

METODOLOGIE QUANTITATIVE PER L'ANALISI DELL'EFFETTO DOMINO IN STUDI DI RISCHIO D'AREA

V. Cozzani*, L. Foschi[#], G. Francalanza[#], S. Zanelli*

- (*) Università degli Studi di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali, Via Diotisalvi n.2, Pisa
(#) Istituto per la Sicurezza e le Tecnologie per l'Ambiente Srl, Lungarno Buozzi n.20, Pisa

1. SOMMARIO

La severità degli incidenti dovuti all'effetto domino, ovvero alla propagazione di un singolo evento incidentale a causarne altri, è ben nota. La Direttiva Europea 96/82/EC ("Seveso II") ed il suo recente recepimento italiano (DL 334/99) riconoscono l'importanza di questo genere di incidenti in impianti di processo e richiedono un'analisi del rischio associato anche al di fuori dei confini del singolo stabilimento, in particolare in aree industriali ad elevata concentrazione di attività a rischio di incidente rilevante. L'analisi e la prevenzione di questi rischi è infatti di particolare importanza in zone dove siano presenti numerose potenziali sorgenti di rischio contigue fra loro.

Tuttavia, ad oggi non è presente una procedura di riferimento per l'analisi sistematica qualitativa e quantitativa del rischio associato a questo tipo di incidenti. Questo limite è particolarmente importante negli studi di rischio d'area, in cui l'elevato numero di sorgenti analizzate ed il numero di informazioni da gestire richiede lo sviluppo di approcci specifici per l'analisi sistematica dell'effetto domino.

Questo studio ha riguardato lo sviluppo e la validazione di una metodologia sistematica per l'analisi dell'effetto domino in studi di rischio d'area. L'analisi di numerosi eventi incidentali causati da effetto domino ha permesso di evidenziare due diverse tipologie di scenari: i) incidenti causati dalla propagazione di eventi iniziatori di limitata severità; e ii) incidenti secondari causati da un incidente rilevante primario. Le due tipologie di effetti domino sono state analizzate con metodi specifici per l'identificazione degli scenari, l'individuazione delle frequenze attese e la valutazione delle conseguenze. Uno dei principali obiettivi delle metodologie sviluppate è stato di minimizzare il numero di ulteriori informazioni ed analisi da effettuare per la valutazione quantitativa degli scenari secondari.

2. INTRODUZIONE

Per "effetto domino" si intende in generale un effetto di propagazione di un incidente, a cui normalmente è associata un'amplificazione dei danni causati. Tuttavia nella letteratura specialistica e tra gli operatori del settore non è presente una precisa definizione o delimitazione di ciò che si deve intendere come "effetto domino". La mancanza di una delimitazione del significato tecnico di "effetto domino" si manifesta inevitabilmente nell'assenza di metodologie efficaci e generalizzabili per l'analisi dei rischi associati a questo tipo di eventi in incidenti nell'industria di processo. Come riprova, basti verificare che nei tre volumi (più di 3000 pagine) di "Loss Prevention in the Process Industries" [1], che si è affermato come il testo di riferimento nel campo delle metodologie per l'analisi di sicurezza dell'industria di processo, non più di 3 pagine sono dedicate alle metodologie di analisi dell'effetto domino.

A fronte dell'assenza di metodologie per l'analisi quantitativa dei rischi (QRA o quantitative risk analysis) inerenti all'effetto domino, l'analisi storica di incidenti nell'industria di processo mostra che gli incidenti in cui è avvenuto un "effetto domino" hanno in generale conseguenze particolarmente gravi. Per questo motivo la legislazione per la prevenzione dei rischi dovuti ad incidenti rilevanti richiede, sia a livello comunitario (Direttive 82/501/EEC [2] e 96/82/EC [3]) che a livello nazionale (DPR 175/88 e DL 334/99), l'individuazione dei potenziali effetti domino sia all'interno che all'esterno dello stabilimento.

L'analisi dell'effetto domino all'interno dello stabilimento può rappresentare, da un certo punto di vista, il necessario completamento dell'analisi di sicurezza dell'impianto. In questo senso, le difficoltà associate sono di natura tecnica, in particolare legate alla disponibilità di metodologie QRA sufficientemente semplici ed affidabili. L'analisi degli effetti domino esterni allo stabilimento pone però anche problemi di natura gestionale, dal momento che richiede necessariamente uno scambio di informazioni tra aziende potenzialmente concorrenti. E' evidente perciò che lo studio dell'effetto domino tra stabilimenti contigui è strettamente connesso agli studi di rischio d'area ed alle strategie di pianificazione del territorio.

Da questa premessa emerge con chiarezza l'importanza dello sviluppo di procedure per l'analisi dei rischi dovuti all'effetto domino. D'altronde, dal punto di vista legislativo, il DL 334/99, che costituisce il recepimento italiano della Direttiva Europea 96/82/EC, meglio nota come "Direttiva Seveso-II", richiede specificamente l'individuazione dei potenziali rischi dovuti all'effetto domino all'esterno degli stabilimenti.

D'altronde, l'esigenza di un'efficace pianificazione del territorio dal punto di vista della minimizzazione del rischio industriale sta portando al progressivo sviluppo di metodologie per lo studio del rischio d'area [4]. Uno dei principali limiti delle metodologie di analisi del rischio d'area attualmente in uso è che non sono disponibili procedure semplificate per l'analisi quantitativa dell'effetto domino, nonostante che il rischio d'area sia orientato ad un'analisi integrata delle interazioni delle diverse sorgenti di rischio presenti sul territorio.

3. SVILUPPO DI METODOLOGIE QUANTITATIVE SEMPLIFICATE PER L'ANALISI DELL'EFFETTO DOMINO

L'analisi dell'effetto domino è finora stata condotta principalmente nell'ambito di studi di sicurezza di singoli impianti. Per questo motivo, l'obiettivo principale del lavoro pregresso svolto nel settore è stato l'individuazione di "soglie di danno" per la propagazione degli incidenti. Queste rappresentano l'intensità di un effetto fisico (irraggiamento, sovrappressione) a cui deve essere sottoposta un'apparecchiatura perché possa risultare danneggiata da un incidente che coinvolga un'apparecchiatura adiacente [1]. Tuttavia, l'applicazione del DL 334/99 richiede di affrontare lo studio dell'effetto domino in un contesto più ampio, estendendo l'analisi oltre i confini del singolo stabilimento. Questa particolarità può portare all'adozione di procedure semplificate di analisi quantitativa dell'effetto domino sulla base di alcune ipotesi fondamentali.

L'analisi dei rischi dovuti all'effetto domino, proprio a causa del superamento dei limiti del singolo stabilimento, si pone come un problema da affrontare a valle della redazione dei rapporti di sicurezza del singolo impianto, o comunque successivamente all'analisi degli incidenti rilevanti "primari" individuati per l'impianto. Nello sviluppo di procedure per l'analisi dell'effetto domino si può quindi ragionevolmente supporre che siano disponibili le analisi di sicurezza (analisi di affidabilità, analisi delle conseguenze degli incidenti rilevanti o "top events" individuati) degli impianti considerati.

Questo presupposto permette di semplificare l'analisi dell'effetto domino minimizzando l'ulteriore lavoro da svolgere e sfruttando, per quanto possibile, i risultati già disponibili.

4. MODALITA' E PROBABILITA' DI PROPAGAZIONE DEGLI INCIDENTI

La propagazione degli incidenti può avvenire a causa di tre distinte cause:

- irraggiamento
- sovrappressione
- proiezione di frammenti

L'approccio alla verifica degli effetti domino può essere effettuato in modo deterministico, in base a "soglie di danno", o in modo probabilistico.

I valori di soglia più frequentemente utilizzati in letteratura sono di 37kW/m^2 per l'irraggiamento e di 0.7atm per la sovrappressione [1,5], anche se la verifica dell'affidabilità di questi limiti è un punto molto importante, che richiede un ulteriore contributo di ricerca. Per quanto riguarda la proiezione dei frammenti, l'unico valore di soglia ipotizzabile è la distanza massima di proiezione, che dipende però da vari fattori (dimensioni del frammento, velocità iniziale, etc.) che non permettono di ottenere valori generalizzabili. L'utilizzo dei soli valori di soglia per stimare la possibilità di propagazione dell'evento corrisponde però ad un approccio eccessivamente catastrofista.

In alternativa ai valori di soglia, possono essere utilizzate funzioni probabilistiche per determinare la probabilità di propagazione dell'incidente in funzione dell'intensità degli effetti fisici a cui le apparecchiature sono sottoposte [1]. In letteratura sono stati ad oggi proposti vari metodi, sia empirici [7,8], sia basati sull'utilizzo di funzioni di probit per valutare la probabilità di danno delle apparecchiature in base all'intensità degli effetti fisici [1]. Anche in questo caso, poiché le funzioni probabilistiche sono applicate ad eventi rari la cui possibilità può dipendere anche da numerose condizioni al contorno (es. il grado di riempimento dell'apparecchiatura, etc.), lo sviluppo di questo approccio richiede ancora un sostanziale contributo di ricerca.

Un approccio misto può essere basato sull'utilizzo di valori di soglia per determinare la possibilità di interazione e, all'interno del cerchio di danno, dall'utilizzo di funzioni di probabilità per stimare la possibilità di propagazione da un punto di vista quantitativo.

5. IDENTIFICAZIONE DEGLI SCENARI INCIDENTALI CAUSATI DALL'EFFETTO DOMINO

5.1 Tipologie di effetto domino

Il primo problema che deve essere affrontato nello sviluppo di metodologie per l'analisi dell'effetto domino è l'identificazione degli scenari incidentali. E' evidente che si possono utilizzare tecniche convenzionali basate su alberi dei guasti o degli eventi, ma è importante riconoscere preliminarmente che esistono due tipologie ben distinte di effetto domino.

Un incidente dovuto all'effetto domino può avere una delle seguenti connotazioni:

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

Un esempio di queste due diverse tipologie di eventi è dato da un incidente avvenuto in un impianto italiano per la produzione di etilene e propilene nel 1985.

L'incidente è stato iniziato dalla rottura della saldatura di un tronchetto di piccolo diametro (2") su una tubazione di etilene alla base di una colonna di frazionamento. La rottura è stata causata dalle vibrazioni dovute alla ripetuta apertura e chiusura di due valvole di sicurezza. Il gas, fuoriuscendo, ha formato un dardo di fuoco che è andato ad incidere direttamente su una tubazione di 600mm di diametro contenente idrocarburi C₂-C₃ in pressione. A seguito dell'irraggiamento, la tubazione da 600mm ha collassato dando immediatamente origine ad un dardo di fuoco lungo alcune decine di metri, che è andato a colpire il parco serbatoi dello stabilimento. Il secondo dardo di fuoco ha causato il BLEVE di un serbatoio verticale in pressione contenente etilene liquido. Un secondo ed un terzo serbatoio, avvolti dalle fiamme, sono esplosi poco dopo. L'impianto è stato distrutto quasi completamente nell'incendio che è seguito alle esplosioni.

Questo incidente mostra chiaramente la presenza di due diverse tipologie di effetto domino. Il secondo dardo di fuoco (dalla tubazione di 600mm) è un esempio di effetto domino del primo tipo, cioè della propagazione di un evento di limitata gravità. Infatti un "jet fire" da una tubazione di 2" in generale viene considerato avere conseguenze trascurabili se si trascura la possibilità di effetto domino. D'altronde, nell'analisi di sicurezza di un impianto, la rottura a ghigliottina di una tubazione di 600mm in generale si ritiene essere un evento scarsamente credibile se considerato come evento "primario". Quindi, non considerando la possibilità di effetto domino, questo tipo di incidente potrebbe essere ritenuto non credibile e in quanto tale trascurato in un rapporto di sicurezza.

Tuttavia, i maggiori danni all'impianto sono stati causati dai BLEVE nel parco serbatoi. Questi sono chiaramente stati causati da un effetto domino "di secondo tipo", cioè dall'interazione di "top events" diversi: il BLEVE del primo serbatoio che ha causato un secondo ed un terzo BLEVE.

Il BLEVE di un sigaro verticale in pressione contenente gas infiammabile liquefatto è evidentemente un top-event che dovrebbe essere considerato nel rapporto di sicurezza dell'impianto. Presumibilmente questo evento dovrebbe essere studiato per tutti i serbatoi presenti nel parco stoccaggio. Il verificarsi simultaneamente di più di un BLEVE (uno come evento primario e gli altri come eventi secondari, cioè causati dal primo BLEVE) è chiaramente un effetto domino del secondo tipo, cioè il risultato dell'interazione di top-events distinti. E' evidente che la presenza di più serbatoi contigui ha due effetti: elevare la probabilità dei singoli top-events e rendere possibili scenari di maggiore severità.

L'esempio discusso rende chiaro che le due tipologie di effetto domino considerate hanno caratteristiche distinte. Per questo motivo è opportuno distinguere le metodologie di identificazione e valutazione degli scenari incidentali causati dai due tipi di effetti domino. In particolare va notato che gli effetti domino del primo tipo, essendo causati da eventi di limitata severità, hanno in generale un ridotto raggio di effetto. Contribuiscono, cioè, ad aumentare il numero di top-events credibili o le relative frequenze all'interno di un singolo impianto.

Gli effetti domino del secondo tipo, essendo causati da eventi già in sé rilevanti, hanno maggiore raggio di danno potenziale. In particolare, nella ricerca delle interazioni tra sorgenti di rischio in stabilimenti diversi in generale dovrebbe essere sufficiente verificare la possibilità di effetti domino di questo secondo tipo.

5.2 Identificazione degli scenari incidentali causati da effetti domino del primo tipo

Per identificare gli scenari incidentali derivanti dal primo tipo di effetto domino (propagazione di eventi primari di limitata gravità) è necessario identificare tutti i possibili eventi iniziatori di limitata gravità (EILG). Assumendo che siano disponibili i risultati dell'analisi di operabilità dell'impianto, l'identificazione degli EILG richiede la revisione di tutti i top-events identificati nell'analisi e considerati di importanza trascurabile dal punto di vista delle conseguenze primarie. Gli EILG più credibili dal punto di vista degli effetti domino del primo tipo sono in generale i getti incendiati (es. dalla rottura di linee di piccolo diametro) e gli incendi di pozze di liquido (es. dalla perdita di tenute) di limitate dimensioni. L'analisi degli effetti della propagazione di un EILG (se presenti) può risultare in tre possibili categorie di eventi secondari:

- 1) L'identificazione di nuovi scenari incidentali per l'impianto, che richiedono perciò una completa analisi in termini di frequenze e conseguenze
- 2) L'identificazione dell'effetto domino come causa credibile di scenari incidentali di frequenza trascurabile dal punto di vista delle cause primarie (es. la rottura a ghigliottina di una tubazione di diametro superiore a 10"). La valutazione di questi scenari secondari richiede quindi una revisione dell'analisi delle frequenze e una completa analisi delle conseguenze
- 3) L'identificazione dell'effetto domino come causa ulteriore di scenari incidentali già analizzati come eventi primari. La valutazione di questi scenari richiede soltanto la revisione dell'analisi delle frequenze incidentali, in quanto l'analisi delle conseguenze è già stata effettuata

5.3 Identificazione degli scenari incidentali causati da effetti domino del secondo tipo

L'identificazione di scenari incidentali causati da effetti domino del secondo tipo (interazione di più top-events) richiede l'individuazione degli incidenti rilevanti "primari" che possono causare effetti domino. Come detto in precedenza, la propagazione dell'incidente primario può avvenire principalmente a causa di tre fattori: l'irraggiamento, la sovrappressione e la proiezione di frammenti. La possibilità di generare un evento secondario deve essere valutata, anche in questo caso, sulla base di "soglie di danno". Tuttavia, in questo caso, è importante effettuare anche una valutazione della probabilità con cui si genera l'evento secondario in funzione dei diversi fattori (distanza, geometria, durata) che caratterizzano l'interazione con l'evento primario. La proiezione di frammenti, inoltre, si presta con difficoltà alla stima di soglie di danno, in quanto la forma e la geometria dei frammenti può variare in modo importante [6].

E' però importante notare che, una volta stimata la probabilità di propagazione dell'evento primario, l'analisi delle conseguenze dell'evento secondario è in generale già disponibile.

6. ANALISI DELLE FREQUENZE

6.1 Analisi delle frequenze di scenari incidentali causati da effetti domino del primo tipo

La figura 1 rappresenta un serbatoio atmosferico a volume variabile di gas di altoforno e le relative tubazioni di adduzione del gas e di collegamento con le utenze. Nell'analisi di sicurezza della rete di tubazioni, anche in base a dati storici, è stata individuata la possibilità di formazione di miscela esplosiva e la proiezione di frammenti come conseguenza dell'innesco di questa miscela. Un effetto domino del primo tipo può essere dovuto alla rottura del serbatoio a seguito dell'impatto di frammenti di tubazioni.

La frequenza degli incidenti secondari (IS) causati da EILG può essere valutata come segue:

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

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:

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

La valutazione delle frequenze attese di questo primo tipo di incidenti dovuti ad effetto domino può ancora essere basata su tecniche classiche quali albero dei guasti ed albero degli eventi. La frequenza degli EILG può essere convenzionalmente calcolata tramite alberi di guasto. La probabilità di propagazione dell'incidente può essere stimata attraverso tecniche basate su alberi degli eventi. Quest'ultima è il parametro

più critico da valutare, in quanto è dipendente da elementi largamente incerti, quali gli intervalli tra le ispezioni, la posizione e l'orientamento di tubazioni minori, etc. Tuttavia possono essere utilizzate ipotesi ragionevolmente cautelative, basate ad esempio su criteri geometrici.

Nel caso in cui l'incidente secondario causato dall'EILG abbia anche cause primarie dell'evento, in base all'ipotesi di indipendenza degli eventi iniziatori e al fatto che le frequenze attese sono piccole (10^{-6} - 10^{-2} ev/anno) possiamo considerare tali eventi come disgiunti e quindi esprimere la frequenza complessiva come somma delle frequenze relative ai due tipi di eventi iniziatori e cioè:

$$f_{top} = f_{IP} + f_{IS} \quad (3)$$

dove f_{IP} è la frequenza dell'evento in base alle cause primarie.

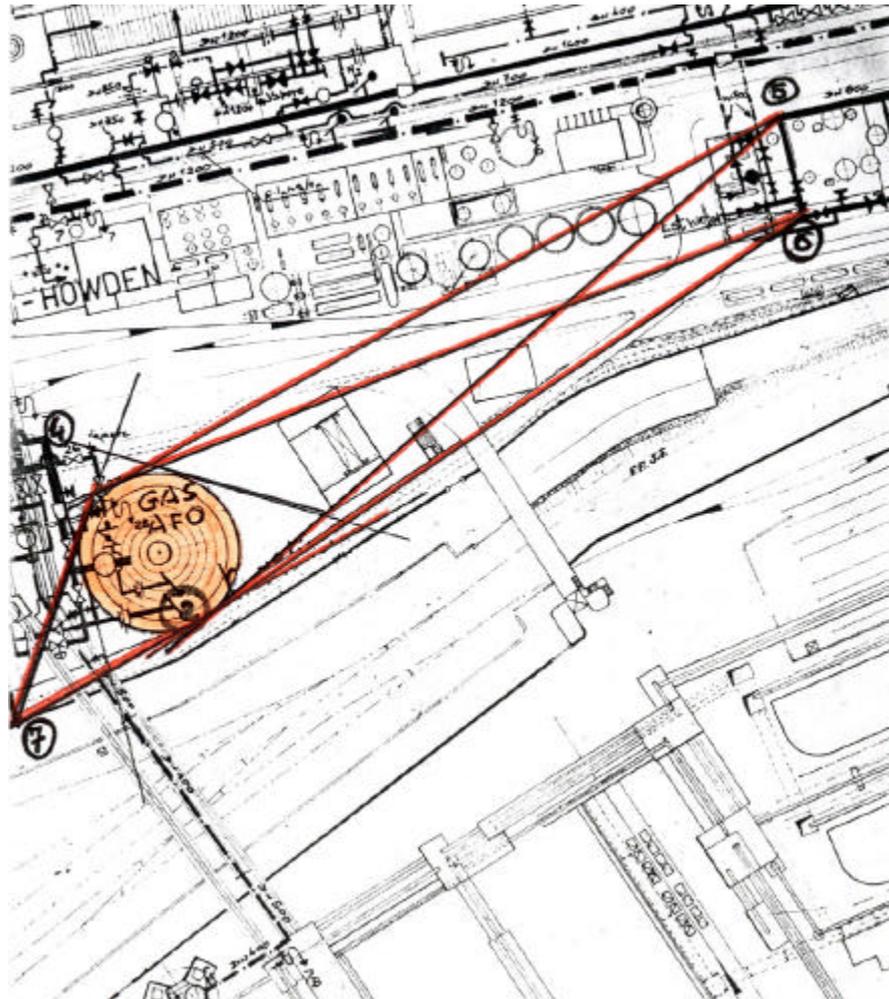


Figura 1: *Evento domino del primo tipo (rottura di un serbatoio atmosferico causata dalla proiezione di frammenti)*

6.2 Analisi delle frequenze di scenari incidentali causati da effetti domino del secondo tipo

La figura 1 rappresenta due serbatoi atmosferici di solventi infiammabili. In generale, nell'analisi di sicurezza dell'impianto devono essere considerate le conseguenze di pool fire causati dallo sversamento del contenuto dei singoli serbatoi. Un effetto domino del secondo tipo, dovuto all'irraggiamento della parete del secondo serbatoio, può causarne la rottura, lo sversamento del contenuto ed un pool fire dal secondo serbatoio.

In generale, nell'analisi di sicurezza degli impianti si ipotizza che i diversi "top-events" (pool fire dal serbatoio 1, pool fire dal serbatoio 2) siano eventi indipendenti e possano essere considerati praticamente

disgiunti dal punto di vista probabilistico. Questa ipotesi ($P(1\cap 2)\approx 0$) è giustificata dai bassi valori delle frequenze primarie dei singoli eventi nel caso in cui si possa escludere la possibilità di effetti domino del secondo tipo.

Stimare la frequenza attesa di eventi domino del secondo tipo richiede quindi di rimuovere l'ipotesi di non contemporaneità (disgiunzione) degli scenari e contestualmente di ottenere le relazioni di dipendenza tra gli eventi, definendo quindi il valore dell'intersezione $P(1\cap 2)$. Questo implica la necessità di valutare la probabilità di propagazione degli incidenti. Infatti, definendo f_{pt1} e f_{pt2} la frequenza complessiva del pool fire 1 e del pool fire 2 in base agli eventi primari, la frequenza di un evento simultaneo causato dall'effetto domino (f_{ED}) è data da:

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

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 $P_{d,1\rightarrow 2} \neq P_{d,2\rightarrow 1}$. In particolare, uno dei due termini può essere considerato uguale a zero se il valore degli effetti fisici prodotti sull'apparecchiatura secondaria è inferiore al valore di soglia.

Va inoltre notato che la frequenza dei singoli eventi (pool fire 1 o pool fire 2) in assenza di effetto domino deve essere ricalcolata:

$$f_{p1} = f_{pt1} \cdot (1 - P_{d,1\rightarrow 2}) \quad (5)$$

$$f_{p2} = f_{pt2} \cdot (1 - P_{d,2\rightarrow 1}) \quad (6)$$

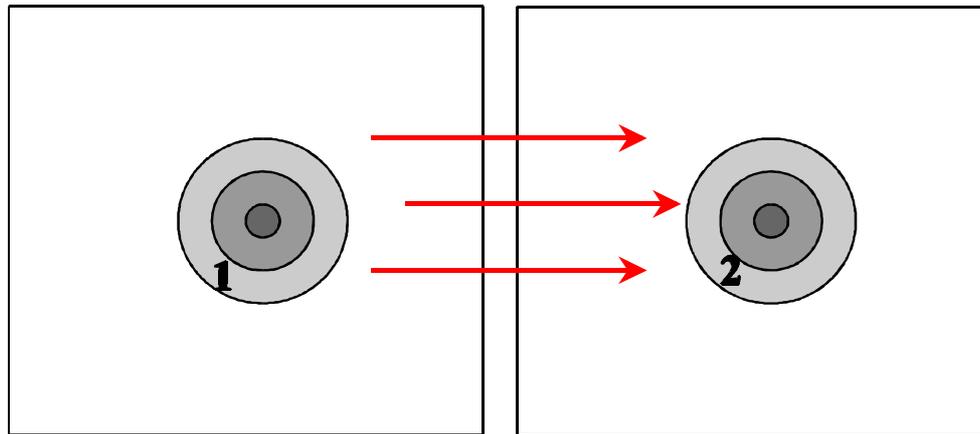


Figura 2: Evento domino del secondo tipo (pool fires causati da sversamento di serbatoi di solventi)

7. ANALISI DELLE CONSEGUENZE

7.1 Analisi delle conseguenze di scenari incidentali causati da effetti domino del primo tipo

Richiamando le tre diverse situazioni che si possono avere come risultato dell'identificazione degli scenari incidentali dovuti ad effetti domino del primo tipo, la valutazione delle conseguenze non è necessaria nel caso 3. Nei casi 1 e 2, questa dovrà necessariamente essere condotta con metodi convenzionali, basati su tecniche di albero degli eventi, modelli di dispersione, modelli di valutazione degli effetti fisici, modelli di vulnerabilità [4].

7.2 Analisi delle conseguenze di scenari incidentali dovuti ad effetti domino del secondo tipo

Questi scenari sono il risultato dell'interazione di eventi incidentali per i quali dovrebbe essere disponibile l'analisi delle conseguenze, in quanto eventi incidentali "primari". 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. La sovrapposizione delle mappe degli effetti fisici può essere facilmente effettuata nel contesto di studi di rischio d'area, se si utilizzano software georeferenziati.

Una stima della probabilità di danno può essere anche ottenuta dalle mappe di vulnerabilità, che sono più facilmente gestibili dai software per l'analisi del rischio d'area. La vulnerabilità rappresenta la probabilità di danno a seguito dell'esposizione ad una dose di un effetto fisico (irraggiamento, sovrappressione, concentrazione tossica) e si esprime attraverso funzioni di probit:

$$Pr = a + b \cdot \ln(D^\alpha \cdot t) \quad (7)$$

dove a, b ed α sono costanti caratteristiche del tipo di effetto fisico, D è la dose, t il tempo di esposizione. Le funzioni di probit sono univocamente collegate ai corrispondenti valori della probabilità di danno:

$$V = f(Pr) \quad (8)$$

dove V, probabilità di danno, è un valore compreso tra 0 ed 1.

La vulnerabilità in un punto della mappa conseguente ad un effetto domino del secondo tipo (V_t) è data, in generale, dalla seguente espressione:

$$V_t = F(V_1, V_2) \quad (9)$$

dove V_1 e V_2 sono le vulnerabilità dei singoli eventi considerati ed F è una funzione da definire. Se la probabilità di danno è un valore compreso tra 0 ed 1, la funzione F può assumere le forme seguenti:

1. Per effetti fisici diversi (sovrappressione e irraggiamento, sostanze tossiche e irraggiamento, etc.), con l'ipotesi di poter trascurare eventuali effetti sinergici sulla probabilità di danno:

$$F(V_1, V_2) = \min\{V_1 + V_2, 1\} \quad (10)$$

2. Per lo stesso effetto fisico:

$$F(V_1, V_2) = f(Pr) \text{ con } Pr = Pr(Pr_1, Pr_2) \text{ e } Pr_i = f^{-1}(V_i), i=1,2 \quad (11)$$

dove f è la funzione che associa probabilità corrispondente al valore di probit dell'evento congiunto Pr. Tale valore di probit Pr è a sua volta funzione dei due valori di probit relativi agli eventi singoli nel seguente modo (calcolato tramite semplici manipolazioni algebriche):

$$Pr(Pr_1, Pr_2) = a + b \cdot \ln \left(e^{\frac{Pr_1 - a}{ab}} + e^{\frac{Pr_2 - a}{ab}} \right)^\alpha \quad (12)$$

dove a, b ed α sono i coefficienti della funzione di probit relativa all'effetto fisico considerato. Il calcolo della F è però piuttosto oneroso, in quanto richiede due trasformazioni tra probit e probabilità. Tuttavia il calcolo più complesso riguarda la (13). La possibilità di approssimare la (12) con una funzione di tipo:

$$Pr(Pr_1, Pr_2) \approx b_1 Pr_1 + b_2 Pr_2 + R_n \quad (13)$$

con R_n un resto con parte positiva opportunamente piccola rappresenterebbe quindi un notevole vantaggio dal punto di vista dei tempi di calcolo.

Notiamo che la funzione in (12) è convessa. Ne segue che una prima approssimazione grossolana si può fare considerando un piano che incroci il grafico della funzione in (12) in tre punti fissati e calcolati a priori in modo che la funzione sia calcolata per eccesso, e cioè che risulti $R_n < 0$.

La probabilità di danno dovuta all'effetto domino si può stimare moltiplicando la somma delle vulnerabilità per la probabilità di propagazione dell'incidente. Questo metodo può essere utilizzato per valutazioni preliminari, in particolare nell'ambito di studi di rischio d'area in cui siano utilizzate funzioni di probit per la stima del rischio locale e sociale.

8. CONCLUSIONI

Molta strada resta ancora da fare per arrivare a criteri generali per la valutazione quantitativa dell'effetto domino. I principali punti di incertezza rimangono lo sviluppo di metodologie per la stima della probabilità di propagazione degli incidenti e la determinazione di soglie sufficientemente affidabili per la probabilità di propagazione in base all'intensità degli effetti fisici.

L'utilizzo di metodologie quantitative per l'analisi dell'effetto domino nel contesto di studi d'area o comunque che vadano oltre i confini del singolo stabilimento richiede lo sviluppo di tecniche sistematiche e sostenibili dal punto di vista della complessità di applicazione.

La categorizzazione proposta è un contributo per individuare le strategie di sviluppo delle tecniche di analisi dell'effetto domino. In particolare, la collocazione dell'analisi a valle degli studi di sicurezza dei singoli impianti permette di minimizzare il lavoro ulteriore richiesto per l'analisi dell'effetto domino e di evitare l'analisi di numerosi scenari aggiuntivi, utilizzando metodologie basate sulla sovrapposizione degli effetti.

L'analisi dell'effetto domino all'esterno dello stabilimento può ragionevolmente concentrarsi su eventi del secondo tipo (interazione di "top-events" distinti), riducendo significativamente la mole delle informazioni da gestire.

9. RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia il prof. Fausto Gozzi per le utili discussioni e per la collaborazione alla formalizzazione del problema per quanto riguarda gli elementi probabilistici

10. LISTA DEI SIMBOLI

f_{IS}	frequenza degli incidenti secondari dovuti al primo tipo di effetto domino
f_{top}	frequenza complessiva degli eventi secondari causati da EILG
f_p	frequenza attesa dell'evento primario (EILG)
P_d	probabilità di propagazione degli incidenti a causa dell'effetto domino
f_{IP}	frequenza dell'evento in base alle cause primarie.
f_{ED}	frequenza di un evento simultaneo causato dall'effetto domino
Pr	probit
D	dose
t	tempo di esposizione
V	probabilità di danno

11. RIFERIMENTI

- [1] Lees, F.P.: "Loss Prevention in the process industries (II ed.)". Butterworth-Heinemann, Oxford (UK), 1996
- [2] 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
- [3] 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
- [4] D.Egidi, F.P.Foraboschi, G.Spadoni, A.Amendola, *Reliability Eng. System Safety*, **49**,75 (1995)
- [5] P.Latha, G. Gautam, K.V. Raghavan, *J. Loss Prev.Proc.Ind.* **5**,1 (1992)
- [6] J.H. Bowen, *Nuclear Eng.* **19**,149 (1980)
- [7] F.I. Khan, S.A. Abbasi, *Proc. Safety Prog.* 17:107 (1998)
- [8] D.F. Bagster, R.M. Pitblado, *Proc.Safety Environ.* **69**,196 (1991)