

SVILUPPO ED APPROFONDIMENTO DI METODOLOGIE INNOVATIVE PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO D'AREA

Giuseppe Maschio¹, Barbara Mazzarotta², Renato Pastorino³, Gigliola Spadoni⁴ e Severino Zanelli⁵

¹ Dipartimento di Chimica Industriale ed Ingegneria dei Materiali, Università di Messina, Salita Sperone, 31 98166 Messina

¹ *Autore al quale inviare la corrispondenza : Tel. 090 67665605, Fax. 090 391518 e-mail maschiog@unime.it*

² Dipartimento di Ingegneria Chimica, Università di Roma "La Sapienza", Via Eudossiana 18, 00184 Roma

³ Dipartimento di Ingegneria Chimica e di Processo "G.B. Bonino", Università di Genova, Via O. Pia 15 Genova

⁴ Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali, Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna

⁵ Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei materiali, Università di Pisa, Via Diotisalvi 2 56100 Pisa

Sommario

Nell'ambito dei Progetti di ricerca di rilevante interesse nazionale il MIUR ha cofinanziato il progetto dal titolo Sviluppo ed approfondimento di metodologie innovative per la valutazione del rischio d'area. Al progetto partecipano le Università di Messina (Sede coordinatrice), di Bologna, Genova, Pisa e Roma La Sapienza.

L'obiettivo principale del progetto di ricerca è la definizione, lo sviluppo e la messa a punto di metodologie, procedure e strumenti software per l'analisi sistematica di scenari incidentali in impianti fissi ed in sistemi di trasporto di sostanze pericolose, finalizzati all'utilizzo in studi di rischio d'area. Nel progetto è stata data priorità all'opportunità di sviluppare strumenti tecnici avanzati per l'applicazione del DL 334/99, recepimento italiano della Direttiva 96/82/EC.

1. INTRODUZIONE

I metodi d'analisi quantitativa del rischio industriale dovuto alla manipolazione o allo stoccaggio di sostanze pericolose sono tecniche il cui uso è ormai consolidato. Sia la normativa europea, attraverso le Direttive 82/501/EEC (Direttiva "Seveso") [1] e 96/82/EC ("Direttiva Seveso-II") [2], che la legislazione Italiana, attraverso il DPR 175/88 ed i successivi aggiornamenti, fino al D.L. 334/99, ne prevedono esplicitamente l'utilizzo per tutti i siti industriali in cui siano presenti quantitativi di prodotti pericolosi eccedenti soglie prestabilite.

La Direttiva 96/82/EC richiede però non solo la valutazione del rischio dovuto alla presenza di singoli impianti o stoccaggi, ma anche l'adozione di criteri per la pianificazione del territorio al fine di limitare l'esposizione della popolazione al rischio industriale derivante dalla manipolazione e dallo stoccaggio di sostanze pericolose. Il recepimento da parte della legislazione italiana, con il D.L. 334/99, ha portato all'individuazione di aree ad "elevata concentrazione di stabilimenti" in cui è sancita la necessità di una valutazione complessiva del rischio industriale.

Lo sviluppo di criteri di pianificazione territoriale che minimizzino l'esposizione ai rischi industriali deve essere basato su strumenti georeferenziati che permettano la valutazione del rischio complessivo attraverso l'applicazione di tecniche QARA (Quantitative Area Risk Analysis).

Le tecniche QARA attualmente disponibili sono principalmente derivate da un adattamento di metodologie sviluppate per valutare il rischio di incidente rilevante causato da una singola sorgente di rischio. Questo elemento ha comportato difficoltà oggettive nella valutazione di effetti di tipo sinergico sul rischio complessivo, dovuti alla presenza contigua di numerose e diverse attività comportanti l'impiego o lo stoccaggio di sostanze pericolose.

Le esperienze pregresse di applicazione della QARA, sia internazionali sia nazionali, sono state rivolte inizialmente all'esame dei contributi delle sole sorgenti di rischio dovute alla presenza di impianti fissi, ma hanno successivamente interessato anche il sistema dei trasporti delle sostanze pericolose oggetto di stoccaggio e trasformazione negli stabilimenti. Si ricordano in merito la prima esperienza olandese [3] che ha considerato solo sei stabilimenti, lo studio inglese di Canvey [4], che ha coinvolto anche il Porto, i successivi studi italiani che, a partire dal Progetto ARIPAR [5], hanno fornito un quadro complessivo dei rischi di incidenti rilevanti per aree ad elevata concentrazione di attività industriali includendo anche i sistemi di trasporto di sostanze pericolose connessi.

La pericolosità dei sistemi di trasporto di sostanze pericolose non è tanto legata ai quantitativi coinvolti, che sono in genere sensibilmente minori di quelli presenti negli impianti fissi, quanto piuttosto al coinvolgimento della popolazione nelle conseguenze di un possibile rilascio. Infatti, i percorsi seguiti nel trasporto possono spesso attraversare o lambire centri abitati, mentre la gran parte degli insediamenti industriali sono localizzati ad una certa distanza da zone abitate. L'entità del rischio associato al trasporto di sostanze pericolose è significativa, come mostrano i risultati di uno studio riguardante il Regno Unito [6], e quelli del progetto ARIPAR [5].

L'esperienza maturata nel settore indica dunque che lo sviluppo delle tecniche QARA richiede principalmente l'approfondimento di tre aspetti:

- metodologie di analisi di scenari incidentali derivanti dalla propagazione di incidenti (effetto "domino")
- sviluppo di tecniche e strumenti per l'analisi del rischio dovuto ai sistemi di trasporto di sostanze pericolose
- messa a punto di metodologie per la valutazione e la ricomposizione del rischio d'area dovuto alle diverse sorgenti di rischio

1.1 Effetto domino

Per "effetto domino" si intende in generale un effetto di propagazione di un incidente, cui normalmente è associata un'amplificazione dei danni causati. L'analisi storica di incidenti nell'industria di processo mostra che gli incidenti in cui è avvenuto un "effetto domino" hanno avuto in generale conseguenze particolarmente gravi. Per questo motivo la legislazione per la prevenzione dei rischi dovuti ad incidenti rilevanti richiede, sia a livello comunitario (Direttiva 96/82/EC) che a livello nazionale (DL 334/99) l'individuazione dei potenziali effetti domino all'interno ed all'esterno dello stabilimento.

L'analisi del rischio dovuto ad effetto domino richiede un'attenta valutazione del lay-out dell'impianto ed una valutazione estensiva della possibilità, della frequenza attesa e delle conseguenze degli incidenti dovuti ad effetti di propagazione. In letteratura sono presenti numerose pubblicazioni sull'argomento, limitate spesso però ad un'analisi qualitativa del problema [7-10]. Attualmente non esistono metodologie consolidate per l'analisi quantitativa del rischio dovuto ad effetto domino e, tra quelle proposte, alcune sono basate su semplificazioni eccessive del problema [11] o introducono fattori arbitrari per la valutazione della probabilità di propagazione [12-14].

Un importante limite di gran parte delle metodologie disponibili è nel non aver riconosciuto le possibili semplificazioni derivanti dal fatto che l'analisi dell'effetto domino in generale si svolge "a valle" dell'analisi di sicurezza dei singoli impianti, quando cioè sono già disponibili numerosi dati sulle frequenze e sulle conseguenze dei "top events" individuati. L'assenza di una metodologia integrata basata sui risultati dell'analisi di sicurezza dei singoli impianti è ancora più importante se l'analisi dell'effetto domino viene effettuata nel contesto dell'analisi di rischio d'area (quantitative area risk analysis o QARA) o su gruppi di stabilimenti, quando cioè le dimensioni del problema sono sostanzialmente più ampie.

Recentemente è stato sviluppato un metodo integrato e sistematico di analisi dell'effetto domino, principalmente orientato all'applicazione in contesti QARA, che permette di valorizzare i dati già disponibili dall'analisi dei singoli impianti e di minimizzare il lavoro ulteriore richiesto dall'analisi quantitativa dell'effetto domino [15, 16]. Il metodo riduce il lavoro di analisi dell'effetto domino alla valutazione della possibilità e della probabilità di propagazione degli eventi primari, nonché alla valutazione delle conseguenze di un numero limitato di scenari caratteristici dell'effetto domino.

In questo contesto è però fondamentale disporre di funzioni affidabili per la probabilità di propagazione degli eventi causata dai diversi effetti fisici e di valori di soglia per delimitare il massimo cerchio di danno all'interno del quale analizzare i possibili eventi di propagazione. Su questo punto, infatti, l'incertezza è elevatissima e in letteratura sono presenti metodologie, in generale basate su tabelle di vulnerabilità, estremamente conservative. In un approccio finalizzato, ad esempio, alla pianificazione territoriale, questo può portare ad incertezze sensibili sulla necessità di vincolare o meno fasce estese di territorio: si veda l'esempio in figura 1. L'approccio basato su tabelle di vulnerabilità non sembra quindi adeguato all'utilizzo per la valutazione quantitativa dell'effetto domino, in quanto può comportare costi sociali estremamente elevati non giustificabili su base scientifica.

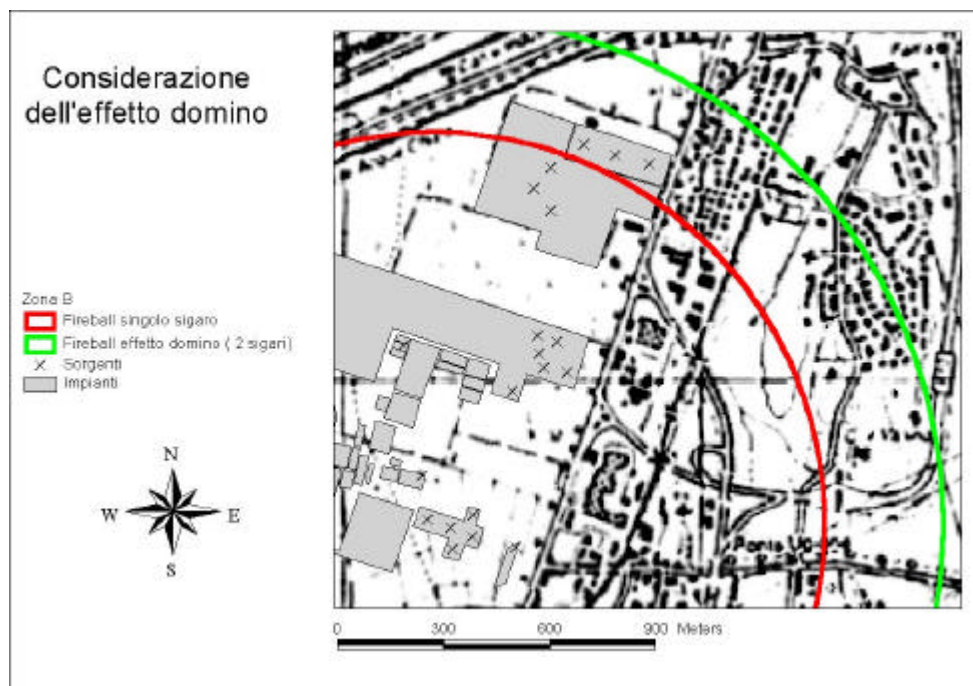


Figura 1: Variazione della zona di inizio mortalità per il fireball di un serbatoio di propano liquido in pressione considerando o meno l'effetto domino rispetto ad un serbatoio adiacente

In alternativa, per la propagazione di incidenti causata da onde di pressione in letteratura sono riportati dati sia sul tipo di danneggiamento in funzione dei valori di sovrappressione [17] che funzioni di probit per la stima della probabilità di danno [12,18,19]. Un approccio al problema della stima della probabilità di propagazione causata dalla proiezione di frammenti è stato sviluppato [20], ma deve essere ancora messo a punto e validato. Per l'irraggiamento i pochi dati disponibili sono contraddittori [12,14] ed il problema della determinazione della probabilità di propagazione deve ancora essere affrontato.

Gli eventi secondari causati da effetto domino in generale sono assimilabili alle categorie di scenari incidentali normalmente utilizzate nell'analisi delle conseguenze (pool fire, jet fire, ecc.). Alcuni eventi primari possono però generare scenari secondari specifici. In particolare, la perdita di controllo di sistemi chimici può causare il rilascio di composti tossici formati durante l'incidente e quindi non presenti inizialmente nel sistema interessato dall'evento primario. Questo tipo di incidenti è esplicitamente contemplato dall'articolo 2 della Direttiva 96/82/EC ("Seveso-II") e dal D.L. 334/99. Solo recentemente è stato proposto un metodo per identificare le sostanze tossiche potenzialmente formate in un incidente di questo tipo [21-23] ed è stato sviluppato un approccio per la modellazione di questi scenari incidentali [24]. Tuttavia, il consolidamento e la validazione delle metodologie proposte richiedono ancora un sostanziale contributo di ricerca, sia modellistico che sperimentale.

1.2 Analisi del rischio dovuto ai sistemi di trasporto di sostanze pericolose

La necessità di prevenire il verificarsi di incidenti rilevanti ha portato all'emanazione delle due direttive "Seveso" [1,2], sotto cui ricadono i siti in cui siano presenti quantitativi di prodotti pericolosi eccedenti soglie prestabilite. Dall'ambito di applicazione di queste normative è escluso il trasporto delle sostanze pericolose, nonostante l'entità del rischio sia significativa, come mostrano i risultati di diversi studi sull'argomento [5-6]. In questo caso, la pericolosità è essenzialmente legata non tanto ai quantitativi coinvolti quanto al possibile coinvolgimento della popolazione in caso di incidente, dato che, soprattutto per il trasporto stradale e ferroviario, i percorsi seguiti spesso attraversano o lambiscono centri abitati.

L'applicazione delle tecniche di analisi di rischio al trasporto di sostanze pericolose risulta più complessa rispetto al caso delle installazioni fisse, dato che lungo l'itinerario cambiano continuamente gli scenari incidentali ed i valori delle variabili da cui dipende l'entità del rischio stesso. Negli U.S.A. sono state proposte delle linee guida [25] in cui viene suggerito il ricorso ad ipotesi semplificative, quali la suddivisione del percorso in tratte omogenee e l'assunzione di valori medi dei parametri per ogni tratto considerato. Nel Regno Unito e nei Paesi Bassi sono in corso progetti più completi, finalizzati a sviluppare metodologie e realizzare strumenti in grado di consentire una valutazione più dettagliata di questi rischi [26-27] ed anche in Italia sono state intraprese analoghe iniziative con i progetti di ricerca promossi dal Gruppo Nazionale Difesa

Rischio Chimico Industriale ed Ecologico (GNDRICIE) del Consiglio Nazionale delle Ricerche [28-29]. In questo ambito sono state messe a punto delle metodologie per la valutazione del rischio nel trasporto stradale di sostanze pericolose [30-32] e per la scelta ottimale del percorso [33,34], nonché i prototipi dei relativi programmi di calcolo. I miglioramenti più significativi nell'accuratezza delle previsioni sono legati all'utilizzo di banche dati contenenti le probabilità degli scenari incidentali e della loro evoluzione negli eventi incidentali finali (incendio, esplosione, nube tossica) per i vari prodotti ed all'impiego di sistemi di informazione territoriale (GIS: Geographic Information Systems) per la gestione delle informazioni riguardanti i parametri caratterizzati da una elevata variabilità locale (incidentalità, densità di popolazione, meteorologia, ecc.). A tal fine, sono stati predisposti una banca dati prodotti [30], contenente una trentina di sostanze, un GIS contenente le coperture informative relative al trasporto stradale con un dettaglio di 1 km [35], ed un programma che utilizza entrambi per la valutazione dettagliata del rischio [32]. I benefici dell'applicazione di GIS al trasporto di merci pericolose comprendono anche il supporto al monitoraggio per la localizzazione dei veicoli a ciò adibiti, con scopo di controllo, ma anche di gestione delle emergenze attraverso l'individuazione delle unità di pronto intervento più vicine e la possibilità di visualizzare le aree di impatto in caso di incidente.

1.3 Ricomposizione del rischio d'area dovuto alle diverse sorgenti di rischio

Le precedenti esperienze di applicazione della QARA hanno mostrato l'importanza della ricomposizione del rischio dovuto a sorgenti diverse [3-5]. Il progetto ARIPAR [5] rappresenta a livello internazionale una delle prime esperienze di applicazione di metodi quantitativi allo studio del rischio d'area in cui, oltre all'analisi delle sorgenti fisse, è stata riconosciuta la necessità di considerare e quantificare anche il rischio dovuto al trasporto di sostanze pericolose.

In anni recenti si sono inoltre andate diffondendo metodologie basate sull'uso di informazioni georeferenziate [35] che consentono di associare vari "strati" di informazioni ai dati e di rappresentarli su di una mappa. Date le loro caratteristiche, questi sistemi, detti GIS (Geographic Information System), si prestano ad essere utilizzati nelle analisi di rischio, attraverso la predisposizione di una mappa contenente informazioni georeferenziate relative ai parametri che intervengono nell'analisi stessa, quali: localizzazione di siti industriali, centri di riferimento per le emergenze, principali vie di comunicazione, ecc.

L'utilizzo dei sistemi GIS sembra particolarmente promettente nel settore degli studi di rischio d'area [36,37]. In questo ambito è stata sviluppata una metodologia per la ricomposizione del rischio d'area basata su modelli di vulnerabilità, che ha permesso l'analisi contemporanea degli effetti dovuti ad installazioni fisse ed al trasporto di sostanze pericolose sulla base di un'ipotesi di indipendenza dei singoli scenari incidentali considerati. Il metodo è stato successivamente sviluppato per permettere di georeferenziare i risultati ottenuti tramite un software supportato su GIS [37-39].

Recentemente è stato predisposto un sistema GIS contenente le coperture informative necessarie per la valutazione del rischio nel trasporto stradale di prodotti pericolosi, da utilizzare in combinazione con un programma di valutazione del rischio [38]. Questo approccio, oltre a migliorare l'accuratezza dell'analisi, si presta immediatamente alle applicazioni relative al rischio d'area, attraverso la visualizzazione di zone di impatto e curve isorischio. Peraltro la presenza contemporanea in un'area di sorgenti puntiformi (gli impianti) e di sorgenti lineari (i trasporti) pone indubbe difficoltà alla comparazione delle corrispondenti misure di rischio. E' sufficiente osservare, a titolo di esempio, che le curve F/N relative ai sistemi di trasporto possono mutare al cambiare delle dimensioni del territorio di riferimento [6], mentre così certamente non è per un insediamento produttivo. Si evidenzia inoltre la necessità di individuare criteri di tollerabilità del rischio specifici per sorgenti legate al trasporto, nonché di procedere all'individuazione di percorsi in grado di accoppiare economicità e accettabilità del rischio per i sistemi di trasporto di sostanze pericolose.

L'approccio e gli strumenti software sviluppati a partire dal progetto ARIPAR e messi a punto nei successivi studi di rischio d'area a cui sono stati applicati, costituiscono un punto di partenza per la quantificazione di rischio d'area. Le principali limitazioni del metodo sono dovute alla mancanza di un approccio sistematico al problema del rilascio di sostanze pericolose diverse e all'assenza di criteri specifici di tipo quantitativo che permettano di prendere in considerazione gli effetti di propagazione degli incidenti. I risultati ottenuti dall'approccio ARIPAR-GIS costituiranno il punto di partenza per aggiornare, sviluppare e validare la metodologia di ricomposizione per la valutazione quantitativa del rischio d'area.

2. IL PROGETTO DI RICERCA

L'obiettivo principale del progetto di ricerca è la definizione, lo sviluppo e la messa a punto di metodologie, procedure e strumenti software per l'analisi sistematica di scenari incidentali in impianti fissi ed in sistemi di trasporto di sostanze pericolose, finalizzati all'utilizzo in studi di rischio d'area. Nel progetto è stata data priorità all'opportunità di sviluppare strumenti tecnici avanzati per l'applicazione del DL 334/99, recepimento italiano della Direttiva 96/82/EC.

Il progetto si articolerà su due filoni principali:

- Sviluppo ed approfondimento di metodologie innovative per la Valutazione del Rischio in impianti fissi
- Sviluppo ed approfondimento di metodologie innovative per la Valutazione del Rischio nel trasporto di merci pericolose

Per quanto riguarda gli impianti fissi, gli obiettivi del progetto riguardano principalmente lo sviluppo di metodi sistematici per l'analisi della propagazione degli incidenti, ossia gli "effetti domino". In questo contesto l'obiettivo prioritario è lo sviluppo di una metodologia quantitativa per l'analisi dell'effetto domino. E' anche importante valutare l'impatto di alcune tipologie di incidenti quali getti incendiati ed esplosioni confinate, che, pur di limitata rilevanza dal punto di vista dei rischi d'area, possono costituire l'evento iniziatore incidenti più gravi, a seguito di effetti di propagazione. Sono inoltre da tenere in considerazione scenari specifici dovuti all'effetto domino, quali lo sviluppo di prodotti indesiderati generati a seguito del decorso anomalo di un processo o ad incendi.

Per quanto riguarda il trasporto di sostanze pericolose, dall'esperienza di precedenti studi di rischio d'area è risultato che i valori del rischio relativo spesso risultano prevalenti su quelli dovuti alla presenza di impianti fissi. Inoltre le aree potenzialmente interessate al rischio dovuto al trasporto di merci pericolose possono trovarsi anche a notevoli distanze da aree ad alta concentrazione di impianti a rischio d'incidente rilevane ed interessare zone altamente popolate e di elevato interesse artistico e paesaggistico.

Questi risultati suggeriscono l'importanza di approfondire gli strumenti di analisi di questa tipologia di rischi. In questo contesto, devono essere affrontate sia la revisione delle metodologie utilizzate per l'ottenimento delle frequenze incidentali, sia l'analisi degli scenari conseguenti ad incidenti nei sistemi di trasporto, nonché implementare la base di dati su cui condurre lo studio.

Gli strumenti software sviluppati devono essere supportati da una piattaforma GIS per la gestione della cartografia, al fine di avere una efficace rappresentazione delle mappe di danno sul territorio. Essi devono essere inoltre in grado di poter analizzare aree ristrette del territorio, come ad esempio quelle circostanti gli impianti fissi o relative a punti critici delle rotte di trasporto (attraversamento di centri urbani, svincoli autostradali, tunnel, sopraelevate ecc.), così come tratte lunghe decine o centinaia di chilometri rappresentative delle tratte stradali o ferroviarie congiungenti gli stabilimenti origine dei prodotti e i luoghi di destinazione.

Il programma di ricerca si propone il conseguimento di risultati che rappresentino un contributo altamente innovativo rispetto allo stato dell'arte del settore.

I principali risultati attesi del progetto possono essere quindi sintetizzati come segue:

Nel campo dell'analisi dell'effetto domino, lo sviluppo di una metodologia quantitativa per la valutazione del rischio dovuto alla propagazione degli incidenti da implementare in software per lo studio del rischio d'area, anche in base ai modelli probabilistici per la perdita di contenimento dovuta ad irraggiamento, a sovrappressione ed a proiezione di frammenti sviluppati nell'ambito del programma di ricerca

Nel campo del trasporto di sostanze pericolose, ci si propone lo sviluppo di una procedura di riferimento per l'analisi del rischio dovuto al trasporto stradale e ferroviario di sostanze pericolose ottenibile attraverso l'integrazione di diversi strumenti software in fase di sviluppo o già disponibili. Un altro punto particolarmente qualificante è rappresentato dallo sviluppo e l'implementazione di strumenti software georeferenziati per la valutazione del rischio dovuto al trasporto e la ricerca del percorso ottimale, anche in base alla definizione di una metodologia di riferimento per la modellazione del rischio dovuto al trasporto stradale e ferroviario di sostanze pericolose

Infine per quanto riguarda il settore della ricomposizione del rischio d'area, lo sviluppo di un software QARA georeferenziato integrato con le nuove metodologie di valutazione del rischio dovuto all'effetto domino ed al trasporto di sostanze pericolose, messe a punto nell'ambito del programma di ricerca.

3. RISCHIO TRASPORTI

Per tenere conto in modo accurato del contributo del rischio trasporti nell'ambito più ampio del rischio d'area occorre tenere presente che le esigenze, ed i mezzi che si possono impiegare, sono ben diversi dipendentemente dalle dimensioni dell'area oggetto dello studio. Infatti, se essa ha dimensioni relativamente piccole, come ad esempio una zona rettangolare con lati lunghi alcuni chilometri, è possibile scendere in grande dettaglio, determinando con accuratezza tutte le informazioni locali necessarie, che è possibile reperire sul posto in tempi relativamente brevi. In questo caso, ad esempio, il grado di dettaglio può scendere fino a localizzare posizione e consistenza di una serie di centri vulnerabili in cui possono essere presenti contemporaneamente molte persone (scuole, centri commerciali, stadi, chiese, ecc.). La situazione si presenta invece diversa quando l'area oggetto di studio presenti dimensioni maggiori, come ad esempio una zona rettangolare con lati lunghi fino ad alcune decine di chilometri. In questo caso gli oneri richiesti per reperire per l'intera area informazioni molto dettagliate diviene rapidamente eccessivo e rende necessario il ricorso ad informazioni locali ancora accurate, ma basate su dati mediati. In questo caso, ad esempio, si può stimare la popolazione residente sulla base di dati censuari considerandone la media all'interno di fasce di interesse poste ad una certa distanza dal percorso seguito dal mezzo di trasporto. Entrambi questi strumenti di analisi di rischio risultano pertanto necessari e possono (e devono) essere utilizzati in combinazione tra loro: in particolare, si può ipotizzare di utilizzare un'analisi di rischio a "largo raggio" per avere una prima identificazione delle tratte maggiormente critiche, riservandosi l'uso dello strumento a "corto raggio", maggiormente accurato, proprio per eseguire indagini approfondite in queste zone critiche.

Per quanto riguarda l'analisi del rischio trasporti a "corto raggio", verrà utilizzato il codice TRAT, messo a punto in precedenza [40]. Tale codice per la valutazione del rischio nelle reti di trasporto, giunto alla sua seconda versione denominata TRAT2, è stato ulteriormente migliorato attraverso la predisposizione mappe della probabilità di danno letale per l'uomo per una decina di sostanze pericolose [41], il codice sarà ulteriormente implementato per messo dell'utilizzo di una piattaforma GIS. Inoltre si individueranno quali altri composti siano riconducibili a queste sostanze, in quanto collocabili in classi di pericolosità equivalenti; verrà a tal fine sviluppato un insieme di codici di calcolo semplificati in grado di generare automaticamente le mappe, una volta definiti gli scenari incidentali. Nella costruzione delle mappe si terranno in debito conto le peculiarità del territorio predisponendo, per ogni scenario ipotizzato, più mappe in funzione di queste caratteristiche. Una particolare attenzione sarà rivolta anche alla valutazione di plausibili scenari di danno ambientale.

Per quanto riguarda l'analisi del rischio trasporti a "largo raggio", verrà utilizzato il codice TrHazGis, che consente la valutazione del rischio dovuto al transito di prodotti pericolosi su strada e ferrovia all'interno di un'area di interesse [32]. Le informazioni territoriali necessarie alla valutazione del rischio (incidentalità, popolazione, meteorologia) riferite ai singoli tratti del percorso verranno gestite tramite l'applicativo GIS MapRisk attraverso coperture che comprendono il sistema della viabilità principale e quello ferroviario, e la localizzazione degli impianti soggetti alle normative Seveso per l'intero territorio nazionale. Per velocizzare ed automatizzare le procedure di raccolta dei dati e di valutazione del rischio saranno utilizzate delle banche dati. La prima, denominata TrHazDat, riguarda le caratteristiche dei prodotti oggetto del trasporto e, in particolare, informazioni storico statistiche relative alle probabilità che si verifichino vari scenari incidentali dopo lo sversamento e la valutazione delle aree di impatto in corrispondenza di varie condizioni meteorologiche. La seconda, denominata TrHazOD, conterrà le informazioni riguardo agli stabilimenti di origine e destino dei trasporti, alle tipologie ed ai quantitativi stagionali di sostanze trasportate ed ai percorsi seguiti.

Le informazioni riguardanti il rischio trasporti, determinate mediante l'utilizzo dei codici anzidetti, saranno quindi inserite all'interno del codice ARIPAR-GIS, che costituisce un modello di ricomposizione dei rischi derivanti dai trasporti e dagli impianti.

Un ulteriore obiettivo è quello di ottimizzare i flussi delle merci pericolose nell'area di studio, sia per la problematica a corto raggio che per quella a largo raggio. Nel primo caso si procederà perfezionando una metodologia per l'ottimizzazione, basata sulla minimizzazione del rischio: data una rete stradale (rappresentabile mediante un insieme di nodi e di archi) e note le origini e le destinazioni delle sostanze, si ricerca la distribuzione ottimale, sui vari archi, dei vettori delle sostanze pericolose, in grado cioè di minimizzare il rischio, rispettando i criteri di accettabilità degli indici di rischio per l'area nel suo complesso e garantendo la fattibilità economica del trasporto. L'applicazione pratica a realtà territoriali reali richiederà l'interfacciamento con il codice TRAT2 per il calcolo degli indici di rischio associati ad ogni arco, nonché la gestione delle informazioni e dei risultati su una mappa georeferenziata da cui sia immediatamente visualizzabile la soluzione ottimale. Per quanto riguarda il problema a largo raggio, si procederà essenzialmente alla ridistribuzione ottimale dei flussi di merci pericolose tra strada e ferrovia [42], tenendo conto della effettiva fattibilità (presenza di tronchetti di collegamento ferroviario negli stabilimenti, possibilità di effettuare il trasporto intermodale), nonché delle diverse caratteristiche (e dimensioni) dei

contenitori utilizzati. Infatti, i contenitori utilizzati per il trasporto ferroviario hanno, di norma, capacità maggiore che non quelli utilizzati per il trasporto stradale: ciò implica, da un lato, il vantaggio di un minor numero di viaggi a parità di quantitativi trasportati ma, dall'altro, la possibile fuoriuscita di un maggiore quantitativo di materiale (e quindi conseguenze potenzialmente più gravi) in caso di incidente.

Si procederà infine allo sviluppo, su basi sperimentali e teoriche, di una metodologia di riferimento nella valutazione del rischio nel trasporto di sostanze pericolose per scenari incidentali di elevata severità, quali incidenti in tunnel. Lo sviluppo di incendi in galleria sarà oggetto di particolare approfondimento e studio teorico-sperimentale, anche con la finalità di pervenire a risultati di supporto nella definizione di normativa tecnica di riferimento per la progettazione/gestione di impianti ventilazione in condizioni di regime e di emergenza. I risultati di questa fase della ricerca potranno pure servire da supporto per l'implementazione dei codici per la valutazione del rischio sviluppati.

Le procedure di valutazione ed ottimizzazione del rischio nei trasporti saranno applicate in un'area di studio nella regione Sicilia.

Alcuni risultati preliminari ottenuti dal gruppo di ricerca saranno presentati in specifiche memorie nel corso del Convegno [43, 44]

I benefici dell'applicazione di GIS al trasporto di merci pericolose comprendono anche il supporto al monitoraggio per la localizzazione dei veicoli a ciò adibiti, con scopo di controllo, ma anche di gestione delle emergenze attraverso l'individuazione delle unità di pronto intervento più vicine e la possibilità di visualizzare le aree di impatto in caso di incidente.

Il lavoro fatto è quindi significativo, ma occorre ancora porre a mano a numerose questioni aperte, sia per affrontare con maggiore incisività il problema del rischio trasporti in sé sia per esaminarlo nel contesto del rischio d'area.

Un punto preliminare di grande importanza è la disponibilità di informazioni relativamente ai flussi, all'incidentalità, alle probabilità dei vari scenari incidentali e della loro evoluzione negli eventi pericolosi finali (incendio, esplosione, nube tossica). Occorre quindi mettere a punto le procedure di acquisizione di tali informazioni e le metodologie per elaborarle in modo da pervenire a stime affidabili.

Un'altra questione fondamentale è quella relativa alla definizione di accorpamenti dei vari prodotti oggetto del trasporto in un certo numero di classi, individuando dei prodotti di riferimento per ognuna di esse. Infatti, il numero e la varietà dei prodotti trasportati è tale da rendere oggettivamente impossibile che siano effettuate le valutazioni delle zone di impatto per ognuna di esse. Occorre quindi mettere a punto procedure e criteri di accorpamento e di scelta dei prodotti di riferimento in modo da mantenere ragionevolmente contenuto il numero dei casi da prendere in esame e, al tempo stesso, di ottenere informazioni che possano essere estese in modo affidabile anche a numerosi altri prodotti.

Un ultimo punto importante riguarda le incertezze nelle stime del rischio, dovute sia ai dati su cui si basa la stima delle frequenze degli eventi pericolosi che ai modelli di valutazione delle conseguenze, soprattutto in situazioni ambientali particolari (gallerie, viadotti, ecc.).

4. EFFETTO DOMINO

4.1 Definizione e schematizzazione dell'effetto domino

Su questo argomento, il punto di partenza del progetto di ricerca è stato lo sviluppo e la messa a punto di una metodologia quantitativa per l'analisi dell'effetto domino, specificamente indirizzata all'utilizzo nell'ambito di studi di rischio d'area. Particolare attenzione è stata dedicata allo sviluppo ed alla validazione di modelli avanzati ed affidabili per il calcolo della probabilità di propagazione degli incidenti.

Il primo problema con cui confrontarsi è stata una definizione non ambigua di "effetto domino". Infatti nella letteratura specialistica e tra gli operatori del settore non è presente una precisa definizione o delimitazione del problema. L'effetto domino è stato definito come la "propagazione di un singolo evento incidentale a causarne altri con una severità complessiva maggiore rispetto all'evento primario". L'effetto domino è stato quindi schematizzato come un incidente (evento primario) che genera un vettore di effetti fisici (conseguenze dell'effetto primario) che, investendo un bersaglio secondario provocano un secondo incidente (evento secondario).

I vettori attraverso cui può avvenire una propagazione di eventi incidentali sono riconducibili a quattro:

- i) **sovrappressione**: un'esplosione (evento primario) provoca un'onda di pressione che investendo un'apparecchiatura (bersaglio secondario) la danneggia, generando un evento secondario
- ii) **irraggiamento**: un incendio (evento primario) genera energia termica che investendo un'apparecchiatura (bersaglio secondario) la danneggia, generando un evento secondario
- iii) **missili**: un'esplosione di un'apparecchiatura (evento primario) proietta frammenti della stessa su di un'apparecchiatura adiacente (bersaglio secondario) provocando un evento secondario

La scala dei tempi di eventi di propagazione dovuti a rilascio tossico rende questo vettore una causa improbabile di propagazione. In ogni caso, la possibilità di propagazione di incidenti dovuta a rilasci tossici richiede strumenti di analisi e di prevenzione diversi, basati sulla gestione dell'emergenza, e quindi costituisce un problema a sè.

4.2 Metodologie quantitative di analisi dell'effetto domino

Su questo argomento sono reperibili in letteratura diversi contributi. Alcuni metodi sono puramente deterministici, cioè stabiliscono se l'evento secondario può avvenire o no sulla base di strumenti modellistici complessi e su una conoscenza dettagliata del lay-out. Questo tipo di approccio da un lato ha costi e tempi elevati di applicazione, dall'altro non tiene conto dei numerosi fattori di incertezza che possono inficiare una valutazione rigidamente deterministica. In letteratura sono stati proposti alcuni metodi probabilistici che sono però basati su un'analisi "ab initio" del rischio dovuto all'effetto domino. Poiché invece l'analisi dell'effetto domino in generale si colloca a valle dell'analisi di sicurezza "convenzionale" degli impianti, non vengono così sfruttate le potenzialità derivanti dalla disponibilità dei risultati dell'analisi di sicurezza degli impianti. Nell'ambito di questo progetto di ricerca si è scelto di sviluppare un metodo per l'analisi quantitativa dell'effetto domino specificamente orientato al rischio d'area [15, 16].

Nell'approccio utilizzato per la valutazione, sono state identificate due tipologie di effetto domino:

- i) propagazione di eventi iniziatori di limitata gravità (EILG)
- ii) interazione di "top-events" distinti

La valutazione quantitativa è diversa per i due tipi di eventi. Per gli eventi causati da EILG la frequenza di effetto domino può essere valutata come segue:

$$f_{ED} = f_p \cdot P_d \quad (1)$$

dove f_p è la frequenza attesa (espressa di solito in eventi/anno) dell'evento primario (EILG), e P_d è la probabilità che avvenga l'effetto domino:

$$P_d = P(ED|EILG) \quad (2)$$

Per gli effetti domino del secondo tipo:

$$f_{ED} = f_{pt1} \cdot P_{d,1 \rightarrow 2} + f_{pt2} \cdot P_{d,2 \rightarrow 1} \quad (4)$$

dove $P_{d,1 \rightarrow 2}$ e $P_{d,2 \rightarrow 1}$ sono le probabilità di propagazione degli incidenti a causa dell'effetto domino. Nonostante l'apparente simmetria delle formule, è evidente che in generale $f_{pt1} \neq f_{pt2}$ e $P_{d,1 \rightarrow 2} \neq P_{d,2 \rightarrow 1}$.

Va inoltre notato che la frequenza dei singoli eventi in assenza di effetto domino deve essere ricalcolata:

$$f_{pe} = f_p \cdot (1 - P_d) \quad (5)$$

Per quanto riguarda il calcolo delle conseguenze, nel caso degli effetti domino del primo tipo la valutazione, necessaria solo per l'evento secondario, dovrà essere condotta con metodi convenzionali, basati su tecniche di albero degli eventi, modelli di dispersione, modelli di valutazione degli effetti fisici, modelli di vulnerabilità. Nel caso di effetti domino di secondo tipo, un primo approccio all'analisi delle conseguenze può essere effettuato trascurando i possibili effetti sinergici causati dalla contemporaneità degli eventi e applicando la sovrapposizione degli effetti fisici. Le conseguenze dell'incidente risultano quindi dalla somma delle mappe degli effetti fisici (irraggiamento, sovrappressioni, concentrazioni di sostanze tossiche) risultanti dagli eventi primario e secondario considerati separatamente. Questa può essere ottenuta sommando direttamente le mappe di vulnerabilità degli eventi, come discusso altrove [15].

4.3 Modelli probabilistici per la stima della probabilità di propagazione

Da quanto sopra deriva che il punto critico per la valutazione quantitativa dell'effetto domino è la disponibilità di modelli sufficientemente affidabili per la determinazione della probabilità di propagazione. E' infatti sull'approfondimento di questo punto che sono state concentrate le principali attività del progetto. Infatti, gran parte degli approcci utilizzati in letteratura per la modellazione della probabilità di propagazione sono improponibili per l'utilizzo in modelli di calcolo. L'approccio più diffuso è ancora basato su "soglie di propagazione" o "tabelle di vulnerabilità". Questo consiste nell'assegnare probabilità unitaria di danno alle apparecchiature presenti all'interno della regione in cui si hanno effetti fisici superiori a quelli di un valore di soglia e probabilità nulla alle apparecchiature che si trovano al di fuori di tale regione. E' bene sottolineare che in letteratura non c'è accordo rispetto ai valori di soglia da assumere, che possono variare anche di un ordine di grandezza, come mostrato dalla tabella 1 relativa ai valori di soglia dovuti a sovrappressione. Per flusso termico radiante, Latha et al. [13] propongono il valore di 37.5 kW/m² come limite al di sotto del quale la probabilità di propagazione è nulla, Pettitt et al. [14] propongono l'utilizzo di una soglia di danno pari a 37.5 kW/m², mentre nella normativa tecnica italiana compare spesso il valore di 12.5 kW/m² [16].

Tabella 1: Valori di soglia proposti per il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione

Soglia (atm)	Tipo di danno	Rif.
0.7	non descritto	Bagster e Pitblado, 1991 [45]
0.355	non descritto	Khan e Abbasi, 1998 [12]
0.2	spostamento	Clancey, 1972 [46]
0.07-0.136	rottura connessioni tubazioni	Glasstone, 1962 [47]
0.27	apparecchiature atmosferiche	Clancey, 1972 [46]
0.136	apparecchiature atmosferiche	Glasstone, 1962 [47]
0.2-0.27	apparecchiature atmosferiche	Brasie e Simpson, 1968 [48]
0.34	apparecchiature in pressione	Wells, 1980 [49]

Il progetto di ricerca si è quindi proposto come obiettivo lo sviluppo di modelli probabilistici più affidabili e strutturati per i diversi vettori di propagazione degli eventi. Per il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione il lavoro è stato orientato allo sviluppo di modelli probabilistici di propagazione basati su funzioni di probit per apparecchiature specifiche e che tengono effettivamente conto delle tipologie di bersagli secondari. Per la propagazione dovuta a frammentazione di apparecchiature, preliminarmente allo sviluppo di un modello probabilistico di propagazione è necessario effettuare un'analisi storica dei dati presenti in letteratura.

Lo sviluppo di un approccio basato su criteri semplificati di cedimento e sul calcolo del tempo di cedimento di apparecchiature atmosferiche ed in pressione sottoposte ad irraggiamento ha permesso di ottenere funzioni semplificate per il calcolo del tempo disponibile per gli interventi di mitigazione. I modelli semplificati utilizzati per valutare il tempo di cedimento sono quindi stati validati attraverso l'utilizzo di codici di calcolo agli elementi finiti per verificarne l'attendibilità. La disponibilità dei tempi di cedimento ha permesso di calcolare la probabilità di propagazione con un approccio basato sull'affidabilità dinamica, legato al confronto fra il tempo disponibile per l'intervento di mitigazione (time to performance requirement) ed il tempo di cedimento dell'apparecchiatura (time to performance achievement).

I risultati preliminari ottenuti hanno permesso di valutare il rischio aggiuntivo dovuto all'effetto domino in alcune aree industriali [50]. L'approccio sviluppato è stato confrontato con gli approcci basati su "tabelle di vulnerabilità". L'analisi di vari casi di studio ha mostrato come l'effetto domino possa aumentare i valori di rischio sociale fino ad un ordine di grandezza. L'utilizzo dei metodi probabilistici basati su modelli attendibili di danno ha mostrato come i valori del rischio ottenuti da valutazioni dell'effetto domino basate su tabelle di vulnerabilità possano essere eccessivamente conservativi, evidenziando l'importanza dell'ulteriore sviluppo e validazione di modelli di danno per tutti i potenziali vettori di propagazione degli incidenti.

5. RICOMPOSIZIONE DEL RISCHIO D'AREA

L'obiettivo principale dell'attività proposta è il miglioramento delle tecniche attualmente utilizzate per la quantificazione delle misure di rischio d'area, al fine di verificarne le procedure di applicazione quali strumenti per la gestione e la scelta delle opzioni progettuali sul territorio.

Le unità operative partecipanti al progetto di ricerca sono coinvolte a vario titolo nei numerosi studi di rischio d'area o di analisi del rischio nei sistemi di trasporto di sostanze pericolose già completati o attualmente in corso nel territorio nazionale. Questi studi, rappresentano una base di esperienza ed un'importante occasione per validare gli strumenti e le metodologie sviluppate nell'ambito del presente progetto di ricerca e per la loro diffusione.

Per quanto riguarda le metodologie per la ricomposizione del rischio d'area, si intendono apportare modifiche teorico-procedurali al codice ARIPAR-GIS, che costituisce un modello di ricomposizione dei rischi derivanti dai trasporti e dagli impianti, ed in particolare si affinerà la procedura in esso contenuta al fine di gestire in maniera agevole l'eventualità degli effetti domino. Ciò comporterà l'inserimento nel codice ARIPAR-GIS della procedura di valutazione degli effetti domino predisposta. Si intende infatti applicare il software ARIPAR-GIS così modificato ad un'area reale, impiegando le mappe di danno predisposte per verificare l'incidenza degli affinamenti metodologici introdotti sulle misure di rischio.

Infine i codici per la valutazione dei rischi nei trasporti potranno essere integrati tra loro in modo tale da fornire una procedura di riferimento per la valutazione del rischio dovuto al trasporto stradale e ferroviario di sostanze pericolose che accoppiata al software ARIPAR-GIS permetta una più completa ricomposizione del rischio d'area.

6. CONCLUSIONI

In conclusione il progetto di ricerca al suo termine permetterà di rendere disponibili metodologie e strumenti software che permettano di affrontare in maniera completa la delicata e complessa procedura per la valutazione dei rischi d'area sia in siti ad elevata concentrazione di stabilimenti, sia in aree critiche soggette ad intensi flussi di merci pericolose.

La procedura di accettabilità di un'attività produttiva o di un insediamento industriale è infatti un processo altamente complesso che supera il settore scientifico-tecnologico in quanto implica aspetti sociali, amministrativi e psicologici; in ultima analisi si tratta di una valutazione che spetta all'autorità preposta alla gestione ed al controllo del territorio.

L'apporto della comunità scientifica a questo processo decisionale è essenzialmente legato alla possibilità di sviluppare strumenti e metodologie che permettano di valutare in modo quantitativo indici e mappe del rischio, le quali forniscono sia dati complessivi che il contributo parziale del singolo impianto o attività industriale.

L'obiettivo finale è quindi rappresentato dalla realizzazione di una metodologia che permetta di ottenere una valutazione complessiva dei rischi in aree complesse e che si proponga come strumento per la pianificazione territoriale e la predisposizione dei piani di emergenza.

Pertanto le Autorità deputate alla predisposizione dei piani d'emergenze esterni e a compiere scelte di pianificazione del territorio avranno a disposizione uno strumento che permetterà di fornire dati quantitativi affidabili e quindi costituirà una base indispensabile per il processo decisionale.

RINGRAZIAMENTI

Questa ricerca è stata svolta nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato dal MIUR Progetti di Rilevante Interesse Nazionale 2001

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Council Directive 82/501/EEC of 24 June 1982 on the Major Accident Hazards of Certain Industrial Activities, Official Journal of the European Communities L230/25, Brussels, 5.8.82
- [2] Council Directive 96/82/EC of 9 December 1996 on the control of major-accident hazards involving dangerous substances. Official Journal of the European Communities, L 10/13, Brussels, 14.1.97
- [3] Central Environmental Control Agency Rijnmond: "Risk Analysis of Six Potentially Industrial Objects in the Rijnmond Area, a Pilot Study – A Report to the Rijnmond Public Authority", D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1982
- [4] Health and Safety Executive: "Canvey: Summary of an investigation of potential hazards from operations in the Canvey Island/Thurrock Area", HM Stationery Office, London, U.K, 1982
- [5] D.Egidi, F.P.Foraboschi, G.Spadoni, A.Amendola: "The ARIPAR project: an analysis of the major accident risks connected with industrial and transportation activities in the Ravenna area", Reliability Engineering and System Safety 49:75 (1995)
- [6] Health and Safety Commission: "Major hazard aspects of the transport of dangerous substances", HMSO, London, 1991
- [7] T.A. Kletz: "Process safety: an achievement". J. Inst.Mech.Eng. 11:34 (1991)
- [8] C.M. Pietersen: "Consequence of accidental release of hazardous materials". J.Loss Prev.Proc.Ind. 3:136 (1990)
- [9] R.W. Prugh: "Modeling and mitigation of the consequence of accidental release of hazardous materials". Plant operation progress 11:19 (1992)
- [10] C. Delvosalle: "Development of a methodology for the identification of potential domino effects based on an analysis of past accidents". Proc. European Seminar on Domino Effects, Leuven (B), 19-20 September 1986, p.11
- [11] D.F. Bagster, R.M. Pitblado: "The estimation of domino incident frequencies - an approach". Proc.Safety Environ. 69:196 (1991)
- [12] F.I. Khan, S.A. Abbasi: "Models for domino effect analysis in chemical process industries". Proc. Safety Prog. 17:107 (1998)
- [13] P. Latha, G. Gautam, K.V. Raghavan: "Strategies for quantification of thermally initiated cascade effects". J.Loss Prev.Proc.Ind. 5:1 (1992)
- [14] G.N.Pettitt, R.R.Schumacher, L.A.Seeley: "Evaluating the Probability of Major Hazardous Incidents as a Result of Escalation Events". J. Loss Prev. Process Ind. 6:37 (1993)

- [15] V. Cozzani, S. Zanelli: "An Approach to the Assessment of Domino Accidents Hazard in Quantitative Area Risk Analysis" in: "Loss prevention and safety promotion in the process industries", H.J. Pasman, O. Fredholm, A. Jacobsson Eds., Elsevier: Amsterdam 2001; p.1263-74
- [16] V. Cozzani, L. Foschi, G. Francalanza, S. Zanelli: "Metodologie Quantitative per l'Analisi dell'Effetto Domino in Studi di Rischio d'Area", Atti II Convegno Nazionale Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili ed industriali, vol. 1, 51, 2000
- [17] R.W. Nelson: "Know your insurer's expectations". Hydrocarbon Processing 8:103 (1977)
- [18] N.A. Eisenberg, C.J. Lynch, R.J. Breeding: "Vulnerability model: a simulation system for assessing damage resulting from marine spills", Rep. CG-D-136-75, Enviro Control Inc., Rockville, MD, 1975
- [19] F.P. Lees: "Loss prevention in the process industries". Butterworths, London 1996
- [20] V. Cozzani, W. Folgheraiter, M. Carcassi: "Procedures for risk analysis of pipeline networks". Proc. 9th Annual Meeting of the European Society of Risk Analysis, Delft University Press, Delft (NL): 1999.
- [21] V. Cozzani, A. Amendola, S. Zanelli: "The formation of hazardous substances in industrial accidents". La Chimica e l'Industria (Milan) 79:1357 (1997)
- [22] V. Cozzani, S. Zanelli: "EUCLID: A study on the Emission of Unwanted Compounds Linked to Industrial Disasters". EUR 17351 EN, European Commission, 1997
- [23] V. Cozzani, S. Zanelli: "Precursors of dangerous substances formed in the loss of control of chemical systems". J. Haz. Mat. 65:93 (1999)
- [24] V. Cozzani, A. Amendola, S. Zanelli: "Formation and release of hazardous substances as a consequence of out of control conditions". Proc. 9th Int. Symp. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Barcelona, 1998, Editorial Signo, 1276
- [25] Center for Chemical Process Safety. "Guidelines for chemical transportation risk analysis", AIChE, New York, 1995
- [26] S.A. Gadd, D.G. Leeming, T.N.K. Riley: "Transport RISKAT: the HSE quantified risk assessment tool for toxic and flammable dangerous goods transport by road and rail in Great Britain", Proceeding 9th Int. Symp. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industry, Vol.1, 308, Barcelona 4-7.5.1998.
- [27] G. Tiemessen, J.P. van Zweenen: "Risk assessment of the transport of hazardous materials", Proc. 9th Int. Symp. Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Barcelona, 1998, Editorial Signo, 299.
- [28] Atti Seminario Unità Operative Gruppo Nazionale per la Difesa dai Rischi Chimico-Industriali ed Ecologici, Roma 6-7.4.1998, a cura di E. Ragno, Roma (1998)
- [29] Atti Seminario di Studio sul Rischio Industriale, Roma 13.12.1994, a cura di E. Ragno, Litograf 2000, Roma, luglio 1995.
- [30] R. Bubbico, S. Di Cave, B. Mazzarotta: "TrHaz, a quantified risk assessment tool for road transport of dangerous goods in Italy". Proc. SRA 1998 Annual Conference "Risk analysis: opening the process", Proc. SRA 1998 Annual Conference, Paris: 1998, vol.2, p.665
- [31] P. Leonelli, S. Bonvicini, G. Spadoni, "New detailed numerical procedures for calculating risk measures in hazardous materials transportation". J. Loss Prev. Proc. Ind. 12:507 (1999)
- [32] R. Bubbico, S. Di Cave, B. Mazzarotta: "Computer aided transportation risk assessment", in "Computer-Aided Chemical Engineering" 82:769-774, Ed. S. Pierucci, Elsevier Science B.V., Amsterdam, 2000
- [33] S. Bonvicini, P. Leonelli, G. Spadoni. "A risk analysis-based routing methodology for the transportation of hazardous materials". Proc. SRA 1998 Annual Conference, Paris: 1998, vol.2, p.717
- [34] P. Leonelli, S. Bonvicini, G. Spadoni: "Hazardous materials transportation: a risk-analysis-based routing methodology". J. Hazardous Materials 71:293 (2000)
- [35] R. Bubbico, S. Di Cave, B. Mazzarotta. "Transportation risk analysis: a GIS approach", in Chemical Industry and Environment, Ed. R. Zarzycki & Z. Malecki, Vol. 2, Pag. 333-340, Cracovia, 1999.
- [36] Risk 97", Int. Conf. Mapping Environmental Risk and Risk Comparison, Book of papers, B.J.M. Ale, M.P.M. Janssen and M.J.M. Pruppers Eds., Amsterdam 21-24.10.1998.
- [37] G. Spadoni, D. Egidi, S. Contini: "Through ARIPAR-GIS the quantified area risk analysis supports land-use planning activities". J. Hazardous Materials 71:423 (2000)
- [38] F. Bellezza, G. Contini, M. Binda, G. Spadoni. "A GIS based software tool for risk assessment and management in industrial areas", Safety and Reliability, S. Lydersen, G.K. Hansen and H.A. Sandtorv Eds., Vol.1, 67, 1998.
- [39] S. Contini: "Rischio d'area: metodologia e software ARIPAR", Rapporto POP Sicilia D/N/17/02.1/sc, 1996

- [40] S. Bonvicini, P. Leonelli, R. Lisi, G. Maschio, G. Spadoni “ Risk analysis of the transportation of hazardous materials: an application of the TRAT2 software to Messina“ . Proceedings of the 10th International Symposium of Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries. Stockholm - Sweden 19-21 June 2001
- [41] M.F. Milazzo, G. Antonioni, S. Bonvicini, R. Lisi, G. Maschio, G. Spadoni “ Hazmat transport through Messina Town : from risk analysis suggestions for improving territorial safety “ J. Loss Prev. Proc. Ind. In press 2002
- [42] B.Mazzarotta: “Risk reduction when transporting dangerous goods: road or rail?”, Risk Decision and Policy, 7, 45-56 (2002).
- [43] R. Bubbico, G. Maschio*, B. Mazzarotta, E. Parisi, V. Usai, “Analisi della sicurezza nel trasporto di merci pericolose via strada e ferrovia in Sicilia”, Atti Convegno VGR 2002, Pisa Ottobre 2002.
- [44] M. F. Milazzo, R. Lisi, A. Cogode, G. Spadoni e G. Maschio, “ Valutazione del rischio nel trasporto di merci pericolose in aree urbane : il caso Messina ”, Atti Convegno VGR 2002, Pisa Ottobre 2002.
- [45] D.F. Bagster, R.M. Pitblado: *Proc.Safety Environ.* **69**,196 (1991)
- [46] V. J. Clancey: “Diagnostic features of explosion damage”, 6th Int. Meeting of Forensic Sciences, Edinburgh, 1972
- [47] S. Glasstone: “The effects of nuclear weapons”, Atom. Energy Comm, Washington DC, 1962
- [48] W.C. Brasie, D.W. Simpson: “Guidelines for estimating explosion damage”, *Loss Prevention* 2,91 (1968)
- [49] G. L. Wells: “Safety in Process Plant Design”, Wiley, Chichester, 1980, p 170
- [50] V.Cozzani, F. Franchi, P. Pierno, E. Vitale, S. Zanelli: “Il contributo dell’effetto domino al rischio industriale”. Atti Convegno VGR 2002, Pisa Ottobre 2002.