

## IL CONTRIBUTO DELL'EFFETTO DOMINO AL RISCHIO INDUSTRIALE

*Valerio Cozzani\**, *Federica Franchi\**, *Paolo Pierno\**, *Emilio Vitale<sup>#</sup>*, *Severino Zanelli\**

- (\*) Università degli Studi di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Chimica Industriale e Scienza dei Materiali, via Diotisalvi n°2, 56126 Pisa
- (#) Università degli Studi di Pisa, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione, via Diotisalvi n°2, 56126 Pisa

### 1. SOMMARIO

Il DL 334/99 ha reso di attualità il problema della valutazione quantitativa del rischio dovuto all'effetto domino. Il presente contributo è indirizzato allo sviluppo ed all'applicazione di una metodologia quantitativa per l'analisi dell'effetto domino nell'ambito di studi di rischio d'area. Particolare attenzione è stata dedicata allo sviluppo ed alla validazione di modelli per il calcolo della probabilità di propagazione degli incidenti causata da irraggiamento. I risultati ottenuti hanno permesso di valutare il rischio aggiuntivo dovuto all'effetto domino in un'area industriale ed hanno mostrato che l'effetto domino può aumentare i valori di rischio sociale fino ad un ordine di grandezza. L'utilizzo di metodi probabilistici basati su modelli attendibili di danno ha mostrato come i valori del rischio ottenuti da valutazioni dell'effetto domino basate su tabelle di vulnerabilità possano essere eccessivamente conservativi, evidenziando l'importanza dell'ulteriore sviluppo e validazione di modelli di danno per tutti i potenziali vettori di propagazione degli incidenti.

### 2. INTRODUZIONE

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 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, né sono disponibili modelli sufficientemente affidabili per il calcolo della probabilità di propagazione di eventi incidentali [1]. 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 [2].

Nel presente lavoro è stata ulteriormente sviluppata una metodologia quantitativa per l'analisi dell'effetto domino, specificamente indirizzata all'utilizzo nell'ambito di studi di rischio d'area [3]. Particolare attenzione è stata dedicata allo sviluppo ed alla validazione di modelli per il calcolo della probabilità di propagazione degli incidenti causata da irraggiamento. Lo sviluppo di un approccio basato su criteri semplificati di cedimento e sul calcolo del tempo di cedimento di apparecchiature atmosferiche ed in pressione sottoposte ad irraggiamento ha permesso di ottenere funzioni semplificate per il calcolo del tempo disponibile per gli interventi di mitigazione. I modelli semplificati utilizzati per valutare il tempo di cedimento sono quindi stati validati attraverso l'utilizzo di codici di calcolo agli elementi finiti per verificarne l'attendibilità [4].

La disponibilità dei tempi di cedimento ha permesso di calcolare la probabilità di propagazione con un approccio basato sull'affidabilità dinamica, legato al confronto fra il tempo disponibile per l'intervento di mitigazione (time to performance requirement) ed il tempo di cedimento dell'apparecchiatura (time to performance achievement).

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

### 3. ANALISI QUANTITATIVA DEL RISCHIO DOVUTO AD EFFETTO DOMINO

#### 3.1 Definizione di “effetto domino”

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”. Nel seguito l’effetto domino sarà definito come la “propagazione di un singolo evento incidentale a causarne altri con una severità complessiva maggiore rispetto all’evento primario”. L’effetto domino si può quindi schematizzare come un incidente (evento primario) che genera un vettore di effetti fisici (conseguenze dell’effetto primario) che, investendo un bersaglio secondario provocano un secondo incidente (evento secondario).

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

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

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

#### 3.2 Metodologie quantitative di analisi dell’effetto domino

Su questo argomento sono reperibili in letteratura diversi contributi. Alcuni metodi sono puramente deterministici, cioè stabiliscono se l’evento secondario può avvenire o no sulla base di strumenti modellistici complessi e su una conoscenza dettagliata del lay-out. Questo tipo di approccio da un lato ha costi e tempi elevati di applicazione, dall’altro non tiene conto dei numerosi fattori di incertezza che possono inficiare una valutazione rigidamente deterministica. In letteratura sono stati proposti alcuni metodi probabilistici che sono però basati su un’analisi “ab initio” del rischio dovuto all’effetto domino. Poiché invece l’analisi dell’effetto domino in generale si colloca a valle dell’analisi di sicurezza “convenzionale” degli impianti, non vengono così sfruttate le potenzialità derivanti dalla disponibilità dei risultati dell’analisi di sicurezza degli impianti. Solo recentemente è stato proposto un metodo per l’analisi quantitativa dell’effetto domino specificamente orientato al rischio d’area [3,5]. Questo è stato utilizzato nel presente lavoro per il calcolo del rischio aggiuntivo dovuto all’effetto domino.

#### 3.3 Valutazione quantitativa dell’effetto domino

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

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

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

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

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

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

Per gli effetti domino del secondo tipo:

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

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

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

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

Per quanto riguarda il calcolo delle conseguenze, nel caso degli effetti domino del primo tipo la valutazione, necessaria solo per l’evento secondario, dovrà essere condotta con metodi convenzionali, basati su tecniche di albero degli eventi, modelli di dispersione, modelli di valutazione degli effetti fisici, modelli di vulnerabilità [6]. Nel caso di effetti domino di secondo tipo, un primo approccio all’analisi delle conseguenze può essere effettuato trascurando i possibili effetti sinergici causati dalla contemporaneità degli eventi e applicando la sovrapposizione degli effetti fisici. Le conseguenze dell’incidente risultano quindi dalla somma delle mappe degli effetti fisici (irraggiamento, sovrappressioni, concentrazioni di sostanze tossiche) risultanti

dagli eventi primario e secondario considerati separatamente. Questa può essere ottenuta sommando direttamente le mappe di vulnerabilità degli eventi, come discusso altrove [3].

#### 4. MODELLI PER LA PROBABILITÀ DI PROPAGAZIONE

Da quanto sopra deriva che il punto critico per la valutazione quantitativa dell'effetto domino è la disponibilità di modelli sufficientemente affidabili per la determinazione della probabilità di propagazione. In letteratura sono stati utilizzati molteplici approcci alla valutazione della probabilità di propagazione.

Il più diffuso è basato su "soglie di propagazione" o "tabelle di vulnerabilità". Questo consiste nell'assegnare probabilità unitaria di danno alle apparecchiature presenti all'interno della regione in cui si hanno effetti fisici superiori a quelli di un valore di soglia e probabilità nulla alle apparecchiature che si trovano al di fuori di tale regione. È bene sottolineare che in letteratura non c'è accordo rispetto ai valori di soglia da assumere, che possono variare anche di un ordine di grandezza, come mostrato dalla tabella 1 relativa ai valori di soglia dovuti a sovrappressione. Per flusso termico radiante, Latha et al. [7] propongono il valore di 37.5 kW/m<sup>2</sup> come limite al di sotto del quale la probabilità di propagazione è nulla, Pettitt et al. [8] propongono l'utilizzo di una soglia di danno pari a 37.5 kW/m<sup>2</sup>, mentre nella normativa tecnica italiana compare spesso il valore di 12.5 kW/m<sup>2</sup> [9].

Soglia (atm)	Tipo di danno	Rif.
0.7	non descritto	Bagster e Pitblado, 1991 [10]
0.355	non descritto	Khan e Abbasi, 1998 [11]
0.2	spostamento	Clancey, 1972 [12]
0.07-0.136	rottura connessioni tubazioni	Glasstone, 1962 [13]
0.27	apparecchiature atmosferiche	Clancey, 1972 [12]
0.136	apparecchiature atmosferiche	Glasstone, 1962 [13]
0.2-0.27	apparecchiature atmosferiche	Brasie e Simpson, 1968 [14]
0.34	apparecchiature in pressione	Wells, 1980 [15]

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

Modelli probabilistici più affidabili e strutturati sono stati proposti da diversi autori. In letteratura sono presenti funzioni empiriche per il calcolo della probabilità di propagazione basate su un'attenuazione in funzione della distanza [10]. Per il danneggiamento di apparecchiature dovuto a sovrappressione sono disponibili invece modelli probabilistici di propagazione basati su funzioni di probit per apparecchiature specifiche e che tengono effettivamente conto delle tipologie di bersagli secondari [5]. Questo tipo di approccio è attualmente il migliore per la valutazione della probabilità di propagazione dovuta a sovrappressione, ed è stato utilizzato nel presente lavoro. La rassegna dei metodi disponibili in letteratura ha invece rivelato la lacunosità e le eccessive semplificazioni adottate per i modelli relativi alla propagazione causata da irraggiamento. Si è reso quindi necessario sviluppare una metodologia per la valutazione della probabilità di danno.

#### 5. MODELLAZIONE PROBABILISTICA DEL DANNO DA IRRAGGIAMENTO

##### 5.1 Approccio modellistico

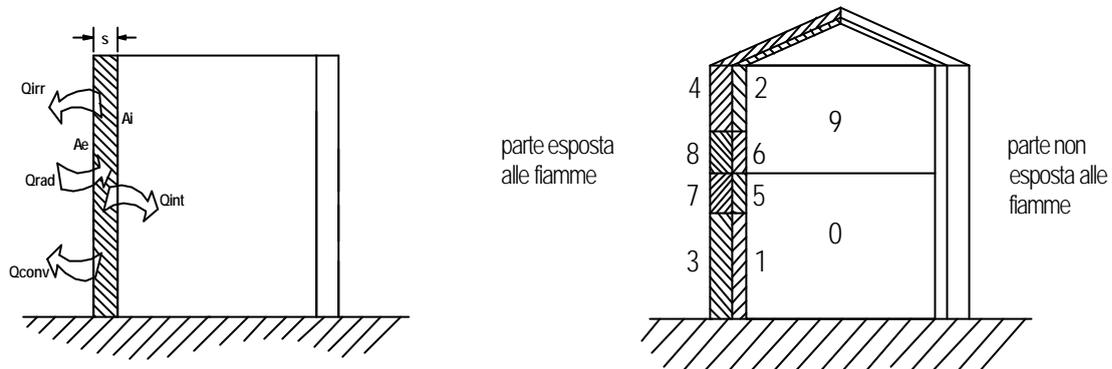
L'approccio sviluppato è stato basato sulla valutazione dei tempi di cedimento dei bersagli secondari in funzione dell'intensità di irraggiamento e sul loro confronto con i tempi necessari ad azioni efficaci di contrasto. La valutazione dei tempi di cedimento è stata effettuata sviluppando un modello per la temperatura di parete ed individuando criteri di cedimento per le categorie di bersagli individuate.

Lo studio di un esteso numero di casi ha permesso di ottenere una matrice di dati relativa a tempi di cedimento e intensità di irraggiamento. Attraverso l'utilizzo di funzioni interpolanti è stato quindi possibile ottenere correlazioni empiriche per il tempo di cedimento in funzione dell'intensità di irraggiamento.

##### 5.2 Modello termico a nodi

Il punto di partenza della metodologia applicata è l'utilizzo di un modello sufficientemente dettagliato per il calcolo della temperatura di parete. Ai fini del presente lavoro è stato messo a punto un modello basato su nodi termici. Il modello è stato cioè impostato considerando omogenee le temperature delle diverse zone della parete, del liquido e del vapore. Il bilancio termico è stato basato sull'introduzione di un numero di nodi termici sufficienti a rappresentare il serbatoio ed il fluido contenuto. La figura 1 mostra i nodi termici definiti nel caso più complesso studiato, costituito dalla modellazione di un serbatoio atmosferico coibentato investito da un getto incendiato. Si possono distinguere 10 nodi termici: liquido (0), parete a contatto con il

liquido non direttamente lambita dalle fiamme (1), parete a contatto con il vapore non direttamente lambita dalle fiamme (2), parete di isolante nella parte a contatto con il liquido non direttamente lambita dalle fiamme (3), parete di isolante nella parte a contatto con il vapore non direttamente lambita dalle fiamme (4), parete a contatto con il liquido direttamente lambita dalle fiamme (5), parete a contatto con il vapore direttamente lambita dalle fiamme (6), parete di isolante nella parte a contatto con il liquido direttamente lambita dalle fiamme (7), parete di isolante nella parte a contatto con il vapore direttamente lambita dalle fiamme (8), vapore (9). Tutti gli altri casi studiati possono essere considerati sottoinsiemi di quello rappresentato in figura. Metà della superficie del serbatoio non è esposta al calore radiante emesso dalle fiamme. Potrebbe quindi essere considerata mediante altri quattro nodi termici (parete non irraggiata a contatto con il liquido, parete non irraggiata a contatto con il vapore, isolante non irraggiato a contatto con il liquido, isolante non irraggiato a contatto con il vapore). Sulla base dei bilanci corrispondenti, in cui si è tenuto conto dello scambio convettivo tra il fluido all'interno dal recipiente e la parete, della conduzione dalla parete all'isolante, dell'irraggiamento dalla superficie esterna verso l'ambiente e dello scambio convettivo tra l'aria e la superficie, è stato verificato che il contributo dei suddetti nodi termici è trascurabile. Si è quindi ritenuto inutile introdurre questi nodi nel modello.



**Figura 1:** Flussi termici e nodi utilizzati per la modellazione di un serbatoio cilindrico verticale parzialmente avvolto dalle fiamme

Quando la superficie di un'apparecchiatura è esposta alle radiazioni termiche, siano esse provenienti da un incendio distante o da una fiamma diretta, si riscontra un aumento della sua temperatura fino al raggiungimento, in generale dopo un lungo periodo di esposizione, di un valore stazionario.

$$M \cdot c_p \cdot \frac{dT_p}{dt} = Q_{rad} - Q_{irr} - Q_{conv} - Q_{int} \quad (1)$$

Nella formula sopra esposta il termine al primo membro corrisponde all'accumulo di calore nella parete:  $M$  è la massa della parete, che dipende dalla geometria del serbatoio,  $c_p$  è il calore specifico del materiale costituente la parete,  $T_p$  è la temperatura di parete. Il primo termine al secondo membro corrisponde al calore ricevuto dalla parete per irraggiamento: se indichiamo con  $I$  ( $\text{kW/m}^2$ ) il flusso termico dovuto alla fiamma tale calore può essere espresso tramite la (2):

$$Q_{rad} = I \cdot A_e \quad (2)$$

dove  $A_e$  ( $\text{m}^2$ ) è la superficie di parete ricevente. Il secondo e terzo termine indicano il calore ceduto dalla parete all'ambiente rispettivamente per irraggiamento (3) e per convezione (4):

$$Q_{irr} = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_p^4 - T_a^4) \cdot A_e \quad (3)$$

$$Q_{conv} = h_a \cdot (T_p - T_a) \cdot A_e \quad (4)$$

dove  $\epsilon$  è l'emissività della parete,  $\sigma$  la costante di Stefan-Boltzmann,  $T_a$  la temperatura dell'ambiente circostante ed  $h_a$  il fattore di scambio termico convettivo tra parete ed aria. Da notare che nel caso di avvolgimento diretto delle fiamme la convezione tra parete ed aria non è presente. L'ultimo termine al secondo membro della (1) corrisponde al calore ceduto dalla parete al fluido contenuto nel serbatoio.

### 5.3 Correlazioni semplificate per il tempo di cedimento in funzione dell'irraggiamento

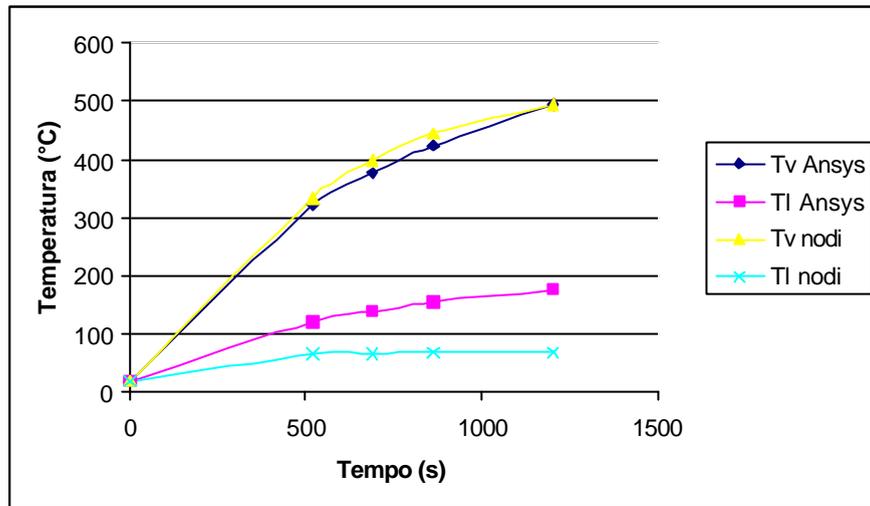
Dal modello sono state ottenute curve temperatura-tempo, di cui un esempio è riportato in figura 2. Le curve mostrate permettono con relativa facilità di verificare la resistenza dell'apparecchiatura rispetto a fenomeni di plasticizzazione. I meccanismi di cedimento per superamento della tensione di plasticizzazione possono essere due. La sollecitazione equivalente può aumentare a causa di un aumento di pressione interna,

superando così la sollecitazione ammissibile. In alternativa, con l'aumento della temperatura è la sollecitazione ammissibile a diminuire, fino a divenire inferiore alla sollecitazione equivalente. I due fenomeni possono presentarsi contemporaneamente, come nel caso di un serbatoio in pressione il cui contenuto è in ebollizione: la sollecitazione equivalente cui è sottoposta la parete aumenta e la sollecitazione ammissibile è diminuita, poiché aumenta la temperatura di parete a causa dell'irraggiamento esterno. Da queste valutazioni sono stati ottenuti grafici del tipo riportato in figura 3, relativi al tempo di cedimento in funzione dell'intensità di irraggiamento, per tipologie diverse di apparecchiature.

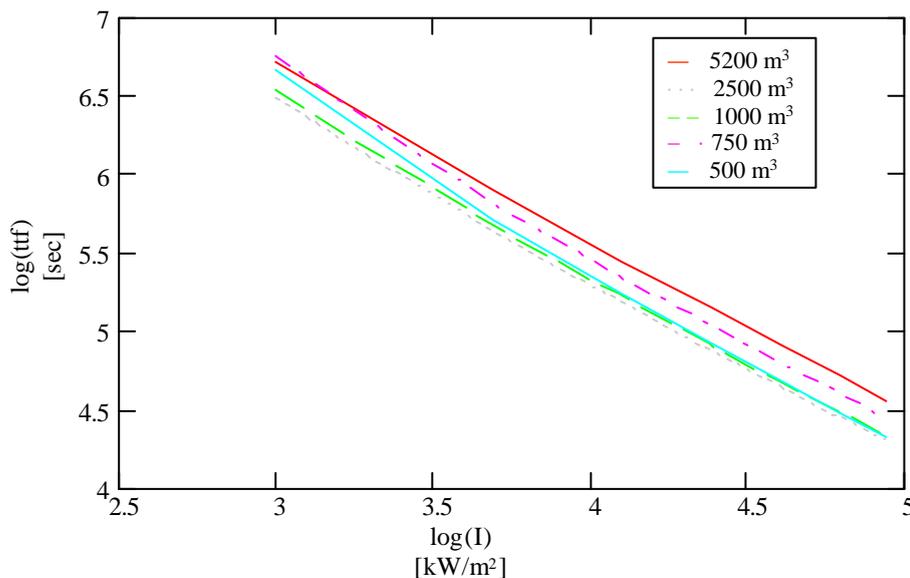
L'utilizzo della procedura caso per caso risulta estremamente impegnativo in termini di tempo di calcolo. È quindi evidente il vantaggio che comporterebbe la disponibilità di funzioni semplificate per la stima del tempo di cedimento in funzione dell'intensità di irraggiamento e delle caratteristiche del bersaglio. Per varie tipologie di serbatoi atmosferici è stato possibile ottenere da dati analoghi a quelli riportati in figura 3 correlazioni semplificate per il tempo di cedimento in funzione del flusso termico radiante e del volume:

$$\ln(t) = m \cdot \ln(I) + n \quad (5)$$

Dove **m** ed **n** sono parametri empirici della correlazione, che devono essere ricavati sulla base dei risultati del modello.



**Figura 2:** Andamento nel tempo della temperatura di parete di un serbatoio da 1000m<sup>3</sup> sottoposto ad un irraggiamento di 20kW/m<sup>2</sup> (Tv: temperatura parete a contatto col vapore; Tl: temperatura parete a contatto col liquido)



**Figura 3:** Tempo di cedimento in funzione dell'intensità di irraggiamento per stoccaggi atmosferici

Le rette in figura 3, che rappresentano ciascuna un volume diverso, sono parallele: è stato quindi 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:

$$n = M \cdot V + N \quad (6)$$

Sono state ottenute correlazioni per:

- serbatoi atmosferici provvisti o meno di isolante irraggiati da sorgente distante
- serbatoi atmosferici provvisti o meno di isolante direttamente investiti dalle fiamme.

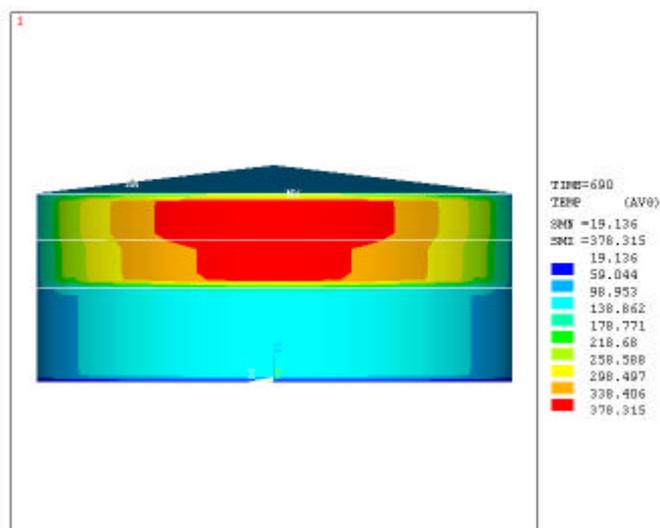
Le correlazioni ottenute sono tutte conservative ed in particolare l'errore commesso non è mai superiore al 15% per valori dell'irraggiamento  $\geq 20 \text{ kW/m}^2$  per serbatoi non coibentati. Alcune correlazioni ottenute nel caso di irraggiamento da sorgente distante sono riportate a titolo d'esempio in tabella 2.

	$V = 5200 \text{ m}^3, 500 \text{ m}^3$	$V = 250 \text{ m}^3, 25 \text{ m}^3$
<b>non coibentato</b> <b>(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</b> <b>(SA-299)</b>	$\ln(t) = -2.802 \cdot \ln(I) + n$ $n = 7.5 \cdot 10^{-5} \cdot V + 20.092$	$\ln(t) = -2.666 \cdot \ln(I) + 19.342$

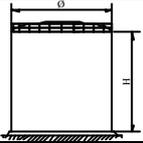
**Tabella 2:** Correlazioni tempo di cedimento - irraggiamento per serbatoi atmosferici cilindrici verticali

#### 5.4 Validazione dei risultati mediante l'utilizzo di un codice ad elementi finiti

L'utilizzo di un modello a nodi permette con facilità il calcolo della temperatura di parete di apparecchiature soggette a irraggiamento. Tuttavia questo tipo di modelli semplificati non permette un'analisi puntuale della distribuzione di temperatura sulla superficie dei serbatoi e, di conseguenza, non permette una completa valutazione delle sollecitazioni di origine termica generate dall'irraggiamento. Al fine di verificare se le approssimazioni introdotte utilizzando modelli basati su nodi termici siano effettivamente accettabili, il problema è stato studiato anche mediante modelli più complessi. È stato utilizzato un codice di calcolo, basato su metodi agli elementi finiti, Ansys v. 5.6, con cui è stato possibile simulare le condizioni in cui vengono a trovarsi serbatoi soggetti a irraggiamento, sia dal punto di vista termico che dal punto di vista meccanico. Nel presente lavoro Ansys è stato utilizzato per la valutazione dello stato di sollecitazione in serbatoi atmosferici soggetti a irraggiamento da sorgente distante. I dati costruttivi dei serbatoi studiati sono riassunti nella tabella 3. Ai fini della modellazione si è supposto un grado di riempimento del 50% e si è scelto il benzene quale composto rappresentativo dei liquidi infiammabili altobollenti normalmente contenuti in questa tipologia di serbatoi.



**Figura 4:** Distribuzione della temperatura di parete dopo 690s per un serbatoio da  $1000 \text{ m}^3$ , 50% di riempimento, sottoposto ad un irraggiamento di  $20 \text{ kW/m}^2$

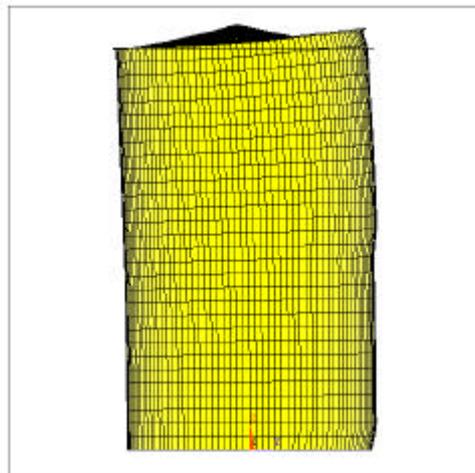
 <b>Serbatoio Atmosferico Verticale</b> Contenuto: liquido non bollente Materiale: acciaio Standard: ASME SA-299							
V (m <sup>3</sup> )	D (mm)	H (mm)	h (mm)	SPESSORI (mm) SA-299			
				sv1	sv2	sv3	st
25	2700	4500	250	5	5	5	5
100	4400	7000	470	5	5	5	5
250	6700	7500	500	5	5	5	5
750	10500	9000	800	7	7	7	7
1000	15000	6000	900	7	8	9	7
5200	25000	11000	1300	10	14	19	10

**Tabella 3:** Caratteristiche costruttive dei serbatoi modellati con il codice ANSYS

La modellazione, sia termica che meccanica, è stata effettuata per serbatoi atmosferici a tetto fisso di vari volumi e aventi caratteristiche geometriche differenti. Sono state prese in considerazione due diverse condizioni incidentali che generano due diverse tipologie di irraggiamento e quindi di modellazione: l'irraggiamento da sorgente distante e il jet-fire.

Ai fini del lavoro sono stati presi in considerazione essenzialmente la distribuzione delle temperature del mantello dei serbatoi e lo stato di tensione, espresso attraverso le componenti della matrice delle sollecitazioni e il valore della tensione equivalente risultante dall'applicazione del criterio di Von Mises. La figura 4 riporta un esempio della distribuzione di temperatura per un serbatoio da 1000m<sup>3</sup> sottoposto ad un flusso termico radiante da sorgente distante pari a 100 kW/m<sup>2</sup>. La figura 2 riporta invece l'andamento della massima temperatura di parete confrontata con i valori ottenuti dal modello termico a nodi. La figura 5, infine, riporta un esempio della deformazione che subiscono i serbatoi a causa dell'irraggiamento.

Per mezzo di questa analisi è stato possibile individuare le zone delle apparecchiature maggiormente sollecitate e la tipologia di sollecitazione critica. La figura 6 mostra i risultati ottenuti per un serbatoio da 25m<sup>3</sup> soggetto ad un flusso radiante di 100kW/m<sup>2</sup>.

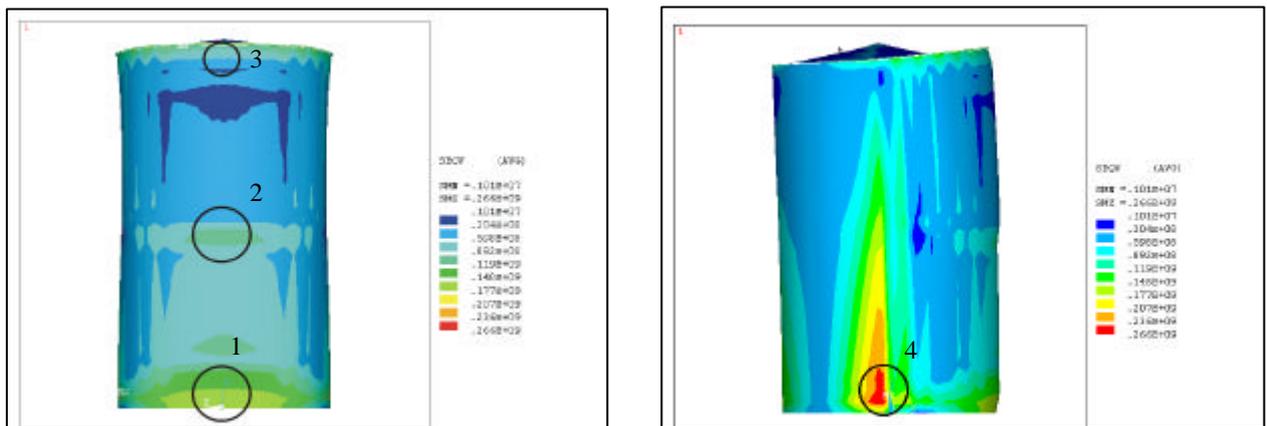


**Figura 5:** Deformazione di un serbatoio da 25m<sup>3</sup>, 50% di riempimento, sottoposto ad un irraggiamento di 100kW/m<sup>2</sup> per 100s

Il calcolo agli elementi finiti è stato condotto in regime transitorio, per cui, dalle mappe di tensione ottenute in successivi istanti di tempo, è stato possibile stimare i tempi di cedimento delle apparecchiature. Sono stati presi in considerazione due diversi meccanismi di cedimento: il cedimento per plasticizzazione ed il cedimento per instabilità. Per la valutazione del tempo di cedimento per plasticizzazione in via cautelativa sono state effettuate verifiche puntuali rispetto al superamento dei valori di tensione ammissibile forniti dalla normativa. Analogamente, per il cedimento per instabilità si è assunto rappresentativo il tempo al quale le

tensioni assiali o circonferenziali superano quelle critiche ricavate utilizzando il criterio proposto da Timoshenko e Gere [16]. E' stata trascurata sia l'influenza di eventuali deviazioni dalla geometria ideale che la distribuzione non uniforme dei carichi sulla struttura.

I risultati hanno mostrato che il meccanismo di cedimento varia a seconda dell'intensità di irraggiamento e delle caratteristiche del serbatoio. Per poter identificare il meccanismo prevalente di cedimento del serbatoio, è stato individuato il fenomeno che dà luogo al tempo di cedimento più basso per ogni tipologia di serbatoio studiata e per ogni valore di irraggiamento considerato. Nella tabella 4 si è riportato il meccanismo di cedimento in funzione dell'intensità di irraggiamento e del rapporto diametro/altezza del serbatoio, che è risultato il principale fattore geometrico che ha influenza sul meccanismo di cedimento.



**Figura 6:** Stato di sollecitazione (tensione equivalente) e zone oggetto di verifica per un serbatoio da 25m<sup>3</sup> soggetto a 100kW/m<sup>2</sup> di irraggiamento per 100s

La tabella risulta chiaramente divisa in tre zone:

- per bassi rapporti D/h e bassi flussi radianti non si ha alcun tipo di cedimento e la soglia di 12.5 kW/m<sup>2</sup> ben rappresenta l'ordine di grandezza dei flussi termici al di sotto dei quali in generale non avvengono fenomeni di propagazione
- per bassi rapporti D/h e flussi radianti elevati, il cedimento della struttura è dovuto a collasso plastico
- per alti rapporti D/h, il cedimento è dovuto a fenomeni di instabilità; in questa regione, i risultati ottenuti mostrano che non può essere escluso che il cedimento avvenga anche per valori molto ridotti dei flussi termici radianti.

Appare evidente dai risultati ottenuti che il cedimento dei serbatoi è vincolato al rapporto tra diametro ed altezza. In prospettiva dovrebbe essere quindi possibile identificare il meccanismo prevalente di collasso in base al valore di questo parametro. Ovviamente i risultati in tabella 4 devono essere ritenuti solo indicativi, in quanto la casistica studiata è insufficiente a definire quantitativamente le regioni di transizione tra i fenomeni.

V (m <sup>3</sup> )	I (kW/m <sup>2</sup> )	8	12.5	20	60	100
25	D/h = 0.6	Blue	Blue	Red	Red	Red
100	D/h = 0.63	Blue	Blue	Red	Red	Red
250	D/h = 0.893	Blue	Blue	Red	Yellow	Yellow
750	D/h = 1.167	Blue	Blue	Red	Yellow	Yellow
5200	D/h = 2.273	Blue	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
1000	D/h = 2.5	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow

- Cedimento per superamento della tensione ammissibile
- Cedimento per instabilità assiale
- Nessun cedimento

**Tabella 4:** Meccanismi di cedimento in funzione del rapporto diametro/altezza (D/h)

### 5.5. Valutazione della probabilità di propagazione

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 [5]:

$$Pr = 9.252 - 1.847 \cdot \ln(ttf) \quad (7)$$

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 funzione (7) è stata ottenuta sulla base di dati generici per i tempi di intervento, ma può essere facilmente modificata utilizzando dati specifici del sito.

## 6. ANALISI DEL RISCHIO AGGIUNTIVO DOVUTO AD EFFETTO DOMINO

### 6.1 Definizione di un caso di studio

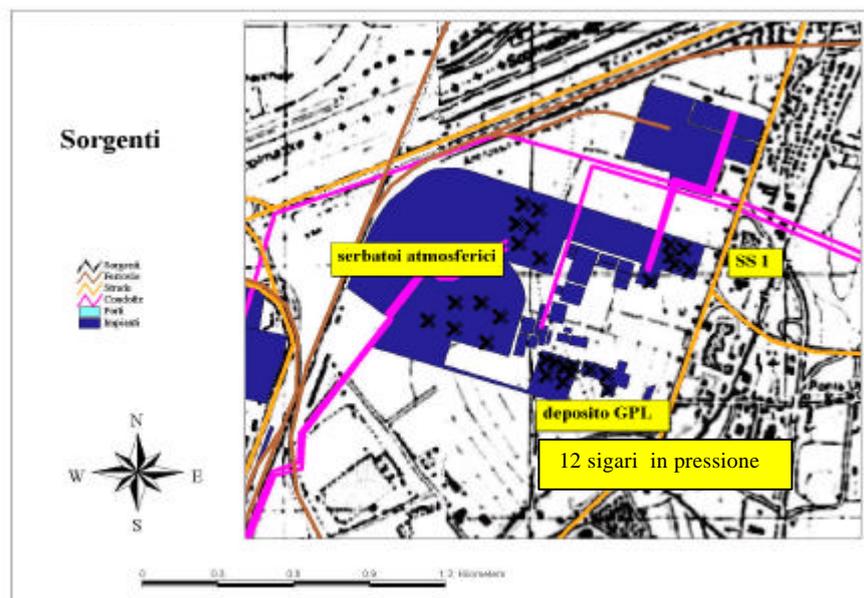
E' importante verificare da un lato la validità della metodologia generale per la valutazione quantitativa del rischio aggiuntivo dovuto ad effetto domino, dall'altro l'influenza dei modelli probabilistici utilizzati sui risultati della valutazione. A questo scopo la metodologia sviluppata è stata applicata ad un settore di un'area industriale italiana. I dati utilizzati per lo studio sono stati derivati dai risultati di un'analisi di rischio d'area condotta sulla zona in esame.

La valutazione del rischio aggiuntivo dovuto ad effetto domino è stata condotta stimando i due principali indici di rischio considerando o meno il contributo dell'effetto domino: il rischio locale ed il rischio sociale. Questi sono definiti come:

- **rischio locale:** il rischio di morte (dovuta ad incidente) in un determinato punto del territorio di un individuo presente 24 ore al giorno
- **rischio sociale:** esprimibile con curve F-N, che confrontano la frequenza complessiva (F) degli incidenti che possono determinare sull'intera area d'impatto un numero di decessi almeno uguale ad un valore di riferimento (N).

Il software utilizzato sia per lo studio di rischio d'area che per la valutazione del rischio aggiuntivo dovuto all'effetto domino è costituito dal programma di ricomposizione del rischio ARIPAR-GIS, sviluppato sull'omonimo studio di rischio d'area di Ravenna [2] e aggiornato negli anni successivi da Snamprogetti, dal JRC di Ispra, dall'Università di Bologna e dalla Protezione Civile della regione Emilia Romagna [17]. Per lo studio effettuato è stata utilizzata la versione 2.1 del programma.

I risultati dello studio di rischio d'area hanno individuato due zone come potenziale sede di incidenti dovuti a effetto domino: il parco stoccaggi atmosferici ed il deposito di GPL di una raffineria. In figura 7 si riporta una pianta delle installazioni.



**Figura 7:** Localizzazione delle sorgenti di rischio all'interno dell'impianto studiato

### 6.2. Valutazione della probabilità di propagazione

Per il calcolo degli indici di rischio è stato necessario valutare le frequenze e le conseguenze degli incidenti dovuti ad effetto domino. Come mostrato nei paragrafi 2 e 3, e più estesamente in altre pubblicazioni [3,5], se si dispone dei risultati dell'analisi di sicurezza degli impianti, l'unico elemento che è necessario calcolare "ex-novo" è la probabilità di propagazione. La valutazione della probabilità di propagazione è stata effettuata mettendo a confronto tre diversi metodi:

1. utilizzo di tabelle di vulnerabilità con i valori più conservativi reperiti in letteratura riferito a tabelle di vulnerabilità relative a bassi valori di soglia (“basse soglie”): 0.15 bar per la propagazione dovuta a sovrappressione, 12.5kW/m<sup>2</sup> per la propagazione dovuta ad irraggiamento
2. utilizzo di tabelle di vulnerabilità con i valori meno conservativi reperiti in letteratura riferito a tabelle di vulnerabilità relative a bassi valori di soglia (“basse soglie”): 0.7 bar per la propagazione dovuta a sovrappressione, 37.5kW/m<sup>2</sup> per la propagazione dovuta ad irraggiamento
3. utilizzo di modelli probabilistici

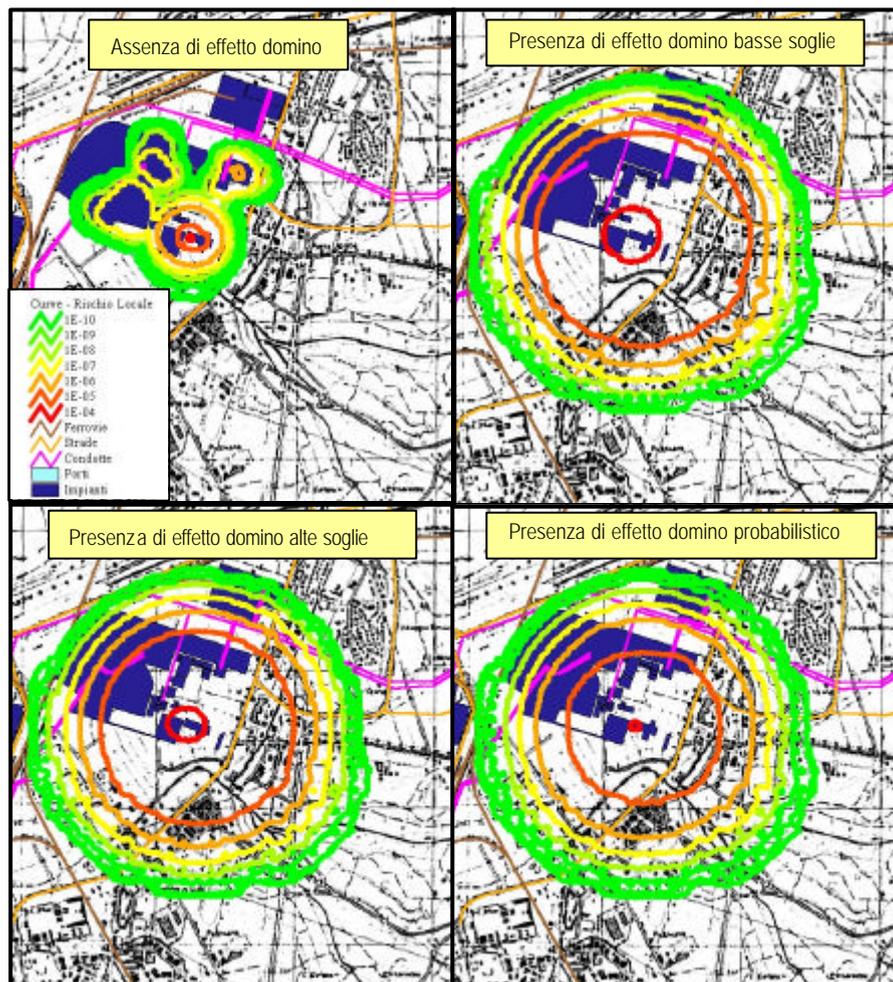
I modelli probabilistici utilizzati sono i seguenti, basati su funzioni di probit:

$$Pr = 9.252 - 1.847 \cdot \ln(ttf) \quad (8)$$

dove ttf è il tempo di cedimento (s), per la propagazione dovuta ad irraggiamento, e

$$Pr = -54.707 + 5.8611 \cdot \ln(p^{\circ}) \quad (9)$$

dove p<sup>o</sup> è la sovrappressione massima (bar), per la propagazione dovuta ad onde di pressione.



**Figura 8:** *Rischio locale in assenza ed in presenza di effetto domino considerando varie tipologie di modelli di propagazione*

In figura 8 sono riportate le curve di rischio locale ottenute nei vari casi. La prima cosa che viene messa in evidenza dall’analisi delle curve di rischio locale è, come prevedibile, che i valori più elevati di rischio si hanno sempre nella zona adiacente al parco stoccaggi in pressione (deposito GPL).

Si nota che in assenza di effetto domino le curve di rischio locale relative ai più alti valori delle frequenze si estendono fino ai confini del deposito di GPL, mentre in presenza di effetto domino ricoprono un’area d’impatto che si estende ben oltre i confini del singolo stabilimento. Ciò evidenzia il forte impatto che l’effetto domino può avere sugli indici di rischio locale di una zona industriale in cui sono presenti molteplici sorgenti di rischio.

Dall’analisi delle curve risulta inoltre evidente quanto siano conservativi i risultati ottenuti mediante l’applicazione di tabelle di vulnerabilità, in particolare per i bassi valori di soglia (che sono però quelli

adottati da alcune normative italiane): l'area d'impatto per la quale si hanno i più alti valori di rischio locale, dell'ordine di  $10^{-4} \div 10^{-5}$  eventi/anno, è notevolmente più estesa.

Nella figura 9 si riportano le curve di rischio sociale calcolate nei diversi casi. La frequenza complessiva (F) degli incidenti che possono determinare sull'intera area d'impatto un numero di decessi (N) pari al massimo a 8000, aumenta di almeno un ordine di grandezza se si considera il contributo dell'effetto domino. Si passa infatti dal valore  $1.78 \cdot 10^{-6}$ , ottenuto senza considerare il contributo dell'effetto domino, ai valori di  $1.99 \cdot 10^{-5}$  e  $3.98 \cdot 10^{-5}$ , ottenuti rispettivamente considerando il contributo dell'effetto domino valutato rispettivamente con il metodo degli "alti valori di soglia" e dei "bassi valori di soglia".

Si può concludere che, come messo in evidenza in particolare dalla valutazione del rischio sociale, l'utilizzo di modelli probabilistici risulta meno conservativo, portando ad una valutazione meno catastrofistica e più accurata del rischio aggiuntivo dovuto ad effetto domino.

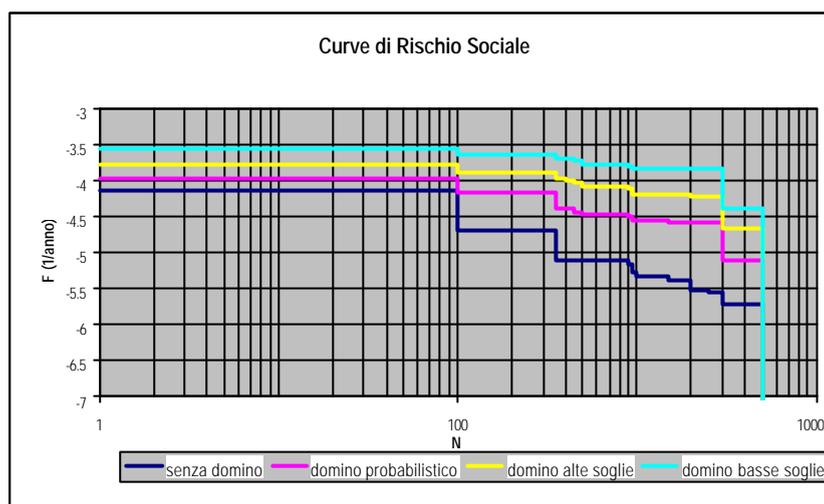


Figura 9: Curve di rischio sociale in presenza ed in assenza di effetto domino

## 7. CONCLUSIONI

Il lavoro è stato orientato da un lato alla messa a punto e validazione di una tecnica per la stima quantitativa del rischio aggiuntivo dovuto ad effetto domino, dall'altro allo sviluppo di modelli di propagazione degli incidenti. In questo ambito è stato messo a punto un modello probabilistico per il danneggiamento di apparecchiature a causa dell'irraggiamento termico dovuto ad incendi. Questo ha comportato lo sviluppo di un modello semplificato a nodi termici per il calcolo della temperatura di parete di apparecchiature sottoposte a diverse condizioni di irraggiamento. Il modello è stato validato anche attraverso i risultati ottenuti dalla modellazione di apparecchiature sottoposte ad irraggiamento tramite l'utilizzo di codici ad elementi finiti. Dalla conoscenza del tempo di cedimento è stato possibile risalire alla probabilità di propagazione dell'incidente attraverso un opportuno modello probabilistico.

L'approccio sviluppato è stato applicato all'analisi del rischio aggiuntivo dovuto all'effetto domino in un'area industriale. L'utilizzo del software ARIPAR-GIS ha permesso la valutazione degli indici di rischio locale e sociale in presenza ed in assenza di effetto domino. È stato inoltre possibile confrontare l'influenza dell'utilizzo di diversi modelli di propagazione.

I risultati ottenuti hanno mostrato il forte impatto che l'effetto domino può avere sugli indici di rischio di una zona industriale in cui sono presenti molteplici sorgenti di rischio. Lo studio conferma la grande importanza che deve essere attribuita allo sviluppo di modelli affidabili ed accurati per la valutazione dell'effetto domino, in particolare nella prospettiva dell'applicazione di metodi di pianificazione territoriale, per i quali l'utilizzo di stime inutilmente conservativi del rischio può portare ad affrontare costi sociali inaccettabili.

## 8. RINGRAZIAMENTI

Il lavoro è stato condotto nell'ambito del progetto di ricerca di rilevante interesse nazionale "Sviluppo ed approfondimento di metodologie innovative per la valutazione del rischio d'area", cofinanziato dal MIUR e dall'Università di Pisa.

Si ringraziano inoltre Marcello Mossa Verre e Francesco Marotta dell'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana per le utili discussioni.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- [1] Center for Chemical Process Safety: "Guidelines for quantitative risk analysis". A.I.Ch.E., New York 2000
- [2] D. Egidi, F. P. Foraboschi, G. Spadoni, A. Amendola: "The ARIPAR project: an analysis of the major accident risks connected with industrial and transportation activities in the Ravenna area", *Reliability Engineering and System Safety* 49:75 (1995)
- [3] V. Cozzani, S. Zanelli: "An Approach to the Assessment of Domino Accidents Hazard in Quantitative Area Risk Analysis" in: "Loss prevention and safety promotion in the process industries", H.J. Pasman, O. Fredholm, A. Jacobsson Eds., Elsevier: Amsterdam 2001; p.1263-74
- [4] A. Amendola: "Accident sequence dynamic simulation versus event trees", *Reliability Engineering and System Safety* 22:3 (1988)
- [5] 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
- [6] F. P. Lees, "Loss Prevention in the Process Industries (II ed.)", Butterworth-Heinemann, Oxford (UK), 1996
- [7] P. Latha, G. Gautam, K. W. Raghavan, "Strategies for the quantification of thermally initiated cascade effects", *J. Loss Prev. Process Ind.*, 1992, vol. 5, n°1 (pp 18-27)
- [8] G. N. Pettitt, R. R. Schumacher, L. A. Seeley, "Evaluating the Probability of Major Hazardous Incidents as a Result of Escalation Events", *J. Loss Prev. Process Ind.*, 1993, vol 6, n° 1 (pp 37-46)
- [9] D.Lgs n.151 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. 16/6/2001
- [10] D.F. Bagster, R.M. Pitblado: *Proc.Safety Environ.* **69**,196 (1991)
- [11] F.I. Khan, S.A. Abbasi: *Proc. Safety Prog.* **17**,107 (1998)
- [12] V. J. Clancey: "Diagnostic features of explosion damage", 6<sup>th</sup> Int. Meeting of Forensic Sciences, Edinburgh, 1972
- [13] S. Glasstone: "The effects of nuclear weapons", *Atom. Energy Comm*, Washington DC, 1962
- [14] W.C. Brasie, D.W. Simpson: "Guidelines for estimating explosion damage", *Loss Prevention* **2**,91 (1968)
- [15] G. L. Wells: "Safety in Process Plant Design", Wiley, Chichester, 1980, p 170
- [16] T. Timoshenko, G. Gere: "Theory of elastic stability", Mc Graw-Hill, New York 1936
- [17] G. Spadoni, D. Egidi, S. Contini: "Through Aripa-GIS the quantified area risk analysis supports land-use planning activities". *J. Hazardous Materials* 71:423 (2000)", *Reliability Engineering and System Safety* 49:75 (1995)
- [18] M. Mossa Verre (Ed.), *Analisi del rischio per l'area di Livorno e strategie di intervento*, ARPAT, Firenze, 2000