

## PROPOSTA DI UN METODO SPEDITIVO PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFETTO DOMINO

P. Fargione\*, L. Ferroni\*, R.V. Gagliardi\*\*

\*Scuola di Specializzazione in Sicurezza e Protezione, DINCE, Università di Roma “ La Sapienza”,  
Corso Vittorio Emanuele 244, 00186 Roma

\*\*ISPESL, Dipartimento Insediamenti Produttivi ed Interazione con l'Ambiente, Via Urbana 167,  
00184 Roma

### SOMMARIO

L'analisi dell'effetto domino è un argomento di grande interesse nell'ambito delle problematiche relative agli impianti a rischio di incidente rilevante, sia per la maggiore severità delle conseguenze degli eventi incidentali che esso comporta, sia per la indeterminazione ancora presente nelle metodologie di analisi e di valutazione del fenomeno stesso. La Direttiva Europea 96/82/EC (“Seveso II”), ed il suo recepimento italiano, il Decreto Legislativo 334/99, stabiliscono la necessità di valutare l'effetto domino fra stabilimenti, in particolare in aree industriali ad elevata concentrazione di attività a rischio di incidente rilevante. Più specificamente, l'art. 12 comma 1 del D. Lgs 334/99 introduce il parametro “vicinanza” tra quelli da considerare per valutare la possibile insorgenza di effetto domino tra stabilimenti, oltre all'inventario delle sostanze pericolose in essi presenti. Un fattore determinante nel verificarsi dell'effetto domino è, infatti, la localizzazione degli elementi a rischio dell'impianto, dal momento che l'intensità delle conseguenze di un evento incidentale diminuisce in funzione della distanza dalla sorgente. Partendo da queste considerazioni, il presente lavoro propone una metodologia per la realizzazione di uno strumento che consenta la quantificazione del concetto di “vicinanza” mediante la restituzione di un intervallo di distanze critiche in termini di suscettibilità di interazione, e cioè di distanze fra apparecchiature, determinate in funzione di valori di soglia, opportunamente prefissati, al di sotto dei quali può verificarsi l'effetto domino. Tale metodologia vuole costituire la base di uno strumento in tempo reale, quindi di carattere “speditivo”, per la verifica della eventualità di insorgenza di effetto domino, strumento che possa consentire agli enti di controllo di assumere velocemente la decisione sulla necessità di dar corso a verifiche relative alla possibilità di insorgenza di effetti domino fra stabilimenti ad alto rischio. Il lavoro presenta i principali risultati finora raggiunti nello studio evidenziando, altresì, gli aspetti per i quali è necessario procedere con ulteriori approfondimenti.

### 1. INTRODUZIONE

La necessità di tener conto dell'effetto domino è stata introdotta nella Direttiva Seveso II [1], riguardante il controllo dei rischi di incidente rilevante relativi alle attività connesse con sostanze pericolose; tale direttiva, entrata in vigore il 3 febbraio 1999, prevede esplicitamente, all'art. 8, l'obbligo per gli Stati Membri della Comunità Europea, di *identificare gli stabilimenti o i gruppi di stabilimenti per i quali la probabilità, la possibilità o le conseguenze di un incidente rilevante possano essere incrementate dalla localizzazione, dalla vicinanza degli stabilimenti stessi, e dall'inventario delle sostanze in essi presenti*. Oltre a ciò, una volta che tali stabilimenti siano individuati, la direttiva prevede che fra i gestori avvenga lo *scambio delle informazioni necessarie per consentire di riesaminare, ed eventualmente modificare, in considerazione della natura e dell'entità del pericolo globale di incidente rilevante, i rispettivi sistemi di gestione della sicurezza, i rapporti di sicurezza, i piani di emergenza interni e la diffusione di informazioni alla popolazione*.

Il recepimento italiano della direttiva Seveso II, e cioè il decreto legislativo 334 del 17 agosto 1999 [2], riconosce l'importanza di questo genere di incidenti in impianti di processo introducendo anch'esso uno specifico articolo sull'effetto domino, l'art. 12, e richiedendo inoltre, con l'art. 13, l'individuazione di aree industriali ad elevata concentrazione di attività a rischio di incidente rilevante, per le quali è richiesta l'emanazione di ulteriori decreti al fine di stabilire i criteri per l'individuazione e la perimetrazione delle aree nelle quali l'effetto domino possa coinvolgere gruppi di stabilimenti.

Anche il più recente decreto attuativo del 9 maggio 2001 [3] sulla pianificazione d'uso del territorio, prevede all'art. 6, relativo alle aree ad elevata concentrazione di stabilimenti, che gli strumenti di pianificazione territoriale e urbanistica tengano conto delle risultanze, ove disponibili, della valutazione dello studio di sicurezza integrato dell'area, studio che non può prescindere da una valutazione dell'effetto domino ai fini della definizione di opportune distanze di sicurezza tra gli stabilimenti e le zone residenziali.

Un approccio efficace alla valutazione dell'effetto domino implica quindi la necessità di adottare un approccio integrato nella valutazione del rischio associato alle attività industriali a rischio di incidente

rilevante, che includa anche le problematiche relative alle strategie di pianificazione territoriale, alla valutazione del rischio d'area, alla sicurezza dei trasporti, oltre alla salvaguardia della sicurezza e della salute della popolazione.

Le figure coinvolte dalla legislazione vigente nella gestione dell'effetto domino provengono, da un lato, dal mondo dell'industria, tipicamente il gestore che deve redigere il rapporto di sicurezza o il piano di emergenza interno, dall'altro dalle istituzioni e dalle autorità pubbliche, ad esempio i tecnici coinvolti nelle ispezioni o quelli responsabili del piano di emergenza esterno e dell'informazione alle popolazioni; a tali figure occorre offrire strumenti e metodi di valutazione dell'effetto domino per una corretta valutazione del rischio associato.

Nonostante la normativa, sia nazionale che comunitaria, introduca la necessità di valutazione dell'effetto domino, restano ancora indefiniti gli strumenti ed i metodi per una corretta valutazione di tale fenomeno. La normativa nazionale, infatti, nell'art. 12 comma 1 del D. Lgs 334/99, introduce il parametro "vicinanza" tra quelli da considerare per valutare la possibile insorgenza di effetto domino tra stabilimenti limitrofi oltre, naturalmente, all'inventario di sostanze pericolose in essi presenti.

E' da queste considerazioni in merito alle carenze di legge che è nata l'esigenza di affrontare il presente lavoro, che mira a proporre una metodologia per la realizzazione di uno strumento di calcolo di tipo "speditivo" che consenta la quantificazione del concetto di "vicinanza" mediante la restituzione di un insieme di distanze critiche in termini di suscettibilità di interazione, in funzione dei seguenti parametri di ingresso:

- natura della sostanze;
- quantità coinvolte;
- condizioni meteorologiche.

Poiché, infatti, le informazioni immediatamente disponibili per un sito a rischio di incidente rilevante consistono nella mappa dell'area su cui insiste l'impianto, nel layout di impianto, nella tipologia e nella quantità delle sostanze pericolose presenti, oltre che nel tipo di attività e/o modalità di detenzione delle stesse, si vuol creare uno strumento che, utilizzando questi soli dati di ingresso, permetta di stabilire se determinate unità sono poste a distanze inferiori a quelle considerate critiche per l'insorgenza dell'effetto domino.

Per dare un taglio almeno iniziale all'attività, si è preliminarmente effettuata un'analisi storica di incidenti in cui si era verificato l'effetto domino, in modo da definire le sostanze più frequentemente coinvolte, le tipologie di apparecchiature più vulnerabili, i fenomeni di propagazione più probabili per ogni tipo di apparecchiatura. Successivamente, per ciascuno dei fenomeni di propagazione precedentemente definiti, sono stati individuati i modelli matematici più efficaci ai fini della determinazione delle distanze critiche ricercate. Particolare attenzione è stata dedicata alla individuazione dei valori di soglia relativi agli eventi incidentali suscettibili di dar luogo all'effetto domino, soprattutto in relazione alla determinazione dei valori più conservativi.

In questa memoria si dà conto dello stato delle attività di ricerca in merito alla modellazione degli effetti termici e meccanici (onde di pressione) capaci di innescare l'effetto domino mentre, per la valutazione degli effetti causati dalla proiezione di frammenti, così come per la realizzazione vera e propria dello strumento di valutazione, si rimanda a successive implementazioni del lavoro.

## 2. DATI STORICI

Dalle analisi di Banche Dati effettuate, gli incidenti complicati da effetto domino sono risultati, negli anni, relativamente rari; le informazioni per essi disponibili sono risultate scarse e comunque affette da notevoli incertezze, tuttavia ne sono scaturiti sufficienti dati preliminari in merito alle sostanze e agli elementi di impianto a maggior rischio.

Nel presente lavoro, per la classificazione degli incidenti, si fa riferimento alle definizioni [4] e assunzioni che seguono.

- per effetto domino si intende una cascata di eventi che amplifica le conseguenze di un evento primario sia spazialmente che temporalmente, e che induce un incidente rilevante;
- l'"unità primaria" è l'unità che, in caso di guasto, può danneggiare un'altra unità a rischio di incidente rilevante; in tal caso unità e tipologia di incidenti vengono classificati come primari, mentre l'"unità secondaria" è quella suscettibile di subire le conseguenze di un incidente primario;
- l'amplificazione delle conseguenze incidentali può essere sia spaziale, nel senso che risultano danneggiate aree non colpite dall'incidente primario, che temporale, nel senso che una stessa area viene danneggiata anche dall'incidente secondario ma con un certo intervallo di tempo tra i due eventi;

- gli effetti primari possono essere termici o meccanici (onda di pressione o proiezione di missili), mentre quelli secondari possono essere meccanici, termici e tossici<sup>1</sup>.

Per mezzo di una opportuna ricerca bibliografica [6], [7], [8]) si è identificata una lista contenente i più importanti incidenti in cui si è verificato un effetto domino. Le indicazioni desunte da tale ricerca sono state confrontate con le principali risultanze di due studi che, con metodi statistici, hanno effettuato delle elaborazioni sui parametri caratterizzanti una serie di incidenti rilevanti complicati da effetto domino, che si ritengono particolarmente significativi ai fini del presente lavoro.

Il primo studio [9] ha analizzato un insieme di 207 incidenti verificatisi negli ultimi 40 anni, classificandoli in categorie in funzione delle sostanze pericolose coinvolte. In tabella 1 si riportano i risultati più significativi di tale studio, ed in particolare il numero totale di incidenti verificatisi, il numero di incidenti che si ritiene abbiano dato luogo ad almeno un effetto domino, il numero di incidenti che si ritiene abbiano dato luogo a più di un effetto domino (in parentesi è riportata il peso percentuale di probabilità di effetto domino per ogni categoria). Da tale tabella si evince che:

- le sostanze infiammabili siano la causa più frequente di effetto domino;
- i vapori di idrocarburi (solitamente stoccati sotto pressione) costituiscono la tipologia di sostanza con la più alta probabilità di causare effetto domino;
- il contributo a tale probabilità delle sostanze tossiche è decisamente il meno significativo.

	<b>Combustibili Liquidi</b>	<b>Vapori Idrocarburi</b>	<b>Sostanze Tossiche</b>	<b>Miscellanea di sostanze</b>	<b>Totale</b>
Numero di incidenti	43	50	45	69	207
N° incidenti con almeno 1 effetto domino	21 (0.488)	29 (0.508)	7 (0.156)	23 (0.333)	80 (0.386)
N° incidenti con almeno 2 effetto domino	8 (0.186)	14 (0.280)	2 (0.044)	10 (0.145)	34 (0.164)

Tabella 1. Probabilità di effetto domino per categoria di sostanze.

Il secondo studio [6] ha analizzato 41 incidenti in funzione dei seguenti parametri: tipo di unità primarie, volume delle unità primarie, effetto primario, ritardo tra l'incidente primario e il secondario, unità secondarie, volume delle unità secondarie, effetti secondari, raggio di danno, numero di morti e feriti. Tra tutti i dati emersi nello studio, in tabella 2 si riportano i dati utili al lavoro in esame, ovvero le tipologie di unità (primarie e secondarie) più frequentemente coinvolte dall'effetto domino, e la relativa percentuale di coinvolgimento (dall'analisi statistica sono stati eliminati gli elementi quantitativamente meno significativi quali, per esempio, lo stoccaggio di prodotti solidi).

	<b>Unità primaria</b>	<b>Unità secondaria</b>
Stoccaggio in pressione (>2bar)	30%	33%
Stoccaggio a p atmosferica	28%	46%
Apparecchiature di processo	30%	12%
Pipelines	12%	--
Piccolo condizionamento	--	9%

Tabella 2. Tipologie di unità di impianto più frequentemente coinvolte nell'effetto domino.

Ulteriori valutazioni hanno riguardato i differenti effetti fisici osservati in incidenti primari e secondari e le occorrenze relative dei diversi fenomeni; tali valutazioni sono riportate in tabella 3.

L'esperienza storica consente dunque di caratterizzare le sostanze ed i fenomeni fisici da considerare per l'insorgenza dell'effetto domino ed anche le tipologie di unità (primarie e secondarie) che possono essere più frequentemente coinvolte da tale evento. In tal modo, nota la sostanza pericolosa e la relativa quantità presente in un impianto, opportunamente valutate sulla base del layout di impianto le unità suscettibili di dar luogo ad effetto domino, si deve ora fornire la metodologia quantitativa poter verificare la possibile insorgenza dell'effetto domino.

<sup>1</sup> Alcuni autori [5] includono anche il rilascio di una sostanza tossica fra gli eventi primari, in virtù del fatto che il rilascio tossico può colpire il personale operativo e quindi inabilitare le procedure di emergenza in caso di incidente; tale circostanza, verificatisi in realtà poche volte nel passato, tende a divenire sempre meno probabile con l'aumento dell'automazione dell'impianto. E' comunque buona norma, nella progettazione della sala operativa di un impianto, tener conto di tale rischio prevedendo la possibilità, in caso di rilascio tossico, di isolare la sala e di ventilarla in circuito chiuso.

Incidenti primari			Incidenti secondari		
Effetti		Occorrenza relativa del fenomeno fisico	Effetti		Occorrenza relativa del fenomeno fisico
Meccanici	(35%)	VCE (47%) Missili (53%)	Meccanici	(37%)	VCE (50%) Missili (50%)
Termici	(77%)	Pool fire (24%) Boilover (12%) Bleve (31%) Jet fire (10%) Flash fire (14%) Fire (9%)	Termici	(93%)	Pool fire (17,4%) Boilover (13%) Bleve (25%) Jet fire (--%) Flash fire (--%) Fire (44%)
			Tossici	(10%)	

Tabella 3. Tipologia di effetti fisici coinvolti nell'effetto domino.

### 3. UN METODO SPEDITIVO PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFETTO DOMINO

L'approccio "speditivo" ad una verifica di primo tentativo sulla suscettibilità di effetto domino può essere o di tipo deterministico o di tipo probabilistico. Nel primo caso occorre far riferimento alle "soglie di danno", che rappresentano l'intensità di un effetto fisico (irraggiamento, sovrappressione, proiezione di frammenti) cui deve essere sottoposta un'apparecchiatura perché questa possa risultare danneggiata da un incidente provocato da un'apparecchiatura adiacente. Noti i valori di soglia relativi a diversi livelli di danno per gli obiettivi di interesse, si adotta un criterio on-off che assume come danneggiato o non danneggiato il componente la cui posizione è ad una distanza rispettivamente minore o maggiore della "distanza di suscettibilità" associata ai livelli critici di radiazione termica o sovrappressione prodotte dall'evento incidentale primario<sup>2</sup>. Nel secondo approccio, invece, vengono utilizzate funzioni probabilistiche per determinare la probabilità di propagazione dell'incidente in funzione dell'intensità degli effetti fisici cui le apparecchiature sono sottoposte. Ancora più efficace potrebbe risultare una metodologia che combini i due approcci, utilizzando i valori di soglia per determinare l'area di danno, e stimando, all'interno di tale zona, la probabilità di propagazione dell'incidente da un punto di vista probabilistico.

Ai fini del presente lavoro, il cui obiettivo è quello di mettere a punto uno strumento di calcolo che consenta di quantificare il concetto di "vicinanza" in termini di "distanza di suscettibilità" fra apparecchiature al di sotto della quale si verifica l'effetto domino, si è adottato un approccio deterministico, la qual cosa non esclude tuttavia, in una successiva fase di approfondimento, possibili implementazioni di metodologie diverse.

La procedura in base alla quale si intende realizzare lo strumento fa diretto riferimento all'approccio presentato dall'IAEA (International Atomic Energy Agency) [10] per la classificazione e la definizione delle priorità del rischio negli impianti a rischio di incidente rilevante, metodologia fatta propria, peraltro, dalla Protezione Civile nell'elaborazione delle "Linee Guida per la pianificazione dell'emergenza esterna per impianti industriali a rischio di incidente rilevante" (1994).

In perfetta analogia con la metodologia di riferimento, lo strumento proposto, di cui, in questa sede, si dà conto del solo aspetto legato alla modellistica adottata, può riassumersi nella seguente procedura:

**1. Indicizzazione della sostanza pericolosa.** Le sostanze pericolose vengono classificate e caratterizzate da una serie di indici di riferimento.

**2. Indicizzazione della tipologia di attività e/o delle modalità di detenzione della specifica sostanza.** Le tipologie di attività e/o le modalità di detenzione delle specifiche sostanze vengono classificate e caratterizzate da una serie di indici di riferimento.

**3. Individuazione della categoria di effetti.** In base alle quantità di sostanze presenti (quantità massime realisticamente ipotizzabile come coinvolgibile in un singolo incidente), e in base agli indici di riferimento determinati nei passi precedenti, si individua la categoria di effetti corrispondente alla situazione in esame.

**4. Individuazione delle "distanze di suscettibilità".** Con gli elementi determinati nei passi precedenti si ricava, da appositi dati tabellati, la distanza entro la quale le unità di impianto in oggetto sono suscettibili di innescare effetto domino.

<sup>2</sup> Nel caso di lancio di frammenti la soglia viene determinata in base alla distanza massima di proiezione; in letteratura esistono valori di soglia anche per questo evento, ma la verifica della loro affidabilità necessita ancora di maggiori approfondimenti.

Con riferimento agli obiettivi del presente lavoro ci si intende riferire, per i primi due passi, alle stesse classificazioni del documento IAEA; viceversa, ai fini della determinazione della “distanza di suscettibilità”, e cioè della distanza entro la quale esiste la possibilità di innesco dell’effetto domino, si propone una elaborazione autonoma basata sulla modellazione degli effetti dei vari scenari ipotizzabili causa di effetto domino ([8], [11], [12]) con riferimento, almeno allo stato attuale della ricerca, all’irraggiamento termico da incendio e a sovrappressione in conseguenza di esplosioni.

E’ evidente che i risultati quantitativi perseguibili con la metodologia proposta risentiranno, nella loro approssimazione, di tutte le ipotesi semplificative che sarà necessario adottare per la realizzazione dello strumento speditivo; nel caso in cui il metodo dia indicazioni in merito ad un effettivo rischio, sarà comunque onere del verificatore del Rapporto di Sicurezza la decisione finale sull’opportunità, o meno, di procedere ad una valutazione dettagliata dell’effetto domino sull’impianto in esame.

### 3.1 Modellazione degli effetti termici

Gli incendi considerati nel lavoro in oggetto per la valutazione dell’effetto domino sono:

- Incendi di getti di vapore o gas infiammabili prodotti da perdite in serbatoi pressurizzati (jet fire)
- Incendi di pozze e recipienti di liquidi infiammabili (pool fire)
- Sfere di fuoco (fireball).

Il flash fire non è stato considerato tra le possibili cause di effetto domino in quanto esso è un fenomeno di rapida durata che, generalmente, causa danni solo alle parti più facilmente aggredibili dal fuoco, per esempio i cavi elettrici, ma non distrugge le apparecchiature [6], [12].

In caso di incendi di grandi dimensioni il calore sviluppato viene trasferito all’ambiente essenzialmente per irraggiamento. Il calcolo della radiazione termica causata dall’irraggiamento di sostanze in combustione, in funzione del tipo e della quantità di sostanza considerata, viene fatto utilizzando il modello per irraggiamento da sorgente puntiforme, in cui si assume che una data frazione del calore di combustione ( $f$ ) sia emesso come radiazione in tutte le direzioni, e che la superficie del bersaglio sia rivolta verso la sorgente di radiazione in modo da ricevere il massimo flusso incidente. La radiazione ricevuta per unità di area dal bersaglio ( $q$ ) posto a distanza ( $x$ ) dalla sorgente puntiforme è:

$$q = \frac{fmH_c \tau}{4\pi x^2} \quad (1)$$

dove  $m$ =tasso di combustione (kg/s)

$\tau$ =trasmissività atmosferica

$H_c$ =calore di combustione (J/kg).

Nel caso di poolfire, se l’incendio da pozza è prodotto da una sostanza infiammabile con un punto di ebollizione al di sopra della  $T$  ambiente (ad esempio il benzene) il tasso di combustione è stimato tramite la seguente relazione empirica [12]:

$$m = \frac{0,001H_c A}{H_n + c_p (T_b - T_a)} \quad (2)$$

dove  $H_v$ =calore di evaporazione (J/kg)

$C_p$ =calore specifico del liquido a pressione costante (J/kg K)

$A$ =area della pozza ( $m^2$ )

$T_b$ =temperatura di ebollizione (K)

$T_a$ =temperatura ambiente (K)

0,001=costante ( $kg/s m^2$ )

Combinando le equazioni 1 e 2 si ottiene:

$$x = H_c \sqrt{\frac{0,0001A}{q\pi(H_n + c_p (T_b - T_a))}} \quad (3).$$

Se l’incendio da pozza è prodotto da una sostanza infiammabile con un punto di ebollizione al di sotto della  $T$  ambiente (gas liquefatti come, ad esempio, il propano), il tasso di combustione è stato stimato a partire dalla seguente equazione:

$$m = \frac{0,001H_c A}{H_n} \quad (4)$$

Di conseguenza, l’equazione per ottenere la distanza a cui si raggiunge un determinato valore della radiazione ricevuta diviene:

$$x = H_c \sqrt{\frac{0,0001A}{q p H_n}} \quad (5)$$

Nel caso di un jet fire incidente su un bersaglio, si è fatto riferimento ad un modello [8] in cui la radiazione termica è data da:

$$q = \frac{f \dot{m} t H_c}{4 p x^2} \quad (6)$$

dove  $\dot{m}$  indica la portata (kg/s) e gli altri simboli hanno il significato espresso in precedenza. In tal modo, la “distanza di suscettibilità” può essere determinata come segue:

$$x = \sqrt{\frac{f H_c \dot{m} t}{4 p q}} \quad (7)$$

Per il fireball una formulazione specifica del modello sorgente puntiforme è data da:

$$q = \frac{2,2 f m^{0,67} H_c t}{4 p x^2} \quad (8)$$

dove m è la massa del fireball (kg) [12].

Per la determinazione dei valori di soglia da assumere come riferimento per la valutazione dell'effetto domino da irraggiamento termico, si dovrebbe tener conto anche dei livelli di protezione adottati (sistemi antincendio, presenza di isolanti, scudi termici etc..) qualora fossero note, in dettaglio, le caratteristiche dell'impianto in esame. Nel caso queste informazioni non fossero note, ovvero nel caso ipotizzato nel lavoro in oggetto, si dovrà far riferimento ai valori di soglia per la radiazione termica proposti in letteratura per danni alle apparecchiature, di cui si riporta un elenco nella sottostante tabella 4, e/o ai valori proposti nella normativa vigente.

Riferimento	Valore di soglia kW/m <sup>2</sup>	Effetto osservato
[5]	37	danno ad apparecchio a press. atmosferica
[6]	8	danno ad apparecchio non protetto
[6]	32	danno ad apparecchio protetto
[6]	44	danno ad apparecchio a pressione protetto
[11]	37,5	danno ad apparecchio di processo
[13]	37,5	danno ad apparecchio di processo
[8]	37,5	danno ad apparecchio di processo
[3]	12,5	danno a strutture

Tabella 4. Valori di soglia di danno per irraggiamento termico.

### 3.2 Modellazione degli effetti meccanici

La seconda tipologia di effetti capaci di innescare l'effetto domino comprende, rispettivamente, le onde di pressione e la proiezione di missili, entrambi generati da un'esplosione. Trascurando il contributo della proiezione dei missili all'effetto domino, che sarà oggetto di maggiori approfondimenti in una successiva fase del lavoro, si presenta di seguito il metodo adottato per la valutazione della distanza a cui si raggiunge il valore di sovrappressione di soglia a seguito dell'esplosione di una nuvola di vapori conseguente al rilascio di una sostanza infiammabile (VCE). Per modellare l'evento si è fatto riferimento al modello del TNT equivalente [12], basato sull'assunzione dell'equivalenza tra l'infiammabile specifico ed il trinitrotoluene, tenuto conto dell'efficienza dell'esplosione.

La distanza x a cui si raggiunge un determinato valore della sovrappressione può essere determinata tramite la seguente equazione:

$$x = Z \left( \eta m_f \frac{H_c}{H_{cTNT}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

dove  $m_f$ =massa della sostanza infiammabile (kg)  
 $H_{cTNT}$ =calore di combustione del TNT;  
 $\eta$  = parametro che tiene conto dell'efficienza dell'esplosione

$Z$  = parametro legato al valore della sovrappressione ( $m/kg^{1/3}$ ).

I danni prodotti dall'onda di pressione vengono solitamente suddivisi in due categorie, una relativa ai danni alle persone, l'altra relativa ai danni alle strutture. In relazione a quest'ultimi, un sommario esaustivo circa i danni associabili a determinati valori di sovrappressione è disponibile in letteratura [13]. In tabella 5 si riportano i valori più comuni presi come riferimento per l'effetto domino.

Riferimento	Valore di soglia (bar)	Effetto osservato
[5]	0,7	gravi danni a strutture
[16]	0,3	Danni a serbatoi, tubazioni, flange
[6]	0,16	limite inferiore per danno a strutture
[14]	0,07	parziale demolizione edifici, rottura vetri
[13]	0,03÷0,07	rottura vetri

Tabella 5. Valori di soglia di danno per sovrappressione.

#### 4. PRIMI RISULTATI DI VERIFICA SULLA MODELLAZIONE

Per l'applicazione al metodo speditivo dei suddetti modelli di simulazione degli effetti, si sono dovute fare alcune assunzioni tutte rispondenti, peraltro, a criteri conservativi. Tale approccio è giustificato dal fatto che, con la presente metodologia, si vuole creare uno strumento di prima valutazione circa la possibilità di insorgenza di effetto domino; come già accennato, infatti, qualora in base al metodo proposto si riscontrasse tale possibilità, il valutatore potrà o dovrà richiedere al gestore di procedere con analisi e/o strumenti più dettagliati.

##### 3.1 Valutazione degli effetti termici

Circa gli effetti termici, le assunzioni fatte riguardano i seguenti parametri:

- la frazione del calore di combustione dissipata come radiazione termica dipende dal tipo di sostanza e dalle dimensioni della fiamma; i dati misurati, disponibili in letteratura [8] per le varie sostanze, variano da 0.1 a 0.4; volendo assumere ipotesi conservative, nel lavoro si è assunto  $f=0.4$ ;
- la trasmissività atmosferica tiene conto della frazione di radiazione termica diffusa ed assorbita dall'atmosfera che, conseguentemente, non raggiunge il bersaglio. Porre  $\tau=1$  significa trascurare questo effetto determinando, così, una sovrastima della radiazione ricevuta; volendo assumere ipotesi conservative, nel lavoro si è quindi assunto  $\tau=1$ ;
- si assume, infine, la rottura completa dell'unità considerata e che tutta la sostanza presente contribuisca al fenomeno fisico in esame.

Per quanto riguarda i valori di soglia, si è scandagliato il campo con riferimento ai seguenti:

- ✓  $37 \text{ kW/m}^2$ , che è il valore indicato in letteratura per il danno alle apparecchiature;
- ✓  $12,5 \text{ kW/m}^2$ , che è il valore riportato dalla normativa italiana per il danno alle strutture;
- ✓  $8 \text{ kW/m}^2$  che è il valore di soglia indicato in letteratura per apparecchiature non protette;
- ✓  $5 \text{ kW/m}^2$ , che è il valore corrispondente ad ustioni di secondo grado per esposizioni di 40 s; tale valore è stato considerato per poter confrontare i risultati ottenuti nel lavoro in oggetto con quelli calcolati con il software RMP\*Comp<sup>TM</sup>, sviluppato dal NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e dall'EPA (Environmental Protection Agency) per la valutazione delle conseguenze di rilasci accidentali [14].

Le sostanze in relazione alle quali si sono effettuati i primi "run" di calcolo sono il propano ed il metano. In figura 1, 2 e 3 si riportano i valori di "distanza di suscettibilità" calcolate per il propano in corrispondenza dei valori di soglia sopra indicati nel caso, rispettivamente, di pool fire, di jet fire e di fireball. In figura 1 e 3 sono altresì riportati gli andamenti relativi al valore di soglia di  $5 \text{ kW/m}^2$ , ottenuti tramite il software RMP\*Comp<sup>TM</sup>.

L'andamento riportato nei grafici mostra il sostanziale accordo tra i dati calcolati sulla base della modellazione proposta ed i dati ottenuti tramite il software di controllo.

Praticamente impossibile risulta il confronto tra i dati ottenuti e quelli ricavabili dall'esperienza storica, data la frammentarietà delle informazioni disponibili; tuttavia, un caso ben documentato [12] quale quello di Mexico City del 1984, mostra la compatibilità fra il dato storico e quello calcolato. In tal caso, infatti, la distanza valutata dal CCPS per un flusso di radiazione di  $12,5 \text{ kW/m}^2$  prodotto da una Bleve, ed in corrispondenza di una massa di GPL pari a 468.000 kg, è di 1050 m, mentre la distanza ottenuta con il modello proposto è 1185 m.

### 3.2 Valutazione degli effetti meccanici

Circa gli effetti meccanici dovuti all'onda di pressione, si sono effettuate le seguenti assunzioni:

- stime empiriche dell'efficienza dell'esplosione,  $\eta$ , variano tra 0,01 e 0,1 [11]; di conseguenza, come ipotesi conservativa, si è posto  $\eta=0,1$ ;
- tutta la quantità di sostanza presente è rilasciata e forma una nube di vapori entro i limiti di infiammabilità

I valori di soglia considerati sono, rispettivamente:

- ✓ 0,7 bar, che è il valore indicato in letteratura per gravi danni alle strutture;
- ✓ 0,3 bar che è il valore riportato dalla normativa italiana in riferimento a danni su serbatoi, tubazioni etc...;
- ✓ 0,07 bar, che è il valore corrispondente a rottura vetri e parziale demolizione di edifici; tale valore, come nel caso dell'irraggiamento, è stato considerato per poter confrontare i risultati ottenuti nel lavoro in oggetto con quelli calcolati con il software RMP\*Comp™.

I valori di  $Z$  ( $m/kg^{1/3}$ ) sono ricavabili da curve sperimentali che riportano i dati relativi all'onda di pressione [15].

In figura 4 si riportano le “distanza di suscettibilità” calcolate, ancora per il propano, in corrispondenza dei valori di soglia sopra indicati, oltre ai valori ottenuti tramite il software RMP\*Comp™ in corrispondenza di 0,07 bar.

Anche per quanto riguarda la VCE, l'andamento riportato nei grafici mostra il sostanziale accordo tra i dati calcolati sulla base della modellazione proposta ed i dati ottenuti tramite software di confronto. Due incidenti ben descritti in letteratura [12] possono servire da confronto con i dati storici. Il primo è quello avvenuto ad Enschede (Olanda) nel 1980, relativo ad una VCE prodotta da 750 kg di propano; la rottura dei vetri conseguente all'esplosione, attribuibile ad un valore di sovrappressione pari a 0,03 bar, ha interessato un'area di 300 m, mentre con il modello proposto la distanza di danno valutata è di 362 m. Il secondo è relativo ad una VCE di 500 kg di metano avvenuta in Germania, a Raunheim nel 1966; la rottura dei vetri ha coinvolto un'area di 400 m, mentre il modello valuta tale distanza in 409 m.

Occorre infine sottolineare che le stime della “distanza di suscettibilità” riportate nei grafici mostrano un andamento generalmente più conservativo rispetto a quello documentato dalla normativa vigente [16], sebbene il confronto sia problematico data l'assenza di riferimenti, nella norma, ai modelli utilizzati.

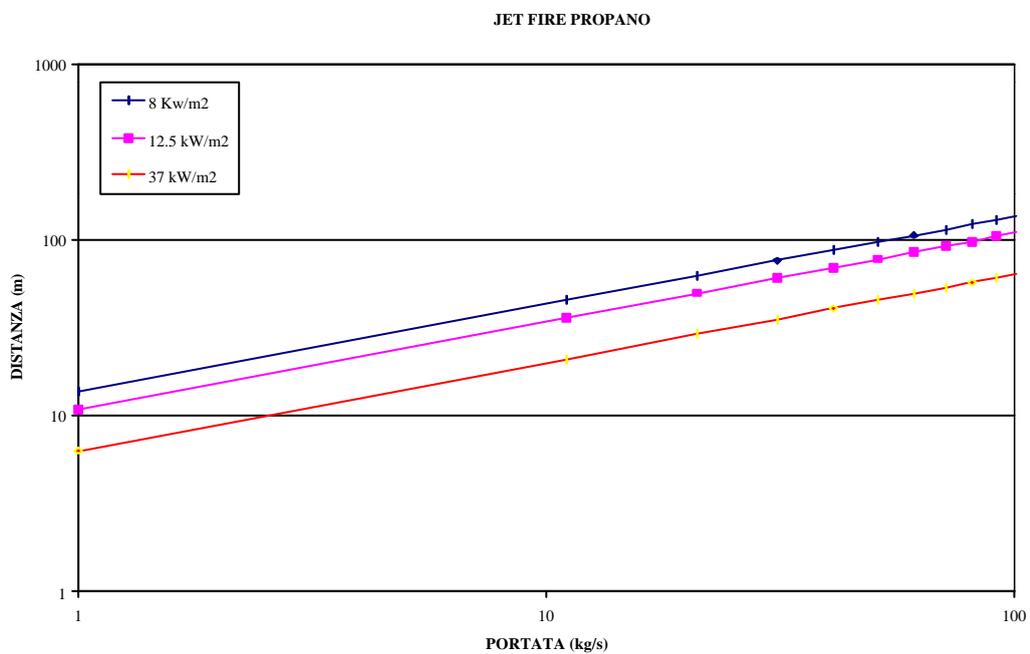
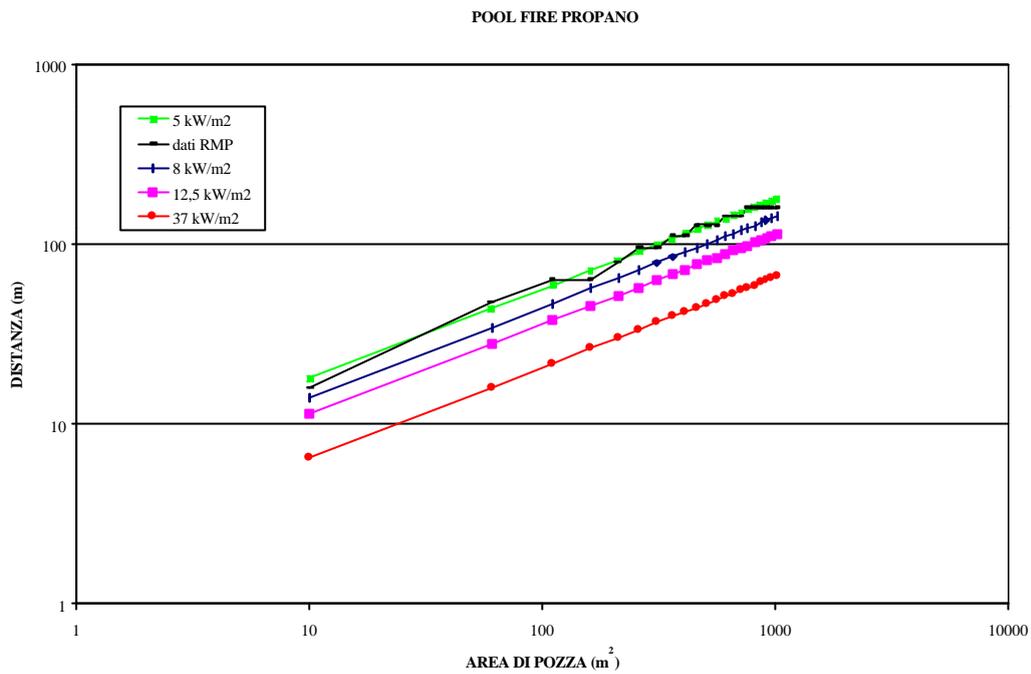
## 5. CONCLUSIONI

Nonostante la legislazione nazionale e comunitaria abbiano codificato la necessità di valutazione dell'effetto domino, è ancora possibile riscontrare una sostanziale carenza in merito alle metodologie di valutazione del fenomeno. In questo lavoro si sono poste le basi per una metodologia con cui realizzare uno strumento di verifica in tempo reale della possibilità di insorgenza di effetto domino tra unità di impianto, che possa supportare gli enti di controllo nella decisione di dar corso o meno a verifiche di dettaglio relative alla possibilità di insorgenza di effetti domino fra stabilimenti ad alto rischio.

Nel lavoro si sono presentati i primi esiti dei calcoli di modellizzazione degli effetti per la quantificazione delle “distanze di suscettibilità” di effetto domino, con riferimento alle distanze critiche in caso di effetti termici e di effetti meccanici causati dall'onda di pressione; tali valutazioni saranno il cuore del metodo speditivo proposto.

La futura implementazione del lavoro prevede i seguenti step:

- estensione dei calcoli ad una serie ben più vasta di sostanze infiammabili ed esplosive, significative nel panorama delle industrie ad alto rischio italiane;
- indicizzazione dei risultati ottenuti in abachi e tabelle del tutto simili a quelli adottati dalla IAEA;
- con successivo approfondimento, valutazione delle “distanze di suscettibilità” di effetto domino anche nel caso di lancio di missili.



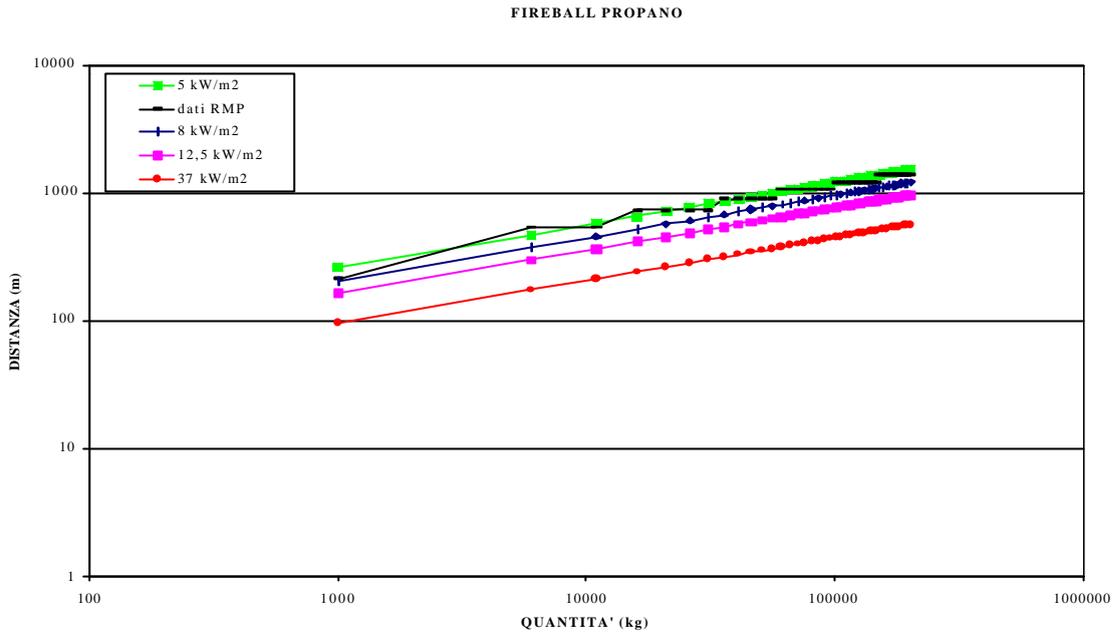


Figura 3. Distanza critica nel caso di fireball.

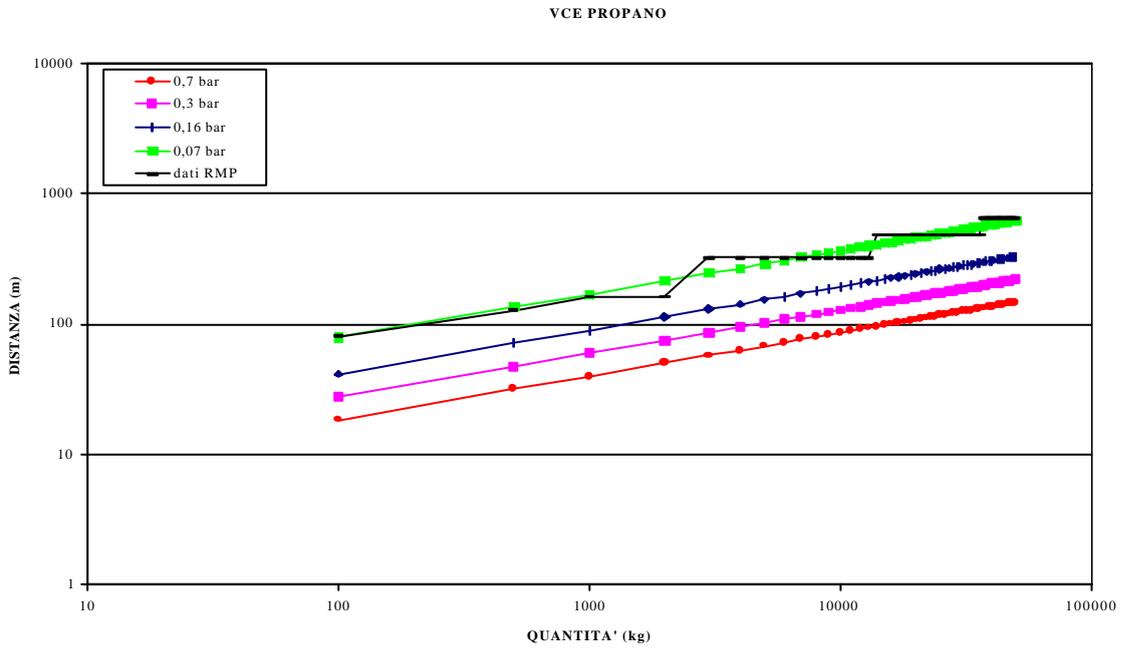


Figura 4. Distanza critica nel caso di VCE.

## LISTA DEI SIMBOLI

q=radiazione per unità di area ricevuta dal bersaglio ( $W/m^2$ )  
m=tasso di combustione (kg/s)  
 $\tau$ =trasmissività atmosferica  
 $H_c$ =calore di combustione (J/kg)  
f=frazione irradiata del calore di combustione  
x=distanza del punto sorgente dal bersaglio (m)  
 $H_i$ =calore di evaporazione (J/kg)  
 $C_p$ =capore specifico del liquido a pressione costante (J/kg K)  
A=area della pozza ( $m^2$ )  
 $T_b$ =temperatura di ebollizione (K)  
 $T_a$ =temperatura ambiente (K)  
 $\dot{m}$ =portata (kg/s)  
 $m_f$ =massa di sostanza infiammabile (kg)  
 $H_{cTNT}$ =calore di combustione del TNT  
 $\eta$ =efficienza dell'esplosione  
Z=parametro legato al valore di sovrappressione ( $m/kg^{1/3}$ ).

## 7. RIFERIMENTI

- [1] 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, 14.01.97
- [2] Decreto Legislativo n. 334 del 17 agosto 1999 Attuazione della Direttiva 96/82/CE relativa al controllo dei pericoli di incidenti rilevanti connessi con determinate sostanze pericolose, G.U. 28.09.99
- [3] Decreto n. 151 del 9 maggio 2001 Requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante, G.U. 16.06.01
- [4] C. Delvosalle, Domino effects phenomena: definition, overview and classification, European Seminar on Domino Effect, Leuven 1996
- [5] F.I.Khan, S.A.Abbasi, Models for domino effect analysis in chemical process industries, *Journal of Hazardous Materials*, vol 17, pp.107-123 (1998)
- [6] J.M.Leveret et al. Methodologie d'analyse des effets domino en milieu industrial, Rapport Final, Ministère de l'Emploi et du Travail, Belgio 1996
- [7] F.I.Khan, S.A.Abbasi, Major accidents in process industries and an analysis of causes and consequences, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol 12, pp.361-378 (1999)
- [8] F. Lees, *Loss prevention in chemical process industries*, London, Butterworth, 1996
- [9] S.P.Kourniotis, C.T.Kiranoudis, N.C.Markatos, Statistical analysis of domino chemical accidents, *Journal of Hazardous Materials*, vol 71, pp.239-252 (2000)
- [10] IAEA, *Manual for the classification and prioritization of risks due to major accidents in process and related industries*, 1993
- [11] Center for Chemical Process Safety, *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*, CCPS Publication, 1989
- [12] Center for Process Safety of the American Institute of chemical Engineers, *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash fires, and BLEVEs*, New York: AIChE, 1994
- [13] P.A.Davies, A guide to the evaluation of condensed phase explosions, *Jurnal of Hazardous Material*, vol 33, pp 1-33, 1993
- [14] U.S. Environmental Protection Agency, *RMP Offsite Consequence Analysis Guidance*, Washington, DC, 1996
- [15] P.A.van den Berg, A.Lannoy, Methods for vapour cloud explosion blast, *Journal of Hazardous Materials*, vol 34, pp.151-171 (1993)
- [16] Decreto Ministeriale del 15 maggio 1996 Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di gas di petrolio liquefatto (GPL), G.U. 09.07.96.

**APPENDICE A. Lista degli incidenti più significativi in cui si è verificato l'effetto domino.**

<b>Località</b>	<b>Stato</b>	<b>Anno</b>	<b>Incidente primario</b>	<b>Sostanza</b>	<b>Impianto</b>
Cleveland, Ohio	USA	1944	incendio,esplosione	gas naturale	stoccaggio
Texas City	USA	1947	Esplosione	nitrito d'ammonio	navi
Port Newark,	USA	1951	VCF, Blevé	propano	stoccaggio
Whiting, I	USA	1955	Esplosione	nafta	idroformilazione
Montréal	Canada	1957	Blevé	butano	stoccaggio
Mc Kittrick	USA	1959	Blevé	GPL	stoccaggio
Nigata	Giappone	1964	incendio,esplosione	idrocarburi	raffineria
Feyzin	Francia	1966	Blevé	propano	stoccaggio
Lake Charles	Usa	1967	Esplosione	isobutano	
Pernis	Olanda	1968	VCE	petrolio	alchilazione
Repcélak	Ungheria	1969	Esplosione	CO <sub>2</sub>	serbatoi scarti
Texas City	USA	1969	VCE	butadiene	
Crescent City	USA	1970	Blevé	GPL	ferrocisterna
Rio de Janeiro	Brasile	1972	Blevé	butano	stoccaggio
Prior Creek	USA	1973			
Kingman	USA	1973	Incendio	propano	ferrocisterna
Beaumont	USA	1974	VCE, Blevé	isoprene	isoprene
Flixborough	UK	1974	VCE	cicloesano	caprolattame
Beek	Olanda	1975	VCE	propilene	petrolchimico
Geismar	USA	1976	Esplosione	ossido etilene	reattore
Angleton	USA	1976		ammoniaca	
Westwego	USA	1977	esplosione polveri	Polvere di grano	silos
Galveston	USA	1977	esplosione polveri	Polvere di grano	silos
Umm Said	Qatar	1977	Incendio	GPL	
Texas City	USA	1978	incendio, Blevé	GPL	stoccaggio
Mississauga	Canada	1979	rilascio tossico	cloro	ferrocisterna
Borger	USA	1980	VCE	idrocarburi	alchilazione
Shuaiba	Kuwait	1981	esplosione,incendio	nafta	stoccaggio
Stailybridge	UK	1981	Esplosione	esano	recupero solvente
Livingston	USA	1982	Blevé	infiammabili, tossici	ferrocisterna
Tacoa	Venezuela	1982	Incendio	petrolio	stoccaggio
Newark	USA	1983	VCE	gasolio	stoccaggio
Milford Haven	UK	1983	Incendio	petrolio	stoccaggio
S.J. Ixhuatex	Messico	1984	VCF, Blevé	GPL	terminal
Priolo	Italia	1985	Incendio	idrocarburi	etilene
Thessalonique	Grecia	1986	incendio,esplosione	petrolio	oil terminal
Lyon	Francia	1987	Flashfire	petrolio	
Antwerp	Belgio	1987	Esplosione	ossido di etilene	colonna distillazione
Piper Alpha	UK	1988	Esplosione	petrolio	
Antwerp	Belgio	1989	Esplosione	ossido di etilene	colonna distillazione
Jonova	Lituania	1989	esplosione,incendio	ammoniaca	stoccaggio NH <sub>3</sub>
Pasadena	USA	1989	VCE	isobutano	polietilene
Baton Rouge	USA	1989	VCE	etano, propano	raffineria
Stanlow		1990	Esplosione	dicloronitrobenzene	reattore
Nagothane	India	1990	VCE	etano, propano	
Vishakapatnam	India	1997	Esplosione	GPL	