CONVEGNO NAZIONALE
VALUTAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO
NEGLI INSEDIAMENTI CIVILI ED INDUSTRIALI
Pisa, 6-8 Ottobre 1998

# SIAR: VALUTAZIONE DEL RISCHIO NEL TRASPORTO DI MATERIALI PERICOLOSI

Giuseppe FORASASSI - Sebastiano VILLANI
Dipartimento di Costruzioni Meccaniche e Nucleari (Università di Pisa)
Via Diotisalvi 2, 56126 Pisa

**SOMMARIO**.

La valutazione del rischio associato al trasporto di sostanze pericolose, è un mezzo utile agli enti interessati di prendere decisioni obiettive, per l'esercizio e la corretta gestione di tale attività, ai fini della riduzione del rischio stesso e del contenimento delle conseguenze di eventuali incidenti. In questo lavoro viene presentato un metodo che consente una valutazione del rischio, privilegiando gli aspetti quantitativi, sulla base dell'analisi degli effetti di determinate scelte operative relative al tipo di contenitori, alle quantità di sostanze trasportate, alla lunghezza e alle caratteristiche dei percorsi etc., e non solo sulla base di dati statistici sugli incidenti e sulle loro conseguenze.

Per tale scopo è stata utilizzata ed adattata una metodologia semplificata di tipo probabilistico (P.R.A., Probabilistic Risk Assessment) per analizzare eventi incidentali mediante adeguati modelli di rilascio, diffusione e dispersione di fluidi e valutare globalmente il rischio sulla base delle possibili conseguenze degli incidenti considerati.

Problematiche di questa complessità richiedono spesso mezzi di analisi di impiego abbastanza semplice ed immediato, che possano essere adottati anche come strumenti di supporto nelle decisioni.

Il codice di calcolo di tipo modulare SIAR qui presentato, costituisce un sistema integrato per la simulazione di incidenti e le valutazioni delle conseguenze specifico per l'analisi del rischio durante il trasporto sia di sostanze tossiche (Cloro, Ammoniaca, ecc.) che infiammabili (LPG, LNG etc.).

Il sistema grazie a simulazioni grafiche territoriali di adeguato impatto visivo, fornisce informazioni sulle aree interessate, e valutazioni numeriche della probabilità di accadimento dell'evento incidentale su un determinato percorso e della entità delle relative conseguenze.

Il sistema, sembra essere strumento particolarmente utile nell'identificazione di percorsi meno rischiosi ed un mezzo adatto anche per la messa a punto dei piani di sicurezza e la valutazione delle possibili emergenze tecnologiche nelle attività di trasporto di materiali pericolosi.

## 1. INTRODUZIONE

Il modello tradizionale di una attività industriale si basa su singoli processi, i quali assorbono materie prime trasformandole in prodotti di consumo e in scarti che escono dagli impianti industriali e devono essere trasportati alle loro destinazioni intermedie e/o finali.

Il crescente sviluppo industriale degli ultimi 20 anni con il conseguente aumento della produzione ed impiego di materiali pericolosi, ed il verificarsi di incidenti anche di grave entità, ha comportato una maggiore attenzione alle attività connesse con il trasporto di tali materiali. Inoltre eventi catastrofici come gli incidenti di Seveso e di Bhopal hanno sensibilizzato l'opinione pubblica mondiale sulla questione degli impianti industriali a rischio e, di riflesso, di tutte le attività ad essi collegate.

Le sostanze vengono classificate come pericolose in base al danno che possono arrecare all'uomo o all'ambiente; il livello di pericolosità è legato alle loro caratteristiche intrinseche (infiammabilità, tossicità, radioattività, possibilità di dar luogo ad esplosioni, ecc.), oltre che alla quantità trasportata, al tipo ed alle condizioni di trasporto e di stoccaggio ed anche a particolari condizioni ambientali e territoriali.

In considerazione quindi della crescente sensibilità dell'opinione pubblica, e di conseguenza del legislatore, alle problematiche connesse con la protezione della salute ed incolumità della popolazione e degli stessi operatori impegnati nelle attività industriali e produttive in genere, anche il trasporto dei materiali potenzialmente pericolosi (classi 2, 3, 4.1, 5.1, 6.1, 8, 9 della normativa ADR), e di quelli classificati come tali secondo le normative vigenti (Direttiva 82/501/CEE o Direttiva Seveso), richiede giustamente da parte degli organismi interessati un impegno ed un'attenzione ben maggiore che in passato [1], anche per il fatto che il volume di materiali pericolosi trasportati è diventato ormai molto elevato: a titolo di esempio si osserva

che dati OCSE evidenziano che il 5-15% di tutte le merci trasportate nel nostro paese è costituito da sostanze pericolose[2].

La produzione, la trasformazione ed il trasporto su strada in particolare di prodotti chimici pericolosi in fase liquida o gassosa devono garantire agli operatori ed alla collettività, le condizioni di massima sicurezza ragionevolmente attuabili, impedendo, per quanto è possibile, danni alle persone, perdita di vite umane, contaminazione dell'ambiente ed anche danni gravi di tipo tecnico-economico alle imprese interessate.

Risultati di questo genere sono comunque legati al raggiungimento di compromessi accettabili tra danni e benefici che caratterizzano lo sviluppo delle attività suddette[3].

La valutazione del rischio associato sia alla gestione di impianti industriali fissi che al trasporto di materiali pericolosi è premessa necessaria per la definizione di un quadro complessivo e realistico sulla cui base soltanto è possibile prendere decisioni razionali ed obiettive per l'esercizio di tali attività mediante l'identificazione delle areee in cui eventuali interventi sono più efficaci ai fini della riduzione del rischio stesso, anche attraverso il contenimento delle conseguenze dei possibili eventi incidentali.

Anche se le quantità di materiali pericolosi che si possono trasportare con un singolo carico sono di solito più ridotte rispetto alle quantità generalmente trattate negli impianti fissi, nel caso del trasporto di tali materiali, vi sono numerosi fattori, quali il volume di traffico, il tipo dei veicoli, l'incertezza della localizzazione del possibile incidente (e quindi della popolazione interessata) e le differenze nelle modalità, materie e sistemi di processo e di sicurezza impiegati, che rendono particolarmente utile e nello stesso tempo delicata una analisi del rischio associato al trasporto.

Nel presente lavoro viene presentato il sistema integrato SIAR (Sistema Integrato per l'Analisi di Rischio), particolarmente adatto per applicazioni nel campo del trasporto di materiali pericolosi, che è stato messo a punto presso il DCMN dell'Università di Pisa (con un finanziamento parziale da parte del MURST e del CNR).

Questo sistema si basa su una metodologia di tipo PRA e comprende tra l'altro la valutazione con specifici modelli del Source-Term, la simulazione della dispersione atmosferica della sostanza rilasciata, la valutazione dell'ampiezza delle aree a rischio e l'entità delle conseguenze sulla popolazione di possibili scenari incidentali, sulla base di adeguati modelli di vulnerabilità, che tengono conto della nocività delle sostanze rilasciate e della evoluzione nel tempo della dispersione di tali sostanze su grigliati territoriali di riferimento.

Il SIAR è uno strumento espressamente progettato per consentire, in modo agevole ed immediato, l'esecuzione su un PC delle simulazioni e valutazioni suddette, impiegando una struttura modulare aperta in cui è possibile implementare anche nuovi modelli per la simulazione di tutti gli ipotetici scenari incidentali di interesse, in quanto ogni singolo modulo del sistema è specializzato per particolari funzioni chiaramente definite.

Nel presente lavoro viene fatto riferimento in particolare ai moduli del sistema (che per analogia delle problematiche si presta anche per la valutazione del rischio in installazioni fisse) relativi all'analisi delle conseguenze di dispersione di sostanze tossiche, incendi ed esplosioni durante il trasporto di materiali suscettibili di causare tali tipi di eventi incidentali.

Come è stato accennato, e come era stato previsto in fase di messa a punto, il sistema SIAR è uno strumento di calcolo di impiego relativamente semplice anche se i singoli elementi che lo compongono (specialmente i modelli di dispersione), possono essere di notevole complessità; la citata flessibilità di impiego e, se necessario di aggiornamento/adattamento, rende il sistema adeguato sia per l'utilizzo da parte di operatori non particolarmente specializzati e con conoscenze relativamente limitate, sia da parte di analisti più esperti delle problematiche multidisciplinari caratteristiche dell'analisi di rischio nel settore.

## 2. METODOLOGIA: P.R.A. SEMPLIFICATO

Come è noto, il Probabilistic Risk Assessment è un approccio abbastanza sofisticato per la stima della probabilità associata alle conseguenze di eventi rari in processi e sistemi complessi anche in assenza di un'adeguata possibilità di osservazione empirico/sperimentale.

L'obiettivo principale di un PRA è la definizione del livello di rischio di una determinata attività; il conseguimento di tale obiettivo richiede tra l'altro l'identificazione e la definizione delle combinazioni degli eventi che, se si verificano, hanno la potenzialità di provocare conseguenze indesiderabili, nonché la stima quantitativa e sistematica dell'entità di tali conseguenze.

Ai fini del P.R.A., di una attività o processo industriale, si devono prendere in considerazione i possibili eventi pericolosi, compresi evidentemente anche quelli a probabilità relativamente ridotta (come ad es. l'esplosione in atmosfera di una nube di gas). La genesi di tali eventi pericolosi deve essere analizzata e fatta risalire a combinazioni di cause elementari e/o eventi iniziatori a cui possono essere associati dati statistici registrabili (impatto in un incidente stradale, perdite di gas infiammabili in vicinanza di un centro abitato)

oppure la cui incidenza è valutabile mediante modelli deterministici di calcolo (rottura di vessel a causa di sovrappressione, diffusione di nubi di gas, etc.).

In bibliografia sono stati pubblicati vari studi di analisi del rischio associato al trasporto di materiali pericolosi con particolare riferimento ai materiali radioattivi[4]ed a quelli tossici ed infiammabili [5],[6], [7]).

Nella Fig. 1 sono riportati in forma schematica gli stadi o fasi successive che è opportuno sviluppare per eseguire una valutazione di rischio in una attività di trasporto del tipo suddetto.

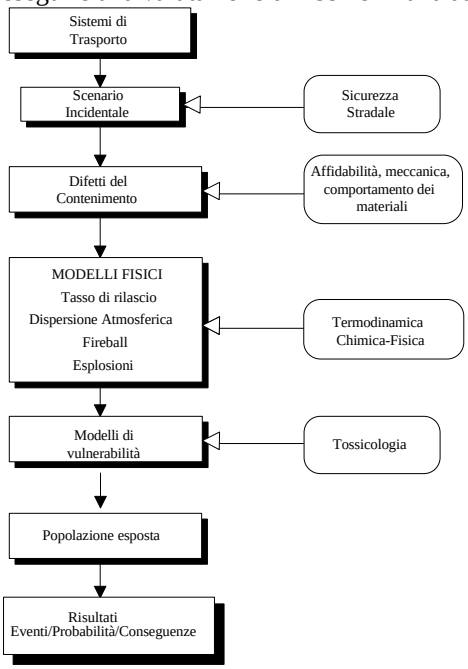


Fig. 1 - Stadi dell'analisi di rischio e discipline coinvolte.

In linea di principio la prima fase dell'analisi comporta la raccolta di dati sui sistemi di trasporto (strade, modalità di trasporto, materiali e mezzi usati in relazione alle proprietà delle sostanze etc.). In una seconda fase occorre prendere in considerazione gli scenari incidentali possibili rilevando che in genere essi traggono origine dal verificarsi di un certo numero di guasti simultanei o in sequenza nei sistemi associati ai processi fisici di interesse. Successivamente devono essere determinate le distribuzioni delle probabilità di guasto dei componenti, definite ad es. mediante un'analisi dei difetti o delle modalità di rottura dei sistemi di contenimento e/o utilizzando dati eventualmente forniti dalle statistiche incidentali. A questa fase afferisce l'eventuale analisi dell'affidabilità delle apparecchiature impiegate. Nella fase successiva viene effettuata la valutazione dei fenomeni fisici che caratterizzano lo scenario incidentale ipotizzato e la quantificazione della probabilità di verificarsi di ciascun incidente. Si passa quindi utilizzando relazioni "esposizione-rischio" o "dose-effetto", alla valutazione dell'area letale, o alla valutazione della dose collettiva. Infine, la stima dei danni (morti, feriti, ecc.) può essere correlata con la densità di popolazione. Al termine di questo processo i risultati ottenuti consentono l'espressione del rischio in termini di conseguenze degli eventi ipotizzati e delle probabilità ad essi associate.

Riassumendo quanto sopra, per valutare il rischio nel trasporto di sostanze pericolose, è necessario disporre di:

- modelli descrittivi degli ipotetici incidenti in cui può restare coinvolto un veicolo con il relativo sistema di contenimento;
- modelli per la valutazione dell'entità delle possibili rotture del sistema di contenimento;
- modelli per il calcolo dell'affidabilità dei sistemi preposti alla sicurezza;
- modelli per la definizione dell'evoluzione spazio-temporale dei rilasci di sostanze pericolose all'ambiente;
- modelli per l'identificazione e la quantificazione delle aree a rischio intorno al percorso di interesse;
- modelli di comportamento umano (eventuali) e dati sulla topografia delle aree interessate;
- modelli per la valutazione delle conseguenze sulla salute derivanti dalla presenza di rilasci delle sostanze pericolose di riferimento.

L'analisi di affidabilità applicata al "sistema trasporto", può essere eseguita sia utilizzando metodi che fanno uso "dell'albero dei guasti" che "dell'albero degli eventi". Mentre i primi mettono in evidenza in che modo il guasto del sistema può verificarsi, i secondi, invece, mettono in relazione eventi iniziatori e combinazioni di successo/insuccesso del sistema comprendente il veicolo, il sistema di contenimento ed i dispositivi eventualmente preposti alla sua sicurezza e alla mitigazione delle conseguenze.

In tal modo, in base a considerazioni di natura probabilistica, si ottengono informazioni qualitative e quantitative inerenti ai livelli di rischio che caratterizzano il sistema nel suo complesso, il suo funzionamento e la sua sicurezza.

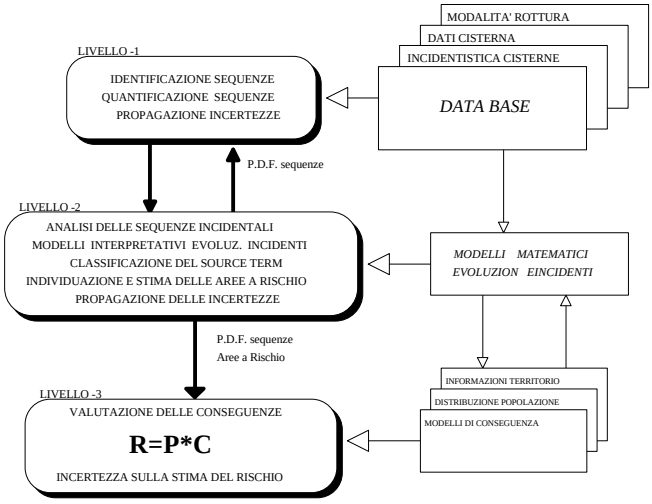


Fig. 2 - P.R.A.-Fasi dell'analisi probabilistica del rischio.

Uno schema funzionale del P.R.A. semplificato[8], riassuntivo delle fasi precedentemente esposte, così come è stato sviluppato nel presente lavoro, è illustrato nella

Fig. 2. La ripartizione dell'analisi su più livelli è opportuna perché ogni livello richiede l'impiego di differenti tecniche, modelli e mezzi ed è anche conveniente perché, anche se lo sviluppo di ciascuna fase presuppone l'impiego dei risultati di quella precedente, i risultati delle singole fasi sono in genere già significativi e spesso utilizzabili anche indipendentemente da quelli delle fasi successive.

Come si vede dal diagramma di

Fig. 2, nel **Livello-1** del P.R.A. è compreso lo studio per l'individuazione e classificazione degli eventi iniziatori dei possibili scenari incidentali e per la stima, utilizzando i dati raccolti, le loro probabilità di verificarsi. Il "sistema trasporto", con questo metodo, viene suddiviso in sotto-sistemi (l'ambiente stradale,

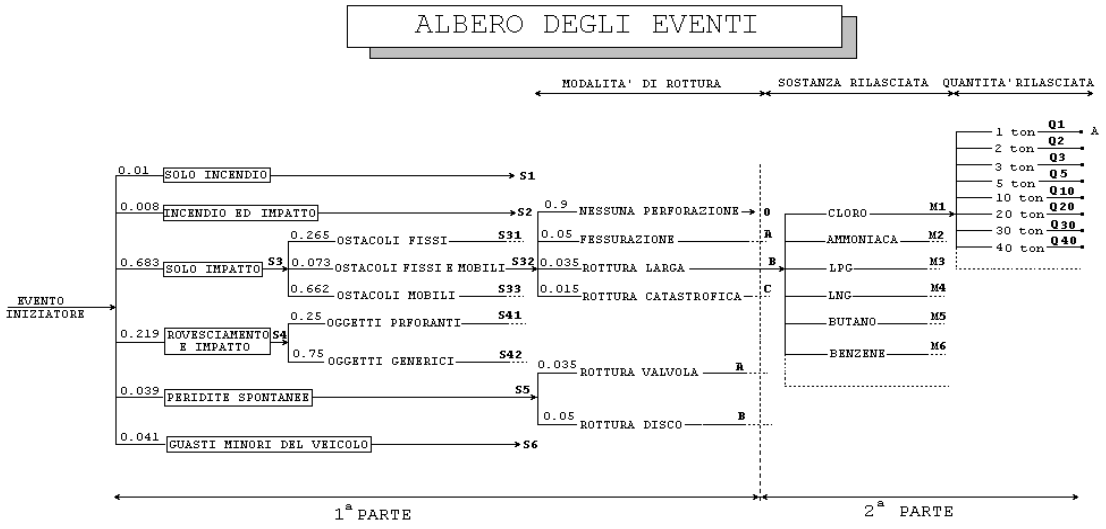


Fig. 3 - Albero degli eventi.

il veicolo, il contenuto, l'ambiente dopo l'incidente).

Per lo sviluppo delle applicazioni di cui al presente lavoro è stato ipotizzato un unico albero degli eventi. Per molte sostanze l'analisi dei dati statistici fornisce utili informazioni per la valutazione delle probabilità percentuali da utilizzare nell'albero degli eventi. Per esempio, nel caso di cisterne per il trasporto di prodotti petroliferi (L.P.G. e L.N.G.) può essere fatto riferimento direttamente alla probabilità che ha la cisterna di esplodere o di prendere fuoco. Secondo questo approccio, in questa prima fase viene costruito il "data base" degli incidenti, che serve alla costruzione dell'albero degli eventi[9] (Fig. 3) nel quale sono riportati anche le probabilità delle singole sequenze incidentali.

I "Top Events" dell'albero degli eventi, nel trasporto di materiali pericolosi, sono essenzialmente gli stessi cui si fa riferimento nel caso di rottura di serbatoi per le installazioni fisse.

A titolo di esempio, nell'analisi degli eventi in esame sono state considerate le seguenti tipologie di sostanze:

- liquidi infiammabili (benzine, L.P.G., L.N.G., ecc.),
- materiali tossici (ammoniaca, cloro ecc.).

Tab. 1 - Modalità di rottura.

| *Modalità di rottura* | *Probabilità* |
|---|---|
| ***Serbatoio non perforato*** | 0.9 |
| ***Fessurazione*** | 0.05 |
| ***Rottura larga o rottura bocchello*** | 0.035 |
| ***Rottura catastrofica*** | 0.015 |

Per ogni tipologia sono state considerate tre modalità di rottura dei contenitori (Tab. 1):

1. fessurazione (*D < 10 mm*);
2. rottura larga (*10 < D < 400 mm*);
3. rottura catastrofica (*D > 400 mm*).

Alle modalità suddette dovrebbero essere aggiunte altre due modalità di rottura:

1. rottura tubazione;
2. rottura valvola o disco di rottura.

Distribuzioni di probabilità delle prime tre modalità citate sono reperibili in bibliografia, specialmente per quel che riguarda la movimentazione di liquidi infiammabili, mentre per le seconde due mancano dati e quelli disponibili non sembrano sufficientemente attendibili.

Per le modalità relative ad eventi non direttamente censiti in bibliografia è indicata una distribuzione media[10], con valori del tipo riportato in Tab. 1.

In mancanza di dati soddisfacenti, per valutare le probabilità di rottura, si può considerare un'espressione analitica per il rateo del guasto di tipo esponenziale come: $p=e^{kE}$, che sembra adatta per calcolare la probabilità di rottura di cisterne ordinarie in funzione dell'energia di impatto (Fig. 4) [11]. Nel caso del trasporto di materiali pericolosi convenzionali, per guasto si intende la rottura del serbatoio, con la conseguenza della perdita della funzione di contenimento. Le incertezze relative alle dimensioni dell'apertura, formatasi in seguito alla rottura della parete del contenitore, influenzano evidentemente in modo considerevole la stima dell'entità del rilascio che viene calcolata proprio sulla base di tali dimensioni e delle caratteristiche e condizioni del fluido trasportato.

L'approccio più semplificato postula le condizioni peggiori di rilascio (rottura catastrofica e la fuoriuscita totale del contenuto). Tale approccio, molto conservativo, è anche poco conveniente da un punto di vista economico.

In mancanza di dati sulla distribuzione probabilistica delle dimensioni delle rotture, per valutare le frequenze associate ai vari tipi di rilascio, si può ricorrere all'uso di valori "standard" di rilascio. Questi valori sono basati sull'analisi di dati storici di incidenti e forniscono una stima, seppur approssimata, della correlazione fra frequenza e magnitudo dei rilasci stessi. La relazione utilizzata per un rilascio standard ha la forma seguente:

$$\log_{10} T = a \cdot \log_{10} f + b \qquad (1)\ [12]$$

dove $T$ è la magnitudo del rilascio in tonnellate, $f$ è la frequenza associata al rilascio (eventi/$10^4$ anno) ed $a$ e $b$ sono dei parametri che caratterizzano il fenomeno.

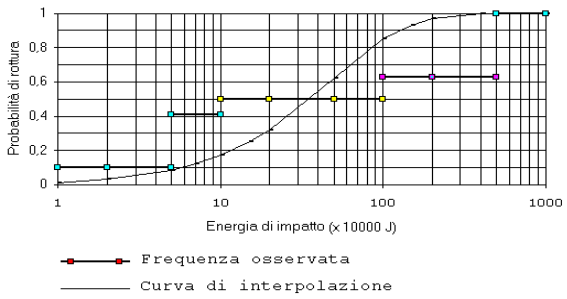

Fig. 4 - Curva di interpolazione dell rottura di cisterne ordinarie.

Questo metodo semplificato può essere utilizzato, in unione all'albero degli eventi, per la stima globale del rischio. L'ulteriore sviluppo dell'albero suddetto comporta l'analisi degli eventi e dei fenomeni che si possono verificare dopo la rottura della cisterna.

Per le due tipologie di sostanze, infiammabili e tossiche vengono considerati i particolari fenomeni che appartengono ad una delle seguenti categorie:

- dispersione e diffusione in atmosfera;
- pool-fire o incendi;
- Fire-Ball;
- BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion);
- UVCE (Uncofined Vapor Cloud Explosion);

Il ramo "fenomenologico" dell'albero, costruito sulla base di queste categorie, viene impostato sull'evento "sostanza rilasciata" come si vede in

Fig. 5. Si osserva che questo ramo dell'albero è identico sia nella eventualità che la rottura interessi una cisterna posta su un autoveicolo, che una cisterna di stoccaggio in installazioni fisse.

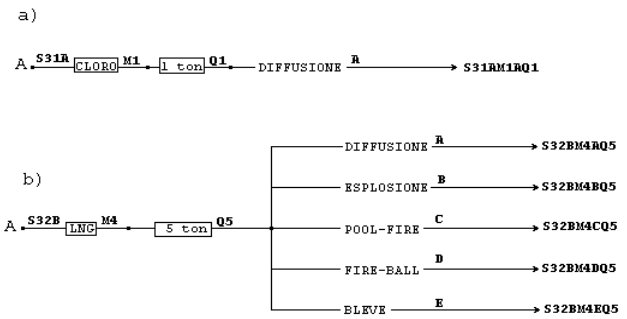


Fig. 5 - Ramo fenomenologico dell'albero degli eventi.

La quantificazione degli effetti considerati può essere fatta in termini fisici e chimici, grazie all'ausilio di modelli deterministici dei fenomeni fisici specifici per ogni fenomenologia di rilascio. Come è già stato accennato vedi Fig. 2 l'analisi dei fenomeni fisici che caratterizzano un incidente, la valutazione dell'entità dei possibili rilasci all'ambiente (Source Term), come pure l'individuazione la quantificazione delle aree a rischio nonché la stima delle probabilità relative, vengono effettuati nel **Livello 2** del P.R.A.

La valutazione delle aree a rischio implica la conoscenza dei limiti di tolleranza biologica, e di conseguenza la determinazione delle distanze o delle aree dove questi limiti vengono raggiunti. A questo livello vengono utilizzati adeguati modelli di vulnerabilità a seconda della sostanza rilasciata. Tali modelli di vulnerabilità vengono quindi combinati con i modelli di diffusione per ottenere una relazione tra l'area a rischio e la quantità di sostanza rilasciata.

Al **Livello-3** del PRA viene effettuata la valutazione delle conseguenze, vengono cioè valutati i possibili danni per l'uomo e per l'ambiente. Queste informazioni vengono quindi associate con le probabilità per definire (eventualmente anche in senso quantitativo) il rischio.

Per valutare le conseguenze sull'uomo (per esempio il numero di vittime) è necessario conoscere la densità di popolazione dell'area coinvolta nell'incidente che deve essere associata agli effetti della fase di dispersione in termini di aree o mappe isoconcentrazione.

Per quanto attiene a questo aspetto la metodologia utilizzata nel presente lavoro è basata sull'impiego di:

- dati sulla densità standard di popolazione per le aree interessate;
- modello di impatto basato su:
  I. settori a densità uniforme di popolazione;
  II. legge esponenziale per la riduzione degli effetti con la distanza (ad. Es. per un incidente con esplosione);
- distribuzione lognormale (una equazione probit) o limiti di soglia per definizione della relazione tra conseguenze e probabilità di morti e feriti (modelli di danno)

Trattandosi di analisi del rischio nel trasporto si deve considerare la popolazione lungo il percorso del o dei veicoli. Nel sistema integrato, oggetto del presente lavoro, il territorio viene suddiviso in celle di dimensioni variabili (a discrezione dell'operatore) ciascuna delle quali è caratterizzata da una categoria di densità di popolazione

Uno degli obbiettivi principali di un analisi di rischio e la relazione (relazione di danneggiamento) che lega il danno probabile in termini di morti o di feriti) con una variabile come la concentrazione per i rilasci di sostanze tossiche, la sovrapressione per le esplosioni e l'energia termica per il tempo di esposizione per gli incendi.

Nel codice di calcolo S.I.A.R. questa forma di "rischio individuale" puo' essere espressa mediante un insieme di curve "iso-rischio" intorno alla sorgente, con indicazione ad esempio delle aree ad uguale valore di concentrazione, nella direzione prevalente del vento. Questo tipo di rappresentazione con curve di livello perde in precisione al crescere della distanza dalla sorgente, ma puo' essere di notevole utilità perché fornisce:

- un mezzo per la mappatura diretta delle aree a rischio;
- un mezzo per il confronto diretto con altri criteri di rischio;

e contemporaneamente forniscono:

- criteri per analizzare gli effetti di possibili cambiamenti del sistema come la riduzione delle quantità rilasciate e l'aumento delle aree di separazione;

Tab. 2 - Elenco principali sostanze pericolose.

| SOSTANZA | EFFETTI | | | |
|---|---|---|---|---|
| | RILASCIO TOSSICO | BLEVE | UVCE | POOL-FIRE |
| CLORO | X | | | |
| AMMONIACA | X | | | |
| ACIDO FLUORIDRICO | X | | | |
| BUTANO | | X | X | X |
| PROPANO (LPG) | | X | X | X |
| METANO (LNG) | | X | X | X |
| BUTADIENE | | X | X | |
| ACIDO CLORIDRICO | X | | | |
| BENZINA | | | X | X |
| STIRENE | | X | | |
| OSSIDO DI CARBONIO | X | | | |
| OSSIDO DI PROPILENE | | X | X | |
| TOLUENE | | | X | X |

sostanze allo stato liquido produce la vaporizzazione di tutto o quasi il materiale fuoriuscito. Questo rilascio può avvenire rapidamente (flash), come nel caso di rottura catastrofica di un recipiente in pressione, o in modo continuo, come nel caso di piccole rotture nella zona occupata dai vapori del contenitore in pressione. Si può avere, inoltre, una combinazione di questi due casi, per esempio a seguito di uno spillamento di un liquido a basso punto di ebollizione (LNG) su terreno.). In questo caso si verifica una ebollizione rapida iniziale seguita da una produzione stabile di vapore, ad una velocità determinata dalle caratteristiche di scambio termico con l'ambiente in genere ed il terreno in particolare.

Tra le sostanze pericolose che in seguito al rilascio, formano nubi di gas pesante (densità superiore alla densità dell'aria) di possono avere:

- sostanze gassose (come Cloro, Butano, Propano, ecc, con peso molecolare maggiore di quello dell'aria;
- sostanze gassose (quali il Metano) con peso molecolare minore di quello dell'aria, che, se stoccate in fase liquida, danno origine a rilasci con densità superiore all'aria;
- sostanze come l'Ammoniaca, meno dense dell'aria a temperatura ambiente, che, a causa di fenomeni termodinamici e chimici possono dare luogo a nubi pesanti
- sostanze quali l' Acido Fluoridrico, che, in seguito a fenomeni chimici di associazione molecolare, possono formare miscele di gas denso.

In generale, l'area interessata dai rilasci di gas pesanti è più piccola, la concentrazione è più alta di quelle caratteristiche dei gas leggeri e quindi le sostanze che producono i primi sono più pericolose di quelle che producono i secondi.

Come è già stato accennato, la quantificazione del "Source term", richiede modelli adeguati e la disponibilità almeno dei seguenti dati di input:

1. dati di sorgente quali caratteristiche fisiche e chimiche dei materiali, geometria della sorgente, condizioni operative del contenitore, tempi di emissione, e caratteristiche del suolo;
2. dati meteorologici quali velocità e direzione del vento, stabilità atmosferica, pressione e temperatura, ecc.;
3. topografia del terreno;
4. distribuzione e posizione dei possibili recettori.

## 3. FENOMENOLOGIA DEI RILASCI E MODELLI DI SIMULAZIONE

La maggior parte dei materiali pericolosi della classe 2 ADR[13] presi in considerazione in questo lavoro ha temperatura di ebollizione inferiore alla temperatura ambiente. Il loro stoccaggio e il loro trasporto avviene in generale sotto forma liquida. Tali sostanze vengono mantenute allo stato liquido a pressione atmosferica alla loro temperatura di saturazione mediante raffreddamento e isolamento termico, o a temperatura ambiente mediante pressurizzazione. Altre sostanze, invece, vengono trasportate allo stato gassoso in opportuni contenitori alla pressione di carico.

Nel primo caso il rilascio nell'ambiente di

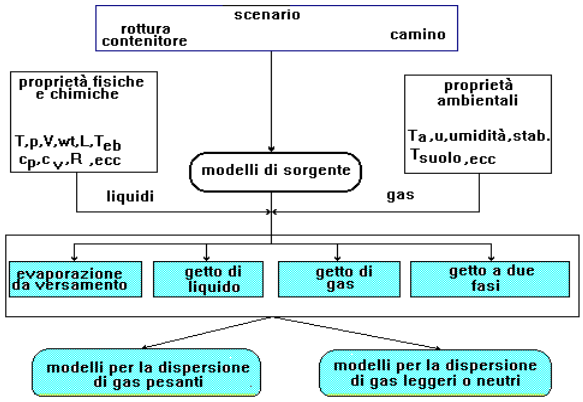


Fig. 6 - Schema modelli per nubi di gas leggeri o pesanti.

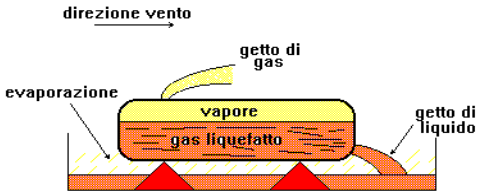


Fig. 7 - Schema meccanismi di rilascio per rottura in zona vapore e in zona liquida di un contenitore in pressione.

É possibile trattare le due tipologie principali di rilascio precedentemente citate:

- rilasci istantanei come quelli che fanno rottura catastrofica ( rilasci la cui durata risulta inferiore a 40s),e rilasci continui come quelli prodotti da evaporazione di liquidi[14].

In generale i modelli disponibili per la simulazione di un rilascio sono specializzati a interpretare un tipo di fenomeno. Il sistema di analisi messo a punto, integra più modelli che coprono tutte la varie situazioni esposte in Fig. 6 e Fig. 7.

Alla fase di rilascio segue la fase di dispersione e diffusione in atmosfera del materiale fuoriuscito dal contenitore, la cui analisi richiede l'utilizzo di modelli appropriati, al tipo di fluido interessato, ad esempio il DEGADIS[15] per i gas pesanti e AVACTA per i gas leggeri.

## 4. SIAR: SISTEMA INTEGRATO DI ANALISI DEL RISCHIO

Il Sistema Integrato di Analisi di Rischio (SIAR) [16] di cui al presente lavoro è stato sviluppato in origine per la valutazione di incidenti nel trasporto di materiale tossico, ed è stato ed è tutt'ora per certe parti sottoposto ad ampliamento ed integrazione, con modelli specifici per la trattazione anche degli effetti di altri fenomeni come incendi ed esplosioni.

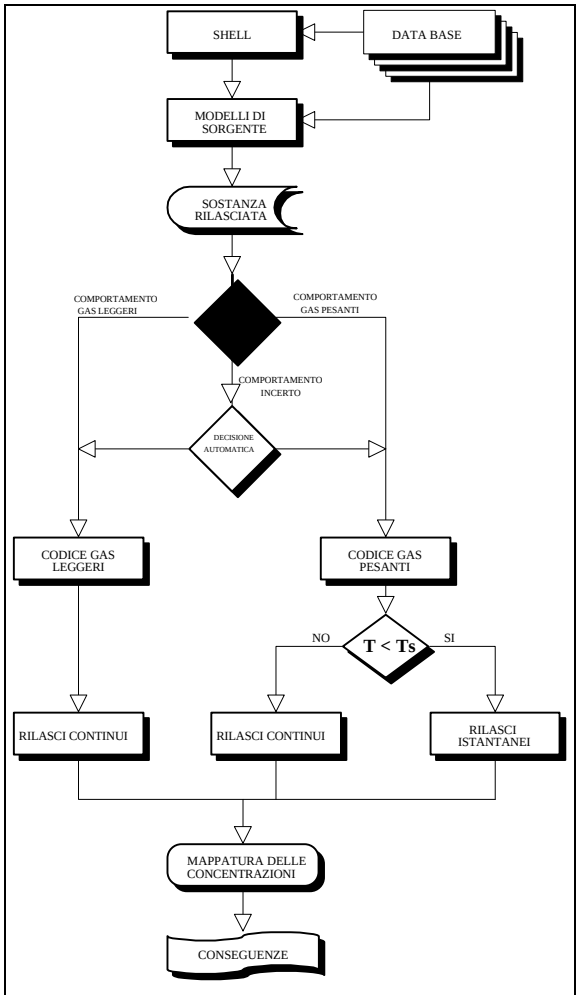

Fig. 8 - Diagramma di flusso del codice di calcolo.

Il sistema comprende attualmente un data base delle proprietà chimico-fisiche di circa 240 sostanze pericolose (che può essere ampliato a seconda delle necessità e mezzi di calcolo.

Nel SIAR sono interessati anche programmi per tenere conto della forma (cilindrica, sferica, troncoconica) e delle dimensioni dei contenitori utilizzati.

Il SIAR è dotato di un processore (SHELL) che sovrintende a tutte le principali attività di input ed alle fasi di calcolo secondo il diagramma di flusso di Fig. 8, in cui è rappresentato lo schema funzionale del sistema.con l'indicazione dei vari moduli in cui è strutturato il codice.

Una analisi del rischio di una operazione di trasporto di materiali pericolosi con il sistema in esame, inizia con la definizione dello scenario di riferimento che viene eseguita selezionando, nell'albero degli eventi, la sequenza incidentale (modalità di rottura del contenitore e frequenza relativa) desiderata.

La scelta della sequenza suddetta comprende la selezione della sostanza trasportata del tipo riportato in Tab.2, del tipo di contenitore (geometria, capacità, condizioni di stoccaggio, ecc.), del tipo di rottura che si verifica e delle condizioni meteorologiche di interesse. Dopo la simulazione dell'andamento della nube e la valutazione delle sue caratteristiche morfologiche, il codice SIAR fornisce la distribuzione delle concentrazioni sul territorio dove è avvenuto il rilascio della sostanza.

La mappatura in forma grafica delle concentrazioni suddette, sovrapposta alla distribuzione della densità della popolazione nel territorio di riferimento, fornisce infine i dati necessari per la definizione delle conseguenze dell'incidente analizzato.

Mediante un modulo specifico (GRAFICO) è possibile visualizzare l'andamento delle curve di isoconcentrazione della nube, anche a diverse altezze dal suolo, ed evidenziare le aree (celle) in cui sono stati superati i limiti di soglia come, per esempio, soglia di letalità, di danno e irritazione per le sostanze tossiche, soglia di innesco di incendio per sostanze infiammabili.

## 5. POSSIBILI APPLICAZIONI DEL SIAR

Il sistema SIAR, già sottoposto ad una prima fase di convalida per quanto riguarda la parte relativa ai rilasci, alla dispersione di nubi e alla valutazione delle concentrazioni[17], è stato utilizzato per analizzare

esempi di situazioni incidentali di veicoli cisterna adibiti al trasporto di materiali tossici quali il cloro e l'ammoniaca.

In quanto segue sono riportati i risultati dell'applicazione del sistema ad un esempio di trasporto di materiali infiammabili come LNG (Liquefied Natural Gas) e LPG (Liquefied Propane Gas) in un'area e su percorsi determinati.

Tab. 3 - Scenario incidentale

| *Esperimento: Trasporto di LNG* | |
|---|---|
| Tipo di rilascio | Trans. |
| Peso molecolare | 16.04 |
| Densità di stoccaggio del gas ($Kg/m^3$)* | 1.64 |
| Densità del liquido ($Kg/m^3$)* | 424 |
| Rottura di un contenitore (Diametro m) | 0.3 |
| Volume rilasciato($m^3$) | 7 |
| Tasso di rilascio(Kg/s) | 3.24 |
| Raggio iniziale sorgente(m) | 20.0 |
| Temperatura atmosferica(°C) | 22 |
| Pressione atmosferica(atm) | 0.98 |
| Velocità vento a 10 m(m/s) | 3 |
| Cat. stab. atm. (Pasquill) | C |
| Umidità relativa(%) | 50 |
| Classe di rugosità(m) (Zona urbana) | .1 |

(*) Densità alla temperatura di stoccaggio T=112 °K

L'individuazione dei percorsi stradali da esaminare presuppone, l'identificazione della rete viaria dell'area di interesse, rispetto alla quale deve essere valutata la relativa distribuzione del traffico

Per ciascun tratto del percorso puo' essere stimata la probabilità di incidente (evento/anno) per ogni sostanza trasportata (LNG allo stato criogenico, nel presente esempio) con relazione:

$$p_e = N_c f_n l_c \qquad (2)$$

dove $N_c$ è il numero di veicoli annuo, $f_n$ la frequenza di incidente e $l_c$ la lunghezza del percorso.

Per la descrizione della distribuzione del traffico nell'applicazione in esame si è fatto ricorso a informazioni disponibili in letteratura[18],[19], opportunamente adattate all'applicazione in esame.

Nel caso specifico è stato ipotizzato un unico evento iniziatore (frequenza $6.63 \cdot 10^{-7}$ eventi/veicolo-Km) in grado di provocare la rottura della cisterna. É stata considerata la sequenza incidentale S31BM4AQ5 (Fig. 3 e Fig. 5) con frequenza pari a $7.2 \cdot 10^{-9}$ eventi/veicolo-Km

E' stata inoltre ipotizzato una densità media di veicoli al chilometro pari a 0.05-0.16, con flussi di veicoli di 3-12 veicoli all'ora alla velocità di 70 Km/h, su un percorso (lunghezza $l_c$=2 Km) in una zona industriale ove passano 100 cisterne di LNG all'anno.

In questo caso la frequenza attesa risultante, con rilascio di 3 ton di LNG sul percorso ipotizzato è pari a $p_e=1.44 \cdot 10^{-6}$ eventi/anno.

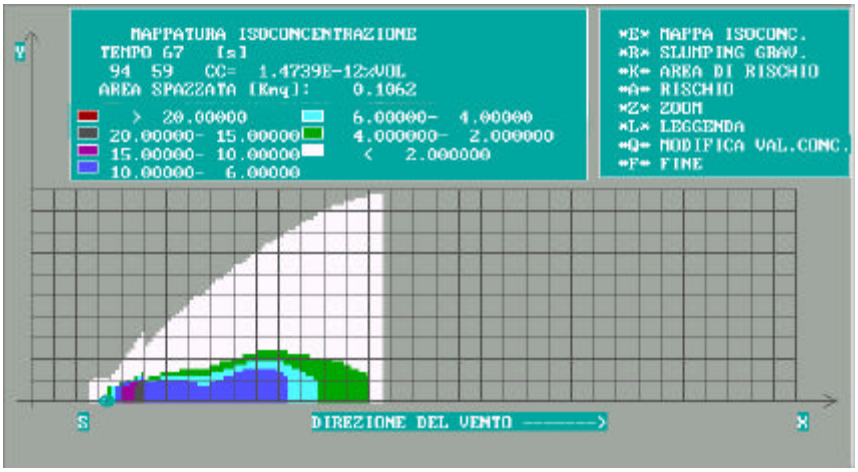


Fig. 9 - Aree a rischio dopo 67 s dal rilascio di 3 ton di LNG su sabbia (u=3 m/s, stabilità C, T=22°C, umidità relativa=50%).

In Tab. 3 sono riportati i dati relativi allo scenario incidentale sopra considerato. Per questo scenario incidentale è stato simulato l'andamento della nube di gas pesante formatosi con l'evaporazione del liquido fuoriuscito a causa della rottura della cisterna dopo impatto con ostacoli fissi. Nel caso di fuoriuscita di LNG o qualsiasi gas infiammabile è necessario valutare le aree ove si raggiungono il limite superiore di infiammabilità (UFL=10%Vol) e il limite inferiore di infiammabilità (LFL=5%Vol per LNG). Infatti in concomitanza della presenza di una sorgente di innesco nelle aree ove il valore della concentrazione è tra i due limiti suddetti, si ha una determinata probabilità che la nube di gas dia origine ad uno dei fenomeni possibili di combustione (esplosione, flash fire, ecc.).

In Fig. 9 sono riportate le curve di isoconcentrazione per lo scenario S31BM4AQ5. Le curve isoconcentrazione sono state valutate a 67 s dopo il rilascio. Si nota chiaramente in quali zone (colore blu e azzurro) vengono raggiunti valori di concentrazione $C_c$ corrispondenti alla possibilità di innesco (10%Vol<$C_c$<4%Vol).

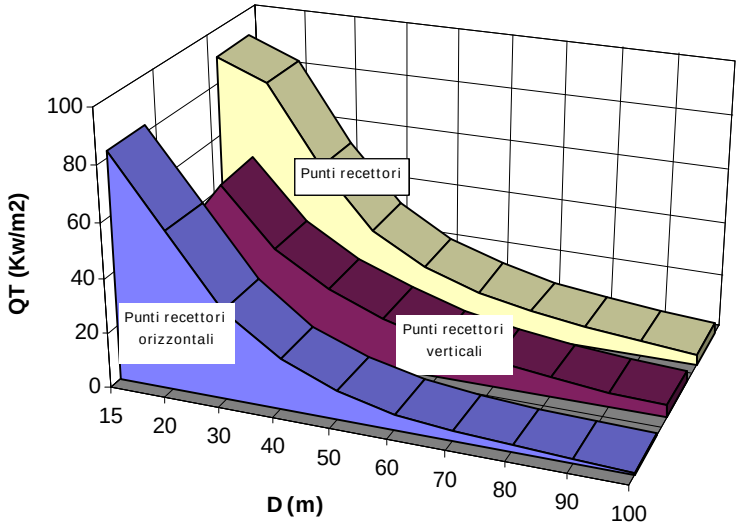


Fig. 10 - Flusso termico massimo nei punti recettori.

Tab. 4 - Distanze secondo il LNG Safety Code (59A) del National Fire Protection Association.

| **Flusso Termico** | Distanza dal centro della pozza |
|---|---|
| **(Kw/m$^2$)** | (m) |
| **31.5** | 40.34 |
| **21.1** | 49.91 |
| **12.6** | 63.30 |
| **5.05** | 92.54 |

Il rilascio di LNG può dar luogo anche a pozze di liquido che prendono fuoco. É stata valutata, quindi, la sequenza incidentale S31BM4CQ5 (Fig. 3 e Fig. 5) con frequenza pari a $5.3 \cdot 10^{-9}$. La valutazione delle conseguenze è stata effettuata mediante un modello di irraggiamento termico descritto in [20]. In Fig. 10 sono riportati i valori di flusso termico calcolati alle varie distanze specificate (punti recettori) dall'utente, e lungo le direzioni orizzontale e verticale alle varie distanze.

Tab. 5 - Conseguenze per flusso termico e tempo di esposizione.

| $Q_T$ (Kw/m$^2$) | t | Effetti |
|---|---|---|
| **4** | lunga esposizione (> 1min) | Limite di sicurezza |
| **12.6** | lunga esposizione | Danno limite |
| **6.5** | 20 s | Vesciche sulla pelle |
| **11** | 10 s | Vesciche sulla pelle |
| **20** | 5 s | Vesciche sulla pelle |

A titolo di esempio, in Tab. 4, invece, sono riportati i valori del flusso termico calcolato alle distanze prescritte dal Safety Code (59A) del National Fire Protection Association (USA). Nella Tab. 5 sono riportate, invece, le possibili conseguenze anche in funzione del valore del flussso termico $Q_T$, e del tempo $t$ di esposizione. La Tab. 5 indica che, per lunghe esposizioni, la popolazione subisce danni limite se il flusso termico di calore supera i 12.6 Kw/m$^2$, mentre al di sotto del valore di soglia di 4 Kw/m$^2$ non si hanno danni sensibili anche per esposizioni di durata superiore al minuto.

## 6. CONCLUSIONI

I principali aspetti positivi del sistema integrato SIAR, messo a punto per l'analisi del rischio nel trasporto di materiali pericolosi, sono costituiti dalla relativa facilità e rapidità di impiego e dalla struttura modulare aperta che consente in modo semplice l'integrazione di ulteriori modelli specializzati (ad es. Fire Ball, BLEVE, UVCE, etc.), l'aggiornamento di quelli già presenti, nonché l'ampliamento ed il completamento dei "data-base" necessari (ad esempio per quanto ottiene l'affidabilità dei contenitori e le reali condizioni di incidente.

Il sistema integrato, anche se di struttura abbastanza complessa, risulta di impiego relativamente facile grazie al modulo grafico di cui è dotato.

Allo stato attuale del suo sviluppo si può affermare che il SIAR consente una simulazione ragionevolmente realistica di incidenti nei quali sono coinvolti veicoli cisterna per il trasporto di sostanze tossiche ed infiammabili.

La previsione del comportamento in atmosfera dei fluidi rilasciati, effettuata con modelli di dispersione, consente la valutazione di quei parametri di rischio (area e distanza letale) da cui dipendono in modo essenziale le eventuali conseguenze degli incidenti stessi.

La metodologia proposta anche se non completamente risolutiva per l'ampio spettro delle situazioni possibili nel trasporto delle sostanze pericolose, una volta che ne sia stata completata la messa a punto mediante lo sviluppo e l'integrazione degli ulteriori moduli previsti, potrebbe inoltre costituire un utile strumento operativo per la valutazione e la gestione globale del rischio associato a tale tipo di attività industriale ed anche un mezzo di supporto decisionale sia nell'identificazione di percorsi meno rischiosi sia per la messa a punto di eventuali aggiornamenti anche a livello normativo di settore.

La metodologia stessa è stata peraltro strutturata in modo da poter essere impiegata per lo studio degli effetti dei rilasci di materiali pericolosi da installazioni fisse, cosa che ne aumenta il potenziale interesse

vista la crescente e doverosa attenzione per le problematiche concernenti la salute pubblica e la gestione organica del territorio dal punto di vista della sicurezza.

## 7. BIBLIOGRAFIA


[1] ADR (1985).United Nation, Economic Commission for Europe, *Inland Transport Committe European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (ADR) and Protocol of Signature;* Vol. I, II, III. Geneva.

[2] Commissione delle Comunità Europee, Centro Comune di Ricerca, Sito di Ispra, Istituto di Ingegneria dei Sistemi, Ispra, Italia, *Trasporto di materiali pericolosi, casi di incidenti, scenari e modelli,* Rapporto intermedio presentato alla Università degli Studi di Pisa, contratto no.3622-88-12-TG-ISP-I, dicembre 1988.

[3] S. Ragusa, *Il rischio industriale*, da Le Scienze quaderni, Il Rischio Chimico, a cura di L. Caglioti, n. 40, Brugherio, febbraio 1988.

[4] *Final environment statement on the trasport of radioactive materials by air and other modes,* rapporto Nureg 0170, US NRC Washington 1977.

[5] Technica, *Study into the risk crom transportation for liquid chlorine and ammonia in the Rijnmond area,* Technica Ltd., Final Report, London, July 1985.

[6] Canvey: *First Report,* London HMSO, 1978.

[7] Canvey: *A Second Report,* London HMSO, 1981.

[8] R. Cortese, G. Forasassi, *Trasporto di materiali pericolosi. Studio preliminare della metodologia di analisi di rischio,* Pubblicazione DCMN, RL 367(88).

[9] P. Pages, P. Hubert, *Methods Available for the Assessment of Risk Related to Transport of Dangerous Substances,* 3 A.S.I. International Conference on Risk in Transport of dangerous Material, Varese, 27-28 Novembre 1986.

[10] M. Camparra, A. Cencia, *Case Histories of Accidents in Transportation of Dangerous Materials by Land and Sea: a Critical Analysis,* 3 ASI Conference, Varese, 1986.

[11] P. Pages, P. Hubert, ibidem.

[12] J. Withers, *Major Industrial Hazards,* Gower Technical Press Ltd, England, 1988.

[13] F. Rubino, *Analisi delle conseguenze,* Corso di formazione ed indirizzo. Rapporto di Sicurezza DPR 175/88, Centro Ricerca Industriale Avanzata, 1989.

[14] J.A. Havens, T.O. Spicer, *Development of an Atmospheric Dispersion Model for Heavier than Air Gas Mixtures,* U.S. Department of Transportation Inited States Coast Guard, office of Research and Development, Washington, D.C. Final Report, May 1985, Vol. I, II.

[15] S. Villani, *Analisi dei Rischi nel Trasporto di Materiali Pericolosi.* Tesi di Laurea, DCMN Pisa, 1991-92.

[16] ibidem.

[17] *Trasporto di Materiali Pericolosi,* Commissione delle Comunità Europee Centro Comune di Ricerca. Sito di Ispra Istituto d'Ingegneria dei Sistemi, Rapporto finale presentato all'Università degli Studi di Pisa, Aprile 1990, C.no. 3622-88-TG-ISP-I.

[18] *Analisi dei Rischi da Trasporto su Strada,* Progetto Aripar, CS 082-15/09/1989.

[19] LNGFIRE3: *A Thermal Radiation Model for LNG Fires,* GRI Report N. 89/0176.

[20] Canvey: A Second Report, ibidem.