

DISPOSITIVI DI PROTEZIONE PASSIVA PER LA RIDUZIONE DEL RISCHIO NEL TRASPORTO DI GAS LIQUEFATTI IN PRESSIONE

Paltrinieri, N.¹, Landucci, G.², Antonioni, G.¹, Bonvicini, S.¹, Spadoni, G.¹, Cozzani, V.¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, via Terracini n.28, 40131 Bologna, Italia

(2) Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali, Università di Pisa, Via Diotisalvi n.2, 56126 Pisa, Italia

SOMMARIO

Il GPL (gas di petrolio liquefatto) è tra le sostanze pericolose maggiormente trasportate su strada e ferrovia in Europa. E' noto che il trasporto di GPL, a causa delle caratteristiche della miscela e delle condizioni in cui avviene il trasporto, causa un rischio potenziale elevato. Nell'ambito del presente lavoro, sono state approfondite le problematiche legate alla sicurezza nel trasporto di gas liquefatti in pressione, in particolar modo del GPL, in relazione all'adozione di misure di protezione passiva antincendio dei serbatoi. In particolare è stato approfondito il ruolo della coibentazione termica nella riduzione del rischio associato ad alcuni scenari incidentali di particolare gravità. L'efficacia della coibentazione termica, basata sulla capacità di evitare o ritardare la rottura di un serbatoio esposto ad un incendio, prevenendo il conseguente BLEVE, è stata dimostrata utilizzando un approccio modellistico basato su un'analisi ad elementi finiti (FEM) del comportamento delle cisterne in condizioni di incendio esterno. I tempi di cedimento predetti tramite la FEM sembrano sufficienti a garantire un'azione di prevenzione efficace. Sulla base dei risultati ottenuti, è stato quindi analizzato l'impatto potenziale sulla riduzione del rischio che deriverebbe dall'applicazione di una protezione termica alle cisterne. L'analisi, condotta attraverso il software TRAT-GIS 4.1, è stata applicata a vari "case-studies", tra i quali il comune di Casalecchio (relativamente ad i flussi censiti sull'autostrada A1) e alcune tratte della regione Emilia Romagna. Tutti gli indici di rischio calcolati nei diversi casi studio (mappe di rischio individuale, curve F-N, PLL ed "expectation value") hanno evidenziato una consistente riduzione del rischio per la popolazione, pari al 60%, conseguente all'implementazione dei dispositivi di protezione passiva.

1 INTRODUZIONE

Il rischio connesso al trasporto stradale e ferroviario di sostanze pericolose è un problema verso il quale viene rivolta grande attenzione in Italia, come all'estero. Spesso gli itinerari di trasporto utilizzati possono attraversare centri abitati più o meno densamente popolati, portando le sostanze pericolose a stretto contatto con luoghi altamente vulnerabili come case, scuole, ospedali, uffici, ecc. In queste aree, l'analisi di rischio e la sua eventuale riduzione, sono di primaria importanza per la prevenzione di eventi incidentali, che potrebbero portare a tragiche conseguenze.

In questo lavoro verranno approfondite le problematiche legate alla sicurezza nel trasporto di gas liquefatti in pressione, soffermandosi sul GPL, sostanza altamente infiammabile. Un incidente nel trasporto di questa sostanza, a causa della sua pericolosità, può generare severi scenari incidentali, tra i quali getti incendiati (jet-fires), incendio di nubi di vapore (flash-fires) e BLEVEs. In particolare quest'ultimo scenario, acronimo di Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion, può esser definito come un'onda di pressione generata dalla vaporizzazione istantanea (flash adiabatico) del GPL fuoriuscito dal serbatoio. Generalmente, a seguito del BLEVE, in presenza di un innesco si verifica una fireball, ossia la combustione della nube di GPL non premiscelata con una fiamma a diffusione. Si possono distinguere due differenti tipi di BLEVE: "cold (unfired) BLEVE" e "hot (fired) BLEVE". Il primo, che avviene in assenza di incendio esterno, può esser dovuto ad urti (ad esempio in un incidente stradale o ferroviario) oppure alla presenza di difetti nel materiale del serbatoio. Il secondo è termicamente indotto, cioè può avvenire se il serbatoio viene esposto ad un incendio esterno. L'esposizione ad incendio provoca l'aumento della temperatura di parete del serbatoio, riducendone la resistenza meccanica, e l'incremento della pressione interna, generando uno stato di sollecitazione meccanica più gravosa sulla struttura. In queste condizioni il serbatoio potrebbe perdere la sua integrità, con conseguente rottura catastrofica. Dall'analisi di vari eventi incidentali riportati in database

specifici [1-6] si ottiene inoltre la seguente ripartizione dei fenomeni di BLEVE: su 44 eventi l'86.4% sono "hot-BLEVE", il restante 13.6% sono "cold-BLEVE".

Numerose misure di protezione passiva possono essere utilizzate per la prevenzione del BLEVE ed in particolare dell' "hot-BLEVE", come una migliore gestione del traffico stradale e ferroviario, la demolizione degli edifici presenti in aree ad alto rischio o l'azione combinata di un isolante termico e di una valvola di sicurezza applicati sul serbatoio. Quest'ultima misura, assai diffusa [7], è indicata come la più efficace, poiché in grado di evitare o anche solo ritardare la rottura catastrofica del serbatoio fino all'attuazione di misure di mitigazione, come il raffreddamento delle pareti della cisterna per mezzo di getti d'acqua da parte delle squadre di emergenza.

In seguito a gravi incidenti alcune nazioni hanno preso misure precauzionali al fine di evitare il fenomeno dello "hot-BLEVE", introducendo specifiche regolamentazioni nel trasporto. Canada e USA permettono il trasporto di gas liquefatti unicamente in ferrocisterne dotate di isolante termico e di valvola di sicurezza, mentre la regione ad amministrazione speciale di Hong Kong (Cina) applica le stesse misure di protezione alle autocisterne.

Lo studio è quindi stato orientato a dimostrare l'efficacia della coibentazione del serbatoio come metodologia per la riduzione del rischio nel trasporto di GPL. Utilizzando un modello ad elementi finiti (FEM) e risultati sperimentali ottenuti su scala pilota in studi precedenti, è stata effettuata un'analisi del comportamento termo-meccanico di serbatoi coibentati sottoposti ad incendio. Ciò ha permesso di valutare se un serbatoio coibentato possa mantenere la sua integrità prima dell'arrivo delle squadre di emergenza, determinandone anche le eventuali condizioni di rottura. E' stato quindi analizzato l'impatto potenziale sul rischio in seguito all'applicazione di una protezione termica ai serbatoi per il trasporto stradale di GPL. Il software TRAT – GIS 4.1 ha infatti permesso valutazioni del rischio in un'area campione e due aree reali del territorio italiano: il comune di Casalecchio di Reno e la regione Emilia Romagna.

2 ANALISI DEL COMPORTAMENTO TERMO-MECCANICO DI SERBATOI COIBENTATI SOTTOPOSTI AD INCENDIO

2.1 Risultati sperimentali

Il comportamento di serbatoi di GPL non coibentati ed esposti al fuoco si può comprendere per mezzo di diversi dati di letteratura [8-10], i quali si riferiscono a test a fuoco di serbatoi completamente avvolti nelle fiamme. Questi dati mostrano come, a seconda delle condizioni di irraggiamento termico e delle caratteristiche del serbatoio, dopo 10-25 min dall'inizio del test si verifichi una rottura catastrofica del serbatoio, con conseguente BLEVE.

A causa di fattori come la distanza dalla stazione di partenza e la disponibilità di acqua, le squadre di emergenza generalmente necessitano di un tempo piuttosto elevato per raggiungere il luogo di un incidente con scorte d'acqua sufficienti. Sulla base dei suoi dati relativi a incidenti avvenuti in passato nei Paesi Bassi, il TNO indica un valore di 75 minuti [11]. Risulta quindi evidente come questo lasso di tempo sia eccessivo rispetto al tempo di cedimento, ossia il tempo che intercorre dall'inizio dell'esposizione all'irraggiamento termico da parte del serbatoio alla rottura catastrofica dello stesso, registrati nei test. Questo non permette di compiere un'efficace azione preventiva di raffreddamento del serbatoio prima della sua rottura.

Il ruolo dei coibenti è dunque importante nel fornire una possibile modalità di protezione dei serbatoi. Nella letteratura "aperta" non sono però disponibili dati soddisfacenti relativi a test sperimentali su serbatoi coibentati avvolti dalle fiamme. Per questo motivo il TNO ha promosso recentemente uno studio sperimentale per quantificare l'azione protettiva della coibentazione associata ad una valvola di sicurezza su serbatoi di piccola scala. Nei test, un serbatoio da 3 m³ di GPL commerciale è stato sottoposto ad incendio, tramite il completo avvolgimento nelle fiamme di un pool-fire di gasolio. Sul serbatoio è stata montata una valvola di sicurezza ed applicato il coibente termico. Quest'ultimo consisteva in un rivestimento di spessore pari a 10mm, realizzato in materiale intumescente supportato su resina epossidica. Il sistema di acquisizione dati consisteva in 18 termocoppie per la misura della temperatura di fiamma, della parete interna del serbatoio, e delle fasi vapore e liquida. La pressione è stata misurata tramite un trasduttore statico di pressione. Nei due test effettuati, il serbatoio di GPL ha resistito oltre 90 minuti alle condizioni di

ingolfamento. L'applicazione della coibentazione e della valvola di sicurezza si è dimostrata quindi una prevenzione efficace per evitare il cedimento termico e quindi il BLEVE.

2.2 Approccio modellistico

Con lo scopo di estendere l'analisi delle prestazioni dei coibenti in condizioni di ingolfamento da "pool fire" a serbatoi di dimensioni reali, è stato sviluppato un modello, basato su un approccio ad elementi finiti (FEM). Sono state effettuate simulazioni termiche delle temperature locali in condizioni di completo avvolgimento nelle fiamme e i risultati sono quindi stati utilizzati per il calcolo delle tensioni locali sul fasciame del serbatoio, secondo lo schema mostrato in figura 1.

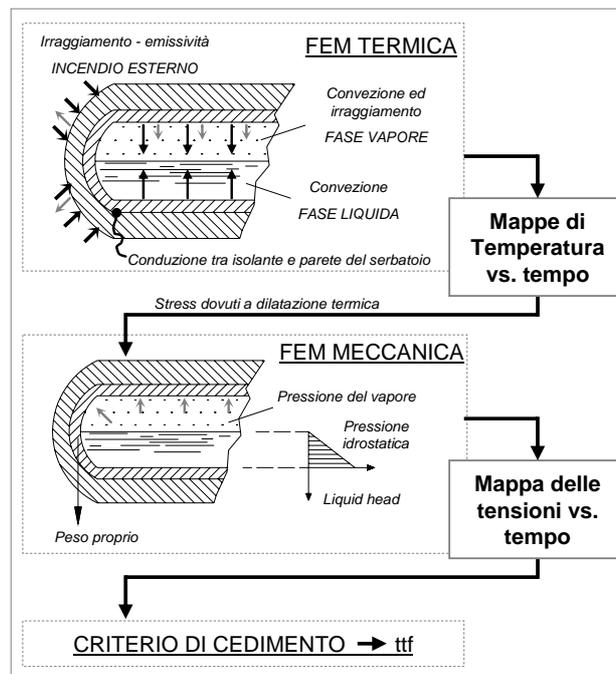


Figura 1. Schematizzazione della metodologia utilizzata nelle simulazioni FEM

Come si è detto, la prima fase dell'analisi del comportamento termico di un serbatoio coibentato ed esposto ad incendio consiste nel calcolo delle temperature di parete in funzione del tempo (mappa delle temperature). Le temperature di parete ottenute sono strettamente correlate alle condizioni di irraggiamento e alle proprietà del fluido stoccato. In particolare, temperatura e pressione del fluido vengono calcolate dal modello stesso in modo dinamico, nel corso della simulazione. I risultati di questa analisi preliminare permettono, tramite implementazione nella simulazione meccanica, la valutazione dettagliata dello stato di tensione del serbatoio (mappa delle tensioni) in funzione e dei carichi meccanici presenti (pressione interna, peso del serbatoio e pressione idrostatica) e delle tensioni derivanti dagli stress termici.

Come riportato in figura 1, il passo finale della procedura consiste nel valutare il tempo di cedimento del serbatoio, indicato in seguito con t_{tf} (dall'inglese time to failure), tramite l'applicazione di un criterio semplificato di cedimento. Esso viene applicato confrontando, a livello puntuale, i valori della tensione equivalente σ_{eq} , calcolati secondo il criterio di Von Mises, con i valori di tensione ammissibile σ_{am} , valutati seguendo le norme ASME degli USA e le ISPESL italiane. Secondo il criterio semplificato, il cedimento (e quindi il BLEVE) avviene se, almeno in un punto, la seguente eguaglianza è verificata:

$$\sigma_{eq} = \sigma_{am} \quad (1)$$

L'approccio FEM è stato validato con i dati sperimentali ottenuti nei test a fuoco del TNO. Dalla figura 2, si può apprezzare un buon accordo tra le temperature di parete sperimentali e quello predette, confermato per tutte le prove sperimentali effettuate e nella simulazione di altri dati riportati in letteratura.

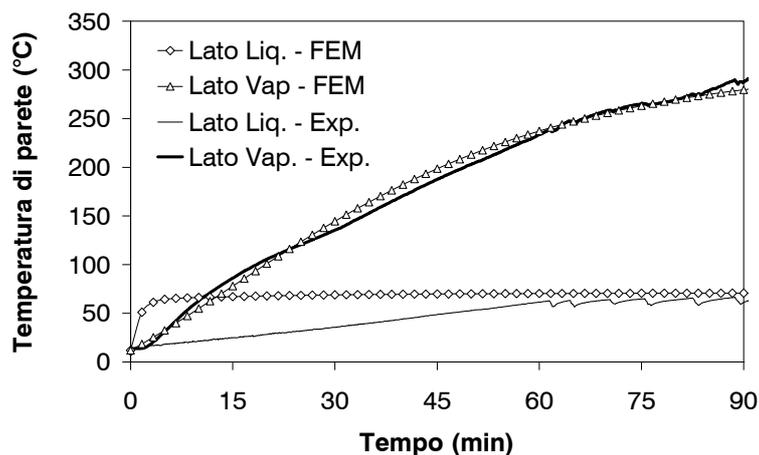


Figura 2. Confronto tra i valori sperimentali (Exp.) di temperatura registrati nei test del TNO e le predizioni del modello (FEM) per la parete a contatto con il liquido (Liq.) e con il vapore (Vap.)

A seguito della validazione, l’approccio modellistico è stato esteso ad una scala maggiore rispetto a quella dell’esperienza, in particolare considerando i serbatoi delle autocisterne. I parametri di input, necessari a questo scopo, provengono da ipotesi sulla geometria e sulle condizioni operative, ma anche da dati di letteratura. Sulle autocisterne vengono installati serbatoi da 60 m³, le cui dimensioni rispettano le regolamentazioni europee sul trasporto di sostanze pericolose, ADR e RID. I valori assunti nel presente studio sono riportati in tabella 1.

Tabella 1. Dimensioni del serbatoio dell’autocisterna utilizzate nell’analisi.

| Parametro | Valore |
|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Volume Nominale | 60 m ³ |
| Diametro | 2.4 m |
| Lunghezza | 13.5 m |
| Spessore minimo di parete | 12.2 mm |
| Pressione di progetto | 1.92 MPa |
| Area di passaggio valvola di sicurezza | “small” 0.004 m ² ; “large” 0.008 m ² |
| Area di passaggio valvola di blow down | “small” 0.004 m ² ; “large” 0.0085 m ² |

Per quanto riguarda l’area di passaggio scelta per le valvole di sicurezza (PRV), come si può vedere dalla tabella 1, sono stati indicati due casi: “small” e “large”. Il caso “small” considera l’area di passaggio calcolata secondo lo standard API 521. Il caso “large” prende in considerazione la presenza di una valvola di sicurezza con un’area di passaggio maggiore, o di 2 valvole di sicurezza montate sullo stesso serbatoio. Per entrambi i serbatoi sono state assunte come input le caratteristiche dell’acciaio WST E 355N DIN 17102, mentre, per quanto riguarda l’isolante, è stato considerato lo stesso materiale intumescente utilizzato nelle prove sperimentali del TNO. In tali prove, è stato verificato che 10mm di strato protettivo si espandono mediamente fino ad uno spessore di 25 mm. Assumendo che questa espansione avvenga in modo pressoché istantaneo, sono stati considerati 25 mm di spessore del coibente come dato di input del modello. Un parametro determinante per l’impostazione delle simulazioni termiche è il valore dell’irraggiamento dovuto all’incendio. In base a numerosi studi su incendi di grande scala [12-13], è stato determinato che l’irraggiamento causato da un pool-fire si può ritenere pressoché costante e connesso al tipo di sostanza coinvolta. Test effettuati con nafta mostrano un irraggiamento di 180-220 kW/m², mentre test su larga scala con carburante standard per aerei JP-4 solamente 134 kW/m². Poiché durante i test del TNO condotti con carburante diesel è stata ottenuta una fiamma particolarmente fuliginosa, nelle simulazioni è stato utilizzato il valore più basso di irraggiamento per le pozze incendiate di nafta, cioè 180 kW/m².

2.3 Stima del tempo di cedimento

Nello sviluppo del modello per la simulazione del serbatoio di GPL completamente avvolto nella pozza incendiata, sono stati considerati differenti livelli di riempimento (20, 50 e 80%) e, come si può notare dalla tabella 1, due tipi di scarico di emergenza (valvola di sicurezza - PRV e valvola di blow down), per poter così ottenere una più completa analisi.

La figura 3 mostra i risultati ottenuti per serbatoi da autocisterna (60 m³) con i diversi gradi di riempimento e con la medesima PRV installata, la cui area corrisponde alle dimensioni “small” di tabella 1.

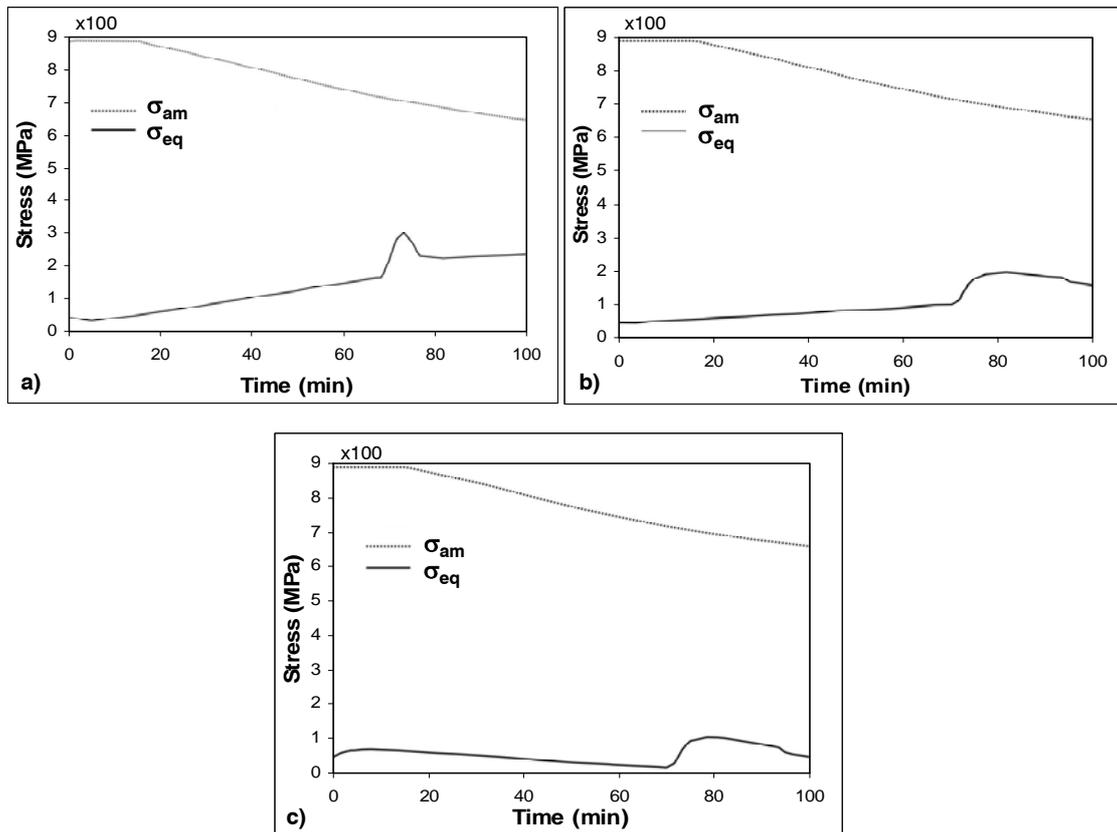


Figura 3. Risultati ottenuti da simulazioni con serbatoi da 60 m³, PRV “small” e livelli di riempimento pari al 20 (a), 50 (b) and 80% (c). La linea tratteggiata rappresenta la tensione ammissibile (σ_{am}), la linea continua la tensione equivalente (σ_{eq}) nel punto più sollecitato

Dai grafici ottenuti per il punto maggiormente sollecitato, sia dal punto di vista termico che meccanico, si può facilmente notare come la curva della tensione ammissibile sia al di sopra della curva della tensione equivalente per tutta la durata della simulazione. Seguendo il criterio di cedimento semplificato riportato in (1), il serbatoio mantiene la sua integrità per almeno 100min, per l'azione combinata della PRV e dell'isolante termico, i quali sono in grado di mantenere la pressione interna e la temperatura di parete entro valori contenuti. Risultati analoghi si ottengono anche dagli altri casi, considerando sistemi di scarico di emergenza diversi.

Tramite la modellazione FEM è stato inoltre possibile portare a termine un'ulteriore analisi di sensitività, con lo scopo di valutare l'influenza dello spessore e della conducibilità dell'isolante sul comportamento termo-meccanico del serbatoio. Durante le prove sperimentali effettuate dal TNO l'isolante in alcune zone ha subito una dilatazione fino a raggiungere lo spessore di 40 mm, in altre non si è dilatato affatto e, in media, lo spessore dopo la dilatazione si attestava sui 25 mm. Per questo motivo sono state effettuate simulazioni considerando tre spessori diversi: 10, 25, e 40 mm. Inoltre, poiché la temperatura potrebbe degradare il coibente, per ogni spessore sono stati considerati tre differenti valori della conducibilità: 0.066, 0.1 e 1 W/mK. Il primo corrisponde con il valore indicato dal fornitore dell'isolante, mentre gli altri rappresentano

una perdita di efficacia della coibentazione fino ad un valore minimo di 1 W/mK. Il valore intermedio corrisponde alla conducibilità della comune lana di roccia.

Tabella 2. Risultati dell'analisi di sensitività. La voce “-” sta ad indicare “rottura del serbatoio non predetta prima di 6000 s”, la voce “X” indica il probabile verificarsi di una rottura del serbatoio. Inoltre vengono indicati anche i tempi di cedimento predetti (ttf).

| Spessore isolante (mm) | Conducibilità termica (W/mK) | | |
|------------------------|------------------------------|-----|-------------------|
| | 0.066 | 0.1 | 1 |
| 10 | - | - | X ttf = 400 s |
| 25 | - | - | X ttf = 1200 s |
| 40 | - | - | X ttf = 2400 s |

Dai risultati riportati in tabella 2 si nota che, laddove viene predetta una rottura, il ttf aumenta con l'aumentare dello spessore. Inoltre appare evidente che isolanti come gli organici intumescenti, con bassa conducibilità termica, possano garantire l'integrità del serbatoio con i tre spessori ipotizzati. Anche isolanti con conducibilità termiche intermedie, come la lana di roccia, non portano alla rottura nelle simulazioni effettuate. La situazione è invece completamente rovesciata per valori di conducibilità di 1W/mK, per i quali viene predetta una rottura del serbatoio per tutti e tre gli spessori. Ciò dimostra come le proprietà del coibente siano un parametro chiave per l'efficacia dell'azione protettiva.

3. ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA COIBENTAZIONE DEI SERBATOI IN RELAZIONE ALLA RIDUZIONE DEL RISCHIO

3.1 Procedura di analisi di rischio nel trasporto di sostanze pericolose

Con lo scopo di valutare l'influenza che la coibentazione dei serbatoi può avere sul rischio nel trasporto di GPL, sono state effettuate specifiche analisi di rischio (Transport Risk Analysis, TRA) su un'area campione e su due aree del territorio italiano. La procedura da seguire per questo tipo di analisi di rischio è schematizzata in figura 4 ed ampiamente descritta nella letteratura di settore [14].

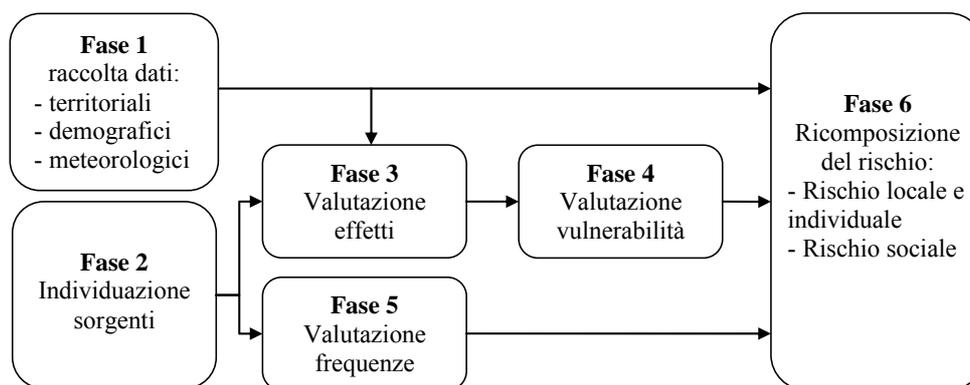


Figura 4. Procedura di analisi di rischio nel trasporto di sostanze pericolose

Nel presente studio, l'analisi è stata effettuata utilizzando come strumento di supporto il software TRAT – GIS 4.1. Questo strumento permette di implementare i dati richiesti su una piattaforma GIS e di calcolare il rischio locale e sociale dovuto a sorgenti di rischio generate dal trasporto terrestre (strada, ferrovia, condotta) di sostanze pericolose [15,16].

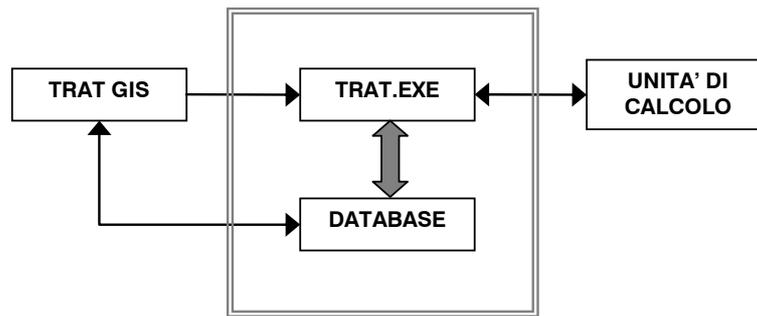


Figura 5. Struttura del software TRAT – GIS 4.1

La struttura del software è schematizzata in figura 5 e consiste di 4 unità principali [15,16]: i) un'interfaccia grafica creata in ArcView® che permette l'immissione di dati demografici e geografici nel database, gestisce e visualizza i risultati relativi al rischio locale; ii) l'applicazione TRAT.EXE che permette l'introduzione degli altri dati necessari e funge da collegamento tra il database e l'unità di calcolo; iii) il database che contiene i dati di input e parte dei dati di output; e iv) l'unità di processo che effettua i calcoli richiesti per la valutazione del rischio. I risultati vengono poi letti e conservati nel database o in file.

L'applicazione della procedura descritta ha avuto lo scopo di valutare l'influenza della coibentazione sul rischio sociale, che viene espresso dal software come curva F-N (frequenza cumulata F di un evento incidentale con un numero di morti maggiore o uguale a N). Poiché un confronto tra 2 o più curve risulterebbe difficoltoso, si è scelto di ricavare da esse un indice di rischio (r_1) facilmente confrontabile, poiché rappresentato da un unico valore:

$$r_1 = \int_0^{\infty} F(N) \cdot N^{(\alpha-1)} dN, \quad (2)$$

dove α è un parametro maggiore o uguale a 1. Se l'indice α è scelto uguale ad 1, l'integrale rappresenta il "Potential Life Loss" (PLL), o numero di morti atteso. Se l'indice α scelto è maggiore di 1, l'integrale cessa di avere un significato fisico, pesando di più le vittime di incidenti più severi, e viene indicato con il termine "Expectation Value" (EV) nella letteratura di settore. Alcuni criteri di valutazione del rischio utilizzano un valore di α pari a 2.

3.2 Effetto sul rischio dovuto a BLEVE delle protezioni passive

La frequenza di accadimento complessiva di uno scenario incidentale nella TRA viene scomposta in diversi fattori determinanti: il numero di chilometri della singola spedizione, il numero di veicoli utilizzati per il trasporto, la frequenza incidentale, la probabilità di rilascio, la probabilità delle diverse categorie di rottura considerate e infine la probabilità di avere un determinato scenario incidentale anziché un altro. L'adozione di un sistema di protezione termica, come dimostrato, potrebbe prevenire lo "hot-BLEVE" e abbassare, di conseguenza, la frequenza di accadimento del BLEVE in generale. Per simulare l'applicazione di una coibentazione, è stata modificata la probabilità di avere uno scenario incidentale dovuto a BLEVE, secondo le ipotesi seguenti. Assumendo che:

- la probabilità di accadimento del BLEVE (P_B) senza coibentazione sia pari a 0.8 [17],
- solo una frazione dei BLEVE sia termicamente indotta (F_H) (è stata considerata una frazione pari allo 86.4%, sulla base dell'analisi di dati ottenuti da database su incidenti nel trasporto di sostanze pericolose),
- la probabilità di accadimento dello "hot-BLEVE" venga annullata in presenza di coibente (secondo i risultati ottenuti dalle simulazioni FEM) e venga considerata solo la frazione relativa al "cold-BLEVE" (F_C)

si ottiene la seguente probabilità residua di accadimento del BLEVE ($P_{B,r}$):

$$P_{B_r} = P_B \times F_C = P_B \times (1 - F_H) = 0.8 \times (1 - 0.864) = 0.1088 \quad (3)$$

Seguendo le indicazioni riportate in letteratura [2,18], si può assumere che il fenomeno incidentale del BLEVE sia nella maggior parte dei casi solamente indotto termicamente. E' stata quindi compiuta una parametrizzazione di F_C/F_H , ottenendo così ulteriori valori di probabilità residue P_{B_r} (tabella 3), al fine di permettere un'analisi di sensibilità dei risultati dello studio rispetto a questo dato.

Tabella 3. Ripartizioni percentuali "cold BLEVE" / "hot BLEVE" (F_C/F_H) e probabilità residue (P_{B_r}) di BLEVE assunte al fine di analizzare la sensibilità degli indici di rischio a questo dato.

| Efficacia protezione | F_C / F_H | P_{B_r} |
|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| BASE (no protezione) | / | 0.8 |
| "cold-BLEVE" 33% | 33 / 67 | 0.264 |
| "cold-BLEVE" 20% | 20 / 80 | 0.16 |
| "cold-BLEVE" 13.6% | 13.6 / 86.4 | 0.1088 |
| No BLEVE | / | 0 |

Vari casi di studio sono stati analizzati utilizzando il valore di probabilità di accadimento del BLEVE riportato in letteratura (cioè 0.8) e, successivamente, i valori di "probabilità residua" del BLEVE elencati nella tabella 3. Il confronto dei risultati ha permesso una valutazione dell'influenza della coibentazione sul rischio nel trasporto stradale.

3.3 Presentazione dei casi studio

Il caso studio 1 riguarda un'area campione, creata esclusivamente per questo scopo, mentre gli altri due (casi studio 2 e 3) sono basati su dati realistici derivati dal trasporto di GPL nell'area di Casalecchio di Reno e nella regione Emilia Romagna. I dati utilizzati provengono da un censimento effettuato in uno studio precedente e relativo alle quantità di combustibile e al numero di vettori all'anno in ingresso ai principali depositi dell'Emilia Romagna.

Tabella 4. Parametri di frequenza (Φ = diametro equivalente del foro associate alla categoria di rottura, in mm; P_{occ} = probabilità di accadimento; * ipotesi del caso BASE, tabella 3).

| Dati | Valore | |
|-----------------------------------------------|----------------------|----------------------|
| Frequenze | | |
| Frequenza incidentale (eventi/veicolo km) | 3.3×10^{-7} | |
| Probabilità di rilascio | 5.0×10^{-2} | |
| Categorie di rilascio | | |
| N° di categorie di rilascio | 2 | |
| Categoria di rilascio 1 Rottura da foro medio | Φ (mm) | 50 |
| | P_{occ} | 2.0×10^{-1} |
| Categoria di rilascio 2 Rottura catastrofica | Φ (mm) | / |
| | P_{occ} | 1.0×10^{-1} |
| Scenari incidentali | | |
| Rottura da foro medio | P_{occ} jet fire | 8.0×10^{-1} |
| | P_{occ} flash fire | 2.0×10^{-1} |
| Rottura catastrofica | P_{occ} fireball* | 8.0×10^{-1} |
| | P_{occ} flash fire | 2.0×10^{-1} |

L'area campione è un quadrato di 4 km di lato, densamente abitata (0.05 abitanti/ m^2) e attraversata da una sola strada (la sorgente di rischio lineare). Per evitare effetti di bordo, la strada è più lunga di un lato del quadrato (5 km). Le condizioni meteorologiche scelte riflettono un campo di vento uniforme in ogni direzione e le classi di stabilità atmosferica di Pasquill-Gifford considerate sono: B con velocità del vento di

3 m/s, D con 5m/s, e F con 2m/s. E' stato considerato un flusso di 10000 veicoli all'anno attraverso l'area, un numero arbitrario grande a sufficienza da ottenere valori di rischio significativi.

Per quanto riguarda i casi di studio 2 e 3, invece, sono stati considerati gli itinerari di trasporto effettivamente utilizzati dai vettori, ricavati da mappe geografiche importate su piattaforma GIS. Anche per distribuzione di popolazione sono stati utilizzati i dati reali del censimento ISTAT del 2001. I parametri meteorologici sono stati ricavati da medie effettuate su dati raccolti in un periodo di 50 anni da parte delle principali centraline meteorologiche della regione Emilia Romagna.

I parametri di frequenza e di probabilità relativi agli eventi incidentali assunti per l'analisi di tutti i casi di studio sono riportati in tabella 4.

Mentre il dato di frequenza incidentale proviene da rilevamenti effettuati dalla società Autostrade per l'Italia sulle tratte interessate, il valore della probabilità di rilascio è stato determinato in base a i dati ottenuti in uno studio precedente [19], mentre i valori di probabilità di accadimento delle categorie di rilascio e degli scenari incidentali sono tratti dal "purple book" olandese [17]. La probabilità di accadimento della fireball riportata in tabella 4 (che corrisponde a quella del BLEVE) è il valore considerato nel caso indicato con BASE, assunto come situazione di riferimento per le simulazioni e corrispondente a cisterne non coibentate. Nell'analisi effettuata, questo valore è stato quindi sostituito dai valori in tabella 3 per simulare l'applicazione dell'isolante termico.

3.4 Risultati del caso studio 1

Il caso studio 1, oltre ad aver permesso di verificare la coerenza dei risultati della TRA, tramite la determinazione degli indici di "potential life loss" (PLL) ed "expectation value" (EV), ha inoltre dimostrato come un'azione di prevenzione del fenomeno incidentale della "fireball" originata da un BLEVE costituisca una misura efficiente per ridurre il rischio complessivo nel trasporto stradale di GPL. Confrontando infatti il contributo percentuale di ciascuno scenario rispetto al valore complessivo di PLL ed EV, si può facilmente notare (figura 6) come il BLEVE sia il fenomeno incidentale che più influenza questi indici di rischio, in particolare l'EV (con un contributo pari al 66%) a causa dell'alto numero di vittime potenziali di questo tipo di scenario.

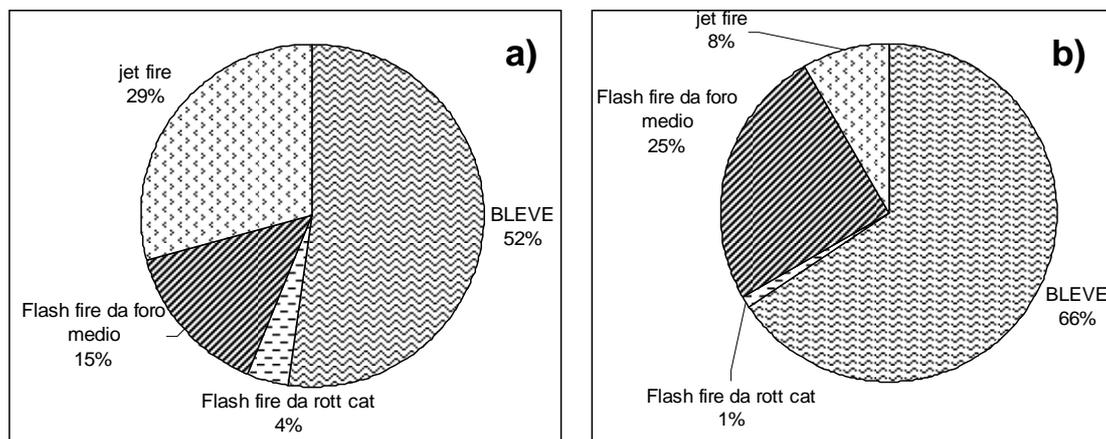


Figura 6. Contributo dei singoli scenari incidentali al valore complessivo del PLL (a) e dell'EV (b) nel caso campione

3.5 Risultati del caso studio 2

I risultati delle TRA effettuate sull'area del comune di Casalecchio di Reno hanno mostrato come, senza alcuna coibentazione delle cisterne, il valore di rischio locale raggiunga valori compresi tra 10^{-6} e 10^{-5} eventi/anno in prossimità dell'autostrada A1, che lo attraversa. Analoghi valori di rischio locali si ottengono in corrispondenza di zone con picchi di densità di popolazione pari a 0.02 persone/m². Assumendo invece le ipotesi relative all'applicazione di un isolante termico, riportate in tabella 3, questi valori di rischio locale

diminuiscono di un ordine di grandezza nelle zone più critiche, raggiungendo valori compresi tra 10^{-7} e 10^{-6} eventi/anno.

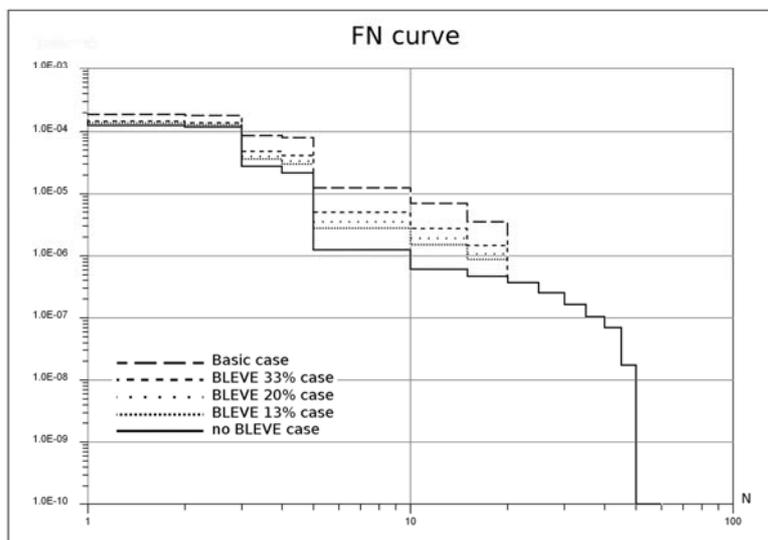


Figura 7. Curve FN del caso Casalecchio di Reno espresse per ognuna delle ipotesi della tabella 3

L'effetto sul rischio sociale, espresso tramite le curve FN, relativo all'applicazione dei dispositivi di coibentazione alle cisterne, è riportato in figura 7. Nella figura sono rappresentate 5 curve sovrapposte, corrispondenti ad ognuna delle ipotesi elencate nella tabella 3. La maggiore influenza sui risultati, in termini di riduzione della frequenza F, si verifica soprattutto in corrispondenza di un numero di decessi attesi, N, pari a 10.

La tabella 5 mostra infine i valori di PLL ed EV calcolati per la situazione relativa a cisterne non coibentate (BASE) e considerando la coibentazione secondo le ipotesi in tabella 3. I valori percentuali, riferiti al caso BASE, confermano come l'applicazione di una coibentazione farebbe diminuire il rischio: il PLL e l'EV diminuiscono rispettivamente del 45 e del 50% in media.

Tabella 5. PLL, EV e loro valori percentuali calcolati per le ipotesi di tabella 3, caso 2.

| Efficacia della protezione | PLL | % PLL | EV | % EV |
|----------------------------|-----------------------|-------|------------------------|------|
| BASE (nessuna protezione) | 2.20×10^{-3} | 100 | $1.12E \times 10^{-3}$ | 100 |
| “BLEVE” 33% | 1.42×10^{-3} | 64.6 | $6.51E \times 10^{-3}$ | 57.9 |
| “BLEVE” 20% | 1.27×10^{-3} | 57.7 | $5.59E \times 10^{-3}$ | 49.8 |
| “BLEVE” 13.6% | 1.19×10^{-3} | 54.3 | $5.14E \times 10^{-3}$ | 45.7 |
| No BLEVE | 1.04×10^{-3} | 47.1 | $4.18E \times 10^{-3}$ | 37.2 |

3.6 Risultati del caso studio 3

La figura 8 rappresenta il rischio locale nel trasporto del GPL tra i principali depositi della regione Emilia Romagna, senza nessuna ipotesi di protezione delle cisterne stradali. Le principali vie di trasporto della regione sono le autostrade A1 e A14, particolarmente critiche poiché interessate da un rischio locale con valori tra 10^{-5} e 10^{-7} eventi/anno. Questi valori, tuttavia, vengono notevolmente ridotti con l'applicazione della coibentazione. Assumendo, infatti, le ipotesi “BLEVE” 20% (tabella 3) la TRA stima dei valori di rischio locale per le autostrade A1 e A14 compresi tra 10^{-7} e 10^{-8} eventi/anno.

Considerando infine i risultati ottenuti dalla TRA riguardo al rischio sociale nel trasporto di GPL in Emilia Romagna si ha una nuova conferma dell'efficacia della misura di protezione. Infatti il PLL e l'EV,

assumendo le ipotesi di “BLEVE” 20% (tabella 3) diminuiscono rispettivamente del 40 e del 48% a partire dai valori di base di 9.88×10^{-2} e 6.76×10^{-1} .

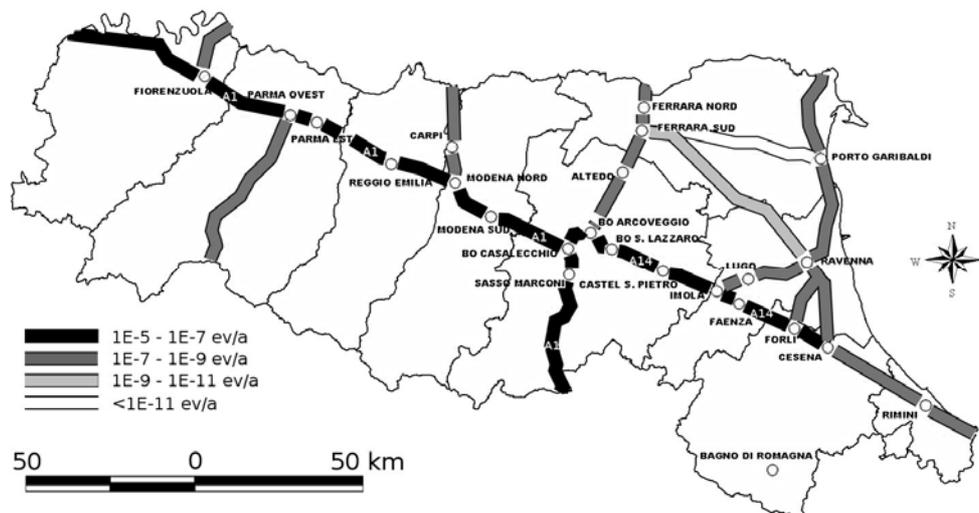


Figura 8. Mappa del rischio locale nel caso 3, senza considerare l’applicazione di coibentazione ai serbatoi.

4 CONCLUSIONI

Lo scopo del presente lavoro è stato quello di dimostrare come, tramite l’applicazione di specifiche misure di protezione passiva antincendio sui serbatoi per il trasporto di GPL, si possa efficacemente diminuire il rischio, particolarmente elevato su numerose vie di trasporto italiane ed estere.

L’analisi FEM effettuata ha messo in risalto come l’azione combinata della coibentazione del serbatoio e di un sistema di scarico di emergenza possa essere una misura molto efficace tra quelle applicabili. Infatti la protezione è in grado di ritardare la rottura del serbatoio per un tempo sufficiente da permettere alle squadre di emergenza di raggiungere il luogo dell’incidente ed attivare l’intervento di mitigazione. Inoltre, dalla campagna di simulazioni effettuate, è risultato che sia un isolante intumescente a matrice organica, sia una più comune lana di roccia, potrebbero adeguatamente adempiere al compito di proteggere il serbatoio, al fine di evitare il fenomeno del BLEVE indotto da incendio esterno.

La valutazione dell’effetto della coibentazione sul rischio dovuto al trasporto stradale di GPL ha quindi messo in luce una diminuzione sia del rischio locale, sia di quello sociale, una volta applicata la protezione termica. L’analisi dei casi reali ha reso evidente come l’attuazione di misure di riduzione del rischio possa tradursi in un beneficio tangibile per la sicurezza della popolazione.

RIFERIMENTI

- [1] Planas-Cuchi, E., Fasulla, N., Ventosa, A., and Casal, J., Explosion of a road tanker containing liquefied natural gas, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 17, 2004, pp. 315-321.
- [2] CCPS, *Guidelines For Evaluating the Characteristics of Vapour Cloud Explosions, Flash Fires and BLEVEs*, 1994, AIChE, New York.
- [3] IChemE, Five incidents involving road tankers, *Loss Prevention Bulletin* 94, 1990, pp. 7-9
- [4] NTSB, *Railroad Accident Report Derailment of Union Pacific Railroad Train QFPLI-26 at Eunice, Louisiana, on May 27, 2000*, NTSB Report Number: RAR-02-03, adopted on 4/2/2002
- [5] Holden, P. L., *Assessment of missile hazards: review of incident experience relevant to major hazard plant*, 1988, Safety and Reliability Directorate, Health & Safety Directorate.
- [6] R.A. Westin, *Railroad Tank Car Safety Research and Test Project, Summary of ruptured tank cars involved in past accidents*, RA-01-2-7, ADDENDUM 05/01/1973

- [7] Molag, M., Product-chain-analysis ammonia, chlorine and LPG, phase 1 technical, components, economical and external safety aspects in the chain (dutch), TNO report R2003/205.
- [8] Kielec, D., and Birk, A. M., Analysis of tank deformation from fire induced ruptures and BLEVEs of 400 L propane tanks, ASME Journal of Pressure Technology, 119, 1997, pp. 365-373.
- [9] Droste, B., and Schoen, W., Full scale fire tests with unprotected and thermal insulated LPG storage tanks, Journal of Hazardous Materials, 20, 1988, pp. 41-53.
- [10] Townsend, W., Anderson, C.E., Zook, J., and Cowgill, G., Comparison of thermally coated and uninsulated rail tank-cars filled with LPG subjected to a fire environment, report FRA-OR&D 75-32, US Department of Transportation – DOT, 1974.
- [11] Molag, M., and Kruithof, A., BLEVE prevention of a LPG tank vehicle or a LPG tank wagon, report R2005/364, Netherlands Organisation for Applied Scientific Research – TNO, Apeldoorn, 2005.
- [12] Cowley, L.T., and Johnson, A.D., Oil and gas fires - characteristics and impact, OTI 92 596, 1992, Health and Safety Executive – HSE, London.
- [13] Roberts, T.A., Buckland, I., Shirvill, L.C., Lowesmith, B.J., and Salater, P., Design and protection of pressure systems to withstand severe fires, Process Safety and Environment Protection, 82, N°B2, 2004, pp. 89-96.
- [14] CCPS, (1996), Centre for Chemical Process Safety of AIChE, Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis, AIChE, New York (USA).
- [15] Maschio, G., Milazzo, M.F., Antonioni, G., Spadoni, G., (2004), Quantitative transport risk analysis on a regional scale: an application of TRAT-GIS to East-Sicily, Proceedings of the ESREL'04 Conference (Berlin (D), 14-18 June 2004).
- [16] Milazzo, M.F., Lisi, R., Maschio, G., Antonioni, G., Bonvicini, S., Spadoni, G., (2002), HazMat transport through Ravenna town: from risk analysis suggestions for improving territorial safety, J. Loss Prev. Process Ind., 15(5), 347-356.
- [17] Uijt de Haag, P.A.M., Ale, B.J.M., Guidelines for Quantitative Risk Assessment (Purple Book), 1999, Committee for the Prevention of Disasters, The Hague (NL).
- [18] ACDS, Major Hazard Aspect of the Transport of Dangerous Substances, Advisory Committee on Dangerous Substances, 1991, Health and Safety Commission, London.
- [19] Cozzani, V., Bonvicini, S., Spadoni, G., and Zanelli, S., Hazmat transport: A methodological framework for the risk analysis of marshalling yards, Journal of Hazardous Materials, 147, 2007, 412-423.