

# VALUTAZIONE QUANTITATIVA DELL'EFFETTO DOMINO IN LAY-OUT COMPLESSI MEDIANTE SOFTWARE GEOREFERENZIATI

Giacomo Antonioni<sup>1</sup>, Valerio Cozzani<sup>1</sup>, Gianfilippo Gubinelli<sup>2</sup>,  
Gigliola Spadoni<sup>1</sup>, Severino Zanelli<sup>2</sup>

(1) Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali,  
Università degli Studi di Bologna, viale Risorgimento n.2, 40136 Bologna

(2) Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali,  
Università degli Studi di Pisa, via Diotisalvi n.2, 56126 Pisa  
valerio.cozzani@mail.ing.unibo.it

## SOMMARIO

La valutazione quantitativa del contributo dell'effetto domino al rischio industriale è ancora un problema aperto nell'analisi di sicurezza degli impianti di processo. Studi precedenti hanno portato sia allo sviluppo di una procedura per l'analisi quantitativa dell'effetto domino che all'ottenimento di funzioni per la probabilità di danno o la probabilità di propagazione degli scenari primari. Tuttavia, l'analisi dell'effetto domino in lay-out complessi, in cui si ha la presenza concomitante di più apparecchiature e quindi di un numero elevato di possibili scenari primari e secondari, richiede la disponibilità di un approccio specifico supportato da un adeguato strumento software. Il calcolo di indici di rischio puntuali e integrali è facilitato dalla disponibilità di strumenti georeferenziati.

Il presente contributo è dedicato allo sviluppo di una metodologia semplificata per la valutazione quantitativa del contributo dell'effetto domino al rischio industriale in lay-out complessi e di uno strumento software georeferenziato per effettuare i calcoli necessari. Il software di valutazione è stato realizzato come uno sviluppo della procedura utilizzata dal programma Aripa-GIS. L'uso dello strumento software rende possibile sia l'identificazione che l'analisi dell'elevato numero di scenari dovuti all'effetto domino in un lay-out complesso. La metodologia sviluppata è stata applicata allo studio di alcuni casi derivati da lay-out esistenti, dimostrando che, con un limitato impegno di calcolo e di analisi, è possibile arrivare ad una valutazione quantitativa del contributo dell'effetto domino al rischio industriale.

## 1. INTRODUZIONE

Gli incidenti dovuti ad effetto domino sono tra i più severi che hanno avuto luogo nell'industria di processo, ed hanno ricevuto un'ampia attenzione nella legislazione per la prevenzione ed il controllo degli incidenti rilevanti. In particolare, il D.Lgs. 334/99 richiede la valutazione dei possibili effetti domino non solo all'interno, ma anche all'esterno dello stabilimento. Il D.M. 9/5/2001 richiede inoltre di tener conto dell'effetto domino anche ai fini della pianificazione territoriale.

Tuttavia, la valutazione quantitativa del contributo dell'effetto domino al rischio industriale è ancora un problema aperto nell'analisi di sicurezza degli impianti di processo. Studi precedenti hanno portato sia allo sviluppo di una procedura per l'analisi quantitativa dell'effetto domino che all'ottenimento di funzioni per la probabilità di danno o la probabilità di propagazione degli scenari primari [1-3]. Tuttavia, l'analisi dell'effetto domino in lay-out complessi, in cui si ha la presenza concomitante di più apparecchiature e quindi di un numero elevato di possibili scenari primari e secondari, richiede la disponibilità di un approccio specifico supportato da un adeguato strumento software. Il calcolo di indici di rischio puntuali e integrali è facilitato dalla disponibilità di strumenti georeferenziati, quali il software Aripa-GIS [4].

Nell'ambito di un lavoro di ricerca dedicato all'analisi dell'effetto domino, il presente contributo illustra lo sviluppo di uno strumento software georeferenziato per effettuare i calcoli necessari alla valutazione quantitativa dell'effetto domino e georeferenziare i risultati relativi agli indici di rischio locale e individuale. La metodologia è stata basata sull'estensione di una procedura precedentemente messa a punto per l'analisi quantitativa dell'effetto domino in lay-out semplificati. A partire dalle frequenze degli eventi primari, è stata messa a punto una procedura articolata per l'identificazione dei possibili eventi domino. Il metodo sviluppato parte dalla definizione di uno o più scenari secondari possibili sulle apparecchiature colpite dagli effetti dello scenario primario. Le frequenze degli scenari dovuti ad effetto domino sono state valutate mediante modelli per la stima della probabilità di propagazione.

Il software di valutazione è stato realizzato come uno sviluppo della procedura utilizzata dal programma Aripa-GIS. L'utilizzo dello strumento software rende possibile in maniera automatizzata sia l'identificazione che l'analisi dell'elevato numero di scenari dovuti all'effetto domino in un lay-out

complesso. La georeferenziazione delle sorgenti permette infatti di valutare in modo diretto la probabilità di propagazione dello scenario primario e di confrontarne il valore con due soglie di cut-off, basate sia sul valore della probabilità di propagazione che sulla frequenza complessiva dello scenario domino. Le frequenze attese delle diverse combinazioni di scenari possibili sono quindi valutate direttamente dal software, sulla base di modelli di propagazione specifici per i bersagli individuati. Questo permette di tener conto in modo semplice delle effettive caratteristiche delle apparecchiature secondarie che possono essere bersaglio di effetto domino. Il software genera inoltre in modo diretto le mappe di vulnerabilità di tutti gli scenari domino individuati, a partire dalle mappe "primarie" definite dall'utente per lo scenario primario e tutti gli scenari secondari che interagiscono durante l'effetto domino.

La metodologia sviluppata è stata applicata allo studio di vari "case-studies" derivati da lay-out di impianti esistenti. L'analisi dei "case-studies" ha mostrato che, con un limitato impegno di calcolo e di analisi, è possibile arrivare ad una valutazione quantitativa del contributo dell'effetto domino al rischio industriale.

## 2. LA METODOLOGIA

### 2.1 Identificazione degli scenari

Le modalità di propagazione di un evento incidentale primario e le strategie di identificazione dei possibili scenari secondari dovuti ad effetto domino in base alle due possibili tipologie di effetto domino (propagazione di eventi iniziatori di limitata severità e interazione di top-events distinti) è stata ampiamente discussa in precedenti pubblicazioni, a cui si rimanda [1]. Sulla base di queste procedure, è evidente che l'identificazione degli scenari dovuti ad effetto domino del primo tipo (propagazione di eventi iniziatori di limitata severità) è una procedura necessariamente manuale, ma che porta alla generazione di un numero limitato di scenari aggiuntivi (a causa della limitata severità dell'evento primario, i possibili bersagli di effetto domino sono in generale limitati ad una singola apparecchiatura). E' invece estremamente più impegnativa la valutazione dei possibili scenari aggiuntivi derivanti da un effetto domino del secondo tipo. Infatti è lecito attendersi che un top-event primario possa danneggiare un numero  $n$  significativo di apparecchiature, compreso tra 1 e 10 nei normali lay-out di un impianto di processo. A seguito dell'evento primario, quindi, potranno avvenire  $n_{ED}$  scenari distinti dovuti ad effetto domino:

$$n_{ED} = 2^n - 1 \quad (1)$$

di cui gli eventi di ordine  $k$  (con  $k < n$ ), cioè che coinvolgono contemporaneamente  $k$  apparecchiature secondarie, sono:

$$\alpha_k = \frac{n!}{(n-k)! \cdot k!} \quad (2)$$

Si vede quindi che il numero complessivo di scenari aggiuntivi dovuti ad effetto domino su un impianto di processo,  $n_{T,ED}$ , è dato da:

$$n_{T,ED} = \sum_{i=1}^d (2^{n_i} - 1) \quad (3)$$

dove  $d$  sono il numero complessivo di eventi primari che possono generare effetto domino e  $n_i$  sono gli scenari secondari generati da ciascun evento primario considerato.

Si vede quindi che il numero complessivo di scenari secondari da considerare è elevato e, in assenza di criteri di "cut-off", può facilmente diventare enorme, tale da rendere non fattibile la valutazione.

### 2.2 Criteri di "cut-off"

Si possono individuare tre distinti criteri di "cut-off" per gli scenari dovuti ad effetto domino:

- soglie basate su valori degli effetti fisici o su distanze di sicurezza
- cut-off basati sulla probabilità di propagazione
- cut-off basati sulla frequenza di accadimento

E' evidente che gli ultimi due criteri sono di interesse specifico in un'analisi quantitativa del rischio, mentre la prima tipologia di criteri può avere svariate applicazioni (determinazione delle distanze di danno per le apparecchiature, individuazione dei potenziali bersagli di effetto domino, etc. Nell'ambito di una metodologia di analisi probabilistica, quale la presente, è conveniente applicare i tre criteri in sequenza.

Per quanto riguarda i criteri di cut-off basati su soglie di danno o su distanze di sicurezza, sono stati proposti svariati valori, discordanti tra loro. L'ambiguità tra la definizione di soglie di danno e soglie per l'effetto domino, le diverse tipologie di apparecchiature e di scenari incidentali possibili hanno portato alle

contraddizioni riscontrabili in letteratura ed in alcune normative tecniche. Nell'ambito del presente studio, i criteri per la propagazione delle diverse tipologie di eventi primari sono stati riesaminati, sia sulla base di dati relativi al danneggiamento delle apparecchiature che dei modelli di propagazione sviluppati. Il lavoro condotto per la revisione delle soglie di propagazione per effetto domino è discusso estesamente altrove [5]. La tabella 1 riassume i valori di soglia proposti per la propagazione dei diversi possibili scenari incidentali primari. Come si vede, i criteri di propagazione dipendono non solo dai valori degli effetti fisici che portano alla propagazione, ma dallo specifico scenario incidentale e dalla tipologia di apparecchiatura coinvolta.

Vettore di propagazione e scenario	Tipo di apparecchiatura bersaglio	Soglia di propagazione
<b>Irraggiamento</b>		
flash-fire	tutti	non credibile
fireball	atmosferica in pressione	possibile solo per avvolgimento completo non credibile
pool fire e jet-fire	atmosferica in pressione	10 kW/m <sup>2</sup> per più di 15 minuti 30 kW/m <sup>2</sup> per più di 15 minuti
<b>Sovrappressione</b>		
tutti	atmosferica in pressione colonna (tossici) colonna (infiammabili) ausiliaria (tossici)	16 kPa 17 kPa 14 kPa 31 kPa 37 kPa
<b>Frammenti</b>		
tutti	tutti	250m

**Tabella 1:** soglie di propagazione per l'effetto domino

I criteri in tabella 1 permettono di ridurre sensibilmente il numero di scenari aggiuntivi credibili la cui valutazione è effettivamente necessaria al fine di stimare il rischio aggiuntivo dovuto ad effetto domino.

Per quanto riguarda i criteri di cut-off di tipo probabilistico, sono stati utilizzati i seguenti valori:

- $10^{-6}$  per la probabilità di propagazione, al di sotto della quale si ritiene non credibile lo scenario
- $10^{-12}$  eventi/anno per la frequenza attesa dello scenario, al di sotto della quale si ritiene non credibile lo scenario

L'applicazione di questi criteri è fondamentale per ridurre il numero degli scenari la cui valutazione è necessaria al fine della stima degli indici di rischio.

### 2.3 Modelli di propagazione e valutazione delle frequenze

Nel caso in cui un evento primario possa causare un solo evento secondario, la frequenza di effetto domino si può ricavare con la seguente ben nota formula:

$$f_{ed} = f_{p1} \cdot P_{d,1 \rightarrow 2} \quad (4)$$

dove  $f_{p1}$  è la frequenza dell'evento primario e  $P_{d,1 \rightarrow 2}$  è la probabilità di propagazione dell'evento, che deve essere calcolata utilizzando un opportuno modello di propagazione. La (4) deve però essere modificata se si considera la possibilità che avvengano contestualmente  $k$  eventi secondari su  $n$  possibili (dovuti al danneggiamento potenziale, stimato sulla base dei valori di soglia, di  $n$  bersagli secondari). La probabilità di una generica combinazione  $m$  di  $k$  eventi secondari generati dall'evento primario considerato si può esprimere come:

$$P_{ed}^{(k,m)} = \prod_{i=1}^n [1 - P_{d \rightarrow i} + \delta(i, J^k_m)(2P_{d \rightarrow i} - 1)] \quad (5)$$

dove  $J^k_m = [\gamma_1, \dots, \gamma_k]$  è un vettore i cui elementi sono gli indici della  $m$ -esima combinazione di  $k$  eventi secondari considerata e:

$$\delta(i, J^k_m) = \begin{cases} 1 & i \in J^k_m \\ 0 & i \notin J^k_m \end{cases}$$

La probabilità complessiva di avere un effetto domino che coinvolga almeno una delle  $n$  unità considerate è data da:

$$P_{ed} = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^{\alpha_k} P_{ed}^{(k,m)} \quad (6)$$

dove  $\alpha_k$  è dato dalla (2). La frequenza dell'evento primario in assenza di effetto domino è data allora da:

$$f_{E1} = f_{p1} (1 - P_{ed}) \quad (7)$$

Come si vede, quindi, per l'applicazione delle formule sopra riportate è necessario stimare:

- la frequenza dell'evento primario (attraverso normali tecniche basate su alberi di guasto quantitativi)
- la probabilità di propagazione dei diversi eventi primari sulle apparecchiature bersaglio individuate con i criteri di soglia definiti in tabella 1

La probabilità di propagazione deve essere stimata con modelli specifici. Nell'ambito di studi precedenti, a cui si rimanda per maggiori dettagli, sono stati sviluppati modelli per la probabilità di propagazione dovuta a sovrappressione [2,6,7], ad irraggiamento [3] e alla proiezione di frammenti [8,9]. Per la probabilità di propagazione dovuta a sovrappressione sono stati sviluppati modelli di propagazione basati su funzioni di probit per tipologie specifiche di apparecchiature, che tengono effettivamente conto delle diverse tipologie di bersagli secondari. La tabella 2 riassume i coefficienti di probit da utilizzare nella (8) per il calcolo del probit corrispondente alla probabilità di danneggiamento:

$$Pr_{blast} = a + b \cdot \ln(\Delta P^{\circ}) \quad (8)$$

Per il danno da irraggiamento è stato sviluppato invece un modello probabilistico per il danno da irraggiamento basato sul confronto tra il tempo di cedimento dell'apparecchiatura soggetta ad irraggiamento e quello di intervento caratteristico dell'impianto. La valutazione dei tempi di cedimento è stata effettuata sviluppando un modello per la temperatura di parete ed individuando criteri di cedimento per le categorie di bersagli individuate.

Tipologia di apparecchiatura	a	b
atmosferica	2.44	-18.96
in pressione	4.33	-42.44
colonna	3.16	-28.07
ausiliaria	2.18	-17.79

**Tabella 2:** Coefficienti di probit per diverse categorie di apparecchiature (dose: massima pressione statica in Pa) [2]

Da un modello termico a nodi sono state ottenute curve temperatura-tempo, che hanno permesso il calcolo del "time to failure" in funzione dell'intensità di irraggiamento. Per varie tipologie di serbatoi atmosferici è stato possibile ottenere correlazioni semplificate per il tempo di cedimento in funzione del flusso termico radiante e del volume:

$$\ln(t) = m \cdot \ln(I) + n \quad (9)$$

Dove **m** ed **n** sono parametri empirici della correlazione, che devono essere ricavati sulla base dei risultati del modello. Per serbatoi atmosferici è stato possibile individuare un unico valore del coefficiente angolare della retta, **m**. Il parametro **n** è invece risultato dipendente dal volume del serbatoio secondo la relazione:

$$n = M \cdot V + N \quad (10)$$

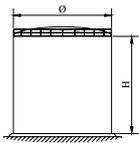
Sono state ottenute correlazioni per:

- serbatoi atmosferici provvisti o meno di isolante
- serbatoi in pressione non coibentati

Le correlazioni ottenute sono tutte conservative ed in particolare l'errore commesso non è mai superiore al 15% per valori dell'irraggiamento  $\geq 20 \text{ kW/m}^2$  per serbatoi non coibentati. Alcune correlazioni ottenute nel caso di irraggiamento da sorgente distante sono riportate a titolo d'esempio in tabella 3. Sulla base dell'approccio sviluppato, una volta noti i tempi di cedimento per un serbatoio irraggiato, è possibile stimare la probabilità di danno mediante una funzione di probit:

$$Pr = 9.252 - 1.847 \cdot \ln(ttf) \quad (11)$$

dove **ttf** è il tempo di cedimento in minuti. La funzione è stata ottenuta correlando la probabilità di effetto domino da irraggiamento alla probabilità di un intervento di soccorso efficace che eviti il cedimento dell'unità secondaria. La (11) è stata ottenuta sulla base di dati generici per i tempi di intervento, ma può essere facilmente modificata utilizzando dati specifici del sito.

	$V = 5200 \text{ m}^3 \div 500 \text{ m}^3$	$V = 250 \text{ m}^3 \div 25 \text{ m}^3$
	<b>non coibentato (SA-299)</b> $\ln(t) = - 1.128 \cdot \ln(I) + n$ $n = - 2.667 \cdot 10^{-5} \cdot V + 9.877$	$\ln(t) = - 1.198 \cdot \ln(I) + n$ $n = - 6 \cdot 10^{-4} \cdot V + 10.11$
<b>20 mm di isolante (SA-299)</b> $\ln(t) = - 2.802 \cdot \ln(I) + n$ $n = 7.5 \cdot 10^{-5} \cdot V + 20.092$	$\ln(t) = - 2.666 \cdot \ln(I) + 19.342$	

**Tabella 3:** Correlazioni tempo di cedimento - irraggiamento per serbatoi atmosferici cilindrici verticali

Per quanto riguarda la propagazione dovuta alla proiezione di frammenti, in letteratura è disponibile un approccio specifico per la determinazione del numero di frammenti generati nell'esplosione e per la stima della velocità iniziale di proiezione [10]. E' stato inoltre sviluppato un modello per determinare la probabilità di impatto di un frammento su un bersaglio di cui siano note la geometria e la distanza dal punto di origine dei frammenti [8,9]. L'utilizzo in sequenza dei due modelli permette di valutare la probabilità cumulativa di impatto dei frammenti sul bersaglio in esame.

L'approccio sviluppato per i diversi modelli di propagazione è stato utilizzato per lo sviluppo di funzioni di vulnerabilità delle apparecchiature utilizzate nel software sviluppato.

#### 2.4 Analisi delle conseguenze degli scenari aggiuntivi e valutazione della vulnerabilità

Lo sviluppo attuale della modellistica incidentale non permette di valutare in modo dettagliato le conseguenze di scenari dovuti ad effetto domino. L'applicazione di modelli complessi, basati su codici CFD o su modelli tridimensionali per l'irraggiamento richiede un dispendio di risorse computazionali e un grado di dettaglio attualmente non praticabili. L'unica via attualmente percorribile per l'analisi delle conseguenze di effetti domino è attraverso la combinazione lineare degli effetti fisici o la "somma" delle conseguenze in termini di probabilità di morte. Questo equivale a trascurare i possibili effetti sinergici causati dalla contemporaneità degli eventi. Le conseguenze di un incidente dovuto ad effetto domino risultano quindi dalla somma delle mappe degli effetti fisici (irraggiamento, sovrappressioni, concentrazioni di sostanze tossiche) relative agli eventi primario e secondario considerati separatamente. 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 in un punto della mappa conseguente ad un effetto domino è data, in generale, dalla seguente espressione:

$$V_t = F(V_1, V_2, \dots, V_k) \quad (12)$$

dove le  $V_i$  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 varie forme. Gli errori introdotti nel calcolo della vulnerabilità dall'utilizzo dei diversi approcci semplificati praticabili sono stati estesamente valutati altrove e sono risultati estremamente limitati [11]. Nel presente approccio si è quindi deciso di valutare la vulnerabilità di un effetto domino dato dalla generica combinazione  $m$  di  $k$  eventi come:

$$V_{ed}^{(k,m)} = \min \left[ \left( \sum_{i=1}^n V_i \cdot \delta(i, J^k_m) \right), 1 \right] \quad (13)$$

### 3. LA VERSIONE "DOMINO" DEL SOFTWARE ARIPAR-GIS

Il software Aripa-GIS [4] è stato esteso a comprendere la valutazione dell'effetto domino. La procedura di valutazione utilizzata è basata su quanto riportato nella sezione 2. In particolare, il software gestisce automaticamente le fasi di identificazione, valutazione delle frequenze e delle conseguenze degli scenari aggiuntivi dovuti ad effetto domino sulla base di un numero limitato di informazioni fornite dall'utente.

Alla normale procedura di definizione e georeferenziazione delle sorgenti di rischio presente nel software Aripa-GIS, nella versione "domino" è stata affiancata una procedura che permette di associare a ciascuna sorgente le informazioni necessarie per valutare gli eventuali scenari secondari conseguenti al danneggiamento dell'apparecchiatura. La figura 1 mostra le informazioni richieste dal software. Queste consistono nella definizione dello scenario secondario da considerare in caso di danneggiamento e da tre modelli di vulnerabilità dell'apparecchiatura rispetto ai tre possibili vettori di propagazione (irraggiamento,

sovrappressione e impatto dovuto a frammenti). I modelli di vulnerabilità sono modificabili da utente e sono specifici dell'apparecchiatura associata alla sorgente di rischio. In questo modo è possibile tener conto delle caratteristiche dell'apparecchiatura dal punto di vista di bersaglio secondario. Ovviamente è anche possibile georeferenziare una sorgente solo "passiva", ossia solo come possibile bersaglio di effetto domino e punto di origine di scenari secondari.

Il software quindi considera, per ciascun scenario primario di cui è richiesta la valutazione, il valore degli effetti fisici su ciascuna sorgente apparecchiatura o sorgente "domino" passiva. Se i valori sono inferiori alle soglie di tabella 1, scarta automaticamente la sorgente. In alternativa, valuta la probabilità di effetto domino tramite lo specifico modello di vulnerabilità. Attraverso le formule mostrate nella sezione 2, il software procede quindi al calcolo della frequenza attesa di ciascuno scenario e al calcolo della relativa mappa di vulnerabilità. Il calcolo prosegue quindi come nella versione normale del software con la procedura convenzionale di ricomposizione per il calcolo degli indici di rischio.

**Inserimento dati Componenti per Effetto Domino e Rischio Sismico**

**Componente** 1 Serbatoio Atmosferico

Tipo Probit	Coeff 1	Coeff 2	Coeff 3	Conv *
Sovrapressione	2.44	-18.96		100000
Energia Frammenti				
Energia				
Irraggiamento	-1.163	10	1	1
Evento sismico				

**Conv \*** Coefficiente di conversione dall'unità di misura dell'Effetto all'unità di misura della Probit

Record: 1 di 5

**Coefficiente 1 Probit tempo di cedimento** 16.814

**Coefficiente 2 Probit tempo di cedimento** -1.847

Esci

**Figura 1:** Scheda dei dati richiesti dal software Aripar-GIS per il calcolo della probabilità di effetto domino e delle conseguenze dello scenario secondario

#### 4. VALUTAZIONE QUANTITATIVA DELL'EFFETTO DOMINO

##### 4.1 Casi di studio

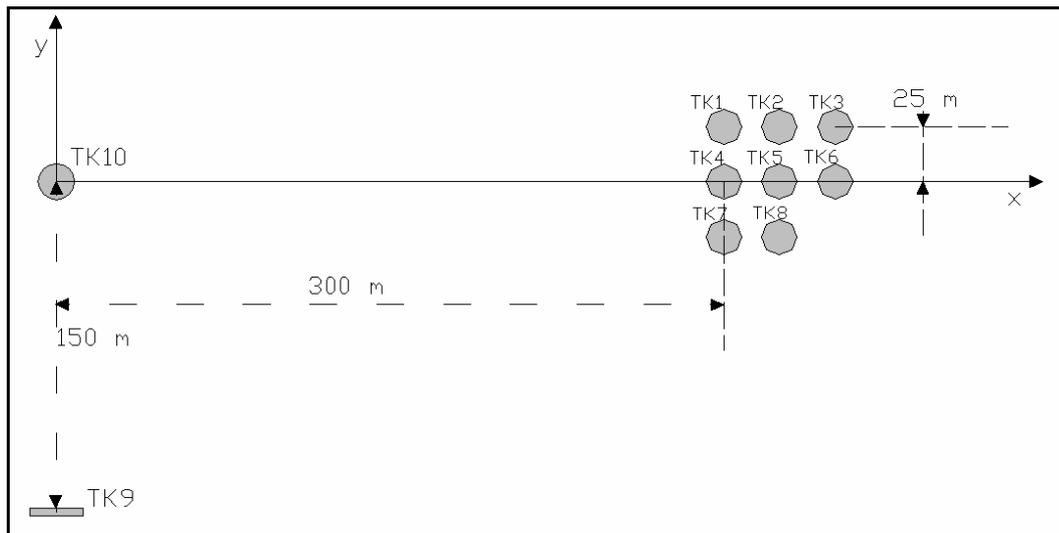
Al fine di verificare la validità dell'approccio proposto e del software sviluppato, sono stati definiti alcuni casi di studio. Le figure 2, 3 e 4 mostrano i lay-out definiti per i casi di studio preliminari, utilizzati per analizzare il peso dei singoli scenari dovuti ad effetto domino. Per effettuare valutazioni di rischio sociale e per valutare un indice PLL convenzionale, è stata assunta una densità di popolazione fittizia ed uniforme pari a 0.04 abitanti/m<sup>2</sup>.

La figura 5 riporta invece i lay-out che sono stati utilizzati per analizzare in modo completo il contributo quantitativo dell'effetto domino al rischio industriale. La tabella 4 riporta le caratteristiche e l'inventario delle apparecchiature presenti nei diversi lay-outs. I diversi casi di studio sono stati definiti selezionando su un lay-out un'apparecchiatura in cui avviene l'evento primario e una o più apparecchiature come bersagli secondari. Per semplicità, in ogni caso di studio definito, a ciascuna apparecchiatura secondaria è stato associato un solo scenario incidentale, che è stato considerato l'unico scenario secondario dovuto ad effetto domino. La tabella 5 riporta i casi di studio considerati in cui si è assunto il danneggiamento di una sola apparecchiatura secondaria (un solo scenario primario ed un solo scenario secondario). La tabella 6 riporta invece i casi di studio in cui si sono considerati più scenari secondari.

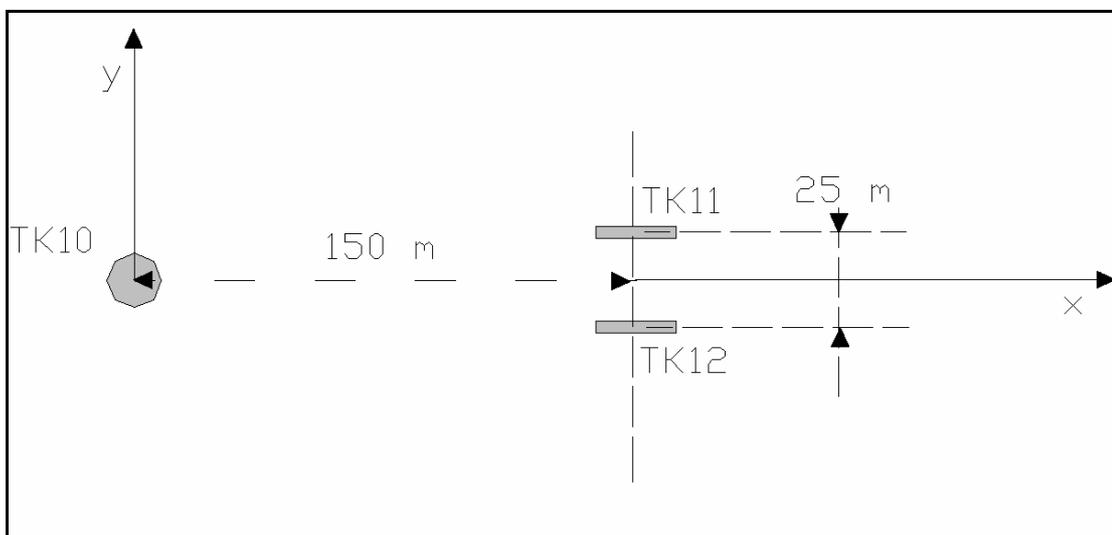
LO	Sigla	Tipo	Sostanza	Contenuto (t)
----	-------	------	----------	---------------

1	TK1-8	Serb. Atm.	Etanolo	2000
1	TK9	Serb. In Press.	GPL	150
1	TK10	Serb. In Press.	GPL	1400
2	TK10	Serb. In Press.	GPL	1400
2	TK11	Serb. In Press.	Cloro	390
2	TK12	Serb. In Press.	Cloro	390
3	TK1-8	Serb. Atm.	Etanolo	2000
3	TK13	Serb. In Press.	Ammoniaca	100
3	TK14	Serb. In Press.	Ammoniaca	100
5c	P1-3	Serb. In Press.	GPL	1400
5c	P4	Serb. In Press.	Ammoniaca	100

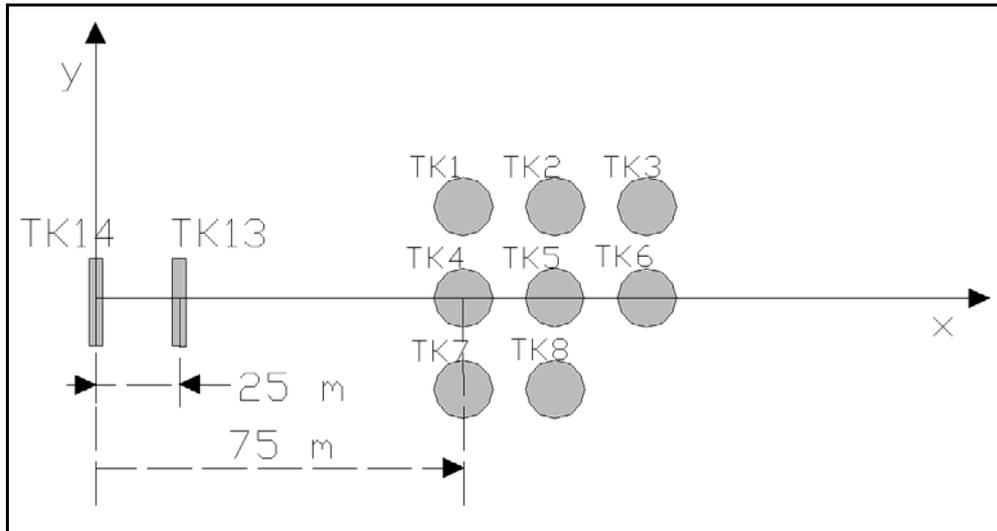
**Tabella 4:** Caratteristiche delle apparecchiature considerate nei diversi lay-out (LO).



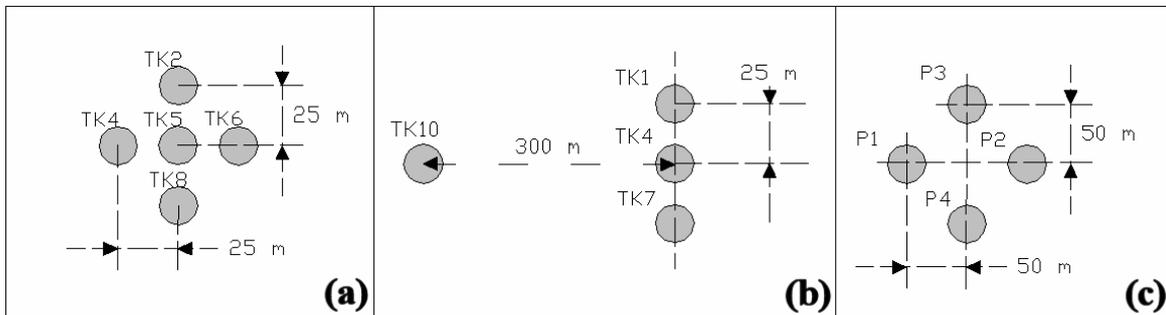
**Figura 2:** Lay-out n.1 utilizzato per definire i diversi casi di studio



**Figura 3:** Lay-out n.2 utilizzato per definire i diversi casi di studio



**Figura 4:** Lay-out n.3 utilizzato per definire i diversi casi di studio



**Figura 5:** Lay-out utilizzati per l'analisi completa dell'effetto domino.

ID	LO	Unità Primaria	Rilascio	Scenario	Vettore di propagazione	Unità Secondari	Evento secondario
1	1	TK10	Istant.	VCE	Sovrapressione	TK04	PF
4	1	TK10	Istant.	VCE	Sovrapressione	TK09	FB
5	1	TK10	Tot. 10 min.	VCE	Sovrapressione	TK09	FB
6	1	TK10	Istant.	BLEVE	Missili	TK04	PF
7	1	TK10	Istant.	BLEVE	Missili	TK09	FB
8	1	TK05	Istant.	PF	Irraggiamento	TK04	PF
12	2	TK10	Istant.	VCE	Sovrapressione	TK11	TX
14	3	TK10	Istant.	BLEVE	Missili	TK11	TX
15	3	TK13	Istant.	TX	Missili	TK04	PF
16	3	TK13	Istant.	TX	Missili	TK14	TX

**Tabella 5:** Casi di studio con singolo scenario secondario (VCE: esplosione di nube di vapore; PF: pool fire; TX: rilascio tossico; FB: fireball).

ID	LO	Unità Primaria	Rilascio	Scen.	Vettore di propagazione	n° unità secondarie coinvolte	Unità Secondarie	Evento secondario
2	1	TK10	Istant.	VCE	Sovrapressione	2	TK01,TK04	PF,PF
3	1	TK10	Istant.	VCE	Sovrapressione	3	TK01,TK04,TK07	PF,PF,PF
9	1	TK05	Istant.	PF	Irraggiamento	2	TK02,TK04	PF,PF
10	1	TK05	Istant.	PF	Irraggiamento	3	TK02,TK04,TK06	PF,PF,PF
11	1	TK05	Istant.	PF	Irraggiamento	4	TK02,TK04,TK06 TK08	PF,PF,PF, PF
13	2	TK10	Istant.	VCE	Sovrapressione	2	TK11,TK12	TX,TX

**Tabella 6:** Casi di studio con più scenari secondari.

Per quanto riguarda i casi di studio più complessi, nei lay-out riportati in figura 5-(a) ed in figura 5-(b), si è considerato un solo evento primario (pool fire da cedimento catastrofico di TK5 nel caso di figura 5-(a) e VCE da cedimento catastrofico di TK10 nel caso di figura 5-(b)) e tutti gli scenari secondari dovuti al

possibile danneggiamento delle altre apparecchiature presenti sul lay-out, ancora associando a ciascuna apparecchiatura un solo possibile scenario secondario (in tutti i casi di entrambi i lay-out, pool-fires). Nell'analisi completa effettuata per il lay-out 5-(c), si sono considerati tutti i possibili scenari ottenuti associando a ciascuna apparecchiatura un solo possibile scenario primario e un solo possibile scenario secondario. La tabella 7 riporta un riepilogo degli scenari considerati in quest'ultimo caso e delle relative frequenze attese se considerati come eventi primari.

Unità Primaria	Rilascio	Scenario	Frequenza (ev/anno)	Probabilità Scenario
P1	Istantaneo	VCE	$5 \cdot 10^{-7}$	0.2
P2	Istantaneo	VCE	$5 \cdot 10^{-7}$	0.2
P3	Istantaneo	VCE	$5 \cdot 10^{-7}$	0.2
P4	Istantaneo	Rilascio Tossico	$1 \cdot 10^{-7}$	1

**Tabella 7:** Scenari e frequenze attese per l'analisi completaeffettuata per il lay-out in figura 5-(c)

#### 4.2 Casi di studio semplificati

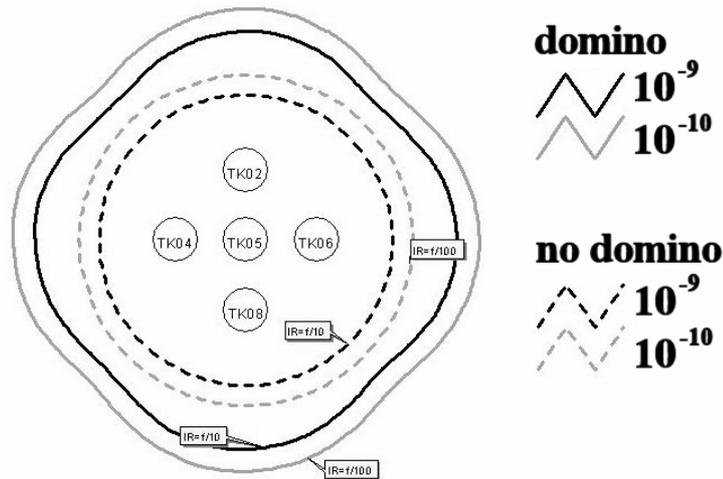
La tabella 8 riporta i risultati delle valutazioni effettuate per i casi di studio definiti nelle tabelle 5 e 6. I PLL mostrati in tabella 8 sono stati calcolati con il software Aripa-GIS e sono stati validati attraverso una procedura di calcolo manuale, che ha verificato l'attendibilità dei risultati ottenuti. Come si può vedere, l'effetto domino porta in generale ad un rilevante aumento del numero di decessi attesi. L'aumento è ovviamente più marcato per i casi in cui l'evento primario danneggia più apparecchiature, generando quindi più scenari secondari. D'altronde, deve essere sottolineato che nella presente valutazione sono stati considerati solo eventi domino del secondo tipo, cioè interazione di top-events con conseguenze rilevanti: l'aumento della severità dell'incidente è quindi il principale risultato della propagazione.

La valutazione delle frequenze attese degli scenari dovuti ad effetto domino mostra però che in generale le frequenze sono piuttosto basse. In particolare, le frequenze degli eventi in cui avviene il danneggiamento contemporaneo di più apparecchiature sono limitate. Questo si riflette in una variazione del PLL che non sempre è in accordo con la variazione del numero di decessi attesi. In particolare, gli scenari domino con frequenze attese molto basse portano ad un aumento trascurabile del PLL sull'area. I risultati quindi confermano la validità della metodologia sviluppata e mostrano che può essere facilmente applicata alla stima quantitativa del rischio dovuto ad effetto domino.

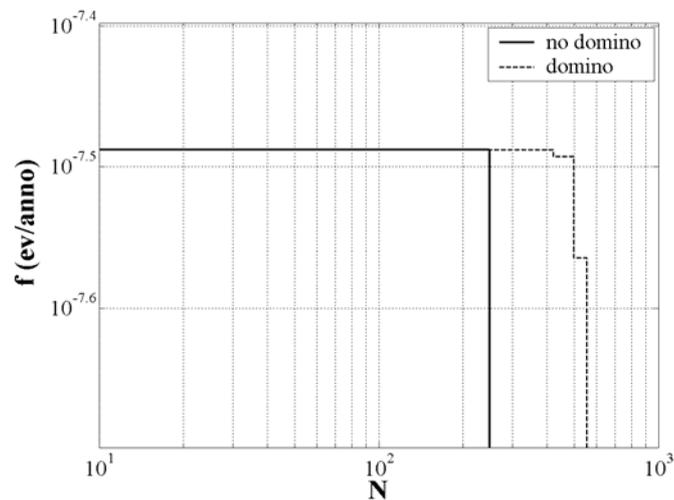
ID	n° unità second.	N prim.	N domino	$\Delta\%$ N	Freq. primario (ev/anno)	Probab. domino	Freq. domino (ev/anno)	PLL prim.	PLL domin o	$\Delta\%$ PLL
1	1	467	716	53	$5.4 \cdot 10^{-8}$	$1.01 \cdot 10^{-1}$	$5.43 \cdot 10^{-9}$	25	27	8
2	2	<b>467</b>	<b>812</b>	74	<b><math>5.4 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b><math>1.01 \cdot 10^{-2}</math></b>	<b><math>5.47 \cdot 10^{-11}</math></b>	<b>25</b>	<b>25</b>	0
3	3	<b>467</b>	<b>905</b>	94	<b><math>5.4 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b><math>1.02 \cdot 10^{-3}</math></b>	<b><math>5.50 \cdot 10^{-12}</math></b>	<b>25</b>	<b>25</b>	0
4	1	467	4650	896	$5.4 \cdot 10^{-8}$	$1.41 \cdot 10^{-5}$	$7.61 \cdot 10^{-13}$	25	25	0
5	1	43	4290	9877	$5.4 \cdot 10^{-8}$	$2.40 \cdot 10^{-6}$	$1.30 \cdot 10^{-13}$	2	2	0
6	1	27369	27372	0	$3.5 \cdot 10^{-8}$	$3.14 \cdot 10^{-3}$	$1.10 \cdot 10^{-10}$	958	958	0
7	1	27369	27498	0	$3.5 \cdot 10^{-8}$	$1.03 \cdot 10^{-2}$	$3.61 \cdot 10^{-10}$	958	958	0
8	1	250	345	38	$3.25 \cdot 10^{-8}$	$9.57 \cdot 10^{-1}$	$3.11 \cdot 10^{-8}$	8	11	38
9	2	<b>250</b>	<b>421</b>	68	<b><math>3.25 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b><math>9.16 \cdot 10^{-1}</math></b>	<b><math>2.98 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b>8</b>	<b>13</b>	63
10	3	<b>250</b>	<b>496</b>	98	<b><math>3.25 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b><math>8.76 \cdot 10^{-1}</math></b>	<b><math>2.85 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b>8</b>	<b>15</b>	88
11	4	<b>250</b>	<b>555</b>	122	<b><math>3.25 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b><math>8.39 \cdot 10^{-1}</math></b>	<b><math>2.73 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b>8</b>	<b>16</b>	100
12	1	480	111200	23067	$5.4 \cdot 10^{-8}$	$1.41 \cdot 10^{-5}$	$7.61 \cdot 10^{-13}$	26	26	0
13	2	<b>480</b>	<b>152400</b>	31650	<b><math>5.4 \cdot 10^{-8}</math></b>	<b><math>1.99 \cdot 10^{-10}</math></b>	<b><math>1.07 \cdot 10^{-17}</math></b>	<b>26</b>	<b>26</b>	0
14	1	57000	145400	155	$3.5 \cdot 10^{-8}$	$1.01 \cdot 10^{-2}$	$3.54 \cdot 10^{-10}$	1993	2025	2
15	1	1270	1300	2	$5.0 \cdot 10^{-7}$	$5.65 \cdot 10^{-2}$	$2.83 \cdot 10^{-8}$	635	636	0
16	1	1270	1630	28	$5.0 \cdot 10^{-7}$	$1.09 \cdot 10^{-1}$	$5.43 \cdot 10^{-8}$	635	655	3

#### 4.3 Casi di studio completi

La figura 6 mostra le curve di rischio individuale ottenute per il caso di studio associato al lay-out in figura 5-(a). La figura 7 mostra le corrispondenti curve F-N di rischio sociale in presenza ed in assenza di effetto domino. Come si vede dalle figure, il rischio locale e sociale aumentano. Nel caso del rischio sociale, la curva in presenza di effetto domino presenta un certo numero di "gradini" con N più elevata rispetto al caso in cui l'effetto domino non è considerato. Questi corrispondono agli scenari dovuti ad effetto domino, che presentano frequenze inferiori ma più elevata severità rispetto agli scenari convenzionali.

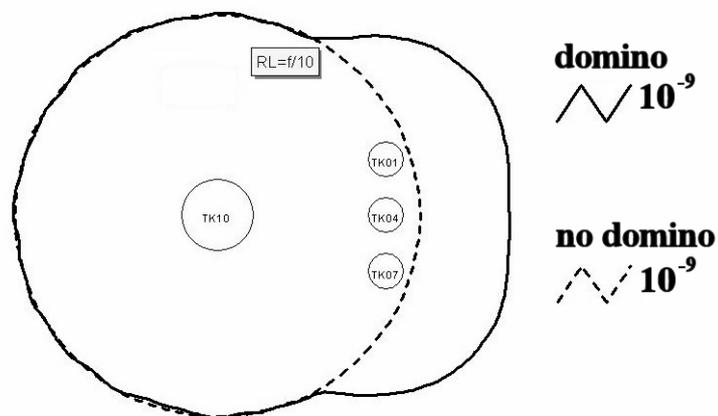


**Figura 6:** Rischio individuale in presenza ed in assenza di effetto domino per il lay-out di figura 5-(a).

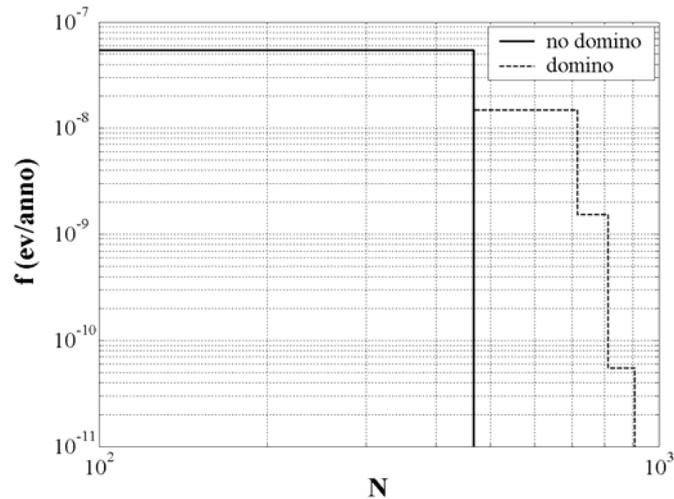


**Figura 7:** Rischio sociale in presenza ed in assenza di effetto domino per il lay-out di figura 5-(a)

La figura 8 mostra le curve di rischio individuale ottenute per il caso di studio associato al lay-out in figura 5-(b). La figura 9 mostra le corrispondenti curve F-N di rischio sociale in presenza ed in assenza di effetto domino. In questo caso è ancora più evidente l'incremento del rischio locale e sociale dovuto agli scenari "domino".

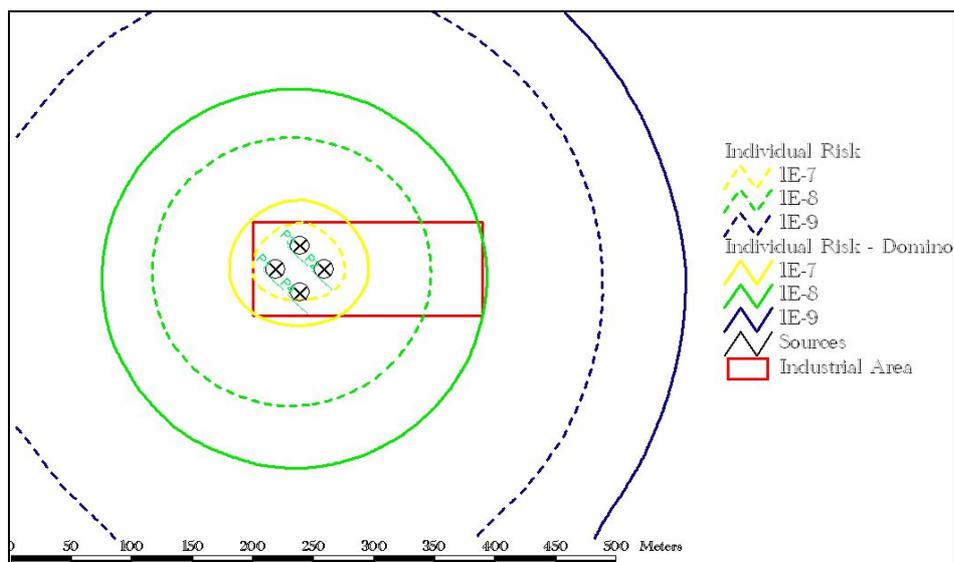


**Figura 8:** Rischio individuale in presenza ed in assenza di effetto domino per il lay-out di figura 5-(b).



**Figura 9:** Rischio sociale in presenza ed in assenza di effetto domino per il lay-out di figura 5-(b)

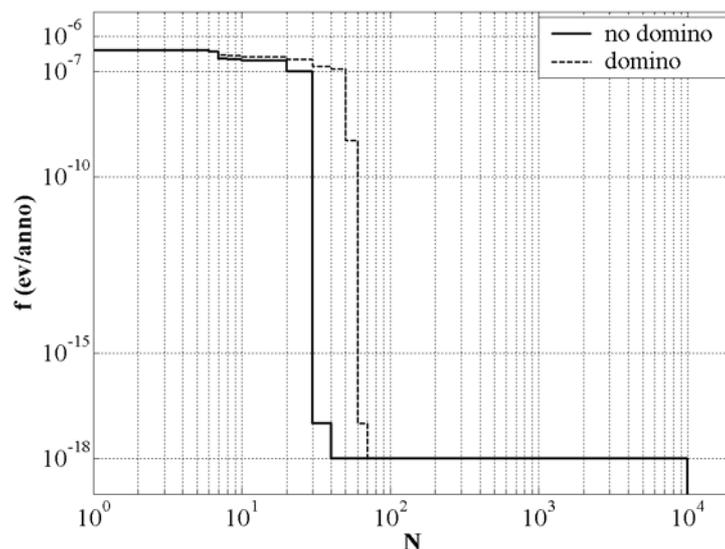
La figura 10 mostra le curve di rischio individuale ottenute per il caso di studio associato alla valutazione completa del lay-out in fig.5-(c) (vedi tabella 7). La figura 11 mostra le corrispondenti curve F-N di rischio sociale in presenza ed in assenza di effetto domino. Questo caso, più articolato, evidenzia l'importante effetto degli scenari dovuti a propagazione nel caso in cui i bersagli secondari siano costituiti da serbatoi di sostanze tossiche, come nel caso del serbatoio P4. Le curve F-N mostrano che l'effetto domino causa un aumento non trascurabile del rischio su un esteso intervallo di valori di severità, N.



**Figura 10:** Rischio individuale in presenza ed in assenza di effetto domino per il lay-out 5-(c).

## 5. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti mostrano che la procedura sviluppata per la valutazione quantitativa dell'effetto domino permette di valutare in modo efficace il rischio aggiuntivo dovuto a questi scenari. La disponibilità di adeguati modelli di propagazione, su cui deve essere basata la valutazione, è un punto chiave della procedura. La versione sviluppata per il software Aripa-GIS, basata su questa metodologia e sui modelli di propagazione resi disponibili, validata nell'ambito del presente studio, permette in modo rapido e con un limitato impegno aggiuntivo, la valutazione quantitativa dell'effetto domino.



**Figura 11:** Rischio sociale in presenza ed in assenza di effetto domino per il lay-out in fig. 5-(c).

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] V. Cozzani, S. Zanelli: "An Approach to the Assessment of Domino Accidents Hazard in Quantitative Area Risk Analysis". Proc. 10<sup>th</sup> Int. Symp. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, Elsevier: Amsterdam 2001; p.1263-74
- [2] V. Cozzani, E. Salzano: "The quantitative assessment of domino effect caused by overpressure. Part I: probit models". Journal of Hazardous Materials 107:67-80 (2004)
- [3] V. Cozzani, F. Gozzi, A. Mazzoni, S. Zanelli: "Assessment of probabilistic models for the estimation of accident propagation hazards". Proc. Eur.Conf. Safety and Reliability, MG: Torino 2001; p.807-814
- [4] 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)
- [5] V. Cozzani, G. Gubinelli, G. Russo, E. Salzano, S. Zanelli: "An assessment of the escalation potential in domino scenarios". Proc. 11<sup>th</sup> Int. Symp. on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries, PCHE: Prague 2004; p.1153-1162
- [6] E. Salzano, V. Cozzani: "Estimation of damage to equipment caused by blast wave by means of fuzzy sets". Proc. Eur.Conf. Safety and Reliability, Springer: London 2004; p.3653-3658
- [7] V. Cozzani, E. Salzano: "Blast wave damage to process equipment as a trigger of domino effect". Proc. 19<sup>th</sup> Annual CCPS International Conference, AIChE: New York 2004; p.101-114
- [8] G. Gubinelli, S. Zanelli, V. Cozzani: "A simplified model for the assessment of the impact probability of fragments", proposto per la pubblicazione su: Journal of Hazardous Materials
- [9] V. Cozzani, F. Franchi, P. Pierno, E. Vitale, S. Zanelli: "Il Contributo dell'Effetto Domino al Rischio Industriale". Atti del III Convegno Nazionale Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili ed Industriali, DIMNP (015), Pisa: 2002
- [10] P.L. Holden, A.B. Reeves, Fragment hazards from failures of pressurised liquefied gas vessels, IChemE Symposium Series No. 93 (1985) 205
- [11] G. Antonioni, V. Cozzani, G. Gubinelli, G. Spadoni, S. Zanelli: "The estimation of vulnerability in domino accidental events". Proc. Eur.Conf. Safety and Reliability, Springer: London 2004; p.3212-3217