del rischio NaTech.....	36
2.2.1.2. Valutazione qualitativa del rischio NaTech.....	38
<b>3. MATERIALI E METODI .....</b>	<b>40</b>
3.1. Obiettivo .....	40
3.2. Approccio al problema .....	41
3.2.1. Caratterizzazione dell'evento sismico .....	41
3.2.2. Identificazione delle apparecchiature bersaglio .....	44
3.2.3. Stima della probabilità di guasto per cause sismiche .....	45
3.2.4. Stima della probabilità di guasto causa effetto domino.....	49
3.2.4.1. Distanza di sicurezza per BLEVE ed esplosioni meccaniche .....	50
3.2.4.2. Distanza di sicurezza per <i>fireball</i> .....	52
3.2.4.3. Distanza di sicurezza per incendi di pozza.....	53
3.2.4.4. Probabilità di guasto per effetto domino .....	54
3.2.4.5. Stima della probabilità di guasto totale .....	55
3.2.5. Pericolosità delle sostanze .....	56
3.2.5.1. Infiammabili .....	59
Volatilità .....	60
Entalpia di combustione .....	61
Massa .....	62
3.2.5.2. Tossiche .....	63
Volatilità .....	63
Tossicità.....	64

3.2.5.3. Esplosive.....	64
Pressione di stoccaggio.....	66
Probabilità di accadimento .....	66
Entalpia di combustione .....	66
Volatilità .....	66
3.3. <i>Analytic Hierarchy Process</i> .....	67
3.3.1. Valutazione delle alternative .....	68
3.3.2. Costruzione delle gerarchie .....	69
3.3.2.1. Infiammabili .....	70
3.3.2.2. Tossiche .....	72
3.3.2.3. Esplosive.....	73
3.3.2.4. Commento alle gerarchie.....	76
3.3.3. Aggregazione degli indici.....	77
3.3.4. Definizione dei pesi .....	78
3.3.4.1. Costruzione delle Matrici dei confronti a coppie .....	78
3.3.4.2. Calcolo dei pesi e consistenza delle matrici .....	79
3.3.4.3. Matrici e pesi per sostanze Infiammabili.....	80
3.3.4.4. Matrici e pesi per sostanze Tossiche .....	83
3.3.4.5. Matrici e pesi per sostanze Esplosive .....	85
<b>4. RISULTATI.....</b>	<b>88</b>
4.1. Convalida.....	88
4.1.1. Caso studio 1 – Milazzo .....	91
4.1.2. Caso studio 2 - Roma .....	98
4.1.3. Caso studio 3 – Livorno.....	100
4.1.4. Commento ai risultati .....	102
4.2. Analisi di sensitività .....	103
4.2.1. Vulnerabilità sismica .....	103
4.2.2. Vulnerabilità all’effetto domino .....	109
4.2.3. Volatilità delle sostanze.....	113
<b>5. CONCLUSIONI .....</b>	<b>118</b>
<b>6. ALLEGATO .....</b>	<b>120</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>123</b>

## Indice delle figure

Figura 1 – Mappa della PGA attesa con il 10% di Exceedance Probability in 50 anni sul suolo italiano (INGV 2004) .....	43
Figura 2 – <i>Damage probability</i> relativa al collasso (DS3) di serbatoi atmosferici ancorati (At-An) con livello di riempimento superiore all'80% ( <i>full</i> ) come funzione dell'intensità sismica PGA. ....	47
Figura 3 – <i>Damage probability</i> relativa al collasso (DS3) di serbatoi atmosferici non ancorati (At-Un) con livello di riempimento superiore all'80% ( <i>full</i> ) come funzione dell'intensità sismica PGA. ....	48
Figura 4 – <i>Damage probability</i> relativa al collasso (DS3) di serbatoi pressurizzati (PV) come funzione dell'intensità sismica PGA. ....	48
Figura 5 – Distanze di sicurezza per la prevenzione dell'effetto domino causato dall'onda d'urto prodotta dal <i>BLEVE</i> di un vessel di propano riempito all'80%, in funzione della massa, del volume e dell'energia totale liberata. Linea continua: serbatoi pressurizzati; linea tratteggiata: serbatoi atmosferici (Cozzani <i>et al.</i> 2007).....	51
Figura 6 – Distanze di sicurezza per la prevenzione dell'effetto domino causato da un <i>fireball</i> in funzione della massa e del corrispondente volume di un vessel di propano pieno all'80%. Solo per serbatoi atmosferici (Cozzani <i>et al.</i> 2007).....	52
Figura 7 – Massa critica di combustibile per l'effetto domino dovuto a incendi di pozza in funzione della superficie e del raggio equivalente della pozza. <i>Light liquid</i> : velocità bruciamento >0,055 kg/m <sup>2</sup> s; <i>Heavy vapour</i> : velocità bruciamento <0,055 kg/m <sup>2</sup> s. Per ottenere le distanze di sicurezza, aggiungere al raggio equivalente 50 metri per serbatoi atmosferici e 15 metri per pressurizzati (Cozzani <i>et al.</i> 2007)..	53
Figura 8 – Tassonomia degli eventi incidentali generati da sostanze pericolose con caratteristiche differenti (Rota e Nano 2007). ....	57
Figura 9 – Gerarchia per la valutazione del rischio NaTech relativo ad incendi; ai nodi sono mostrati i criteri individuati e la domanda a cui devono rispondere, nonché i pesi assegnati ai differenti criteri (Busini, Marzo, Callioni, Rota, <i>to be submitted</i> ).....	71
Figura 10 – Gerarchia per la valutazione del rischio NaTech relativo a dispersione di sostanze tossiche; ai nodi sono mostrati i criteri individuati e la domanda a cui devono rispondere, nonché i pesi assegnati ai differenti criteri (Busini, Marzo, Callioni, Rota, <i>to be submitted</i> ).....	73

Figura 11 – Gerarchia per la valutazione del rischio NaTech relativo ad esplosioni; ai nodi sono mostrati i criteri individuati e la domanda a cui devono rispondere, nonché i pesi assegnati ai differenti criteri (Busini, Marzo, Callioni, Rota, <i>to be submitted</i> ). .....	75
Figura 12 – Rappresentazione grafica dei valori assunti dal Rischio Locale, ottenuti da QRA. Linea tratteggiata: probabilità di guasto per cause sismiche non inclusa; linea continua: probabilità di guasto per cause sismiche inclusa (Antonioni <i>et al.</i> 2007). .....	89
Figura 13 - – Curva F-N ottenuta dall’aggregazione dei valori del Rischio Locale. Linea tratteggiata: probabilità di guasto per cause sismiche non inclusa; linea continua: probabilità di guasto per cause sismiche inclusa (Antonioni <i>et al.</i> 2007). .....	90
Figura 14 – Layout per il caso studio 1 – Milazzo (Campedel <i>et al.</i> 2008). .....	92
Figura 15 – Procedura per la valutazione semplificata del rischio di incidente rilevante iniziato da sismi (Busini, Marzo, Callioni, Rota, <i>to be submitted</i> ). .....	93
Figura 16 – <i>Layout</i> per il caso studio 2 – Roma (Campedel <i>et al.</i> 2008). .....	98
Figura 17 – <i>Layout</i> per il caso studio 3 – Livorno (Campedel <i>et al.</i> 2008). .....	100
Figura 18 – KPI calcolati in corrispondenza di differenti valori di PGA per serbatoi atmosferici non ancorati. ....	105
Figura 19 – KPI calcolati in corrispondenza di differenti valori di PGA per serbatoi atmosferici ancorati. ....	106
Figura 20 –KPI calcolati in corrispondenza di differenti valori di PGA per serbatoi pressurizzati. ....	107
Figura 21 –KPI <sub>G</sub> calcolati per differenti valori di PGA e tipologia di serbatoio. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati. ....	108
Figura 22 – Valori dei KPI calcolati per differenti layout di coppie di serbatoi soggetti all’effetto domino causato dalla presenza di differenti tipologie di serbatoio in corrispondenza di una PGA pari a 0,20 g. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati. ....	112
Figura 23 – KPI calcolati per sostanze con differenti caratteristiche di volatilità per un indice di Massa Pesata pari a 1. 1: Gas compressi/liquefatti; 2: Liquidi alta volatilità; 3: Liquidi bassa volatilità; 4: Solidi/polveri fini. ....	114

Figura 24 – KPI calcolati per sostanze con differenti caratteristiche di volatilità in corrispondenza di una PGA pari a 0,20g. 1: Gas compressi/liquefatti; 2: Liquidi alta volatilità; 3: Liquidi bassa volatilità; 4: Solidi/polveri fini.....	116
Figura 25 – KPI calcolati per sostanze con differenti caratteristiche di volatilità in due situazioni: indice di massa pesata uguale a 1 (WM=1); frazione massiva pari a 1 e PGA pari a 0,20g (WM realistico). 1: Gas compressi/liquefatti; 2: Liquidi alta volatilità; 3: Liquidi bassa volatilità; 4: Solidi/polveri fini. ....	117

## Indice delle Tabelle

Tabella 1 – Zonazione sismica per il territorio italiano come definita dall’Ordinanza OPCM 3519. ....	43
Tabella 2– <i>Damage State</i> attesi e a) scenari di riferimento assunti per la valutazione delle conseguenze di b) <i>Loss of Containment events</i> a seguito del danneggiamento di serbatoi atmosferici e pressurizzati per cause sismiche (Antonioni <i>et al.</i> 2007).45	45
Tabella 3 – Modelli di vulnerabilità: valori delle costanti <i>Probit</i> nell’Equazione 1 per differenti apparecchiature, stati di guasto e livelli di riempimento (Antonioni <i>et al.</i> 2009).....	46
Tabella 4 – Scenari incidentali capaci di causare effetto domino definiti sulla base delle caratteristiche di pericolosità delle sostanze coinvolte.....	54
Tabella 5 – Criteri preliminari per l’identificazione e la classificazione delle apparecchiature critiche dal punto di vista del rischio di incidente (Antonioni <i>et al.</i> 2009). ....	59
Tabella 6 – Variabili principali influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Infiammabili. ....	62
Tabella 7 - Variabili principali influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Tossiche. ....	64
Tabella 8 - Variabili principali influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Esplosive.....	67
Tabella 9 – Scala semantica usata dal metodo AHP (Saaty 1980).....	78
Tabella 10 – Matrice dei confronti a coppie per la volatilità di sostanze Infiammabili. ....	82
Tabella 11 – Matrice dei confronti a coppie normalizzata per la volatilità di sostanze Infiammabili. ....	82
Tabella 12 – Pesi per la volatilità di sostanze Infiammabili, da utilizzare nella gerarchia relativa a Incendi rappresentata in Figura 9.....	82

Tabella 13 - Matrice dei confronti a coppie per l'entalpia di combustione di sostanze Infiammabili. ....	83
Tabella 14 - Pesi per l'entalpia di combustione di sostanze Infiammabili, da utilizzare nella gerarchia relativa a Incendi rappresentata in Figura 9.....	83
Tabella 15 - Matrice dei confronti a coppie per la volatilità di sostanze Tossiche. ....	84
Tabella 16 – Pesi per la volatilità di sostanze Tossiche, da utilizzare nella gerarchia relativa a Dispersione di sostanze tossiche rappresentata in Figura 10.....	84
Tabella 17 - Matrice dei confronti a coppie per la tossicità di sostanze Tossiche. ....	85
Tabella 18 – Pesi per la tossicità di sostanze Tossiche, da utilizzare nella gerarchia relativa a Dispersione di sostanze tossiche rappresentata in Figura 10.....	85
Tabella 19 - Matrice dei confronti a coppie per la probabilità di accadimento di differenti scenari di esplosione.....	85
Tabella 20 – Pesi per la per la probabilità di accadimento di differenti scenari di esplosione, da utilizzare nella gerarchia relativa ad Esplosioni rappresentata in Figura 11. .	86
Tabella 21 - Matrice dei confronti a coppie per la pressione di stoccaggio di Gas compressi/liquefatti. ....	86
Tabella 22 – Pesi per la per la pressione di stoccaggio di Gas compressi/liquefatti, da utilizzare nella gerarchia relativa ad Esplosioni rappresentata in Figura 11. ....	86
Tabella 23 - - Matrice dei confronti a coppie per la volatilità di sostanze Infiammabili capaci di generare VCE. ....	87
Tabella 24 – Pesi per la per la volatilità di sostanze Infiammabili capaci di generare VCE, da utilizzare nella gerarchia relativa ad Esplosioni rappresentata in Figura 11. ....	87
Tabella 25 – Matrice delle probabilità condizionate contenente i valori $P_{jk}$ della probabilità che un incidente sul serbatoio j causi il collasso del serbatoio k per effetto domino. ....	94
Tabella 26 – Valori della probabilità di guasto totale per i serbatoi dell'impianto al caso studio 1. ....	95
Tabella 27 – Valori degli indici di massa pesata calcolati per i serbatoi del caso studio 1.....	95
Tabella 28 – Valori dei KPI relativi ai diversi serbatoi e all'impianto nel suo complesso, ottenuti con il metodo semplificato per la valutazione dl rischio NaTech. ....	97
Tabella 29 – Confronto tra i KPI relativi all'impianto del caso studio 1, ottenuti considerando serbatoi Ancorati e Non Ancorati.....	97
Tabella 30 – PLL ricavati tramite QRA dell'impianto del caso studio 1 (Campedel <i>et al.</i> 2008).....	97

Tabella 31 - Valori delle probabilità totali di guasto $DP_k$ , degli indici di Massa pesata e dei KPI relativi ai diversi serbatoi e all'impianto nel suo complesso, ottenuti con il metodo semplificato per la valutazione del rischio NaTech.....	99
Tabella 32 - KPI relativi all'impianto del caso studio 2.....	99
Tabella 33 - PLL ricavati tramite QRA dell'impianto del caso studio 2 (Campedel <i>et al.</i> 2008).....	100
Tabella 34 – Matrice delle probabilità condizionate contenente i valori $P_{jk}$ della probabilità che un incidente sul serbatoio j causi il collasso del serbatoio k per effetto domino. ....	101
Tabella 35 - Valori delle probabilità totali di guasto $DP_k$ , degli indici di Massa pesata e dei KPI relativi ai diversi serbatoi e all'impianto nel suo complesso, ottenuti con il metodo semplificato per la valutazione del rischio NaTech.....	102
Tabella 36 - KPI relativi all'impianto del caso studio 3.....	102
Tabella 37 - PLL ricavati tramite QRA dell'impianto del caso studio 3 (Campedel <i>et al.</i> 2008).....	102
Tabella 38 – Valori della probabilità di guasto $DP_j$ assunta dai serbatoi in corrispondenza di diversi valori di PGA. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati. ....	104
Tabella 39 – KPI calcolati per serbatoi atmosferici non ancorati soggetti a diversi valori della PGA. ....	105
Tabella 40 – KPI calcolati per serbatoi atmosferici ancorati in corrispondenza di diversi valori della PGA. ....	106
Tabella 41 – KPI calcolati per serbatoi pressurizzati soggetti a diversi valori della PGA....	107
Tabella 42 – $KPI_G$ calcolati per differenti serbatoi in corrispondenza di diversi valori della PGA. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati. ....	108
Tabella 43 – Valori della probabilità di guasto $DP_j$ assunta dai serbatoi per una PGA pari a 0,20g. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati. ....	110
Tabella 44 – Valori della probabilità di guasto totale $DP_k$ assunta da serbatoi soggetti all'effetto domino causato dalla presenza di differenti tipologie di serbatoio in corrispondenza di una PGA pari a 0,20 g. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati. ....	110



Tabella 45 – Valori dei $KPI_G$ calcolati per differenti layout di coppie di serbatoi soggetti all'effetto domino causato dalla presenza di differenti tipologie di serbatoio in corrispondenza di una PGA pari a 0,20 g. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati.....	111
Tabella 46 –KPI calcolati per sostanze con differenti caratteristiche di volatilità per un indice di Massa Pesata pari a 1.....	114
Tabella 47 – Valori delle probabilità di guasto $DP_j$ calcolati in corrispondenza di una PGA pari a 0,20g. At-Un: serbatoio atmosferici non ancorati; PV: serbatoi pressurizzati. ....	115
Tabella 48 – KPI calcolati per sostanze con differenti caratteristiche di volatilità per una PGA pari a 0,20g. ....	115
Tabella 49 – $KPI_G$ calcolati per sostanze con differenti caratteristiche di volatilità in due situazioni: indice di massa pesata uguale a 1 ( $WM=1$ ); frazione massiva pari a 1 e PGA pari a 0,20g (WM realistico).....	117
Tabella 50 – Caratteristiche dell'impianto esaminato nel caso studio 1 (Campedel <i>et al.</i> 2008). ....	120
Tabella 51 – Caratteristiche dell'impianto esaminato nel caso studio 1 (Campedel <i>et al.</i> 2008). ....	120
Tabella 52 – Caratteristiche dell'impianto esaminato nel caso studio 2 (Campedel <i>et al.</i> 2008). ....	121
Tabella 53 – Caratteristiche dell'impianto esaminato nel caso studio 2 (Campedel <i>et al.</i> 2008). ....	121
Tabella 54 – Caratteristiche dell'impianto esaminato nel caso studio 3 (Campedel <i>et al.</i> 2008). ....	122
Tabella 55 – Caratteristiche dell'impianto esaminato nel caso studio 3 (Campedel <i>et al.</i> 2008). ....	122

## Indice delle Equazioni

Equazione 1 – Espressione della vulnerabilità sismica, linearizzata attraverso l'uso della Probit Analisis, in funzione della PGA (Salzano <i>et al.</i> 2003). ....	46
Equazione 2 – Probabilità P che una apparecchiatura raggiunga uno stato di danno fissato per cause sismiche, calcolato per mezzo della correlazione dose-risposta Y fornita dalla Probit Analisis (Salzano <i>et al.</i> 2003).....	46

Equazione 3 – Espressione approssimata per il calcolo dell’energia liberata da una esplosione meccanica. ....	51
Equazione 4 – Valori assunti dalla probabilità $P_{jk}$ di un effetto domino. $D_{jk}$ : distanza tra serbatoi; $SD_j$ : distanza di sicurezza. Tratto da Busini, Marzo, Callioni, Rota ( <i>to be submitted</i> ). ....	51
Equazione 5 – Formula per il calcolo della probabilità di guasto totale del serbatoio k, $DP_k$ . $DP_j$ indica la probabilità di guasto del serbatoio j per cause sismiche; $P_{jk}$ è la probabilità che il serbatoio j collassando a causa del sisma, coinvolga il serbatoio k nelle conseguenze dell’incidente e ne causi il collasso; NT è il numero dei serbatoi di stoccaggio presenti nell’impianto. (Tratto da Busini, Marzo, Callioni, Rota, <i>to be submitted</i> ) .....	55
Equazione 6 – Potenza termica irraggiata da un <i>pool-fire</i> .....	60
Equazione 7 – Superficie di una pozza di liquido non confinata. ....	60
Equazione 8 – Velocità di bruciamento massiva di un combustibile liquido.....	60
Equazione 9 – Potenza termica irraggiata da un <i>fireball</i> .....	61
Equazione 10 – Durata di un <i>fireball</i> .....	61
Equazione 11 – Espressione approssimata per la potenza irraggiata da un <i>fireball</i> .....	61
Equazione 12 – Irraggiamento da sorgente puntiforme.....	62
Equazione 13 – Espressione approssimata per la superficie interessata dagli effetti di una dispersione di sostanze tossiche. ....	63
Equazione 14 – Relazione tra distanza, sovrappressione incidente ed energia liberata per una esplosione. ....	65
Equazione 15 – Espressione approssimata per la superficie interessata dagli effetti di una esplosione. ....	65
Equazione 16 – Formula per la sintesi dei KPI relativi a differenti scenari incidentali in un unico indice globale di rischio $KPI_G$ .....	77
Equazione 17 – <i>Consistency Index</i> (C.I.) per Matrici dei confronti a coppie. $\lambda_{max}$ : autovalore massimo della matrice. ....	80
Equazione 18 – <i>Consistency Ratio</i> per Matrici dei confronti a coppie. ....	80
Equazione 19 – Incremento dell’indice PLL a causa di eventi sismici. ....	91

# DEFINIZIONE DI UN APPROCCIO SEMPLIFICATO PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO NATECH DETERMINATO DA SISMI

## Abstract

Gli eventi catastrofici naturali sono potenti iniziatori di incidenti industriali poiché conducono al rilascio di sostanze pericolose da impianti e stoccaggi; gli incidenti così generati sono stati definiti eventi NaTech, ad indicare la loro doppia composizione, naturale e tecnologica. Questi incidenti pongono, nelle aree soggette a catastrofi naturali, un rischio addizionale, di entità spesso importante, in quanto la compresenza degli effetti dell'evento naturale contribuisce ad aumentare la probabilità che la popolazione sia esposta a conseguenze dannose per la salute o la vita. La peculiarità dei problemi posti dall'interazione tra catastrofi naturali e impianti dell'industria di processo ha portato alla necessità di elaborare specifiche procedure per la valutazione e la gestione del rischio NaTech.

L'obiettivo del presente lavoro è sviluppare una metodologia semplificata di valutazione del rischio NaTech dovuto a terremoti che fornisca le basi per una comparazione oggettiva, benché semplificata, del rischio posto da differenti impianti potenzialmente soggetti a eventi sismici; il fine è di individuare le situazioni a rischio elevato, per le quali è necessario procedere a un'analisi di rischio quantitativa e predisporre misure di mitigazione del rischio, e le situazioni a rischio basso evitando così spreco di risorse in metodologie più onerose. Le informazioni necessarie alla valutazione sono organizzate all'interno della cornice costituita dal metodo di scelta multicriterio *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, che permette di confrontare parametri non commensurabili e condensarli in un indice di prestazione qualitativo, espresso nell'intervallo 0 – 1, che esprime il soddisfacimento dei criteri influenti sul problema oggetto della decisione. A conclusione dello studio il metodo è stato prima convalidato attraverso il confronto con i risultati di analisi quantitative del rischio NaTech tratte dalla letteratura e poi applicato ad alcuni casi studio definiti in modo da mostrare la sensitività dei risultati alle variabili influenti sul rischio.

**Keywords:** NaTech – Terremoti – Incidenti industriali – Analisi rischio – *Analytic Hierarchy Process* - Sostanze pericolose - Probabilità di guasto - Effetto domino.

## Introduzione

Le catastrofi naturali pongono un rischio che non dipende unicamente dagli effetti diretti su persone e strutture ma comprende anche gli effetti dovuti a rilasci accidentali di sostanze

pericolose da impianti e stoccaggi colpiti dal cataclisma, il quale agisce come causa esterna di guasto delle apparecchiature; gli incidenti così generati sono stati nominati eventi NaTech, ad indicare la loro doppia

composizione, naturale e tecnologica (Showalter e Myers, 1994). L'interazione tra catastrofi naturali e impianti industriali produce un incremento della frequenza e della intensità degli scenari incidentali generati dal rilascio di sostanze pericolose; l'estensione geografica della superficie potenzialmente colpita da uno stesso cataclisma finisce con il produrre rilasci multipli e simultanei (Krausmann e Mushtaq 2008), l'emergenza generata dalla catastrofe naturale e dai numerosi rilasci competono per le poche risorse disponibili per l'intervento e il soccorso (Steinberg *et al.* 2008).

Negli ultimi anni si è posta una sempre maggiore attenzione alle problematiche poste dal NaTech, numerosi studi esaminano fatti disastrosi recenti evidenziandone le caratteristiche principali per fornire una base allo sviluppo di metodi e strategie di gestione specifiche. In particolare il lavoro di Young *et al.* (2004) costituisce una sistematica recensione di eventi catastrofici naturali ed eventi NaTech che mette in luce la frequenza con cui rilasci diretti e indiretti di sostanze pericolose si accompagnano a tali situazioni.

Di recente la Commissione Europea ha varato il progetto iNTeg-Risk, che identifica il NaTech come un rischio emergente e promuove una attività di ricerca finalizzata alla elaborazione di metodi per la valutazione e la gestione di tale rischio. Nello sviluppo di un approccio specifico al problema della valutazione del rischio NaTech è necessario conformarsi alla procedura standard di gestione del rischio.

Procedure specifiche per la valutazione quantitativa del rischio NaTech relativo a terremoti e alluvioni sono state messe a punto di recente usando i metodi della QRA e basandosi su un esteso lavoro di ricerca riguardante eventi NaTech (Fabbrocino *et al.* 2005; Antonioni *et al.* 2007; Campedel *et al.* 2008; Antonioni *et al.* 2009). L'approccio usato consiste nel definire le caratteristiche del fenomeno naturale sulla base di frequenza e intensità e nell'individuare le apparecchiature potenzialmente danneggiate, la gravità del danno atteso e la quantità di sostanze pericolose potenzialmente rilasciate, attraverso modelli di vulnerabilità delle apparecchiature al fenomeno naturale, sviluppati sulla base di una grande quantità di osservazioni usando metodi probabilistici.

Il presente studio punta all'elaborazione di un metodo per la valutazione semplificata del rischio NaTech determinato da terremoti che renda conto dei fenomeni implicati e delle principali variabili influenti caratterizzandoli in modo semplice e creando una cornice ben definita all'interno della quale organizzare e gestire le informazioni necessarie alla valutazione. In particolare il metodo dovrà fornire la possibilità di stimare l'incremento del rischio dovuto alla propagazione di un incidente a diverse apparecchiature per effetto domino e valutare in modo oggettivo il rischio associato a un impianto o a una singola apparecchiatura permettendo la comparazione di situazioni differenti.

La necessità di comparare simultaneamente un certo numero di parametri anche non commensurabili direttamente e di calcolare un

indice di prestazione che sia rappresentativo del rischio che un determinato impianto o apparecchiatura pongono ha portato alla scelta del metodo di scelta multicriterio *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, Saaty 2000), il cui uso è già stato proposto nell'ambito dell'analisi del rischio NaTech (Rota *et al.* 2008). A conclusione dello studio il modello è stato convalidato attraverso il confronto con i risultati di valutazioni quantitative del rischio NaTech tratte da Campedel *et al.* (2008).

### **Materiali e metodi**

Lo sviluppo del metodo è articolato in più fasi che comprendono:

- definizione delle caratteristiche dell'evento sismico
- identificazione delle apparecchiature bersaglio
- ricerca di funzioni che definiscano la correlazione tra intensità dell'evento sismico e probabilità di guasto delle apparecchiature
- definizione di un metodo per valutare le conseguenze di un effetto domino sulla probabilità di guasto delle singole apparecchiature
- individuazione degli scenari potenzialmente generati dal rilascio e delle caratteristiche di pericolosità dei materiali potenzialmente rilasciati
- implementazione del modello per la valutazione con il metodo *Analytic Hierarchy Process (AHP)*
- convalida del modello attraverso il confronto con i risultati di valutazioni quantitative del rischio NaTech tratte dalla letteratura (Campedel *et al.* 2008).

### **Caratterizzazione dell'evento sismico**

L'intensità di un evento sismico è spesso riferita a misure dell'intensità dello scuotimento del terreno: la massima accelerazione al suolo (*Peak Ground Acceleration* PGA) e la massima velocità al suolo (*Peak Ground Velocity* PGV) in una determinata zona. Nell'analisi della vulnerabilità sismica di serbatoi è tipicamente usata la PGA, mentre la PGV è utilizzata per investigare sistemi composti da tubazioni (Salzano *et al.* 2003).

I valori di PGA attesi in una data zona sono tipicamente forniti da enti nazionali e internazionali di ricerca sotto forma di carte tematiche che riportano una classificazione delle zone sismiche basata sul massimo valore di PGA atteso statisticamente.

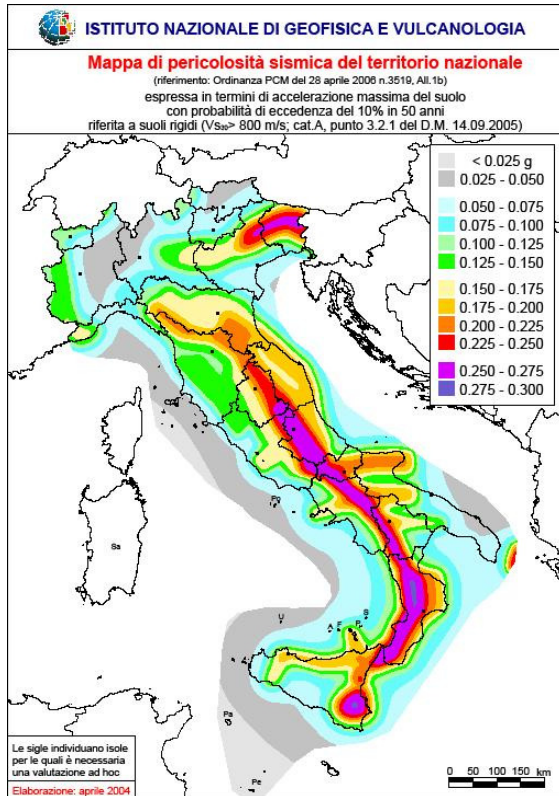
La probabilità di accadimento dell'evento sismico è definita in accordo con i metodi dell'analisi probabilistica del rischio sismico (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis* PSHA) in funzione di un intervallo di tempo T fissato (Cornell 1968); l'intervallo tipicamente scelto è di 50 anni in quanto rappresentativo della vita media di una struttura, edificio o impianto. Si definisce quindi la probabilità di accadimento in corrispondenza di un dato valore di PGA come la probabilità che il valore di PGA scelto sia superato nell'intervallo di tempo T fissato:

$$H(T) = P[PGA > a, T]$$

La variabile  $H(T)$  è la probabilità di superamento (*Exceedance Probability*, EP) del valore di PGA 'a' nell'intervallo di tempo T.

L'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri OPCM 3519 prevede il

completamento, la pubblicazione e la gestione della mappa di pericolosità sismica dell'intero territorio italiano da parte dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV); in Figura A è mostrata la mappa riportante i valori di PGA attesi con il 10% di *Exceedance Probability* in 50 anni su buona parte del suolo italiano (INGV 2004).



**Figura A – Mappa della PGA attesa con il 10% di *Exceedance Probability* in 50 anni sul suolo italiano (INGV 2004).**

Ai fini della valutazione semplificata del rischio di incidente rilevante iniziato da sismi oggetto di questo studio, si utilizzeranno i valori di PGA con una *Exceedance Probability* del 10% in un intervallo di tempo di 50 anni.

### **Identificazione delle apparecchiature bersaglio**

Un esteso lavoro dedicato all'identificazione delle apparecchiature tipicamente danneggiate

in un evento sismico, delle modalità con cui queste si danneggiano e delle caratteristiche dei danni subiti, finalizzato alla valutazione quantitativa del rischio NaTech, è stato effettuato da Campedel *et al.* (2008) e Salzano *et al.* (2003). Dai risultati delle QRA citate si evince che a determinare maggiormente il rischio di incidente rilevante contribuiscono i grandi serbatoi atmosferici e i serbatoi pressurizzati in quanto sono apparecchiature che presentano una capienza molto superiore rispetto alle altre; si sottolinea però che anche tubazioni di grosso diametro possono presentare un contributo non trascurabile al rilascio di sostanze pericolose. Gli scenari potenzialmente generati sono rispettivamente incendi e dispersioni da pozza per i serbatoi atmosferici, *jet-fire*, *fireball*, *BLEVE* (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*), *flash-fire* e *VCE* (*Vapor Cloud Explosion*) per i pressurizzati.

Il metodo per la valutazione semplificata del NaTech qui proposto, con l'obiettivo di rendere il problema del rischio usando un numero di variabili contenuto, considera come apparecchiature bersaglio dell'evento sismico serbatoi atmosferici e serbatoi pressurizzati; lo stato di guasto considerato sarà il collasso catastrofico per tutte le apparecchiature individuate al fine di semplificare in modo conservativo il problema della definizione della quantità di sostanze pericolose rilasciate.

### **Stima della probabilità di guasto per cause sismiche**

Il problema della descrizione della vulnerabilità delle apparecchiature a un evento sismico è stata affrontato da alcuni ricercatori

attraverso lo sviluppo di modelli di fragilità empirici basati su osservazioni sperimentali (Campedel *et al.* 2008; Salzano *et al.* 2003). Questi modelli correlano per un gran numero di apparecchiature e serbatoi la probabilità (*Damage Probability*, DP) di raggiungere un determinato stato di guasto (*Damage State*, DS) alla PGA con una funzione cumulata di probabilità log-normale caratterizzata da media  $\mu$  e deviazione standard  $\beta$ . Attraverso l'uso della *Probit analysis* (Finney 1971) la distribuzione è stata linearizzata ottenendo un set di modelli di vulnerabilità basati su espressioni del tipo:

$$Y = K_1 + K_2 \text{Ln}(PGA).$$

**Equazione A – Espressione della vulnerabilità sismica, linearizzata attraverso l'uso della Probit Analysis, in funzione della PGA (Salzano *et al.* 2003).**

La variabile Y costituisce una relazione “dose-risposta” tra l'intensità sismica (PGA) espressa come frazione dell'accelerazione di gravità g e la probabilità di subire un determinato danno (Finney 1971).

**Tabella A – Modelli di vulnerabilità: valori delle costanti Probit nell'Equazione A per differenti apparecchiature, stati di guasto e livelli di riempimento (Antonioni *et al.* 2009).**

Type of equipment	Filling level	Limit state (DS)	$k_1$	$k_2$
Anchored atmospheric tanks	Near full	$\geq 2$	7.01	1.67
	Near full	3	4.66	1.54
	$\geq 50\%$	$\geq 2$	5.43	1.25
	$\geq 50\%$	3	3.36	1.25
Unanchored atmospheric tanks	Near full	$\geq 2$	7.71	1.43
	Near full	3	5.51	1.34
	$\geq 50\%$	3	4.93	1.25
Horizontal pressurized storage tanks	Any	$\geq 1$	5.36	1.01
	Any	$\geq 2$	4.50	1.12
	Any	3	3.39	1.12

Tali correlazioni sono state sviluppate per differenti categorie di equipaggiamenti e per differenti stati di guasto, la Tabella A riassume i modelli di vulnerabilità disponibili per le apparecchiature maggiormente influenti sul

rischio. La variabile Y si può convertire in probabilità risolvendo l'integrale:

$$P(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} e^{-V^2/2} dV$$

**Equazione B – Probabilità P che una apparecchiatura raggiunga uno stato di danno fissato per cause sismiche, calcolato per mezzo della correlazione dose-risposta Y fornita dalla Probit Analysis (Salzano *et al.* 2003).**

Ai fini dello sviluppo del metodo di valutazione qualitativa sono state selezionate le funzioni che descrivono la probabilità di raggiungere lo stato di guasto corrispondente al collasso catastrofico per le seguenti apparecchiature: serbatoi atmosferici ancorati e non ancorati, serbatoi pressurizzati. Per i serbatoi atmosferici si considera un livello di riempimento pari o superiore all'80%. Tali scelte sono state effettuate con l'intenzione di considerare il peggior scenario incidentale possibile.

### Stima della probabilità di guasto per effetto domino

L'effetto domino è caratterizzato dal propagarsi di un incidente alle apparecchiature vicine a causa dell'esposizione delle stesse alle conseguenze (irraggiamento, sovrappressione) dell'incidente stesso. Nella cornice costituita dal metodo per la valutazione quantitativa del rischio NaTech, Cozzani *et al.* (2007) hanno sviluppato una guida alla mitigazione dell'effetto domino che comprende la valutazione delle distanze di sicurezza necessarie a proteggere serbatoi atmosferici e pressurizzati dalle conseguenze di alcuni scenari incidentali.

Il metodo individua una serie di scenari capaci di causare l'effetto domino: *fireball*, *jet-fire*, incendi da pozza, *VCE*, *BLEVE*, esplosioni meccaniche e confinate attraverso l'analisi di casi di incidenti reali, e per ognuno di essi esprime le distanze di sicurezza necessarie ad evitare l'effetto domino in funzione della quantità e delle caratteristiche del materiale pericoloso rilasciato. Ai fini dell'elaborazione di un metodo per la valutazione qualitativa del rischio NaTech sono stati selezionati gli scenari corrispondenti a: *BLEVE*, Esplosioni meccaniche, *Fireball* e Incendi di pozza.

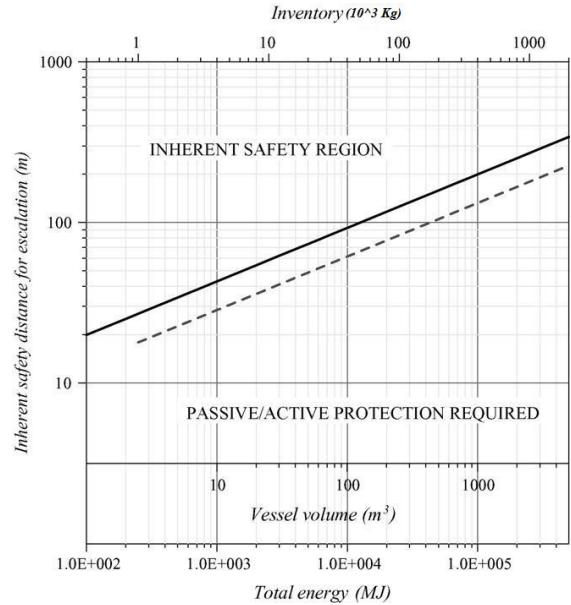
La procedura elaborata in questo studio per il calcolo della *Damage Probability* di serbatoi potenzialmente esposti all'effetto domino causato da diversi scenari incidentali prevede di preparare una matrice quadrata n x n, dove n è il numero dei serbatoi presenti nell'impianto, contenente i valori  $P_{jk}$  della probabilità che il collasso del serbatoio j per cause sismiche coinvolga il serbatoio k negli effetti dello scenario incidentale generato causandone il collasso per effetto domino; comparando la distanza tra coppie di serbatoi  $D_{jk}$  e la relativa distanza di sicurezza  $SD_j$ , la probabilità  $P_{jk}$  di un effetto domino può essere calcolata come:

$$P_{jk} = \begin{cases} 0 & \text{if } D_{jk} > SD_j \\ 1 & \text{if } D_{jk} < SD_j \end{cases}$$

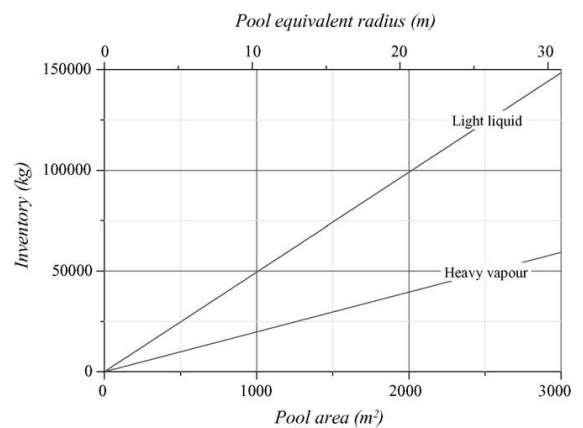
**Equazione C – Valori assunti dalla probabilità  $P_{jk}$  di un effetto domino.  $D_{jk}$ : distanza tra serbatoi;  $SD_j$ : distanza di sicurezza. Tratto da Busini, Marzo, Callioni, Rota (to be submitted).**

Se la distanza effettiva tra i serbatoi  $D_{jk}$ , è maggiore della distanza di sicurezza  $SD_j$ , ricavata per i differenti scenari utilizzando i diagrammi mostrati in Figura B, Figura C e

Figura D, allora l'effetto domino sarà giudicato come non possibile e il valore assegnato a  $P_{jk}$  sarà 0; in caso contrario la probabilità assegnata sarà 1.

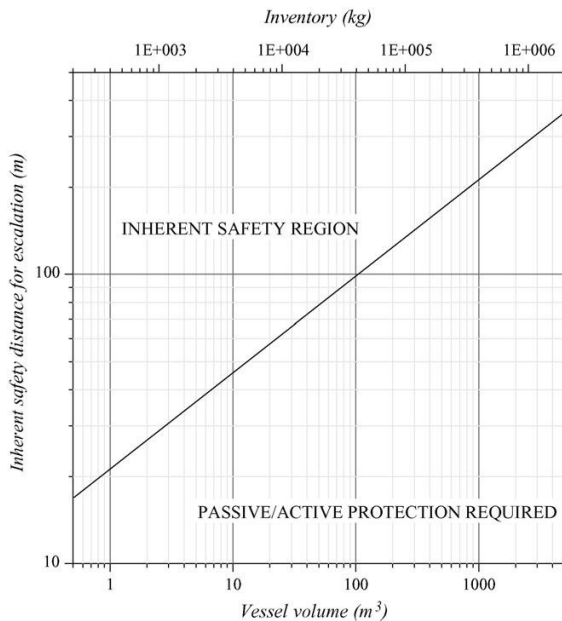


**Figura B – Distanze di sicurezza per la prevenzione dell'effetto domino causato dal BLEVE di un vessel di propano riempito all'80%, in funzione della massa, del volume e dell'energia totale liberata. Linea continua: serbatoi pressurizzati; linea tratteggiata: serbatoi atmosferici (Cozzani et al. 2007).**



**Figura C – Massa critica di combustibile per l'effetto domino dovuto a incendi di pozza in funzione della superficie e del raggio equivalente della pozza. Light liquid: velocità bruciamento > 0,055 kg/m<sup>2</sup>s; Heavy vapour: velocità bruciamento < 0,055 kg/m<sup>2</sup>s. Per ottenere le distanze di sicurezza, aggiungere al raggio equivalente 50 metri per serbatoi atmosferici e 15 metri per pressurizzati (Cozzani et al. 2007).**





**Figura D – Distanze di sicurezza per la prevenzione dell'effetto domino causato da un fireball in funzione della massa e del corrispondente volume di un vessel di propano pieno all'80%. Solo per serbatoi atmosferici (Cozzani *et al.* 2007).**

La probabilità che un serbatoio j collassi per cause sismiche e che il serbatoio k sia investito dagli effetti e collassi a sua volta si può calcolare, usando la definizione di probabilità condizionata, come prodotto della probabilità condizionata del collasso del serbatoio k a causa degli scenari generati dal collasso del serbatoio j per cause sismiche,  $P_{jk}$ , e della *Damage Probability* del serbatoio j dovuta a cause sismiche,  $DP_j$ .

Un serbatoio k può collassare per effetto del sisma o per effetto domino; la probabilità che il serbatoio k collassi per una qualsiasi delle cause individuate, chiamata  $DP_k$ , si può rappresentare come l'unione delle probabilità di collasso dovute alle differenti cause. Dalla teoria della probabilità, l'unione di eventi non mutuamente esclusivi è calcolata come:

$$A \cup B = 1 - (1 - X_A)(1 - X_B)$$

La probabilità  $DP_k$  del collasso del serbatoio k per una qualsiasi delle cause individuate si può allora calcolare come complementare a uno della probabilità di non collassare per alcun motivo, come espresso nell'Equazione D.

$$\overline{DP_k} = 1 - \prod_{j=1}^{NT} (1 - DP_j \times P_{jk})$$

**Equazione D – Formula per il calcolo della probabilità di guasto totale del serbatoio k,  $DP_k$ .**  $DP_j$  indica la probabilità di guasto del serbatoio j per cause sismiche;  $P_{jk}$  è la probabilità che il serbatoio j collassando a causa del sisma, coinvolga il serbatoio k nelle conseguenze dell'incidente e ne causi il collasso; NT è il numero dei serbatoi di stoccaggio presenti nell'impianto. Tratto da Busini, Marzo, Callioni, Rota (*to be submitted*).

### Pericolosità delle sostanze

Le caratteristiche di pericolosità delle sostanze rilasciate durante un incidente determinano il tipo di scenario incidentale potenzialmente generato. Le conseguenze associate a scenari relativi ad incidenti industriali capaci di mettere in pericolo la vita o la salute delle persone sono stati ampiamente approfondite nell'ambito della QRA di incidenti rilevanti (Lees 1996) e sono: irraggiamento termico sviluppato da incendi, tossicità di sostanze disperse in atmosfera e onde d'urto generate da fenomeni esplosivi.

Si propone una classificazione delle sostanze basata sui principali fenomeni generati in un incidente industriale; tale classificazione distingue sostanze Infiammabili, Tossiche ed Esplosive. Per Infiammabili si definiscono tutte le sostanze solide, liquide e gassose che sono classificate come F + o F in accordo a quanto definito dalla Direttiva Europea 67/548/EEC (*Council Directive 67/548/EEC*) e

che possono pertanto dare origine a scenari di incendio tipo *jet-fire*, *fireball*, *flash-fire*, *pool-fire* e incendi di materiale solido.

La potenza termica irradiata in un incendio dipende principalmente da entalpia di combustione, volatilità della sostanza e massa di combustibile coinvolta e risulta essere proporzionale alla superficie interessata da effetti letali causati dall'irraggiamento. Un indice di rischio, benché derivante da una valutazione estremamente semplificata, ricavato dal prodotto di entalpia, volatilità e massa di combustibile rilasciata risulta quindi essere correlato alla superficie interessata da effetti letali. Le principali variabili influenti sul rischio di incendio e la loro classificazione sono riassunte in Tabella B.

**Tabella B – Variabili influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Infiammabili.**

Variabili influenti	Classificazione variabili
Volatilità	Gas compressi/liquefatti Liquidi alta volatilità (Flash Point > 18°C) Liquidi bassa volatilità (Flash Point < 18°C) Solidi
Entalpia di combustione	Elevata (>40 MJ/Kg) Bassa (<40 MJ/Kg)
Massa	Frazione rispetto la quantità definita ex art.8 Direttiva "Seveso II" (Council Directive 96/82/EC)

Per Tossiche si definiscono tutte le sostanze che sono classificate come T +, T, C, Xi, Xn, N in accordo a quanto definito dalla Direttiva Europea 67/548/EEC (Council Directive 67/548/EEC) e che presentano caratteristiche di volatilità tali da poter subire la dispersione in atmosfera. La superficie interessata da

concentrazioni pericolose di sostanze tossiche può essere correlata alla massa di sostanza rilasciata, alla tossicità delle sostanze nonché alla volatilità delle stesse. Le principali variabili influenti sul rischio relativo alla dispersione di sostanze Tossiche e la loro classificazione sono riassunte in Tabella C.

**Tabella C - Variabili influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Tossiche.**

Variabili influenti	Classificazione variabili
Volatilità	Gas compressi/liquefatti Liquidi alta volatilità ( $P^0(T_{amb}) > 5$ KPa) Liquidi bassa volatilità ( $P^0(T_{amb}) < 5$ KPa) Polveri fini ( $D < 50 \mu m$ )
Tossicità	Alta (IDLH < 100 ppm) Bassa (IDLH > 100 ppm)
Massa	Frazione rispetto quantità definita ex art.8 Direttiva "Seveso II" (Council Directive 96/82/EC)

Per Esplosive si considerano tutte le sostanze in grado di dare origine a fenomeni tipo *BLEVE* ed esplosioni meccaniche ossia quelle classificate come Gas compressi/liquefatti e le sostanze definite come Infiammabili e che presentano una volatilità abbastanza elevata da poter produrre una *VCE*. Sono escluse le sostanze classificate come E in accordo a quanto definito dalla Direttiva Europea 67/548/EEC (Council Directive 67/548/EEC) in considerazione del fatto che tali sostanze pongono un pericolo di esplosione tanto elevato da essere stoccate con apposite precauzioni volte a ridurre il rischio di innesco accidentale. In Tabella D sono riassunte le principali variabili influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Esplosive.

**Tabella D - Variabili influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Esplosive.**

Scenario incidentale	Variabili influenti	Classificazione variabili
VCE	Volatilità	Gas compressi/liquefatti Liquidi alta volatilità (Flash Point > 18°C) Polveri fini (D < 50 µm)
	Entalpia di combustione	Elevata (>40 MJ/Kg) Bassa (<40 MJ/Kg)
	Massa	Frazione rispetto quantità definita ex art.8 Direttiva "Seveso II" (Council Directive 96/82/EC)
BLEVE Esplosione meccanica	Volatilità	Gas compressi/liquefatti
	Pressione di stoccaggio	Alta pressione (>20 bar) Bassa pressione (<20 bar)
	Massa	Frazione rispetto quantità definita ex art.8 Direttiva "Seveso II" (Council Directive 96/82/EC)

### Analytic Hierarchy Process

L'*Analytic Hierarchy Process* (AHP, Saaty 1980) è un metodo utilizzato a supporto dei processi di decisione per la sua capacità di scomporre il problema di una decisione complessa in una gerarchia di sotto-problemi strutturata su più livelli, in particolare prevede di organizzare le informazioni necessarie alla scelta in una struttura ad albero con l'obiettivo principale della valutazione in alto, sotto di esso si dipartono i rami che corrispondono agli obiettivi secondari della scelta, sotto ognuno di essi dipartono i rami dei criteri secondari. L'importanza dei criteri che definiscono la risposta a uno stesso sottoproblema può essere valutata indipendentemente attraverso una comparazione a coppie basata su una scala

semantica di importanza relativa propria del metodo AHP. L'utilizzo di tale scala permette di comparare criteri altrimenti non commensurabili; dai confronti a coppie sono ricavati pesi che esprimono l'importanza relativa dei criteri. Ai piedi della gerarchia sono le Alternative oggetto della decisione, di esse si definiscono le prestazioni riguardo ai sottocriteri individuati alla base della gerarchia attraverso dei punteggi definiti con una scala normalizzata nell'intervallo 0-1.

Decomponendo il problema in sottoproblemi, relativi criteri e sottocriteri, assegnando ad ognuno di essi una importanza relativa nel concorrere alla determinazione del soddisfacimento del criterio ad essi superiore gerarchicamente e descrivendo le alternative attraverso la valutazione dei criteri individuati, è possibile fornire una stima del soddisfacimento di tutti i sottocriteri, criteri e obiettivi del problema relativamente alla alternativa oggetto di valutazione attraverso un indice della prestazione globale definito in una scala 0-1, dove 1 rappresenta il massimo soddisfacimento di tutti i criteri individuati. L'indice di prestazione (*Key performance Indicator*, KPI) così ricavato permette di comparare alternative differenti rispetto al soddisfacimento dei criteri individuati.

Le Alternative sono valutate attraverso indici di massa, chiamati Massa Pesata (*Weighted Mass* WM); un indice di Massa Pesata è calcolato per ognuno dei serbatoi di stoccaggio presenti nell'impianto come prodotto della massa contenuta, definita come frazione della quantità che è permesso detenere ai sensi dell'articolo 8

della Direttiva Europea “Seveso II” (Council Directive 96/82/EC), per la probabilità di collasso totale del serbatoio DP<sub>k</sub>, comprensiva degli effetti del sisma e dell’effetto domino. L’AHP impone poi di normalizzare i punteggi assegnati alle Alternative rispetto al massimo valore che possono assumere così che siano comprese nell’intervallo 0-1. Ai fini della costruzione di un metodo di valutazione semplificata del rischio NaTech, si è

stabilito di correlare l’indice di prestazione ricavato con il metodo AHP alla superficie di impatto degli effetti letali di scenari incidentali classificati come Incendi, Dispersioni di sostanze tossiche in atmosfera ed Esplosioni. Una distinta gerarchia sarà sviluppata per ognuno dei generici scenari incidentali individuati; gli indici di prestazione ottenuti dalle singole gerarchie saranno condensati in un indicatore globale di prestazione.

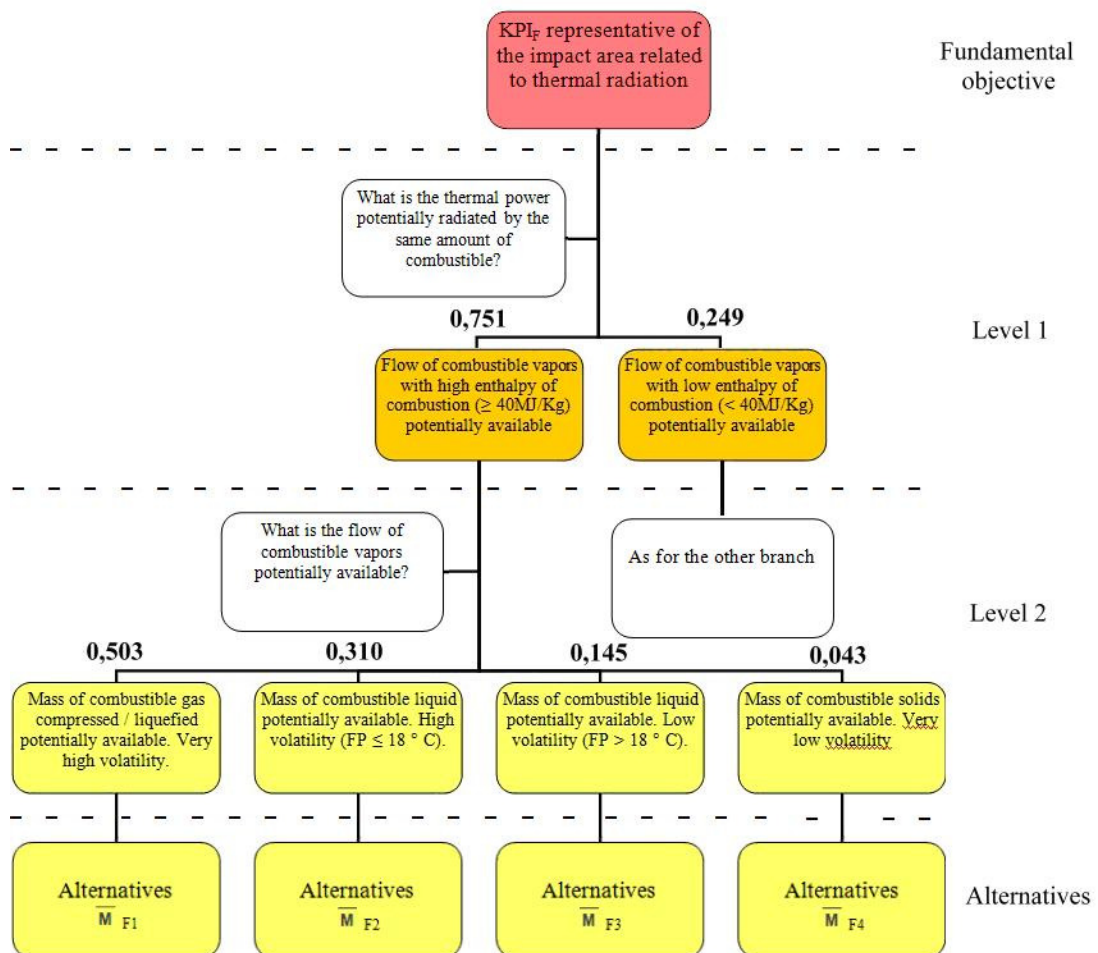


Figura E – Gerarchia per la valutazione del rischio NaTech relativo ad incendi; ai nodi sono mostrati i criteri individuati e la domanda a cui devono rispondere, nonché i pesi assegnati ai differenti criteri (Busini, Marzo, Callioni, Rota, to be submitted).

## Gerarchia relativa ad Incendi

La superficie di impatto per un evento tipo incendio è correlata alla potenza termica irraggiata, che a sua volta risulta dipendere dalla volatilità, dall'entalpia di combustione e dalla massa di sostanze combustibili come riassunto in Tabella B.

L'obiettivo principale della gerarchia sarà la determinazione di un indice di prestazione  $KPI_I$  relativo alla superficie di impatto degli effetti letali dell'irraggiamento dovuto a diversi scenari di Incendio che tenga in conto dei principali parametri individuati come

influenti. La regola che permette di stabilire quali elementi possono essere posti in uno stesso gruppo, in posizione gerarchicamente inferiore a uno stesso criterio o obiettivo, è che essi rispondano alla stessa domanda (Saaty 2000). Al di sotto dei sottocriteri relativi alla volatilità si trovano le alternative, descritte attraverso gli indici di Massa Pesata, calcolati per ogni serbatoio come prodotto della massa contenuta e della *Damage Probability* totale. La gerarchia costruita per la valutazione del rischio relativo a Incendi è mostrata nella Figura E, tratta da Busini, Marzo, Callioni, Rota (*to be submitted*).

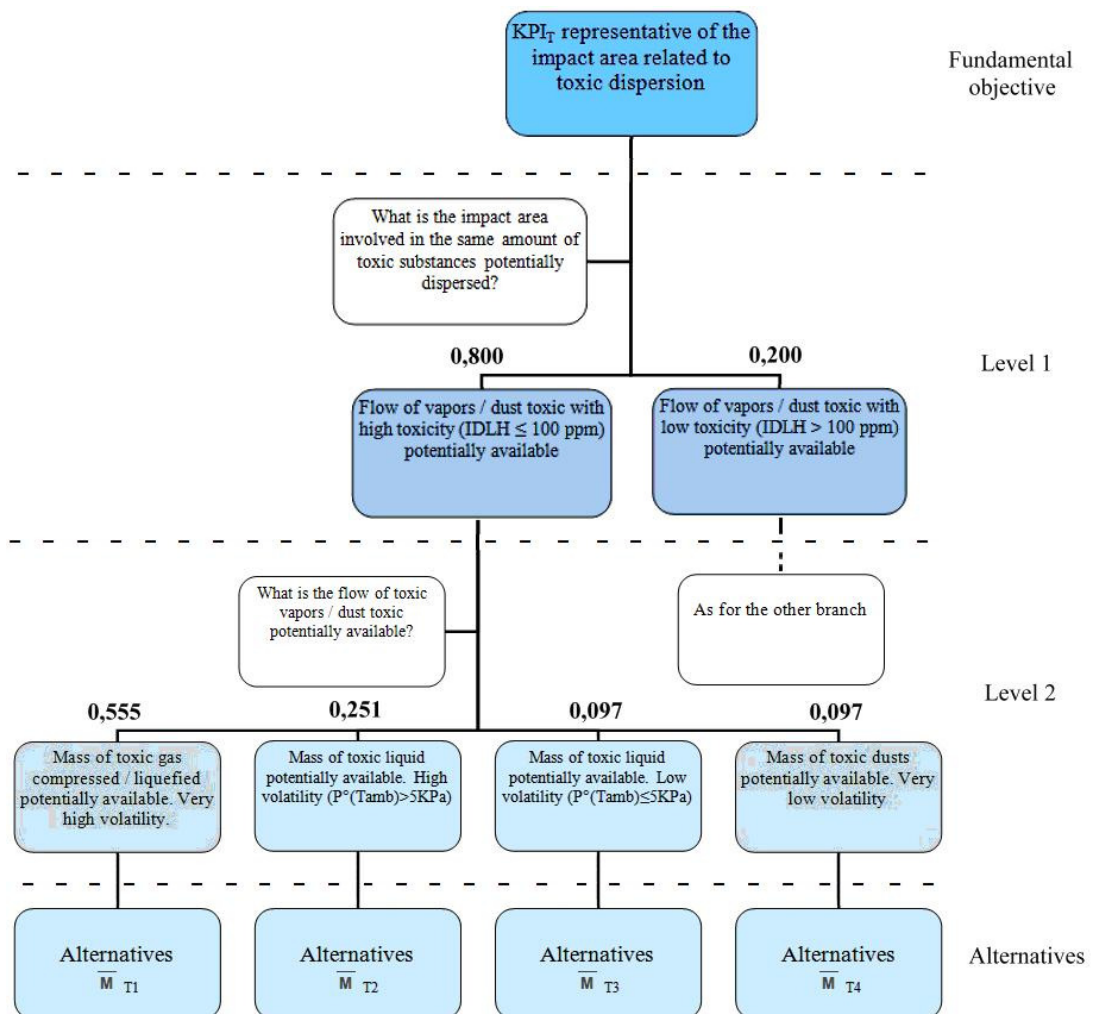


Figura F – Gerarchia per la valutazione del rischio NaTech relativo a dispersione di sostanze tossiche; ai nodi sono mostrati i criteri individuati e la domanda a cui devono rispondere, nonché i pesi assegnati ai differenti criteri (Busini, Marzo, Callioni, Rota, *to be submitted*).

## Gerarchia relativa a Dispersione di sostanze Tossiche

La superficie interessata da effetti letali legati alla concentrazione di sostanze tossiche disperse in atmosfera è correlata alla tossicità, alla volatilità e alla massa di sostanze tossiche rilasciate, come riassunto in Tabella C.

L'obiettivo principale della gerarchia sarà un  $KPI_T$  il cui valore sia indicativo della superficie colpita dagli effetti letali legati al

rilascio e alla dispersione di sostanze tossiche differenti. Nel livello inferiore a quello dei sottocriteri sono le alternative, descritte dagli indici di Massa Pesata relativi ai serbatoi contenenti sostanze classificate come Tossiche. La gerarchia costruita per la valutazione del rischio relativo a Dispersione di sostanze tossiche è mostrata nella Figura F, tratta da Busini, Marzo, Callioni, Rota (*to be submitted*).

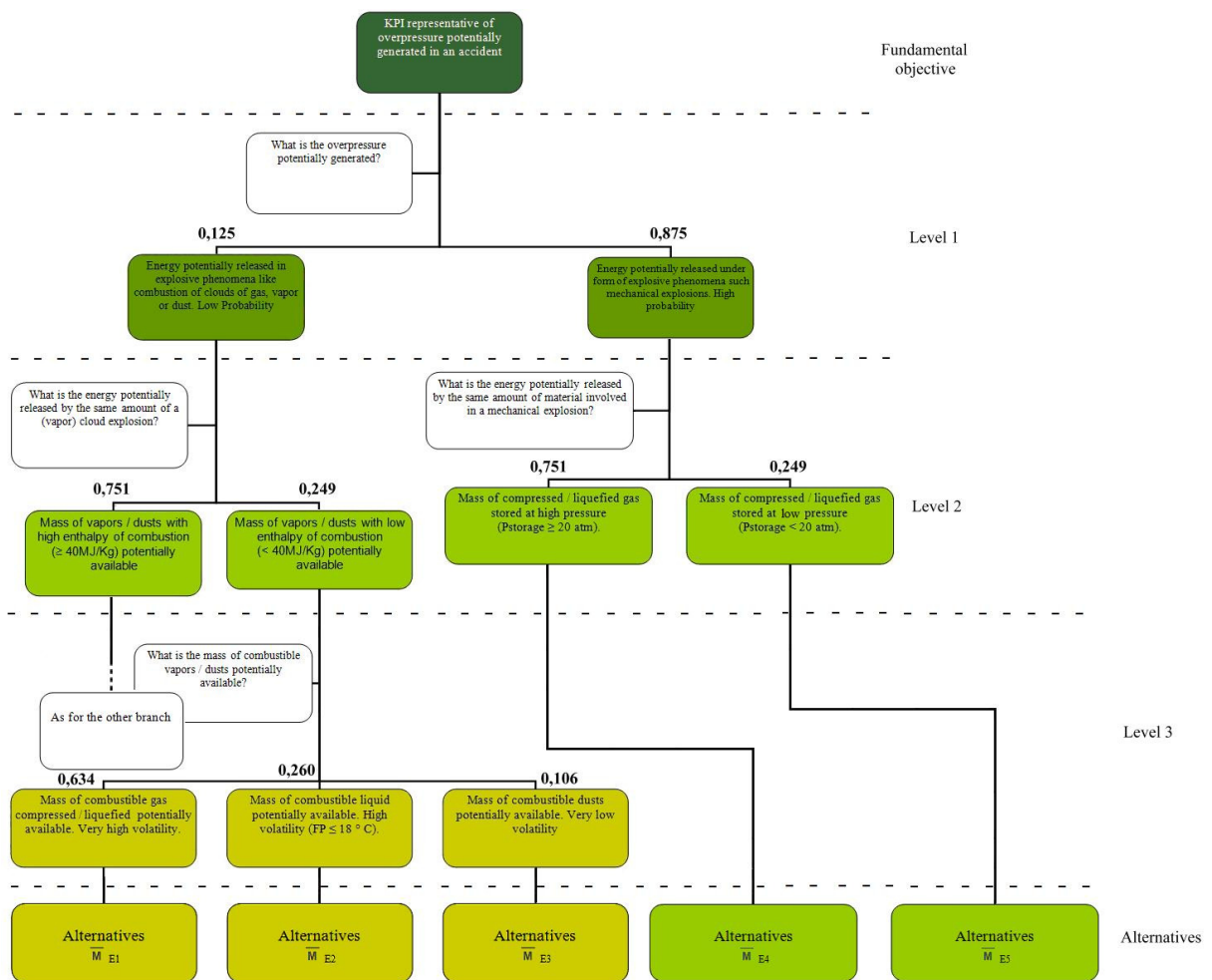


Figura G – Gerarchia per la valutazione del rischio NaTech relativo ad esplosioni; ai nodi sono mostrati i criteri individuati e la domanda a cui devono rispondere, nonché i pesi assegnati ai differenti criteri (Busini, Marzo, Callioni, Rota, *to be submitted*).

## Gerarchia relativa ad Esplosioni

La superficie interessata dalla sovrappressione dovuta al passaggio di un'onda d'urto è

correlata all'energia liberata nell'esplosione. Per eventi come VCE l'energia potenzialmente liberata è correlata all'entalpia di combustione,

alla volatilità e alla massa delle sostanze combustibili rilasciate, nonché alla probabilità di accadimento del fenomeno; per eventi come *BLEVE* ed esplosioni meccaniche la superficie interessata da effetti letali è stata correlata alla massa di Gas compressi/liquefatti rilasciata, alla pressione di stoccaggio e alla probabilità di accadimento, come riassunto in Tabella D.

Obiettivo principale della gerarchia è la definizione di un  $KPI_E$  che sia indicativo della superficie potenzialmente interessata dagli effetti di una esplosione. Al di sotto del livello dei sottocriteri si trovano le alternative, descritte dagli indici di Massa Pesata relativi alle sostanze classificate come Infiammabili, per il ramo relativo a VCE, e Gas compressi/liquefatti per BLEVE ed esplosioni meccaniche. La gerarchia costruita per la valutazione del rischio relativo a Esplosioni è mostrata nella Figura G, tratta da Busini, Marzo, Callioni, Rota (*to be submitted*).

### **Aggregazione degli indici**

I valori dei differenti indici di rischio  $KPI_I$ ,  $KPI_T$ ,  $KPI_E$  relativi all'intero impianto si ottengono dalla somma dei KPI ottenuti per una stessa categoria di scenario incidentale (Incendi, Dispersione di sostanze Tossiche, Esplosioni) dalla valutazione dei KPI relativi ai singoli serbatoi. Considerando i tre KPI come vettori in uno spazio tridimensionale, la condizione ottimale è rappresentata dall'origine degli assi, dove i KPI assumono il valore 0. Un indice globale del rischio può essere rappresentato dal vettore somma, che definisce un punto nello spazio dei KPI posto a una certa distanza dall'origine; distanza definita dal modulo del vettore stesso, come

descritto dall'Equazione E (Busini, Marzo, Callioni, Rota, *to be submitted*).

$$KPI_G = (KPI_I^2 + KPI_T^2 + KPI_E^2)^{0.5}$$

**Equazione E – Formula per la sintesi dei KPI relativi a differenti scenari incidentali in un unico indice globale di rischio  $KPI_G$ .**

L'indice globale  $KPI_G$  è trasformato ai fini della decisione in una scala qualitativa che classifica la sensibilità dell'impianto al NaTech in 3 livelli di rischio:

- Alto ( $KPI_G > 10^{-1}$ )
- Medio ( $KPI_G$  compreso tra  $10^{-2}$  e  $10^{-1}$ )
- Basso ( $KPI_G < 10^{-2}$ ).

Gli impianti classificati come a Basso rischio non richiedono un ulteriore approfondimento delle problematiche connesse a eventi NaTech, mentre gli impianti classificati come ad Alto rischio richiedono sicuramente un approfondimento tramite metodi di valutazione quantitativa. Il rischio connesso ad impianti classificati come a Medio rischio può essere sia trascurabile che non accettabile, cioè cade in una sorta di regione di indecisione, definita da Lees (1996) zona *ALARP* (*As Low As Reasonably Possible*), in cui la decisione di approfondire il dettaglio della valutazione deve essere presa caso per caso.

### **Definizione dei pesi**

Il metodo *AHP* prevede di fornire una misura dell'importanza relativa dei criteri appartenenti a uno stesso livello e usati per definire la risposta a uno stesso sottoproblema attraverso un vettore di pesi ottenuto con una procedura specifica che prevede la costruzione di Matrici dei confronti a coppie (Saaty 2000) per

valutare l'influenza di ogni criterio individuato sulle relative risposte. Una Matrice dei confronti a coppie è quadrata, di dimensioni  $n \times n$ , dove  $n$  è il numero dei criteri che definiscono il sottoproblema, e riporta i valori  $A_{ij}$  della preferenza accordata a un determinato criterio, posto nella riga  $i$ -esima, rispetto al criterio posto nella colonna  $j$ -esima. Risulta quindi che la diagonale della matrice è composta di 1, corrispondenti alla preferenza di ogni criterio rispetto a sé stesso.

La preferenza accordata a un criterio rispetto a un altro nei confronti a coppie è definita attraverso una scala semantica di importanza relativa, propria del metodo *AHP*, mostrata in Tabella E. La scala prevede che i numeri dispari interi da 1 a 9 siano usati nel definire la preferenza di un criterio rispetto a un altro, dove a 1 corrisponde "Le due attività contribuiscono all'obiettivo in egual misura" e a 9 corrisponde "Le prove che favoriscono una attività sull'altra sono del massimo livello di certezza possibile".

Quando un criterio  $i$  è meno preferito ad un criterio  $j$  il giudizio sulla preferenza  $A_{ij}$  è descritto dal reciproco del giudizio assegnato al criterio  $j$  rispetto al criterio  $i$ , pari a  $1/A_{ji}$ . Ogni matrice può così essere completata facendo  $n*(n-1)/2$  comparazioni.

I confronti a coppie sono effettuati tramite un giudizio dell'importanza relativa dei criteri, basato sui risultati di studi riguardanti la QRA di eventi NaTech (Antonioni *et al.* 2009; Campedel *et al.* 2008; Antonioni *et al.* 2007).

Un metodo approssimato per calcolare i pesi da Matrici dei confronti a coppie prevede di normalizzare ogni colonna per la somma dei

valori che contiene per ottenere una matrice dei confronti normalizzata. Le righe di questa matrice sono mediate con media aritmetica o media geometrica per ottenere un vettore di pesi non normalizzati. La normalizzazione dei pesi rispetto alla loro somma fornisce il vettore di pesi normalizzati che descrivono l'importanza relativa dei criteri oggetto della matrice.

**Tabella E – Scala semantica usata dal metodo *AHP* (Saaty 1980).**

Intensità di importanza $A_{ij}$	Definizione	Spiegazione
1	Uguale importanza	Le due attività contribuiscono nella stessa misura
3	Prevalenza debole	L'esperienza e il giudizio favoriscono leggermente l'attività $i$
5	Prevalenza forte	L'esperienza e il giudizio favoriscono chiaramente l'attività $i$
7	Prevalenza dimostrata	La prevalenza dell'attività $i$ è dimostrata in pratica
9	Prevalenza assoluta	La prevalenza dell'attività $i$ è dimostrata con il massimo livello di certezza possibile

### Convalida

Il metodo messo a punto permette di valutare il rischio determinato dall'interazione tra un evento sismico e i serbatoi di stoccaggio presenti all'interno di un impianto attraverso il calcolo di tre indici di prestazione KPI, relativi a tre diverse categorie di scenari incidentali (Incendi, Dispersione di sostanze tossiche, Esplosioni). Il valore dei KPI è definito in modo da essere rappresentativo della superficie potenzialmente interessata dalle conseguenze di scenari incidentali iniziati dall'evento sismico; per la convalida si rende quindi



necessario il confronto con indici di rischio, ottenuti da QRA relative ad eventi NaTech, che siano correlati alla superficie potenzialmente interessata dagli effetti letali di un incidente.

I metodi QRA riassumono il rischio in indici specifici quali Rischio Individuale, curve F-N (Frequenza-Numero di decessi), e *Potential Life Loss Index* (PLL).

Il PLL, espresso come numero di decessi all'anno nell'area considerata, è rappresentativo della superficie interessata da effetti letali dovuti a tutti gli incidenti possibili sull'impianto e costituisce un buon termine di confronto per la convalida sperimentale del metodo di valutazione semplificata. Si metteranno a confronto l'indice globale  $KPI_G$  ottenuto dall'aggregazione degli indici ricavati dalle tre gerarchie con l'incremento del rischio dovuto alla sismicità  $PLL_{ratio}$ , valutato come rapporto tra il numero di decessi attesi mediamente in un anno per incidenti sull'impianto dovuti a cause interne ( $PLL_{internal}$ ) e ad eventi sismici ( $PLL_{seismic}$ ), come mostrato nell'Equazione F.

$$PLL_{ratio} = (PLL_{seismic} + PLL_{internal}) / PLL_{internal}$$

**Equazione F – Incremento dell'indice PLL a causa di eventi sismici.**

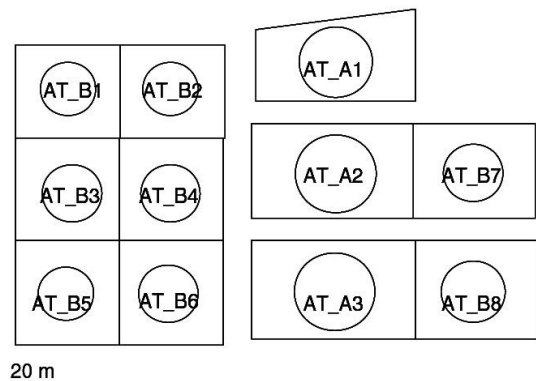
## Risultati

Il layout dell'impianto considerato, mostrato in Figura H, riporta il numero e la posizione di serbatoi di stoccaggio a pressione atmosferica, dotati di bacino di contenimento. L'analisi quantitativa riguarda 3 differenti situazioni:

- incidente iniziato per cause interne
- incidente iniziato da un sisma, serbatoi ancorati

- incidente iniziato da un sisma, serbatoi non ancorati.

Per ognuna di queste situazioni è stata portata a termine da Campedel *et al.* (2008) una QRA i cui risultati sono forniti attraverso la rappresentazione grafica dell'indice di Rischio Locale e della relativa curva F-N, ricavata ipotizzando una densità abitativa delle zone circostanti l'impianto pari a 10 abitanti per ettaro e utilizzando un apposito strumento software sviluppato in un ambiente GIS. La curva F-N è infine integrata per fornire il valore assunto dal PLL nella situazione considerata.



**Figura H – Layout per il caso studio considerato – Milazzo (Campedel *et al.* 2008).**

La procedura per la valutazione semplificata del rischio NaTech dovuto a sismi è schematizzata e mostrata nella Figura I; di seguito si affronterà la valutazione relativa ad un incidente iniziato da un sisma in un impianto con serbatoi atmosferici ancorati le cui caratteristiche sono riportate in Allegato, Tabella 50 e Tabella 51.

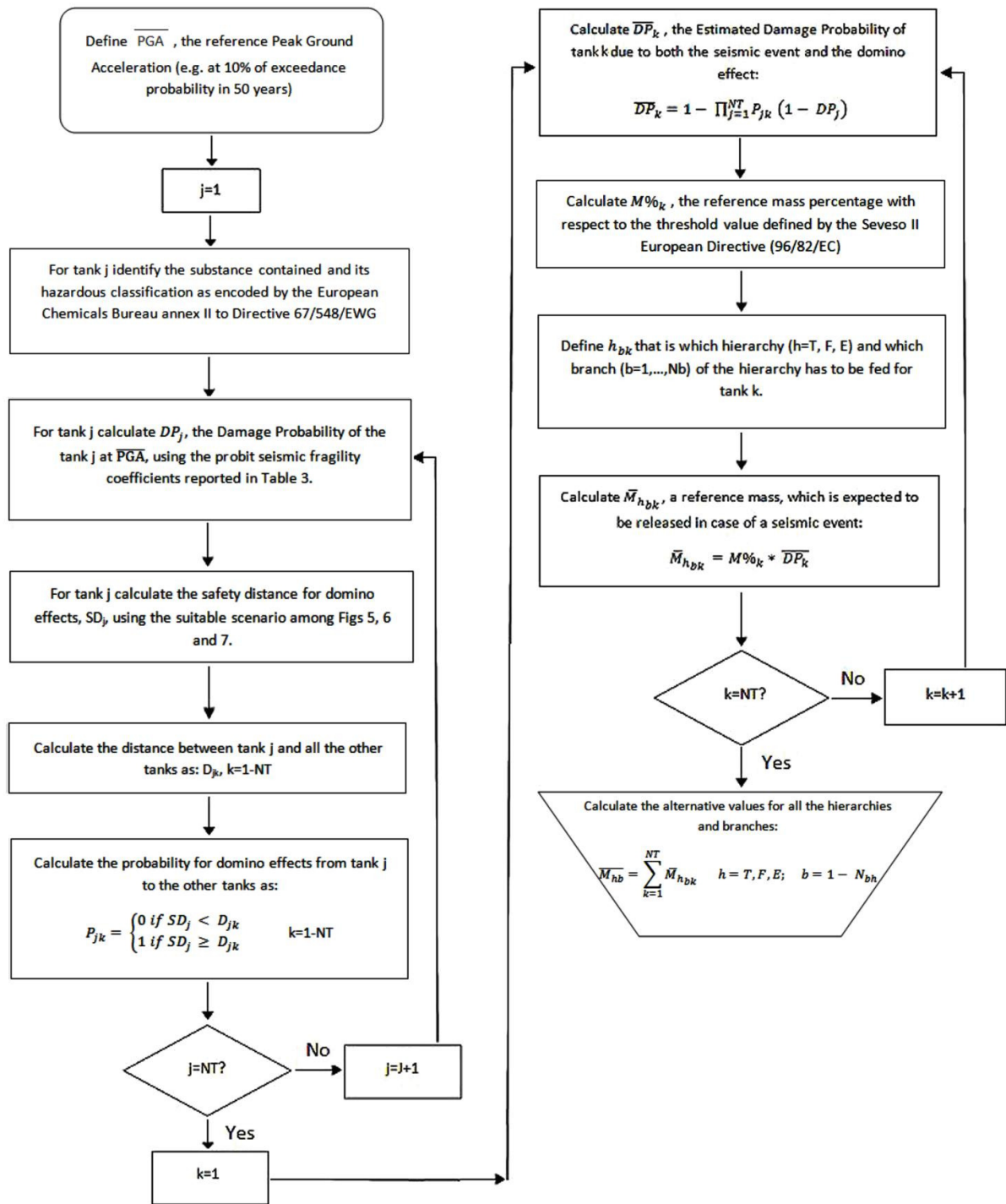


Figura I – Procedura per la valutazione semplificata del rischio di incidente rilevante iniziato da sismi (Busini, Marzo, Callioni, Rota, to be submitted).

Nel caso in esame la PGA attesa è pari a 0,302, ricorrendo alle funzioni di vulnerabilità sismica descritte, si calcola la probabilità di guasto del serbatoio j per cause sismiche  $DP_j$ ; il valore della probabilità di guasto di serbatoi

atmosferici ancorati soggetti a una PGA di 0,302 è  $1,45 \cdot 10^{-2}$  eventi su anno.

Usando le informazioni contenute in Figura B, Figura C e Figura D si determinano i valori della probabilità  $P_{jk}$  che le conseguenze di un incidente al serbatoio j si ripercuotano su un

serbatoio k causandone il collasso; ripetendo la valutazione delle probabilità  $P_{jk}$  per tutti i serbatoi j si ottiene una matrice contenente soltanto valori pari a 0 o 1 e con una diagonale principale composta di soli 1, come mostrato in Tabella F, ogni elemento  $P_{jk}$  della matrice corrisponde alla probabilità condizionata del collasso del serbatoio k per effetto domino a causa del collasso del serbatoio j per cause sismiche.

**Tabella F – Matrice delle probabilità condizionate  $P_{jk}$  che un incidente sul serbatoio j causi il collasso del serbatoio k per effetto domino.**

elementi j	elementi k										
	AT-A1	AT-A2	AT-A3	AT-B1	AT-B2	AT-B3	AT-B4	AT-B5	AT-B6	AT-B7	AT-B8
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
5	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0
6	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
8	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
9	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0
10	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
11	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1

Dai valori  $P_{jk}$  della matrice si può calcolare la probabilità totale  $DP_k$  del collasso del serbatoio k a causa del sisma o dell'effetto domino usando l'Equazione D. I valori di  $DP_k$  calcolati per tutti i serbatoi sono mostrati in Tabella G.

**Tabella G – Valori della probabilità di guasto totale per i serbatoi dell'impianto esaminato nel caso studio.**

Elemento k	$DP_k$
AT-A1	7,04E-02
AT-A2	1,10E-01
AT-A3	8,38E-02
AT-B1	5,67E-02
AT-B2	8,38E-02
AT-B3	8,38E-02
AT-B4	1,10E-01
AT-B5	5,67E-02
AT-B6	8,38E-02
AT-B7	7,04E-02
AT-B8	5,67E-02

Per ognuno dei k serbatoi, usando le caratteristiche di pericolosità della sostanza contenuta e le gerarchie illustrate in Figura E, Figura F e Figura G rispettivamente per sostanze classificate come Infiammabili, Tossiche ed Esplosive dal presente metodo, si identificano i rami  $h_{bk}$  delle gerarchie che descrivono il rischio rappresentato dalla sostanza contenuta nel serbatoio k; h descrive la gerarchia a cui il ramo appartiene ( $h = I, T, E$ ), b è il numero che identifica il ramo della gerarchia. Ad ogni ramo corrispondono i pesi assegnati all'importanza relativa dei criteri che influiscono sul rischio descritto dal ramo stesso; moltiplicando l'indice di Massa pesata del serbatoio k per i pesi presenti sul ramo  $h_{bk}$  si ottiene il valore del KPI relativo al rischio determinato da quella combinazione di serbatoio, sostanza e scenario incidentale. Sommando i KPI calcolati per i diversi serbatoi, relativi allo stesso tipo di scenario incidentale, si ottengono i 3 KPI che descrivono per l'impianto analizzato il rischio relativo rispettivamente ad Incendi, Dispersioni di sostanze tossiche ed Esplosioni; i risultati sono mostrati in tabella H.

**Tabella H – Valori dei KPI relativi ai diversi serbatoi e all'impianto nel suo complesso, ottenuti con il metodo semplificato per la valutazione del rischio NaTech.**

Elemento k	Massa pesata	KPI <sub>I</sub>	KPI <sub>T</sub>	KPI <sub>E</sub>
AT-A1	1,12E-02	2,61E-03	0	2,74E-04
AT-A2	1,76E-02	4,09E-03	0	4,29E-04
AT-A3	1,34E-02	3,11E-03	0	3,26E-04
AT-B1	5,55E-03	1,29E-03	0	1,36E-04
AT-B2	8,21E-03	1,91E-03	0	2,00E-04
AT-B3	8,21E-03	1,91E-03	0	2,00E-04
AT-B4	1,08E-02	2,51E-03	0	2,63E-04
AT-B5	5,55E-03	1,29E-03	0	1,36E-04
AT-B6	8,21E-03	1,91E-03	0	2,00E-04
AT-B7	1,01E-02	2,35E-03	0	2,46E-04
AT-B8	8,14E-03	1,89E-03	0	1,99E-04
Impianto	/	2,49E-02	0	2,61E-03

Aggregando i tre indici KPI ottenuti per l'impianto come descritto dall'Equazione E, si ottiene l'indice globale KPI<sub>G</sub>, pari a  $2,5 \cdot 10^{-2}$ , che essendo compreso tra  $10^{-1}$  e  $10^{-2}$  corrisponde ad un livello Medio di rischio NaTech. Ripetendo l'intera procedura di valutazione semplificata per lo scenario relativo ad un incidente iniziato da un sisma in un impianto che contiene serbatoi atmosferici non ancorati, si ottengono i valori dei KPI relativi alla seconda situazione.

I KPI ricavati dalle due valutazioni sono riassunti in Tabella I, si nota come i valori dei KPI relativi a serbatoi non ancorati sono di un ordine di grandezza superiori a quelli per serbatoi ancorati, a causa della loro maggiore vulnerabilità sismica.

**Tabella I – Confronto tra i KPI ottenuti considerando serbatoi Ancorati e Non Ancorati.**

Tipo serbatoio	KPI <sub>I</sub>	KPI <sub>T</sub>	KPI <sub>E</sub>	KPI <sub>G</sub>	Rischio
Ancorati	0,0249	0,0000	0,0026	0,0250	Medio
Non Ancorati	0,1753	0,0000	0,0184	0,1763	Alto

I PLL che risultano dalle QRA effettuate da Campedel *et al.* (2008) sono riassunti nella Tabella L, insieme al PLL<sub>ratio</sub> calcolato come descritto nell'Equazione F.

**Tabella L – PLL ricavati tramite analisi quantitativa dell'impianto (Campedel, Cozzani 2008).**

Tipo serbatoi	PLL <sub>internal</sub>	PLL <sub>seismic</sub>	PLL <sub>ratio</sub>
Ancorati	1,43E-05	3,80E-04	28
Non Ancorati	1,43E-05	2,92E-03	205

Confrontando il livello di rischio indicato dal metodo di valutazione semplificato con il PLL<sub>ratio</sub>, ottenuto per l'impianto con serbatoi ancorati si nota come ad un incremento del PLL di circa un ordine di grandezza corrisponde un livello di rischio segnalato come Medio. Per l'impianto con serbatoi non ancorati l'incremento del PLL dovuto a cause sismiche è di due ordini di grandezza, corrispondente a una situazione in cui l'evento sismico modifica notevolmente il rischio posto dall'impianto, il livello di rischio valutato con metodo semplificato è Alto.

Il metodo di valutazione semplificata è in grado di dare una previsione del rischio di incidente rilevante iniziato da eventi sismici compatibile con i risultati ottenuti da QRA.

## Conclusioni

I danni causati a impianti industriali e stoccaggi da eventi catastrofici come i terremoti possono produrre rilasci multipli e simultanei di sostanze pericolose, tali incidenti prendono il nome di eventi NaTech. Quando un impianto è posizionato in una zona a rischio sismico si trova esposto a cause esterne di guasto che possono incrementare l'intensità e la frequenza di differenti scenari incidentali

anche di alcuni ordini di grandezza, sottoponendo le aree circostanti a livelli di rischio non accettabili; è quindi necessaria l'elaborazione di specifiche procedure per la valutazione e la gestione del rischio posto da queste situazioni. Obiettivo del presente lavoro di tesi è l'elaborazione di un metodo di *screening* per la valutazione qualitativa del rischio indotto dall'interazione tra eventi sismici e grandi stoccaggi di sostanze pericolose al fine di comparare differenti impianti e individuare le situazioni che necessitano di una valutazione più dettagliata, ottenuta applicando i metodi della QRA al problema del rischio NaTech. Attraverso la definizione di indici di prestazione si è caratterizzato il livello di rischio NaTech determinato da un dato impianto posto in una

zona con una data sismicità; la valutazione degli indici è stata effettuata con il metodo di scelta multicriterio *Analytic Hierarchy Process*. I risultati ottenuti con il metodo di *screening* sono in buon accordo con i risultati ottenuti da QRA, la sensibilità alle principali variabili influenti sul rischio è elevata e la procedura per la valutazione dell'effetto domino esprime ragionevolmente l'incremento del rischio determinato dalla possibile propagazione di incidenti; il metodo permette di valutare il rischio posto dalle apparecchiature prese singolarmente e dall'impianto nel suo complesso e di effettuare comparazioni tra situazioni differenti basandosi su una valutazioni oggettive benché semplificate.

## 1. INTRODUZIONE

Le catastrofi naturali pongono un rischio che non dipende unicamente dagli effetti diretti su persone e strutture, ma comprende anche gli effetti dovuti a rilasci accidentali di sostanze pericolose da impianti e stoccaggi colpiti dal cataclisma, il quale agisce come causa esterna di guasto delle apparecchiature, iniziando catene di eventi che portano al rilascio e alle conseguenze correlate. La caratteristica principale di tali rilasci accidentali di sostanze è quella di essere iniziati dall'evento naturale, che produce nell'impianto un guasto o un malfunzionamento che conducono al rilascio; gli incidenti così generati sono stati nominati eventi NaTech, ad indicare la loro doppia composizione, naturale e tecnologica.

L'interazione tra catastrofi naturali e impianti industriali produce un incremento della frequenza e della intensità degli scenari incidentali generati dal rilascio di sostanze pericolose; l'elevata estensione della superficie potenzialmente colpita da uno stesso cataclisma finisce con il produrre rilasci multipli e simultanei.

L'emergenza generata dalla catastrofe naturale e dai numerosi rilasci di sostanze pericolose competono per le poche risorse disponibili per l'intervento e il soccorso, la compresenza degli effetti contribuisce sinergicamente ad aumentare la probabilità che la popolazione sia esposta a sostanze tossiche o agli effetti indiretti dovuti a incendi o esplosioni che si generano quando sostanze infiammabili sono innescate.

Negli ultimi anni si è posta una sempre maggiore attenzione alle problematiche poste da eventi NaTech; numerosi studi esaminano fatti disastrosi recenti al fine di porre in luce le caratteristiche principali di questi eventi e fornire una base per lo sviluppo di metodi e strategie di gestione specifiche.

Di recente la Commissione Europea ha varato il progetto iNTeg-Risk, che identifica il NaTech come un rischio emergente e promuove una attività di ricerca finalizzata alla elaborazione di metodi per la valutazione e la gestione di tale rischio.

Nello sviluppo di un approccio specifico al problema della valutazione del rischio NaTech è necessario conformarsi alla procedura standard di gestione del rischio, che prevede tra l'altro una valutazione qualitativa del rischio volta all'individuazione delle situazioni che richiedono analisi più approfondite, effettuata con metodi adatti allo *screening* di un numero potenzialmente elevato di impianti.

Il presente studio punta all'elaborazione di un metodo per la valutazione semplificata del rischio NaTech determinato da terremoti che renda conto dei fenomeni implicati e delle principali variabili influenti, caratterizzandoli in modo semplice e creando una cornice ben definita all'interno della quale organizzare e gestire le informazioni necessarie alla valutazione. In particolare il metodo dovrà fornire la possibilità di stimare l'incremento del rischio dovuto alla propagazione di un incidente a diverse apparecchiature per effetto domino e valutare in modo oggettivo il rischio associato a un impianto o a una singola apparecchiatura, permettendo la comparazione di situazioni differenti.

La necessità di comparare simultaneamente un certo numero di parametri anche non commensurabili direttamente e di calcolare un indice di prestazione che sia rappresentativo del rischio che un determinato impianto o apparecchiatura pongono ha portato alla scelta del metodo di scelta multicriterio *Analytic Hierarchy Process*.

A conclusione dello studio il modello è stato prima convalidato attraverso il confronto con i risultati di valutazioni quantitative del rischio NaTech tratte dalla letteratura e poi applicato ad alcuni casi studio definiti in modo da mostrare la sensibilità dei risultati alle variabili influenti sul rischio.

## **2. STATO DELL'ARTE**

### **2.1. Incidenza di catastrofi naturali**

Eventi catastrofici naturali come terremoti, eruzioni vulcaniche, incendi, alluvioni, tsunami e uragani minacciano estese aree in tutto il pianeta. Gli effetti di tali cataclismi possono incidere su territori ampi centinaia di chilometri quadrati, colpendo duramente le popolazioni e le attività ivi insediate. La capacità di intervento dopo una catastrofe naturale può essere ridotta a causa dell'indisponibilità di personale ed equipaggiamenti necessari ad operazioni di ricerca e salvataggio. Contribuiscono a questo l'estensione delle aree interessate da un singolo evento, l'elevato numero di emergenze simultaneamente in atto, la possibilità che il personale e gli equipaggiamenti dedicati al salvataggio siano stati essi stessi colpiti dalle conseguenze del disastro nonché l'impraticabilità delle vie di comunicazione che può isolare alcune zone impedendo il soccorso (Steinberg *et al.* 2008).

A eventi di elevata intensità spesso fanno seguito effetti secondari quali scarsità di cibo e acqua potabile, diffusione di epidemie, impossibilità di riprendere una attività normale nei territori più colpiti. Perdite di vite umane e danni economici ingenti sono le drammatiche conseguenze di questi avvenimenti; la ricostruzione può richiedere anni per essere completata e gli elevati costi che comporta pesano sui bilanci delle nazioni colpite.

#### **2.1.1. Valutazione e gestione del rischio naturale**

La verosimiglianza del verificarsi di un evento catastrofico di tipo naturale in un certo luogo dipende dalle caratteristiche geologiche, morfologiche e climatiche, la causa scatenante l'evento può essere individuata nel territorio stesso o in un territorio vicino. In pratica il rischio dovuto a cause naturali dipende da fattori non modificabili, che assoggettano determinati territori a eventi catastrofici che possono ripetersi con una certa frequenza, dato il necessario permanere delle condizioni che possono causarli.

L'elevata intensità distruttiva di questi eventi associata a una frequenza spesso non trascurabile implica che persone e strutture presenti su questi territori siano costantemente soggette a livelli di rischio che in molti casi travalicano i limiti considerati come accettabili.

Per questi motivi, sono state sviluppate da molti paesi procedure per la gestione dei rischi di carattere naturale a cui il territorio nazionale è soggetto, che prevedono la creazione di mappe



che riportano l'intensità massima attesa dell'evento in una determinata zona e la pianificazione degli usi del territorio in funzione dei rischi a cui è soggetto. Gli strumenti tipicamente utilizzati per la mitigazione degli effetti di eventi catastrofici prevedono criteri di progettazione di strutture ed edifici, che ne garantiscono la resistenza a eventi di una intensità fissata, la redazione di piani di emergenza e l'addestramento di squadre specificamente dedicate al salvataggio.

Insedimenti umani e industriali sono stati costruiti in zone ad elevato rischio naturale per motivi quali la indisponibilità di altri spazi più adatti all'edificazione, l'abbondanza di acqua, necessaria alla vita e alle attività industriali, e la presenza di suoli adatti a coltura. L'assenza, in tempi passati, di una pianificazione dell'uso del territorio in funzione dei livelli di rischio naturale ha finito con il produrre in molti casi elevate concentrazioni di persone e attività in zone ad elevato rischio.

## **2.2. Rischio NaTech**

I disastri naturali sono potenti e importanti meccanismi con cui si producono rilasci di sostanze pericolose (Young *et al* 2004.). Questi rilasci possono essere direttamente conseguenza dell'evento disastroso, per esempio il rilascio di gas tossici e radionuclidi durante eruzioni vulcaniche, o indiretti, come il rilascio di sostanze pericolose dovuto al danneggiamento di un serbatoio di stoccaggio.

A causa dell'elevata estensione delle aree soggette a catastrofi naturali, numerose attività umane possono essere interessate da un singolo evento (Steinberg *et al.* 2008). Tra tutti pongono un particolare problema gli impianti chimici e molti impianti dell'industria di processo, gli stoccaggi di combustibili, le rivendite di prodotti chimici all'ingrosso e tutte le attività che utilizzano sostanze pericolose in quanto i danni provocati alle strutture dall'evento naturale possono causare rilasci multipli e simultanei di sostanze pericolose (Krausmann e Mushtaq 2008).

Sostanze pericolose sono tutte le sostanze che presentano effetti negativi diretti sulla salute umana, dai più lievi ai più gravi, quelle che generano successivamente al rilascio situazioni pericolose per la vita e la salute umane (incendi, esplosioni), nonché le sostanze che presentano effetti di tossicità ambientale.

Nel caso di un impianto chimico o di stoccaggio il rilascio può essere direttamente causato dalla rottura di una apparecchiatura o di un serbatoio e quindi essere non intenzionale o essere causato da procedure di messa in sicurezza e spegnimento dell'impianto.

L'evento naturale si configura come iniziatore di catene di eventi che portano al rilascio di sostanze pericolose dall'impianto e alle conseguenze correlate a questo rilascio; caratteristica principale di questi incidenti è quella di essere iniziati dall'evento naturale, che produce un guasto, un malfunzionamento, una rottura che conducono al rilascio di sostanze pericolose.

I rilasci non intenzionali di materiali pericolosi che derivano da incidenti industriali iniziati da disastri naturali sono stati definiti con il nome di eventi NaTech, da Natural-technologic (Showalter e Myers, 1994).

L'emergenza generata dalla catastrofe naturale e quella generata dall'incidente industriale competono per le poche risorse disponibili per l'intervento e il soccorso (Steinberg *et al.* 2008), la compresenza degli effetti contribuisce sinergicamente ad aumentare la probabilità che la popolazione sia esposta a sostanze pericolose o a pericoli secondari quali incendi o esplosioni che si generano quando sostanze infiammabili sono innescate (Young *et al.* 2004).

Negli ultimi anni si è posta una sempre maggiore attenzione alle problematiche poste da tali eventi. Numerosi studi esaminano fatti disastrosi recenti ponendo l'attenzione sul numero di incidenti NaTech verificatisi in tali occasioni, sul tipo e quantità di sostanze rilasciate nell'ambiente e sulle modalità con cui l'evento catastrofico ha prodotto il rilascio al fine di porre in luce le caratteristiche principali di questi eventi e fornire una base allo sviluppo di metodi e strategie specifiche.

In particolare il lavoro di Young *et al.* (2004) costituisce una sistematica recensione di eventi catastrofici naturali ed eventi NaTech che mette in luce la frequenza con cui rilasci diretti e indiretti di sostanze pericolose si accompagnano a tali situazioni. Si sottolinea la necessità di studi che forniscano informazioni su scala regionale dell'incidenza di eventi NaTech e della potenziale estensione dei rilasci di sostanze pericolose, che valutino l'efficacia delle misure di mitigazione e favoriscano l'elaborazione di strategie appropriate.

Una raccolta di informazioni in forma standardizzata, che permetta di effettuare comparazioni, è il presupposto indispensabile per l'elaborazione di strategie mirate alla prevenzione e alla mitigazione dei danni causati dai NaTech (Krausmann e Mushtaq 2008).

### **2.2.1. Valutazione e gestione del rischio NaTech**

Per gli impianti industriali a rischio elevato è prevista da normative nazionali e internazionali (*Council Directive 96/82/EC*) una attenta progettazione orientata all'affidabilità dell'impianto relativamente a cause di guasto interne, una valutazione del rischio a cui sono soggette le aree circostanti e la redazione di specifici piani di emergenza per l'allerta e la salvaguardia della popolazione. Le cause di guasto esterne sono spesso considerate trascurabili in questo tipo di

valutazioni, inoltre la direttiva fissa per gli impianti che conservano o utilizzano sostanze pericolose in quantità inferiore al limite definito dall'articolo 8 della Direttiva Europea "Seveso II" (*Council Directive 96/82/EC*) la non obbligatorietà di tali valutazioni, mentre per quantità inferiori a quelle definite dall'articolo 6 non si prevede l'obbligo di effettuare valutazioni del rischio né l'elaborazione di piani di emergenza, in considerazione del rischio limitato che è posto in essere da quantità ridotte di sostanze pericolose.

Posto che eventi catastrofici naturali possono causare incidenti industriali con rilascio di sostanze pericolose, si rende necessario considerare nelle procedure di valutazione del rischio di incidente rilevante la possibilità che eventi esterni di tipo naturale possano essere gli iniziatori di incidenti molto gravi con rilasci multipli e la distruzione di più apparecchiature e linee. In caso di incidente con rilascio di sostanze tossiche o sviluppo di scenari quali incendi ed esplosioni, è necessario che le persone si proteggano da effetti pericolosi per la salute o la vita rifugiandosi in casa o altri luoghi chiusi o, se allertate per tempo, abbandonando le zone colpite. La compresenza degli effetti dovuti a una catastrofe naturale possono ridurre la capacità delle persone di mettersi in salvo intrappolandole o danneggiando gravemente gli edifici in cui è possibile cercare rifugio, questo fa sì che il numero delle vittime possa aumentare in maniera sensibile. Inoltre la presenza simultanea di numerose emergenze sovraccarica la capacità di intervento impedendo una efficace azione di soccorso.

Per questi motivi il problema dell'esistenza del rischio NaTech è stato affrontato da diversi ricercatori con l'obiettivo di raccogliere informazioni su eventi disastrosi recenti, elaborare metodi per la valutazione qualitativa o quantitativa del rischio NaTech e strategie volte alla prevenzione e alla mitigazione.

Di recente la Commissione Europea ha varato il progetto iNTeg-Risk, che identifica il NaTech come un rischio emergente e promuove una attività di ricerca con oggetto "*Emerging risks related to interaction between natural hazards and technologies at community level*". L'attività punta alla elaborazione di metodi per la valutazione e la gestione del rischio NaTech e alla produzione di un manuale di norme di buona tecnica per la mitigazione del rischio (iNTeg-Risk, 2008).

Nello sviluppo di un approccio specifico al problema della valutazione del rischio NaTech è necessario conformarsi alla procedura standard di gestione del rischio, che prevede:

- pianificazione degli obiettivi, delle attività e delle risorse necessarie
- identificazione dei rischi
- attività di *screening*, volta all'individuazione delle situazioni che richiedono analisi più approfondite, effettuata con metodi qualitativi

- analisi di rischio quantitativa, per gli impianti esposti a rischio non trascurabile
- pianificazione delle misure mitigazione necessarie a ricondurre il rischio a livelli accettabili
- monitoraggio e controllo del rischio, per verificare che il rischio non superi la soglia dell'accettabilità.

La peculiarità dei problemi posti dall'interazione tra eventi catastrofici naturali e impianti dell'industria di processo ha portato alla necessità di elaborare metodi specifici sia per la valutazione quantitativa che per la valutazione qualitativa del rischio NaTech.

I metodi sviluppati per la valutazione del rischio NaTech seguono due approcci differenti: i metodi quantitativi si sforzano di descrivere i complessi meccanismi che producono il rischio per darne una definizione in termini quantitativi, affrontando il problema del grande numero di variabili e correlazioni da gestire, usando le procedure dell'analisi di rischio quantitativa; i metodi qualitativi, invece, puntano a selezionare un set ridotto di variabili giudicate come maggiormente influenti, a darne una descrizione attraverso una scala di valori semiquantitativa e ricomporre le informazioni in un indice di prestazione.

#### 2.2.1.1. Valutazione quantitativa del rischio NaTech

In generale i metodi per la valutazione quantitativa del rischio di incidente rilevante (*Quantitative Risk Assessment, QRA*) si articolano in più fasi, comprendenti:

- individuazione dei possibili scenari incidentali
- individuazione delle catene di eventi che conducono ai differenti scenari
- determinazione delle frequenze degli scenari incidentali
- determinazione dell'intensità degli effetti e della gravità delle conseguenze
- ricomposizione delle informazioni in indici di rischio.

Nell'analisi di rischio quantitativa il rischio viene genericamente definito come il prodotto tra frequenza di un evento incidentale e magnitudo (o gravità) dell'evento stesso.

La definizione della frequenza con cui un evento catastrofico naturale può presentarsi in una determinata area è tipicamente basata su una analisi statistica delle serie storiche riguardanti l'evento, data l'impossibilità di prevedere in modo deterministico il verificarsi di simili eventi.

La magnitudo del danno potenzialmente generato risulta dall'interazione tra:

- intensità del fenomeno naturale
- caratteristiche di vulnerabilità dell'impianto e delle apparecchiature
- pericolosità delle sostanze rilasciate a seguito del danneggiamento dell'impianto

- vulnerabilità delle persone e degli edifici all'evento catastrofico naturale e alle conseguenze del rilascio di sostanze pericolose.

La valutazione della magnitudo è complicata dalla impossibilità di determinare con precisione il valore delle variabili influenti sul rischio e dalla difficoltà nella determinazione del tipo e numero di scenari incidentali potenzialmente generati da rilasci multipli e contemporanei.

Procedure specifiche per la valutazione quantitativa del rischio NaTech relativo a terremoti e alluvioni sono state messe a punto di recente usando i metodi della QRA e basandosi su un esteso lavoro di ricerca riguardante eventi NaTech (Fabbrocino *et al.* 2005; Antonioni *et al.* 2007; Campedel *et al.* 2008; Antonioni *et al.* 2009).

L'approccio usato consiste nel definire le caratteristiche del fenomeno naturale sulla base di frequenza e intensità, nell'individuare le apparecchiature potenzialmente danneggiate, la gravità del danno atteso e la quantità di sostanze pericolose potenzialmente rilasciate attraverso modelli di vulnerabilità delle apparecchiature al fenomeno naturale sviluppati sulla base di una grande quantità di osservazioni usando metodi probabilistici. Tali modelli di vulnerabilità descrivono la probabilità che una determinata apparecchiatura raggiunga un preciso stato di guasto a seguito di un evento catastrofico naturale di intensità fissata; sulla base dello stato di guasto raggiunto si definisce la quantità di materiale rilasciato dall'apparecchiatura e la modalità del rilascio. Si prosegue quindi definendo i possibili scenari incidentali generati dalle singole apparecchiature e calcolando l'intensità degli effetti dovuti a tali scenari utilizzando i metodi tipici della QRA; con metodi specificamente sviluppati si ricavano le combinazioni credibili di eventi incidentali singoli e se ne calcola la frequenza, per valutare le conseguenze al di fuori dello stabilimento e per ricomporre le informazioni in indici di rischio quantitativi si utilizza un software GIS (Sistema Informativo Geografico).

I metodi per la valutazione quantitativa del rischio costituiscono i più potenti strumenti disponibili per la valutazione dell'impatto che un evento catastrofico naturale può avere su un impianto; richiedono però l'intervento di un team di esperti e una elevata quantità di risorse in termini di tempo, che si traducono in costi che i soggetti interessati a questo tipo di valutazioni, cioè enti pubblici locali e gestori di piccoli impianti, non sempre possono affrontare. Sono quindi necessari metodi che permettano una valutazione del rischio NaTech semplificata al fine di fornire uno strumento per lo *screening* preliminare di un grande numero di situazioni potenzialmente pericolose. Tale procedura di *screening* deve discriminare gli impianti che, presentando un livello di rischio non trascurabile, è necessario siano analizzati approfonditamente con i metodi della QRA e gestiti in maniera adeguata, dagli impianti che possono considerarsi sicuri rispetto al rischio posto da eventi NaTech.

### 2.2.1.2. Valutazione qualitativa del rischio NaTech

Procedure per la valutazione qualitativa del rischio NaTech sono state messe a punto in vari studi (Krausmann e Mushtaq 2008; Galderisi *et al.* 2008; Cruz e Okada 2008), i risultati ottenuti tramite tali approcci spaziano da scale di intensità qualitative, che indicano il tipo e la gravità dei rilasci che possono verificarsi a causa di un evento NaTech, fino a indici di prestazione ottenuti aggregando più indici qualitativi che valutano il tipo e l'intensità degli eventi catastrofici naturali possibili, la vulnerabilità dell'impianto e della popolazione, l'estensione di territorio interessata.

Krausmann e Mushtaq (2008) hanno investigato il rischio associato all'inondazione di impianti industriali attraverso l'analisi di casi storici al fine di sviluppare un metodo che permettesse la valutazione qualitativa dell'impatto che una alluvione può causare in differenti tipologie di attività industriali. Il metodo considera tre differenti livelli di intensità potenziale del fenomeno naturale ed associa ad ognuno di questi e per ognuna delle attività considerate il tipo di conseguenze attese. I risultati forniti sono di tipo assolutamente qualitativo e non permettono di tenere in considerazione la dimensione delle installazioni, la quantità di sostanze stoccate né è possibile ricavare un indice di rischio che permetta di comparare situazioni differenti.

Galderisi *et al.* (2008) hanno elaborato un metodo per la valutazione del rischio NaTech come strumento di supporto per la pianificazione dell'uso del territorio finalizzato alla riduzione del rischio NaTech nelle aree urbane. Il metodo è sviluppato all'interno di un ambiente GIS, decomponendo il territorio in esame in unità attraverso una griglia e definendo per ognuna di esse l'intensità del pericolo rappresentato dall'evento naturale, dalla presenza dell'impianto e dalla vulnerabilità di persone e strutture attraverso scale di valori qualitative. Le informazioni sono poi ricomposte in un indice di prestazione dalla cui classificazione si ricavano le aree che, presentando livelli di rischio elevati, necessitano di un intervento prioritario. Il metodo, affrontando il discorso della potenziale esposizione a differenti tipi di eventi naturali e della possibile presenza di più impianti nell'area in esame, costituisce effettivamente uno strumento utile alla pianificazione territoriale, costruito peraltro con uno dei metodi tipici di questa attività, vale a dire l'utilizzo di un ambiente GIS per la costruzione di carte tematiche a supporto della decisione. Il metodo richiede però di esaminare un elevato numero di parcelle di territorio e di fornire un giudizio esperto sul valore dei parametri usati per definire il rischio.

Cruz e Okada (2008) hanno proposto un metodo a indici per la valutazione del rischio NaTech relativo a terremoti e alluvioni nelle aree urbane che considera le possibili interazioni tra il

rischio posto dal rilascio di una specifica sostanza da uno specifico serbatoio e i vari sistemi presenti nell'ambiente urbano: le infrastrutture (impianti industriali, reti per la distribuzione di servizi essenziali), la popolazione e i sistemi per la gestione dei rischi e delle emergenze. Fattori relativi a pericolo e vulnerabilità sono stati analizzati qualitativamente; il metodo è stato convalidato attraverso il confronto con i risultati di una analisi volta a determinare i NaTech verificatisi durante il terremoto nella regione di Kocaeli, Turchia, il 17 agosto 1999.

Il procedimento prevede la raccolta di dati per la creazione di una lista dei serbatoi presenti sul territorio, con quantità e tipo di sostanze pericolose contenute, necessaria all'identificazione dei pericoli generati da possibili rilasci, il calcolo della massima distanza alla quale si possono ripercuotere gli effetti dovuti al rilascio di materiale da ognuno dei serbatoi presi singolarmente usando il metodo quantitativo, l'analisi della vulnerabilità dell'impianto all'effetto domino, la vulnerabilità della popolazione e quella delle infrastrutture vitali comprese all'interno dell'area di impatto del NaTech. Le analisi danno luogo a indici qualitativi che sono poi ricomposti in un indice NaTech calcolato per ognuno dei serbatoi individuati.

Il metodo di Cruz rende effettivamente conto dei fenomeni e dei parametri maggiormente influenti sul rischio NaTech, andando a considerare anche la possibilità di un effetto domino, e permette una valutazione così capillare da spingersi fino al livello dei singoli serbatoi. Questa caratteristica permette di effettuare facilmente comparazioni tra i rischi relativi ad impianti di tipo differente o per fenomeni naturali di tipo differente e persino di confrontare i livelli di rischio relativi a serbatoi e sostanze di tipo differente.

Un metodo per lo *screening* preliminare del rischio NaTech, volto ad esaminare i diversi impianti presenti in un territorio al fine di individuare le situazioni che necessitano di una analisi più dettagliata e costosa, deve considerare le principali variabili influenti sul rischio e caratterizzarle in modo semplice, creare una cornice ben definita all'interno della quale organizzare e gestire le informazioni necessarie alla valutazione, fornire un indice che sia rappresentativo dell'effettivo livello di rischio che l'interazione tra un evento naturale e un impianto industriale possono generare.

## 3. MATERIALI E METODI

### 3.1. Obiettivo

Obiettivo di questo lavoro di tesi è sviluppare una metodologia che permetta di valutare il rischio di incidente rilevante che deriva dalla interazione tra terremoti e impianti dell'industria di processo.

Il metodo è specificamente dedicato alla valutazione del rischio NaTech derivante da eventi sismici al fine di costituire uno strumento atto allo *screening* preliminare di impianti potenzialmente a rischio all'interno di una più ampia procedura di gestione del rischio NaTech in una determinata regione. Tale strumento è quindi concepito per fornire una valutazione semiquantitativa del rischio, che possa essere ottenuta con l'impiego di tempo e risorse limitate e sia adatta all'uso da parte di personale potenzialmente poco esperto nella valutazione quantitativa del rischio di incidente rilevante.

Il metodo vuole dare risposta alla semplice domanda: “ L'impianto (o apparecchiatura) A è più pericoloso dell'impianto (o apparecchiatura) B?”, dove A e B possono essere due differenti impianti posti nella stessa zona così come un impianto soggetto a differenti misure di mitigazione. L'indice di rischio verrà fornito sotto forma di un indice delle prestazioni (*Key Performance Indicator*, KPI) dell'impianto rispetto all'evento NaTech ricavato utilizzando una quantità limitata di informazioni facili da reperire per descrivere le principali variabili che influenzano il rischio. Una stima delle conseguenze che l'effetto domino può avere sulla probabilità di guasto delle apparecchiature colpite da eventi incidentali generati dal NaTech dovrà essere considerata. Le informazioni necessarie alla valutazione dovranno essere organizzate e aggregate attraverso l'uso di un metodo strutturato che permetta di prendere decisioni complesse comparando simultaneamente un grosso numero di parametri anche con unità di misura differenti. A questo fine è stato usato il metodo di scelta multicriterio *Analytic Hierarchy Process* (AHP, Saaty 2000), il cui uso è già stato proposto nell'ambito dell'analisi del rischio NaTech (Rota *et al.* 2008).



## 3.2. Approccio al problema

L'approccio seguito è articolato in più fasi che comprendono:

- definizione delle caratteristiche dell'evento sismico
- identificazione delle apparecchiature bersaglio
- ricerca di funzioni che definiscano la correlazione tra intensità dell'evento sismico e probabilità di guasto delle apparecchiature
- definizione di un metodo per valutare le conseguenze di un effetto domino sulla probabilità di guasto delle singole apparecchiature
- individuazione degli scenari potenzialmente generati dal rilascio e delle caratteristiche di pericolosità dei materiali potenzialmente rilasciati
- implementazione del modello per la valutazione con il metodo *Analytic Hierarchy Process* (AHP)
- convalida del modello attraverso il confronto con i risultati di valutazioni quantitative del rischio NaTech tratte dalla letteratura (Campedel *et al.* 2008)
- analisi di sensitività del modello.

Il metodo è stato basato sull'esteso lavoro di ricerca riguardante la valutazione quantitativa del rischio NaTech relativo a eventi sismici realizzato da Cozzani *et al.* (Salzano *et al.* 2003; Cozzani *et al.* 2007; Campedel *et al.* 2008; Antonioni *et al.* 2007; Fabbrocino *et al.* 2005).

### 3.2.1. Caratterizzazione dell'evento sismico

L'evento sismico è stato caratterizzato attraverso parametri relativi ad intensità e frequenza in accordo con la metodologia per la QRA degli eventi NaTech già citata.

L'intensità di un evento sismico si riferisce alle caratteristiche delle onde sismiche che, generate nell'ipocentro del sisma, si irradiano nel suolo e le cui caratteristiche possono essere correlate alla magnitudo, alla distanza e al tipo di substrato geologico. Questa visione, che già risulta semplificata, presenta numerose incertezze circa la determinazione univoca dell'intensità del terremoto; è comunque in uso la classificazione degli eventi sismici in base a due classi di parametri: *ground parameters* e *structural dynamic affecting parameters*, in grado di rappresentare tutti gli effetti che affliggono la risposta di una struttura.

I *ground parameters* riferiscono a misure dell'intensità dello scuotimento del terreno: la massima accelerazione al suolo (*Peak Ground Acceleration*, PGA) e la massima velocità al suolo (*Peak Ground Velocity*, PGV) in una determinata zona. Nell'analisi della vulnerabilità

sismica di serbatoi è tipicamente usata la PGA, mentre la PGV è utilizzata per investigare sistemi composti da tubazioni (Salzano *et al.* 2003).

Gli *structural dynamic affecting parameters* riferiscono invece alla amplificazione dinamica indotta dalle onde sismiche su un sistema a un grado di libertà con lo stesso periodo della struttura analizzata. La caratterizzazione dettagliata degli effetti di un sisma richiede l'utilizzo di codici di calcolo agli elementi finiti, che richiedono per loro stessa natura un investimento notevole in termini di tempo e competenze specifiche, ed esula dagli obiettivi del presente lavoro. Normative nazionali e internazionali da tempo prescrivono standard di resistenza strutturale per le costruzioni poste in zone classificate come a rischio sismico, il parametro tipicamente usato per indicare il livello di intensità del sisma è la massima accelerazione orizzontale al suolo (PGA).

I valori di PGA attesi in una data zona possono essere ricavati da dati storici o modelli più complessi che analizzano la posizione dei possibili epicentri, l'energia potenzialmente liberata, le caratteristiche geologiche del sottosuolo e usano dei modelli di attenuazione per ricavare la PGA in una determinata zona. Questi valori sono tipicamente forniti da enti nazionali e internazionali di ricerca sotto forma di carte tematiche che riportano una classificazione delle zone sismiche basata sul massimo valore di PGA atteso statisticamente.

La probabilità di accadimento dell'evento sismico è definita in accordo con i metodi dell'analisi probabilistica del rischio sismico (*Probabilistic Seismic Hazard Analysis*, PSHA) in funzione di un intervallo di tempo T fissato (Cornell 1968).

L'intervallo di tempo tipicamente scelto è di 50 anni in quanto rappresentativo della vita media di una struttura, edificio o impianto.

Si definisce quindi la probabilità di accadimento in corrispondenza di un dato valore di PGA come la probabilità che il valore di PGA scelto sia superato nell'intervallo di tempo T fissato:

$$H(T) = P[PGA > a, T]$$

La variabile H(T) è la probabilità di superamento (*Exceedance Probability*, EP) del valore di PGA 'a' nell'intervallo di tempo T.

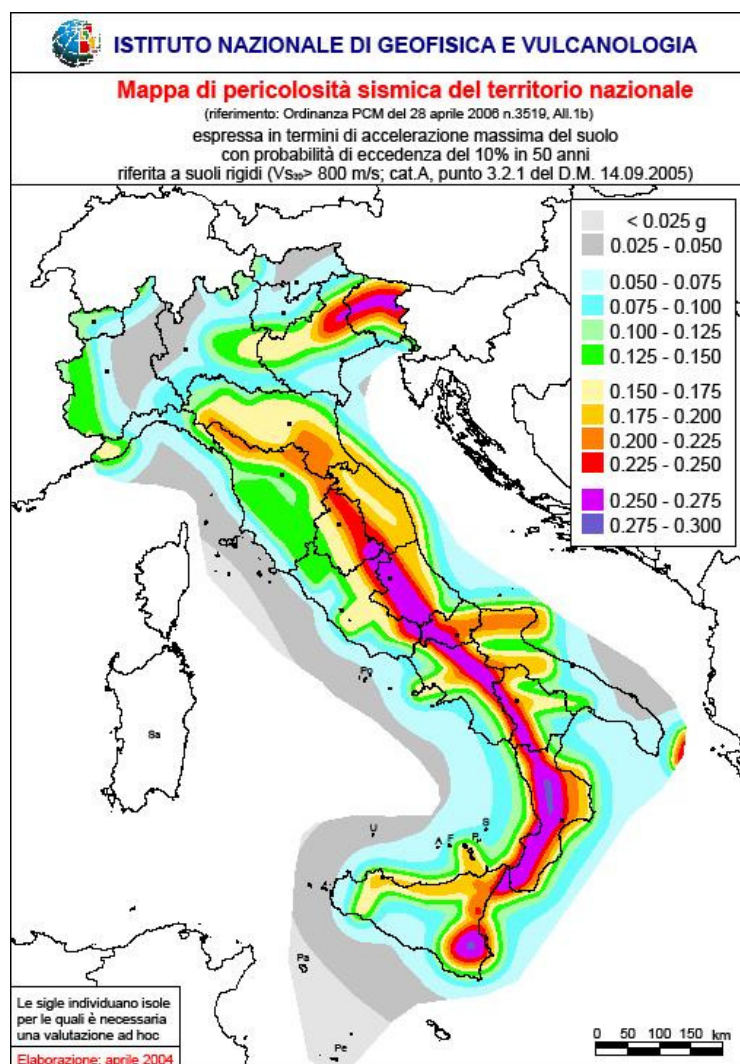
L'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri OPCM 3519 prevede la suddivisione dell'intero territorio italiano in 4 zone sulla base del rischio sismico a cui sono soggette, il completamento, la pubblicazione e la gestione della mappa di pericolosità sismica dell'intero territorio italiano da parte dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

Le zone sismiche italiane sono classificate sulla base della PGA attesa con una probabilità di superamento del 10% in 50 anni ed espressa come frazione dell'accelerazione di gravità g come descritto in Tabella 1.

**Tabella 1 – Zonazione sismica per il territorio italiano come definita dall’Ordinanza OPCM 3519.**

	PGA con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni
Zona 1	>0,25g
Zona 2	0,15 - 0,25g
Zona 3	0,05 - 0,15
Zona 4	<0,05

I ricercatori dell’Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia hanno creato 9 mappe che forniscono il valore della massima PGA attesa in un intervallo di 50 anni con differenti probabilità di superamento, al fine di permettere la ricostruzione di curve di rischio sismico riportanti la probabilità che un qualsiasi valore di PGA sia superato in 50 anni per ogni sito della griglia di calcolo utilizzata (Meletti e Montaldo 2007). In Figura 1 è mostrata la mappa riportante i valori di PGA attesi con il 10% di *Exceedance Probability* in 50 anni su buona parte del suolo italiano (INGV 2004).



**Figura 1 – Mappa della PGA attesa con il 10% di Exceedance Probability in 50 anni sul suolo italiano (INGV 2004)**

I dati relativi al rischio sismico sono forniti anche in forma tabulare riportante, per ogni valore di *Exceedance Probability*, il valore di PGA atteso su una griglia comprendente svariate migliaia di siti.

Il valore di *Exceedance Probability* tipicamente utilizzato come riferimento nella progettazione di strutture resistenti ad eventi sismici è del 10%. Ai fini della valutazione semplificata del rischio di incidente rilevante iniziato da sismi oggetto di questo studio, si utilizzeranno i valori di PGA con una *Exceedance Probability* del 10% in un intervallo di tempo di 50 anni.

### **3.2.2. Identificazione delle apparecchiature bersaglio**

Una analisi strutturale dettagliata volta a identificare i danni causati da un evento sismico richiede risorse specifiche e fornisce un livello di dettaglio eccessivo ai fini di una valutazione semplificata, in alternativa sono stati reperiti in letteratura dei modelli empirici basati su osservazioni di casi reali.

Un esteso lavoro dedicato all'identificazione delle apparecchiature tipicamente danneggiate in un evento sismico, delle modalità con cui queste si danneggiano e delle caratteristiche dei danni subiti e finalizzato alla valutazione quantitativa del rischio NaTech, è stato effettuato da Campedel *et al.* (2008) e Salzano *et al.* (2003). Dall'analisi di eventi NaTech recenti generati da sismi sono stati individuati come maggiormente esposti serbatoi atmosferici, serbatoi pressurizzati, tubi di grosso calibro, scambiatori, colonne, reattori, pompe e linee di minor calibro. Ai fini della definizione della quantità e portata di sostanze pericolose rilasciate da una apparecchiatura, necessaria allo sviluppo di un metodo per la QRA del NaTech sismico, e seguendo le linee guida HAZUS (1997), le possibili tipologie di danno che una apparecchiatura, serbatoio o tubazione possono subire a seguito di un terremoto sono state classificate in un certo numero di stati di guasto (*Damage States DS*) discreti. Successivamente gli stati di guasto definiti per le differenti apparecchiature sono stati correlati all'entità del rilascio di sostanze pericolose risultante (*Loss of containment LOC*) e agli scenari incidentali potenzialmente generati.

Dai risultati delle QRA citate si evince che a determinare maggiormente il rischio di incidente rilevante contribuiscono i grandi serbatoi atmosferici e i serbatoi pressurizzati in quanto sono apparecchiature che presentano una capienza molto superiore rispetto alle altre già citate in precedenza; si sottolinea però che anche tubazioni di grosso diametro possono presentare un contributo non trascurabile al rilascio di sostanze pericolose. Inoltre si evidenzia che lo stato di guasto più tipico per grossi serbatoi atmosferici è il collasso della struttura, mentre per i

serbatoi pressurizzati è la rottura di tubazioni e flange o la foratura del mantello. L'intensità della perdita di contenimento è in entrambi i casi tale da causare l'intero svuotamento dell'apparecchiatura in meno di 10 minuti, gli scenari potenzialmente generati sono rispettivamente incendi e dispersioni da pozza per i serbatoi atmosferici, *jet-fire*, *fireball*, BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*), flash-fire e VCE (*Vapor Cloud Explosion*) per i pressurizzati, come evidenziato in Tabella 2.

**Tabella 2– Damage State attesi e a) scenari di riferimento assunti per la valutazione delle conseguenze di b) Loss of Containment events a seguito del danneggiamento di serbatoi atmosferici e pressurizzati per cause sismiche (Antonioni et al. 2007).**

Damage state	Substance hazard	Atmospheric vessels	Pressurized vessels
<b>(a) Expected scenarios</b>			
DS1	Flammable	Minor pool fire	Minor jet fire
	Toxic	Minor evaporating pool	Boiling pool Toxic dispersion
DS2	Flammable	Pool fire Flash fire VCE	BLEVE/fireball Flash fire VCE
	Toxic	Evaporating pool Toxic dispersion	Boiling pool Toxic dispersion
<b>(b) Reference scenarios</b>			
DS1	Flammable	Pool fire	Jet fire
	Toxic	Toxic dispersion from evaporating pool	Toxic dispersion from jet release
DS2	Flammable	Pool fire	VCE
	Toxic	Toxic dispersion from evaporating pool	Toxic dispersion from boiling pool

Il metodo per la valutazione semplificata del NaTech qui proposto, con l'obiettivo di rendere il problema del rischio usando un numero di variabili contenuto, considera come apparecchiature bersaglio dell'evento sismico serbatoi atmosferici e serbatoi pressurizzati. Lo stato di guasto considerato sarà il collasso catastrofico per tutte le apparecchiature individuate al fine di semplificare in modo conservativo il problema della definizione della quantità di sostanze pericolose rilasciate.

### 3.2.3. Stima della probabilità di guasto per cause sismiche

Il problema della descrizione della vulnerabilità delle apparecchiature a un evento sismico è stata affrontato da alcuni ricercatori attraverso lo sviluppo di modelli di fragilità empirici basati su osservazioni sperimentali (Campedel et al. 2008; Salzano et al. 2003). Questi modelli correlano per un gran numero di apparecchiature e serbatoi la probabilità (*Damage Probability*, DP) di raggiungere un determinato stato di guasto (*Damage State*, DS) alla PGA con una funzione del tipo:

$$DP = F[DS|PGA] = f(\mu, \beta, PGA)$$

La variabile DP è una funzione cumulata di probabilità log-normale caratterizzata da media  $\mu$  e deviazione standard  $\beta$ . Attraverso l'uso della *Probit analysis* (Finney 1971) la funzione f è stata linearizzata ottenendo un set di modelli di vulnerabilità basati su espressioni del tipo:

$$Y = K_1 + K_2 \text{Ln}(PGA).$$

**Equazione 1 – Espressione della vulnerabilità sismica, linearizzata attraverso l'uso della Probit Analysis, in funzione della PGA (Salzano *et al.* 2003).**

La variabile Y costituisce una relazione “dose-risposta” tra l'intensità sismica (PGA) espressa come frazione dell'accelerazione di gravità g e la probabilità di subire un determinato danno (Finney 1971).

La variabile Y si può convertire in probabilità risolvendo l'integrale:

$$P(V) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} e^{-v^2/2} dv$$

**Equazione 2 – Probabilità P che una apparecchiatura raggiunga uno stato di danno fissato per cause sismiche, calcolato per mezzo della correlazione dose-risposta Y fornita dalla Probit Analysis (Salzano *et al.* 2003).**

Tali correlazioni sono state sviluppate per differenti categorie di equipaggiamenti e per differenti stati di guasto, la Tabella 3 riassume i modelli di vulnerabilità disponibili per le apparecchiature considerate come maggiormente influenti sul rischio.

**Tabella 3 – Modelli di vulnerabilità: valori delle costanti *Probit* nell'Equazione 1 per differenti apparecchiature, stati di guasto e livelli di riempimento (Antonioni *et al.* 2009).**

Type of equipment	Filling level	Limit state (DS)	$k_1$	$k_2$
Anchored atmospheric tanks	Near full	$\geq 2$	7.01	1.67
	Near full	3	4.66	1.54
	$\geq 50\%$	$\geq 2$	5.43	1.25
	$\geq 50\%$	3	3.36	1.25
Unanchored atmospheric tanks	Near full	$\geq 2$	7.71	1.43
	Near full	3	5.51	1.34
	$\geq 50\%$	3	4.93	1.25
Horizontal pressurized storage tanks	Any	$\geq 1$	5.36	1.01
	Any	$\geq 2$	4.50	1.12
	Any	3	3.39	1.12

Dai risultati delle QRA si nota che la probabilità di guasto è sempre inferiore per stati di guasto più gravi e che alcune apparecchiature sono più vulnerabili di altre, inoltre il livello di

riempimento dei serbatoi e alcuni particolari strutturali come l'ancoraggio influenzano la probabilità di guasto (DP). La DP di serbatoi atmosferici aumenta all'aumentare del livello di riempimento e raggiunge il massimo per livelli pari o superiori all'80% della capacità totale. Questo comportamento è dovuto più che al sisma stesso all'inerzia del liquido che può portare allo spostamento, al rovesciamento o comunque al danneggiamento del serbatoio. L'ancoraggio è una misura dedita alla prevenzione dello spostamento e conseguente danneggiamento dei grandi serbatoi atmosferici in occasione di eventi sismici o alluvionali; i serbatoi provvisti di ancoraggio presentano una probabilità di guasto inferiore ai non ancorati. I serbatoi pressurizzati, per effetto delle loro caratteristiche costruttive, presentano una scarsa vulnerabilità agli eventi sismici.

Ai fini dello sviluppo del metodo di valutazione qualitativa sono state selezionate le funzioni che descrivono la probabilità di raggiungere lo stato di guasto corrispondente al collasso catastrofico per le seguenti apparecchiature: serbatoi atmosferici ancorati e non ancorati, serbatoi pressurizzati. Per i serbatoi atmosferici si considera un livello di riempimento pari o superiore all'80%. Tali scelte sono state effettuate con l'intenzione di considerare il peggior scenario incidentale possibile (*worst case*).

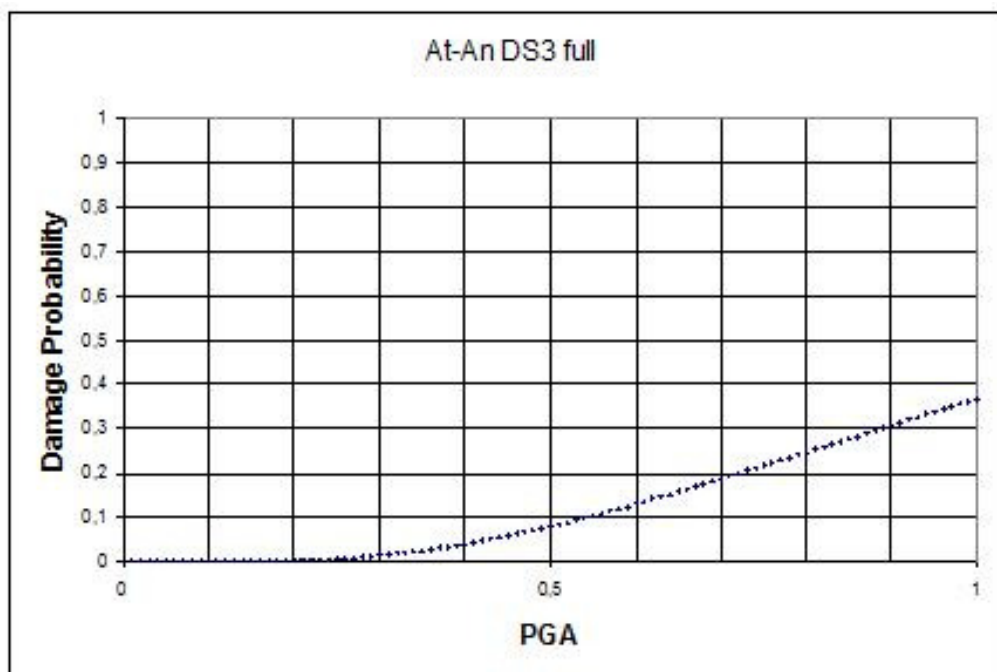


Figura 2 – *Damage probability* relativa al collasso (DS3) di serbatoi atmosferici ancorati (At-An) con livello di riempimento superiore all'80% (*full*) come funzione dell'intensità sismica PGA.

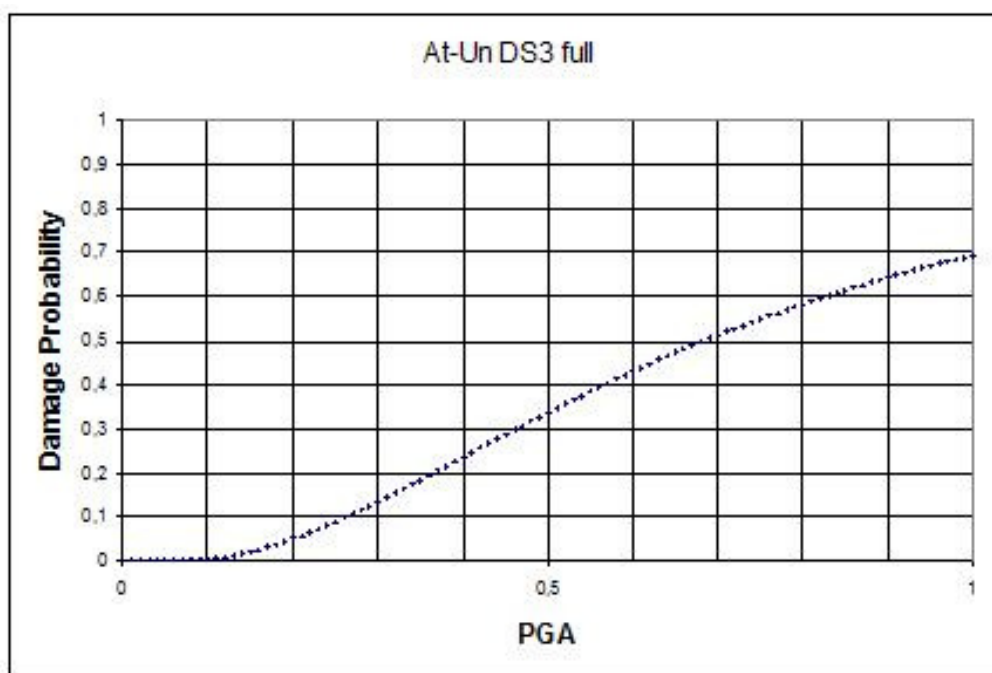


Figura 3 – *Damage probability* relativa al collasso (DS3) di serbatoi atmosferici non ancorati (At-Un) con livello di riempimento superiore all'80% (*full*) come funzione dell'intensità sismica PGA.

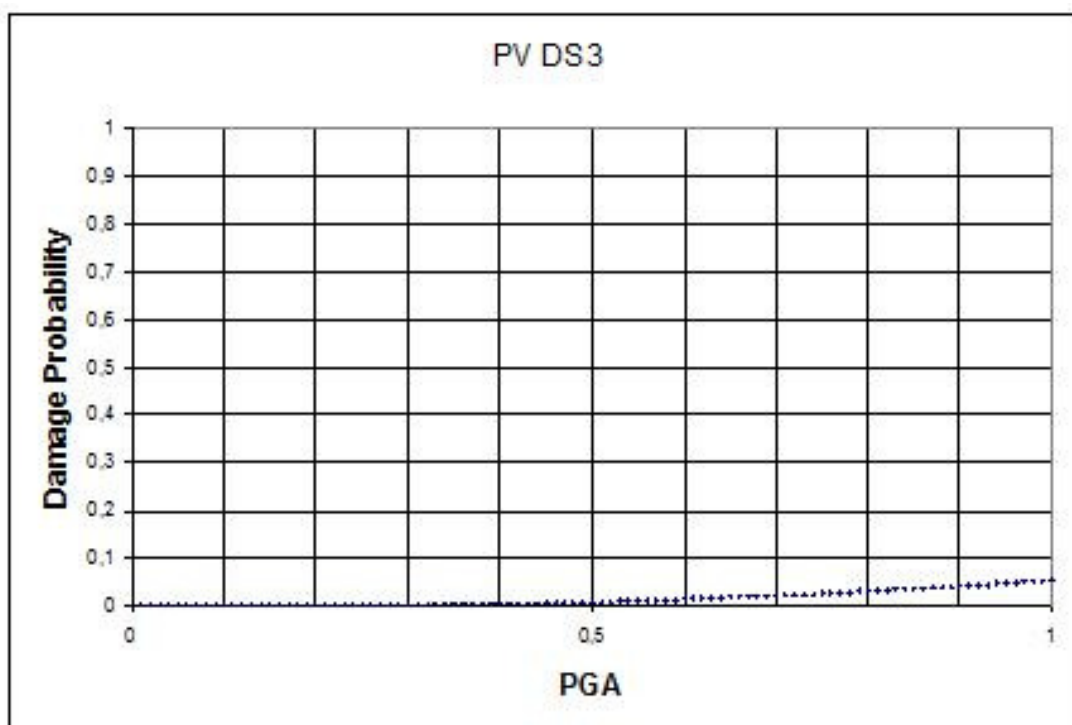


Figura 4 – *Damage probability* relativa al collasso (DS3) di serbatoi pressurizzati (PV) come funzione dell'intensità sismica PGA.

Le curve che descrivono la probabilità di collasso in funzione della PGA per le apparecchiature con le caratteristiche descritte nel paragrafo precedente mostrano che la vulnerabilità è massima per serbatoi atmosferici non ancorati (Figura 3), minima per serbatoi



pressurizzati (Figura 4) mentre per serbatoi atmosferici ancorati (Figura 2) assume un valore intermedio.

#### **3.2.4. Stima della probabilità di guasto causa effetto domino**

L'effetto domino è caratterizzato dal propagarsi di un incidente alle apparecchiature vicine a causa dell'esposizione delle stesse alle conseguenze (irraggiamento, sovrappressione) dell'incidente stesso.

L'approccio alla riduzione del rischio derivante dall'effetto domino si basa principalmente su misure di protezione passive quali barriere fisiche, rivestimenti isolanti e distanze di sicurezza perché il loro funzionamento non richiede l'intervento umano, a differenza di sistemi di protezione attiva che sono per loro natura meno affidabili.

Nella cornice costituita dal metodo per la valutazione quantitativa del rischio NaTech, Cozzani *et al.* (2007) hanno sviluppato una guida alla mitigazione dell'effetto domino che comprende la valutazione delle distanze di sicurezza necessarie a proteggere serbatoi atmosferici e pressurizzati dalle conseguenze di alcuni scenari incidentali.

Il metodo individua una serie di scenari capaci di causare l'effetto domino: *fireball*, *jet-fire*, incendi da pozza, VCE (*Vapour Cloud Explosion*), BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*), esplosioni meccaniche e confinate attraverso l'analisi di casi di incidenti reali; associa agli scenari individuati un parametro fisico che definisce l'intensità del fenomeno (potenza irraggiata, sovrappressione) e un valore soglia superato il quale si assume che l'apparecchiatura soggetta alle conseguenze dell'incidente subisca danno grave.

Attraverso le correlazioni quantitative usate tipicamente nell'analisi di rischio per la stima delle conseguenze di un incidente industriale e i valori soglia per la vulnerabilità delle apparecchiature sono determinate per ognuno degli scenari individuati le distanze di sicurezza necessarie ad evitare l'effetto domino in funzione della quantità e delle caratteristiche del materiale pericoloso rilasciato.

Ai fini dell'elaborazione di un metodo per la valutazione qualitativa del rischio NaTech sono stati selezionati gli scenari corrispondenti a:

- BLEVE
- Esplosioni meccaniche
- *Fireball*
- Incendi da pozza.

Per ognuno di questi scenari è descritta la procedura per la valutazione delle distanze di sicurezza che impediscono il propagarsi dell'incidente.

La valutazione dell'effetto domino causato da *jet-fire* è di difficile interpretazione all'interno della cornice data dal metodo semplificato a causa della elevata direzionalità del fenomeno nonché dell'impossibilità pratica di determinare l'esatto valore di tutte le variabili implicate; La valutazione dell'effetto domino dovuto a VCE è anch'essa complicata dalla necessità di stimare la quantità di miscela infiammabile che si genera a seguito della dispersione in atmosfera di gas o vapori combustibili; pertanto la possibilità di un effetto domino causato da *Jet-fire* e VCE non sarà ulteriormente considerata.

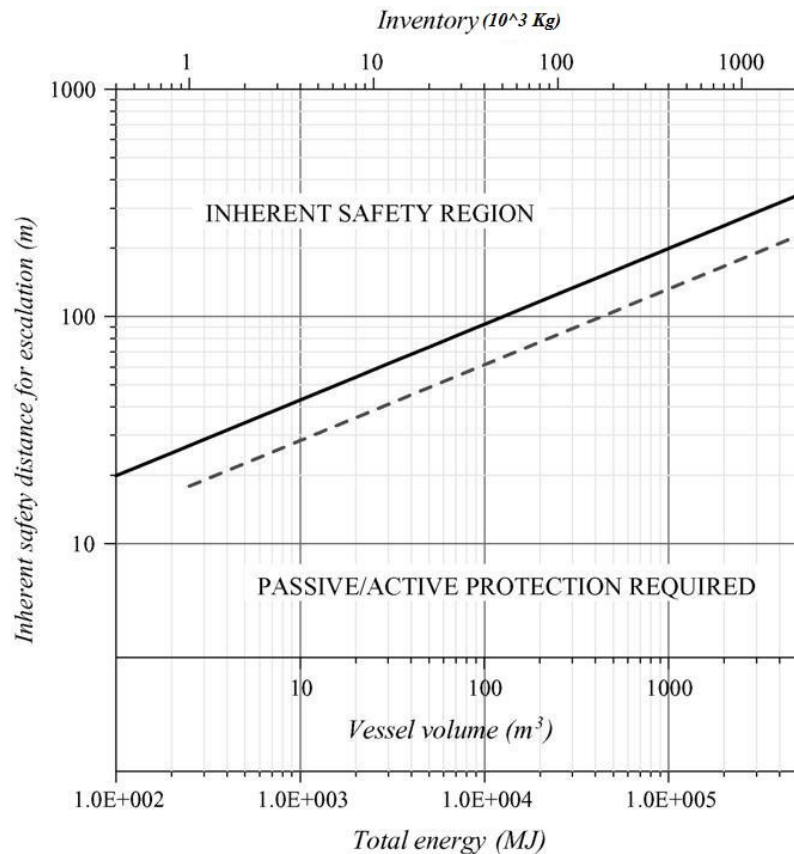
La procedura elaborata in questo studio per il calcolo della *Damage Probability* di serbatoi potenzialmente esposti all'effetto domino causato da diversi scenari incidentali prevede di preparare una matrice quadrata  $n \times n$ , dove  $n$  è il numero dei serbatoi presenti nell'impianto, contenente i valori  $P_{jk}$  della probabilità che il collasso del serbatoio  $j$  per cause sismiche coinvolga il serbatoio  $k$  negli effetti dello scenario incidentale generato causandone il collasso per effetto domino, valori ricavati come descritto nei paragrafi successivi.

#### 3.2.4.1. Distanza di sicurezza per BLEVE ed esplosioni meccaniche

Il BLEVE è un fenomeno caratterizzato dalla rapida nucleazione di vapore in seno ad un liquido in condizioni di forte disequilibrio termodinamico. La rapida produzione di vapore può pressurizzare le apparecchiature colpite oltre la capacità di resistenza causandone il collasso con rapida espansione dei vapori e formazione di un'onda d'urto che può danneggiare altre apparecchiature anche se non posizionate nelle immediate vicinanze. Interessa soltanto liquidi fortemente surriscaldati e pertanto si genera principalmente dal collasso di serbatoi contenenti gas liquefatti per compressione, ad esempio GPL, e non da gas liquefatti per raffreddamento.

Le esplosioni meccaniche sono generate dal danneggiamento di serbatoi contenenti gas compressi che collassano liberando gas in espansione ad alta velocità con la formazione di un'onda d'urto. Il meccanismo con cui le conseguenze di una esplosione meccanica si ripercuotono su eventuali apparecchiature colpite è simile a quello del BLEVE.

Le distanze di sicurezza per la prevenzione dell'effetto domino sono espresse per i due fenomeni esplosivi su uno stesso grafico, mostrato in Figura 5, in funzione della massa di propano liquido coinvolta, per il BLEVE, e dell'energia liberata  $q$ , per una esplosione meccanica. La linea tratteggiata esprime le distanze di sicurezza per serbatoi atmosferici, la linea intera per serbatoi pressurizzati. Inserendo la massa di gas liquefatto coinvolta in un BLEVE o l'energia liberata da una esplosione meccanica si può leggere in ordinata la distanza di sicurezza minima per l'apparecchiature considerata.



**Figura 5 – Distanze di sicurezza per la prevenzione dell’effetto domino causato dall’onda d’urto prodotta dal BLEVE di un vessel di propano riempito all’80%, in funzione della massa, del volume e dell’energia totale liberata. Linea continua: serbatoi pressurizzati; linea tratteggiata: serbatoi atmosferici (Cozzani *et al.* 2007).**

L’energia  $q$  liberata da una esplosione meccanica può essere facilmente calcolata ipotizzando una espansione isoentropica del gas, integrando e semplificando per ottenere:

$$q \approx 2P_0V$$

**Equazione 3 – Espressione approssimata per il calcolo dell’energia liberata da una esplosione meccanica.**

$P_0$  indica la pressione interna del serbatoio contenente gas compresso espressa in Pascal e  $V$  il volume del serbatoio in  $\text{m}^3$ ;  $q$  è espressa in Joule.

Le distanze per questi scenari sono calcolate dalla parete del serbatoio  $j$ , oggetto dell’incidente, alla parete del serbatoio  $k$  di cui si vuole valutare la probabilità del collasso per effetto domino; comparando la distanza  $D_{jk}$  con la relativa distanza di sicurezza  $SD_j$ , la probabilità  $P_{jk}$  di un effetto domino può essere calcolata come:

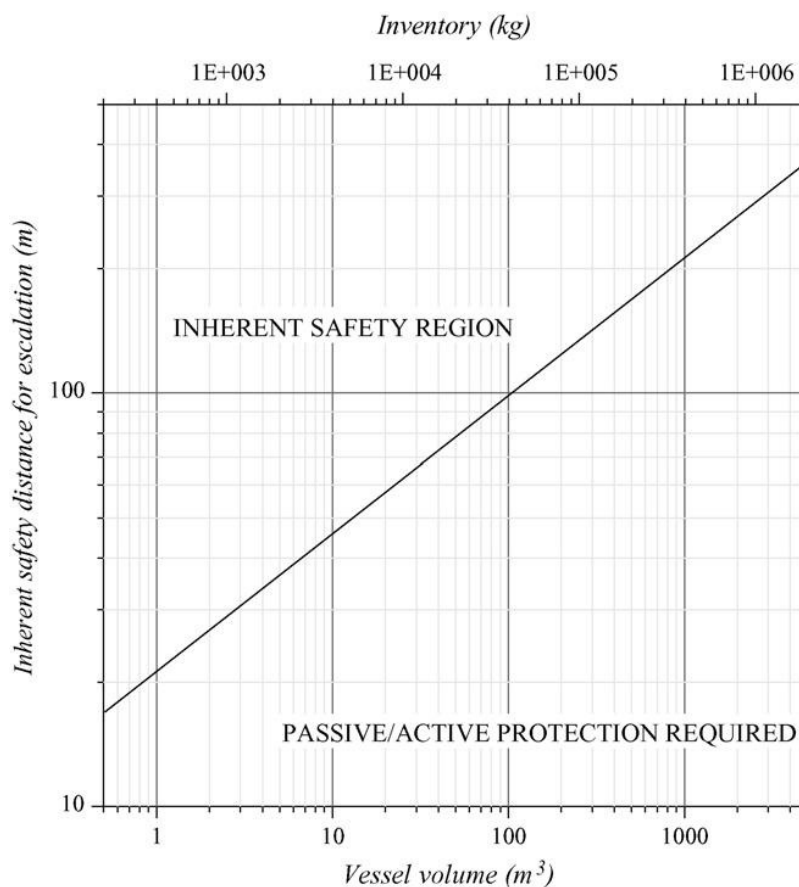
$$P_{jk} = \begin{cases} 0 & \text{if } D_{jk} > SD_j \\ 1 & \text{if } D_{jk} < SD_j \end{cases}$$

**Equazione 4 – Valori assunti dalla probabilità  $P_{jk}$  di un effetto domino.  $D_{jk}$ : distanza tra serbatoi;  $SD_j$ : distanza di sicurezza. Tratto da Busini, Marzo, Callioni, Rota (*to be submitted*).**

Se la distanza effettiva tra i serbatoi, indicata con  $D_{jk}$ , è maggiore della distanza di sicurezza, indicata con  $SD_j$ , allora l'effetto domino sarà giudicato come non possibile. In questo caso il valore assegnato a  $P_{jk}$ , corrispondente alla probabilità che il collasso del serbatoio  $j$  per cause sismiche coinvolga il serbatoio  $k$  negli effetti dello scenario incidentale generato causandone il collasso per effetto domino, sarà 0. In caso contrario la probabilità assegnata sarà 1.

#### 3.2.4.2. Distanza di sicurezza per fireball

Il *fireball* è un evento di breve durata caratterizzato dall'incendio di una grossa quantità di gas infiammabile liberato dal collasso catastrofico di un serbatoio pressurizzato. Il collasso può anche essere causato dal danneggiamento del mantello che, innescando il fenomeno del BLEVE, porta alla distruzione del serbatoio e al rilascio del suo contenuto. Il violento incendio che risulta da un innesco immediato della massa di gas può coinvolgere direttamente le apparecchiature vicine o danneggiarle a causa dell'irraggiamento. Le distanze di sicurezza sono espresse per i soli serbatoi atmosferici su un grafico, mostrato in Figura 6, in funzione della massa di propano liquido interessata dal *fireball*. Data la durata limitata del fenomeno i serbatoi pressurizzati non sono vulnerabili al fenomeno.

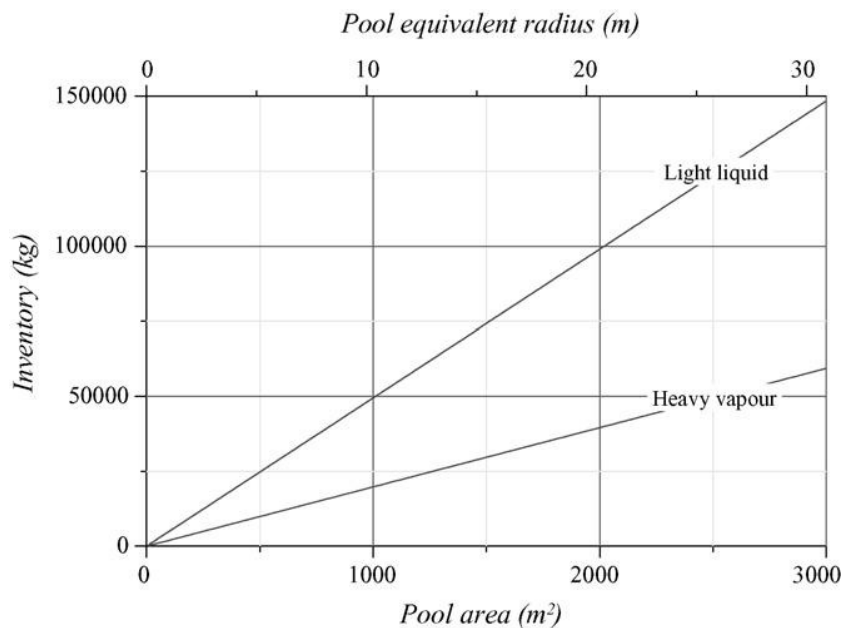


**Figura 6 – Distanze di sicurezza per la prevenzione dell'effetto domino causato da un *fireball* in funzione della massa e del corrispondente volume di un vessel di propano pieno all'80%. Solo per serbatoi atmosferici (Cozzani *et al.* 2007).**

Inserendo la massa di gas combustibile rilasciato è possibile leggere la distanza di sicurezza, calcolata dalla parete del serbatoio  $j$ , oggetto dell'incidente, alla parete del serbatoio  $k$  di cui si vuole valutare la possibilità del collasso causa effetto domino. Confrontando la distanza effettiva tra i serbatoi  $D_{jk}$  con la distanza di sicurezza  $SD_j$ , se la prima è maggiore della seconda allora l'effetto domino sarà giudicato come non possibile e  $P_{jk}$  sarà pari a 0. In caso contrario la probabilità assegnata sarà 1.

### 3.2.4.3. Distanza di sicurezza per incendi di pozza

Gli incendi di pozza sono originati dal rilascio di sostanze combustibili liquide che trovato un innesco si trasformano in pozze di combustibile in fiamme. Le apparecchiature coinvolte direttamente nell'incendio e quelle più vicine possono essere soggette a irraggiamento tanto elevato da produrre in pochi minuti di esposizione danni anche gravi, fino al collasso. In Figura 7 è rappresentata la minima massa di combustibile necessaria a generare un incendio della durata di 15 minuti in funzione della superficie e del raggio equivalente della pozza, per combustibili con velocità di bruciamento maggiore di  $0,055 \text{ Kg/m}^2\text{s}$  (*Light liquids*) e minore (*Heavy vapour*).



**Figura 7 – Massa critica di combustibile per l'effetto domino dovuto a incendi di pozza in funzione della superficie e del raggio equivalente della pozza. *Light liquid*: velocità bruciamento  $>0,055 \text{ kg/m}^2\text{s}$ ; *Heavy vapour*: velocità bruciamento  $<0,055 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Per ottenere le distanze di sicurezza, aggiungere al raggio equivalente 50 metri per serbatoi atmosferici e 15 metri per pressurizzati (Cozzani et al. 2007).**

Le apparecchiature esposte a incendi di durata maggiore a 15 minuti possono essere danneggiate per effetto domino; le distanze di sicurezza necessarie a evitare l'effetto domino sono di 50 metri per serbatoi atmosferici e 15 metri per pressurizzati. Tali distanze di

sicurezza, così come le distanze effettive tra i serbatoi, sono calcolate dal bordo della pozza o, se presente un bacino di contenimento, dalla parete del bacino del serbatoio  $j$ , oggetto dell'incidente, alla parete del serbatoio  $k$  di cui si vuole valutare la possibilità del collasso causa effetto domino.

Inserendo la massa di combustibile liquido rilasciato è possibile ricavare il raggio equivalente della pozza che consumerebbe il combustibile in 15 minuti; se il raggio della pozza realmente formata o del bacino di contenimento è superiore al raggio equivalente ricavato da Figura 7 allora il combustibile sarà consumato in un tempo inferiore a 15 minuti, l'effetto domino non potrà avere luogo e  $P_{jk}$  sarà pari a 0. In caso contrario è necessario confrontare la distanza effettiva  $D_{jk}$  con la distanza di sicurezza  $SD_j$ , calcolate come definito in precedenza: se la prima è maggiore della seconda allora l'effetto domino sarà giudicato come non possibile e  $P_{jk}$  sarà pari a 0. In caso contrario la probabilità assegnata sarà 1.

#### 3.2.4.4. Probabilità di guasto per effetto domino

La procedura elaborata in questo studio per il calcolo della *Damage Probability* di serbatoi potenzialmente esposti all'effetto domino causato da diversi scenari incidentali prevede di preparare una matrice quadrata  $n \times n$ , dove  $n$  è il numero dei serbatoi presenti nell'impianto, contenente i valori  $P_{jk}$  della probabilità che il collasso del serbatoio  $j$  per cause sismiche coinvolga il serbatoio  $k$  negli effetti dello scenario incidentale generato causandone il collasso per effetto domino. In base alle caratteristiche della sostanza contenuta nel serbatoio  $j$  e usando le informazioni in Tabella 4, si individuano gli scenari incidentali potenzialmente generati dal collasso del serbatoio; poi si ricava la probabilità che le conseguenze dovute agli scenari individuati possano causare il collasso dei serbatoi  $k$ -esimi, usando le procedure definite ai paragrafi 3.2.4.1, 3.2.4.2 e 3.2.4.3 rispettivamente per BLEVE ed esplosioni meccaniche, *fireball* e incendi di pozza. I valori di  $P_{jk}$  per  $j = k$  sono posti pari a 1.

**Tabella 4 – Scenari incidentali capaci di causare effetto domino definiti sulla base delle caratteristiche di pericolosità delle sostanze coinvolte.**

Pericolosità sostanza	Volatilità	Scenario generato
Infiammabili	Liquidi	Pool-fire
	Gas compressi/liquefatti	Fireball BLEVE Esplosione meccanica
Non Infiammabili	Gas compressi/liquefatti	BLEVE Esplosione meccanica

Ripetendo tale procedura per tutti i serbatoi j-esimi si ottiene una matrice di probabilità condizionate  $P_{jk}$  che descrivono, dato il collasso del serbatoio j per cause sismiche, la probabilità che il serbatoio k collassi a causa dell'esposizione alle conseguenze degli scenari incidentali generati dal serbatoio j.

La *Damage Probability* di un serbatoio j dovuta a cause sismiche, chiamata  $DP_j$ , è determinata attraverso i modelli di vulnerabilità che usano le *Probit functions*, come descritto al paragrafo 3.2.3. La probabilità che un serbatoio j collassi per cause sismiche e che il serbatoio k sia investito dagli effetti e collassi a sua volta si può calcolare, usando la definizione di probabilità condizionata, come prodotto della probabilità condizionata del collasso del serbatoio k a causa degli scenari generati dal collasso del serbatoio j per cause sismiche,  $P_{jk}$ , e della *Damage Probability* del serbatoio j dovuta a cause sismiche,  $DP_j$ .

#### 3.2.4.5. Stima della probabilità di guasto totale

Un serbatoio k può collassare per effetto del sisma o per effetto domino; la probabilità che il serbatoio k collassi per una qualsiasi delle cause individuate, chiamata  $DP_k$ , si può rappresentare come l'unione delle probabilità di collasso dovute alle differenti cause. Dalla teoria della probabilità, l'unione di eventi non mutuamente esclusivi è facilmente calcolata dalla formula:

$$A \cup B = 1 - (1 - X_A)(1 - X_B)$$

A e B indicano due eventi non mutuamente esclusivi,  $X_A$  e  $X_B$  sono due variabili che indicano la probabilità del verificarsi rispettivamente di A e B, la probabilità del verificarsi dell'unione degli eventi (almeno un evento)  $A \cup B$  è data dal complementare a uno della probabilità che nessun evento si verifichi; tale probabilità è espressa dal prodotto delle probabilità che A e B non si verifichino  $(1 - X_A)(1 - X_B)$ .

Allora la probabilità  $DP_k$  del collasso del serbatoio k per una qualsiasi delle cause individuate si può calcolare come complementare a uno della probabilità di non collassare per alcun motivo, come espresso nell'Equazione 5.

$$\overline{DP_k} = 1 - \prod_{j=1}^{NT} (1 - DP_j \times P_{jk})$$

**Equazione 5 – Formula per il calcolo della probabilità di guasto totale del serbatoio k,  $DP_k$ .  $DP_j$  indica la probabilità di guasto del serbatoio j per cause sismiche;  $P_{jk}$  è la probabilità che il serbatoio j collassando a causa del sisma, coinvolga il serbatoio k nelle conseguenze dell'incidente e ne causi il collasso; NT è il numero dei serbatoi di stoccaggio presenti nell'impianto. (Tratto da Busini, Marzo, Callioni, Rota, to be submitted)**

Ripetendo tale procedura per tutti i serbatoi  $k$  presenti all'interno dell'impianto si ottengono le relative probabilità totali di collasso totali.

In questo modo è possibile tenere in conto l'effetto domino, aumentando però la quantità di informazioni da gestire. Tenuto conto del fatto che il numero di distanze da calcolare è almeno  $n*(n-1)$ , dove  $n$  è il numero dei serbatoi di stoccaggio presenti nell'impianto, l'utilizzo di un software GIS accoppiato a una mappa georeferenziata del *layout* dell'impianto può semplificare notevolmente la procedura per la definizione delle distanze effettive tra le apparecchiature.

### **3.2.5. Pericolosità delle sostanze**

La stima della pericolosità delle sostanze è un passo fondamentale nella costruzione di un metodo di valutazione semplificato del rischio che permetta di comparare un gran numero di situazioni differenti attraverso un numero limitato di variabili.

Le caratteristiche di pericolosità delle sostanze rilasciate durante un incidente determinano il tipo di scenario incidentale potenzialmente generato. Le conseguenze associate a scenari relativi ad incidenti industriali capaci di mettere in pericolo la vita o la salute delle persone sono stati ampiamente approfondite nell'ambito della QRA di incidenti rilevanti (Lees 1996) e sono:

- irraggiamento termico sviluppato da incendi,
- tossicità di sostanze disperse in atmosfera,
- onde d'urto generate da fenomeni esplosivi.

A generare gli effetti sopra citati contribuiscono una grande varietà di scenari incidentali. Nell'analisi di rischio quantitativa si usa identificare gli scenari potenzialmente generati da un rilascio di materiale attraverso un metodo grafico ad alberi che costituisce una classificazione tassonomica dei possibili scenari in funzione principalmente delle caratteristiche del materiale rilasciato, come mostrato nella Figura 8 (Rota e Nano 2007).

Sono classificati rilasci di gas, liquidi, solidi ed energia; in corrispondenza di un rilascio di gas l'evento immediatamente successivo è la dispersione in atmosfera. Gli scenari potenzialmente generati dipendono dalle caratteristiche di pericolosità della sostanza rilasciata, per sostanze tossiche lo scenario generato sarà la dispersione di sostanze tossiche, per sostanze infiammabili si potranno generare incendi di gas o esplosioni.

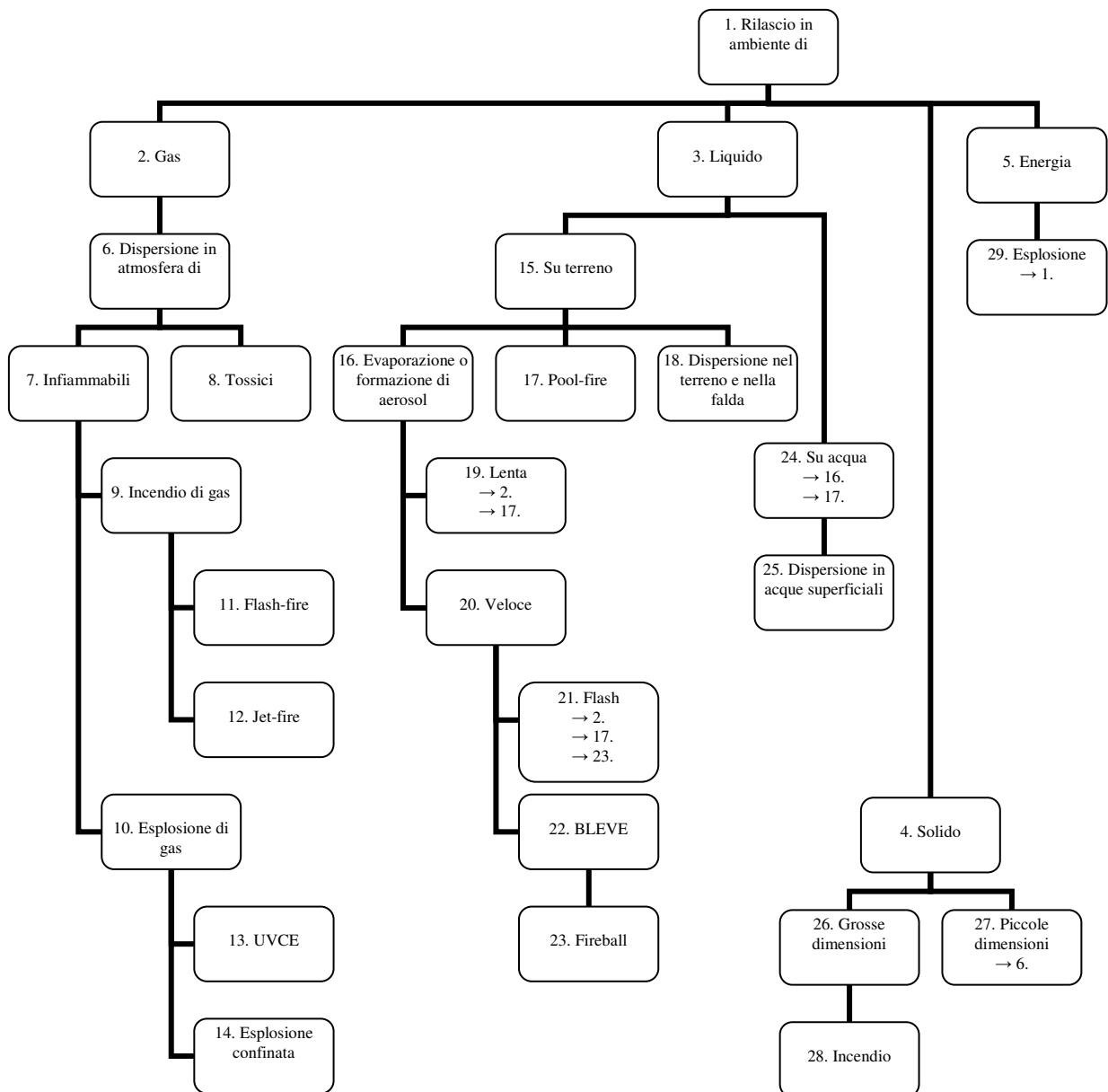
Rilasci di liquido genereranno delle pozze, per liquidi infiammabili si potranno generare incendi da pozza, nel caso in cui il combustibile non subisca un innesco i vapori potranno



miscelarsi all'aria e dare origine ad esplosioni; per liquidi tossici la possibilità di un effetto acuto sulla popolazione è necessariamente legata all'evaporazione.

Il rilascio in ambiente di un solido potrà avere conseguenze diverse a seconda della sua granulometria, per solidi grossolani sarà possibile lo sviluppo di un incendio, per solidi fini sarà possibile la dispersione in atmosfera con tutte le conseguenze tipicamente dovute al rilascio di un gas.

Nel caso in cui ad essere rilasciata sia energia stoccata in qualche forma lo scenario generato è una esplosione.



**Figura 8 – Tassonomia degli eventi incidentali generati da sostanze pericolose con caratteristiche differenti (Rota e Nano 2007).**

Questa prima analisi permette di trarre alcune osservazioni: la capacità di una sostanza di disperdersi in atmosfera e dare origine a differenti tipologie di scenario anche a distanza dal

punto del rilascio, caratteristica che contribuisce ad aumentare notevolmente il rischio, è legata essenzialmente alla volatilità della sostanza, dipendente dallo stato fisico e dalle caratteristiche chimico-fisiche e termodinamiche della sostanza rilasciata. Sostanze stoccate allo stato gassoso, gas liquefatti per compressione o per raffreddamento hanno una elevata potenzialità di dispersione e sono da considerarsi più pericolosi di sostanze liquide o solide. Sostanze solide al contrario sono scarsamente volatili e la dispersione è possibile solo per particelle di piccole dimensioni.

Il comportamento dei liquidi si colloca tra questi due estremi, l'esperienza suggerisce che risulta utile distinguere tra liquidi ad alta e bassa volatilità.

Ai fini della valutazione semplificata del rischio NaTech sono individuate 4 categorie di volatilità delle sostanze:

- Gas compressi/liquefatti;
- Liquidi alta volatilità
- Liquidi bassa volatilità
- Solidi.

Le sostanze classificate come Gas compressi/liquefatti comprendono tutte le sostanze gassose a temperatura ambiente stoccate in pressione allo stato liquido o gassoso, sono conservate esclusivamente in serbatoi pressurizzati e quindi la determinazione del rischio rappresentato dal rilascio di queste sostanze farà riferimento solo al modello di vulnerabilità per serbatoi pressurizzati.

Le sostanze classificate come liquidi ad alta volatilità comprendono tutte le sostanze liquide con tensione di vapore elevata a temperatura ambiente e i gas liquefatti per raffreddamento;

Le sostanze classificate come liquidi a bassa volatilità comprendono i liquidi con tensione di vapore trascurabile a temperatura ambiente.

Le sostanze classificate come solidi comprendono le sostanze solide a temperatura ambiente, con granulometria sufficientemente piccola da potersi rendere responsabile degli scenari incidentali considerati.

Con l'eccezione dei liquidi criogenici, lo stato scelto come riferimento per la definizione della vulnerabilità è la temperatura ambiente in considerazione del fatto che il metodo riferisce al rischio posto da grandi serbatoi di stoccaggio i quali si presume mantengano le sostanze a una temperatura vicina a quella ambientale.

Le categorie di sostanze diverse da Gas compressi/liquefatti sono contenute in serbatoi a pressione atmosferica, il rischio posto da queste sostanze dovrà quindi fare riferimento ai modelli di vulnerabilità per grandi serbatoi atmosferici a tetto fisso con ancoraggio a terra o

senza. Si evidenzia che per i serbatoi di stoccaggio di liquidi criogenici non è disponibile un modello di vulnerabilità specifico pertanto si farà riferimento al modello relativo a semplici serbatoi a pressione atmosferica.

Una classificazione molto simile a questa, ricavata da Antonioni *et al.* (2009) nell'ambito della valutazione quantitativa del rischio NaTech per sostanze a differente volatilità contenute in diverse apparecchiature, è mostrata in Tabella 5.

**Tabella 5 – Criteri preliminari per l'identificazione e la classificazione delle apparecchiature critiche dal punto di vista del rischio di incidente (Antonioni *et al.* 2009).**

	Storage vessels	Large diameter pipes	Columns	Reactors, heat exchangers
Pressurized liquefied gas	4	4	3	3
Overheated liquid	3	3	2	2
Gas (compressed)	3	2	2	1
Cryogenic liquid	2	2	2	1
Liquid	1	1	1	1

Unit hazard increases from 1 to 4.

Tornando a una più generica pericolosità delle sostanze si propone una classificazione delle sostanze basata sui principali fenomeni generati in un incidente industriale; tale classificazione distingue:

- Infiammabili
- Tossiche
- Esplosive.

Nei paragrafi successivi si darà una descrizione delle variabili maggiormente influenti sul rischio determinato da sostanze così classificate.

### 3.2.5.1. Infiammabili

Per Infiammabili si intendono tutte le sostanze solide, liquide e gassose, qualunque sia la loro volatilità, che sono classificate come F + o F in accordo a quanto definito dalla Direttiva Europea 67/548/EEC (*Council Directive 67/548/EEC*) e che possono pertanto dare origine a scenari di incendio tipo *jet-fire*, *fireball*, *flash-fire*, *pool fire* e incendi di materiale solido. Ai fini della valutazione e in considerazione della complessità dei modelli per la determinazione degli effetti di *jet-fire* e di *flash-fire*, questi scenari non saranno ulteriormente considerati nella realizzazione del modello per la valutazione semplificata.

La Volatilità delle sostanze Infiammabili è stata così classificata:

- Gas compressi/liquefatti
- Liquidi alta volatilità (*Flash Point* > 18°C)
- Liquidi bassa volatilità (*Flash Point* < 18°C)
- Solidi

Il valore del *Flash Point* è stato scelto in modo tale da discriminare la diversa volatilità che i liquidi possono avere a temperature prossime a quella ambiente.

I modelli semplificati a sorgente puntuale usati nella valutazione quantitativa delle conseguenze di incendi assumono che l'intera potenza termica liberata sia emessa da una sorgente ideale puntiforme e che la potenza si irradia nello spazio determinando l'irraggiamento subito dal bersaglio.

Per un *pool-fire* la potenza irraggiata dipende dalla velocità di bruciamento massiva per unità di superficie  $m_b$  e dalla entalpia di combustione massiva  $\Delta h_{comb}$  della sostanza, nonché dalla superficie  $S$  della pozza e dalla efficienza della combustione  $\eta$  secondo la relazione:

$$Q = m_b * \Delta h_{comb} * S * \eta.$$

**Equazione 6 – Potenza termica irraggiata da un *pool-fire*.**

Considerando il rilascio di una massa  $m$  di liquido, con densità  $\rho$ , che si sparge formando una pozza di spessore  $s$ , la superficie  $S$  risulta essere proporzionale alla massa e può essere calcolata come:

$$S = m / (\rho * s)$$

**Equazione 7 – Superficie di una pozza di liquido non confinata.**

La velocità di bruciamento massiva per unità di superficie è calcolata con una correlazione semiempirica data dal rapporto tra l'entalpia di combustione e l'entalpia di vaporizzazione del liquido.

$$m_b = 10^{-3} * \Delta h_{comb} / \Delta h_{vap}$$

**Equazione 8 – Velocità di bruciamento massiva di un combustibile liquido.**

Pertanto la potenza termica totale emessa da un incendio di pozza risulta correlata positivamente al quadrato dell'entalpia di combustione del liquido e alla massa di liquido rilasciata ed è inversamente proporzionale alla sua entalpia di evaporazione. Osservando la questione da un altro punto di vista si potrebbe dire che la potenza irraggiata è direttamente proporzionale alla volatilità del liquido facendo corrispondere a una maggiore entalpia di evaporazione una minore volatilità.

La potenza termica irraggiata da un *fireball* è calcolata con una espressione simile a quella per il *pool-fire*, a parte la velocità di bruciamento che è sostituita dal rapporto tra la massa  $m$  di gas coinvolta e la durata  $t$  del fenomeno, determinata con un apposito sottomodulo.

$$Q = m/t * \Delta h_{\text{comb}} * \eta.$$

**Equazione 9 – Potenza termica irraggiata da un *fireball*.**

Si sottolinea che i *fireball* sono fenomeni di breve durata caratterizzati dall'emissione di una elevata potenza termica dovuta alla immediata disponibilità di tutto il combustibile coinvolto per via del suo stato gassoso. La durata  $t$  di un *fireball* che coinvolge una massa di combustibile maggiore di 30000 Kg, valore scelto in base alla dimensione media dei serbatoi pressurizzati in impianti dell'industria di processo, è calcolabile come:

$$t = 2,6 * m^{0,17}.$$

**Equazione 10 – Durata di un *fireball*.**

La potenza termica irraggiata risulta quindi proporzionale all'entalpia di combustione e a una potenza della massa di gas coinvolta nel *fireball* secondo la relazione:

$$Q \approx \text{costante} * m^{0,83} * \Delta h_{\text{comb}}$$

**Equazione 11 – Espressione approssimata per la potenza irraggiata da un *fireball*.**

Risaltano da questa analisi alcune cose: la volatilità per i liquidi infiammabili è effettivamente indicativa degli effetti legati a un incendio, per i Gas compressi/liquefatti la volatilità è massima, il *fireball* costituisce lo scenario di incendio a maggiore intensità, l'entalpia di combustione ha una influenza tale da renderne necessaria la considerazione ai fini della valutazione semplificata, la potenza termica irraggiata è correlata positivamente alla massa di combustibile rilasciata.

Tutte le sostanze considerate come Infiammabili sono allora state suddivise in base all'Entalpia di combustione in due categorie:

- Entalpia combustione elevata (>40 MJ/Kg)
- Entalpia combustione bassa (< 40 MJ/Kg).

Il valore discriminante le due situazioni è stato scelto in modo da essere rappresentativo di sostanze infiammabili di tipo differente, a entalpia di combustione maggiore di 40 MJ/Kg corrispondono buona parte dei combustibili più comuni.

L'irraggiamento su un bersaglio posto a una certa distanza dalla sorgente ideale puntuale è calcolato come il rapporto tra la potenza termica irraggiata e la superficie della sfera avente raggio  $X$  pari alla distanza tra la sorgente ideale e il ricettore:

$$I = Q/(4\pi X^2)$$

**Equazione 12 – Irraggiamento da sorgente puntiforme.**

Imponendo un valore di irraggiamento costante e compatibile con la protezione degli individui, la potenza termica irraggiata, dipendente secondo le approssimazioni effettuate da entalpia di combustione, volatilità della sostanza e massa di combustibile coinvolta, risulta essere proporzionale alla superficie interessata da effetti letali causati dall'irraggiamento. Un indice di rischio, benché derivante da una valutazione estremamente semplificata, ricavato dal prodotto di entalpia, volatilità e massa di combustibile rilasciata risulta quindi essere correlato alla superficie interessata da effetti letali. Le principali variabili influenti sul rischio di incendio e la loro classificazione sono riassunte in Tabella 6.

La dipendenza della superficie interessata dagli effetti di un incendio dalla massa rende necessaria una classificazione della massa stessa ai fini della realizzazione del modello semplificato. Si propone una classificazione della Massa di sostanze pericolose rilasciata in un incidente industriale basata sui limiti posti dall'articolo 8 della Direttiva Europea "Seveso II" (*Council Directive 96/82/EC*) per un gran numero di sostanze e di tipologie di sostanze differenti, distinte in base all'entità del pericolo specifico che comportano (tossiche, infiammabili, esplosive). Gli impianti che conservano quantità di sostanze pericolose inferiori a quelle imposte all'articolo 8 non sono soggetti all'obbligo di compiere valutazioni quantitative del rischio di incidente rilevante, pertanto il metodo di valutazione semplificata del rischio NaTech sarà orientata verso questi tipo di stabilimenti e farà riferimento ai limiti imposti dalla direttiva.

La massa di sostanze pericolose sarà classificata come frazione della massa definita all'articolo 8 della Direttiva Europea "Seveso II" (*Council Directive 96/82/EC*) per la sostanza o la tipologia di sostanze considerata.

**Tabella 6 – Variabili principali influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Infiammabili.**

Variabili influenti	Classificazione variabili
Volatilità	Gas compressi/liquefatti Liquidi alta volatilità ( <i>Flash Point</i> > 18°C) Liquidi bassa volatilità ( <i>Flash Point</i> < 18°C) Solidi
Entalpia di combustione	Elevata (>40 MJ/Kg) Bassa (<40 MJ/Kg)
Massa	Frazione rispetto la quantità definita ex art.8 Direttiva "Seveso II" ( <i>Council Directive 96/82/EC</i> )

### 3.2.5.2. Tossiche

Per Tossiche si intendono tutte le sostanze che sono classificate come T +, T, C, Xi, Xn, N in accordo a quanto definito dalla Direttiva Europea 67/548/EEC (*Council Directive 67/548/EEC*) e che presentano caratteristiche di volatilità tali da poter subire la dispersione in atmosfera ed espletare l'effetto tossico anche a distanza dal punto di rilascio, si considerano pertanto tra le sostanze tossiche quelle classificate in base alla Volatilità come:

- Gas compressi/liquefatti
- Liquidi alta volatilità ( $P^0(T_{amb}) > 5 \text{ KPa}$ )
- Liquidi bassa volatilità ( $P^0(T_{amb}) < 5 \text{ KPa}$ )
- Polveri fini ( $D < 50 \mu\text{m}$ )

Il valore del diametro delle polveri è stato scelto tenendo in considerazione che particelle con diametro inferiore a  $50 \mu\text{m}$  possiedono un tempo di sedimentazione tale da permetterne il trasporto a distanza e la dispersione.

Il modello gaussiano usato nella valutazione della dispersione passiva di gas in atmosfera permette di calcolare la concentrazione della sostanza rilasciata in un punto posto a distanza dalla sorgente usando la massa o la portata rilasciate e una serie di parametri meteorologici e climatici che definiscono la capacità dell'atmosfera di disperdere gli inquinanti.

Andando a considerare la concentrazione al centro di una nube, scegliendo parametri di stabilità atmosferica pari ad atmosfera poco stabile (E), corrispondente a una scarsa capacità di dispersione, ricavando i valori dei corrispondenti coefficienti di dispersione, sostituendoli e approssimando biematicamente l'equazione con l'elisione del termine esponenziale si ottiene una espressione della concentrazione in funzione della massa di sostanza rilasciata e di una potenza della distanza tra sorgente e ricettore. Assumendo una data concentrazione, sufficiente a garantire la protezione degli individui e rimaneggiando l'equazione, si ottiene una correlazione che descrive la proporzionalità tra la superficie interessata da effetti letali e una potenza della massa di sostanza tossica dispersa tipo:

$$X^2 \approx \text{costante} * m^{0,8}.$$

**Equazione 13 – Espressione approssimata per la superficie interessata dagli effetti di una dispersione di sostanze tossiche.**

Il metodo gaussiano non distingue le diverse caratteristiche delle sostanze, limitandosi a simularne la dispersione. La concentrazione a una distanza fissata dalla sorgente è proporzionale alla massa scaricata e disponibile per la dispersione, dipendente a sua volta dalla volatilità della sostanza. Considerando due situazioni in cui viene scaricata la stessa quantità di composti, con la stessa volatilità ma con diversa tossicità, la superficie interessata

da effetti letali dipenderà dal valore della concentrazione che può produrre tali effetti, valore più basso per sostanze più tossiche. La superficie colpita da effetti letali sarà quindi tanto maggiore quanto maggiore sarà la tossicità della sostanza rilasciata.

Le sostanze classificate come Tossiche sono allora suddivise in due categorie in base alla propria Tossicità:

- Tossicità alta (IDLH < 100 ppm)
- Tossicità bassa (IDLH > 100 ppm).

IDLH, *Immediate Danger to Life or Health*, è un valore limite di concentrazione disponibile per molte sostanze tossiche e comunemente usato nell'analisi di rischio quantitativa. Il valore è scelto in modo da permettere di distinguere sostanze a tossicità molto elevata da sostanze la cui tossicità è più raramente letale.

L'analisi mette in luce che la superficie interessata da concentrazioni pericolose di sostanze tossiche può essere proficuamente correlata alla massa di sostanza rilasciata, alla tossicità delle sostanze nonché alla volatilità delle stesse, che regola la quantità di gas o vapori disponibili per la dispersione. Le principali variabili influenti sul rischio relativo alla dispersione di sostanze Tossiche e la loro classificazione sono riassunte in Tabella 7.

**Tabella 7 - Variabili principali influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Tossiche.**

Variabili influenti	Classificazione variabili
Volatilità	Gas compressi/liquefatti Liquidi alta volatilità ( $P^0(T_{amb}) > 5 \text{ KPa}$ ) Liquidi bassa volatilità ( $P^0(T_{amb}) < 5 \text{ KPa}$ ) Polveri fini ( $D < 50 \mu\text{m}$ )
Tossicità	Alta (IDLH < 100 ppm) Bassa (IDLH > 100 ppm)
Massa	Frazione rispetto quantità definita ex art.8 Direttiva "Seveso II" ( <i>Council Directive 96/82/EC</i> )

### 3.2.5.3. Esplosive

Per Esplosive si considerano tutte le sostanze che possono dare origine a fenomeni tipo VCE, BLEVE ed esplosioni meccaniche, ossia quelle stoccate in serbatoi a pressione superiore a quella ambientale e classificate come Gas compressi/liquefatti e le sostanze definite come Infiammabili e che presentano una volatilità abbastanza elevata da poter produrre una VCE.



Sono escluse le sostanze classificate come E in accordo a quanto definito dalla Direttiva Europea 67/548/EEC (*Council Directive 67/548/EEC*) in considerazione del fatto che tali sostanze pongono un pericolo di esplosione tanto elevato da essere stoccate con apposite precauzioni volte a ridurre il rischio di innesco accidentale, l'intensità degli effetti di una esplosione e la probabilità di un effetto domino attraverso lo stoccaggio in apposite strutture resistenti all'esplosione e la riduzione delle dimensioni degli stoccaggi stessi.

I modelli semplificati a sorgente puntuale per la valutazione quantitativa delle conseguenze di una esplosione stimano la sovrappressione incidente in un punto a causa del passaggio dell'onda d'urto attraverso una correlazione semiempirica tra la distanza  $R_0$  del bersaglio dalla sorgente, l'energia  $q$  liberata nell'esplosione e la sovrappressione incidente  $P_0$  del tipo:

$$R_0^3 * P_0 / q = \text{costante.}$$

**Equazione 14 – Relazione tra distanza, sovrappressione incidente ed energia liberata per una esplosione.**

Fissato un valore limite della sovrappressione  $P_0$  adatto alla protezione degli individui e rimaneggiando l'equazione, si ottiene una correlazione che descrive la proporzionalità tra la superficie interessata dagli effetti letali dell'esplosione e una potenza dell'energia rilasciata dall'esplosione del tipo:

$$R_0^2 \approx \text{costante} * q^{0,66}.$$

**Equazione 15 – Espressione approssimata per la superficie interessata dagli effetti di una esplosione.**

L'energia liberata in una esplosione meccanica, generata dal collasso di un serbatoio di gas compresso non liquefatto che si espande a grande velocità generando un'onda d'urto, può essere calcolata ipotizzando una compressione adiabatica e reversibile del gas dalla pressione ambiente alla pressione di stoccaggio  $P_0$  e integrando per ottenere il lavoro compiuto. Semplificando l'espressione ottenuta si ottiene:

$$q \approx 2 P_0 V.$$

**Equazione 3 – Espressione approssimata per il calcolo dell'energia liberata da una esplosione meccanica.**

Ipotizzando una densità del gas compresso, l'energia  $q$  risulta essere correlata positivamente alla pressione  $P_0$  e alla massa di gas coinvolta.

L'energia liberata da un BLEVE risulta di difficile determinazione a causa della complessità del fenomeno che prevede l'evaporazione rapidissima di un liquido fortemente surriscaldato con generazione di vapori in espansione ad alta velocità che possono formare una onda d'urto. Ai fini della costruzione di un modello semplificato si valuterà l'energia liberata da un BLEVE con lo stesso metodo usato per le esplosioni meccaniche.

Si classificano quindi le tutte sostanze conservate in serbatoi pressurizzati o Gas compressi/liquefatti, in base alla Pressione di stoccaggio in:

- Alta pressione (>20 bar)
- Bassa pressione (<20 bar).

Il valore di 20 bar è stato scelto in modo da distinguere serbatoi con pressioni interne decisamente basse da altri con pressioni più elevate che pongono un rischio maggiore.

Una VCE (*Vapour Cloud Explosion*) si origina dalla combustione di grosse quantità di miscele infiammabili di aria e gas o vapori combustibili in aree congestionate geometricamente, dove il fronte di fiamma può accelerare sufficientemente da creare un'onda d'urto. La possibilità che si formi una grossa quantità di miscela combustibile è correlata alla massa di combustibile rilasciato, alla sua volatilità e al ritardo nell'innesco della combustione della miscela. In assenza di un innesco sufficientemente ritardato e di una congestione geometrica dell'area non si forma un'onda d'urto di entità apprezzabile, pertanto il fenomeno della VCE può essere considerato un fenomeno con una probabilità di accadimento inferiore rispetto a BLEVE ed esplosioni meccaniche, che si generano dal danneggiamento grave di serbatoi pressurizzati.

I fenomeni esplosivi sono pertanto classificati secondo la Probabilità di accadimento in:

- Bassa probabilità (VCE)
- Alta probabilità (BLEVE, esplosioni meccaniche).

L'energia rilasciata in una esplosione tipo VCE può essere calcolata in modo molto approssimato come prodotto della massa di gas o vapori combustibili presente all'interno dei limiti di infiammabilità e della entalpia di combustione.

L'Entalpia di combustione è classificata come per le sostanze Infiammabili:

- Entalpia combustione elevata (>40 MJ/Kg)
- Entalpia combustione bassa (< 40 MJ/Kg).

La massa di vapori o gas disponibili per la combustione può essere correlata alla massa e alla volatilità del combustibili rilasciato. Poiché la formazione di quantità consistenti di vapori richiede una elevata volatilità, le caratteristiche di Volatilità delle sostanze che possono dare origine a VCE sono classificate in:

- Gas compressi/liquefatti
- Liquidi alta volatilità (*Flash Point*> 18°C)
- Polveri fini ( $D < 50 \mu\text{m}$ ).

L'analisi effettuata evidenzia che la superficie interessata dagli effetti letali di un'esplosione può essere proficuamente correlata per fenomeni tipo VCE a probabilità di accadimento,

entalpia di combustione, volatilità e massa di combustibile rilasciato; mentre per BLEVE ed esplosioni meccaniche la superficie interessata può essere correlata alla probabilità di accadimento, alla massa di Gas compressi/liquefatti liberata e alla pressione di stoccaggio. In Tabella 8 sono riassunte le principali variabili influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Esplosive.

**Tabella 8 - Variabili principali influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Esplosive.**

Scenario incidentale	Variabili influenti	Classificazione variabili
VCE	Volatilità	Gas compressi/liquefatti Liquidi alta volatilità ( <i>Flash Point</i> > 18°C) Polveri fini (D < 50 µm)
	Entalpia di combustione	Elevata (>40 MJ/Kg) Bassa (<40 MJ/Kg)
	Massa	Frazione rispetto quantità definita ex art.8 Direttiva "Seveso II" ( <i>Council Directive</i> 96/82/EC)
BLEVE Esplosione meccanica	Volatilità	Gas compressi/liquefatti
	Pressione di stoccaggio	Alta pressione (>20 bar) Bassa pressione (<20 bar)
	Massa	Frazione rispetto quantità definita ex art.8 Direttiva "Seveso II" ( <i>Council Directive</i> 96/82/EC)

### 3.3. Analytic Hierarchy Process

La necessità di fornire un metodo per strutturare il problema della valutazione semplificata del rischio NaTech, che permetta di comparare simultaneamente un certo numero di parametri anche con unità di misura differenti e di calcolare un indice di prestazione che sia rappresentativo del rischio che un determinato impianto o apparecchiatura pongono, ha portato alla scelta del metodo *Analytic Hierarchy Process* AHP (Saaty 1980), il cui uso è già stato proposto nell'ambito dell'analisi del rischio NaTech (Rota *et al.* 2008).

L'AHP è un metodo utilizzato a supporto dei processi di decisione per la sua capacità di scomporre il problema di una decisione complessa in una gerarchia di sotto-problemi strutturata su più livelli, in particolare prevede di organizzare le informazioni necessarie alla scelta in una struttura ad albero con l'obiettivo principale della valutazione in alto, sotto di esso si dipartono i rami che corrispondono agli obiettivi secondari della scelta, sotto ognuno di essi dipartono i rami dei criteri secondari. L'importanza dei criteri che definiscono la

risposta a uno stesso sottoproblema può essere valutata indipendentemente attraverso una comparazione a coppie basata su una scala semantica di importanza relativa propria del metodo AHP. L'utilizzo di tale scala permette di comparare criteri altrimenti non commensurabili; dai confronti a coppie sono ricavati pesi che esprimono l'importanza relativa dei criteri.

Ai piedi della gerarchia sono le alternative oggetto della decisione, di esse si definiscono le prestazioni riguardo ai sottocriteri individuati alla base della gerarchia attraverso dei punteggi definiti con una scala normalizzata nell'intervallo 0-1. Decomponendo il problema in sottoproblemi, relativi criteri e sottocriteri, assegnando ad ognuno di essi una importanza relativa nel concorrere alla determinazione del soddisfacimento del criterio ad essi superiore gerarchicamente e descrivendo le caratteristiche di una alternativa attraverso la valutazione dei criteri individuati è possibile fornire una stima del soddisfacimento di tutti i sottocriteri, criteri e obiettivi del problema relativamente alla alternativa oggetto di valutazione attraverso un indice della prestazione globale dell'alternativa definito in una scala 0-1, dove 1 rappresenta il massimo soddisfacimento di tutti i criteri individuati. L'indice di prestazione (*Key performance Indicator*, KPI) così ricavato permette di comparare alternative differenti rispetto al soddisfacimento dei criteri individuati.

### **3.3.1. Valutazione delle alternative**

Le Alternative sono valutate attraverso indici di massa, chiamati Massa Pesata (*Weighted Mass WM*); un indice di Massa Pesata è calcolato per ognuno dei serbatoi di stoccaggio presenti nell'impianto come prodotto della massa contenuta per la probabilità di collasso totale del serbatoio, comprensiva degli effetti del sisma e dell'effetto domino, calcolata come descritto nel paragrafo 3.2.4.5. L'AHP impone poi di normalizzare i punteggi assegnati alle Alternative rispetto al massimo valore che possono assumere in modo da ottenerle in una scala 0-1. I valori così ricavati costituiscono gli input della gerarchia, il risultato della applicazione del metodo è un KPI indicativo del rischio posto da un determinato serbatoio rispetto al generico scenario incidentale considerato, il quale può essere sommato ai KPI relativi ad altri serbatoi che pongono lo stesso tipo di rischio per ottenere un KPI globale per lo scenario considerato.

La massa delle sostanze pericolose è stata definita come frazione della quantità che è permesso detenere ai sensi dell'articolo 8 della Direttiva Europea "Seveso II" (*Council Directive 96/82/EC*) e il suo valore è quindi compreso tra 0 e 1; la probabilità di guasto è necessariamente compresa tra 0 e 1 pertanto il massimo valore che la massa potenzialmente

rilasciata può assumere è 1 e la normalizzazione dei valori delle alternative non è necessaria. Può capitare di effettuare valutazioni riguardanti impianti che contengono sostanze pericolose in quantità superiori ai limiti definiti all'articolo 8 della Direttiva "Seveso". Poiché la probabilità di guasto è spesso molto inferiore a 1, in tal caso è possibile calcolare comunque l'indice di massa pesata; se l'indice supera il valore di 1 sarà necessario limitare tale valore a 1; nel fare questo bisogna però tenere conto del fatto che si sta riducendo artificialmente il livello di rischio reale rappresentato dall'impianto e che la valutazione del rischio relativa ad impianti che eccedono le quantità definite all'articolo 8 della Direttiva "Seveso" è sicuramente utile ai fini della comparazione di differenti situazioni ma non necessaria perché questi impianti sono già classificati dalla normativa come impianti a rischio elevato e sono pertanto soggetti all'obbligo di una valutazione quantitativa del rischio.

### **3.3.2. Costruzione delle gerarchie**

Il primo passo nell'applicazione del metodo AHP al problema della valutazione del rischio NaTech richiede la decomposizione del problema in una gerarchia di obiettivi, criteri e sottocriteri. La gerarchia ha la forma di un diagramma ad albero ed è costruita ponendo in alto l'obiettivo principale (Goal) della valutazione, gerarchicamente al di sotto di esso sono posti i sotto obiettivi (Subgoal) del problema. Per ognuno dei sotto obiettivi si individuano quindi i criteri (Criteria) che contribuiscono al soddisfacimento del sotto obiettivo. I criteri individuati possono essere a loro volta decomposti in un uno o più livelli di sottocriteri (Subcriteria), organizzati gerarchicamente come già descritto.

La regola che permette di stabilire quali elementi possono essere posti in uno stesso gruppo, in posizione gerarchicamente inferiore a uno stesso criterio o obiettivo, è che essi devono dare risposta alla stessa domanda, inerente al soddisfacimento del criterio o obiettivo considerato (Saaty 2000). Una raccomandazione che Saaty fa nel suo libro è quella di badare che sia il rapporto gerarchico, verticale, tra i criteri ad esprimere le ragioni della scelta, piuttosto che il rapporto tra criteri di uno stesso gruppo. Infine sottolinea che non esistono gerarchie corrette e gerarchie errate o insufficienti, una gerarchia riflette lo stato di informazione della persona che si accinge alla decisione.

La scomposizione dei singoli criteri in sottocriteri sviluppata su più livelli gerarchici permette di raggiungere un buon livello di dettaglio ma bisogna ricordare che maggiore è il numero di criteri considerati, minore è l'importanza di ogni singolo criterio, inoltre i giudizi sull'importanza relativa dei criteri possono diventare inconsistenti. In uno studio specifico Saaty (2003) ribadisce che il numero di sottocriteri in uno stesso gruppo non deve eccedere il

numero di 7 per garantire la consistenza dei giudizi sull'importanza relativa, vale a dire il rispetto della proprietà transitiva dell'uguaglianza nello stabilire l'importanza relativa dei criteri in uno stesso gruppo. Per un numero esiguo di criteri in uno stesso gruppo, l'inconsistenza generata da un giudizio incongruente è elevata e può essere facilmente individuata e corretta, mentre nel caso di un numero elevato di criteri l'incremento dell'inconsistenza dovuta a un singolo giudizio è di piccola entità, difficile da individuare e correggere; da cui la necessità di individuare un numero limitato di criteri.

Ai fini della costruzione di un metodo di valutazione semplificata del rischio NaTech, si è stabilito di correlare l'indice di prestazione ricavato con il metodo AHP alla superficie di impatto degli effetti letali di scenari incidentali classificati come:

- Incendi
- Dispersioni di sostanze tossiche in atmosfera
- Esplosioni.

Una distinta gerarchia sarà sviluppata per ognuno dei generici scenari incidentali individuati; gli indici di prestazione ottenuti dalle singole gerarchie saranno condensati in un indicatore globale di prestazione.

#### 3.3.2.1. Infiammabili

La superficie di impatto per un evento tipo incendio è correlata alla potenza termica irraggiata, come esplicitato nell'analisi svolta al paragrafo 3.2.5.1. La potenza termica irraggiata in differenti scenari di incendio risulta dipendere dalla volatilità, dall'entalpia di combustione e dalla massa di sostanze combustibili come riassunto in Tabella 6.

L'obiettivo principale della gerarchia sarà la determinazione di un indice di prestazione  $KPI_I$  relativo alla superficie di impatto degli effetti letali dell'irraggiamento dovuto a diversi scenari di Incendio che tenga in conto dei principali parametri individuati come influenti.

La domanda a cui i criteri sottostanti l'obiettivo devono rispondere è: "Qual è la potenza termica irraggiata da tutti i potenziali scenari di incendio causati da sismi o dall'effetto domino nell'impianto considerato?". La risposta a questa domanda è: "La potenza termica irraggiata dipende dalla portata di vapori combustibili disponibili e dalla entalpia di combustione degli stessi" e rende comparabili le portate di vapori combustibili ad alta e bassa entalpia di combustione che bruciando determinando l'intensità dell'irraggiamento.

I criteri relativi all'entalpia, posti al di sotto del sotto obiettivo saranno quindi:

- Entalpia combustione elevata ( $>40$  MJ/Kg)
- Entalpia combustione bassa ( $< 40$  MJ/Kg).

Per ognuno dei criteri individuati, i sotto criteri devono rispondere alla domanda: “Qual è la portata di vapori a elevata (o bassa) entalpia di combustione potenzialmente rilasciata negli scenari incidentali individuati?”. La risposta a questa domanda è: “La portata di vapori combustibili disponibili dipende dalla volatilità delle sostanze rilasciate dalla rottura di serbatoi di stoccaggio ed è correlata alla massa delle stesse” e rende comparabili le masse di sostanze con diversa volatilità.

I sottocriteri relativi alla volatilità delle sostanze posti al di sotto di ognuno dei criteri individuati per l’entalpia sono:

- Gas compressi/liquefatti
- Liquidi alta volatilità (Flash Point > 18°C)
- Liquidi bassa volatilità (Flash Point < 18°C)
- Solidi.

La gerarchia costruita per la valutazione del rischio relativo a Incendi è mostrata nella Figura 9, tratta da Busini, Marzo, Callioni, Rota (*to be submitted*).

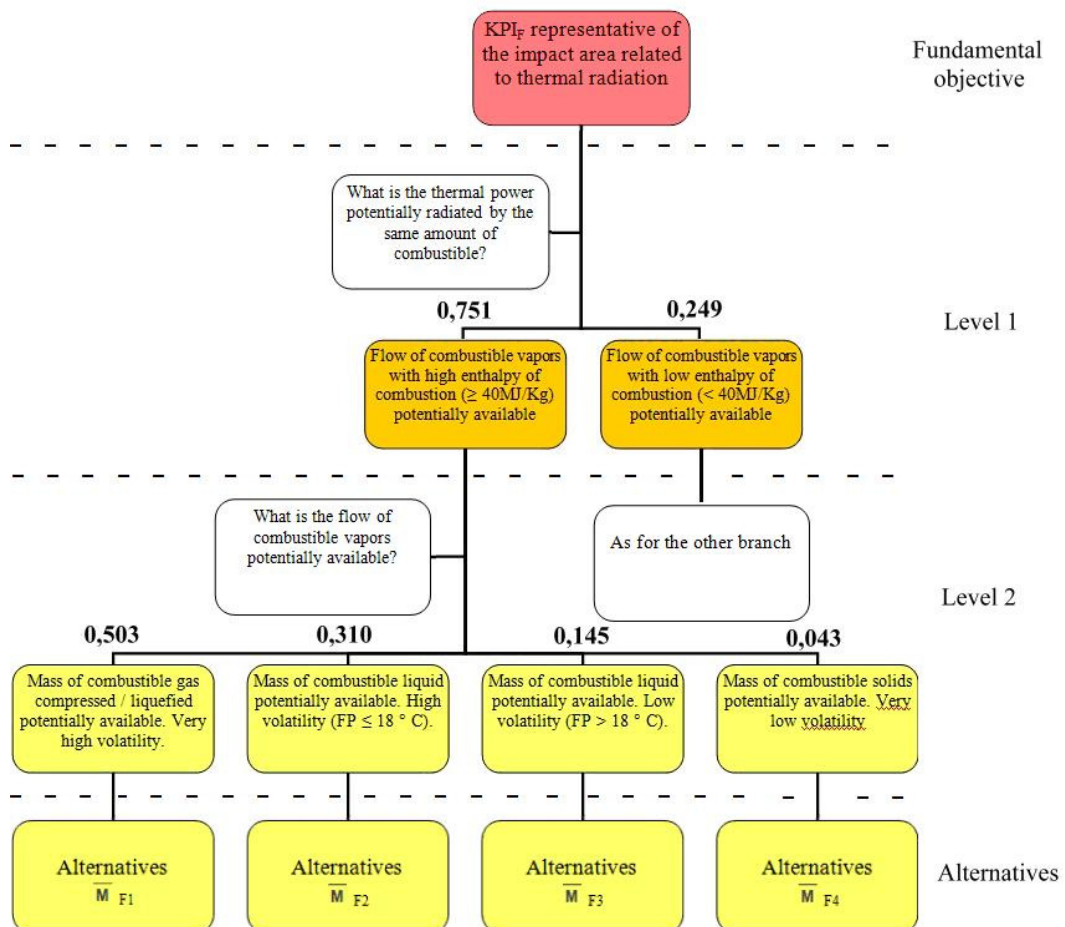


Figura 9 – Gerarchia per la valutazione del rischio NaTech relativo ad incendi; ai nodi sono mostrati i criteri individuati e la domanda a cui devono rispondere, nonché i pesi assegnati ai differenti criteri (Busini, Marzo, Callioni, Rota, *to be submitted*).

Al di sotto dei sottocriteri relativi alla volatilità si trovano le alternative, descritte dalla massa delle sostanze Infiammabili con le caratteristiche individuate potenzialmente rilasciate dal collasso catastrofico di serbatoi causato da un sisma o dall'effetto domino attraverso un indice chiamato Massa Pesata (*Weighted Mass*, WM), calcolato per ogni serbatoio come prodotto della massa contenuta e della *Damage Probability* totale del serbatoio, maggiori dettagli sono riportati nel paragrafo 3.3.1.

### 3.3.2.2. Tossiche

La superficie interessata da effetti letali legati alla concentrazione di sostanze tossiche disperse in atmosfera è stata correlata nel paragrafo 3.2.5.2 alla tossicità, alla volatilità e alla massa di sostanze tossiche rilasciate, come riassunto in Tabella 7.

L'obiettivo principale della gerarchia sarà un  $KPI_T$  il cui valore sia indicativo della superficie colpita dagli effetti letali legati al rilascio e alla dispersione di sostanze tossiche differenti.

I criteri sottostanti all'obiettivo principale devono rispondere alla domanda: "Qual è la superficie interessata dagli effetti letali della tossicità delle sostanze potenzialmente rilasciate?". La risposta a questa domanda è: "La superficie interessata dagli effetti tossici dipende dalla tossicità propria delle sostanze e dalla portata di vapori disponibili per la dispersione" e permette di confrontare gli effetti dovuti al rilascio di sostanze aventi differenti caratteristiche di tossicità.

Sono quindi individuati come criteri sottostanti all'obiettivo principale:

- Tossicità alta (IDLH < 100 ppm)
- Tossicità bassa (IDLH > 100 ppm).

Per ognuno dei criteri individuati, i sottocriteri devono rispondere alla domanda: "Quale è la portata di vapori a tossicità alta (o bassa) disponibili per la dispersione?". La risposta è: "La portata di vapori tossici disponibili dipende dalla volatilità e dalla massa delle diverse sostanze rilasciate" e rende comparabili le masse di sostanze tossiche a differente volatilità rilasciate in un potenziale incidente NaTech.

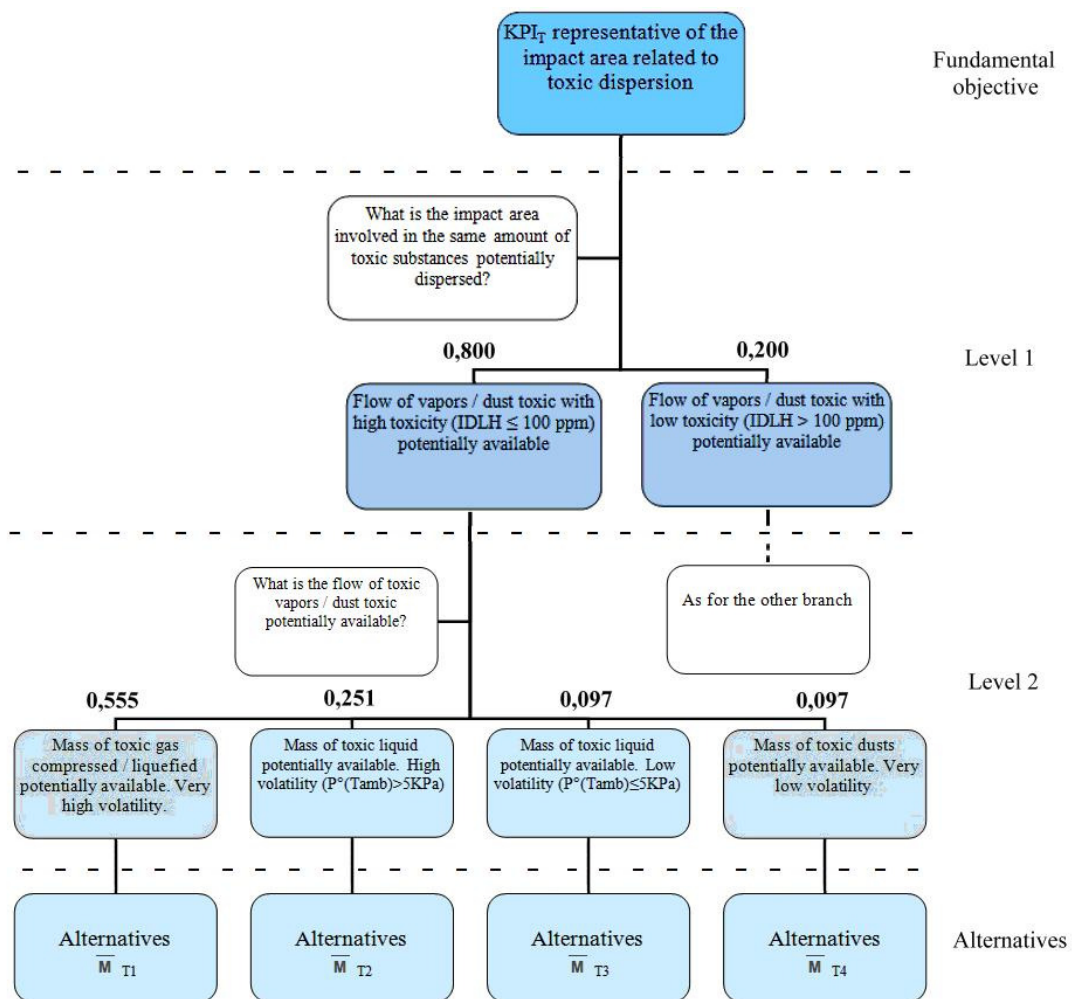
I sottocriteri relativi alla volatilità delle sostanze tossiche sono:

- Gas compressi/liquefatti
- Liquidi alta volatilità ( $P^0(T_{amb}) > 5$  KPa)
- Liquidi bassa volatilità ( $P^0(T_{amb}) < 5$  KPa)
- Polveri fini ( $D < 50$   $\mu$ m).



Nel livello inferiore a quello dei sottocriteri sono le alternative, descritte dagli indici di Massa Pesata calcolati come al paragrafo 3.3.1 e relativi ai serbatoi contenenti sostanze classificate come Tossiche.

La gerarchia costruita per la valutazione del rischio relativo a Dispersione di sostanze tossiche è mostrata nella Figura 10, tratta da Busini, Marzo, Callioni, Rota (*to be submitted*).



**Figura 10 – Gerarchia per la valutazione del rischio NaTech relativo a dispersione di sostanze tossiche; ai nodi sono mostrati i criteri individuati e la domanda a cui devono rispondere, nonché i pesi assegnati ai differenti criteri (Busini, Marzo, Callioni, Rota, *to be submitted*).**

### 3.3.2.3. Esplosive

La superficie interessata dalla sovrappressione dovuta al passaggio di un'onda d'urto è correlata all'energia liberata nell'esplosione, come descritto nel paragrafo 3.2.5.3. Per eventi come VCE l'energia liberata è correlata all'entalpia di combustione, alla volatilità e alla massa delle sostanze combustibili rilasciate, nonché alla probabilità di accadimento del fenomeno; per eventi come BLEVE ed esplosioni meccaniche la superficie interessata da

effetti letali è stata correlata alla massa di Gas compressi/liquefatti rilasciata, alla pressione di stoccaggio e alla probabilità di accadimento, come riassunto in Tabella 8.

Obiettivo principale della gerarchia è la definizione di un  $KPI_E$  che sia indicativo della superficie potenzialmente interessata dagli effetti di una esplosione.

I criteri sottostanti dovranno rispondere alla domanda: “Qual è l’energia potenzialmente liberata in un evento esplosivo generato dalla combustione di miscele infiammabili o dal collasso di serbatoi pressurizzati?”. La risposta alla domanda è: “L’energia potenzialmente liberata da un evento esplosivo dipende dall’energia effettivamente liberata e dalla verosimiglianza del verificarsi dello scenario considerato” e rende confrontabili gli effetti legati a differenti scenari di esplosione che si verificano con probabilità differente.

Quindi sono individuati come criteri sottostanti all’obiettivo principale e relativi alla probabilità di accadimento:

- Bassa probabilità (VCE)
- Alta probabilità (BLEVE, esplosioni meccaniche).

Sotto il criterio individuato per le VCE sono posti i sottocriteri che rispondono alla domanda: “Quale è l’energia liberata da eventi tipo VCE?”. La risposta a questa domanda è: “L’energia liberata da VCE dipende dalla massa di vapori combustibili presente all’interno dei limiti di infiammabilità e dalla entalpia di combustione” e rende confrontabili gli effetti legati alla combustione di masse di vapori aventi entalpia di combustione differente.

I criteri individuati per l’entalpia di combustione sono quelli già visti per gli Infiammabili:

- Entalpia combustione elevata (>40 MJ/Kg)
- Entalpia combustione bassa (< 40 MJ/Kg).

Per ognuno di questi criteri sono individuati i relativi sottocriteri, che devono rispondere alla domanda: “Qual è la massa di vapori combustibili presenti all’interno dei limiti di infiammabilità?”. La risposta è: “La massa di vapori presente entro i limiti di infiammabilità dipende dalla massa e dalla volatilità delle sostanze rilasciate in un evento NaTech” e rende confrontabili gli effetti dovuti al rilascio di masse di sostanze combustibili con volatilità differente. I criteri di volatilità per le sostanze che pongono il rischio di VCE sono:

- Gas compressi/liquefatti
- Liquidi alta volatilità (Flash Point < 18°C)
- Polveri fini ( $D < 50 \mu\text{m}$ ).

Al di sotto di questo livello si trovano le alternative, descritte dagli indici di Massa Pesata relativi alle sostanze classificate come Infiammabili e aventi la volatilità indicata, calcolati come descritto nel paragrafo 3.3.1.

Per eventi tipo BLEVE ed esplosioni meccaniche, i criteri posti al di sotto della probabilità di accadimento devono rispondere alla domanda: “Qual è l’energia liberata da un fenomeno esplosivo tipo BLEVE ed Esplosione meccanica?”. La risposta a questa domanda è: “L’energia liberata dall’esplosione di un serbatoio pressurizzato dipende dalla pressione di stoccaggio e dalla massa di sostanza contenuta” e rende comparabili gli effetti dovuti all’esplosione di serbatoi contenenti sostanze stoccate a pressione differente.

I criteri individuati sono:

- Alta pressione (>20 bar)
- Bassa pressione (<20 bar).

La gerarchia costruita per la valutazione del rischio relativo a Esplosioni è mostrata nella Figura 11, tratta da Busini, Marzo, Callioni, Rota (*to be submitted*).

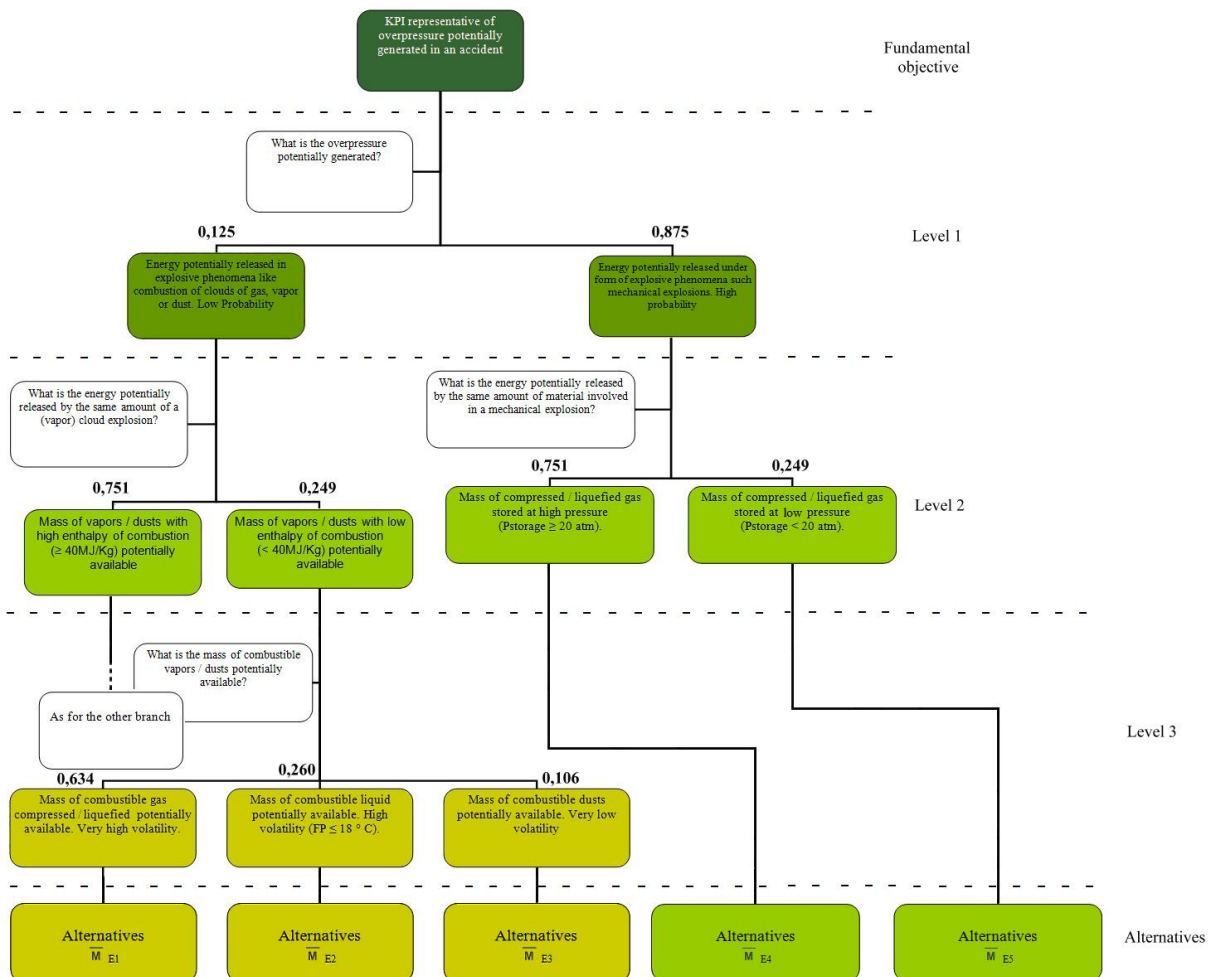


Figura 11 – Gerarchia per la valutazione del rischio NaTech relativo ad esplosioni; ai nodi sono mostrati i criteri individuati e la domanda a cui devono rispondere, nonché i pesi assegnati ai differenti criteri (Busini, Marzo, Callioni, Rota, *to be submitted*).

Sotto l'ultimo livello si trovano le alternative, descritte attraverso gli indici di Massa Pesata, calcolati come descritto nel paragrafo 3.3.1, relativi a Gas compressi/liquefatti che essendo stoccati in pressione possono determinare la possibilità di una esplosione.

#### 3.3.2.4. Commento alle gerarchie

Le gerarchie costruite per le tre differenti tipologie di fenomeno incidentale considerano le principali variabili influenti sul rischio individuate nell'analisi del paragrafo 3.2.5. In particolare, essendo rispettato il vincolo sul numero di criteri utilizzabili per definire un problema, ci si attende una sensibilità elevata dei modelli alle variabili individuate.

La struttura delle gerarchie è stata costruita cercando di rendere l'indice globale di rischio attraverso il rapporto gerarchico, verticale, tra i criteri. Il calcolo del KPI relativo a un serbatoio contenente una sostanza capace di causare una determinata tipologia di scenario incidentale prevede di moltiplicare il valore dell'indice di Massa Pesata calcolato per il serbatoio in questione per i pesi assegnati ai relativi criteri di valutazione della pericolosità della sostanza così come descritto dalle gerarchie, procedendo dai criteri al fondo fino all'obiettivo principale. L'indice globale risulta allora dal prodotto di variabili normalizzate che descrivono:

- Probabilità di collasso del serbatoio
- Massa di sostanza rilasciata
- Caratteristiche di pericolosità delle sostanze.

Ci si attende quindi che i KPI siano correlati alla superficie di impatto degli scenari potenzialmente generati e che il loro valore sia compreso nell'intervallo 0-1. L'aver utilizzato degli indici di massa, pesata dalla probabilità che tale massa sia rilasciata per collasso del contenitore, per caratterizzare le Alternative ha reso i KPI estremamente sensibili alla massa di sostanze chimiche e alla vulnerabilità degli stoccaggi agli eventi sismici. In situazioni in cui la massa di sostanze chimiche stoccate è nulla o è nulla la probabilità di danneggiamento il relativo KPI assume il valore 0, corrispondente all'assenza di rischio di incidente rilevante.

Una stessa sostanza, sulla base delle proprie caratteristiche di pericolosità, può essere in grado di generare più categorie di scenari incidentali, come nel caso di sostanze infiammabili o tossiche stoccate in pressione. In tal caso si valuterà un KPI per ognuno degli scenari incidentali potenzialmente generati dal collasso del serbatoio considerato.

### 3.3.3. Aggregazione degli indici

La valutazione dei differenti indici di rischio  $KPI_I$ ,  $KPI_T$ ,  $KPI_E$  relativi all'intero impianto si ottengono dalla somma dei KPI ottenuti per una stessa categoria di scenario incidentale (Incendi, Dispersione di sostanze Tossiche, Esplosioni) dalla valutazione dei KPI relativi ai singoli serbatoi.

Le approssimazioni adottate nel rendere la dipendenza funzionale degli indici di rischio dalla superficie potenzialmente interessata dagli effetti letali di un incidente rendono i valori dei differenti KPI non direttamente confrontabili tra di loro, motivo per cui non è stato possibile unificare le tre gerarchie.

Considerando i tre KPI come vettori in uno spazio tridimensionale, giacenti sui tre assi ortogonali di un sistema di riferimento e aventi origine nell'origine del sistema, la condizione ottimale è rappresentata dall'origine degli assi, dove i KPI assumono il valore 0. Un indice globale del rischio può essere rappresentato dal vettore somma, che definisce un punto nello spazio dei KPI posto a una certa distanza dall'origine; distanza definita dal modulo del vettore stesso (Busini, Marzo, Callioni, Rota, *to be submitted*).

Allora un indice globale  $KPI_G$  si può calcolare attraverso la formula che fornisce il modulo di un vettore somma come radice quadrata della somma dei quadrati dei moduli dei vettori addendi:

$$KPI_G = (KPI_I^2 + KPI_T^2 + KPI_E^2)^{0,5}$$

**Equazione 16 – Formula per la sintesi dei KPI relativi a differenti scenari incidentali in un unico indice globale di rischio  $KPI_G$ .**

L'indice globale  $KPI_G$  è trasformato ai fini della decisione in una scala qualitativa che classifica la sensibilità dell'impianto al NaTech in 3 livelli di rischio:

- Alto ( $KPI_G > 10^{-1}$ )
- Medio ( $KPI_G$  compreso tra  $10^{-2}$  e  $10^{-1}$ )
- Basso ( $KPI_G < 10^{-2}$ ).

Gli impianti classificati come a Basso rischio non richiedono un ulteriore approfondimento delle problematiche connesse a eventi NaTech, mentre gli impianti classificati come ad Alto rischio richiedono sicuramente un approfondimento tramite metodi di valutazione quantitativa. Il rischio connesso ad impianti classificati come a Medio rischio può essere sia trascurabile che non accettabile, cioè cade in una sorta di regione di indecisione, definita da Lees (1996) zona ALARP (*As Low As Reasonably Possible*), in cui la decisione di approfondire il dettaglio della valutazione deve essere valutato caso per caso.

### 3.3.4. Definizione dei pesi

Le gerarchie sono state costruite su differenti livelli procedendo dall'alto al basso, mettendo in ogni livello i fattori che influenzano direttamente gli elementi del livello immediatamente superiore e che sono influenzati da quelli del livello immediatamente inferiore.

Il metodo AHP prevede di fornire una misura dell'importanza relativa dei criteri appartenenti a uno stesso livello e usati per definire la risposta a uno stesso sottoproblema attraverso un vettore di pesi ottenuto con una procedura specifica che prevede la costruzione di Matrici dei confronti a coppie (Saaty 1980) per valutare l'influenza di ogni criterio individuato sulle relative risposte.

#### 3.3.4.1. Costruzione delle Matrici dei confronti a coppie

La Matrice dei confronti a coppie è quadrata, di dimensioni  $n \times n$ , dove  $n$  è il numero dei criteri che definiscono il sottoproblema, e riporta i valori  $A_{ij}$  della preferenza accordata a un determinato criterio, posto nella riga  $i$ -esima, rispetto al criterio posto nella colonna  $j$ -esima. Risulta quindi che la diagonale della matrice è composta di 1, corrispondenti alla preferenza di ogni criterio rispetto a sé stesso.

La preferenza accordata a un criterio rispetto a un altro nei confronti a coppie è definita attraverso una scala semantica di importanza relativa propria del metodo AHP. La scala prevede che i numeri dispari interi da 1 a 9 siano usati nel definire la preferenza di un criterio rispetto a un altro, dove a 1 corrisponde "Le due attività contribuiscono all'obiettivo in egual misura" e a 9 corrisponde "Le prove che favoriscono una attività sull'altra sono del massimo livello di certezza possibile", La scala definita da Saaty è mostrata nella Tabella 9.

**Tabella 9 – Scala semantica usata dal metodo AHP (Saaty 1980).**

Intensità di importanza $A_{ij}$	Definizione	Spiegazione
1	Uguale importanza	Le due attività contribuiscono nella stessa misura
3	Prevalenza debole	L'esperienza e il giudizio favoriscono leggermente l'attività $i$
5	Prevalenza forte	L'esperienza e il giudizio favoriscono chiaramente l'attività $i$
7	Prevalenza dimostrata	La prevalenza dell'attività $i$ è dimostrata in pratica
9	Prevalenza assoluta	La prevalenza dell'attività $i$ è dimostrata con il massimo livello di certezza possibile

Nel caso in cui la preferenza che si vuole descrivere non corrisponda a un valore preciso della scala ma sia invece intermedia a due di essi, si può assegnare a questa preferenza il valore dato dal corrispondente numero pari intero intermedio ai due dispari individuati.

Quando un criterio  $i$  è meno preferito ad un criterio  $j$  il giudizio sulla preferenza  $A_{ij}$  è descritto dal reciproco del giudizio assegnato al criterio  $j$  rispetto al criterio  $i$ , pari a  $1/A_{ji}$ . Ogni matrice può così essere completata facendo  $n*(n-1)/2$  comparazioni.

I confronti a coppie sono effettuati tramite un giudizio dell'importanza relativa dei criteri, basato sui risultati dell'analisi svolta al paragrafo 3.2.5 e sui risultati di studi riguardanti la QRA di eventi NaTech (Antonioni *et al.* 2009; Campedel *et al.* 2008; Antonioni *et al.* 2007).

#### 3.3.4.2. Calcolo dei pesi e consistenza delle matrici

Completata la Matrice dei confronti a coppie relativa ai criteri influenti su uno stesso sottoproblema, si possono calcolare i pesi assegnati ad ognuno di essi con metodi differenti a seconda che i giudizi contenuti nelle matrici siano consistenti o meno.

I giudizi sono consistenti quando rispettano la proprietà transitiva dell'uguaglianza, questo significa che se il criterio  $A$  è preferito a  $B$  e  $B$  è preferito a  $C$  allora  $A$  deve essere preferito a  $C$  e che i giudizi devono essere consistenti anche dal punto di vista numerico. Le matrici consistenti hanno rango 1, cioè tutte le righe sono multiple le une delle altre, e i pesi possono essere calcolati normalizzando ogni colonna rispetto alla somma dei valori che le appartengono.

Nel caso in cui le matrici non siano consistenti i pesi possono essere calcolati risolvendo un problema di autovettori. Dati una matrice  $A$  e un vettore  $x$  l'autovettore di una matrice  $A$  è un vettore costituito di elementi detti autovalori  $\lambda$  tali per cui vale la relazione:

$$Ax = \lambda x$$

Gli autovalori di una matrice possono essere calcolati risolvendo l'equazione caratteristica:

$$\text{Det}(\lambda I - A) = 0$$

Gli autovalori di una matrice hanno due proprietà che risultano utili nella determinazione della consistenza delle Matrici dei confronti a coppie: il numero degli autovalori diversi da 0 per una matrice è uguale al suo rango, quindi matrici consistenti avranno un solo autovalore, e la somma degli autovalori è uguale alla somma degli elementi della diagonale della matrice, che in questo caso è composta di soli 1. Allora una matrice  $n \times n$  consistente ha un unico autovalore pari a  $n$ , mentre matrici inconsistenti hanno più autovalori la cui somma è pari a  $n$ .

La consistenza si può misurare con un Indice della Consistenza (*Consistency Index, C.I.*) ricavato dal massimo autovalore  $\lambda_{\max}$  della matrice con la formula:

$$C.I. = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1).$$

**Equazione 17 – Consistency Index (C.I.) per Matrici dei confronti a coppie.**  $\lambda_{\max}$ : autovalore massimo della matrice.

Un'altra misura della consistenza è data dal Rapporto di Consistenza (*Consistency Ratio*, C.R.) ottenuto dal rapporto tra C.I. e un indice di consistenza, detto *Random Index* (R.I.), calcolato come un C.I., ricavato da una matrice di confronti a coppie in cui i valori relativi ai confronti sono generati casualmente.

$$C.R. = C.I./ R.I.$$

**Equazione 18 – Consistency Ratio per Matrici dei confronti a coppie.**

Una regola empirica dice che matrici con C.R. <0,1 sono da considerarsi consistenti (Saaty 1980). Le matrici dei confronti a coppie sono però spesso inconsistenti, a causa della difficoltà nel mantenere la coerenza in tutti i confronti. La teoria dei sistemi relazionali di preferenza dimostra infatti che le relazioni di preferenza e di indifferenza che conseguono da un insieme di confronti a coppie possono essere non transitive. Obbligando l'esperto ad essere perfettamente coerente nei suoi giudizi lo costringeremmo implicitamente (e indebitamente) a rispettare quel principio di transitività della preferenza e dell'indifferenza che non dovrebbe mai essere imposto a priori.

Un metodo approssimato per calcolare i pesi da Matrici dei confronti a coppie inconsistenti, che non consente di ottenere una stima dell'inconsistenza, prevede di normalizzare ogni colonna per la somma dei valori che contiene per ottenere una matrice dei confronti normalizzata. Le righe di questa matrice sono mediate con media aritmetica o media geometrica per ottenere un vettore di pesi non normalizzati. La normalizzazione dei pesi rispetto alla loro somma fornisce il vettore di pesi normalizzati che descrivono l'importanza relativa dei criteri oggetto della matrice.

Nel presente studio si utilizzerà al fine del calcolo dei pesi il metodo approssimato con media aritmetica, in considerazione della non necessità della valutazione della consistenza delle matrici e della possibilità, dato il numero limitato di criteri individuati, di valutare direttamente l'adeguatezza dei pesi.

#### 3.3.4.3. Matrici e pesi per sostanze Infiammabili

La procedura per il calcolo dei pesi, applicata ai criteri di volatilità delle sostanze infiammabili prevede di creare un matrice n x n, dove n è il numero dei criteri.

I criteri individuati per la volatilità delle sostanze Infiammabili sono:



- Gas compressi/liquefatti
- Liquidi alta volatilità (Flash Point > 18°C)
- Liquidi bassa volatilità (Flash Point < 18°C)
- Solidi.

La matrice dei confronti a coppie misura 4 x 4, ad ogni colonna e ad ogni riga è associato un criterio, all'intersezione tra una riga i e una colonna j deve essere riportato il giudizio dato all'importanza relativa del criterio i rispetto al criterio j, la matrice ha una diagonale principale composta di soli 1; l'importanza relativa di un criterio rispetto a un altro è descritta tramite la scala semantica relativa elaborata da Saaty e riportata nella Tabella 9, il numero totale di confronti da effettuare è pari a  $n*(n-1)/2 = 6$ .

In generale si può dire che più importanza è stata data a sostanze con maggiore volatilità perché si è dimostrato che sostanze più volatili, a parità di temperatura, emettono maggiori quantità di vapori infiammabili il cui incendio determina una maggiore potenza termica irradiata, coinvolgendo negli effetti letali dell'irraggiamento superfici più estese e determinando quindi un livello di rischio maggiore.

Procedendo dalla riga 1, corrispondente a Gas compressi/liquefatti, il primo confronto è con il criterio della colonna 2, vale a dire Liquidi alta volatilità; il rischio rappresentato dai primi è stato giudicato come leggermente maggiore in virtù del fatto che i composti classificati come Gas compressi/liquefatti e Liquidi alta volatilità presentano caratteristiche di volatilità non eccessivamente differenti, come mostrato anche da una classificazione della pericolosità delle sostanze effettuata ai fini della QRA NaTech da Antonioni et al. (2009). Il valore di importanza assegnato alla casella  $A_{ij}$  è, sulla base delle considerazioni fatte, pari a 2; nella casella specularmente opposta rispetto alla diagonale principale deve essere riportato l'inverso di tale numero, vale a dire  $A_{ji} = 1/ A_{ij}$ .

Il confronto tra Gas compressi/liquefatti e Liquidi bassa volatilità (colonna 3) porta a definire l'importanza relativa della volatilità del primo come sensibilmente maggiore, corrispondente al valore di 4. L'inverso di tale valore è assegnato alla casella speculare a questa.

Il confronto tra Gas compressi/liquefatti e Solidi (colonna 4) vede la massima prevalenza della volatilità dei primi sui secondi, il giudizio assegnato è 9, il corrispondente inverso è assegnato alla casella speculare a questa.

Passando alla riga 2, corrispondente a Liquidi alta volatilità, e confrontandola con la colonna 3, corrispondente a Liquidi bassa volatilità, l'importanza assegnata al primo criterio rispetto al secondo è 3, una importanza leggermente maggiore è stata data a Liquidi alta volatilità in virtù della maggiore velocità di bruciamento che presentano; il valore inverso è assegnato alla

casella speculare a questa. Nel confronto tra Liquidi alta volatilità e Solidi (colonna 4) si assegna ai primi una importanza pari a 7, corrispondente a una elevata prevalenza della volatilità dei primi rispetto ai secondi; alla casella speculare a questa è assegnato il valore inverso. L'ultimo confronto è tra Liquidi bassa volatilità (riga 3) e Solidi (colonna 4); la volatilità dei primi è giudicata come sensibilmente maggiore, il valore assegnato è 5, il corrispondente inverso è assegnato alla casella speculare a questa rispetto alla diagonale. La matrice a questo punto è completa ed appare come mostrato in Tabella 10.

**Tabella 10 – Matrice dei confronti a coppie per la volatilità di sostanze Infiammabili.**

	Gas compresso/liquefatto	Liquido alta volatilità	Liquido bassa volatilità	Solido
Gas compresso/liquefatto	1	2	4	9
Liquido alta volatilità	1/2	1	3	7
Liquido bassa volatilità	1/4	1/3	1	5
Solido	1/9	1/7	1/5	1

Il metodo semplificato per il calcolo dei pesi prevede di normalizzare il contenuto della colonna j-esima rispetto alla sommatoria dei valori che contiene, procedimento ripetuto per le 4 colonne. Il risultato è la matrice mostrata in Tabella 11.

**Tabella 11 – Matrice dei confronti a coppie normalizzata per la volatilità di sostanze Infiammabili.**

	Gas compresso/liquefatto	Liquido alta volatilità	Liquido bassa volatilità	Solido
Gas compresso/liquefatto	0,537	0,576	0,488	0,409
Liquido alta volatilità	0,269	0,288	0,366	0,318
Liquido bassa volatilità	0,134	0,095	0,122	0,227
Solido	0,060	0,041	0,024	0,045

Facendo la media aritmetica dei valori appartenenti alla riga i-esima si ottiene il peso del criterio i-esimo. Normalizzando questi pesi per la somma di loro stessi si ottengono altri pesi il cui valore somma a 1, come richiesto dal metodo AHP. I pesi calcolati per i criteri di volatilità sono mostrati in Tabella 12.

**Tabella 12 – Pesi per la volatilità di sostanze Infiammabili, da utilizzare nella gerarchia relativa a Incendi rappresentata in Figura 9.**

Gas compresso/liquefatto	0,503
Liquido alta volatilità	0,310
Liquido bassa volatilità	0,145
Solido	0,043

Il risultato ottenuto descrive l'importanza dei criteri riguardanti la volatilità nel concorrere alla determinazione del rischio relativo ad incendi. L'analisi del paragrafo 3.2.5.1 associava un rischio maggiore a sostanze con maggiore volatilità; come ci si attendeva l'importanza massima è assegnata a Gas compressi/liquefatti e la stessa decresce al diminuire della volatilità del composto considerato.

I criteri riguardanti l'entalpia di combustione di sostanze Infiammabili sono:

- Entalpia di combustione elevata (>40 MJ/Kg)
- Entalpia di combustione bassa (< 40 MJ/Kg).

La matrice dei confronti a coppie misura 2 x 2 e un solo confronto è richiesto per il suo completamento. L'importanza del criterio Entalpia combustione elevata rispetto al criterio bassa entalpia nel determinare il rischio è stata giudicata come leggermente maggiore, corrispondente a 3.

La matrice dei confronti a coppie appare come mostrato in Tabella 13.

**Tabella 13 - Matrice dei confronti a coppie per l'entalpia di combustione di sostanze Infiammabili.**

	Entalpia combustione elevata	Entalpia combustione bassa
Entalpia combustione elevata	1	3
Entalpia combustione bassa	1/3	1

Normalizzando le colonne, mediando le righe della matrice che ne risulta e normalizzando i pesi il risultato ottenuto, riassunto in Tabella 14, mostra che l'influenza nel determinare l'indice di rischio associata a sostanze con Entalpia di combustione elevata è maggiore, come risultante dall'analisi effettuata al paragrafo 3.2.5.1.

**Tabella 14 - Pesi per l'entalpia di combustione di sostanze Infiammabili, da utilizzare nella gerarchia relativa a Incendi rappresentata in Figura 9.**

Entalpia combustione elevata	0,751
Entalpia combustione bassa	0,249

#### 3.3.4.4. Matrici e pesi per sostanze Tossiche

Per quanto riguarda le sostanze Tossiche, i criteri individuati per la volatilità sono:

- Gas compressi/liquefatti
- Liquidi alta volatilità ( $P^0(T_{amb}) > 5$  KPa)
- Liquidi bassa volatilità ( $P^0(T_{amb}) < 5$  KPa)
- Polveri fini ( $D < 50$   $\mu$ m).

L'analisi del paragrafo 3.2.5.2 ha evidenziato che a sostanze con maggiore volatilità corrisponde un rischio maggiore.

La matrice dei confronti a coppie misura 4 x 4 e servono 6 confronti per definirla. Partendo dal criterio della riga 1, Gas compressi/liquefatti, e confrontando con il criterio di colonna 2, Liquidi alta volatilità, il primo è giudicato essere leggermente più importante del secondo, corrispondente a 3 nella scala semantica relativa usata dall'AHP.

Rispetto a Liquidi bassa volatilità e Polveri fini, il criterio Gas compressi/liquefatti è giudicato essere sensibilmente più importante in considerazione del maggior rischio posto da sostanze tossiche gassose, le quali dopo il rilascio sono immediatamente disponibili per la dispersione, ed è stato assegnato in entrambi i casi un valore di 5.

Il criterio di riga 2, Liquido alta volatilità, è stato giudicato come di importanza leggermente maggiore rispetto ai criteri delle colonne 3 e 4, relativi a Liquidi bassa volatilità e Polveri fini, in virtù di una differenza non spiccata tra gli effetti tossici prodotti da sostanze con queste caratteristiche di volatilità; il valore assegnato ai due confronti è di 3. Liquidi a bassa volatilità e polveri fini sono giudicati essere della medesima importanza, la Matrice dei confronti a coppie è mostrata nella Tabella 15.

**Tabella 15 - Matrice dei confronti a coppie per la volatilità di sostanze Tossiche.**

	Gas compresso/liquefatto	Liquido alta volatilità	Liquido bassa volatilità	Polvere fine
Gas compresso/liquefatto	1	3	5	5
Liquido alta volatilità	1/3	1	3	3
Liquido bassa volatilità	1/5	1/3	1	1
Polvere fine	1/5	1/3	1	1

Attraverso la procedura descritta al paragrafo 3.3.4.2 si ricavano i pesi relativi ai criteri di volatilità delle sostanze tossiche, riassunti in Tabella 16. Come atteso, maggiore importanza è assegnata alle sostanze più volatili, perché queste incidono maggiormente sul rischio posto dal rilascio di sostanze tossiche.

**Tabella 16 – Pesi per la volatilità di sostanze Tossiche, da utilizzare nella gerarchia relativa a Dispersione di sostanze tossiche rappresentata in Figura 10.**

Gas compresso/liquefatto	0,555
Liquido alta volatilità	0,251
Liquido bassa volatilità	0,097
Polvere fine	0,097

La tossicità delle sostanze è stata classificata come:

- Tossicità alta (IDLH < 100 ppm)
- Tossicità bassa (IDLH > 100 ppm).

La matrice dei confronti a coppie misura 2 x 2, il criterio di Tossicità alta è stato giudicato come di importanza sensibilmente maggiore rispetto al criterio di Tossicità bassa e il valore assegnato al confronto a coppie è 4. La matrice è mostrata nella Tabella 17.

**Tabella 17 - Matrice dei confronti a coppie per la tossicità di sostanze Tossiche.**

	Tossicità alta	Tossicità bassa
Tossicità alta	1	4
Tossicità bassa	1/4	1

I pesi ricavati per la tossicità sono riassunti in Tabella 18, un peso maggiore nel determinare l'indice di rischio è stato assegnato alle sostanze con maggiore tossicità.

**Tabella 18 – Pesì per la tossicità di sostanze Tossiche, da utilizzare nella gerarchia relativa a Dispersione di sostanze tossiche rappresentata in Figura 10.**

Tossicità alta	0,800
Tossicità bassa	0,200

#### 3.3.4.5. Matrici e pesi per sostanze Esplosive

I fenomeni esplosivi tipo VCE, BLEVE ed esplosioni meccaniche, analizzati nel paragrafo 3.2.5.3, sono stati classificati in base alla probabilità di accadimento in:

- Alta probabilità (BLEVE, esplosioni meccaniche)
- Bassa probabilità (VCE).

La Matrice dei confronti a coppie misura 2 x 2, il criterio Alta probabilità è stato giudicato essere di estrema importanza rispetto al secondo criterio, il valore assegnato è di 7. L'estrema preferenza data al primo criterio è giustificata dalle condizioni stringenti che si devono verificare per produrre una VCE e che rendono la probabilità di accadimento di un fenomeno di questo tipo decisamente inferiore rispetto a fenomeni come BLEVE ed esplosioni meccaniche. I risultati sono mostrati nella Tabella 19.

**Tabella 19 - Matrice dei confronti a coppie per la probabilità di accadimento di differenti scenari di esplosione.**

	Alta probabilità	Bassa probabilità
Alta probabilità	1	7
Bassa probabilità	1/7	1

I pesi ricavati per la probabilità di accadimento di fenomeni esplosivi sono riassunti nella Tabella 20. I fenomeni ad alta probabilità di accadimento influiscono maggiormente nella determinazione dell'indice di rischio.

**Tabella 20 – Pesì per la per la probabilità di accadimento di differenti scenari di esplosione, da utilizzare nella gerarchia relativa ad Esplosioni rappresentata in Figura 11.**

Alta probabilità	0,875
Bassa probabilità	0,125

L'intensità degli effetti dovuti a BLEVE ed esplosioni meccaniche è stata distinta in base alla pressione di stoccaggio:

- Alta pressione (>20 bar)
- Bassa pressione (<20 bar).

Alle sostanze stoccate ad Alta pressione è stata accordata una leggera preferenza, corrispondente a un valore di 3, in virtù della maggiore intensità degli effetti connessi al collasso di serbatoi contenenti sostanze stoccate a pressione maggiore. La matrice risultante è mostrata in Tabella 21.

**Tabella 21 - Matrice dei confronti a coppie per la pressione di stoccaggio di Gas compressi/liquefatti.**

	Alta pressione	Bassa pressione
Alta pressione	1	3
Bassa pressione	1/3	1

I pesi relativi alla pressione di stoccaggio di sostanze coinvolte in BLEVE ed esplosioni meccaniche sono riassunti nella Tabella 22. Il maggior peso accordato a sostanze stoccate a pressione più alta riflette la maggiore intensità degli effetti associati al rilascio esplosivo di queste.

**Tabella 22 – Pesì per la per la pressione di stoccaggio di Gas compressi/liquefatti, da utilizzare nella gerarchia relativa ad Esplosioni rappresentata in Figura 11.**

Alta pressione	0,751
Bassa pressione	0,249

Le sostanze Infiammabili che possono dare origine a VCE sono state classificate in base alla entalpia di combustione:

- Entalpia di combustione elevata (>40 MJ/Kg)
- Entalpia di combustione bassa (< 40 MJ/Kg).

La matrice dei confronti a coppie e i pesi che ne risultano sono uguali a quelli ricavati per le sostanze Infiammabili relativamente a eventi tipo incendio e sono riassunti nella Tabella 13 e nella Tabella 14.

Le sostanze Infiammabili sufficientemente volatili da poter formare nubi di miscela infiammabile la cui combustione può dare origine a VCE sono state distinte in:

- Gas compressi/liquefatti
- Liquidi alta volatilità (Flash Point > 18°C)
- Polveri fini (D < 50 µm).

La matrice dei confronti a coppie misura 3 x 3 e per definirla sono necessari 3 confronti. Il criterio della riga 1, relativo a Gas compressi/liquefatti, è stato giudicato come di importanza leggermente maggiore rispetto al criterio della colonna 2, Liquidi alta volatilità, perché la maggiore volatilità dei Gas compressi/liquefatti determina un maggiore rischio di formazione di nubi di miscele infiammabili; il valore assegnato nel confronto è 3. I Gas compressi/liquefatti sono stati giudicati di importanza sicuramente maggiore rispetto alle polveri fini nel determinare il rischio relativo a VCE, il valore assegnato è 5.

Il confronto tra il rischio posto da Liquidi ad alta volatilità e Polveri fini ha portato a definire l'importanza del primo come leggermente superiore, il valore assegnato al confronto è 3. La matrice ricavata è riassunta dalla Tabella 23.

**Tabella 23 - - Matrice dei confronti a coppie per la volatilità di sostanze Infiammabili capaci di generare VCE.**

	Gas compresso/liquefatto	Liquido alta volatilità	Polvere fine
Gas compresso/liquefatto	1	3	5
Liquido alta volatilità	1/3	1	3
Polvere fine	1/5	1/3	1

I pesi ricavati per la volatilità di sostanze che possono dare origine a VCE sono mostrati nella Tabella 24. Il maggior peso attribuito alle sostanze più volatili riflette il rischio che queste sostanze comportano.

**Tabella 24 – Pesi per la per la volatilità di sostanze Infiammabili capaci di generare VCE, da utilizzare nella gerarchia relativa ad Esplosioni rappresentata in Figura 11.**

Gas compresso/liquefatto	0,634
Liquido alta volatilità	0,260
Polvere fine	0,106

## 4. RISULTATI

### 4.1. Convalida

Il metodo messo a punto permette di valutare il rischio determinato dall'interazione tra un evento sismico e i serbatoi di stoccaggio presenti all'interno dell'impianto attraverso il calcolo di tre indici di prestazione KPI, relativi a tre diverse categorie di scenari incidentali (Incendi, Dispersione di sostanze tossiche, Esplosioni). Tali KPI sono costruiti in modo da essere sensibili alle principali variabili influenti sul rischio, individuate nell'analisi del paragrafo 3.2.5, e corrispondenti a:

- intensità sismica locale (PGA)
- vulnerabilità degli stoccaggi all'evento sismico
- vulnerabilità degli stoccaggi all'effetto domino
- massa contenuta negli stoccaggi
- pericolosità delle sostanze rilasciate (tossicità, infiammabilità, potenziale esplosivo)
- intensità del pericolo rappresentato dalla sostanza (Alto/Basso)
- volatilità delle sostanze rilasciate (Gas compressi/liquefatti, Liquidi alta/bassa volatilità, solidi/polveri).

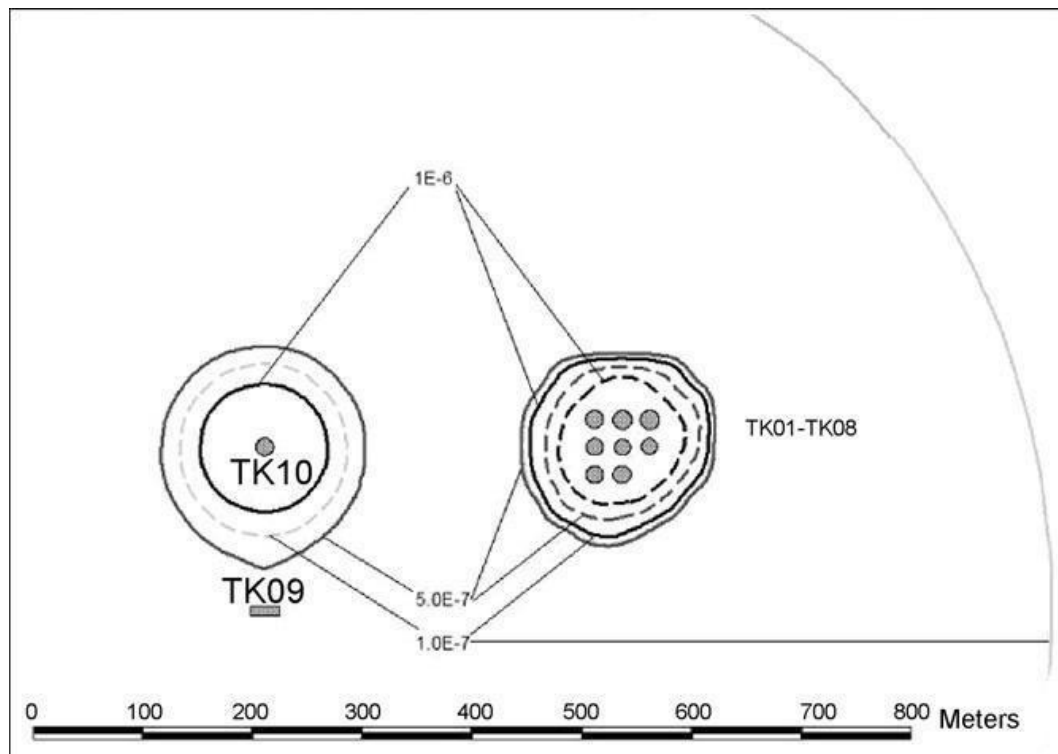
Il valore dei KPI è definito in modo da essere rappresentativo della superficie potenzialmente interessata dalle conseguenze di scenari incidentali iniziati dall'evento sismico; per la convalida si rende quindi necessario il confronto con indici di rischio, ottenuti da QRA relative ad eventi NaTech, che siano correlati alla superficie potenzialmente interessata dagli effetti letali di un incidente.

I metodi QRA riassumono il rischio in indici specifici quali Rischio Individuale, curve F-N (Frequenza-Numero di decessi), e *Potential Life Loss Index* (PLL).

L'indice di Rischio Individuale definisce la frequenza con cui una persona può subire le conseguenze di possibili incidenti sull'impianto considerato; la conseguenza tipicamente considerata è il decesso e l'indice è espresso come numero di decessi per persona all'anno. Assumendo che la persona si possa trovare con frequenza pari a 1 a una distanza fissata dall'impianto e che gli effetti degli incidenti, se di sufficiente intensità, possano colpire tale

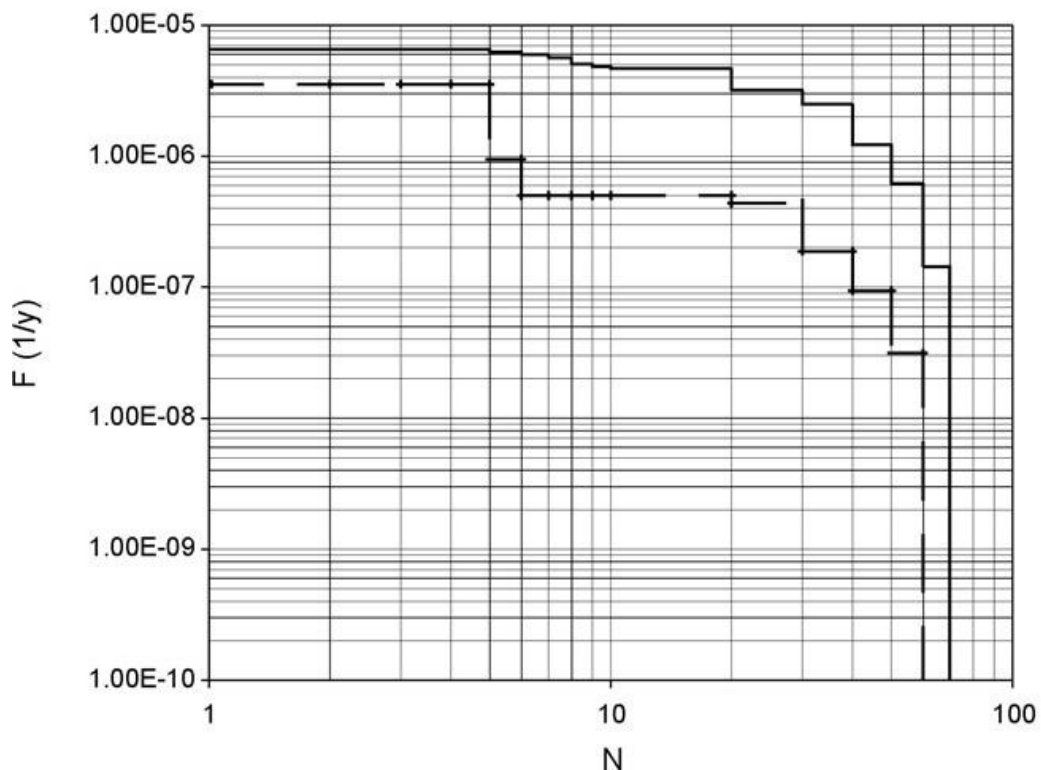


posizione con probabilità pari a 1, l'indice assume il significato di Rischio Locale, il quale rappresenta la frequenza con cui una persona posta in una certa posizione rispetto all'impianto subisce gli effetti letali legati a incidenti sull'impianto in un anno. Il Rischio Locale assume quindi valori differenti e decrescenti allontanandosi dall'impianto, tali valori sono tipicamente rappresentati sotto forma di superfici concentriche alla sorgente degli effetti letali, alle quali è associato lo stesso livello di Rischio Locale, come mostrato in Figura 12.



**Figura 12 – Rappresentazione grafica dei valori assunti dal Rischio Locale, ottenuti da QRA. Linea tratteggiata: probabilità di guasto per cause sismiche non inclusa; linea continua: probabilità di guasto per cause sismiche inclusa (Antonioni *et al.* 2007).**

Ipotizzando una densità abitativa delle superfici esposte al rischio, è possibile aggregare il numero di morti attesi nell'area colpita e la frequenza stimata con cui tali persone sono colpite in curve che rappresentano la frequenza cumulata di incidenti con un numero di vittime determinato, dette curve F-N; un esempio è mostrato in Figura 13. In ascissa è indicato il numero di decessi N atteso a seguito degli scenari incidentali individuati e valutati nella QRA, in corrispondenza di un valore N dell'ascissa è possibile leggere la frequenza cumulata di tutti gli incidenti in grado di causare un numero di vittime pari o inferiore a N.



**Figura 13 – Curva F-N ottenuta dall'aggregazione dei valori del Rischio Locale. Linea tratteggiata: probabilità di guasto per cause sismiche non inclusa; linea continua: probabilità di guasto per cause sismiche inclusa (Antonioni *et al.* 2007).**

Le informazioni contenute nelle curve F-N possono essere aggregate in un indice, detto PLL, che indica il numero di morti attese mediamente in un anno a causa di incidenti industriali che possono colpire le zone adiacenti l'impianto ed è calcolato come integrale della frequenza cumulata su tutti i possibili valori assunti da N:

$$PLL = \int_0^{\infty} F dN,$$

Il PLL, espresso come numero di decessi all'anno nell'area considerata, è rappresentativo della superficie interessata da effetti letali dovuti a tutti gli incidenti possibili sull'impianto e costituisce un buon termine di confronto per la convalida sperimentale del metodo di valutazione semplificata.

I casi studio usati per la convalida derivano da *lay-out* di impianti realmente esistenti, usati per testare il metodo per la valutazione quantitativa del rischio NaTech descritto al paragrafo 2.2.1.1 e tratti da Campedel *et al.*(2008). Tali valutazioni si concludono con il calcolo degli indici appena descritti e relativi a due situazioni differenti: la prima è caratterizzata dalle probabilità di guasto dovute a cause interne all'impianto, per la seconda invece si fa

riferimento alle probabilità di guasto dovute ad un evento sismico; gli indici sono quindi confrontati per mostrare la differenza tra il livello di rischio determinato unicamente dalla affidabilità dei componenti dell'impianto e il rischio determinato dall'interazione tra tali componenti e il sisma. Inoltre l'analisi quantitativa dei casi studio utilizzati riguarda il rischio determinato da serbatoi di stoccaggio, il che rende le condizioni particolarmente favorevoli a un confronto tra i risultati di tali valutazioni e i risultati del metodo qualitativo elaborato in questo studio.

Si metteranno a confronto l'indice globale  $KPI_G$  ottenuto dall'aggregazione degli indici ricavati dalle tre gerarchie con l'incremento del rischio dovuto alla sismicità  $PLL_{ratio}$ , valutato come rapporto tra il numero di decessi attesi mediamente in un anno per incidenti sull'impianto dovuti sia a cause interne ( $PLL_{internal}$ ) che ad eventi sismici ( $PLL_{seismic}$ ), calcolato come somma dei PLL dovuti alle due differenti cause ( $PLL_{seismic} + PLL_{internal}$ ), e il  $PLL_{internal}$  come mostrato in Equazione 19.

$$PLL_{ratio} = (PLL_{seismic} + PLL_{internal}) / PLL_{internal}.$$

**Equazione 19 – Incremento dell'indice PLL a causa di eventi sismici.**

I valori assunti dal  $KPI_G$  sono stati divisi in 3 classi di intensità, corrispondenti a:

- Alto ( $KPI_G > 10^{-1}$ )
- Medio ( $KPI_G$  compreso tra  $10^{-2}$  e  $10^{-1}$ )
- Basso ( $KPI_G < 10^{-2}$ ).

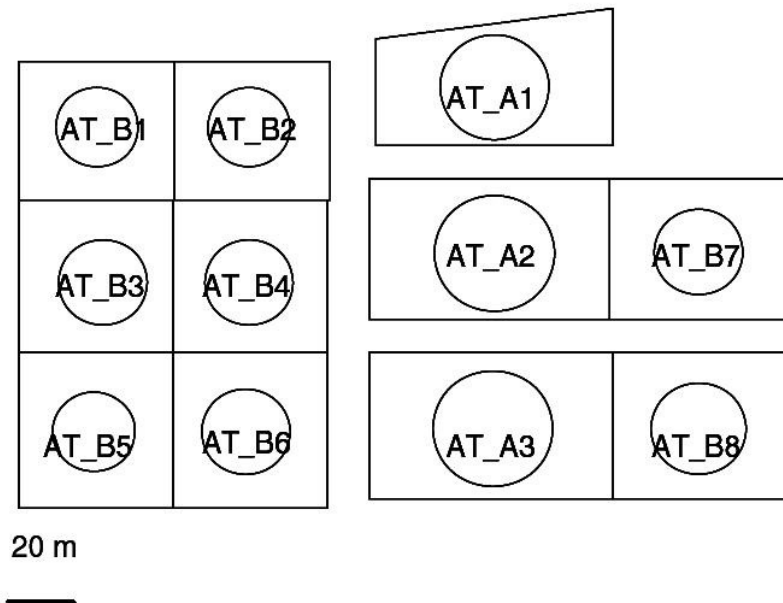
Ci si attende che a valori minimi del  $PLL_{ratio}$  corrispondano valori del  $KPI_G$  classificati come Basso rischio, e che al crescere del  $PLL_{ratio}$  cresca anche la classe di rischio determinata con il metodo qualitativo.

#### **4.1.1. Caso studio 1 – Milazzo**

Il *layout* dell'impianto considerato, mostrato in Figura 14, è derivato da una raffineria realmente esistente e riporta il numero e la posizione di serbatoi di stoccaggio a pressione atmosferica, dotati di bacino di contenimento. L'analisi quantitativa riguarda 3 differenti situazioni:

- incidente iniziato per cause interne
- incidente iniziato da un sisma, serbatoi ancorati
- incidente iniziato da un sisma, serbatoi non ancorati.

Per ognuna di queste situazioni è stata portata a termine da Campedel *et al.* (2008) una QRA i cui risultati sono forniti attraverso la rappresentazione grafica dell'indice di Rischio Locale e della relativa curva F-N, ricavata ipotizzando una densità abitativa delle zone circostanti l'impianto pari a 10 abitanti per ettaro e utilizzando un apposito strumento software sviluppato in un ambiente GIS. La curva F-N è infine integrata per fornire il valore assunto dal PLL nella situazione considerata.



**Figura 14 – Layout per il caso studio 1 – Milazzo (Campedel *et al.* 2008).**

La procedura per la valutazione semplificata del rischio NaTech dovuto a sismi è schematizzata e mostrata nella Figura 15; di seguito si affronterà, a titolo di esempio, l'intera valutazione relativa ad un incidente iniziato da un sisma in un impianto con serbatoi ancorati le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 50 e in Tabella 51.

Il primo passo è la definizione dell'intensità sismica attesa PGA, espressa come frazione dell'accelerazione di gravità. Nel caso in esame la PGA attesa è pari a 0,302, un valore decisamente alto; le zone che presentano tali intensità sismiche sono classificate secondo la normativa italiana come Zona 1, corrispondente al massimo livello di rischio sismico.

Successivamente, partendo dal primo serbatoio, indicato con  $j$ , si procede ad identificare la sostanza contenuta e la sua classificazione in accordo a quanto definito dalla Direttiva Europea 67/548/EEC (*Council Directive 67/548/EEC*).

Si definisce quindi il tipo di serbatoio in base alla pressione di stoccaggio e alla presenza di ancoraggi e, ricorrendo alle funzioni di vulnerabilità sismica descritte al paragrafo 3.2.3, si calcola la probabilità di guasto del serbatoio  $j$  per cause sismiche  $DP_j$ ; il valore della

probabilità di guasto di serbatoi atmosferici ancorati soggetti a una PGA di 0,302 è  $1,45 \cdot 10^{-2}$  eventi su anno.

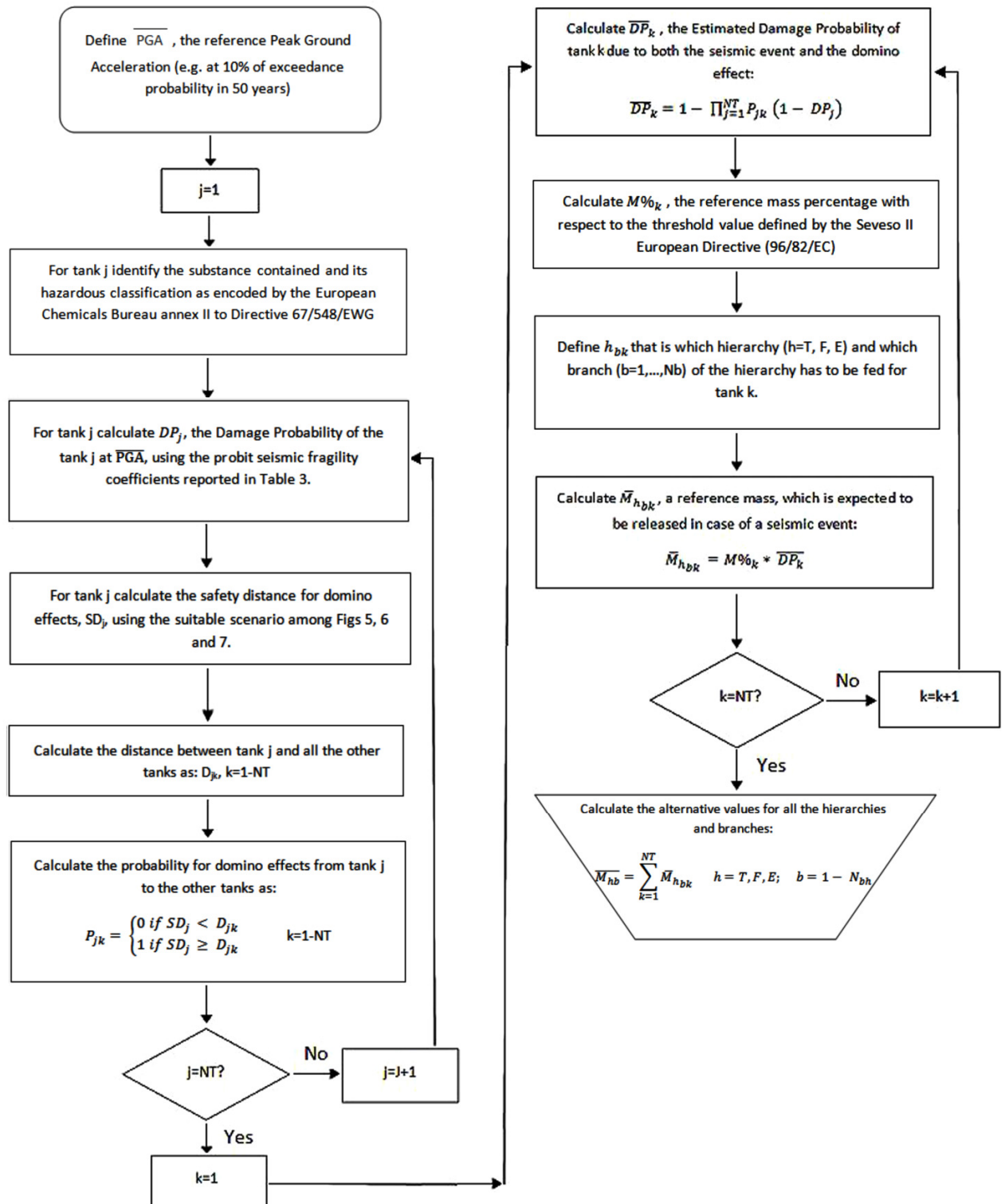


Figura 15 – Procedura per la valutazione semplificata del rischio di incidenti rilevante iniziato da sismi (Busini, Marzo, Callioni, Rota, to be submitted).

Usando le informazioni contenute in Tabella 4, si individuano i potenziali scenari incidentali generati dal collasso del serbatoio j; per ognuno degli scenari individuati si calcolano le

distanze di sicurezza necessarie ad evitare il propagarsi dell'incidente a serbatoi vicini per effetto domino tramite i diagrammi riportati in Figura 5, Figura 6 e Figura 7 rispettivamente per BLEVE ed esplosioni meccaniche, *fireball* e incendi di pozza; quindi si seleziona la massima distanza di sicurezza tra quelle ricavate nominandola  $SD_j$ .

La probabilità  $P_{jk}$  che le conseguenze di un incidente al serbatoio  $j$  si ripercuotano su un serbatoio  $k$  causandone il collasso va riportata in una matrice quadrata  $n \times n$ , dove  $n$  è il numero dei serbatoi considerati, come descritto al paragrafo 3.2.4.4.

I valori  $P_{jk}$  sono ricavati determinando la distanza effettiva  $D_{jk}$  del serbatoio  $j$  dal serbatoio  $k$ , se tale distanza è maggiore della distanza di sicurezza massima  $SD_j$  allora a  $P_{jk}$  sarà assegnato il valore 0, in caso contrario  $P_{jk}$  sarà posta pari a 1. Confrontando un serbatoio con sé stesso, per  $j=k$ , il valore assegnato a  $P_{jk}$  è sempre 1. Ripetendo tale procedura per tutti i  $k$  serbatoi si otterrà una riga della matrice.

Ripetendo la valutazione delle probabilità  $P_{jk}$  per tutti i serbatoi  $j$ , si ottiene una matrice, contenente soltanto valori pari a 0 o 1 e con una diagonale principale composta di soli 1, come mostrato in Tabella 25, ogni elemento  $P_{jk}$  della matrice corrisponde alla probabilità condizionata del collasso del serbatoio  $k$  per effetto domino a causa del collasso del serbatoio  $j$  per cause sismiche.

**Tabella 25 – Matrice delle probabilità condizionate contenente i valori  $P_{jk}$  della probabilità che un incidente sul serbatoio  $j$  causi il collasso del serbatoio  $k$  per effetto domino.**

elementi k		AT-A1	AT-A2	AT-A3	AT-B1	AT-B2	AT-B3	AT-B4	AT-B5	AT-B6	AT-B7	AT-B8
elementi j	indici	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
AT-A1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
AT-A2	2	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1
AT-A3	3	0	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1
AT-B1	4	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
AT-B2	5	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0
AT-B3	6	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
AT-B4	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
AT-B5	8	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
AT-B6	9	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0
AT-B7	10	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
AT-B8	11	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1

La colonna 8 della matrice evidenzia che il corrispondente serbatoio, AT-B8, è meno soggetto all'effetto domino rispetto ad altri serbatoi, questo fatto è da imputare alla posizione periferica che questo serbatoio ha nel layout dell'impianto. Dai valori  $P_{jk}$  della matrice si può calcolare la probabilità totale  $DP_k$  del collasso del serbatoio  $k$  a causa del sisma o dell'effetto domino

usando l'Equazione 5, ricavata dalla formula relativa all'unione delle probabilità di eventi non mutuamente esclusivi.

Ripetendo per k serbatoi si ottengono tutti i valori di  $DP_k$ , mostrati in Tabella 26.

**Tabella 26 – Valori della probabilità di guasto totale per i serbatoi dell'impianto al caso studio 1.**

Elemento k	$DP_k$
AT-A1	7,04E-02
AT-A2	1,10E-01
AT-A3	8,38E-02
AT-B1	5,67E-02
AT-B2	8,38E-02
AT-B3	8,38E-02
AT-B4	1,10E-01
AT-B5	5,67E-02
AT-B6	8,38E-02
AT-B7	7,04E-02
AT-B8	5,67E-02

I valori di  $DP_k$  calcolati non mostrano differenze elevate determinate dall'effetto domino in quanto la probabilità di guasto per cause sismiche di serbatoi atmosferici ancorati è bassa e dall'unione di tali valori non risultano probabilità totali elevate; unica eccezione è il serbatoio AT-A2 che, trovandosi al centro del parco serbatoi, è il maggiormente esposto all'effetto domino. A questo punto, per il serbatoio generico k, in base alla classificazione della pericolosità della sostanza che contiene si individuano i limiti posti dall'articolo 8 della Direttiva Europea "Seveso II" (*Council Directive 96/82/EC*) sulle massima quantità della sostanza in esame che è possibile stoccare in un impianto senza essere soggetti ad obbligo di valutazione quantitativa del rischio; da utilizzare insieme a massa stoccata e probabilità di guasto totale  $DP_j$  per valutare l'indice di Massa Pesata per il serbatoio considerato, come descritto al paragrafo 3.3.1. Gli indici di massa pesata sono riassunti nella Tabella 27.

**Tabella 27 – Valori degli indici di massa pesata calcolati per i serbatoi del caso studio 1.**

Elemento k	Massa pesata
AT-A1	1,12E-02
AT-A2	1,76E-02
AT-A3	1,34E-02
AT-B1	5,55E-03
AT-B2	8,21E-03
AT-B3	8,21E-03
AT-B4	1,08E-02
AT-B5	5,55E-03
AT-B6	8,21E-03
AT-B7	1,01E-02
AT-B8	8,14E-03

Per ognuno dei  $k$  serbatoi, usando le caratteristiche di pericolosità della sostanza contenuta esplicitate nell'analisi del paragrafo 3.2.5 e le gerarchie illustrate in Figura 9, Figura 10 e Figura 11 rispettivamente per sostanze classificate come Infiammabili, Tossiche ed Esplosive dal presente metodo, si identificano i rami  $h_{bk}$  delle gerarchie che descrivono il rischio rappresentato dalla sostanza contenuta nel serbatoio  $k$ ;  $h$  descrive la gerarchia a cui il ramo appartiene ( $h = I, T, E$ ),  $b$  è il numero che identifica il ramo della gerarchia. Ad ogni ramo corrispondono i pesi assegnati all'importanza relativa dei criteri che influiscono sul rischio descritto dal ramo stesso; moltiplicando l'indice di Massa pesata del serbatoio  $k$  per i pesi presenti sul ramo  $h_{bk}$  si ottiene il valore del KPI relativo al rischio determinato da quella combinazione di serbatoio, sostanza e scenario incidentale. Tale rischio può essere descritto da più di un ramo della stessa gerarchia unicamente nel caso in cui la sostanza sia classificata come Infiammabile e come Gas compresso/liquefatto, in tal caso il  $KPI_E$ , relativo ad esplosioni, si otterrà dalla somma dei risultati dei due rami. Una sostanza che non presenta caratteristiche di pericolosità tali da poter generare un determinato scenario incidentale, come nel caso di sostanze non Infiammabili o non Tossiche, non rientrerà in alcun ramo di tali gerarchie e il KPI relativo sarà nullo. Ripetendo la valutazione per le tre gerarchie, si ottengono 3 KPI che esprimono il livello di rischio determinato dal serbatoio in esame rispetto a differenti scenari incidentali.

Ripetendo la valutazione per tutti i  $k$  serbatoi e sommando i KPI relativi allo stesso tipo di scenario incidentale, si ottengono i 3 KPI che descrivono per l'impianto analizzato il rischio relativo rispettivamente ad Incendi, Dispersioni di sostanze tossiche ed Esplosioni.

I serbatoi oggetto dell'analisi contengono benzina, un liquido classificato come Infiammabile, Liquido Alta volatilità, Entalpia combustione elevata, non Tossico e non Pressurizzato, capace di generare scenari tipo Incendio ed Esplosione (VCE). I risultati ottenuti per tutti i serbatoi e per l'impianto nel suo complesso sono mostrati in Tabella 28.

Aggregando i tre indici KPI ottenuti per l'impianto come descritto nel paragrafo 3.3.3, si ottiene l'indice globale  $KPI_G$ , pari a  $2,5 \cdot 10^{-2}$ , che essendo compreso tra  $10^{-1}$  e  $10^{-2}$  corrisponde ad un livello Medio di rischio NaTech. Tale livello di rischio è da confrontare con i risultati ottenuti dalle QRA e più precisamente con il  $PLL_{ratio}$ , calcolato come descritto nell'Equazione 19.



**Tabella 28 – Valori dei KPI relativi ai diversi serbatoi e all’impianto nel suo complesso, ottenuti con il metodo semplificato per la valutazione di rischio NaTech.**

Elemento k	Massa pesata	KPI <sub>I</sub>	KPI <sub>T</sub>	KPI <sub>E</sub>
AT-A1	1,12E-02	2,61E-03	0	2,74E-04
AT-A2	1,76E-02	4,09E-03	0	4,29E-04
AT-A3	1,34E-02	3,11E-03	0	3,26E-04
AT-B1	5,55E-03	1,29E-03	0	1,36E-04
AT-B2	8,21E-03	1,91E-03	0	2,00E-04
AT-B3	8,21E-03	1,91E-03	0	2,00E-04
AT-B4	1,08E-02	2,51E-03	0	2,63E-04
AT-B5	5,55E-03	1,29E-03	0	1,36E-04
AT-B6	8,21E-03	1,91E-03	0	2,00E-04
AT-B7	1,01E-02	2,35E-03	0	2,46E-04
AT-B8	8,14E-03	1,89E-03	0	1,99E-04
Impianto	/	2,49E-02	0	2,61E-03

Ripetendo l’intera procedura di valutazione semplificata per lo scenario relativo ad un incidente iniziato da un sisma in un impianto che contiene serbatoi atmosferici non ancorati, si ottengono i valori dei KPI relativi a questa situazione.

I KPI ricavati dalle due valutazioni sono riassunti in Tabella 29, si nota come i valori dei KPI relativi a serbatoi non ancorati sono di un ordine di grandezza superiori a quelli per serbatoi ancorati, a causa della loro maggiore vulnerabilità sismica.

**Tabella 29 – Confronto tra i KPI relativi all’impianto del caso studio 1, ottenuti considerando serbatoi Ancorati e Non Ancorati.**

Tipo serbatoio	KPI <sub>I</sub>	KPI <sub>T</sub>	KPI <sub>E</sub>	KPI <sub>G</sub>	Rischio
Ancorati	0,0249	0,0000	0,0026	0,0250	Medio
Non Ancorati	0,1753	0,0000	0,0184	0,1763	Alto

I PLL che risultano dalle QRA effettuate da Campedel *et al.* (2008) sono riassunti nella Tabella 30, insieme al PLL<sub>ratio</sub> calcolato come descritto nell’Equazione 19.

**Tabella 30 – PLL ricavati tramite QRA dell’impianto del caso studio 1 (Campedel *et al.* 2008).**

Tipo serbatoi	PLL <sub>internal</sub>	PLL <sub>seismic</sub>	PLL <sub>ratio</sub>
Ancorati	1,43E-05	3,80E-04	28
Non Ancorati	1,43E-05	2,92E-03	205

Confrontando il livello di rischio indicato dal metodo di valutazione semplificato con il PLL<sub>ratio</sub>, ottenuti per l’impianto con serbatoi ancorati, si nota come ad un incremento del PLL di circa un ordine di grandezza corrisponde un livello di rischio segnalato come Medio.

Per l'impianto con serbatoi non ancorati l'incremento del PLL dovuto a cause sismiche è di due ordini di grandezza, corrispondente a una situazione in cui l'evento sismico modifica notevolmente il rischio posto dall'impianto, il livello di rischio valutato con metodo semplificato è Alto, come era lecito attendersi.

#### 4.1.2. Caso studio 2 - Roma

Il *layout* dell'impianto considerato, mostrato in Figura 16, rappresenta la disposizione e le distanze di 11 serbatoi di stoccaggio pressurizzati contenenti GPL. La QRA è stata svolta per due situazioni differenti ottenendo il rischio determinato da:

- incidenti iniziati per cause interne
- incidenti iniziati da un sisma.

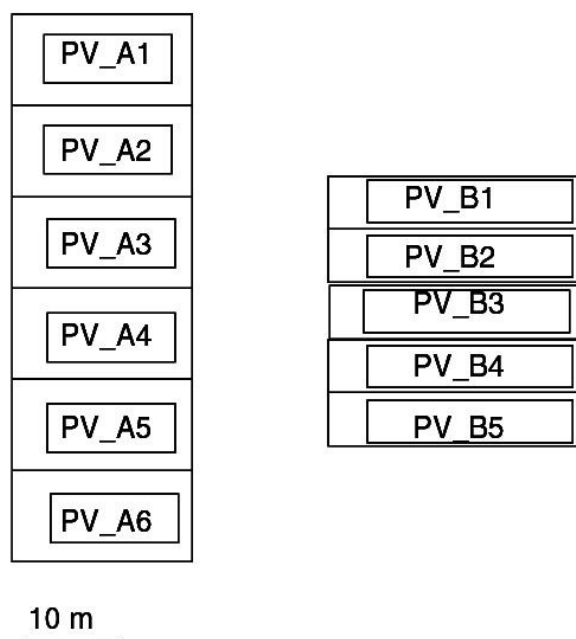


Figura 16 – *Layout* per il caso studio 2 – Roma (Campedel, Cozzani, *et al.* 2008).

Il calcolo degli indici di rischio è basato, come per il Caso studio 1, su una densità abitativa di 10 persone per ettaro. La valutazione degli indici qualitativi seguirà lo schema rappresentato in Figura 15. Il valore della PGA attesa è di 0,159, corrispondente secondo la normativa italiana a una zona a rischio sismico medio, definita come Zona 2. Le caratteristiche dell'impianto e dei serbatoi sono riassunte in Tabella 52 e Tabella 53.

Tabella 53 La valutazione della probabilità di un effetto domino, data la minima distanza tra i serbatoi, non sufficiente ad evitare l'effetto domino causato da una esplosione, porta a definire

una matrice di probabilità condizionate  $P_{jk}$  composta di soli 1, a mostrare il fatto che l'esplosione di un qualunque serbatoio a causa di un sisma porterebbe tutti gli altri serbatoi ad essere investiti dagli effetti e, secondo l'analisi effettuata, a collassare a loro volta. La probabilità di guasto per cause sismiche  $DP_j$  è minima, data l'elevata robustezza intrinseca dei serbatoi pressurizzati, e assume per tutti il valore di  $1,22 \cdot 10^{-4}$  eventi su anno; l'effetto domino aumenta la probabilità di guasto totale  $DP_k$  di un ordine di grandezza, portandola al valore di  $1,34 \cdot 10^{-3}$  per tutti i serbatoi. Il GPL è classificato dal presente metodo come Infiammabile, Gas compresso/liquefatto con Entalpia di combustione elevata, non Tossico, stoccato a Pressione bassa e pertanto è in grado di generare scenari relativi a incendi di gas ed esplosioni tipo VCE e BLEVE. I valori della probabilità di guasto totale, insieme agli indici di Massa Pesata e ai KPI relativi a ciascun serbatoio sono riassunti nella Tabella 31. I differenti valori assunti dall'indice di Massa pesata dipendono dalla differente quantità di GPL stoccata nei serbatoi; la quantità totale di GPL stoccata è molto superiore a quella definita all'articolo 8 della Direttiva Europea "Seveso II" (*Council Directive 96/82/EC*) e pari al 650% del limite, pertanto l'impianto risulta soggetto all'obbligo di valutazione quantitativa del rischio.

**Tabella 31 - Valori delle probabilità totali di guasto  $DP_k$ , degli indici di Massa pesata e dei KPI relativi ai diversi serbatoi e all'impianto nel suo complesso, ottenuti con il metodo semplificato per la valutazione del rischio NaTech.**

Elemento k	$DP_k$	Massa pesata	$KPI_I$	$KPI_T$	$KPI_E$
PV-A1	1,34E-03	0,00101	0,00038	0,00000	0,00028
PV-A2	1,34E-03	0,00101	0,00038	0,00000	0,00028
PV-A3	1,34E-03	0,00101	0,00038	0,00000	0,00028
PV-A4	1,34E-03	0,00101	0,00038	0,00000	0,00028
PV-A5	1,34E-03	0,00101	0,00038	0,00000	0,00028
PV-A6	1,34E-03	0,00053	0,00020	0,00000	0,00015
PV-B1	1,34E-03	0,00053	0,00020	0,00000	0,00015
PV-B2	1,34E-03	0,00053	0,00020	0,00000	0,00015
PV-B3	1,34E-03	0,00053	0,00020	0,00000	0,00015
PV-B4	1,34E-03	0,00053	0,00020	0,00000	0,00015
PV-B5	1,34E-03	0,00000	0,00000	0,00000	0,00000
Totale	/	/	0,00329	0,00000	0,00242

I KPI calcolati per l'intero impianto sono mostrati in Tabella 32 e confrontati con i valori del  $PLL_{ratio}$  ricavato come descritto nell'Equazione 19.

**Tabella 32 - KPI relativi all'impianto del caso studio 2.**

Tipo serbatoi	$KPI_I$	$KPI_T$	$KPI_E$	$KPI_G$	Rischio
Pressurizzati	0,00329	0,00000	0,00242	0,00408	Basso

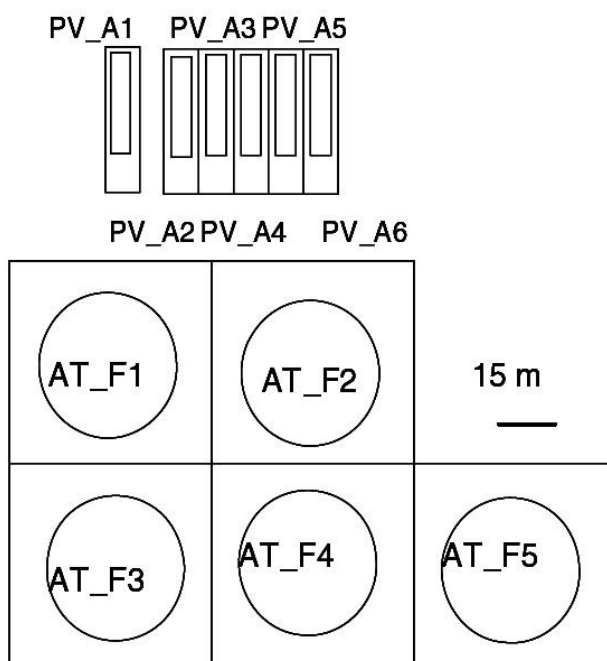
Il valore dell'indice globale  $KPI_G$  è inferiore a  $10^{-2}$ , pertanto la sensibilità dell'impianto al rischio NaTech è da considerarsi di livello Basso nonostante l'elevata quantità di GPL contenuta. L'incremento del PLL dovuto all'evento sismico, mostrato in Tabella 33, è praticamente nullo, ad indicare che l'impianto è poco vulnerabile ad eventi sismici; pertanto i risultati ottenuti con il metodo di valutazione semplificato sono coerenti con i risultati della QRA.

**Tabella 33 - PLL ricavati tramite QRA dell'impianto del caso studio 2 (Campedel *et al.* 2008).**

Tipo serbatoi	PLL <sub>internal</sub>	PLL <sub>seismic</sub>	PLL <sub>ratio</sub>
Pressurizzati	3,70E-04	1,00E-05	1

#### 4.1.3. Caso studio 3 – Livorno

Il layout del terzo impianto, mostrato in Figura 17, è più complesso dei precedenti e rappresenta 5 serbatoi atmosferici ancorati contenenti benzina e 6 serbatoi pressurizzati contenenti GPL.



**Figura 17 – Layout per il caso studio 3 – Livorno (Campedel *et al.* 2008).**

La QRA è stata svolta per due situazioni differenti ottenendo il rischio determinato da:

- incidenti iniziati per cause interne
- incidenti iniziati da un sisma.

Il calcolo degli indici di rischio è basato su una densità abitativa di 10 persone per ettaro. La valutazione degli indici qualitativi seguirà lo schema rappresentato in Figura 15.

Il valore della PGA attesa è di 0,143, corrispondente secondo la normativa italiana a una zona a rischio sismico basso, definita come Zona 3. Le caratteristiche dell'impianto e dei serbatoi sono riassunte in Tabella 54 e Tabella 55.

Le probabilità di guasto per cause sismiche assumono il valore  $4,26 \cdot 10^{-4}$  eventi su anno per serbatoi atmosferici ancorati e  $7,58 \cdot 10^{-5}$  eventi su anno per serbatoi pressurizzati, meno vulnerabili dei primi agli effetti del sisma. La valutazione della probabilità di un effetto domino porta a definire la matrice di probabilità condizionate  $P_{jk}$  mostrata in Tabella 34.

**Tabella 34 – Matrice delle probabilità condizionate contenente i valori  $P_{jk}$  della probabilità che un incidente sul serbatoio j causi il collasso del serbatoio k per effetto domino.**

	elementi k	AT-F1	AT-F2	AT-F3	AT-F4	AT-F5	PV-A1	PV-A2	PV-A3	PV-A4	PV-A5	PV-A6
elementi j		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
AT-F1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
AT-F2	2	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
AT-F3	3	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
AT-F4	4	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
AT-F5	5	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
PV-A1	6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PV-A2	7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PV-A3	8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PV-A4	9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PV-A5	10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PV-A6	11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

La matrice mostra che i serbatoi pressurizzati sono esposti unicamente al rischio di effetto domino causato dall'esplosione di uno degli stessi, essendo i serbatoi atmosferici contenenti combustibile liquido posti a una distanza tale da evitare l'effetto domino causato da incendi di pozza. I serbatoi atmosferici, per effetto della loro disposizione e distanza, risultano sensibili all'effetto domino causato sia da esplosione che da incendio. I valori della probabilità di guasto totale  $DP_k$ , insieme agli indici di Massa Pesata e ai KPI relativi a ciascun serbatoio sono riassunti in Tabella 35. Si può osservare che la probabilità di guasto totale dei serbatoi è aumentata di un ordine di grandezza, rispetto alla probabilità di guasto dovuta al sisma, a causa dell'effetto domino. Gli indici di Massa pesata relativi a serbatoi pressurizzati presentano un valore simile a quello calcolato per serbatoi atmosferici a causa della elevata quantità di GPL che contengono, pari al 620% del limite definito all'articolo 8 della Direttiva Europea "Seveso II" (Council Directive 96/82/EC).

**Tabella 35 - Valori delle probabilità totali di guasto  $DP_k$ , degli indici di Massa pesata e dei KPI relativi ai diversi serbatoi e all'impianto nel suo complesso, ottenuti con il metodo semplificato per la valutazione del rischio NaTech.**

Elemento k	$DP_k$	Massa pesata	$KPI_I$	$KPI_T$	$KPI_E$
AT-F1	2,16E-03	0,00025	0,00006	0,00000	0,00001
AT-F2	2,58E-03	0,00030	0,00007	0,00000	0,00001
AT-F3	2,58E-03	0,00030	0,00007	0,00000	0,00001
AT-F4	2,58E-03	0,00030	0,00007	0,00000	0,00001
AT-F5	2,16E-03	0,00025	0,00006	0,00000	0,00001
PV-A1	4,55E-04	0,00047	0,00018	0,00000	0,00013
PV-A2	4,55E-04	0,00047	0,00018	0,00000	0,00013
PV-A3	4,55E-04	0,00047	0,00018	0,00000	0,00013
PV-A4	4,55E-04	0,00047	0,00018	0,00000	0,00013
PV-A5	4,55E-04	0,00047	0,00018	0,00000	0,00013
PV-A6	4,55E-04	0,00047	0,00018	0,00000	0,00013
Totale	/	/	0,00139	0,00000	0,00082

I KPI relativi all'impianto nel suo complesso, mostrati in Tabella 36, classificano l'impianto come a Basso rischio NaTech.

**Tabella 36 - KPI relativi all'impianto del caso studio 3.**

Tipo serbatoi	$KPI_I$	$KPI_T$	$KPI_E$	$KPI_G$	Rischio
Pressurizzati	0,00139	0,00000	0,00082	0,00161	Basso

L'incremento dei PLL ottenuti tramite la QRA, mostrati in Tabella 37, è praticamente nullo e indica che l'impianto è scarsamente sensibile ad eventi NaTech. Confrontando il  $KPI_G$  con il  $PLL_{ratio}$  si riscontra la coerenza tra i risultati ottenuti con il metodo semplificato a indici e i risultati ottenuti dalla QRA.

**Tabella 37 - PLL ricavati tramite QRA dell'impianto del caso studio 3 (Campedel *et al.* 2008).**

Tipo serbatoi	$PLL_{internal}$	$PLL_{seismic}$	$PLL_{ratio}$
Pressurizzati	6,02E-04	8,53E-04	2

#### **4.1.4. Commento ai risultati**

I risultati ottenuti per i casi in esame mostrano che il metodo di valutazione semplificata è in grado di dare una previsione approssimata del rischio di incidente rilevante iniziato da eventi sismici ma compatibile con i dettagliati risultati ottenuti da QRA. In particolare l'uso di indici di massa pesata dalla probabilità di guasto per la valutazione delle alternative che costituiscono l'input del modello ha permesso una elevata sensibilità all'intensità sismica, alla vulnerabilità dei differenti serbatoi considerati e all'incremento del rischio determinato dalla

possibilità di un effetto domino; requisiti indispensabili per un metodo di valutazione del rischio NaTech determinato dall'interazione tra eventi sismici e impianti industriali.

La normalizzazione delle masse rispetto ai limiti definiti all'articolo 8 della Direttiva Europea "Seveso II", già di per sé indicativi del rischio posto da una sostanza, insieme al sistema di pesi elaborati per descrivere l'importanza delle caratteristiche delle sostanze nel definire il rischio, ha fornito la possibilità di comparare gli effetti generati dal rilascio di sostanze differenti.

Nel suo complesso il modello è in grado di fornire le basi per una comparazione oggettiva dei livelli di rischio NaTech determinati da diversi impianti e apparecchiature potenzialmente soggetti ad eventi sismici. La cornice costituita dal metodo di valutazione semplificata elaborato in questo studio permette di selezionare, descrivere, organizzare ed aggregare le principali variabili influenti sul rischio NaTech al fine di ottenere degli indici di prestazione KPI che permettano di discriminare gli impianti che, determinando livelli di rischio non accettabile, necessitano di una valutazione più accurata e finalizzata alla riduzione e gestione del rischio.

## **4.2. Analisi di sensitività**

La sensibilità dei KPI, indicatori delle prestazioni dell'impianto rispetto al rischio di incidente rilevante iniziato da un evento sismico, è stata valutata attraverso la costruzione di appositi casi studio che mostrassero l'influenza di determinate variabili del modello sui valori assunti dagli indici elaborati per gli scenari relativi a Incendi, Dispersione di sostanze tossiche ed Esplosioni.

Le variabili di cui si vuole analizzare l'influenza sono:

- vulnerabilità sismica di differenti tipologie di serbatoio di stoccaggio
- vulnerabilità dei serbatoi all'effetto domino
- volatilità delle sostanze.

### **4.2.1. Vulnerabilità sismica**

L'influenza della vulnerabilità di differenti tipologie di stoccaggio a eventi sismici di varia intensità sui KPI è analizzata attraverso 3 *layout* molto semplificati, contenenti un unico serbatoio assoggettato a 3 valori di intensità sismica differenti. Per tali casi studio sarà affrontata la valutazione dei KPI assumendo che la massa di sostanze pericolose contenuta,

espressa come frazione rispetto al limite definito all'articolo 8 della Direttiva Europea "Seveso II" (*Council Directive 96/82/EC*), sia pari ad 1.

Le tipologie di serbatoio considerate nell'analisi sono:

- serbatoi cilindrici verticali atmosferici non ancorati (AT-UN)
- serbatoi cilindrici verticali atmosferici ancorati (AT-AN)
- serbatoi cilindrici orizzontali pressurizzati (PV).

I livelli di accelerazione orizzontale al suolo (PGA) considerati nell'analisi, espressi come frazione dell'accelerazione di gravità  $g$ , sono:

- 0,05g
- 0,15g
- 0,25g.

Si assume che i serbatoi atmosferici contengano una generica sostanza, classificata dal presente metodo come Infiammabile, Liquido alta volatilità ad Entalpia di combustione elevata, Tossica ad elevata tossicità ed Esplosiva, capace di generare scenari tipo incendi di pozza, dispersione di sostanze tossiche e VCE.

I serbatoi pressurizzati si assume contengano invece una generica sostanza classificata come Infiammabile, Gas compresso/liquefatto ad Entalpia di combustione elevata, Tossica a tossicità alta, Esplosiva stoccata a Pressione bassa, capace di generare scenari tipo incendi di gas, dispersione di sostanze tossiche, BLEVE e VCE.

Usando i metodi descritti al paragrafo 3.2.3, sono state calcolate le probabilità di guasto  $DP_j$  dovute all'evento sismico per tutti i serbatoi e per tutte le PGA scelte; i risultati sono mostrati in Tabella 38.

Le probabilità di guasto in generale aumentano all'aumentare dell'intensità sismica; si nota che i serbatoi atmosferici non ancorati sono i più sensibili a sismi di qualunque intensità. I serbatoi ancorati e i pressurizzati presentano una probabilità di guasto molto bassa per minime intensità sismiche, e all'aumentare dell'intensità sismica la probabilità va crescendo più per gli ancorati.

**Tabella 38 – Valori della probabilità di guasto  $DP_j$  assunta dai serbatoi in corrispondenza di diversi valori di PGA. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati.**

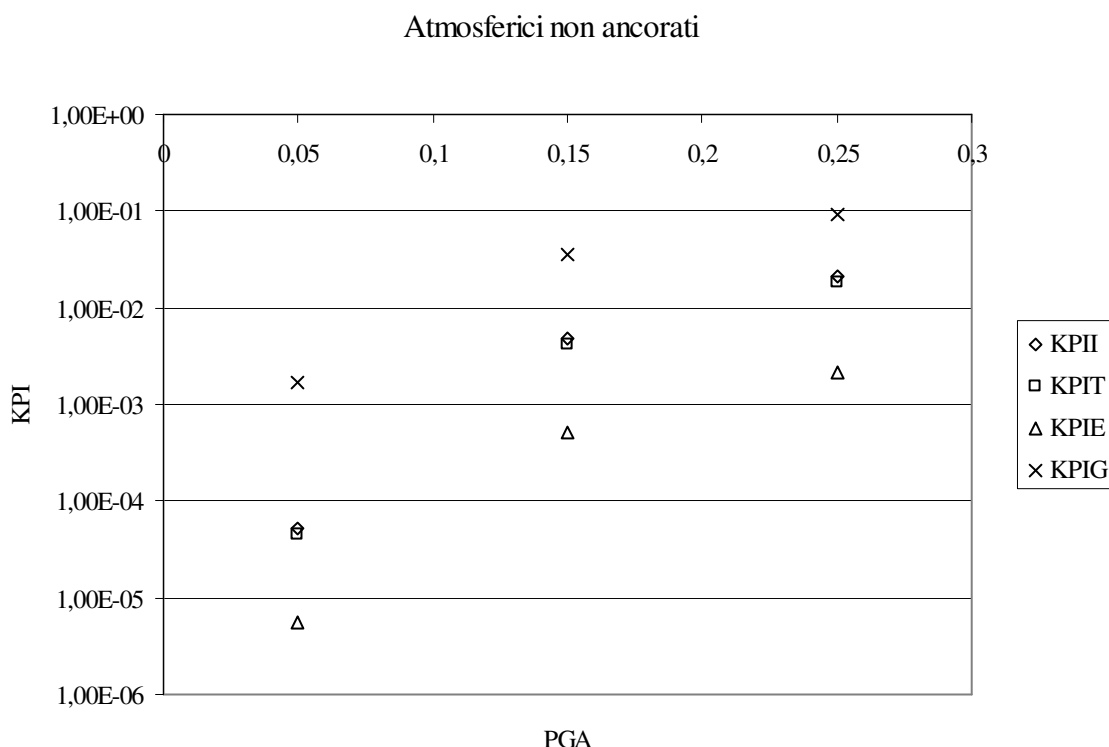
PGA	0,05g	0,15g	0,25g
At-Un	2,29E-04	2,11E-02	8,89E-02
At-An	3,65E-07	5,54E-04	6,66E-03
PV	3,43E-07	9,39E-05	7,82E-04



La valutazione dei KPI è basata sulle caratteristiche di pericolosità delle sostanze contenute negli stoccaggi già descritte, usando la procedura schematizzata in Figura 15 e i pesi assegnati alle variabili influenti sul rischio, elaborati nel paragrafo 3.3.4, sono stati calcolati i valori dei  $KPI_I$ ,  $KPI_T$  e  $KPI_E$  relativi a Incendi, Dispersione di sostanze tossiche ed Esplosioni per tutte le situazioni considerate; tali valori sono stati messi a confronto con metodo grafico per ogni tipologia di serbatoio considerato al fine di mostrare l'influenza della PGA sugli indici. Successivamente sono stati ricavati i valori degli indicatori globali  $KPI_G$ , attraverso l'Equazione 16, e diagrammati per evidenziare l'influenza del tipo di serbatoio sugli indici. I valori dei KPI relativi a serbatoi atmosferici non ancorati sono riassunti in Tabella 39; tali valori sono diagrammati e mostrati in Figura 18.

**Tabella 39 – KPI calcolati per serbatoi atmosferici non ancorati soggetti a diversi valori della PGA.**

PGA	0,05g	0,15g	0,25g
$KPI_I$	5,33E-05	4,91E-03	2,07E-02
$KPI_T$	4,60E-05	4,24E-03	1,79E-02
$KPI_E$	5,59E-06	5,14E-04	2,17E-03
$KPI_G$	1,71E-03	3,48E-02	9,10E-02



**Figura 18 – KPI calcolati in corrispondenza di differenti valori di PGA per serbatoi atmosferici non ancorati.**

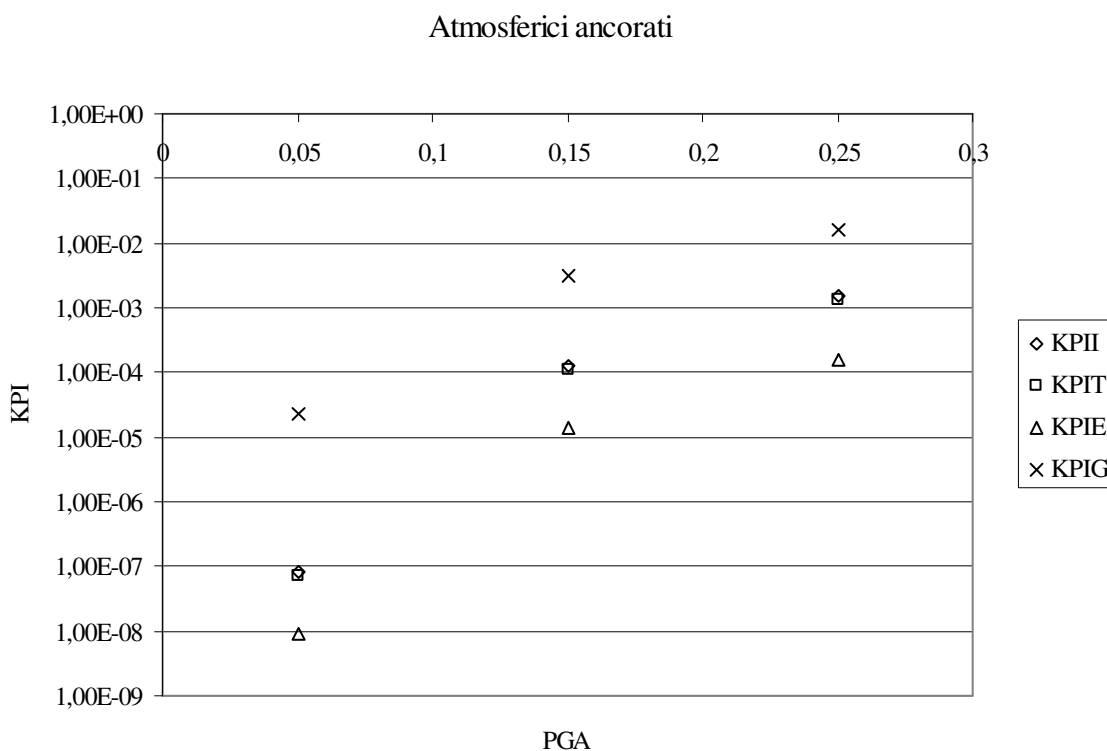
I valori assunti dai tre indici KPI, rappresentati su un diagramma a scala logaritmica, mostrano tutti la stessa forma funzionale, determinata dalla forma funzionale della probabilità di guasto per cause sismiche che, all'aumentare della PGA, tende asintoticamente a 1.

I valori dei KPI relativi a Incendi e Dispersione di sostanze tossiche sono molto simili; in effetti le gerarchie sviluppate per questi scenari hanno la stessa struttura e i relativi pesi non differiscono di molto, il  $KPI_E$  assume un valore molto inferiore agli altri. Il KPI globale, risultante dalla somma vettoriale dei tre KPI, è per definizione sempre superiore. Tutti gli indici infine variano in funzione della PGA su due ordini di grandezza, come imposto dalla funzione probabilità di guasto.

I valori dei KPI relativi a serbatoi atmosferici ancorati sono riassunti in Tabella 40; tali valori sono diagrammati e mostrati in Figura 19.

**Tabella 40 – KPI calcolati per serbatoi atmosferici ancorati in corrispondenza di diversi valori della PGA.**

PGA	0,05g	0,15g	0,25g
$KPI_I$	8,49E-08	1,29E-04	1,55E-03
$KPI_T$	7,33E-08	1,11E-04	1,34E-03
$KPI_E$	8,90E-09	1,35E-05	1,63E-04
$KPI_G$	2,33E-05	3,08E-03	1,62E-02



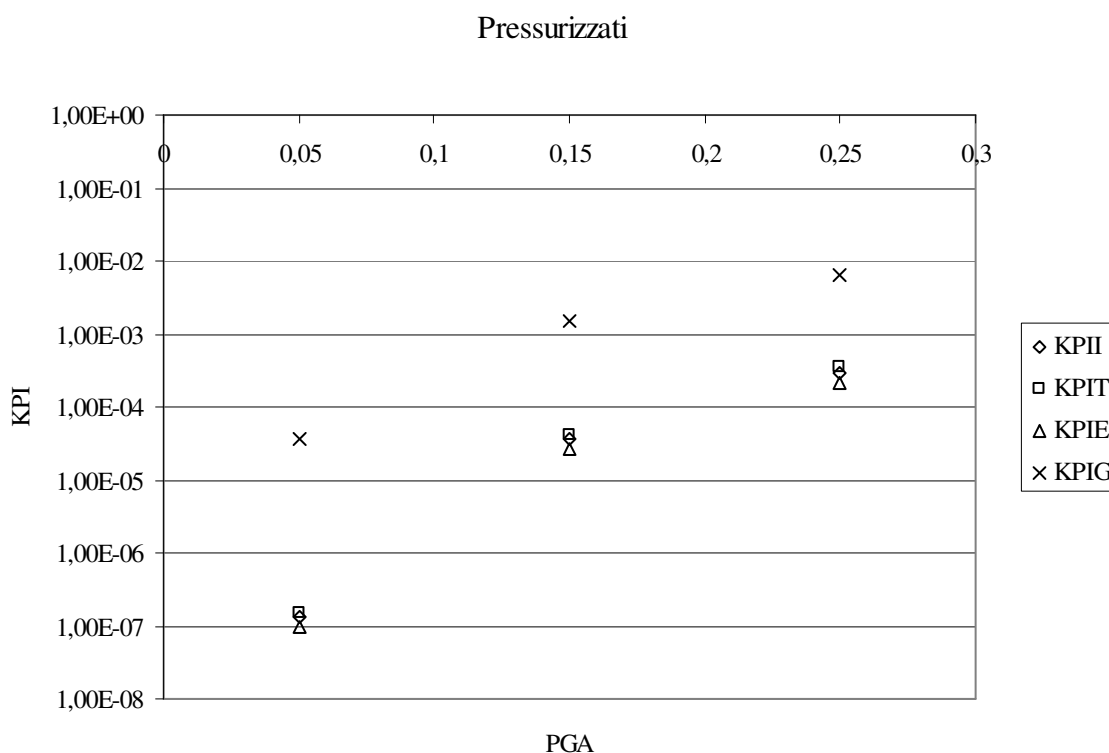
**Figura 19 – KPI calcolati in corrispondenza di differenti valori di PGA per serbatoi atmosferici ancorati.**

Per i serbatoi atmosferici ancorati valgono le considerazioni del caso precedente, in quanto le caratteristiche di pericolosità delle sostanze e i pesi usati per descrivere queste due situazioni sono gli stessi, è da notare però che il valore degli indici è inferiore di quasi un ordine di grandezza rispetto a quelli calcolati per serbatoi atmosferici non ancorati e che tali indici variano in funzione della PGA su quattro ordini di grandezza, come imposto dalla probabilità di guasto per cause sismiche, riassunta in Tabella 38.

I valori dei KPI relativi a serbatoi pressurizzati sono riassunti in Tabella 41; tali valori sono diagrammati e mostrati in Figura 20.

**Tabella 41 – KPI calcolati per serbatoi pressurizzati soggetti a diversi valori della PGA.**

PGA	0,05g	0,15g	0,25g
KPI <sub>I</sub>	1,29E-07	3,55E-05	2,95E-04
KPI <sub>T</sub>	1,52E-07	4,17E-05	3,47E-04
KPI <sub>E</sub>	9,52E-08	2,61E-05	2,17E-04
KPI <sub>G</sub>	3,66E-05	1,54E-03	6,34E-03



**Figura 20 –KPI calcolati in corrispondenza di differenti valori di PGA per serbatoi pressurizzati.**

I KPI relativi a serbatoi pressurizzati mostrano la forma funzionale asintotica dovuta alla probabilità di guasto; i loro valori variano in funzione della PGA su quasi quattro ordini di grandezza. I KPI relativi ad Incendi e Dispersione di sostanze tossiche sono simili per effetto

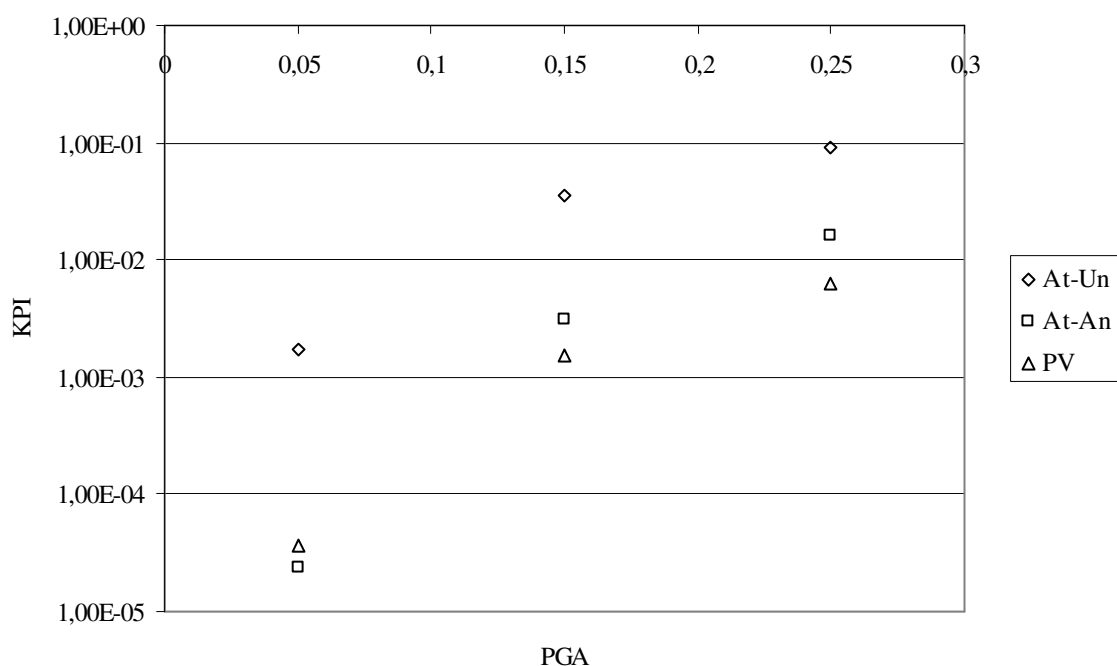
della similarità tra i relativi pesi e gerarchie, il  $KPI_E$  assume un valore maggiore rispetto ai casi precedenti per effetto della maggiore pericolosità dei Gas compressi/liquefatti, capaci di generare scenari di esplosione tipo BLEVE e VCE che solo sostanze pressurizzate possono generare.

I valori dei  $KPI_G$  relativi alle differenti tipologie di serbatoi sono riassunti in Tabella 42; tali valori sono diagrammati e mostrati in Figura 21.

**Tabella 42 – $KPI_G$  calcolati per differenti serbatoi in corrispondenza di diversi valori della PGA. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati.**

$KPI_G$	0,05g	0,15g	0,25g
At-Un	1,71E-03	3,48E-02	9,10E-02
At-An	2,33E-05	3,08E-03	1,62E-02
PV	3,66E-05	1,54E-03	6,34E-03

Confronto vulnerabilità serbatoi



**Figura 21 – $KPI_G$  calcolati per differenti valori di PGA e tipologia di serbatoio. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati.**

Il confronto tra i  $KPI_G$  ricavati a differenti PGA mostra che i serbatoi atmosferici non ancorati sono i più vulnerabili agli effetti di un sisma, passando da una intensità sismica di 0,05g a una di 0,15g l'incremento dell'indice è superiore a un ordine di grandezza, incrementando ulteriormente l'intensità i KPI mostrano di essere vicini al loro massimo valore, imposto dall'asintoto corrispondente a una probabilità di guasto per cause sismiche pari a 1.

I  $KPI_G$  relativi a serbatoi atmosferici ancorati mostrano anch'essi di essere vicini a un asintoto per intensità sismiche elevate, la vulnerabilità di questi serbatoi è sempre inferiore rispetto a quella dei non ancorati; inoltre per basse intensità sismiche si può notare una vulnerabilità decisamente bassa, determinata dalla presenza dell'ancoraggio; i KPI variano in funzione della PGA su 3 ordini di grandezza. Gli stoccaggi pressurizzati, nonostante presentano probabilità di guasto nettamente inferiori a tutte le altre tipologie di serbatoi, determinano valori dei KPI simili e generalmente di poco inferiori a quelli dovuti a serbatoi atmosferici non ancorati; questo comportamento è dovuto alla maggiore pericolosità assegnata alle sostanze stoccate in pressione e classificate come Gas compressi/liquefatti, che contribuisce ad elevare il valore del rischio rappresentato dagli stoccaggi di queste sostanze.

L'analisi effettuata ha mostrato che gli indici di prestazione ricavati con l'uso del metodo semplificato sono fortemente correlati all'intensità sismica dalle funzioni di vulnerabilità usate nella QRA e tratte da Antonioni *et al.* (2009).

#### **4.2.2. Vulnerabilità all'effetto domino**

L'influenza della vulnerabilità di differenti tipologie di serbatoio all'effetto domino sui KPI è analizzata attraverso 12 *layout* molto semplificati, 4 per ogni tipologia di stoccaggio, che rappresentano l'effetto della presenza di un secondo serbatoio sui valori dei KPI. Si assume una PGA pari a 0,20g per tutti i layout e una massa di sostanze pericolose contenuta in ogni serbatoio, definita come frazione rispetto al limite definito all'articolo 8 della Direttiva Europea "Seveso II" (*Council Directive 96/82/EC*), pari ad 1.

Le tipologie di serbatoio considerate nell'analisi sono:

- serbatoi cilindrici verticali atmosferici non ancorati (AT-UN)
- serbatoi cilindrici verticali atmosferici ancorati (AT-AN)
- serbatoi cilindrici orizzontali pressurizzati (PV).

Per ognuna di queste tipologie di serbatoio saranno valutati i KPI relativi a layout con:

- solo il serbatoio considerato
- il serbatoio considerato e un secondo serbatoio pressurizzato
- il serbatoio considerato e un secondo serbatoio atmosferico ancorato
- il serbatoio considerato e un secondo serbatoio atmosferico non ancorato.

Si assume inoltre che i serbatoi atmosferici contengano una generica sostanza, classificata dal presente metodo come Infiammabile, Liquido alta volatilità ad Entalpia di combustione elevata, Tossica ad elevata tossicità ed Esplosiva, capace di generare scenari tipo incendi di pozza, dispersione di sostanze tossiche e VCE. I serbatoi pressurizzati si assume contengano

una generica sostanza classificata come Infiammabile, Gas compresso/liquefatto ad Entalpia di combustione elevata, Tossica a tossicità alta, Esplosiva stoccata a Pressione bassa, capace di generare scenari tipo incendi di gas, dispersione di sostanze tossiche, BLEVE e VCE.

**Tabella 43 – – Valori della probabilità di guasto  $DP_j$  assunta dai serbatoi per una PGA pari a 0,20g. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati.**

PGA=0,20g	$DP_j$
At-Un	4,98E-02
At-An	2,41E-03
PV	3,22E-04

Le probabilità condizionate  $P_{jk}$  che descrivono la probabilità del propagarsi di uno scenario incidentale dal serbatoio j al serbatoio k sono poste pari a 1; usando i valori delle probabilità di guasto dei serbatoi per cause sismiche  $DP_j$ , mostrate in Tabella 43, e l'Equazione 5, sono determinati i valori delle probabilità di guasto totali  $DP_k$  dei serbatoi oggetto dell'analisi; tali valori sono riportati in Tabella 44.

**Tabella 44– Valori della probabilità di guasto totale  $DP_k$  assunta da serbatoi soggetti all'effetto domino causato dalla presenza di differenti tipologie di serbatoio in corrispondenza di una PGA pari a 0,20 g. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati.**

$DP_k$	Singolo	PV	At-An	At-Un
At-Un	4,98E-02	5,01E-02	5,21E-02	9,71E-02
At-An	2,41E-03	2,73E-03	4,82E-03	5,21E-02
PV	3,22E-04	6,43E-04	2,73E-03	5,01E-02

Le probabilità di guasto mostrano che i serbatoi atmosferici non ancorati sono i più vulnerabili all'evento sismico, se vicini a serbatoi con bassa vulnerabilità sismica il valore della probabilità di guasto totale praticamente non varia; mentre nel caso in cui il serbatoio vicino sia di tipo atmosferico non ancorato la probabilità di guasto cresce a causa della possibile propagazione di un incidente per effetto domino. I serbatoi atmosferici ancorati mostrano probabilità di guasto più basse dei precedenti e la vicinanza di serbatoi a bassa vulnerabilità sismica non ne influenza il valore; se vicini a serbatoi atmosferici non ancorati però mostrano un incremento della probabilità di guasto di un ordine di grandezza, determinato dall'effetto domino. I serbatoi pressurizzati sono i meno sensibili all'attività sismica, se vicini a serbatoi atmosferici però la probabilità di guasto totale cresce notevolmente a causa della possibile propagazione di un incidente su tali serbatoi, più

vulnerabili, ai serbatoi pressurizzati che vedrebbero così inficiata la loro maggiore robustezza ad eventi sismici. Nel caso di un serbatoio pressurizzato vicino ad un serbatoio atmosferico non ancorato, la probabilità di guasto totale del primo cresce di due ordini di grandezza arrivando ad essere praticamente identica alla probabilità di guasto del serbatoio più vulnerabile. I serbatoi pressurizzati, proprio per la loro robustezza, risultano essere i più sfavoriti da un potenziale effetto domino causato dal collasso di serbatoi più vulnerabili.

**Tabella 45 – Valori dei  $KPI_G$  calcolati per differenti layout di coppie di serbatoi soggetti all’effetto domino causato dalla presenza di differenti tipologie di serbatoio in corrispondenza di una PGA pari a 0,20 g. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati.**

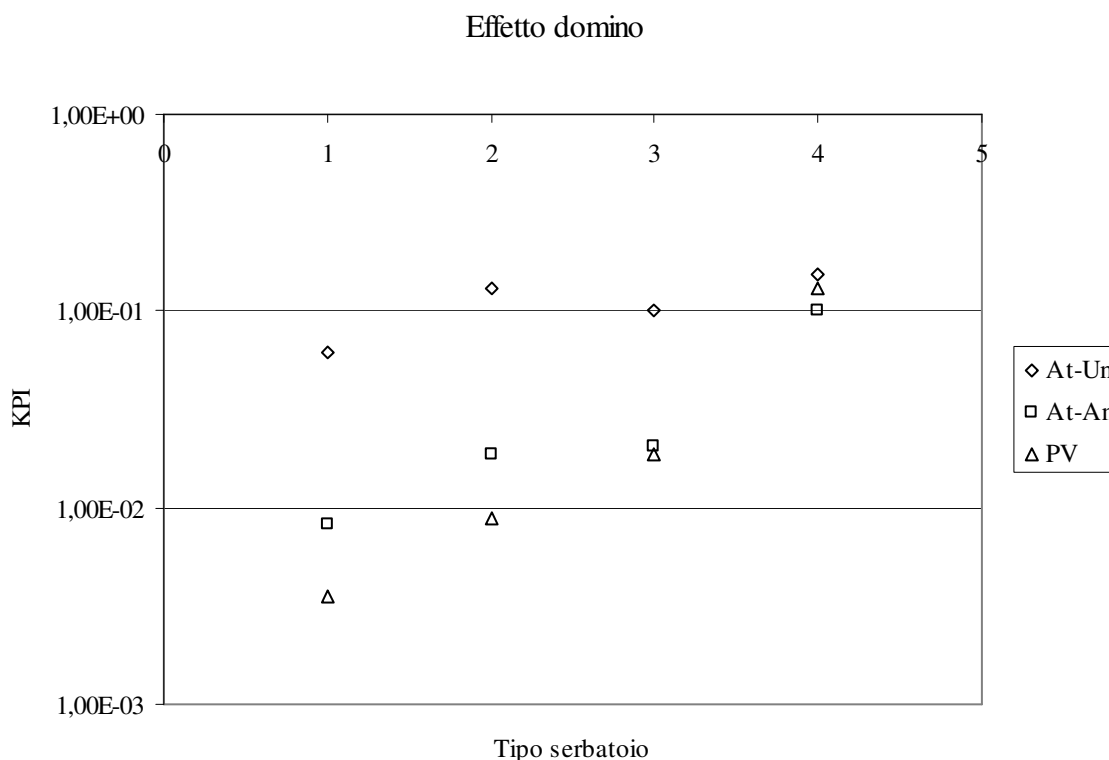
$KPI_G$	Singolo	PV	At-An	At-Un
ID caso	1	2	3	4
At-Un	6,18E-02	1,30E-01	1,01E-01	1,53E-01
At-An	8,21E-03	1,87E-02	2,07E-02	1,01E-01
PV	3,51E-03	8,84E-03	1,87E-02	1,30E-01

In Tabella 45 sono riassunti i  $KPI_G$  calcolati per i layout considerati nell’analisi, tali valori sono diagrammati e mostrati in Figura 22. I layout sono così organizzati: 3 costituiti da un singolo serbatoio e 9 costituiti da una coppia di serbatoi il cui nome è riportato in riga e in colonna alla tabella. Si nota che alcuni valori sono uguali, questo è dovuto al fatto che delle 9 combinazioni possibili di coppie di serbatoi 3 sono ripetute.

I serbatoi atmosferici non ancorati determinano un valore alto e abbastanza stabile dei  $KPI_G$ , nel primo caso il singolo serbatoio determina già un KPI elevato rispetto ad altri serbatoi; nel caso 2 il KPI cresce, non a causa del propagarsi di un incidente dal serbatoio pressurizzato al serbatoio atmosferico ma per il motivo contrario, anche il serbatoio pressurizzato infatti contiene una sostanza pericolosa e la vicinanza del serbatoio atmosferico lo rende molto vulnerabile. Nei casi 3 e 4 la presenza di altri serbatoi atmosferici contribuisce in maniera sensibile alla determinazione del KPI.

I serbatoi atmosferici ancorati determinano, da soli, per effetto della loro vulnerabilità, un valore dei KPI inferiore di un ordine di grandezza rispetto ai non ancorati; nel caso 2 la presenza di un secondo serbatoio pressurizzato determina un incremento del rischio dovuto, come già detto, alla vulnerabilità dello stesso all’effetto domino. Nel caso 3 il risultato è cambiato di poco, ma a determinarlo questa volta sono i due serbatoi atmosferici ancorati presenti nel *layout*; nel caso 4 la presenza di un serbatoio non ancorato causa un incremento del KPI rispetto al caso 3 di quasi un ordine di grandezza; poiché i due serbatoi contengono lo

stesso tipo e quantità di sostanza, l'incremento osservato è dovuto unicamente all'effetto domino.



**Figura 22 – Valori dei KPI calcolati per differenti layout di coppie di serbatoi soggetti all'effetto domino causato dalla presenza di differenti tipologie di serbatoio in corrispondenza di una PGA pari a 0,20 g. At-Un: serbatoi atmosferici non ancorati; At-An: serbatoi atmosferici ancorati; PV: serbatoi pressurizzati.**

I serbatoi pressurizzati sono i meno vulnerabili ad eventi sismici, nel caso 2 la presenza di un secondo serbatoio pressurizzato determina un incremento dei KPI dovuto principalmente alla pericolosità della sostanza che esso contiene più che all'effetto domino, nel caso 3 un ulteriore incremento dei KPI è dovuto alla presenza di un serbatoio atmosferico, più vulnerabile e quindi capace di incrementare la probabilità di guasto totale del primo serbatoio, nonostante la sostanza contenuta sia meno pericolosa di un Gas compresso/liquefatto. Nel caso 4 la presenza di un serbatoio atmosferico non ancorato, estremamente vulnerabile al sisma, determina un incremento del KPI dovuto unicamente all'effetto domino.

L'analisi effettuata ha evidenziato che il modello risponde in modo plausibile alla possibilità di un effetto domino causato dal mancato rispetto delle distanze di sicurezza necessarie ad evitare la propagazione di incidenti.



### 4.2.3. Volatilità delle sostanze

L'influenza della volatilità di diverse sostanze sui KPI è analizzata attraverso dei layout molto semplificati comprendenti un unico serbatoio.

Si valutano i KPI relativi a sostanze con differente volatilità classificate come:

- Gas compressi/liquefatti
- Liquidi alta volatilità
- Liquidi Bassa volatilità
- Solidi/polveri fini.

Le sostanze classificate come Gas compressi/liquefatti sono contenute in serbatoi pressurizzati, tutte le altre sostanze si assume siano contenute in serbatoi atmosferici non ancorati.

Nella valutazione dei KPI si farà riferimento a due situazioni differenti: nella prima si assume un indice di massa pesata pari a 1 per tutte le sostanze, valore assolutamente non realistico perché non tiene conto delle differenti probabilità di guasto dei serbatoi, scelto per mostrare il peso assegnato a ciascuna delle volatilità delle sostanze; nella seconda si assumerà una massa di sostanze pericolose, espressa come frazione rispetto al limite definito all'articolo 8 della Direttiva Europea "Seveso II", pari ad 1 e probabilità di guasto realistiche, calcolate per una PGA di 0,20g.

Si assume ai fini dell'analisi che la sostanza classificata come Gas compresso/liquefatto sia Infiammabile ad Entalpia di combustione elevata, Tossica a tossicità alta, Esplosiva stoccata a Pressione bassa, capace di generare scenari tipo incendi di gas, dispersione di sostanze tossiche, BLEVE e VCE.

La sostanza classificata come Liquido alta volatilità sarà considerata Infiammabile ad Entalpia di combustione elevata, Tossica a tossicità alta, Esplosiva, capace di generare scenari tipo incendi di pozza, dispersione di sostanze tossiche e VCE.

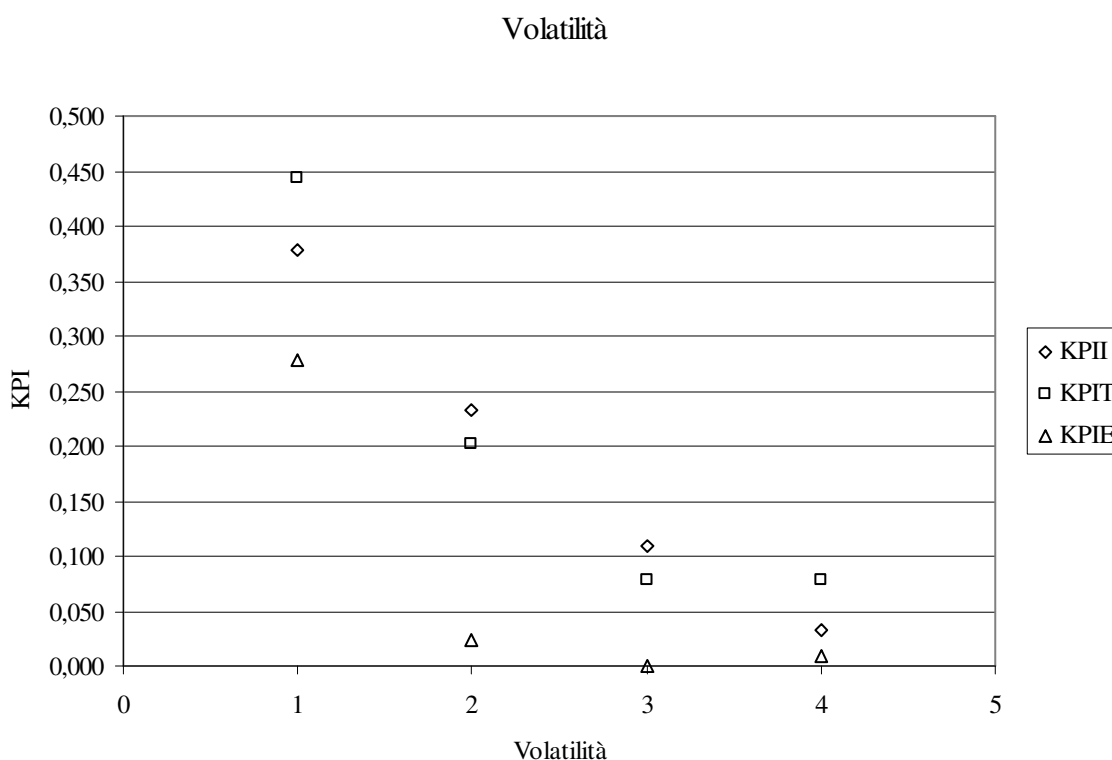
La sostanza classificata come Liquido bassa volatilità sarà considerata Infiammabile ad Entalpia di combustione elevata, Tossica a tossicità alta, non Esplosiva, capace di generare scenari tipo incendi di pozza e dispersione di sostanze tossiche.

La sostanza classificata come Solido/polvere fine sarà considerata Infiammabile ad Entalpia di combustione elevata, Tossica a tossicità alta, Esplosiva, capace di generare scenari tipo incendi di materiale solido, dispersione di sostanze tossiche e VCE.

Assumendo una massa pesata WM pari a 1 e calcolando i KPI per tutte le sostanze a diversa volatilità con le caratteristiche di pericolosità appena descritte si ottengono quelli che in pratica sono i pesi assegnati ai differenti rami delle gerarchie, cioè il massimo valore che il KPI riguardante un determinato tipo di scenario può assumere; tali KPI sono mostrati in Tabella 46 e diagrammati in Figura 23.

**Tabella 46 –KPI calcolati per sostanze con differenti caratteristiche di volatilità per un indice di Massa Pesata pari a 1.**

	Gas compresso/liquefatto	Liquido alta volatilità	Liquido bassa volatilità	Solido/Polvere fine
ID caso	1	2	3	4
KPI <sub>I</sub>	0,377	0,233	0,109	0,032
KPI <sub>T</sub>	0,444	0,201	0,077	0,077
KPI <sub>E</sub>	0,277	0,024	0,000	0,010
KPI <sub>G</sub>	0,747	0,457	0,261	0,192



**Figura 23 – KPI calcolati per sostanze con differenti caratteristiche di volatilità per un indice di Massa Pesata pari a 1. 1: Gas compressi/liquefatti; 2: Liquidi alta volatilità; 3: Liquidi bassa volatilità; 4: Solidi/polveri fini.**

Si nota che a sostanze classificate come Gas compresso/liquefatto corrispondono valori dei KPI elevati, compresi tra 0,25 e 0,45; i Liquidi ad alta volatilità presentano degli indici

relativi a Incendi e Dispersioni di sostanze tossiche compresi tra 0,20 e 0,25, mentre il  $KPI_E$  è di un ordine di grandezza inferiore perché tali sostanze non sono in grado di generare gli scenari di esplosione a maggiore probabilità di accadimento, come BLEVE ed esplosioni meccaniche. I Liquidi a bassa volatilità rappresentano un rischio decisamente inferiore rispetto alle precedenti categorie, i KPI relativi a incendi e dispersione sono bassi, il  $KPI_E$  è nullo perché le sostanze così classificate non sono in grado di produrre vapori sufficienti a generare una VCE; le sostanze classificate come Solido/polvere fine determinano anch'esse un basso livello di rischio, i relativi KPI non superano il valore di 0,1; è da notare che per queste sostanze lo scenario considerato come più pericoloso risulta essere quello della dispersione di sostanze tossiche.

La seconda prova fa riferimento a una situazione più realistica, con le probabilità di guasto  $DP_j$  calcolate tramite i modelli di vulnerabilità sismica per una PGA pari a 0,20g e una massa normalizzata posta pari a 1; i valori delle probabilità  $DP_j$  sono mostrati in Tabella 47; si nota una differenza di due ordini di grandezza tra le due tipologie di serbatoio considerate nell'analisi.

**Tabella 47 – Valori delle probabilità di guasto  $DP_j$  calcolati in corrispondenza di una PGA pari a 0,20g. At-Un: serbatoio atmosferici non ancorati; PV: serbatoi pressurizzati.**

$DP_j$	PGA=0,20
At-Un	4,98E-02
PV	3,22E-04

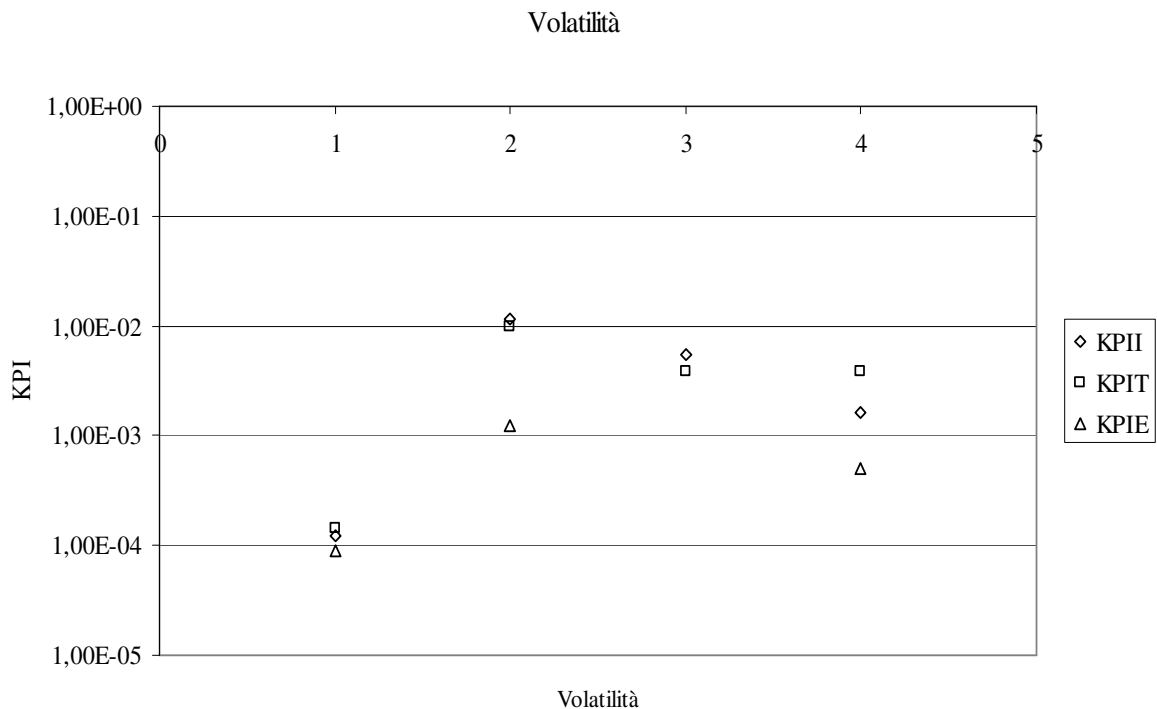
I KPI che si possono ricavare in questa situazione per le sostanze con le caratteristiche già descritte sono mostrati in Tabella 48 e diagrammati in Figura 24.

**Tabella 48 – KPI calcolati per sostanze con differenti caratteristiche di volatilità per una PGA pari a 0,20g.**

	Gas compresso/liquefatto	Liquido alta volatilità	Liquido bassa volatilità	Solido/Polvere fine
ID caso	1	2	3	4
$KPI_I$	1,21E-04	1,16E-02	5,41E-03	1,60E-03
$KPI_T$	1,43E-04	1,00E-02	3,85E-03	3,86E-03
$KPI_E$	8,93E-05	1,22E-03	0,00E+00	4,96E-04
$KPI_G$	3,51E-03	6,18E-02	3,53E-02	2,60E-02

Si può notare che in questa situazione, per effetto della bassa vulnerabilità dei serbatoi pressurizzati, i KPI relativi a Gas compressi/liquefatti sono inferiori di 4 ordini di grandezza inferiori rispetto alla situazione precedente, i Liquidi ad alta volatilità hanno KPI relativi a

incendi e dispersioni di due ordini di grandezza superiori rispetto a Gas compressi/liquefatti, sempre per effetto della differente vulnerabilità sismica; il  $KPI_E$  assume un valore basso, compatibilmente con l'analisi dell'influenza della volatilità effettuata per  $WM=1$ . I Liquidi a bassa volatilità mostrano valori di  $KPI_I$  e  $KPI_T$  simili, a causa della similarità delle gerarchie, mentre il  $KPI_E$  relativo a esplosioni come già spiegato è nullo. Le sostanze classificate come Solidi/polveri fini mostrano KPI simili a quelli mostrati da liquidi, da notare è che il KPI relativo alla rischio di dispersione di sostanze tossiche è per queste sostanze maggiore di quello stimato per incendi, ad indicare la maggiore pericolosità del primo scenario.

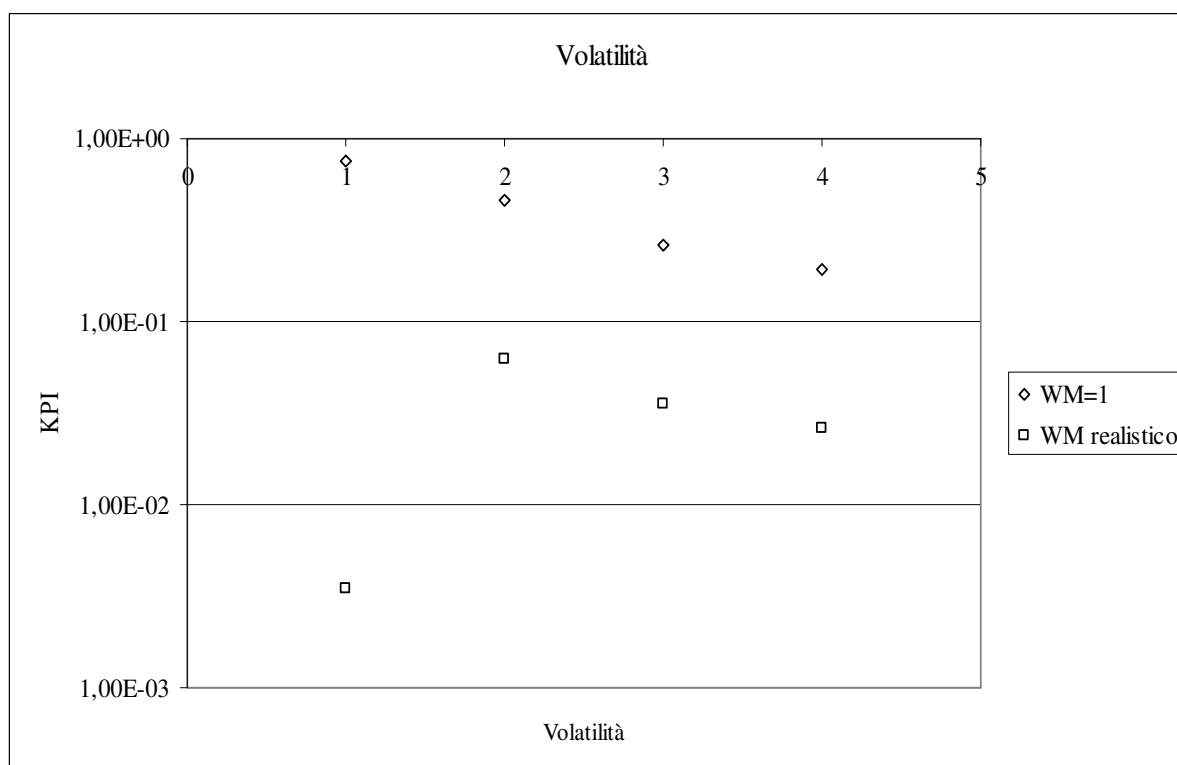


**Figura 24 – KPI calcolati per sostanze con differenti caratteristiche di volatilità in corrispondenza di una PGA pari a 0,20g. 1: Gas compressi/liquefatti; 2: Liquidi alta volatilità; 3: Liquidi bassa volatilità; 4: Solidi/polveri fini.**

In Tabella 49 sono riportati i valori dei  $KPI_G$  ricavati per le situazioni in esame, diagrammati in Figura 25 ai fini del confronto. Si nota come per i gas compressi/liquefatti la differenza tra i KPI sia notevole, differenza determinata dal valore della probabilità di guasto. Per le sostanze contenute in serbatoi atmosferici invece la differenza tra gli indici ricavati per le due situazioni è minore e costante, poiché a queste sostanze è associato lo stesso tipo di serbatoio.

**Tabella 49 – KPI<sub>G</sub> calcolati per sostanze con differenti caratteristiche di volatilità in due situazioni: indice di massa pesata uguale a 1 (WM=1); frazione massiva pari a 1 e PGA pari a 0,20g (WM realistico).**

	Gas compresso/liquefatto	Liquido alta volatilità	Liquido bassa volatilità	Solido/Polvere fine
KPI <sub>G</sub>	1	2	3	4
WM=1	7,47E-01	4,57E-01	2,61E-01	1,92E-01
WM realistico	3,51E-03	6,18E-02	3,53E-02	2,60E-02



**Figura 25 – KPI calcolati per sostanze con differenti caratteristiche di volatilità in due situazioni: indice di massa pesata uguale a 1 (WM=1); frazione massiva pari a 1 e PGA pari a 0,20g (WM realistico). 1: Gas compressi/liquefatti; 2: Liquidi alta volatilità; 3: Liquidi bassa volatilità; 4: Solidi/polveri fini.**

Quello che in generale è possibile dire è che a sostanze con volatilità elevata è associato un livello di rischio elevato; le probabilità di guasto effettive delle diverse tipologie di serbatoi però, essendo questi associati indissolubilmente a sostanze con determinate caratteristiche di volatilità, finisce con il modificare sensibilmente l'assetto dato alle gerarchie nell'indicare la maggiore o minore pericolosità intrinseca di uno scenario dando una descrizione del rischio che comprenda anche una stima della verosimiglianza di un evento incidentale.

## 5. CONCLUSIONI

I danni causati a impianti industriali e stoccaggi da eventi catastrofici come i terremoti possono produrre rilasci multipli e simultanei di sostanze pericolose, la compresenza degli effetti legati al sisma e agli scenari incidentali da esso generati contribuisce sinergicamente ad aumentare la probabilità che la popolazione sia esposta a sostanze pericolose o a pericoli secondari quali incendi o esplosioni. Rilasci di sostanze pericolose causati da disastri naturali sono documentati in letteratura e prendono il nome di eventi NaTech. Quando un impianto è posizionato in una zona a rischio sismico si trova esposto a cause esterne di guasto che possono incrementare l'intensità e la frequenza di differenti scenari incidentali anche di alcuni ordini di grandezza, sottoponendo le aree circostanti a livelli di rischio non accettabili. E' quindi necessaria l'elaborazione di specifiche procedure per la valutazione e la gestione del rischio derivante dagli scenari incidentali generati dalla potenziale esposizione di impianti industriali ad eventi sismici.

L'obiettivo del presente lavoro di tesi si inserisce in questo contesto e riguarda l'elaborazione di un metodo di *screening* per la valutazione qualitativa del rischio indotto dall'interazione tra eventi sismici e grossi stoccaggi di sostanze pericolose al fine di comparare differenti impianti e individuare le situazioni a rischio elevato, per le quali è necessario procedere ad una valutazione più dettagliata ottenuta applicando i metodi della QRA al problema del rischio NaTech. Attraverso la definizione di indici di prestazione si è cercato di caratterizzare il livello di rischio NaTech determinato da un dato impianto posto in una zona con una data sismicità; la valutazione degli indici è stata effettuata con il metodo di scelta multicriterio *Analytic Hierarchy Process*.

Il primo passo nella costruzione del metodo è stato definire l'intensità sismica e identificare le apparecchiature che per le loro caratteristiche determinano un livello di rischio elevato; per tali apparecchiature si è definita la vulnerabilità tramite funzioni che correlano l'intensità dell'evento sismico alla probabilità di guasto, elaborate nell'ambito della QRA di eventi NaTech.

L'elevata gravità degli scenari incidentali potenzialmente generati da un sisma ha portato alla necessità di un metodo per valutare le conseguenze del propagarsi di incidenti per effetto domino a diverse unità di impianto; tale problema è stato affrontato definendo uno schema per

il calcolo della probabilità di guasto totale delle apparecchiature, dovuta sia all'evento sismico che all'effetto domino.

Attraverso l'analisi dei metodi quantitativi semplificati per la stima delle conseguenze di incidenti industriali sono stati individuati gli scenari potenzialmente generati e le principali caratteristiche delle sostanze che influiscono sull'intensità di tali scenari.

Le informazioni ricavate dalle precedenti analisi sono state organizzate tramite l'uso del metodo AHP in tre distinte gerarchie che decompongono il problema della determinazione del rischio rappresentato da scenari quali Incendi, Dispersioni di sostanze tossiche ed Esplosioni in sottoproblemi ai quali può essere data risposta indipendente tramite l'elaborazione di indici qualitativi successivamente aggregati in un indice di prestazione globale  $KPI_G$  per fornire la risposta al problema principale.

Il metodo di valutazione semplificato è stato quindi convalidato comparando i risultati ottenuti, distinti in 3 classi di sensibilità dell'impianto al rischio NaTech, corrispondenti a Basso (per  $KPI_G$  minori di  $10^{-2}$ ), Medio (per  $KPI_G$  compresi tra  $10^{-2}$  e  $10^{-1}$ ) o Alto (per  $KPI_G$  maggiori di  $10^{-1}$ ), con i risultati di valutazioni quantitative del rischio tratte dalla letteratura sintetizzati in un unico valore definito come incremento del *Potential Life Loss Index* dovuto a cause sismiche. Infine è stata condotta una analisi di sensitività che evidenziasse la risposta del modello in differenti situazioni.

I risultati ottenuti con il metodo di screening sono in buon accordo con i risultati ottenuti da QRA, la sensibilità alle principali variabili influenti sul rischio è elevata e la procedura per la valutazione dell'effetto domino esprime ragionevolmente l'incremento del rischio determinato dalla possibile propagazione di incidenti; il metodo permette di valutare il rischio posto dalle apparecchiature prese singolarmente e dall'impianto nel suo complesso e di effettuare comparazioni tra situazioni differenti basandosi su una valutazioni oggettive benché semplificate.

## 6. ALLEGATO

**Tabella 50 – Caratteristiche dell’impianto esaminato nel caso studio 1 (Campedel *et al.* 2008).**

ID caso	Milazzo An
Layout	Figura 3a pag.1237
Tabella 5 pag.1239	
PGA (%g)	0,302
Tempo di ritorno (anni)	10000

Nome Serbatoio	AT-A1	AT-A2	AT-A3	AT-B1	AT-B2	AT-B3
Tabella 3 pag. 1238						
Sostanza	benzina	benzina	benzina	benzina	benzina	benzina
Pericolosità sostanza	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile
stato fisico	liquido	liquido	liquido	liquido	liquido	liquido
Quantità (10 <sup>3</sup> Kg)	7976	7976	7976	4897	4897	4897
Limite ex art. 8 Direttiva Seveso (10 <sup>3</sup> Kg)	50000	50000	50000	50000	50000	50000
Quantità (% art.8 Direttiva Seveso)	15,95	15,95	15,95	9,79	9,79	9,79
Tabella 3 pag. 1238						
Caratteristiche apparecchio						
Tipologia	cilindro vert.	cilindro vert.	cilindro vert.	cilindro vert.	cilindro vert.	cilindro vert.
Pressione operativa	atmosferica	atmosferica	atmosferica	atmosferica	atmosferica	atmosferica
Ancoraggio	ancorato	ancorato	ancorato	ancorato	ancorato	ancorato
Livello riempimento	near full	near full	near full	near full	near full	near full
Figura 4b pag. 1240						
Damage state (DS)	collasso	collasso	collasso	collasso	collasso	collasso

**Tabella 51 – Caratteristiche dell’impianto esaminato nel caso studio 1 (Campedel *et al.* 2008).**

ID caso	Milazzo An
Layout	Figura 3a pag.1237

Nome Serbatoio	AT-B4	AT-B5	AT-B6	AT-B7	AT-B8	Totale
Tabella 3 pag. 1238						
Sostanza	benzina	benzina	benzina	benzina	benzina	
Pericolosità sostanza	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile	
stato fisico	liquido	liquido	liquido	liquido	liquido	
Quantità (10 <sup>3</sup> Kg)	4897	4897	4897	7176	7176	67661
Limite ex art. 8 Direttiva Seveso (10 <sup>3</sup> Kg)	50000	50000	50000	50000	50000	50000
Quantità (% art.8 Direttiva Seveso)	9,79	9,79	9,79	14,35	14,35	135,32
Tabella 3 pag. 1238						
Caratteristiche apparecchio						
Tipologia	cilindro vert.	cilindro vert.	cilindro vert.	cilindro vert.	cilindro vert.	
Pressione operativa	atmosferica	atmosferica	atmosferica	atmosferica	atmosferica	
Ancoraggio	ancorato	ancorato	ancorato	ancorato	ancorato	
Livello riempimento	near full	near full	near full	near full	near full	
Figura 4b pag. 1240						
Damage state (DS)	collasso	collasso	collasso	collasso	collasso	



**Tabella 52 – Caratteristiche dell’impianto esaminato nel caso studio 2 (Campedel *et al.* 2008).**

ID caso Roma  
 Layout Figura 3b pag.1237  
 Tabella 5 pag.1239  
 PGA (%g) 0,159  
 Tempo di ritorno (anni) 10000

Nome Serbatoio	PV-A1	PV-A2	PV-A3	PV-A4	PV-A5	PV-A6
Tabella 3 pag. 1238						
Sostanza	LPG	LPG	LPG	LPG	LPG	LPG
Pericolosità sostanza	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile
stato fisico	gas liquefatto	gas liquefatto	gas liquefatto	gas liquefatto	gas liquefatto	gas liquefatto
Quantità (10 <sup>3</sup> Kg)	151	151	151	151	151	151
Limite ex art. 8 Direttiva Seveso (10 <sup>3</sup> Kg)	200	200	200	200	200	200
Quantità (% art.8 Direttiva Seveso)	75,68	75,68	75,68	75,68	75,68	75,68
Tabella 3 pag. 1238						
Caratteristiche apparecchio						
Tipologia	cilindro orizz.	cilindro orizz.	cilindro orizz.	cilindro orizz.	cilindro orizz.	cilindro orizz.
Pressione operativa	Pressurizzato	Pressurizzato	Pressurizzato	Pressurizzato	Pressurizzato	Pressurizzato
Ancoraggio	//	//	//	//	//	//
Livello riempimento	near full	near full	near full	near full	near full	near full
Figura 4b pag. 1240						
Damage state (DS)	collasso	collasso	collasso	collasso	collasso	collasso

**Tabella 53 – Caratteristiche dell’impianto esaminato nel caso studio 2 (Campedel *et al.* 2008).**

ID caso Roma  
 Layout Figura 3b pag.1237

Nome Serbatoio	PV-B1	PV-B2	PV-B3	PV-B4	PV-B5	Totale
Tabella 3 pag. 1238						
Sostanza	LPG	LPG	LPG	LPG	LPG	
Pericolosità sostanza	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile	
stato fisico	gas liquefatto	gas liquefatto	gas liquefatto	gas liquefatto	gas liquefatto	totale
Quantità (10 <sup>3</sup> Kg)	79	79	79	79	79	1304
Limite ex art. 8 Direttiva Seveso (10 <sup>3</sup> Kg)	200	200	200	200	200	200
Quantità (% art.8 Direttiva Seveso)	39,62	39,62	39,62	39,62	39,62	652,18
Tabella 3 pag. 1238						
Caratteristiche apparecchio						
Tipologia	cilindro orizz.	cilindro orizz.	cilindro orizz.	cilindro orizz.	cilindro orizz.	cilindro orizz.
Pressione operativa	Pressurizzato	Pressurizzato	Pressurizzato	Pressurizzato	Pressurizzato	Pressurizzato
Ancoraggio	//	//	//	//	//	//
Livello riempimento	near full	near full	near full	near full	near full	near full
Figura 4b pag. 1240						
Damage state (DS)	collasso	collasso	collasso	collasso	collasso	collasso

**Tabella 54 – Caratteristiche dell’impianto esaminato nel caso studio 3 (Campedel *et al.* 2008).**

ID caso Livorno  
 Layout Figura 3c pag.1237  
 Tabella 5 pag.1239  
 PGA (%g) 0,143  
 Tempo di ritorno (anni) 1000

Nome Serbatoio	AT-F1	AT-F2	AT-F3	AT-F4	AT-F5	Totale
Tabella 3 pag. 1238						
Sostanza	benzina	benzina	benzina	benzina	benzina	
Pericolosità sostanza	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile	
stato fisico	liquido	liquido	liquido	liquido	liquido	
Quantità (10 <sup>3</sup> Kg)	5769,75	5769,75	5769,75	5769,75	5769,75	28848,75
Limite ex art. 8 Direttiva Seveso (10 <sup>3</sup> Kg)	50000	50000	50000	50000	50000	50000
Quantità (% art.8 Direttiva Seveso)	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	57,70
Tabella 3 pag. 1238						
Caratteristiche apparecchio						
Tipologia	cilindro vert.	cilindro vert.	cilindro vert.	cilindro vert.	cilindro vert.	
Pressione operativa	atmosferica	atmosferica	atmosferica	atmosferica	atmosferica	
Ancoraggio	anchored	anchored	anchored	anchored	anchored	
Livello riempimento	near full	near full	near full	near full	near full	
Figura 4b pag. 1240						
Damage state (DS)	collasso	collasso	collasso	collasso	collasso	

**Tabella 55 – Caratteristiche dell’impianto esaminato nel caso studio 3 (Campedel *et al.* 2008).**

ID caso Livorno  
 Layout Figura 3c pag.1237

Nome Serbatoio	PV-A1	PV-A2	PV-A3	PV-A4	PV-A5	PV-A6
Tabella 3 pag. 1238						
Sostanza	LPG	LPG	LPG	LPG	LPG	LPG
Pericolosità sostanza	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile	infiammabile
stato fisico	gas liquefatto	gas liquefatto	gas liquefatto	gas liquefatto	gas liquefatto	gas liquefatto
Quantità (10 <sup>3</sup> Kg)	206,99	206,99	206,99	206,99	206,99	206,99
Limite ex art. 8 Direttiva Seveso (10 <sup>3</sup> Kg)	200	200	200	200	200	200
Quantità (% art.8 Direttiva Seveso)	103,49	103,49	103,49	103,49	103,49	103,49
Tabella 3 pag. 1238						
Caratteristiche apparecchio						
Tipologia	cilindro orizz.	cilindro orizz.	cilindro orizz.	cilindro orizz.	cilindro orizz.	cilindro orizz.
Pressione operativa	Pressurizzato	Pressurizzato	Pressurizzato	Pressurizzato	Pressurizzato	Pressurizzato
Ancoraggio	//	//	//	//	//	//
Livello riempimento	near full	near full	near full	near full	near full	near full
Figura 4b pag. 1240						
Damage state (DS)	collasso	collasso	collasso	collasso	collasso	collasso

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Antonioni, G., G. Spadoni, V. Cozzani (2007). "A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events." *Journal of Hazardous Materials* 147(1-2): 48-59.
- Antonioni, G., S. Bonvicini, G. Spadoni, V. Cozzani (2009). "Development of a framework for the risk assessment of Na-Tech accidental events." *Reliability Engineering & System Safety* 94(9): 1442-1450.
- Busini V., E. Marzo, A. Callioni, R. Rota (to be submitted). "Definition of a short cut methodology for assessing the earthquake-related NaTech risk."
- Campedel, M., V. Cozzani, A. Garcia-Agreda, E. Salzano (2008). "Extending the quantitative assessment of industrial risks to earthquake effects." *Risk Analysis* 28(5): 1231-1246.
- Council Directive 67/548/EEC* of 27 June 1967 on the approximation of laws, regulations and administrative provisions relating to the classification, packaging and labelling of dangerous substances. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31967L0548:en:NOT>
- Council Directive 96/82/EC* of 9 December 1996 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31996L0082:EN:HTML>
- Cozzani, V., A. Tugnoli, E. Salzano (2007). "Prevention of domino effect: From active and passive strategies to inherently safer design." *Journal of Hazardous Materials* 139(2): 209-219.
- Cruz, A. M. and N. Okada (2008). "Methodology for preliminary assessment of NaTech risk in urban areas." *Natural Hazards* 46(2): 199-220.

- Fabbrocino, G., I. Iervolino, F. Orlando, E. Salzano (2005). "Quantitative risk analysis of oil storage facilities in seismic areas." *Journal of Hazardous Materials* 123(1-3): 61-69.
- Finney, D.J. (1971). "Probit Analysis." Cambridge. UK: Cambridge University Press.
- Galderisi, A., A. Ceudech, M. Pistucci (2008). "A method for na-tech risk assessment as supporting tool for land use planning mitigation strategies." *Natural Hazards* 46(2): 221-241.
- Hazus, (1997). "Earthquake Loss Estimation Methodology." National Institute of Building Science, Risk Management Solutions, Menlo Park, CA.
- iNTeg-Risk (2008). "Early Recognition, Monitoring and Integrated Management of Emerging, New Technology Related Risks." Large-scale integrating project, 7<sup>th</sup> FP, Theme 4 NMP – Nanosciences, Nanotechnologies, Materials and New Production Technologies. Collaborative Project. Grant agreement no.: CP-IP 213345-2. <http://www.integrisk.eu-vri.eu/>
- Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (2004). "Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale." [http://zonesismiche.mi.ingv.it/mappa\\_ps\\_apr04/italia.html](http://zonesismiche.mi.ingv.it/mappa_ps_apr04/italia.html)
- Krausmann, E. and F. Mushtaq (2008). "A qualitative NaTech damage scale for the impact of floods on selected industrial facilities." *Natural Hazards* 46(2): 179-197.
- Lees, F. P. (1996). "*Loss Prevention in the Process Industries*", 2<sup>nd</sup> ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Meletti C., Montaldo V. (2007). Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di  $a_g$ . Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D2, <http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>.
- Ordinanza PCM 3519 del 28 aprile 2006: "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone".
- Rota, R., G. Nano (2007). "Introduzione alla Affidabilità e Sicurezza nell'Industria di Processo." Pitagora Editrice, Bologna. Italia.

- Rota, R., S. Caragliano, D. Manca, S. Brambilla (2008). "A Short cut methodology for flood-technological risk assessment." *Chemical Engineering Transactions*.
- Saaty, T.L. (1980). "The Analytic Hierarchy Process". McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T.L. (2000). "Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process." Vol. VI, AHP series, RWS Publications Pittsburgh, PA. USA.
- Saaty, T.L. (2003). "Why the Magic Number Seven Plus or Minus Two." *Mathematical and Computer Modelling* 38: 233-244.
- Salzano, E., I. Iervolino, G. Fabbrocino (2003). "Seismic risk of atmospheric storage tanks in the framework of quantitative risk analysis." *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 16: 403-409.
- Showalter, P. S. and M. F. Myers (1994). "NATURAL DISASTERS IN THE UNITED-STATES AS RELEASE AGENTS OF OIL, CHEMICALS, OR RADIOLOGICAL MATERIALS BETWEEN 1980-1989 - ANALYSIS AND RECOMMENDATIONS." *Risk Analysis* 14(2): 169-182.
- Steinberg, L. J., H. Sengul, A. M. Cruz (2008). "NaTech risk and management: an assessment of the state of the art." *Natural Hazards* 46(2): 143-152.
- Young, S., L. Balluz, J. Malilay (2004). "Natural and technologic hazardous material releases during and after natural disasters: a review." *Science of the Total Environment* 322(1-3): 3-20.