

# **POLITECNICO DI MILANO**

Scuola di Ingegneria dei Processi Industriali

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



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

Relatore:

**Valentina BUSINI**

Correlatore:

**Enrico MARZO**

Tesi di laurea di:

**Paola ZUFFELLATO Matr. 752013**

**Anno accademico 2010/2011**

## Sommario

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	30
<b>2</b>	<b>STATO DELL'ARTE</b>	32
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	35
<b>3</b>	<b>MATERIALI E METODI</b>	42
3.1	Obiettivo	42
3.2	Approccio al problema	42
3.2.1	Caratterizzazione dell'evento alluvionale	43
3.2.2	Stima della probabilità di danno	48
3.2.3	Fattore di Incremento del Rischio	49
3.2.4	Identificazione delle apparecchiature bersaglio	50
3.2.5	Pericolosità delle sostanze	54
3.3	<i>Analytic Hierarchy Process</i>	67
3.3.1	Valutazione delle alternative	68
3.3.2	Costruzione delle gerarchie	69
3.3.3	Aggregazione degli indici	78
3.3.4	Definizione dei pesi	79
<b>4</b>	<b>RISULTATI</b>	92
4.1	Convalida	92
4.1.1	Caso studio 1: Poggio Renatico	95
4.1.2	Caso studio 2: Ferrara	103
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	106
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	108

## Indice delle Figure

Figura 1: Fasce PAI di esondazione della zona limitrofa al fiume Po'. Il verde caratterizza la fascia A, il blu la fascia B e in arancione è evidenziata la fascia C. ....	45
Figura 2: Sezione di deflusso dell'acqua vista in 3D.....	46
Figura 3: Sezione di deflusso vista in sezione. L'area è quella evidenziata in rosso: è un rettangolo che ha come altezza la differenza di quota tra il limite della fascia PAI e alveo del fiume, e come base la distanza tra i limiti della fascia. ....	46
Figura 4: Perimetro bagnato, evidenziato in rosso. È il perimetro della sezione di deflusso del fiume. ....	47
Figura 5: Rappresentazione schematica per definire la pendenza del tratto d'acqua che interessa l'impianto, calcolata come direttrice dell'ipotenusa del triangolo rettangolo che ha come cateti la differenza di quota $h$ dei confini dell'impianto, e la proiezione $L$ della lunghezza dell'impianto sull'orizzontale. ....	48
Figura 6: Probabilità di danno delle strutture in funzione dell'altezza dell'acqua e del quadrato della velocità di impatto, ricavato dal metodo semplificato proposto da Antonioni <i>et al.</i> (2009). ....	49
Figura 7: Tassonomia degli eventi incidentali generati da sostanze pericolose con caratteristiche differenti (Rota e Nano, 2007). ....	55
Figura 8: Gerarchia per la valutazione del rischio NaTech relativo ad incendi; ai nodi sono mostrati i.....	72
Figura 9: 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.....	74
Figura 10: 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 (Marzo <i>et al.</i> (to be submitted)). ....	77
Figura 11: Rappresentazione grafica dei valori assunti dal Rischio Locale, ottenuti da QRA. Linea tratteggiata: probabilità di guasto per cause alluvionali non inclusa; linea continua: probabilità di guasto per cause alluvionali inclusa (Antonioni <i>et al.</i> 2008). ....	93
Figura 12: Curva F-N ottenuta dall'aggregazione dei valori del Rischio Locale. Area a strisce: probabilità di guasto per cause alluvionali non inclusa; area a pallini: probabilità di guasto per cause alluvionali inclusa (Antonioni <i>et al.</i> 2008). ....	94
Figura 13: Procedura per la valutazione semplificata del rischio di incidente rilevante iniziato da alluvione. ....	97
Figura 14: cartografia del sito di interesse, posto nel territorio di Ferrara e nella zona di esondazione del fiume Reno.....	98

Figura 15: Schema dei serbatoi presenti nell'impianto del Caso Studio 1 contenenti Ammoniaca Anidra.....	99
Figura 16: <i>layout</i> dei serbatoi dell'impianto del Caso Studio 2. ....	103

## Indice delle Tabelle

Tabella 1: Valori del coefficiente di rugosità di Manning per diversi tipi di terreno. .....	47
Tabella 2: Indici per la valutazione di rischio preliminare delle apparecchiature in funzione della fase di stoccaggio delle sostanze contenute.....	52
Tabella 3: Modalità di impatto dell'acqua e tipo di danno strutturale; da essi derivano le categorie di rilascio delle sostanze contenute in serbatoi atmosferici. ....	53
Tabella 4: Modalità di impatto dell'acqua e tipo di danno strutturale; da essi derivano le categorie di rilascio delle sostanze contenute in serbatoi pressurizzati.....	53
Tabella 5: Variabili principali influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Infiammabili. ....	60
Tabella 6: Classi di stabilità in relazione alla velocità del vento, al grado di insolazione e copertura notturna del cielo.....	61
Tabella 7: Variabili principali influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Tossiche. ....	63
Tabella 8: Variabili principali che influenzano il rischio determinato da sostanze classificate come Esplosive. ....	66
Tabella 9: Scala semantica usata dal metodo AHP per il confronto a coppie (Saaty 1980). ....	80
Tabella 10: Matrice dei confronti a coppie per la volatilità di sostanze Infiammabili. .....	84
Tabella 11: Matrice dei confronti a coppie normalizzata per la volatilità di sostanze Infiammabili.....	85
Tabella 12: Pesi per la volatilità di sostanze Infiammabili, da utilizzare nella gerarchia relativa a Incendi rappresentata in Figura 8. ....	85
Tabella 13: Matrice dei confronti a coppie per l'entalpia di combustione di sostanze Infiammabili.....	86
Tabella 14: Pesi per l'entalpia di combustione di sostanze Infiammabili, da utilizzare nella gerarchia relativa a Incendi rappresentata in Figura 8. .....	86
Tabella 15: Matrice dei confronti a coppie per la volatilità di sostanze Tossiche..	87
Tabella 16: Pesi per la volatilità di sostanze Tossiche, da utilizzare nella gerarchia relativa a Dispersione di sostanze tossiche rappresentata in Figura 9. .....	87

Tabella 17: Matrice dei confronti a coppie per la tossicità di sostanze Tossiche. .	88
Tabella 18: Pesi per la tossicità di sostanze Tossiche, da utilizzare nella gerarchia relativa a Dispersione di sostanze tossiche rappresentata in Figura 9. ....	88
Tabella 19: Matrice dei confronti a coppie per la probabilità di accadimento di differenti scenari di esplosione.....	89
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 10. ....	89
Tabella 21: Matrice dei confronti a coppie per la pressione di stoccaggio di Gas compressi/liquefatti. ....	89
Tabella 22: Pesi per la per la pressione di stoccaggio di Gas compressi/liquefatti, da utilizzare nella gerarchia relativa ad Esplosioni rappresentata in Figura 10. ....	89
Tabella 23: Matrice dei confronti a coppie per la volatilità di sostanze Infiammabili capaci di generare VCE.....	90
Tabella 24: Pesi per la per la volatilità di sostanze Infiammabili capaci di generare VCE, da utilizzare nella gerarchia relativa a Esplosioni rappresentata in Figura 10. ....	91
Tabella 25: Parametri ambientali per caratterizzare la magnitudo dell'evento alluvionale del Caso Studio 1.....	98
Tabella 26: Parametri che caratterizzano l'evento alluvionale: <i>Damage Probability</i> , ricavata dal metodo grafico di Antonioni <i>et al.</i> (2009), e Fattore di Incremento del Rischio relativi al Caso Studio1.....	99
Tabella 27: valori della massa di ammoniaca anidra presente nei serbatoi per il Caso Studio 1.....	100
Tabella 28: valori della massa presente nei serbatoi del Caso Studio 1, massa percentuale, massa pesata per ogni serbatoi e indice di massa pesata. ....	100
Tabella 29: Valori dei KPI del Caso Studio 1 relativi a Incendio, Dispersione di sostanze tossiche, Esplosioni e Indice di Rischio Globale. ....	101
Tabella 30: Indici di rischio ricavati dalla QRA del Caso Studio 1.....	102
Tabella 31: Confronti tra indici di rischio del Caso Studio 1. $PLL_{ratio}$ ricavato dalla QRA e $KPI_G$ ricavato con il metodo AHP. Entrambi gli indici definiscono un livello di rischio MEDIO. ....	102
Tabella 32: Parametri ambientali e <i>Damage Probability</i> del Caso Studio 2.....	103
Tabella 33: Massa di Ammoniaca Anidra stoccata nei serbatoi analizzati nel Caso Studio 2. ....	103
Tabella 34: Valori di Massa stoccata, Massa percentuale e Massa Pesata per ogni serbatoio analizzato nel Caso Studio 2, e Indice Globale di Massa Pesata. ....	104
Tabella 35: <i>Key Performance Indicator</i> per caratterizzare il rischio presente nell'impianto trattato nel Caso Studio 2 rispetto a Incendi, Dispersione di sostanze Tossiche e Esplosioni, e indice Globale di Rischio. ....	104

Tabella 36: Indici di rischio ricavati dalla QRA del Caso Studio 2.....	105
Tabella 37: Confronto tra i livelli di rischio ricavati da una QRA e dall'analisi qualitativa del Caso Studio 2; entrambi gli indici mostrano un livello di rischio medio.....	105

## Indice delle Equazioni

Equazione 1: Velocità d’impatto dell’acqua contro l’impianto, funzione del coefficiente di Rugosità di Manning, Sezione di deflusso, Perimetro bagnato e Pendenza dell’acqua. ....	48
Equazione 2: Fattore di Incremento del Rischio, funzione della DP e dei tempi di ritorno della fascia C e della fascia in cui è situato l’impianto. ....	50
Equazione 3: Potenza termica irraggiata da un pool-fire. ....	58
Equazione 4: Superficie di una pozza di liquido non confinata. ....	58
Equazione 5: Velocità di bruciamento massiva di un combustibile liquido. ....	58
Equazione 6: Potenza termica irraggiata da un fireball. ....	58
Equazione 7: Durata di un fireball.....	59
Equazione 8: Espressione approssimata per la potenza irraggiata da un fireball. ....	59
Equazione 9: Irraggiamento da sorgente puntiforme. ....	59
Equazione 10: Espressione approssimata per la superficie interessata dagli effetti di una dispersione di sostanze tossiche. ....	62
Equazione 11: Relazione tra distanza, sovrappressione incidente ed energia liberata per una esplosione. ....	64
Equazione 12: Espressione approssimata per la superficie interessata dagli effetti di una esplosione. ....	64
Equazione 13: Espressione approssimata per il calcolo dell’energia liberata da una esplosione meccanica.....	64
Equazione 14: Indice di Massa Pesata per il j-esimo serbatoio, calcolato dal prodotto tra Fattore di Incremento del Rischio e Massa percentuale contenuta nel serbatoio.....	68
Equazione 15: Formula per la sintesi dei KPI relativi a differenti scenari incidentali in un unico indice.....	79
Equazione 16: <i>Consistency Index</i> (C.I.) per Matrici dei confronti a coppie. $\lambda_{max}$ : autovalore massimo della matrice. ....	82
Equazione 17: <i>Consistency Ratio</i> per Matrici dei confronti a coppie.....	82
Equazione 18: Incremento dell’indice PLL a causa di eventi alluvionali. ....	95

## 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 alluvioni che fornisca le basi per una comparazione oggettiva, benché semplificata, del rischio posto da differenti impianti potenzialmente soggetti a eventi alluvionale. 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)*. Esso permette di confrontare parametri non commensurabili e condensarli in un indice di prestazione qualitativo, compreso nell'intervallo 0 – 1, che esprime il soddisfacimento dei criteri influenti sul problema oggetto della decisione. A conclusione dello studio il metodo è stato convalidato attraverso il confronto con i risultati di analisi quantitative del rischio NaTech tratte dalla letteratura.

**Keywords:** Na-Tech; Incidenti industriali; Disastri naturali; Allagamenti; Analytic Hierarchy Process

## 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 rischio naturale può agire quindi 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 (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 si propone di elaborare di un metodo per la valutazione semplificata del rischio NaTech determinato da alluvioni 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 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, 1980), 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 Antonioni *et al.* (2009).

## **Materiali e metodi**

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

- definizione delle caratteristiche dell'evento alluvionale
- identificazione delle apparecchiature bersaglio
- ricerca di funzioni che definiscano la correlazione tra intensità dell'evento naturale e probabilità di guasto delle 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 (Antonioni *et al.* 2009).

### **Caratterizzazione dell'evento alluvionale**

Un evento naturale viene caratterizzato attraverso magnitudo e frequenza di accadimento.

L'intensità dell'evento alluvionale è definita in base a due parametri principali: livello idrico e velocità con cui l'acqua impatta l'impianto. Per definire questi valori è necessario studiare la cartografia del territorio in cui è situato l'impianto; in particolare in questo lavoro è stato fatto riferimento alle fasce definite nel progetto di Piano di stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI), definite dall'Autorità del Bacino del fiume Po'. Esse definiscono l'estensione delle superfici limitrofe a un bacino, suddivise nelle tre fasce di esondazione: fascia A, fascia di deflusso della piena, fascia B, di esondazione e fascia C, area di inondazione per la piena catastrofica.

Identificata la fascia in cui è situato l'impianto si misurano le altitudini dell'impianto e dei limiti della fascia, attraverso strumenti di facile utilizzo e reperibilità (*Google Earth*). La differenza delle due quote fornisce il livello idrico con cui l'impianto verrà sommerso nel caso si verificasse l'alluvione. La velocità d'impatto dell'acqua è definita dalla seguente formula:

$$v = \frac{1}{n} \left( \frac{A}{p} \right)^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}}$$

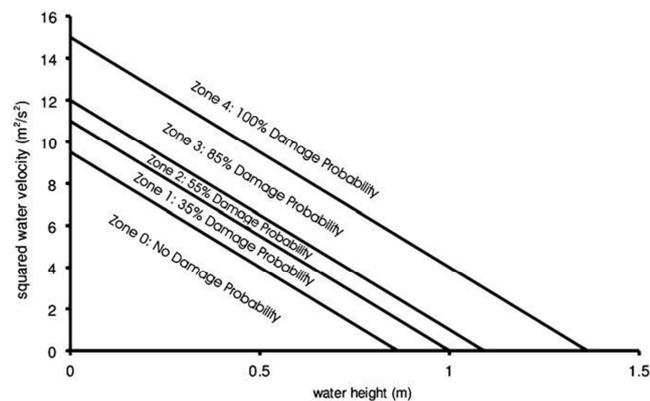
**Equazione A: Velocità d'impatto dell'acqua contro l'impianto.**

I parametri da cui dipende la velocità sono:

- n: coefficiente di rugosità di Manning. Definisce la rugosità del territorio in funzione del tipo di terreno che lo caratterizza. È stato calcolato come media pesata dei coefficienti delle porzioni di terreno che compongono la fascia, per la loro estensione.
- A: sezione di deflusso. È l'area verticale, trasversale al fiume, che passa dall'impianto; è approssimata con un rettangolo la cui base è la distanza tra i limiti della fascia PAI e l'altezza è la differenza di quota tra limite della fascia e fiume.

- p: perimetro bagnato. È il perimetro della sezione di deflusso.
- s: pendenza del tratto d'acqua in prossimità dell'impianto. È definita come la direttrice dell'ipotenusa del triangolo rettangolo i cui cateti sono uno la differenza di quote dei confini dell'impianto, l'altro la proiezione della lunghezza dell'impianto sull'orizzontale, lungo la direttrice del fiume.

Una volta che l'acqua ha impattato contro le apparecchiature, si caratterizza la loro probabilità di danno, *Damage Probability* (DP). In letteratura non sono presenti dei modelli per caratterizzare il fenomeno e i dati raccolti sugli incidenti passati non sono sufficientemente completi di tutte le informazioni necessarie alla costruzione di un modello. Si è perciò deciso di fare affidamento a un modello semplificato, sviluppato da Antonioni *et al.* (2009), il quale sfrutta i parametri di severità della inondazione per definire la probabilità di danno delle apparecchiature. La DP è funzione del livello idrico e del quadrato della velocità d'impatto dell'acqua, come mostrato in Figura A.



**Figura A: Damage Probability dell'evento alluvionale, funzione del livello idrico e del quadrato della velocità d'impatto dell'acqua.**

Per caratterizzare la frequenza di accadimento dell'evento naturale è stato introdotto il Fattore di Incremento del Rischio ( $F_{ir}$ ). Esso mette in relazione la DP con il tempo di ritorno caratteristico della fascia PAI in cui si trova l'impianto attraverso la seguente equazione:

$$F_{ir} = DP \cdot \frac{t_{rc}}{t_{ri}}$$

**Equazione B: Fattore di Incremento del Rischio, funzione della DP e dei tempi di ritorno della fascia C e della fascia in cui si trova l'impianto.**

Il Fattore di Incremento del Rischio è calcolato moltiplicando la DP per il rapporto tra il tempo caratteristico della fascia PAI C (500 anni) e quello della fascia in cui si trova l'impianto (200 anni per la B e 50 anni per la fascia A). Dato che la maggior parte degli impianti dell'industria di processo è situata in fascia C, è stata scelta questa fascia come riferimento, che avrà quindi rapporto tra i tempi di ritorno unitario e  $F_{ir}$  pari alla DP a

cui corrisponde un incremento di rischio nullo. Le altre due fasce hanno tempi di ritorno minori, e quindi un livello di rischio complessivamente maggiore.

### **Identificazione delle apparecchiature bersaglio**

Un esteso lavoro dedicato all'identificazione delle apparecchiature tipicamente danneggiate in un evento alluvionale, 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). 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*), *flashfire* e *VCE* (*Vapor Cloud Explosion*) per i pressurizzati.

Il metodo per la valutazione semplificata del NaTech qui proposto, con l'obiettivo di analizzare il problema del rischio usando un numero di variabili contenuto, considera come apparecchiature bersaglio dell'evento alluvionale 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.

### **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, Esplosive e Reattive con acqua. 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, poolfire* e incendi di materiale solido.

La potenza termica irraggiata 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. L'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 A.

**Tabella A: Variabili 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 alla quantità definita art.8 Direttiva "Seveso II" ( <i>Council Directive 96/82/EC</i> )

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 loro volatilità. Le principali variabili influenti sul rischio relativo alla dispersione di sostanze Tossiche e la loro classificazione sono riassunte in Tabella B.

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

Variabili influenti	Classificazione variabili
Volatilità	Gas compressi/liquefatti Liquidi alta volatilità ( $P^0(T_{amb}) > 5 \text{ KPa}$ ) 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 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 C sono riassunte le principali variabili influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Esplosive.

**Tabella C - Variabili 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 ( $D < 50 \mu\text{m}$ )
	Entalpia di combustione	Elevata (> 40 MJ/Kg) Bassa (< 40 MJ/Kg)
	Massa	Frazione rispetto quantità definite 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 art.8 Direttiva "Seveso II" (Council Directive 96/82/EC)

Le sostanze Reattive con acqua sono quelle classificate come R14, R15, R29 dalla Direttiva Europea 67/548/EEC (Council Directive 67/548/EEC). Nel caso in cui la reazione porti a un componente classificato come pericoloso, secondo le caratteristiche definite precedentemente, si ipotizza che la reazione vada a totale compimento, andando a formare la maggior quantità possibile di prodotti. I prodotti di reazione vengono trattati come se fossero altre sostanze stoccate in impianto.

### **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 sotto-problema 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 sotto-criteri individuati alla base della gerarchia attraverso dei punteggi definiti con una scala normalizzata nell'intervallo 0-1.

Decomponendo il problema in sotto-problemi, relativi criteri e sotto-criteri,

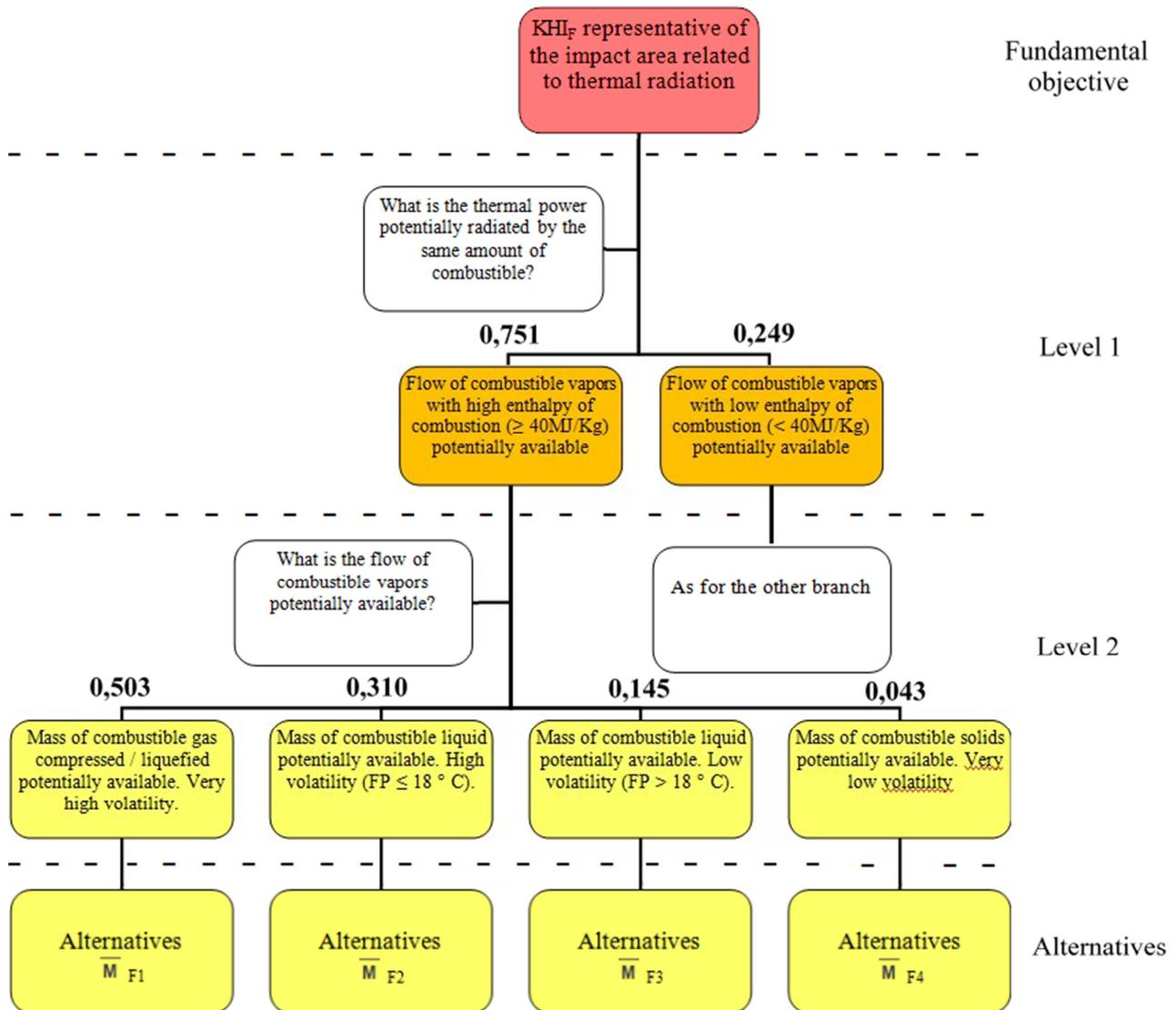
assegnando ad ognuno di essi una importanza relativa nel concorrere alla determinazione del soddisfacimento del criterio ad essi superiore gerarchicamente e descrivendo le alternative attraverso la valutazione dei criteri individuati, è possibile fornire una stima del soddisfacimento di tutti i sotto-criteri, 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 il Fattore di Incremento del rischio. 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.

## Gerarchia relativa ad Incendi



**Figura B – 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 (Marzo et al., to be submitted).**

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

L'obiettivo principale della gerarchia sarà la determinazione di un indice di prestazione KPI<sub>I</sub> relativo alla

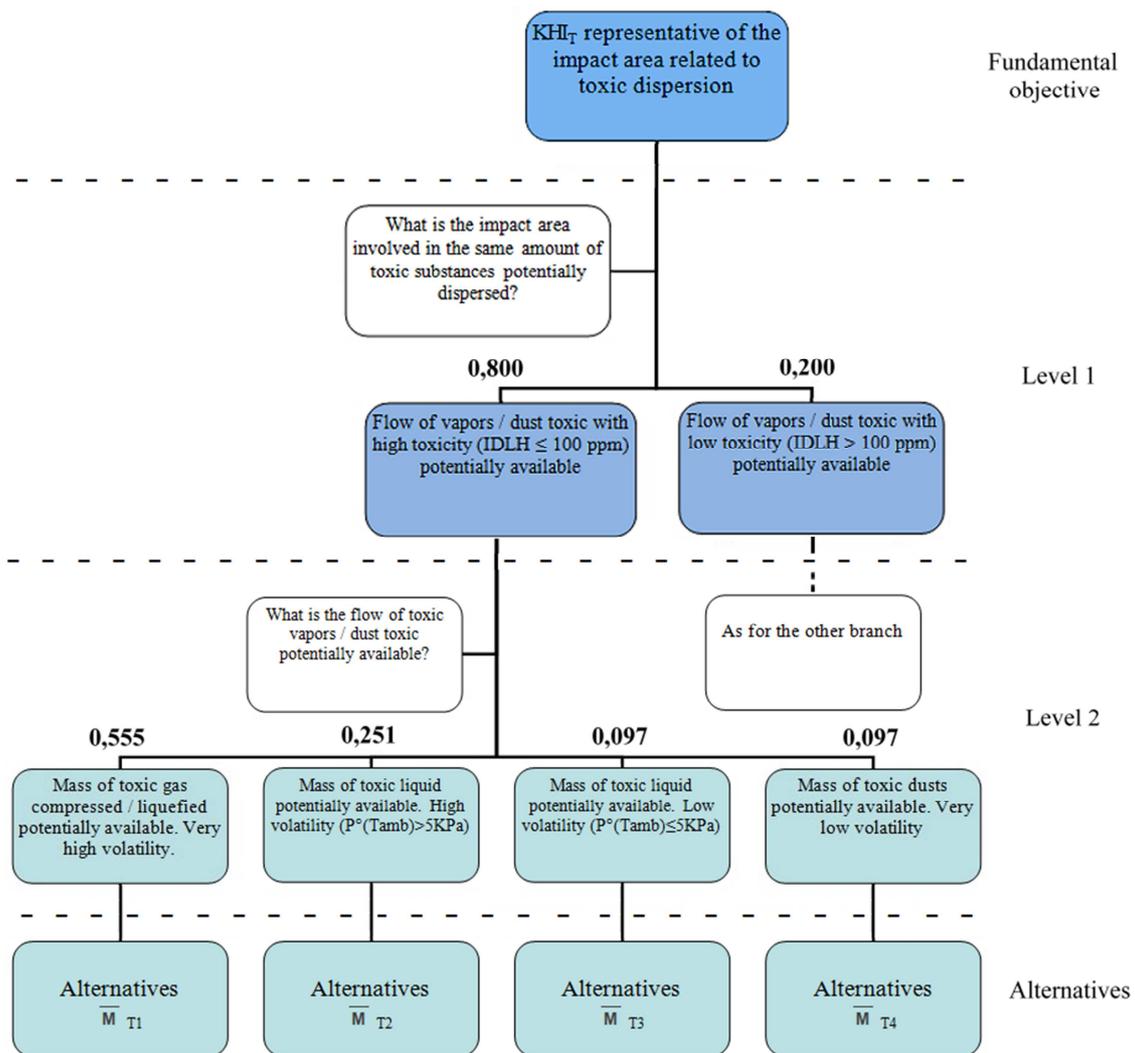
superficie di impatto degli effetti letali dell'irraggiamento dovuto a diversi scenari di incendio che tenga in conto dei principali parametri individuati come influenti. La regola che permette di stabilire quali elementi possano essere posti in uno stesso gruppo, in posizione gerarchicamente inferiore a uno stesso criterio o obiettivo, è che essi rispondano alla

stessa domanda (Saaty 2000). Al di sotto dei sotto-criteri relativi alla volatilità si trovano le alternative, descritte attraverso gli indici di Massa Pesata, calcolati per ogni serbatoio come prodotto della massa contenuta

e del Fattore di Incremento del Rischio..

La gerarchia costruita per la valutazione del rischio relativo a Incendi è mostrata nella Figura B, tratta da Marzo *et al.*, (to be submitted).

### Gerarchia relativa a Dispersione di sostanze Tossiche



**Figura C – 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 (Marzo *et al.*, to be submitted).**

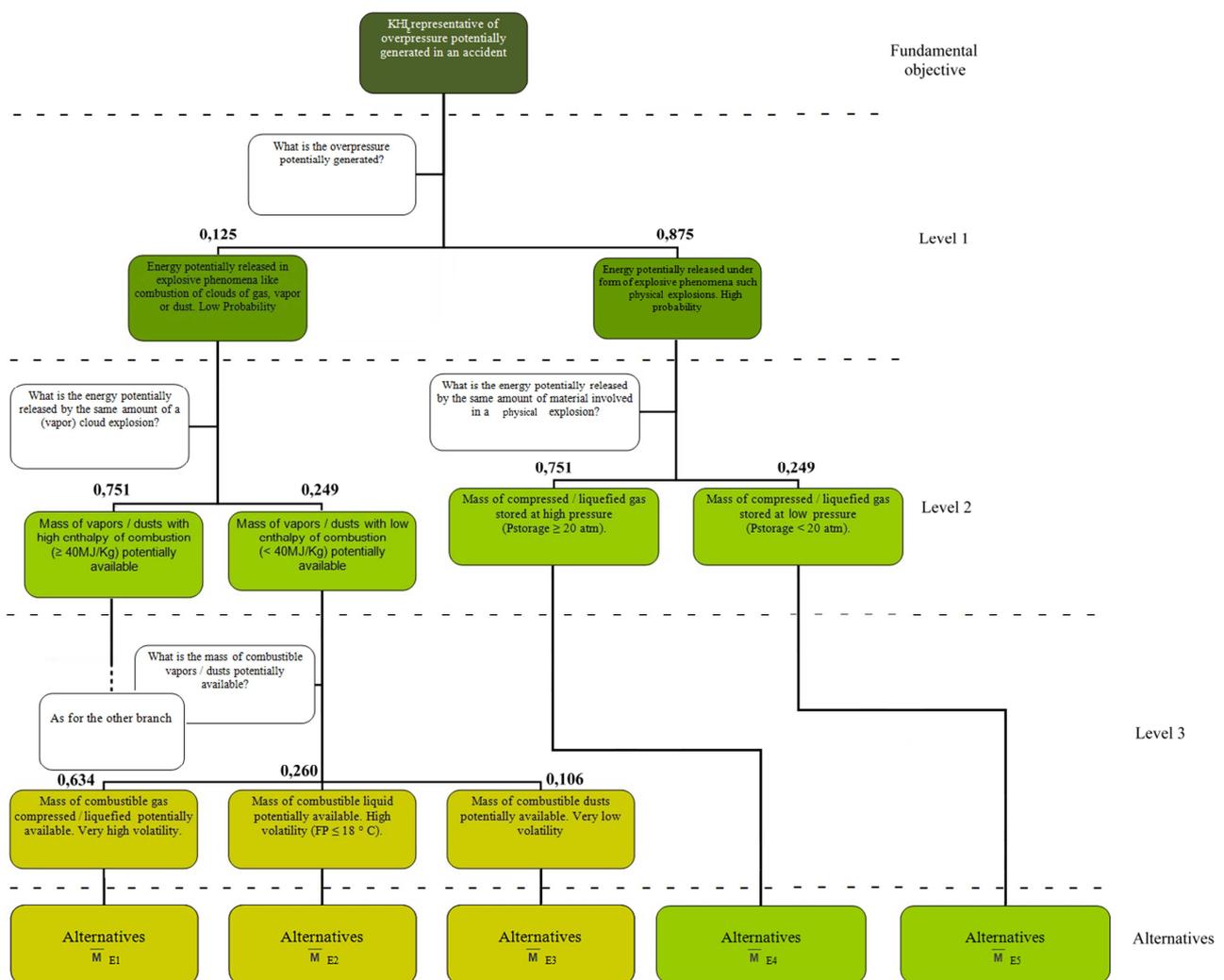
La superficie interessata da effetti letali legati alla concentrazione di sostanze tossiche disperse in

atmosfera è correlata alla tossicità, alla volatilità e alla massa di sostanze tossiche rilasciate, come riassunto in

Tabella B. 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 sotto-criteri 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 C, tratta da Marzo *et al.*, (to be submitted).

### Gerarchia relativa ad Esplosioni



**Figura D – 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 (Marzo *et al.*, to be submitted).**

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 C.

Obiettivo principale della gerarchia è la definizione di un  $KPI_E$  che sia indicativo della superficie potenzialmente interessata dagli effetti di una esplosione. Sotto il livello dei sotto-criteri 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 D, tratta da Marzo *et al.*, (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, dal punto di vista della sicurezza, 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 C, tratta da Busini *et al.* (2011)

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

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

I risultati di  $KPI_G$  ottenuti sono distinti in 3 classi di sensibilità dell'impianto al rischio Natech, corrispondenti a livelli di rischio diversi:

- 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, cade cioè 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 sotto-problema 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 sotto-problema, 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 D. 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 D – Scala semantica usata dal metodo AHP (Saaty 2000).**

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 alluvionale 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 alluvionale; per la convalida si rende quindi necessario il confronto con indicazioni di rischio, ottenute da QRA relative ad eventi NaTech, che siano correlate 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 all'alluvione  $PLL_{ratio}$ ; un incremento di  $10^1$  corrisponde a un livello di rischio Medio,  $10^2$  a un livello Alto. Il  $PLL_{ratio}$  è 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 alluvionali ( $PLL_{flood}$ ), come mostrato nell'Equazione D.

$$PLL_{ratio} = \frac{PLL_{flood} + PLL_{internal}}{PLL_{internal}}$$

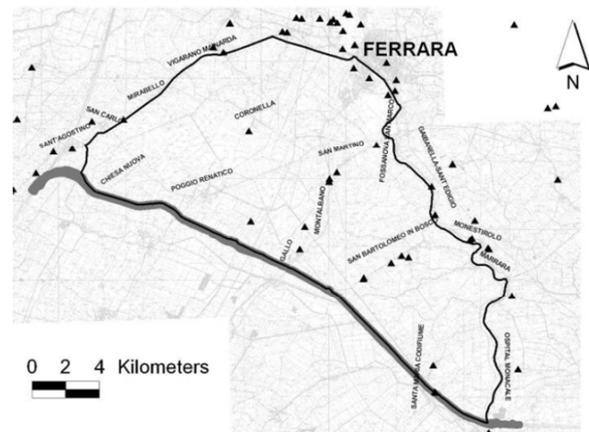
**Equazione D: Incremento dell'indice PLL a causa di eventi alluvionali.**

## Risultati

Il primo caso studio è stato analizzato tramite una valutazione qualitativa di rischio Natech cui è soggetto un impianto posto nel territorio di Poggio Renatico, località di Gallo, nei pressi della diga sul fiume Reno. Sono stati convalidati i risultati dell'analisi di rischio qualitativa, con i dati ottenuti da una QRA sviluppata sullo stesso impianto da Antonioni *et al.* (2009).

La procedura seguita è mostrata in Figura F

È stata caratterizzata innanzitutto la magnitudo dell'evento alluvionale attraverso un'analisi cartografica del sito mostrato in Figura E.



**Figura E: cartografia del sito di interesse, posto nel territorio di Ferrara, nella zona di esondazione del fiume Reno.**

I parametri che vogliamo definire sono riassunti in Tabella E:

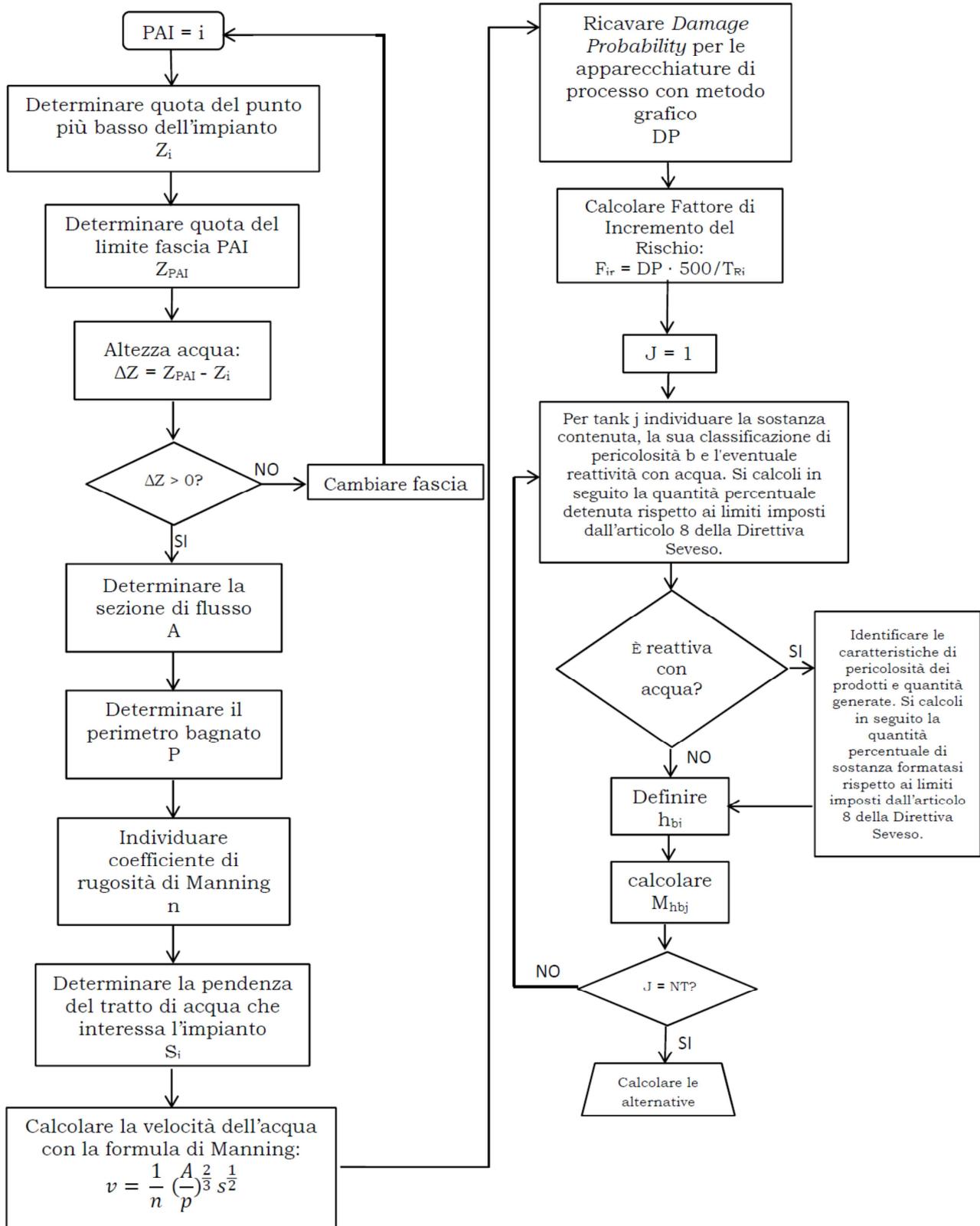
**Tabella E: Parametri ambientali per caratterizzare la magnitudo dell'evento alluvionale del Caso Studio 1.**

Fascia PAI	C
$Z_{PAI}$	10 [m]
$Z_i$	9 [m]
$\Delta Z$	<b>1 [m]</b>
$p$	2504 [m]
$A$	2500 [m <sup>2</sup> ]
$n$	0.035
$s$	0.0091
$v$	2.721 [m/s]
$v^2$	<b>7.405 [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]</b>

È stata calcolata la probabilità di danno attraverso il metodo grafico di Antonioni *et al.* (2009), e il Fattore di Incremento del Rischio, che nel caso

di impianto situato nella fascia C è pari alla DP. Questi parametri sono

mostrati in Tabella F.

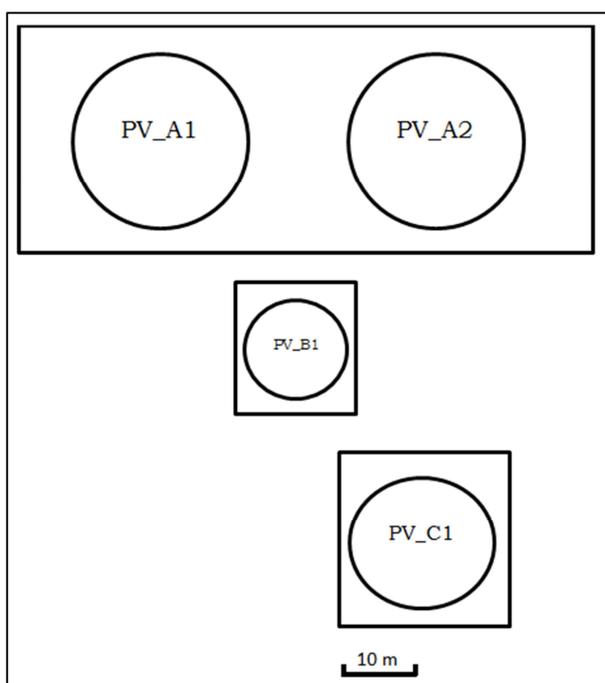


**Figura F: Procedura per la valutazione semplificata del rischio di incidente rilevante iniziato da alluvione.**

**Tabella F: Parametri che caratterizzano l'evento alluvionale: *Damage Probability*, ricavata dal metodo grafico di Antonioni *et al.* (2009), e Fattore di Incremento del Rischio relativi al Caso Studio 1.**

DP	100%
F <sub>ir</sub>	1

L'analisi delle sostanze contenute nei serbatoi definisce per ogni sostanza la sua pericolosità, in termini di infiammabilità, tossicità e esplosività, la reattività con acqua e la quantità degli eventuali prodotti di reazione pericolosi, considerando in questo caso che per ragioni conservative che avvenga la reazione di tutti i reagenti. Nell'impianto di interesse è presente Ammoniaca Anidra in quantità differenti per i diversi serbatoi, rappresentati nello schema in Figura G:



**Figura G: Schema dei serbatoi presenti nell'impianto del Caso Studio 1 contenenti Ammoniaca Anidra.**

Per ogni serbatoio si confronta la quantità contenuta con il limite imposto dall'articolo 8 della Direttiva Europea "Seveso II" (*Council Directive 96/82/EC*). Per l'Ammoniaca Anidra tale limite è fissato a  $200 \cdot 10^3$  Kg. Si procede con l'applicazione del metodo delle gerarchie, assegnando ad ogni serbatoio k un indice di Massa Pesata, calcolato come prodotto della massa percentuale per l'indice F<sub>ir</sub>. In Tabella G sono riportati gli indici per i serbatoi:

**Tabella G: valori della massa presente nei serbatoi del Caso Studio 1, massa percentuale, massa pesata per ogni serbatoio e indice di massa pesata.**

Serbatoio	Quantità (10 <sup>3</sup> Kg)	M %	M <sub>hb</sub>
PV-A1	16.8	0.084	0.084
PV-A2	16.8	0.084	0.084
PV-B	2.8	0.014	0.014
PV-C	5.6	0.028	0.028
<b>Indice Globale di Massa Pesata</b>			0,21

Nel presente caso, dato che i serbatoi contengono tutti la stessa sostanza, si può definire un Indice di Massa Pesata Globale come somma delle masse pesate di tutti i serbatoi. Usando le caratteristiche di pericolosità della sostanza contenuta e le gerarchie per sostanze classificate come Infiammabili, Tossiche ed Esplosive, si identificano i rami h<sub>bk</sub> delle gerarchie che

descrivono il rischio rappresentato dalla sostanza contenuta nei serbatoi e si calcolano i 3 KPI. Nel caso in esame, la sostanza contenuta nei serbatoi è classificata come Tossica, non Infiammabile, Esplosibile, Gas Compresso/Liquefatto, Reattiva con acqua, ma i suoi prodotti di reazione hanno le medesime caratteristiche di pericolosità del reagente, per questo non vengono presi in esame ma si terrà conto solo del reagente. Sono in seguito riportati i KPI ricavati dalle gerarchie:

**Tabella H: valori dei KPI del Caso Studio 1 relativi a Incendio, Dispersione di sostanze tossiche, Esplosioni e l'Indice di Rischio Globale.**

KPI <sub>I</sub>	0
KPI <sub>T</sub>	0.0233
KPI <sub>E</sub>	0.0458
<b>KPI<sub>G</sub></b>	<b>0.0514</b>

L'indice relativo agli incendi risulta dal fatto che il composto ha entalpia di combustione nulla, il KPI<sub>T</sub> dalla combinazione del peso di un gas compresso/liquefatto con quello di bassa tossicità; infine il KPI<sub>E</sub> è determinato dalla sommatoria del contributo di VCE, con entalpia di combustione nulla e gas compresso/liquefatto e BLEVE a pressione interna bassa.

L'indice di rischio globale trovato, essendo compreso tra  $10^{-2}$  e  $10^{-1}$ ,

corrisponde a un livello di rischio medio.

Per la convalida del metodo, si confronta l'indice di rischio globale ricavato dall'analisi qualitativa, con i valori numerici ottenuti dalla QRA. In questo caso faremo riferimento al *Potential Life Loss Index* (PLL). Attraverso tale indice si può misurare l'incremento del rischio causato dalla presenza del fenomeno naturale rispetto al rischio derivante dal solo incidente industriale. Il caso studio ha ricavato i seguenti indici di rischio:

**Tabella I: Indici di rischio ricavati dalla QRA del Caso Studio 1.**

PLL <sub>internal</sub>	7.69E-5
PLL <sub>flood</sub>	3.54E-3
<b>PLL<sub>ratio</sub></b>	<b>47.05</b>

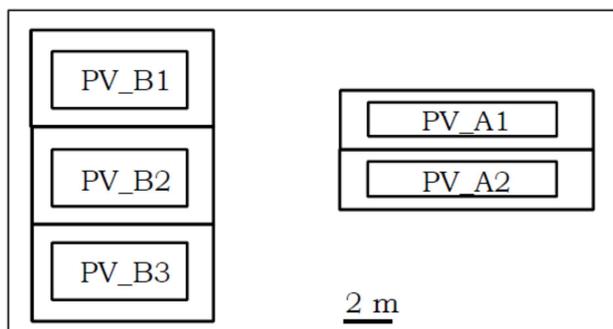
Il PLL<sub>ratio</sub> indica un incremento di un ordine di grandezza, che corrisponde a un livello di rischio Medio. Lo stesso valore è stato ricavato dall'analisi qualitativa attraverso l'indice KPI<sub>G</sub>.

**Tabella L: Confronto tra indici di rischio del Caso Studio 1. PLL<sub>ratio</sub> ricavato dalla QRA e KPI<sub>G</sub> ricavato con il metodo AHP. Entrambi gli indici definiscono un livello di rischio MEDIO.**

PLL <sub>ratio</sub>	KPI <sub>G</sub>	Livello di rischio
47.05	0.0514	<b>Medio</b>

Nel secondo caso studio è stato analizzato il rischio cui è sottoposto un impianto posto nel territorio di

Ferrara. Il *layout* dell'impianto è mostrato in Figura H:



**Figura H: layout dei serbatoi dell'impianto del Caso Studio 2.**

I parametri ambientali che caratterizzano il sito sono stati usati per definire la probabilità di danno, tramite il metodo grafico di Antonioni e sono riassunti in Tabella M:

**Tabella M: Parametri ambientali e Damage Probability del Caso Studio 2.**

h	1 [m]
v <sup>2</sup>	0.204 [m/s]
DP	55%

L'impianto si trova in fascia C e il valore del  $F_{ir}$  è quindi pari alla DP.

I serbatoi analizzati contengono tutti Ammoniaca Anidra.

Si calcolano per ogni serbatoio la Massa Percentuale rispetto al limite imposto dalla Direttiva Europea "Seveso II" (*Council Directive 96/82/EC*), che nel caso dell'Ammoniaca Anidra è pari a  $200 \cdot 10^3$  Kg, e la Massa Pesata, calcolata come prodotto tra Massa Percentuale e  $F_{ir}$ . I valori ricavati sono riassunti in Tabella N:

**Tabella N: Valori di Massa stoccata, Massa percentuale e Massa Pesata per ogni serbatoio analizzato nel Caso Studio 2, e Indice Globale di Massa Pesata.**

Serbatoio	Quantità (10 <sup>3</sup> Kg)	M %	M <sub>hb</sub>
PV-A1	13,5	0.068	0.037
PV-A2	13,5	0.068	0.037
PV-B1	10	0.049	0.027
PV-B1	10	0.049	0.027
PV-B1	10	0.049	0.027
<b>Indice Globale di Massa Pesata</b>			0.157

Il composto analizzato classificato come Tossico, non Infiammabile, Esplosibile, Gas Compresso/Liquefatto, Reattivo con acqua, ma che fornisce prodotti aventi le medesime caratteristiche di pericolosità del reagente. Si definisce quindi l'indice  $h_{bk}$  col quale si entra nella h-esima gerarchia. Partendo dall'Indice Globale di Massa Pesata si risalgono i rami per calcolare i KPI delle varie gerarchie. I valori ricavati sono elencati in Tabella O:

**Tabella O: Key Performance Indicator per caratterizzare il rischio presente nell'impianto trattato nel Caso Studio 2 rispetto a Incendi, Dispersione di sostanze Tossiche e Esplosioni, e indice Globale di Rischio.**

KPI <sub>I</sub>	0
KPI <sub>T</sub>	0.017
KPI <sub>E</sub>	0.034
<b>KPI<sub>G</sub></b>	<b>0.0383</b>

L'indice relativo agli incendi risulta dal fatto che il composto ha entalpia di combustione nulla, il KPI<sub>T</sub> dalla combinazione del peso di un gas compresso/liquefatto con quello di

bassa tossicità; infine il  $KPI_E$  è determinato dalla sommatoria del contributo di VCE, con entalpia di combustione nulla e gas compresso/liquefatto e BLEVE a pressione interna bassa. L'indice di rischio globale è ricavato dalla radice quadrata della sommatoria dei quadrati dei KPI. Il valore trovato, essendo compreso tra  $10^{-2}$  e  $10^{-1}$ , corrisponde a un livello di rischio Medio. Per convalidare il metodo è stato confrontato il  $KPI_G$  con il  $PLL_{ratio}$ , ricavato tramite una QRA, come descritto nel caso studio precedente. I valori relativi all'analisi quantitativa sono riassunti in Tabella P:

**Tabella P: Indici di rischio ricavati dalla QRA del Caso Studio 2.**

$PLL_{internal}$	$8.0 \cdot 10^{-4}$
$PLL_{flood}$	$1.9 \cdot 10^{-2}$
<b><math>PLL_{ratio}</math></b>	<b>24.8</b>

Il  $PLL_{ratio}$ , indica un incremento di rischio di un ordine di grandezza, che corrisponde a un livello di rischio Medio. In Tabella Q sono confrontati gli indici relativi all'analisi qualitativa e quantitativa; entrambi mostrano un livello di rischio Medio, che indica la bontà del metodo semplificato.

**Tabella Q: Confronto tra i livelli di rischio ricavati da una QRA e dall'analisi qualitativa del Caso Studio 2; entrambi gli indici mostrano un livello di rischio medio.**

$PLL_{ratio}$	$KPI_G$	Livello di rischio
24.8	0.0383	<b>Medio</b>

## Conclusioni

I danni causati a impianti industriali e stoccaggi da eventi catastrofici come le alluvioni 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 alluvionale 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 stato l'elaborazione di un metodo di *screening* per la valutazione qualitativa del rischio indotto dall'interazione tra eventi alluvionali 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 un determinato rischio di alluvioni; 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. 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 valutazione oggettive benché semplificate.

# 1 INTRODUZIONE

Si definiscono Natech quegli incidenti tecnologici in impianti industriali iniziati da fattori esterni ambientali: sismi, alluvioni, eruzioni vulcaniche, fulmini, ecc.. possono danneggiare circuiti o apparecchiature, iniziando una catena di eventi dannosi che porta al rilascio incontrollato in ambiente di sostanze pericolose o energia.

L'interazione tra il fattore ambientale e quello industriale aumenta da un lato la gravità delle catastrofi naturali, dall'altro la frequenza di accadimento degli incidenti industriali. Infatti agli eventi diretti di un disastro ambientale su persone e strutture, bisogna aggiungere gli effetti secondari, derivanti dal rilascio su grandi superfici di sostanze tossiche, infiammabili ed esplosive, che portano anche a rilasci multipli e simultanei, con conseguenze catastrofiche. L'incremento della frequenza e dell'intensità degli incidenti con rilascio di sostanze pericolose è dovuto all'interazione delle catastrofi naturali con gli impianti industriali. Il fattore ambientale può essere infatti l'iniziatore di catene di eventi dannosi, che altrimenti non si sarebbero sviluppate, e delle quali non si sarebbe tenuto conto in un'analisi di rischio standard, la quale in genere non analizza il rischio Natech. Un esempio recente di disastro Natech è il terremoto che nel Maggio 2011 ha colpito il Giappone, causando uno tsunami che ha portato al danneggiamento dei circuiti elettrici che governano i sistemi di raffreddamento dei reattori di un impianto nucleare. Le conseguenze di questo evento sono state drammatiche. L'onda che ha colpito l'impianto misurava almeno 14 metri di altezza, mentre l'impianto era stato progettato pensando ad un'altezza massima dell'onda di 6,5 metri.

L'attenzione al rischio Natech è cresciuta soprattutto negli ultimi anni; 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.

Per garantire un approccio specifico al problema della valutazione del rischio NaTech è necessario conformarsi alla procedura standard di gestione del rischio;

essa 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.

Questo è lo scopo del presente lavoro: sviluppare una metodologia semplificata per la valutazione qualitativa del rischio Natech derivante da alluvioni. La tecnica che si vuole proporre risulta di semplice applicazione, sia in termini di conoscenze preliminari richieste che di tempi di calcolo e quindi di risorse economiche richieste. Il metodo è utilizzabile per un'analisi preliminare e giunge a quantificare il rischio secondo un indice di prestazione definito come basso, medio o alto. Nel caso in cui il rischio venga definito alto è opportuno procedere con analisi più approfondite condotte da analisti esperti.

Verranno definiti dei parametri per caratterizzare l'impatto che l'ambiente ha sull'impianto e altri per definire la vulnerabilità delle apparecchiature rispetto a quell'evento. Per il calcolo dell'indice di prestazione è stato quindi necessario comparare simultaneamente un certo numero di parametri anche non commensurabili direttamente; a tal fine è stato utilizzato il metodo di scelta multicriterio *Analytic Hierarchy Process*.

A conclusione dello studio il modello è stato convalidato attraverso il confronto con i risultati di valutazioni quantitative del rischio NaTech tratte dalla letteratura e poi applicato ad alcuni casi studio.

## **2 STATO DELL'ARTE**

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

Eventi catastrofici naturali come terremoti, eruzioni vulcaniche, fulmini, 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**

Il rischio di un evento catastrofico di tipo naturale nasce da fattori intrinseci al territorio, che dipendono dalle caratteristiche geologiche, morfologiche e climatiche del territorio stesso. Tali fattori non sono modificabili, e assoggettano determinate zone a eventi catastrofici che possono ripetersi con una certa frequenza, dato il 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 superano 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. Queste procedure prevedono la creazione di mappe che riportano l'intensità massima attesa dell'evento in una determinata zona e la pianificazione dello sfruttamento del territorio in funzione dei rischi cui è soggetto. Le misure di mitigazione degli effetti di eventi catastrofici prevedono specifici criteri di progettazione di strutture ed edifici, per garantirne la resistenza a eventi di una intensità fissata, la redazione di piani di emergenza e l'addestramento di squadre specificamente dedicate al salvataggio.

Insedamenti umani e industriali sono stati costruiti in zone ad elevato rischio naturale per motivi quali la non disponibilità di altri spazi più adatti all'edificazione e l'abbondanza di acqua necessaria alle attività industriali. 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. Attraverso queste analisi si vogliono evidenziare le caratteristiche principali di questi eventi e per 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 e 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. La direttiva inoltre 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.

È comunque 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 severità) 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 alluvioni e terremoti 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; lo studio viene effettuato attraverso modelli di vulnerabilità delle apparecchiature rispetto 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. Essi tuttavia richiedono 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 necessitano di analisi più

approfondite con metodi della QRA, perché soggetti a un livello di rischio non trascurabile, da quelli 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). Tali approcci forniscono scale di intensità qualitative, che indicano il tipo e la gravità dei rilasci che possono verificarsi a causa di un evento NaTech; inoltre essi valutano l'intensità degli eventi catastrofici naturali possibili, la vulnerabilità dell'impianto e della popolazione, e l'estensione di territorio interessata attraverso degli indici qualitativi. Aggregando questi indici è possibile fornire il valore dell'indice di prestazione del fenomeno Natech.

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 costituisce effettivamente uno strumento utile alla pianificazione territoriale perché affronta il discorso della potenziale esposizione a differenti tipi di eventi naturali e della possibile presenza di più impianti nell'area in esame. Esso risulta inoltre interessante per l'utilizzo che fa 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 alluvioni e terremoti nelle aree urbane. Lo studio 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: infrastrutture, impianti industriali, reti per la distribuzione di servizi essenziali, popolazione e 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 svariati fenomeni naturali e persino di confrontare i livelli di rischio relativi a serbatoi e sostanze diversi.

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. È opportuno inoltre creare una cornice ben definita all'interno della quale organizzare e gestire le informazioni necessarie alla valutazione, con lo scopo di 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**

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è quello di sviluppare una metodologia semplificata per l'analisi qualitativa del rischio Natech relativo ad alluvioni.

L'analisi definita in questo studio ha come scopo quello di fornire alle aziende un modello che consenta di effettuare una valutazione semiquantitativa del rischio, con l'utilizzo di risorse limitate, sia in termini di tempo che di conoscenze preliminari. La valutazione potrà infatti essere effettuata da personale poco esperto del rischio e con informazioni facilmente reperibili.

Il rischio verrà quantificato attraverso l'uso di un indice adimensionale delle prestazioni (*Key Performance Indicator, KPI*) dell'impianto rispetto all'evento Natech. Nel caso di indici molto severi spetterà all'azienda stessa contattare gli esperti per procedere con analisi più dettagliate.

Il metodo si propone di fornire un modello che sia utilizzabile da impianti di processo che svolgono attività diverse e sono dislocati in luoghi a rischio alluvionale più o meno elevato. Un impianto viene caratterizzato tramite parametri che identificano le sostanze presenti e le apparecchiature utilizzate; l'evento naturale è invece caratterizzato tramite dei valori che ne stimano la frequenza di accadimento e la severità.

Nel modello vengono inserite e utilizzate delle variabili che rappresentano grandezze molto diverse tra loro e hanno unità di misura differenti; è stato necessario infatti raggruppare e organizzare le grandezze in gioco in un metodo strutturato, attraverso il quale sia possibile comparare i diversi parametri simultaneamente. A tal fine è stato utilizzato 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 (Rote *et al.* 2008) .

### **3.2 Approccio al problema**

La metodologia per l'approccio al problema e per la definizione dell'indice di rischio, è stata articolata nei seguenti punti:

- Caratterizzazione dell'evento alluvionale
- Stima della probabilità di guasto
- Valutazione del Fattore di Incremento del Rischio
- Identificazione delle apparecchiature bersaglio
- Caratterizzazione della pericolosità delle sostanze
- 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 da letteratura (Antonioni *et al.* (2008))

Il metodo è stato basato sull'esteso lavoro di ricerca riguardante la valutazione quantitativa del rischio NaTech relativo a eventi alluvionali realizzato da Cozzani *et al.* (Antonioni *et al.* (2009), Antonioni *et al.* (2008), Cozzani *et al.* (2010)).

### **3.2.1 Caratterizzazione dell'evento alluvionale**

Gli eventi naturali che portano a catastrofi quali sismi, tsunami e alluvioni, sono sempre di difficile interpretazione e misurazione: i fattori e le variabili che caratterizzano il sistema sono numerose e non sempre quantificabili, inoltre tali fenomeni hanno frequenza di accadimento molto bassa e non sono per la maggior parte dei casi prevedibili. Per lo studio di questi fenomeni sono state quindi introdotte delle semplificazioni che hanno portato a caratterizzare l'evento naturale mediante due aspetti principali: frequenza di accadimento e severità.

#### **3.2.1.1 Parametri di frequenza di accadimento: TEMPO DI RITORNO**

Il tempo di ritorno è definito come quel periodo di tempo che intercorre tra il manifestarsi di un evento catastrofico e il successivo.

Esso è un parametro che può essere utilizzato per quantificare la probabilità di accadimento di un fenomeno: l'inverso del tempo di ritorno rappresenta infatti il numero di eventi che ci si aspetta in un dato intervallo di tempo: la frequenza di accadimento.

È possibile classificare un fenomeno in funzione del numero di eventi che si sono manifestati in un periodo di tempo determinato: ad esempio l'agenzia internazionale *European Observation Network for Territorial Development and Cohesion* (ESPON), ha tracciato una mappatura dell'Europa evidenziando le diverse probabilità di accadimento delle alluvioni in base al numero di osservazioni del fenomeno registrate in un periodo di tempo di 15 anni. Le zone di basso pericolo sono quelle con numero di osservazioni nullo, quelle di alto pericolo hanno osservato 3 eventi. Per caratterizzare la frequenza di accadimento di un dato fenomeno in una porzione di territorio si fa quindi riferimento alle serie storiche relative agli eventi naturali accaduti in un determinato periodo di tempo.

### **3.2.1.2 Parametri di severità: LIVELLO IDRICO e VELOCITÀ dell'acqua**

Per caratterizzare la severità con cui un evento alluvionale incide su un impianto o una struttura, sono stati presi in considerazione due parametri: l'altezza massima raggiungibile dall'acqua e la velocità con cui questa impatta il sistema interessato.

#### ✓ Livello idrico

Per quanto riguarda le aree esondabili, si è fatto riferimento a quelle identificate dall'Autorità di Bacino del Fiume Po' nella definizione del Progetto di Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI).

Il territorio preso in considerazione dall'autorità è quello nella zona limitrofa al fiume Po', ed è stato suddiviso in tre fasce di esondazione, ognuna caratterizzata da una portata di deflusso attesa.

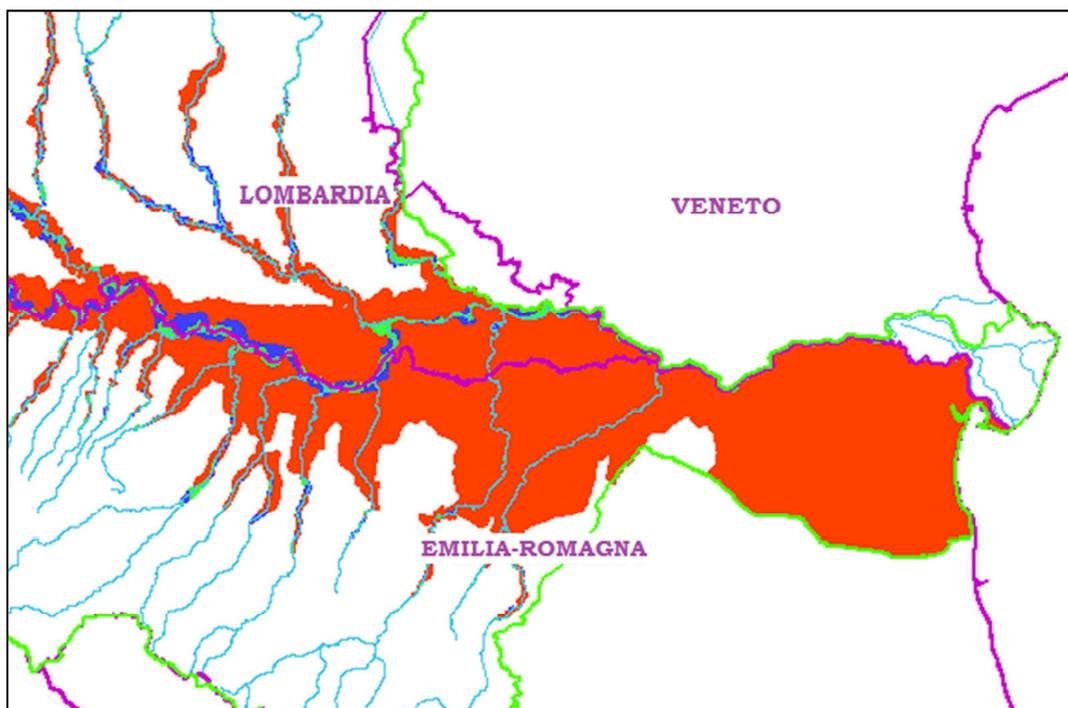
- Fascia A: fascia di deflusso della piena; porzione di alveo che è sede prevalente, per la piena di riferimento, del deflusso della corrente
- Fascia B: fascia di esondazione; esterna alla precedente, costituita dalla porzione di alveo interessata da inondazione al verificarsi dell'evento di piena di riferimento
- Fascia C: area di inondazione per piena catastrofica; costituita dalla porzione di territorio esterna alla precedente, che può essere interessata da

inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quelli di riferimento.

La fascia A racchiude circa l'80 % della portata totale di una piena di riferimento, il restante 20 % è totalmente contenuto nella fascia B. I fenomeni di esondazione che interessano la fascia C sono invece più gravosi e più rari e si assume per essi, come portata di riferimento, la massima piena storicamente registrata.

Ogni fascia è caratterizzata da un tempo di ritorno, in funzione della gravità attesa dell'evento: il tempo di ritorno della fascia A è di 50 anni, per la fascia B la piena di riferimento è quella che si manifesta ogni 200 anni; alla fascia C è invece associato un tempo di ritorno di 500 anni.

In Figura è rappresentata la mappatura del territorio limitrofo al fiume Po' evidenziando la suddivisione nelle fasce di esondazione.



**Figura 1: Fasce PAI di esondazione della zona limitrofa al fiume Po'. Il verde caratterizza la fascia A, il blu la fascia B e in arancione è evidenziata la fascia C.**

È stata utilizzata tale suddivisione del territorio per definire l'altezza massima raggiunta dall'acqua durante un'inondazione: una volta rotti gli argini maestri, il fenomeno di deflusso interessa tutta l'area inondabile, delimitata dai limiti delle fasce. In ogni punto di quella porzione di territorio si potrà quindi definire l'altezza idrica, come differenza tra l'altitudine dei limiti della fascia in cui si trova l'impianto, e quella del punto più basso dell'impianto stesso.

- ✓ Velocità dell'acqua

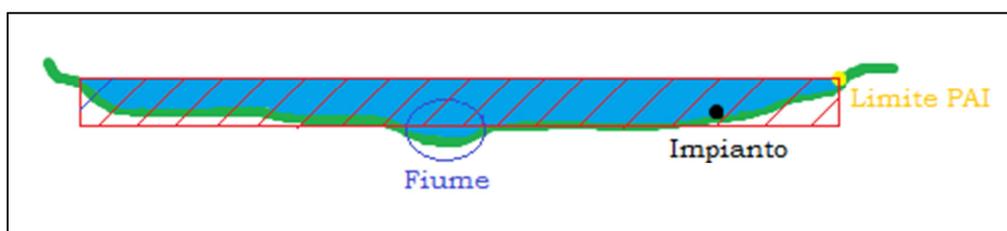
Per il calcolo della velocità con cui l'acqua impatta contro l'impianto, è stata sfruttata la formula di Manning, per l'utilizzo della quale sono stati definite le seguenti grandezze:

- SEZIONE DI DEFLUSSO

La sezione di deflusso è definita come quell'area rettangolare verticale trasversale al fiume, che passa per il sito di interesse percorrendo la distanza minima tra impianto e alveo. La sezione di deflusso ha come base i punti che delimitano, lungo quella retta, i limiti della fascia PAI cui appartiene l'impianto, e come altezza la differenza tra la quota dei limiti della fascia e quella del fiume. In Figura 2 e Figura 3 sono mostrati degli schemi della sezione di deflusso.



**Figura 2: Sezione di deflusso dell'acqua vista in 3D**

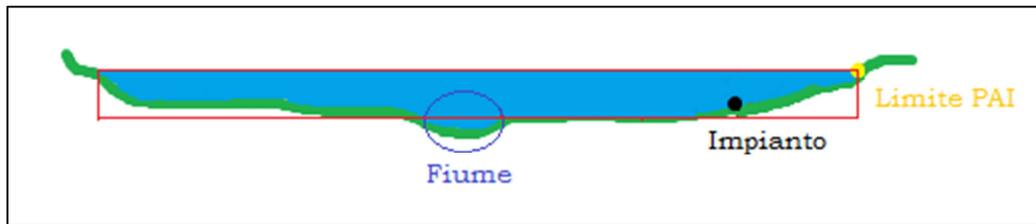


**Figura 3: Sezione di deflusso vista in sezione. L'area è quella evidenziata in rosso: è un rettangolo che e ha come altezza la differenza di quota tra il limite della fascia PAI e alveo del fiume, e come base la distanza tra i limiti della fascia.**

- PERIMETRO BAGNATO

Il perimetro bagnato è il perimetro della sezione di deflusso. Per quelle porzioni naturali di territorio dotate di golena, si evidenzia come piccoli incrementi in altezza del livello idrico, portino a un elevato aumento del perimetro bagnato. Infatti è quasi trascurabile il contributo in altezza del perimetro bagnato, che può essere dell'ordine dei metri, rispetto a quello orizzontale che arriva a coprire

anche centinaia di metri. In Figura 4 è evidenziato il perimetro bagnato della sezione di deflusso.



**Figura 4: Perimetro bagnato, evidenziato in rosso. È il perimetro della sezione di deflusso del fiume.**

- COEFFICIENTE DI RUGOSITÀ

Il coefficiente di rugosità di Manning è una misura della scabrezza del terreno, e assume diversi valori in funzione dell'orografia del territorio e del tipo di superficie che lo caratterizza.

In tabella 1 vengono riportati alcuni valori tipici:

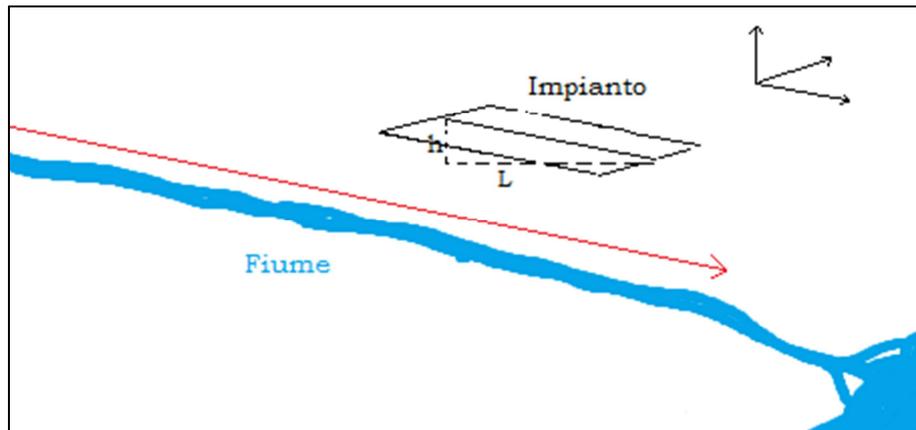
**Tabella 1: Valori del coefficiente di rugosità di Manning per diversi tipi di terreno.**

<b>Material</b>	<b>Manning n</b>	<b>Material</b>	<b>Manning n</b>
<i>Natural Streams</i>		<i>Excavated Earth Channels</i>	
Clean and Straight	0.030	Clean	0.022
Major Rivers	0.035	Gravelly	0.025
Sluggish with Deep Pools	0.040	Weedy	0.030
<i>Metals</i>		Stony, Cobbles	0.035
Brass	0.011	<i>Floodplains</i>	
Cast Iron	0.013	Pasture, Farmland	0.035
Smooth Steel	0.012	Light Brush	0.050
Corrugated Metal	0.022	Heavy Brush	0.075
<i>Non-Metals</i>		Trees	0.15
Glass	0.010	Finished Concrete	0.012
Clay Tile	0.014	Unfinished Concrete	0.014
Brickwork	0.015	Gravel	0.029
Asphalt	0.016	Earth	0.025
Masonry	0.025	Planed Wood	0.012
		Unplaned Wood	0.013

Per il calcolo dell'influenza complessiva che ha il terreno sulla velocità dell'acqua, è stato calcolato un coefficiente di Manning medio ponderato, con i pesi definiti sulle percentuali di terreno diverse con cui è suddiviso il territorio.

- PENDENZA DELL'ACQUA

Per il calcolo della pendenza dell'acqua in prossimità del sito di interesse, è stato costruito un triangolo rettangolo, i cui cateti sono costituiti uno dalla differenza di altitudine tra il lato a monte dell'impianto e quello a valle, l'altro dalla lunghezza dell'impianto nella direzione del fiume. La pendenza dell'acqua è stata calcolata come direttrice dell'ipotenusa di questo triangolo.



**Figura 5: Rappresentazione schematica per definire la pendenza del tratto d'acqua che interessa l'impianto, calcolata come direttrice dell'ipotenusa del triangolo rettangolo che ha come cateti la differenza di quota  $h$  dei confini dell'impianto, e la proiezione  $L$  della lunghezza dell'impianto sull'orizzontale.**

Una volta determinate queste grandezze, è possibile definire la velocità dell'acqua nel tratto di terreno che interessa l'impianto, con la seguente formula:

$$v = \frac{1}{n} \left( \frac{A}{p} \right)^{\frac{2}{3}} s^{\frac{1}{2}}$$

**Equazione 1: Velocità d'impatto dell'acqua contro l'impianto, funzione del coefficiente di Rugosità di Manning, Sezione di deflusso, Perimetro bagnato e Pendenza dell'acqua.**

$v$  : Velocità dell'acqua [m/s]

$n$  : Coefficiente di Manning [-]

$A$  : Sezione di deflusso [m<sup>2</sup>]

$p$  : Perimetro bagnato [m]

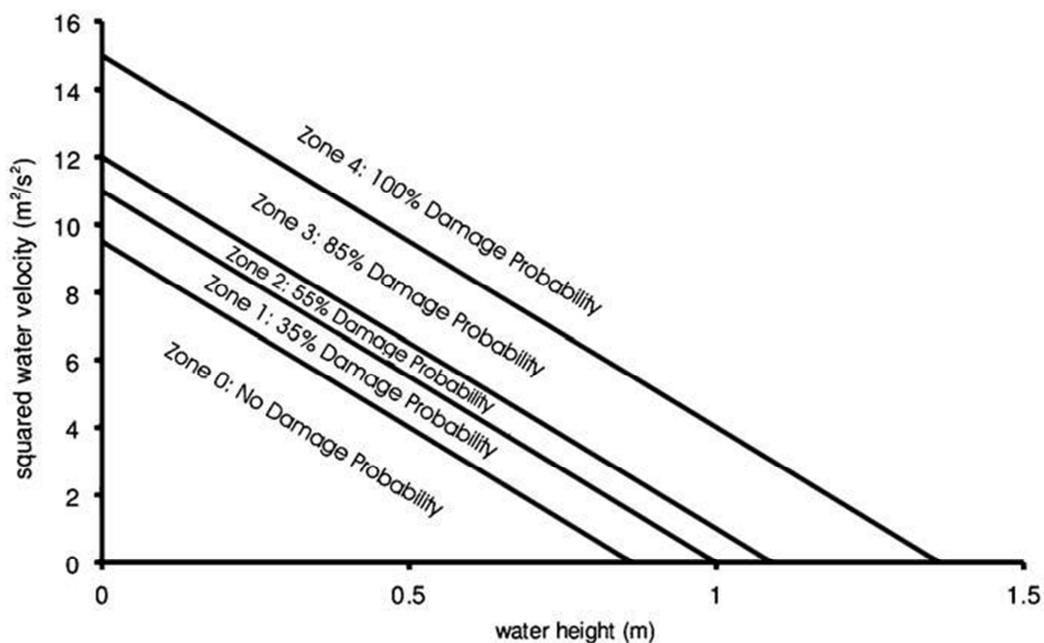
$s$  : pendenza dell'acqua [-]

### 3.2.2 Stima della probabilità di danno

Per quanto riguarda lo studio della probabilità di danno delle apparecchiature una volta che l'acqua ha impattato con esse, in letteratura non sono presenti dei

modelli per caratterizzare il fenomeno. I dati raccolti sugli incidenti passati non sono sufficientemente completi di tutte le informazioni necessarie alla costruzione di un modello, come per esempio i danni strutturali delle apparecchiature o gli indici di severità dell'inondazione.

Si è perciò deciso di fare affidamento a un modello semplificato, sviluppato da Antonioni *et al.* (2009), il quale sfrutta i parametri di severità dell'inondazione per definire la probabilità di danno delle apparecchiature. È un metodo grafico che suddivide lo spazio in 5 porzioni, ognuna delle quali è caratterizzata da una probabilità di guasto che va dallo 0 % per la quale non si prevedono danni alle strutture, a quella 100 %, nella quale c'è certezza assoluta del danno alle strutture. I parametri dell'evento naturale qui utilizzati sono quelli precedentemente descritti: altezza massima dell'acqua e velocità d'impatto al quadrato. In Figura 6 sono mostrati i diversi valori di probabilità di danno in funzione dei due parametri.



**Figura 6: Probabilità di danno delle strutture in funzione dell'altezza dell'acqua e del quadrato della velocità di impatto, ricavato dal metodo semplificato proposto da Antonioni *et al.* (2009).**

### 3.2.3 Fattore di Incremento del Rischio

Il rischio complessivo cui è sottoposto un impianto è influenzato oltre che dalla Probabilità di Danno delle apparecchiature, definita dal livello idrico e dalla

velocità di impatto dell'acqua, anche dal tempo di ritorno dell'evento alluvionale. Un impianto posto in una zona che ha tempo di ritorno dell'alluvione minore di altri, è esposto a livelli di rischio maggiori.

Per quantificare la dipendenza del rischio dal tempo di ritorno, è stato utilizzato il Fattore di Incremento del Rischio  $F_{ir}$ , definito come mostrato in Equazione 2:

$$F_{ir} = DP \cdot \frac{t_{rC}}{t_{ri}}$$

**Equazione 2: Fattore di Incremento del Rischio, funzione della DP e dei tempi di ritorno della fascia C e della fascia in cui è situato l'impianto.**

Esso dipende dalla DP e dal rapporto tra il tempo di ritorno caratteristico della fascia PAI C e quello della fascia in cui si trova l'impianto. Per impianti posti in fascia C il Fattore di Incremento del Rischio è pari alla DP, poiché il rapporto tra i tempi di ritorno risulta pari a 1; tale fascia è stata infatti scelta come riferimento perché la maggior parte degli impianti è posta in essa e l'incremento del rischio per questi impianti risulta quindi nullo. Gli impianti situati in fascia A e B hanno tempi di ritorno minori e livelli di rischio maggiori; il Fattore di Incremento del Rischio per questi impianti aumenta in proporzione al rapporto tra il tempo di ritorno della fascia C (che è pari a 500 anni) e quello della fascia caratteristica dell'impianto (200 anni per fascia B e 50 anni per fascia A).

Attraverso questo parametro è quindi possibile quantificare l'incremento del rischio per impianti posti in zone che hanno maggior frequenza di accadimento dell'evento alluvionale.

### **3.2.4 Identificazione delle apparecchiature bersaglio**

Una volta quantificato l'impatto che l'evento naturale può avere sull'impianto, è necessario studiare la vulnerabilità che l'impianto, con le sue apparecchiature, ha rispetto all'evento catastrofico. Nel presente studio non è stata intrapresa un'analisi dettagliata in questo senso, ma si è fatto affidamento ai dati presenti in letteratura, ricavati dai database dei maggiori incidenti industriali.

Un esteso lavoro dedicato all'identificazione delle apparecchiature tipicamente danneggiate in un evento alluvionale, 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 Cozzani *et al.* (2009).

Per valutare le tipologie di apparecchiature maggiormente vulnerabili alle inondazioni e gli scenari che possono risultare dall'effetto delle inondazioni su impianti industriali, sono necessari i seguenti parametri:

- i) le proprietà di pericolosità delle sostanze
- ii) l' *hold-up* dell'apparecchiatura, che influenza la quantità di sostanza rilasciata
- iii) il tipo di danni strutturali previsti.

Oltre alle sostanze tossiche e infiammabili considerate solitamente nell'approccio convenzionale all'analisi di rischio, nel caso di inondazioni l'analisi dovrebbe essere estesa alle sostanze che possono reagire con acqua sviluppando gas tossici e/o vapori infiammabili.

Per identificare le apparecchiature da considerare nell'analisi, sono state definite le seguenti quattro categorie di apparecchiature, che presentano *hold-up* crescente:

- 1) reattori e scambiatori di calore
- 2) colonne
- 3) *piping*
- 4) serbatoi di stoccaggio.

Gli scenari credibili identificati come possibili conseguenze dell'impatto di un'inondazione sono stati così associati alle differenti condizioni operative o di stoccaggio, tenendo conto delle seguenti categorie di sostanze:

- i) sostanze tossiche per la salute umana
- ii) sostanze pericolose per l'ambiente
- iii) sostanze infiammabili
- iv) sostanze che reagiscono con l'acqua.

È stato possibile identificare le categorie di criticità delle apparecchiature di processo in base alla tipologia e alla severità prevista degli scenari associati ad esse. Il rischio associato ad ogni categoria critica è stato classificato assegnando un indice di severità, variabile da 1 a 4, come indicato in tabella 2.

**Tabella 2: Indici per la valutazione di rischio preliminare delle apparecchiature in funzione della fase di stoccaggio delle sostanze contenute.**

	Serbatoi di stoccaggio	Tubazioni principali	Colonne	Reattori, Scambiatori di calore
Gas liquefatti in pressione	4	4	3	3
Liquidi surriscaldati	3	3	2	2
Gas compressi	3	2	2	1
Liquidi criogenici	2	2	2	1
Liquidi	1	1	1	1

Dalla tabella si evidenzia come i serbatoi di stoccaggio siano le apparecchiature soggette a un livello di rischio maggiore, proprio per la grossa quantità di sostanze pericolose che potenzialmente possono rilasciare nell'ambiente in seguito danneggiamento. Sono state così sviluppate delle classi con cui suddividere i serbatoi per studiare gli stati di danno cui sono soggetti, in funzione delle loro caratteristiche strutturali:

- i) SERBATOI CILINDRICI VERTICALI che hanno rapporto diametro/altezza ( $D/H > 1$ ) (serbatoi atmosferici)
- ii) SERBATOI CILINDRICI VERTICALI che hanno  $D/H < 1$  (sia serbatoi atmosferici che pressurizzati)
- iii) SERBATOI CILINDRICI ORIZZONTALI (atmosferici e pressurizzati).

Per una più precisa caratterizzazione dell'incidente, oltre agli stati di danno sono state definite delle categorie di rilascio della sostanza contenuta, in funzione della diversa perdita di contenimento:

- R1: rilascio continuo da un foro avente diametro equivalente di 10 mm
- R2: rilascio continuo dell'intero contenuto (in meno di 10 minuti)
- R3: rilascio istantaneo dell'intero contenuto (in meno di 2 minuti) a seguito di severi danni strutturali.

Sono state inoltre classificate le diverse modalità di impatto dell'acqua sulla struttura, in funzione della sua velocità. Ad ogni classe sono state associate una modalità di danno e una categoria di rilascio. I dati relativi ai serbatoi atmosferici sono riportati in Tabella 3, quelli per i serbatoi pressurizzati, in Tabella 4.

**Tabella 3: Modalità di impatto dell'acqua e tipo di danno strutturale; da essi derivano le categorie di rilascio delle sostanze contenute in serbatoi atmosferici.**

<b>Modalità d'impatto</b>	<b>Danni strutturali</b>	<b>Categorie di rilascio</b>
Sommersione lenta (velocità dell'acqua trascurabile)	Collasso per instabilità (catastrofico)	R1
	Cedimento completo delle connessioni	R2
	Cedimento delle flange e/o connessioni	R3
Onda a bassa velocità (velocità dell'acqua <1 m/s)	Cedimento delle flange e/o connessioni	R3
	Danno alle connessioni dovuto a impatto con oggetti galleggianti	R3
Onda a alta velocità (velocità dell'acqua >1 m/s)	Impatto con strutture adiacenti	R1
	Cedimento del tetto o rottura della struttura	R2
	Cedimento completo delle connessioni	R2
	Cedimento delle flange e/o connessioni	R3

**Tabella 4: Modalità di impatto dell'acqua e tipo di danno strutturale; da essi derivano le categorie di rilascio delle sostanze contenute in serbatoi pressurizzati.**

<b>Modalità d'impatto</b>	<b>Danni strutturali</b>	<b>Categorie di rilascio</b>
Sommersione lenta (velocità dell'acqua trascurabile)	Cedimento delle flange e/o connessioni	R1
Onda a bassa velocità (velocità dell'acqua <1 m/s)	Cedimento delle flange e/o connessioni	R1
Onda a alta velocità (velocità dell'acqua >1 m/s)	Impatto con strutture adiacenti	R3
	Rottura della struttura	R2
	Cedimento delle flange e/o connessioni	R1

Nel presente lavoro considererò come stato di danno di riferimento il collasso catastrofico della struttura con rilascio istantaneo del contenuto, al fine di semplificare in modo conservativo il problema della definizione della quantità di sostanze pericolose rilasciate.

### 3.2.5 Pericolosità delle sostanze

Uno dei problemi principali derivante dagli incidenti industriali è il rilascio nell'ambiente di sostanze pericolose, quali composti infiammabili, tossici o esplosivi, che generano scenari che possono provocare danni all'uomo o all'ambiente. Nel presente studio è opportuno tenere in considerazione anche quelle sostanze che possono reagire con acqua, i composti generati e l'eventuale energia rilasciata durante la reazione.

I principali incidenti generati da queste sostanze sono:

- irraggiamento termico sviluppato da incendi
- dispersione in atmosfera di sostanze tossiche
- onde d'urto generate da fenomeni esplosivi.

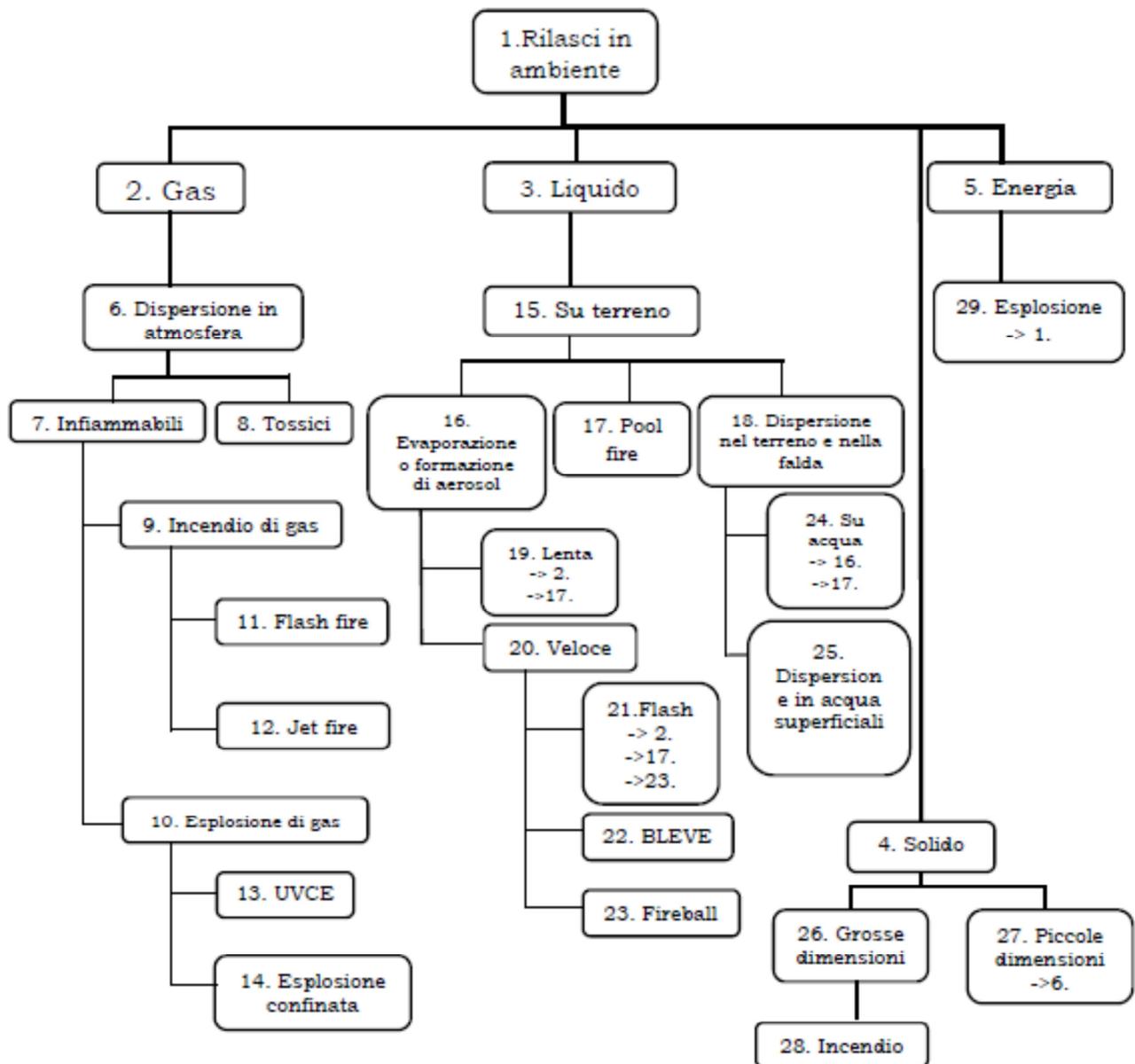
Nell'analisi di rischio quantitativa si usa identificare gli scenari potenzialmente generati da un rilascio di materiale attraverso un metodo grafico ad alberi che costituisce una classificazione tassonomica dei possibili scenari in funzione principalmente delle caratteristiche del materiale rilasciato, come mostrato nella Figura 7 (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. Se la sostanza rilasciata è infiammabile si potranno generare incendi di gas o esplosioni; per sostanze tossiche invece lo scenario conseguente alla dispersione è il rilascio di sostanze tossiche.

Nel caso invece di sversamento di liquidi sul terreno, a seconda della volatilità delle sostanze si possono liberare dei vapori tossici o infiammabili, formare dei *pool-fire* o semplicemente il composto pericoloso si può disperdere nel terreno arrivando fino alla falda. Se il rilascio avviene su acqua il liquido verrà disperso su una superficie molto ampia, eventualmente arrecando danni ambientali significativi; se il liquido liberato è reattivo con l'acqua, nella fase di dispersione si possono formare nuovi composti pericolosi, tossici, infiammabili o esplosivi.

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 tipiche del rilascio di un gas.

È inoltre possibile che avvenga il rilascio di energia, e lo scenario che ne consegue è un'esplosione.



**Figura 7: Tassonomia degli eventi incidentali generati da sostanze pericolose con caratteristiche differenti (Rota e Nano, 2007).**

Un aspetto fondamentale per definire la pericolosità di una sostanza è la sua potenziale capacità di disperdersi nell'ambiente e generare quindi scenari pericolosi anche a lunghe distanze dal punto di rilascio. La capacità di dispersione di un composto è legata alla sua volatilità, che dipende dallo stato fisico e dalle sue caratteristiche chimico-fisiche e termodinamiche. Inoltre anche lo stato fisico a cui sono stoccate le sostanze può influenzare molto la capacità di dispersione: 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 in aria è possibile solo per particelle di piccole dimensioni, oppure se trasportate da un liquido. 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 ad alta volatilità
- liquidi a 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.

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.

Una classificazione della criticità delle apparecchiature che contengono sostanze a differente volatilità, è stata ricavata da Antonioni *et al.* (2009) nell'ambito della valutazione quantitativa del rischio NaTech, ed è stata mostrata in Tabella 2.

Viene presentata nei prossimi paragrafi una classificazione delle sostanze pericolose in base agli scenari dannosi che in certe condizioni e in funzione di specifiche variabili, possono sviluppare. Le sostanze vengono classificate come:

- infiammabili
- tossiche
- esplosive
- reattive con acqua.

### **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.

57

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 in superfici sferiche equipotenziali, 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  $\Delta h_{\text{comb}}$

della sostanza, nonché dalla superficie S della pozza e dalla efficienza della combustione  $\eta$  secondo la relazione:

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

**Equazione 3: 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:

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

**Equazione 4: 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.

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

**Equazione 5: 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 il problema 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 sotto-modello.

$$Q = m/t \cdot \Delta h_{comb} \cdot \eta$$

**Equazione 6: 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:

$$t = 2,6 \cdot m^{0,17}$$

**Equazione 7: 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:

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

**Equazione 8: 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.

59

---

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 9: 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 5. 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 5: Variabili principali influenti sul rischio determinato da sostanze classificate come Infiammabili.**

<b>Variabili influenti</b>	<b>Classificazione variabili</b>
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; per la definizione di tali parametri sono state sfruttate le classi di stabilità di Pasquill, che vanno dalla A: estremamente instabile, alla F: Moderatamente stabile. Esse sono mostrate in Tabella 6:

**Tabella 6: Classi di stabilità in relazione alla velocità del vento, al grado di insolazione e copertura notturna del cielo.**

Velocità del vento	Irraggiamento solare [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]			Frazione di copertura notturna del cielo	
	>700	350/700	<350	>1/2	<3/8
<2	A	A-B	B	-	-
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

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 biicamente 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:

$$X^2 \approx costante \cdot m^{0,8}$$

**Equazione 10: 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 di misurazione della tossicità acuta di una sostanza; in particolare valuta la concentrazione limite della sostanza, in presenza della quale un lavoratore non è soggetto a danni irreversibili e non perde la capacità di mettersi in fuga. È un valore disponibile per molte sostanze tossiche e usato comunemente 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.**

<b>Variabili influenti</b>	<b>Classificazione variabili</b>
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" ( <i>Council Directive</i> 6/82/EC)

### **3.2.5.3 Esplosive**

Come Esplosive si considerano tutte le sostanze che possono dare origine a fenomeni tipo VCE, BLEVE ed esplosioni meccaniche, ossia quei composti stoccati in serbatoi a pressione superiore a quella ambiente e classificati come Gas compressi/liquefatti e le sostanze definite come Infiammabili 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 le 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:

$$R_0^3 \cdot \frac{P_0}{q} = \text{costante}$$

**Equazione 11: 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:

$$R_0^2 \cong \text{costante} \cdot q^{0.66}$$

**Equazione 12: 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:

$$q \approx 2 \cdot P_0 \cdot V$$

**Equazione 13: 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 un'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 geometricamente congestionate, 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 ( $> 40 \text{ MJ/Kg}$ )
- Entalpia combustione bassa ( $< 40 \text{ MJ/Kg}$ ).

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*  $> 18^\circ\text{C}$ )
- 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 che influenzano il rischio determinato da sostanze classificate come Esplosive.**

Scenario incidentale	Variabili influenti	Classificazione variabili
VCE	Volatilità	Gas compressi/liquefatti Liquidi ad 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 alla quantità definita nell'ex articolo 8 della Direttiva "Seveso II" ( <i>Council Directive 96/82/EC</i> )
BLEVE	Volatilità	Gas compressi/liquefatti
Esplosione meccanica	Pressione di stoccaggio	Alta pressione (>20 bar) Bassa pressione (<20 bar)
	Massa	Frazione rispetto alla quantità definita nell'ex articolo 8 della Direttiva "Seveso II" ( <i>Council Directive 96/82/EC</i> )

### 3.2.5.4 Reattive con acqua

Per sostanze Reattive con acqua si considerano quelle sostanze classificate come R14, R15, R29 dalla Direttiva Europea 67/548/EEC (*Council Directive 67/548/EEC*) e che a contatto con l'acqua reagiscono dando origine a nuovi prodotti. I prodotti di reazione possono risultare tossici, infiammabili e generare scenari incidentali anche gravi.

Nel caso in cui sostanze reattive con acqua vengano a contatto con essa generando prodotti pericolosi in seguito alla rottura delle apparecchiature causata dal danneggiamento, si ipotizza che tale reazione vada a totale compimento, andando a consumare tutti i reagenti e a formare la maggior quantità possibile di prodotti. Questa ipotesi è stata introdotta per ragioni conservative: nel caso in cui la reazione formi dei prodotti pericolosi si analizza il caso in cui questi sono presenti nella maggior quantità. Una volta calcolata la massa di prodotti formatasi nella reazione, si analizzano le nuove sostanze eventualmente classificandole in Infiammabili, Tossiche, Esplosive; nel caso, esse rientreranno nell'analisi andando ad incrementare la massa totale di sostanze pericolose detenute in impianto.

### 3.3 Analytic Hierarchy Process

Per risolvere il problema della valutazione semplificata del rischio NaTech, è stato scelto il 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). Tale metodo è risultato infatti interessante per la sua capacità di strutturare i problemi e per la possibilità che offre di comparare simultaneamente un certo numero di parametri anche con unità di misura differenti. Grazie ad esso è infatti possibile calcolare un indice di prestazione che sia rappresentativo del rischio cui sono soggetti un determinato impianto o un' apparecchiatura.

L'AHP è un metodo utilizzato non solamente nell'ambito dell'analisi di rischio, ma in molti processi decisionali, che richiedono di comparare alternative, attributi e criteri che in prima analisi potrebbero sembrare non confrontabili, perché appartenenti ad ambiti decisionali differenti o perché dotati di unità di misura differenti.

Come primo passo si identifica l'obiettivo della scelta, in seguito si ordinano gli altri fattori decisionali disponibili secondo le relazioni di dipendenza che esistono tra di essi e con l'obiettivo stesso. Si identificano in questo modo diversi sottoproblemi e sotto-criteri che concorrono al *goal*. È ora possibile ordinare graficamente i fattori decisionali in un albero gerarchico, con al *Top* l'obiettivo della scelta e al primo livello gli obiettivi secondari che concorrono principalmente al *goal*. Da questo primo livello si separano diversi rami anch'essi ordinati in livelli, su cui sono ordinati i sotto-obiettivi, che rispondono ai diversi criteri di scelta. Questi criteri possono non essere comparabili tra loro, e per decidere quale di questi ha maggiore importanza, per ogni livello si costruisce una scala semantica di importanza relativa, propria del metodo AHP. Essa deriva da confronti a coppie dai quali sono ricavati i pesi che esprimono l'importanza relativa dei criteri. Al *bottom* dell'albero stanno le alternative oggetto della decisione; ad esse vengono assegnati dei punteggi su una scala normalizzata nell'intervallo 0-1, in funzione dell'importanza che hanno rispetto ai sotto-criteri cui devono rispondere.

Terminata la costruzione dell'albero, siamo in presenza di obiettivi secondari che concorrono al *goal*, ordinati in una scala gerarchica in diversi livelli, ognuno dei quali risponde a criteri decisionali definiti dalle alternative presenti al livello

inferiore. In ogni ramo della gerarchia si può trovare il peso che esso dà all'obiettivo finale calcolando l'intersezione di tutte le alternative, obiettivi e criteri che lo determinano. È così possibile definire il peso che hanno le alternative al *bottom* sull'obiettivo finale, e per fare ciò si definisce un indice della prestazione globale dell'alternativa (*Key performance Indicator*, KPI), definito su una scala 0-1. L'indice di prestazione 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 in Fattore di Incremento del Rischio del serbatoio, calcolata come descritto nel paragrafo 3.2.3.

$$WM_j = F_{ir} \cdot M_j\%$$

**Equazione 14: Indice di Massa Pesata per il j-esimo serbatoio, calcolato dal prodotto tra Fattore di Incremento del Rischio e Massa percentuale contenuta nel serbatoio.**

68

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 top dell'albero è invece costituito da un generico scenario incidentale; il risultato della applicazione del metodo è quindi un KPI indicativo del rischio posto da un determinato serbatoio rispetto al generico scenario incidentale considerato. Tutti i KPI relativi ai serbatoi che pongono lo stesso tipo di rischio possono essere sommati 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 artificiosamente 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 sotto-criteri. 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 sotto-criteri (*Subcriteria*), organizzati gerarchicamente come già descritto. La regola che permette di stabilire quali elementi possano essere posti in uno stesso gruppo, in posizione gerarchicamente inferiore a uno stesso criterio o obiettivo, è che essi diano risposta ad una 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 conoscenza della persona che si accinge alla decisione. La scomposizione dei singoli criteri in sotto-criteri 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 sotto-criteri 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 è stata sviluppata per ognuno dei generici scenari incidentali individuati; gli indici di prestazione ottenuti dalle singole gerarchie saranno riassunti 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 dipendente dalla volatilità, dall'entalpia di combustione e dalla massa di sostanze combustibili come riassunto in Tabella 5.

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 dall'allagamento 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.

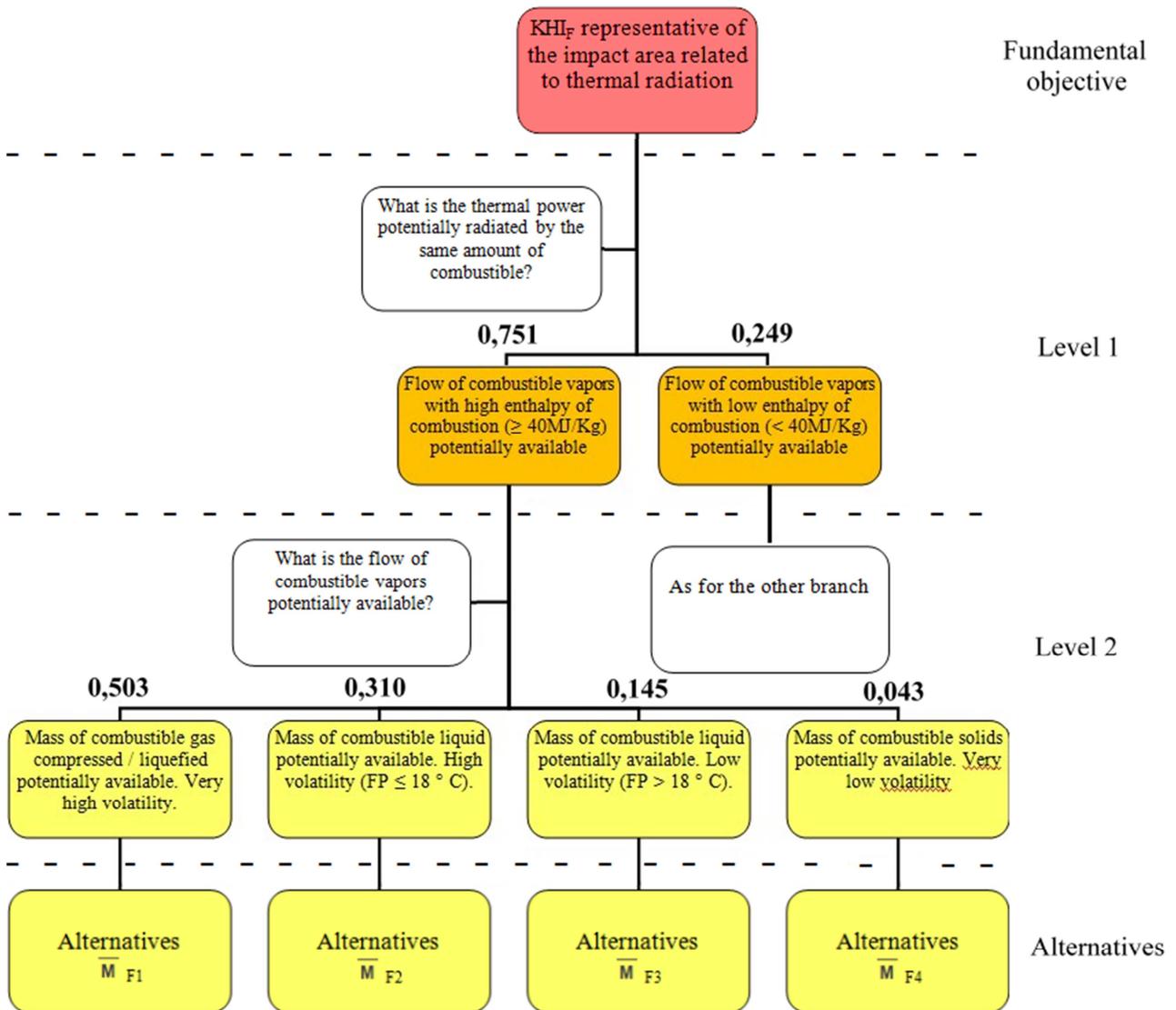
I criteri relativi all’entalpia, posti al di sotto del sotto-obiettivo saranno quindi:

- 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 sotto-criteri 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 8, tratta da Marzo *et al.* (to be submitted).



**Figura 8: 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**  
**Marzo et al. (to be submitted).**

Al di sotto dei sotto-criteri 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 dall'allagamento attraverso un indice chiamato Massa Pesata (*Weighted Mass*, WM), calcolato per ogni serbatoio come prodotto della massa contenuta e del Fattore di Incremento del Rischio.

### 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 l'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 l'obiettivo principale:

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

73

Per ognuno dei criteri individuati, i sotto-criteri 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 sotto-criteri 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 sotto-criteri 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 9, tratta da Marzo *et al.*, (to be submitted).

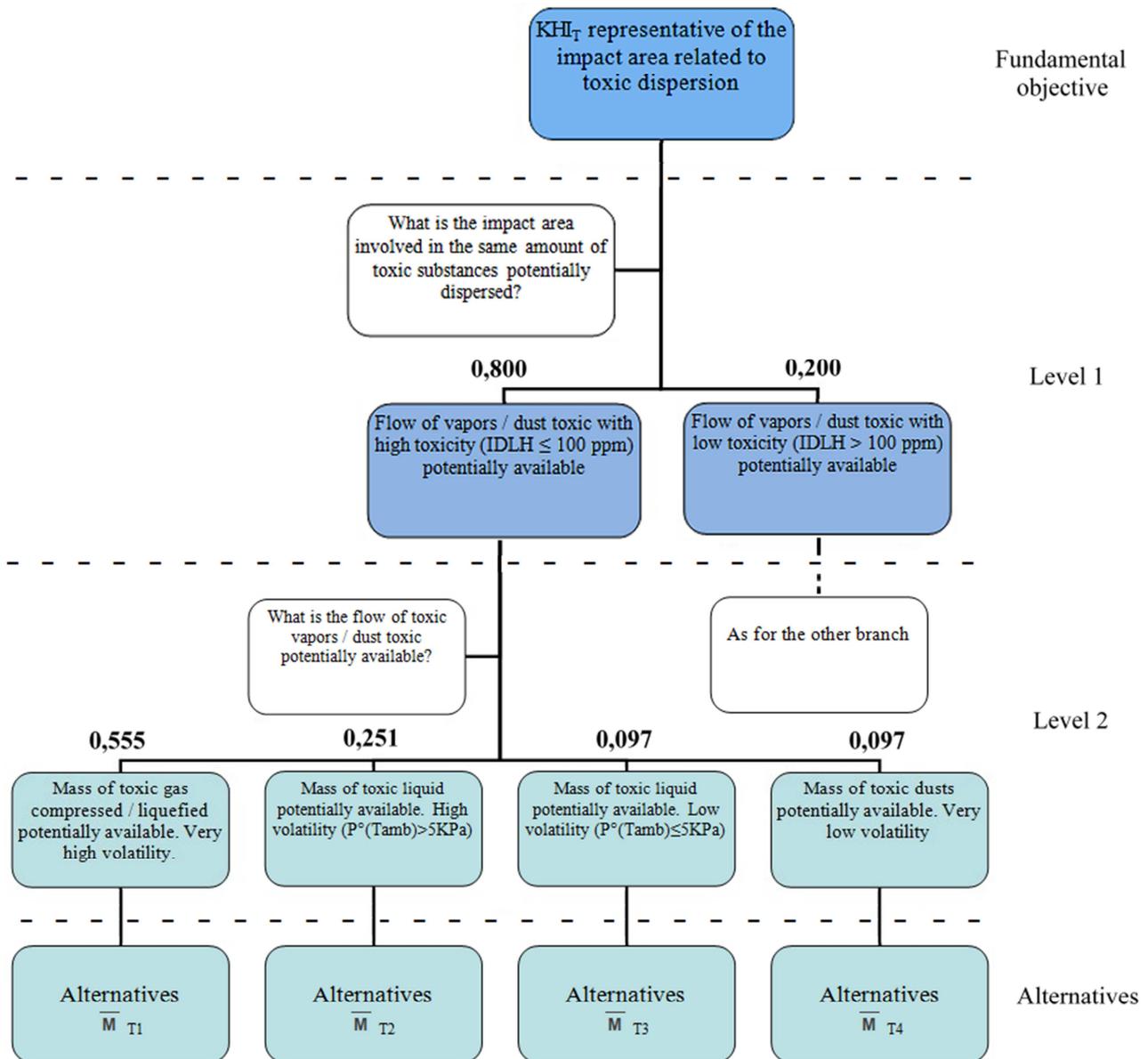


Figura 9: Gerarchia per la valutazione del rischio NaTech relativo a dispersione di sostanze tossiche; ai nodi sono mostrati i criteri individuati e la domanda a cui devono rispondere, nonché i pesi assegnati ai differenti criteri Marzo *et al.* (to be submitted).

### 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 l’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 sotto-criteri 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 sotto-criteri, 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  $< 18^\circ\text{C}$ )
- Polveri fini ( $D < 50 \mu\text{m}$ ).

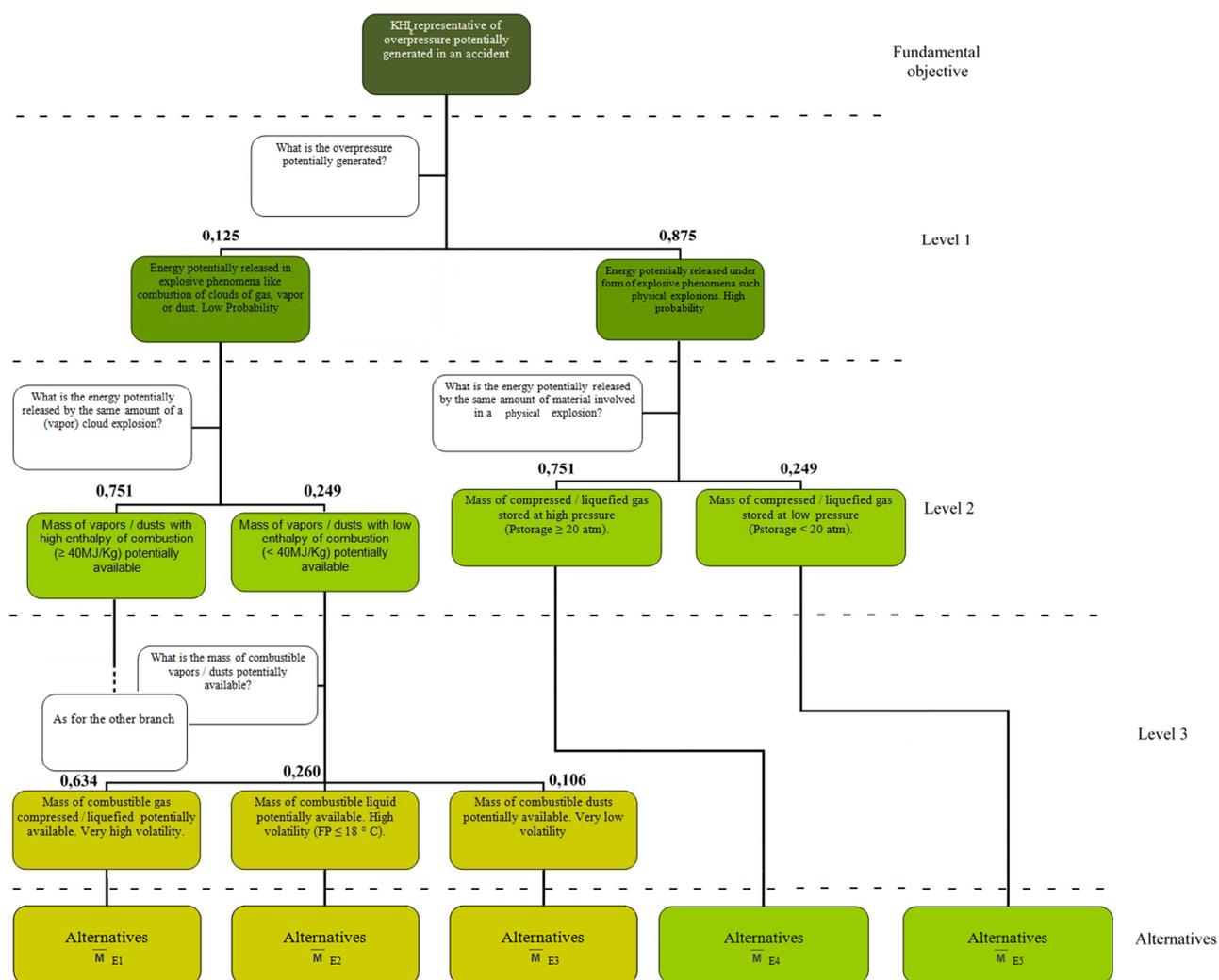
Al di sotto di questo livello si trovano le alternative, descritte dagli indici di Massa Pesata relativi alle sostanze classificate come Infiammabili e aventi la volatilità indicata, calcolati come descritto nel paragrafo 3.3.1.

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 10, tratta da Marzo *et al.*, (*to be submitted*).



**Figura 10: 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 (Marzo *et al.* (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 per caratterizzare le Alternative ha reso i KPI estremamente sensibili alla massa di sostanze chimiche e alla vulnerabilità degli stoccaggi agli eventi alluvionali, proprio perché tale massa è pesata dalla probabilità che sia rilasciata per la probabilità del collasso del contenitore. 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 metodologia illustrata nei paragrafi precedenti mostra com'è possibile ricavare gli indici di rischio globale dell'impianto ( $KPI_I$ ,  $PKI_T$ ,  $KPI_E$ ), relativi agli scenari derivanti dalla dispersione di sostanze infiammabili, tossiche o esplosive. Questi indici globali si possono ricavare dalla vulnerabilità dei singoli serbatoi.

Non è stato possibile unificare le tre gerarchie perché nel correlare gli indici di rischio alla superficie interessata dagli effetti letali di un incidente, sono state

adottate delle approssimazioni tali da rendere i  $KPI_i$  non direttamente confrontabili tra loro. Per calcolare l'indice globale di rischio dell'impianto  $KPI_G$ , consideriamo i tre  $KPI_i$  come vettori in uno spazio tridimensionale, giacenti sui tre assi ortogonali di un sistema di riferimento e aventi origine nell'origine del sistema. L'indice globale di rischio può essere rappresentato dal vettore somma posto a una certa distanza dall'origine, distanza definita dal modulo del vettore stesso (Marzo *et al.*, *to be submitted*). Il  $KPI_G$  si può quindi 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 15: Formula per la sintesi dei KPI relativi a differenti scenari incidentali in un unico indice.**

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. Per valutare l'importanza relativa dei criteri appartenenti a uno stesso livello, usati per definire la risposta a uno stesso sotto-

problema, il metodo AHP prevede di fornire un vettore di pesi costruito attraverso le Matrici dei confronti a coppie (Saaty 1980).

### 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 sotto-problema, 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 per il confronto a coppie (Saaty 1980).**

<b>Intensità di importanza <math>A_{ij}</math></b>	<b>Definizione</b>	<b>Spiegazione</b>
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 della matrici**

Completata la Matrice dei confronti a coppie relativa ai criteri influenti su uno stesso sotto-problema, 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  $\mathbf{A}$  e un vettore  $\mathbf{x}$  l'autovettore di una matrice  $\mathbf{A}$  è un vettore costituito di elementi detti autovalori  $\lambda$  tali per cui vale la relazione:

$$\mathbf{Ax} = \lambda \mathbf{x}$$

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

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

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; inoltre 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 16: 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.

$$C.R. = \frac{C.I.}{R.I.}$$

**Equazione 17: 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 però 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 una matrice  $n \times n$ , 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  $4 \times 4$ , 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  $n \cdot (n-1) / 2 = 6$ .

In generale si può dire che più importanza è stata data a sostanze con maggiore volatilità. È stato infatti 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.

Questo confronto è stato anche esposto in 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 ad 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.**

	<b>Gas compresso/liquefatto</b>	<b>Liquido alta volatilità</b>	<b>Liquido bassa volatilità</b>	<b>Solido</b>
<b>Gas compresso/liquefatto</b>	1	2	4	9
<b>Liquido alta volatilità</b>	1/2	1	3	7
<b>Liquido bassa volatilità</b>	1/4	1/3	1	5
<b>Solido</b>	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; questo procedimento viene 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.**

	<b>Gas compresso/liquefatto</b>	<b>Liquido alta volatilità</b>	<b>Liquido bassa volatilità</b>	<b>Solido</b>
<b>Gas compresso/liquefatto</b>	0,537	0,576	0,488	0,409
<b>Liquido alta volatilità</b>	0,269	0,288	0,366	0,318
<b>Liquido bassa volatilità</b>	0,134	0,095	0,122	0,227
<b>Solido</b>	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 8.**

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 di combustione elevata è

stata giudicata come leggermente maggiore rispetto al criterio bassa entalpia, il valore corrispondente è 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.**

	<b>Entalpia combustione elevata</b>	<b>Entalpia combustione bassa</b>
<b>Entalpia combustione elevata</b>	1	3
<b>Entalpia combustione bassa</b>	1/3	1

In Tabella 14 è infine riassunto il risultato che deriva dalle seguenti operazioni fatte sulle matrice in Tabella 13: normalizzazione delle colonne, mediazione delle righe della matrice che ne risulta e normalizzazione dei pesi.

**Tabella 14: Pesi per l'entalpia di combustione di sostanze Infiammabili, da utilizzare nella gerarchia relativa a Incendi rappresentata in Figura 8.**

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

È evidente come l'influenza nel determinare l'indice di rischio associata a sostanze con Entalpia di combustione elevata è maggiore, come del resto risultava dall'analisi effettuata al paragrafo 3.2.5.1.

#### **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 ( $P^0(T_{amb}) > 5 \text{ KPa}$ )
- Liquidi bassa volatilità ( $P^0(T_{amb}) < 5 \text{ KPa}$ )
- Polveri fini ( $D < 50 \mu\text{m}$ ).

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, e corrisponde 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.**

	<b>Gas compresso/liquefatto</b>	<b>Liquido alta volatilità</b>	<b>Liquido bassa volatilità</b>	<b>Polvere fine</b>
<b>Gas compresso/liquefatto</b>	1	3	5	5
<b>Liquido alta volatilità</b>	1/3	1	3	3
<b>Liquido bassa volatilità</b>	1/5	1/3	1	1
<b>Polvere fine</b>	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 9.**

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.**

	<b>Tossicità alta</b>	<b>Tossicità bassa</b>
<b>Tossicità alta</b>	1	4
<b>Tossicità bassa</b>	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: Pesi per la tossicità di sostanze Tossiche, da utilizzare nella gerarchia relativa a Dispersione di sostanze tossiche rappresentata in Figura 9.**

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.**

	<b>Alta probabilità</b>	<b>Bassa probabilità</b>
<b>Alta probabilità</b>	1	7
<b>Bassa probabilità</b>	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 10.**

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.**

	<b>Alta pressione</b>	<b>Bassa pressione</b>
<b>Alta pressione</b>	1	3
<b>Bassa pressione</b>	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 loro rilascio esplosivo.

**Tabella 22: Pesì per la per la pressione di stoccaggio di Gas compressi/liquefatti, da utilizzare nella gerarchia relativa ad Esplosioni rappresentata in Figura 10.**

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 d'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.**

	<b>Gas compresso/liquefatto</b>	<b>Liquido alta volatilità</b>	<b>Polvere fine</b>
<b>Gas compresso/liquefatto</b>	1	3	5
<b>Liquido alta volatilità</b>	1/3	1	3
<b>Polvere fine</b>	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 a Esplosioni rappresentata in Figura 10.**

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

## 4 RISULTATI

### 4.1 Convalida

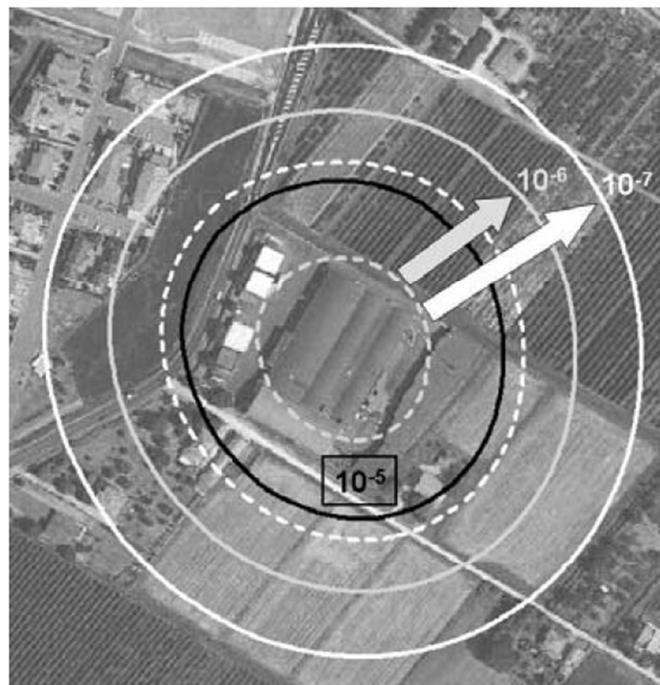
Il metodo messo a punto permette di valutare il rischio determinato dall'interazione tra un evento alluvionale e i serbatoi di stoccaggio presenti all'interno dell'impianto attraverso il calcolo di tre indici di prestazione KPI, relativi a tre diverse categorie di scenari incidentali (Incendi, Dispersione 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, e corrispondenti a:

- Livello idrico e velocità dell'acqua
- vulnerabilità degli stoccaggi all'evento alluvionale
- massa contenuta negli stoccaggi
- pericolosità delle sostanze rilasciate (tossicità, infiammabilità, potenziale esplosivo, reattività con acqua)
- intensità del pericolo rappresentato dalla sostanza (Alto/Basso)
- volatilità delle sostanze rilasciate (Gas compressi/liquefatti, Liquidi ad 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 da alluvioni. Per la convalida si rende quindi necessario il confronto con indici di rischio che siano correlati alla superficie potenzialmente interessata dagli effetti letali di un incidente. A tal fine si è deciso di convalidare il metodo confrontando i risultati ottenuti con quelli ricavati dalla *Quantitative Risk Analysis* (QRA) relativi ad eventi NaTech. 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.

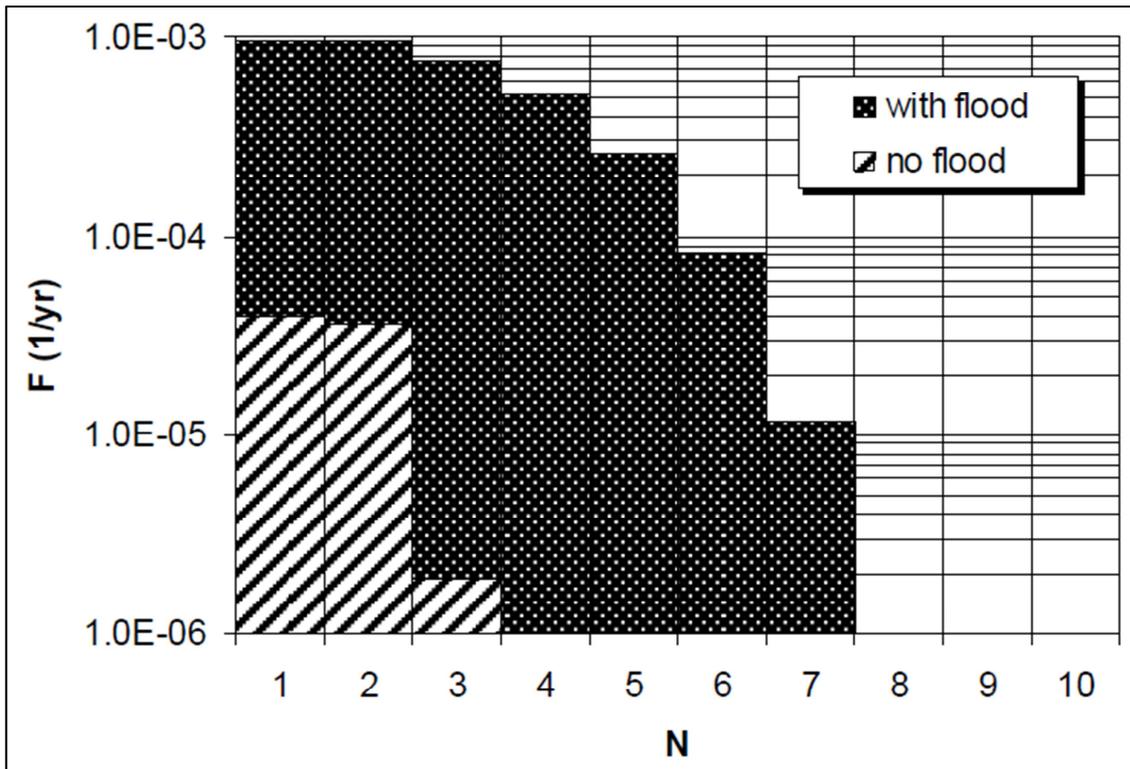
Assumendo che la persona si possa trovare con frequenza pari a 1 a una distanza fissata dall'impianto e che gli effetti degli incidenti, se di sufficiente intensità, possano colpire tale posizione con probabilità pari a 1, l'indice assume il significato di Rischio Locale. Esso rappresenta quindi la frequenza 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 perciò 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 11.



**Figura 11: Rappresentazione grafica dei valori assunti dal Rischio Locale, ottenuti da QRA. Linea tratteggiata: probabilità di guasto per cause alluvionali non inclusa; linea continua: probabilità di guasto per cause alluvionali inclusa (Antonioni et al. 2008).**

Le curve F-N rappresentano la frequenza cumulata di incidenti con un numero di vittime determinato; un esempio è mostrato in Figura 12.

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 12: Curva F-N ottenuta dall'aggregazione dei valori del Rischio Locale. Area a strisce: probabilità di guasto per cause alluvionali non inclusa; area a pallini: probabilità di guasto per cause alluvionali inclusa (Antonioni et al. 2008).**

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. 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 *layout* 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 alluvionale. Gli indici sono 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 l'alluvione. 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 all'alluvione  $PLL_{ratio}$ , 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 alluvionali ( $PLL_{flood}$ ), calcolato come somma dei PLL dovuti alle due differenti cause ( $PLL_{flood} + PLL_{internal}$ ), e il  $PLL_{internal}$  come mostrato in Equazione 18.

$$PLL_{ratio} = \frac{PLL_{flood} + PLL_{internal}}{PLL_{internal}}$$

**Equazione 18: Incremento dell'indice PLL a causa di eventi alluvionali.**

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 ( $KPI_G < 10^{-2}$ ).

95

Ci si attende che a valori minimi del  $PLL_{ratio}$  (dell'ordine di  $10^{-1}$ ) 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: un valore di  $PLL_{ratio}$  dell'ordine di  $10^1$  indica un incremento medio, e un  $PLL_{ratio}$  di  $10^2$  equivale alla classe alta del KPI.

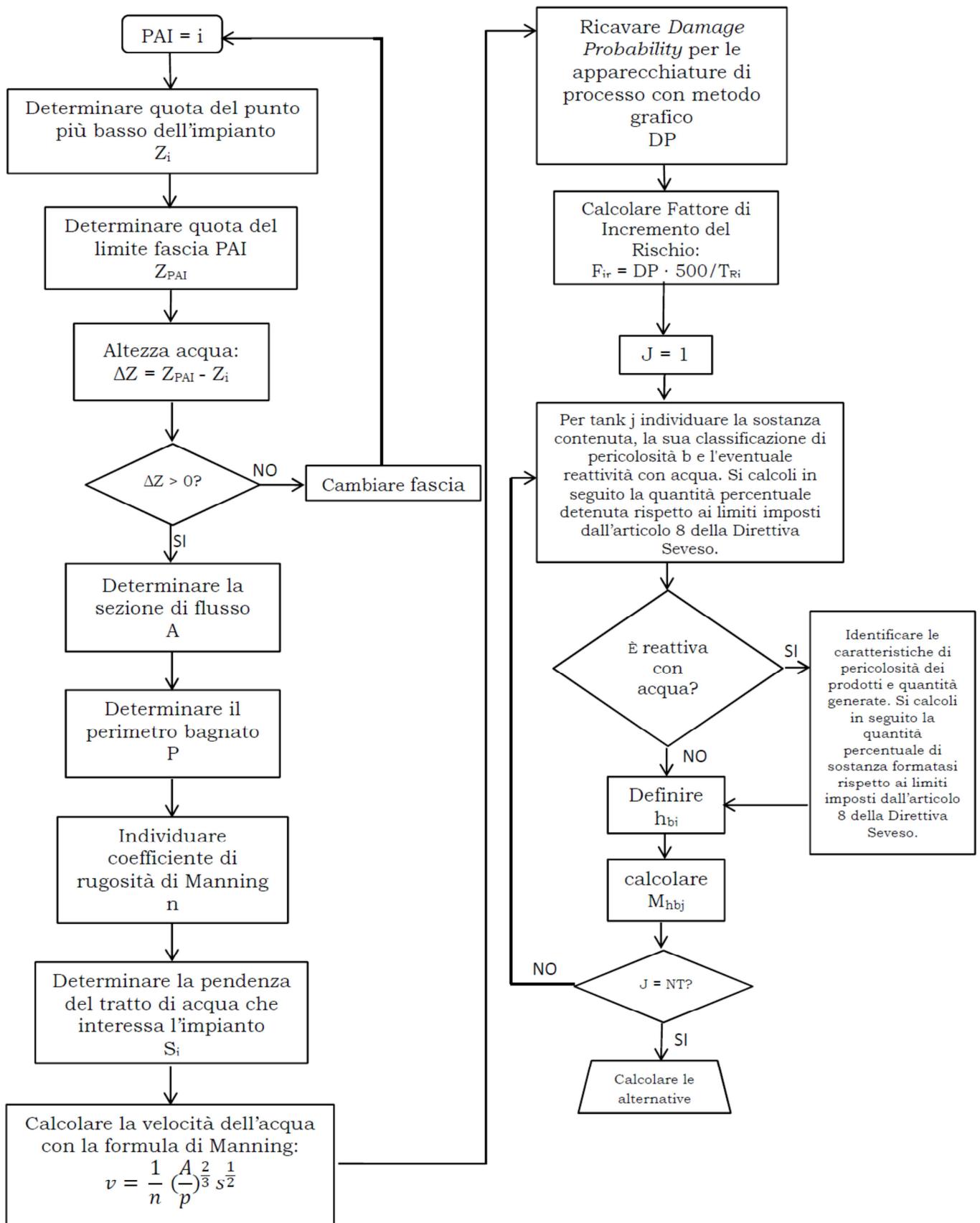
#### **4.1.1 Caso studio 1: Poggio Renatico**

Il presente lavoro è stato effettuato sull'analisi qualitativa di rischio Natech cui è soggetto un impianto posto nel territorio di Poggio Renatico, località di Gallo, nei pressi della diga sul fiume Reno. Lo scopo dello studio è stato quello di convalidare i risultati di un'analisi di rischio qualitativa effettuata con il metodo AHP, con i dati ottenuti da una QRA sviluppata sullo stesso impianto da Antonioni *et al.* (2009). In tal modo si è potuta verificare l'accuratezza del metodo qualitativo presentato nel Capitolo 3.

I due metodi seguono approcci differenti al problema, ma giungono entrambi a quantificare il rischio; il metodo semplificato indica un livello di rischio classificato come basso, medio o alto, la QRA fornisce invece l'incremento che il fattore ambientale aggiunge al rischio proprio dell'impianto.

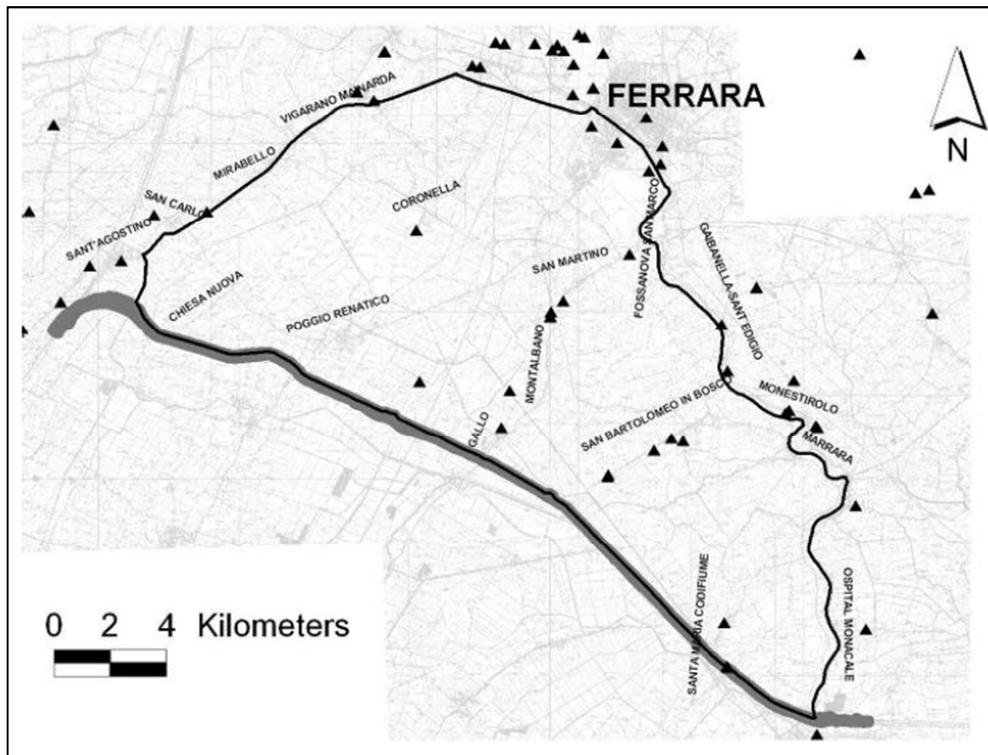
Per il presente caso studio si vuole dimostrare che il metodo AHP è in accordo con quanto risultante dalla QRA.

L'analisi qualitativa segue una determinata procedura rappresentata in Figura 13:



**Figura 13: Procedura per la valutazione semplificata del rischio di incidenti rilevanti iniziati da alluvione.**

Si caratterizza innanzitutto la magnitudo dell'evento alluvionale attraverso un'analisi cartografica, come descritto nel paragrafo 3.2.1. La mappatura del sito è mostrata in Figura 14.



**Figura 14: cartografia del sito di interesse, posto nel territorio di Ferrara e nella zona di esondazione del fiume Reno.**

I parametri che vogliamo definire sono l'altezza massima che raggiunge l'acqua e la sua velocità d'impatto. I dati sono stati ricavati tramite strumenti di facile recupero e utilizzo, quali *Google Earth* e le mappature del comune di Poggio Renatico, e sono riassunti in Tabella 25:

**Tabella 25: Parametri ambientali per caratterizzare la magnitudo dell'evento alluvionale del Caso Studio 1.**

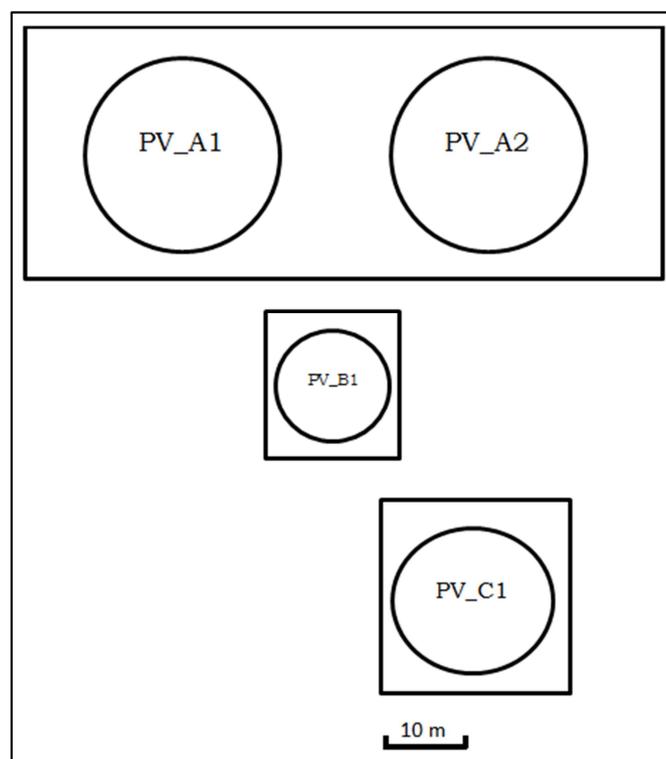
<b>PAI strip</b>	<b>C</b>
<b><math>Z_{PAI}</math></b>	10 [m]
<b><math>Z_i</math></b>	9 [m]
<b><math>\Delta Z</math></b>	1 [m]
<b><math>p</math></b>	2504 [m]
<b><math>A</math></b>	2500 [m <sup>2</sup> ]
<b><math>n</math></b>	0.035
<b><math>s</math></b>	0.0091
<b><math>v</math></b>	2.721 [m/s]
<b><math>v^2</math></b>	7.405 [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]

Si procede in seguito con il calcolo della probabilità di danno attraverso il metodo grafico di Antonioni *et al.* (2009), nel quale la probabilità di danno è definita partendo dall'altezza massima dell'acqua e dal quadrato della velocità di impatto, come mostrato in Figura 6; si calcola inoltre il Fattore di Incremento del Rischio, come mostrato del paragrafo 3.2.3 che nel caso di impianto situato nella fascia C è pari alla DP stessa. Questi parametri sono mostrati in Tabella 26.

**Tabella 26: Parametri che caratterizzano l'evento alluvionale: *Damage Probability*, ricavata dal metodo grafico di Antonioni *et al.* (2009), e Fattore di Incremento del Rischio relativi al Caso Studio 1.**

DP	100%
F <sub>ir</sub>	1

Si procede in seguito con l'analisi delle sostanze contenute nei serbatoi: per ogni sostanza si definiscono la sua pericolosità, la reattività con acqua e la quantità degli eventuali prodotti di reazione, considerando per ragioni conservative che avvenga la reazione di tutti i reagenti. Nell'impianto di interesse è presente Ammoniaca Anidra in quantità differenti per i diversi serbatoi, rappresentati nello schema in Figura 15:



**Figura 15: Schema dei serbatoi presenti nell'impianto del Caso Studio 1 contenenti Ammoniaca Anidra.**

Nella Tabella 27 sono specificate le quantità presenti in ognuno dei serbatoi dell'impianto.

**Tabella 27: valori della massa di ammoniacca anidra presente nei serbatoi per il Caso Studio 1.**

Nome elemento	Quantità (10 <sup>3</sup> Kg)
PV_A1	16.8
PV_A2	16.8
PV_B	2.8
PV_C	5.6

La sostanza presa in esame ha le seguenti caratteristiche di pericolosità: ha bassa tossicità, non è infiammabile, è poco esplosibile, è reattiva con acqua.

Per ogni serbatoio si confronta la quantità contenuta con il limite imposto dall'articolo 8 della Direttiva Europea "Seveso II" (*Council Directive 96/82/EC*), che dichiara per ogni sostanza pericolosa la massima quantità stoccabile senza essere soggetti ad obbligo di valutazione quantitativa del rischio. Per l'Ammoniaca Anidra tale limite è fissato a  $200 \cdot 10^3$  Kg, quindi i serbatoi rientrano nel valore richiesto. È possibile perciò calcolare la massa presente nel serbatoio come percentuale rispetto al limite.

Si procede con l'applicazione del metodo delle gerarchie, precedentemente descritto, assegnando ad ogni serbatoio k un indice di Massa Pesata, calcolato come prodotto della massa percentuale per l'indice  $F_{ir}$ . In Tabella 28 sono riportati gli indici per i serbatoi:

**Tabella 28: valori della massa presente nei serbatoi del Caso Studio 1, massa percentuale, massa pesata per ogni serbatoi e indice di massa pesata.**

Serbatoio	Quantità (10 <sup>3</sup> Kg)	M %	M <sub>hb</sub>
PV-A1	16.8	0.084	0.084
PV-A2	16.8	0.084	0.084
PV-B	2.8	0.014	0.014
PV-C	5.6	0.028	0.028
<b>Indice Globale di Massa Pesata</b>			0,21

Nel presente caso, dato che i serbatoi contengono tutti la stessa sostanza, si può definire un Indice di Massa Pesata globale come somma delle masse pesate di tutti i serbatoi. Usando le caratteristiche di pericolosità della sostanza contenuta

e le gerarchie per sostanze classificate come Infiammabili, Tossiche ed Esplosive, si identificano i rami  $h_{bk}$  delle gerarchie che descrivono il rischio rappresentato dalla sostanza contenuta nei serbatoi;  $h$  descrive la gerarchia a cui il ramo appartiene ( $h = I, T, E$ ),  $b$  è il numero che identifica il ramo della gerarchia. Moltiplicando l'Indice di Massa Pesata per i pesi presenti sul ramo  $h_{bk}$  si ottiene il valore del KPI relativo al rischio determinato da quella combinazione di serbatoi, 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 dai serbatoi analizzati rispetto a differenti scenari incidentali. Nel caso in esame, la sostanza contenuta nei serbatoi è classificata come Tossica, non Infiammabile, Esplosibile, Gas Compresso/Liquefatto, reattiva con acqua. Nonostante l'Ammoniaca Anidra sia reattiva con acqua, i prodotti di reazione non vengono considerati nell'analisi, perché presentano le stesse caratteristiche di pericolosità del reagente e non forniscono pericoli aggiuntivi. Per la definizione del KPI si moltiplicano i pesi dei rami caratteristici della sostanza per l'indice di massa pesata globale, calcolato come sommatoria di tutti gli indici di massa pesata, come mostrato in Tabella 28.

Vengono in seguito riportati i KPI ricavati dalle gerarchie:

**Tabella 29: Valori dei KPI del Caso Studio 1 relativi a Incendio, Dispersione di sostanze tossiche, Esplosioni e Indice di Rischio Globale.**

$KPI_I$	0
$KPI_T$	0.0233
$KPI_E$	0.0458
<b><math>KPI_G</math></b>	<b>0.0514</b>

L'indice relativo agli incendi risulta dal fatto che il composto ha entalpia di combustione nulla, il  $KPI_T$  dalla combinazione del peso di un gas compresso/liquefatto con quello di bassa tossicità; infine il  $KPI_E$  è determinato

dalla sommatoria del contributo di VCE, con entalpia di combustione nulla e gas compresso/liquefatto e BLEVE a pressione interna bassa.

L'indice di rischio globale si calcola come radice quadrata della sommatoria dei quadrati dei KPI.

Il valore trovato, essendo compreso tra  $10^{-2}$  e  $10^{-1}$ , corrisponde a un livello di rischio medio.

Per la convalida del metodo, si confronta l'indice di rischio globale ricavato dall'analisi qualitativa, con i valori numerici ottenuti dalla QRA. In questo caso faremo riferimento al *Potential Life Loss Index* (PLL), che indica il numero di decessi attesi in un anno in una certa porzione di territorio circostante l'impianto causati da un evento incidentale. Tale indice si può calcolare come l'area sottesa alla curva della frequenza cumulata di accadimento dell'incidente, in funzione del numero di morti attesi. Tale curva viene costruita per l'impianto sia nel caso di incidente causato da eventi interni all'industria ( $PLL_{internal}$ ), sia nel caso di incidenti causati da fenomeni esterni, in questo caso fenomeni naturali di tipo inondazione ( $PLL_{flood}$ ). Attraverso tali indici si può misurare l'incremento del rischio causato dalla presenza del fenomeno naturale rispetto al rischio derivante dal solo incidente industriale come espresso nell'equazione 18.

È proprio il  $PLL_{ratio}$  che consente di paragonare il metodo qualitativo con la QRA: un incremento del PLL di un ordine di grandezza corrisponde a un livello di rischio Medio, un incremento di 2 ordini di grandezza corrisponde a un livello Alto.

Il presente caso studio ha ricavato i seguenti indici di rischio:

**Tabella 30: Indici di rischio ricavati dalla QRA del Caso Studio 1.**

$PLL_{internal}$	7.69E-5
$PLL_{flood}$	3.54E-3
<b><math>PLL_{ratio}</math></b>	<b>47.05</b>

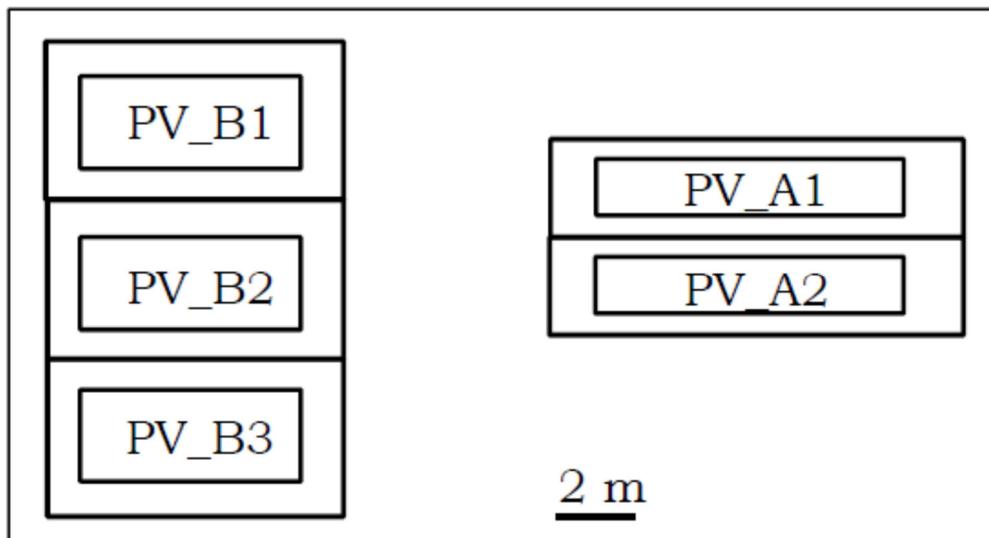
Il  $PLL_{ratio}$  indica un incremento di un ordine di grandezza, che corrisponde a un livello di rischio Medio. Lo stesso valore è stato ricavato dall'analisi qualitativa attraverso l'indice  $KPI_G$ .

**Tabella 31: Confronti tra indici di rischio del Caso Studio 1.  $PLL_{ratio}$  ricavato dalla QRA e  $KPI_G$  ricavato con il metodo AHP. Entrambi gli indici definiscono un livello di rischio MEDIO.**

$PLL_{ratio}$	$KPI_G$	Livello di rischio
47.05	0.0514	<b>Medio</b>

### 4.1.2 Caso studio 2: Ferrara

In questo lavoro è stato analizzato il rischio cui è sottoposto un impianto posto nel territorio di Ferrara. Il *layout* dell'impianto è mostrato in Figura 16:



**Figura 16: layout dei serbatoi dell'impianto del Caso Studio 2.**

Scopo del lavoro è quello di convalidare i risultati ottenuti da un'analisi qualitativa, con quelli ricavati da una QRA.

I parametri ambientali che caratterizzano il sito sono stati usati per definire la probabilità di danno, tramite il metodo grafico di Antonioni e sono riassunti in Tabella 32:

**Tabella 32: Parametri ambientali e *Damage Probability* del Caso Studio 2.**

<b>h</b>	1 [m]
<b>v<sup>2</sup></b>	0.204 [m/s]
<b>DP</b>	55%

Il Fattore di Incremento del Rischio è pari a 1 perché l'impianto si trova in fascia C; il valore di  $F_{ir}$  è pari perciò alla DP.

I serbatoi analizzati contengono tutti Ammoniaca Anidra, in Tabella 33 sono rappresentate le quantità presenti in ogni serbatoio.

**Tabella 33: Massa di Ammoniaca Anidra stoccata nei serbatoi analizzati nel Caso Studio 2.**

<b>Serbatoio</b>	<b>Quantità (10<sup>3</sup> Kg)</b>
PV-A1	13,5
PV-A2	13,5
PV-B1	10
PV-B1	10
PV-B1	10

Si calcolano in seguito per ogni serbatoio la Massa Percentuale rispetto al limite imposto dalla Direttiva Europea “Seveso II” (*Council Directive 96/82/EC*), che nel caso dell’ammoniaca anidra è pari a  $200 \cdot 10^3$  Kg, e la Massa Pesata, calcolata come prodotto tra Massa Percentuale e  $F_{ir}$ . I valori ricavati sono riassunti in Tabella 34:

**Tabella 34: Valori di Massa stoccata, Massa percentuale e Massa Pesata per ogni serbatoio analizzato nel Caso Studio 2, e Indice Globale di Massa Pesata.**

Serbatoio	Quantità ( $10^3$ Kg)	M %	$M_{hb}$
PV-A1	13,5	0.068	0.037
PV-A2	13,5	0.068	0.037
PV-B1	10	0.049	0.027
PV-B1	10	0.049	0.027
PV-B1	10	0.049	0.027
<b>Indice Globale di Massa Pesata</b>			<b>0.157</b>

L’analisi della pericolosità delle sostanze è effettuata come descritto nel paragrafo 4.1.1: il composto analizzato è Ammoniaca Anidra, classificata come Tossica, non Infiammabile, Esplosibile, Gas Compresso/Liquefatto, reattiva con acqua, ma che fornisce prodotti aventi le medesime caratteristiche di pericolosità del reagente. Si definisce quindi l’indice  $h_{bk}$  col quale si entra nella h-esima gerarchia. Partendo dall’Indice Globale di Massa Pesata si risalgono i rami per calcolare i KPI delle varie gerarchie. I valori ricavati sono elencati in Tabella 35:

**Tabella 35: Key Performance Indicator per caratterizzare il rischio presente nell’impianto trattato nel Caso Studio 2 rispetto a Incendi, Dispersione di sostanze Tossiche e Esplosioni, e indice Globale di Rischio.**

$KPI_I$	0
$KPI_T$	0.017
$KPI_E$	0.034
<b><math>KPI_G</math></b>	<b>0.0383</b>

L’indice relativo agli incendi risulta dal fatto che il composto ha entalpia di combustione nulla, il  $KPI_T$  dalla combinazione del peso di un gas compresso/liquefatto con quello di bassa tossicità; infine il  $KPI_E$  è determinato dalla sommatoria del contributo di VCE, con entalpia di combustione nulla e gas compresso/liquefatto e BLEVE a pressione interna bassa. L’indice di rischio globale è ricavato dalla radice quadrata della sommatoria dei quadrati dei KPI.

Il valore trovato, essendo compreso tra  $10^{-2}$  e  $10^{-1}$ , corrisponde a un livello di rischio Medio.

Per convalidare il metodo è stato confrontato il  $KPI_G$  con il  $PLL_{ratio}$ , ricavato tramite una QRA, come descritto nel caso studio precedente.

I valori relativi all'analisi quantitativa sono riassunti in Tabella 36:

**Tabella 36: Indici di rischio ricavati dalla QRA del Caso Studio 2.**

$PLL_{internal}$	$8.0 \cdot 10^{-4}$
$PLL_{flood}$	$1.9 \cdot 10^{-2}$
<b><math>PLL_{ratio}</math></b>	<b>24.8</b>

Il  $PLL_{ratio}$ , indica un incremento di rischio di un ordine di grandezza, che corrisponde a un livello di rischio Medio.

In Tabella 38 sono confrontati gli indici relativi all'analisi qualitativa e quantitativa; entrambi mostrano un livello di rischio Medio, e questo indica la bontà del metodo semplificato.

**Tabella 37: Confronto tra i livelli di rischio ricavati da una QRA e dall'analisi qualitativa del Caso Studio 2; entrambi gli indici mostrano un livello di rischio medio.**

$PLL_{ratio}$	$KPI_G$	Livello di rischio
24.8	0.0383	<b>Medio</b>

## 5 CONCLUSIONI

La valutazione del rischio Natech è un fattore fondamentale per l'analisi di rischio nelle aziende: la combinazione di evento naturale e incidente industriale aumenta i livelli di rischio del territorio circostante anche fino a valori non accettabili. Da un lato gli eventi naturali possono incrementare la frequenza di accadimento e la magnitudo degli incidenti industriali, dall'altro la popolazione si trova esposta oltre ai danni ambientali, anche a sostanze pericolose e a pericoli secondari quali incendi o esplosioni, causati dall'incidente industriale. È quindi fondamentale che ogni azienda si tuteli, valutando il livello di rischio cui è sottoposta, per capire se c'è la necessità di incrementare le misure di prevenzione e protezione in essa esistenti.

I metodi quantitativi forniscono un'indicazione del rischio che deriva da un'analisi dettagliata, che necessita di una grande quantità di risorse.

Lo scopo del presente lavoro di tesi è stato quello di elaborare un metodo di *screening* per la valutazione qualitativa del rischio indotto dall'interazione tra eventi alluvionali e grossi stoccaggi di sostanze pericolose. Tale metodo, oltre a richiedere un numero limitato di risorse, consente di comparare impianti molto diversi tra loro e situati in ambienti esposti a differenti livelli di rischio. Il metodo è applicabile senza la presenza di un analista esperto e consente di stimare il livello di rischio come basso, medio o alto; in quest'ultimo caso sarà necessario procedere con analisi più dettagliate, applicando i metodi propri della QRA al problema del rischio NaTech.

Il primo passo per lo sviluppo del metodo è consistito nel caratterizzare il fenomeno naturale attraverso magnitudo e frequenza di accadimento. Tali parametri sono raccolti nella *Damage Probability*, calcolata noti il livello idrico che raggiunto nell'alluvione e la velocità d'impatto contro le apparecchiature. Per quegli impianti non situati in fascia C (scelta come riferimento in quanto la maggior parte degli impianti è situata in questa fascia), il livello di rischio è maggiore; questo aumento è quantificato dal Fattore di Incremento del Rischio, che mette a confronto i tempi di ritorno delle diverse fasce rispetto a quello della fascia C.

Il secondo passo è consistito nel caratterizzare il potenziale danno sull'impianto calcolando la massa di sostanze pericolose potenzialmente rilasciabili in un

evento alluvionale caratterizzato (come detto sopra). Per introdurre delle ipotesi semplificative e conservative, sono stati considerati solo i grandi serbatoi, che contengono le maggiori quantità di sostanze. Per ogni serbatoio si identifica la massa di sostanza contenuta e si calcola la Massa Pesata attraverso il limite imposto dalla Direttiva Europea e il Fattore di Incremento del Rischio, come mostrato nell'Equazione 14. Si classificano le sostanze pericolose contenute nei serbatoi in Infiammabili, Tossiche ed Esplosive, e in funzione dello stato fisico di stoccaggio. È così possibile identificare gli scenari potenzialmente causabili dal rilascio in ambiente di queste sostanze. Grazie a queste informazioni è possibile applicare l'*Analytic Hierarchy Process*. Esso riassume in tre gerarchie, una per ogni scenario incidentale, l'incidenza che i serbatoi contenenti un determinato composto hanno sullo scenario stesso. La prestazione è funzione delle caratteristiche di pericolosità della sostanza stoccata, rispetto allo scenario proprio della gerarchia, e della sua fase di stoccaggio. Il metodo porta alla definizione di tre *Key Performance Indicator*, uno per ogni gerarchia, che è possibile raggruppare in un indice globale  $KPI_G$ . I risultati ottenuti sono distinti in 3 classi di sensibilità dell'impianto al rischio Natech, corrispondenti a livelli di rischio diversi: 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  $10^{-1}$ ). Una volta ottenuti gli indici grazie all'applicazione dell'*Analytic Hierarchy Process*, il metodo di valutazione semplificato è stato convalidato attraverso i risultati di valutazioni quantitative del rischio, valutando l'incremento del *Potential Life Loss Index* dovuto a cause alluvionali.

I risultati ottenuti con il metodo di *screening* sono in buon accordo con i risultati ottenuti dalla QRA.

Attraverso questo metodo è quindi possibile valutare il rischio Natech ed effettuare un'analisi preliminare con l'utilizzo di risorse limitate e facilmente reperibili.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- Antonioni, Bonvicini, Spadoni, Cozzani, *Development of a framework for the risk assessment of Na-Tech accidental events*, Reliability Engineering and System Safety, **94**, 1442-1450, 2009
- Antonioni, Campedel, Di Baldassarre, Spadoni, Cozzani, *A framework for the assessment of the industrial risk caused by floods*, in *ESREL Conference 2008*, 2008.
- Marzo, Busini, Rota, *Definition of a short-cut methodology for assessing flood-related Na-Tech risk, to be submitted*
- Autorità di bacino del fiume Pò, Progetto di Piano di Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, 7.Norme di attuazione, Titoli II-Norme per le fasce fluviali, Allegato III-*Metodo di delimitazione delle fasce fluviali*, Legge 18 Maggio 1989
- iNTeg-Risk (2008). *Early Recognition, Monitoring and Integrated Management of Emerging, New Technology Related Risks*, Large-scale integrating project, 7th 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/>
- Cozzani, Campedel, Renni, Krausmann, *Industrial accidents triggered by flood events: Analysis of past accidents*, Journal of Hazardous Materials, **175**, 501-509, 2010
- Busini, Marzo, Callioni, Rota, *Definition of a short-cut methodology for assessing earthquake-related NaTech risk*, Journal of Hazardous Materials, 2011

- Antonioni, Spadoni, Cozzani, *A methodology for the quantitative risk assessment of major accidents triggered by seismic events*, Journal of Hazardous Materials, **147**, 48-59, 2007
- Dutta, Herath, Musiake, *A mathematical model for flood loss estimation*, Journal of Hidrology, **277**, 24-49, 2003
- Fendler, *Floods and safety of establishments and installations containing hazardous substances*, Nat Hazard, **46**, 257-263, 2008
- Picou, *Katrina as a Natech Disaster Toxic Contamination and Long-Term Risks for Residents of New Orleans*, University of South Alabama, Jass Fall, 39, 2009
- Krausamann, Mushtaq, *A qualitative Natech damage scale for the impact of floods on selected industrial facilities*, Nat Hazards, **46**, 179-197, 2008
- Young, Balluz, Malilay, *Natural and technologic hazardous material releases during and after natural disasters: a review*, Science of the Total Environment, **322**, 3-20, 2004
- Rasmussen, *Natural events and accidents with hazardous materials*, Journal of Hazardous Materials, **40**, 43-54, 1995
- Rota, Caragliano, Brambilla, Manca, *Comparing Floods and Industrial Accidents: a Conceptual Framework for Multi-Risk Assessment*, Politecnico di Milano
- Egidi, Foraboschi, Spadoni, *The aripa project: analysis of the major accident risks connected with industrial and transportation activities in the Ravenna area*, Reliability Engineering and System Safety, **49**, 75-89, 1995
- Showalter, Myers, *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, 1994.

*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://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31967L0548:en:NOT>

Cruz, Steinberg, Vetere-Arellano, *Emerging issues for Natech disaster risk management in Europe*, *Journal of Risk Research*, **9(5)**, 483-501, 2006

Lees, *Loss prevention in the Process Industries*, ed. Oxford; Butterworth-Heinemann, 1996

Rota, Nano, *Introduzione alla Affidabilità e Sicurezza nell'Industria di Processo* Pitagora Editrice, Bologna, Italia, 2007

Saaty, *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, 1980

110

---

Cruz, Okada, *Methodology for preliminary assessment for Natech risk in urban areas*, *Natural Hazard*, **46(2)**, 199-220, 2008

Saaty, *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*, Vol. VI, AHP series, RWS Publications Pittsburgh, PA. USA, 2000

Steinberg, Sengul, Cruz, *NaTech risk and management: an assessment of the state of the art*, *Natural Hazards* **46(2)**, 143-152, 2008.