CRITERI PER LA VALUTAZIONE DI FREQUENZA E MAGNITUDO DEGLI EFFETTI DOMINO

Concetto Aprile (*), Alfredo Romano (**), Mauro Gotti (**)

(*) Ministero degli Interni, Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, Via Cavour, 4 – 00100 Roma
(**) TRR S.r.l., Piazza Giovanni XXIII n.2 - 24046 OSIO SOTTO (BG)

Abstract

Con il termine “*Effetto Domino*” si intende il meccanismo che propaga uno scenario incidentale iniziale “*primario*” (per effetto di irraggiamento, sovrappressione, ecc.) generando eventi e/o scenari “*secondari*” su altre apparecchiature con potenziale espansione delle zone di danno. L’evento secondario, a seconda dei casi, potrà risultare analogo al primario per tipologia e/o estensione delle conseguenze, oppure dare luogo a scenari diversi.

Per approfondire le problematiche correlate a possibili effetti domino è stato effettuato uno studio mirato delle varie tipologie di scenario incidentale per stabilire una metodologia che consenta, partendo da ciascun scenario primario, di determinare frequenza e magnitudo di quelli secondari da esso provocati.

Il primo passo consiste nella individuazione dei parametri fondamentali che consentano di stabilire se una apparecchiatura coinvolta dagli effetti di un incidente possa subire danni significativi al punto di perdere le proprie caratteristiche di contenimento.

Questi parametri consentono di stabilire se l’apparecchiatura possa subire danni e la probabilità di accadimento dello scenario secondario.

Essi consentono inoltre di stabilire dei “criteri di esclusione”, cioè dei criteri per mezzo dei quali è possibile escludere a priori il danneggiamento dell’apparecchiatura coinvolta senza effettuare analisi o calcoli ulteriori. A titolo di esempio si cita il “Flash Fire” (Incendio di nubi di vapori infiammabili): la tipologia e dell’entità delle conseguenze di tale evento consentono di ritenere marginale, per la maggior parte delle apparecchiature normalmente impiegati negli impianti chimici, petrolchimici o di raffineria, la probabilità di danneggiamento di apparecchiature limitrofe.

Una volta determinata la possibilità che si verifichi l’evento secondario e l’entità delle conseguenze di quest’ultimo è possibile studiare sistemi di prevenzione, e protezione o intervento che scongiurino tale rischio, quali ad esempio:

- sistemi di intervento rapido per l’estinzione dell’evento primario;
- spiazzamento del prodotto pericoloso dalle apparecchiature coinvolte;
- protezione delle apparecchiature potenzialmente coinvolte (schermi, coibentazioni, fire-proofing, raffreddamento);
- intervento delle squadre di emergenza.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi tempi si sta enfatizzando “l’effetto domino”: prova ne sono i numerosi convegni ed interventi sull’argomento, ma è opportuno chiarire che è l’impostazione corretta di una ANALISI DI RISCHIO che in fase di progettazione deve portare a valutare tutti gli interventi atti a prevenire innanzitutto l’incidente e pertanto una corretta analisi deve:

1. valutare tutte le cause iniziatrici che possono comportare degli incidenti;
2. individuare tutte le azioni preventive per interrompere le sequenze incidentali (allarmi, sistemi di blocco);
3. introdurre un primo livello protettivo che a fronte di mancati interventi possa ridurre la quantità fuoriuscita e quindi determinare la gravità dell’evento (esempio valvole di fondo per colonne e recipienti, valvole di sezionamento a comando remoto, sistemi di depressurizzazione rapida, trasferimento di hold-up in altri recipienti) in combinazione con sistemi che sono in grado di rilevare la perdita in tempi rapidi (rilevazione gas, incendio, fumo..);
4. introdurre un secondo livello di protezione agendo su sistemi che possano contrastare l’incidente evitando il propagarsi dell’incidente stesso e quindi il temuto effetto domino; in questo livello si individuano sistemi quali:
 - sistemi di protezione antincendio (acqua, schiuma ...);

- fireproofing di strutture e/o recipienti, schermature in acciaio, controtubo di protezione;
 - bunker in cemento armato o muri di protezione;
 - barriere di acqua per la diluizione dei vapori;
 - utilizzo di panne galleggianti;
 - bacini di contenimento;
 - cordoli e drenaggi efficienti;
5. a valle della prima fase di analisi si procede alla revisione del layout e quindi alla valutazione dei punti vulnerabili (sale controllo, uffici ...), e quindi si può decidere un ulteriore livello protettivo (es. sala controllo a prova di esplosione, edifici resistenti al fuoco);
 6. ultimo livello protettivo è l'intervento della squadra di emergenza, qualora l'incidente si verifichi, per contrarne gli effetti e prevenire l'effetto domino.

Di conseguenza l'eventuale stima e quantificazione in termini di frequenza e magnitudo dell'effetto domino rappresenta la valutazione di un evento che si potrebbe verificare solo a seguito del fallimento dei sistemi di prevenzione, protezione, controllo, contenimento e di intervento in emergenza già previsti e considerati nell'analisi di rischio.

Per quel che riguarda la metodologia, le procedure comunemente adottate nell'analisi di rischio contengono già criteri ed informazioni necessari anche alla quantificazione dell'effetto domino. Nostro obiettivo non è quindi quello di stabilire una nuova metodologia, ma di utilizzare strumenti consolidati per una applicazione particolare.

2. LINEE GUIDA E NORMATIVE DI RIFERIMENTO

La legislazione italiana, a partire dal 1994, ha cominciato a cercare di indirizzare l'analisi degli effetti domino suggerendo alcuni criteri, almeno in termini di soglie limite da prendere in considerazione.

In particolare il primo documento è rappresentato dalle Linee Guida della Protezione Civile:

Presidenza del Consiglio, Dipartimento della protezione civile, *Pianificazione di Emergenza Esterna per impianti industriali a rischio di incidente rilevante, LINEE GUIDA*, GENNAIO 1994.

I valori definiti in tale documento sono:

Fenomeno	Descrizione	Soglia
Esplosioni/UVCE	Per quanto riguarda i danni materiali, da considerarsi ai fini di un possibile effetto domino diretto, si può prendere a riferimento il valore di soglia di 0,3 bar corrispondente al possibile danneggiamento a strutture pesanti, apparecchiatura di processo, serbatoi e tubazioni	0,3 bar
BLEVE/Sfera di fuoco	Per quanto riguarda i danni materiali, da considerarsi ai fini di un possibile effetto domino diretto, si possono prendere a riferimento le tipiche distanze entro cui si verifica la proiezione della maggior parte dei frammenti di dimensioni significative, pari a 100 metri nel caso delle unità di imbombolamento e relativo immagazzinamento, 500 metri per serbatoi di stoccaggio sferici e 800 metri per serbatoi di stoccaggio cilindrici.	100 m 500 m 800 m
Incendi	Per quanto riguarda i danni materiali, da considerarsi ai fini di un possibile effetto domino diretto, può essere preso a riferimento il valore di soglia pari a 12,5 kW/m ² . Tale valore corrisponde al possibile danneggiamento dei serbatoi atmosferici ovvero al collasso termico per quelli pressurizzati per esposizioni prolungate	12,5 kW/m²

Come si può vedere dalla nota relativa all'incendio, già in questo caso le Autorità evidenziano che la soglia di 12,5 kW/m² debba essere considerata concomitantemente al tempo di esposizione. Essa rappresenta il limite inferiore al di sotto del quale la possibilità di effetto domino risulta estremamente remota, e non il limite al di sopra del quale si abbia la certezza dell'evento. Questo concetto verrà approfondito più avanti.

Valori analoghi a quelli sopra riportati sono ripresi ed approfonditi in due Decreti Ministeriali relativi alla valutazione ed analisi dei Rapporti di Sicurezza:

Decreto Ministeriale (Ambiente) del 15/05/1996, *Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di gas e petrolio liquefatto (GPL)*.

Decreto Ministeriale (Ambiente) del 20/10/1998, *Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di liquidi facilmente infiammabili e/o tossici*.

Le soglie di riferimento riportate nei due Decreti sono essenzialmente allineate.

DM 15/05/1996 e DM 20/10/1998, Appendice III, Tabella III/1

Fenomeno	note	Soglia
Esplosioni/UVCE	Il valore di soglia preso a riferimento per i possibili effetti letali estesi si riferisce non solo alla letalità diretta, dovuta all'onda d'urto in quanto tale (0,6 bar), ma anche alla letalità indiretta, causata da cadute, proiezioni del corpo su ostacoli, impatto di frammenti e, specialmente, crollo di edifici (0,3 bar). I limiti per lesioni irreversibili e reversibili sono stati correlati essenzialmente alle distanze a cui sono da attendersi rotture di vetri e proiezione di un numero significativo di frammenti, anche leggeri, generati dall'onda d'urto. Per quanto riguarda gli effetti domino, il valore di soglia (0,3 bar) è stato fissato per tenere conto della distanza media di proiezione di frammenti od oggetti che possano provocare danneggiamento di serbatoi, apparecchiature, tubazioni, ecc	0,6 (0,3) bar
BLEVE/Sfera di fuoco	100m da parco bombole, 600m da stoccaggio in sfere, 800m da stoccaggio in cilindri	100 m 500 m 800 m
Incendi		12,5 kW/m²

Come si può vedere anche i commenti riportati per queste note evidenziano che si tratta solo di criteri indicativi, ed è quindi compito dell'analista approfondire l'argomento, quando necessario, caso per caso.

3. ENTITÀ DEGLI EFFETTI

Per meglio chiarire i passaggi successivi dell'analisi, e le scelte effettuate per determinare le frequenze di accadimento di un eventuale effetto domino, riportiamo di seguito alcune considerazioni che permettono di avere un riscontro materiale della possibilità di danno connessa con le soglie sopra definite.

Irraggiamento

Come riferimento di base ricordiamo che l'irraggiamento solare, in una giornata estiva, può raggiungere intensità da 1 a 1,5 kW/m².

Per visualizzare invece l'intensità dell'irraggiamento pari a 12,5 kW/m² consideriamo l'esposizione di una lastra di ferro dolce di 1 m² dello spessore di 2 cm (rappresentativa della parete di una apparecchiatura o di un serbatoio), con calore specifico pari a 0,5 kJ/(kg K) nell'ipotesi cautelativa che tutto il calore irradiato venga assorbito dalla stessa.

Considerando un volume di ferro pari a 0,02 m³ (circa 160 kg), per ottenere un innalzamento di 150 °C è necessaria una esposizione pari a oltre 15 minuti. Ovviamente in questo calcolo non si è tenuto conto né della frazione di calore riflesso né di quello scambiato dalla lastra con l'ambiente e con i prodotti all'interno del recipiente.

Fireball

Nel caso del fireball il calcolo è ancora più semplice: considerando la soglia massima di 350 kJ/m², energia totale emessa dal Fireball, che ha durata estremamente breve (massimo 2 minuti) si ottiene un irraggiamento della stessa lastra di cui all'esempio precedente inferiore a 5°C.

Sovrappressione per esplosione

Nella tabella riportata alla pagina seguente sono riportati valori di sovrappressione ed i relativi danni potenziali.

4. CONSIDERAZIONI PRELIMINARI SULL'EFFETTO DOMINO

Analizziamo ora le varie tipologie di scenario incidentale e cerchiamo di definire per ciascuna di esse quale sia la probabilità che possa generare un effetto domino.

Nella tabella seguente sono riportati, per ciascuno scenario, le considerazioni alla base della nostra analisi.

Incendio di pozza (POOL FIRE)

Questo è probabilmente l'evento più rappresentativo per lo studio di un effetto domino. Infatti l'eventualità che un oggetto si trovi all'interno delle fiamme o nelle immediate vicinanze suggerisce intuitivamente la possibilità che venga danneggiato. Chiaramente nei due casi (oggetto avvolto dalle fiamme oppure posto ad una certa distanza) la trasmissione del calore ed i fenomeni conseguenti presentano significative differenze.

Getto incendiato (JET FIRE)

La caratteristica principale di questo evento è legata alla sua geometria. Dato che il getto ha dimensioni piuttosto limitate (rispetto ad esempio a quelle di una pozza generata da un rilascio equivalente) la sua caratteristica è quella di generare un irraggiamento che decresce in modo estremamente rapido allontanandosi dallo stesso. La possibilità di danno è quindi limitata agli oggetti che vengano direttamente investiti dalla fiamma.

Incendio di nubi di vapori (FLASH FIRE)

La caratteristica determinante di questo evento è la durata molto limitata. Non è ipotizzabile alcuna trasmissione significativa (cioè in grado di danneggiare apparecchiature o strutture metalliche) di calore per irraggiamento. L'unica possibilità è l'estensione dell'incendio ad altro materiale infiammabile eventualmente presente ed esposto alla fiamma del Flash Fire.

Ai fini dell'effetto domino questo evento non verrà preso in considerazione, in quanto si suppone che in aree di impianto venga accuratamente evitata qualunque presenza di materiale infiammabile o combustibile in prossimità di apparecchiature contenenti sostanze pericolose.

FIREBALL

Come già mostrato al paragrafo precedente il fireball, in analogia al flash Fire, potrebbe comportare effetto domino solo in presenza di materiale infiammabile non adeguatamente protetto.

BLEVE (proiezione di frammenti)

I rischi connessi con questo evento sono legati alla possibilità di proiezione di frammenti. La legislazione per questo evento fornisce indicazioni piuttosto vaghe, indicando alcune distanze standard da considerare indipendentemente dalla tipologia di apparecchiatura o recipiente coinvolto e dalla quantità di prodotto presente.

In realtà per avere una idea chiara della potenziale evoluzione dell'evento bisognerebbe prendere in considerazione un grande numero di parametri, quali ad esempio la massa di prodotto coinvolto e la geometria del recipiente: è ben noto che sfere di grosse dimensioni tendono a rompersi in pochi frammenti di grosse dimensioni, che ricadono nelle immediate vicinanze delle stesse, mentre recipienti di forma allungata (quali i sigari) tendono a perdere una delle calotte e ad essere proiettati a distanze significative a causa dell'effetto di quella che può essere paragonata ad una propulsione a reazione.

Il rischio maggiore è comunque legato alla possibilità di formazione di frammenti di dimensioni piuttosto piccole, ma dotati di una elevata energia cinetica ed in grado quindi di percorrere anche grandi distanze. Anche in questo caso tuttavia sarebbe necessario stabilire l'effettiva possibilità che possono avere questi frammenti di incontrare sul proprio percorso elementi sensibili.

Effetti di sovrappressione su componenti di impianto	Sovrappressione. (Atm)	EFFETTO
Caldaia	0,14	Incrinatura mattoni
Caldaia	0.17	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Caldaia	0.34	L'unità è ribaltata o distrutta
Colonna di estrazione	0.44	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Colonna di estrazione	0.68	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Colonna di estrazione	0.82	L'unità è ribaltata o distrutta
Colonna di frazionamento	0.37	Deformazione della struttura
Colonna di frazionamento	0.48	L'unità è ribaltata o distrutta
Filtro	0.14	Danno causato da proiezione di frammenti
Filtro	0.65	Spostamento unità rispetto fondamenta
Filtro	0.82	L'unità è ribaltata o distrutta
Motore elettrico	0.34	Danno causato da proiezione di frammenti
Motore elettrico	0.61	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Motore elettrico	1.50	Spostamento unità rispetto fondamenta
Pompa	0.82	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Pompa	1.09	Spostamento unità rispetto fondamenta
Reattore chimico	0.14	Rottura finestre e misuratori
Reattore chimico	0.27	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Reattore chimico	0.44	Deformazione della struttura
Reattore chimico	0.61	L'unità è ribaltata o distrutta
Reattore incrinato	0.24	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Reattore incrinato	0.48	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Reattore incrinato	0.82	L'unità è ribaltata o distrutta
Rec. a pressione: orizzontale	0.41	Deformazione della struttura
Rec. a pressione: orizzontale	0.41	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Rec. a pressione: orizzontale	0.41	L'unità è ribaltata o distrutta
Rec. a pressione: verticale	0.82	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Rec. a pressione: verticale	0.95	L'unità è ribaltata o distrutta
Rigeneratore di calore	0.20	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Rigeneratore di calore	0.34	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Rigeneratore di calore	0.34	Deformazione della struttura
Rigeneratore di calore	0.51	L'unità è ribaltata o distrutta
Scambiatore di calore	0.51	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Scambiatore di calore	0.61	L'unità è ribaltata o distrutta
Serb. con tetto conico	0.07	Collasso del tetto
Serb. con tetto conico	0.20	Innalzamento unità (semipiena)
Serb. con tetto conico	0.44	Innalzamento unità (riempita 0.9)
Serb. con tetto galleggiante	0.20	Innalzamento unità (semipiena)
Serb. con tetto galleggiante	0.44	Innalzamento unità (riempita 0.9)
Serb. con tetto galleggiante	1.36	Collasso del tetto
Serb. sferico	0.54	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Serb. sferico	0.95	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Serb. sferico	1.09	L'unità è ribaltata o distrutta
Strum. ausiliaria: contatore gas	0.31	Danni al rivestimento
Strum. ausiliaria: regol. gas	0.41	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Strum. ausiliaria: regol. gas	0.68	Danno ai dispositivi di controllo
Strum. ausiliaria: regol. gas	0.68	Danni al rivestimento
Strum. ausiliaria: trasf.	0.31	Danno causato da proiezione di frammenti
Strum. ausiliaria: trasf.	0.51	Spostamento dell'unità e rottura tubazioni
Strum. ausiliaria: trasf.	0.68	L'unità è ribaltata o distrutta
Supporti tubazioni	0.24	Deformazione della struttura
Supporti tubazioni	0.41	Rottura tubazioni
Supporti tubazioni	0.41	Collasso della struttura
Torre di raffreddamento	0.03	Caduta grate di ventilazione a 0.204 – 0.340 atm
Torre di raffreddamento	0.14	Danni alle parti interne
Torre di raffreddamento	0.24	Collasso della struttura
Turbina a vapore	0.82	Danno ai dispositivi di controllo
Turbina a vapore	0.95	Rottura tubazioni
Turbina a vapore	1.36	Spostamento unità rispetto alle fondamenta
Ventilatore	034	Danni al rivestimento
Ventilatore	0.68	L'unità è ribaltata o distrutta

(serbatoio, apparecchiature o altro) e di urtarli con energia sufficiente. Non riteniamo che questa valutazione possa venire svolta identificando un numero limitato di parametri (come ad esempio nel caso del POOL FIRE, irraggiamento e tempo di esposizione), ma che il problema vada affrontato caso per caso effettuando analisi ad hoc.

E' necessario inoltre sottolineare un altro aspetto.

Entro Dicembre 2002, ai sensi del Decreto Ministeriale del 13/10/1994, *Approvazione della regola tecnica di prevenzione incendi per la progettazione, la costruzione, l'installazione e l'esercizio dei depositi di G.P.L. in serbatoi fissi di capacità complessiva superiore a 5 m³ e/o in recipienti mobili di capacità complessiva superiore a 5.000 kg*, tutti gli stoccaggi di GPL fuori terra dovranno essere dotati di coibentazione resistente al fuoco oppure sostituiti da serbatoio interrati, proprio per scongiurare il verificarsi di tale evento. Di conseguenza, qualora i serbatoi siano classificabili di categoria "A" ai sensi del citato DM 15/05/1996, Appendice II (ed il requisito essenziale per ricadere in questa categoria è appunto la dotazione di un sistema di coibentazione resistente al fuoco), il BLEVE del recipiente e successivo Fireball potranno essere considerati eventi "non ragionevolmente ipotizzabili". Questo scenario sarà quindi molto meno frequente negli impianti Italiani.

U.V.C.E. Esplosione non confinata

La caratteristica fondamentale di tale evento è la generazione di onde di sovrappressione che possono investire altre apparecchiature o unità di impianto poste nelle vicinanze.

Il primo aspetto da sottolineare è che gli idrocarburi presenti nell'industria petrolifera non hanno energie di legame sufficienti a generare onde di sovrappressione superiore ad 1 bar. Questo è un aspetto fondamentale, perché implica che gli effetti devastanti comunemente associati alle esplosioni (ad esempio di TNT, trinitrotoluolo, o altri) non sono ipotizzabili per l'industria petrolchimica o comunque ove non siano presenti sostanze dalle caratteristiche particolari.

Per quel che riguarda le sovrappressioni generate da nubi di vapori di idrocarburi, è possibile osservare che la diminuzione dell'energia dell'onda in funzione della distanza è piuttosto rapida, e nella maggior parte dei casi scende sotto gli 0,3 ÷ 0,6 bar a distanze brevi dal centro dell'evento.

Inoltre, come evidenziato nelle tabelle riportate al capitolo 3, gli effetti di onde di sovrappressione pari a 0,3 ÷ 0,6 bar non provocano la distruzione o il danneggiamento grave dell'apparecchiatura, ma implicano piccoli spostamenti o oscillazioni che comportano potenziali danni alle tubazioni connesse con la stessa e vincolate a supporti rigidi.

Dispersione di sostanze tossiche

In questo studio si considerano solo gli effetti diretti alle cose. In caso di rilascio di sostanze tossiche il potenziale aggravamento della situazione potrebbe essere conseguente al coinvolgimento di personale intento a compiti particolari, quali ad esempio il controllo del riempimento di una Autobotte. Questo tipo particolare di effetto, di per se estremamente remoto, visto che implica la concomitanza di condizioni particolari, non è stato preso in considerazione.

TABELLA RIEPILOGATIVA: Possibilità di effetto domino

EVENTO	POSSIBILITÀ DI EFFETTO DOMINO
Incendio di pozza (POOL FIRE)	Si per irraggiamento > 12,5 kW/m²
Getto incendiato (JET FIRE)	Si all'interno del getto
Incendio di nubi di vapori (FLASH FIRE)	NO
FIREBALL	NO (solo eventuale innesco di altro materiale combustibile)
BLEVE (proiezione di frammenti)	Si Evento da studiare caso per caso
U.V.C.E. Esplosione non confinata	Si sovrappressione > 0,3 bar
Dispersione di sostanze tossiche	NO

5. CRITERI DI ESCLUSIONE

E' ora possibile fare alcune considerazioni, sia di carattere generale che specifico, che consentono di escludere dall'analisi, che altrimenti potrebbe dimostrarsi un'opera faraonica, ad esempio se pensiamo al numero di eventi ipotizzabili per una Raffineria o un impianto petrolchimico di notevoli dimensioni, alcuni eventi che, sulla base di quanto già esposto, hanno una probabilità trascurabile di poter generare un effetto domino.

Incendio di pozza (POOL FIRE)

Come descritto ai paragrafi precedenti, in caso di esposizione ad un irraggiamento pari a 12,5 kW/m², è necessario un periodo di tempo significativo prima che il metallo raggiunga le temperature di cedimento plastico. Tale periodo è stimabile nell'ordine dei 20 minuti per le apparecchiature che contengono sostanze allo stato liquido in grado quindi di assorbire una notevole quantità di calore. Di conseguenza i Pool Fire di durata inferiore a 20 minuti non saranno presi in considerazione.

Getto incendiato (JET FIRE)

Apparecchiature tipiche delle raffinerie e delle industrie petrolchimiche sono le colonne di distillazione. Esse hanno la caratteristica di presentarsi quali recipienti cilindrici verticali, di altezza anche notevole, che sovente sovrastano le altre apparecchiature dell'impianto: scambiatori, ricevitore, condensatori, ribollitori, pompe, ecc. sono solitamente posti a livelli molto inferiori.

Quindi, salvo casi particolari, i Jet Fire con origine alla sommità delle colonne non verranno presi in considerazione visto che risulta estremamente improbabile che possano coinvolgere oggetti posti molto più in basso.

6. STIME DELLE FREQUENZE DI ACCADIMENTO

Sulla base di quanto descritto al capitolo precedente è possibile associare agli eventi ed alle relative soglie di danno una fattore che tiene conto della possibilità di coinvolgimento di altre apparecchiature: i risultati sono descritti nella tabella sottostante.

Scenario	note	fattore
Incendio di pozza	Apparecchiatura avvolta dalle fiamme	1
	Apparecchiatura posta tra il limite delle fiamme e la distanza corrispondente alla soglia di 12,5 kW/m ² . Si tiene conto anche del tempo necessario al manifestarsi di danni significativi ed alla possibilità di intervenire da posizione sicura raffreddando l'apparecchiatura stessa	0,1
	Apparecchiatura esposta ad irraggiamento inferiore a 12,5 kW/m ²	0
JET-FIRE	E' necessario considerare che, all'interno della sfera di raggio pari alla lunghezza del getto, lo stesso possiede due gradi di libertà. E' necessario quindi tenere in conto che la probabilità che un oggetto all'interno della sfera venga investito dal getto è pari al rapporto tra la superficie dell'oggetto stesso, il diametro del getto in corrispondenza dell'apparecchiatura e la superficie della sfera.	0,01
	Apparecchiatura a distanza superiore alla lunghezza del getto	0
	U.V.C.E.	All'interno dell'area con sovrappressione superiore a 0,6 bar
	Area con sovrappressione compresa tra 0,3 e 0,6	0,1
	Area con sovrappressione inferiore a 0,3 bar	0

Chiaramente la valutazione di un evento in base alla sua "credibilità" (evento ragionevolmente ipotizzabile) viene effettuata secondo gli stessi criteri adottati nell'analisi di rischio, ad esempio nella stesura del rapporto di sicurezza.

In particolare TRR valuta come ragionevolmente ipotizzabili gli eventi con frequenza di accadimento superiore a $1 \cdot 10^{-6}$.

La frequenza di accadimento di un evento “secondario” (cioè quello conseguente all’effetto domino) verrà valutata quindi come prodotto tra la frequenza di accadimento dell’evento primario ed i fattori definiti nella tabella soprastante.

Se la frequenza risulta superiore a $1 \cdot 10^{-6}$ si prosegue l’analisi, altrimenti l’evento non viene quantificato.

7. STIMA DEGLI EFFETTI

Una volta stabilito che uno scenario “secondario” risulta ragionevolmente ipotizzabile si può procedere alla valutazione delle conseguenze.

Le conseguenze degli eventi “secondari” sono state analizzate e quantificate con gli stessi criteri e modelli di calcolo utilizzati per la stesura dei Rapporto di Sicurezza ex art. 8 D.Lgs. 334/99.

Le assunzioni fatte per la valutazione delle conseguenze degli effetti secondari sono sintetizzate nella tabella sottostante.

Parametri per termine sorgente		
Scenario	Parametri	Note
POOL FIRE	Ø = Diametro Flangia S = Spessore apertura	Per le apparecchiature che ricadono nell’area di impatto si ipotizza il surriscaldamento dei bulloni, un allungamento degli stessi, e una perdita della tenuta della flangia per uno spessore di 3 mm lungo un terzo della circonferenza totale.
U.V.C.E.	Ø = Diametro Flangia S = Spessore apertura	Anche se la fenomenologia è significativamente diversa, per quantificare il rilascio si fa riferimento agli stessi parametri del caso precedente. In questo caso il cedimento in campo elastico dei bulloni è dovuto all’onda di sovrappressione ed all’eventuale spostamento indotto dalla stessa sull’apparecchiatura.
JET FIRE	Ø = Diametro getto	Si ipotizza che la parte di metallo a contatto con la fiamma possa essere surriscaldata fino a pervenire nella zona duttile (circa 400°C). Questa eventualità è estremamente remota, sia per la instabilità della fiamma (che oscilla) sia per il rapido decadimento della stessa in seguito a depressurizzazione. Cautelativamente il diametro del foro viene assunto pari al diametro del getto nel punto in cui lambisce l’apparecchiatura.

8. APPLICAZIONI

La metodologia descritta è già stata applicata da TRR a diverse realtà sul territorio Italiano, sia con la finalità di realizzare Piani d’area che nella assistenza alle Autorità di protezione civile per la stesura di Piani di emergenza Esterni di poli industriali:

Polo Industriale di S. Martino di Trecate (NO)	Piano di Emergenza Esterna
Polo Industriale di Brindisi	Piano d’area
Polo industriale di Viaggiano (PZ)	Piano di Emergenza Esterna
Polo industriale di Terni	Piano di Emergenza Esterna
Polo industriale di Augusta / Priolo	Piano d’area (*)
(*) Collaborazione con Ministero degli Interni	

9. APPLICAZIONE AD UNA RAFFINERIA

I criteri definiti sono stati applicati in modo sistematico ad una grande raffineria italiana.

Degli oltre trecento scenari incidentali individuati nel Rapporto di Sicurezza (ai sensi del D.Lgs. 334/99), solo 36 sono risultati potenziali sorgenti di effetto domino secondo i criteri adottati.

La tabella alla pagina seguente mostra per ciascuno dei 36 scenari analizzati, la tipologia di rilascio, l’evento finale, la distanza di danno per effetto domino. In grigio sono evidenziati gli scenari che potrebbero coinvolgere altre apparecchiature per effetto domino.

#	Tipologia apparecchiatura	Tipo di rilascio	Scenario	Distanza di danno (m)	App. coinvolte
1	Separatore	A.F. fondo separatore	POOL FIRE	12/22 n	Ricevitore e scambiatori
2	colonna	A.F. testa colonna	U.V.C.E.	20	NESSUNA
3	colonna	A.F. testa colonna	JET FIRE	0,65	NESSUNA
4	colonna	A.F. testa colonna	JET FIRE	0,56	NESSUNA
5	colonna	A.F. fondo colonna	POOL FIRE	6/16 n	scambiatori
6	colonna	A.F. testa colonna	JET FIRE	0,7	NESSUNA
7	scambiatore	rottura tubi Air Fin Cooler	JET FIRE	7	NESSUNA
8	scambiatore	A.F. linea vapori da reboiler a colonna	JET FIRE	0,66	NESSUNA
9	scambiatore	rottura tubi	JET FIRE	9,2	NESSUNA
10	colonna	A.F. testa colonna	JET FIRE	0,54	NESSUNA
11	Ricevitore	A.F. ingresso drum	JET FIRE	0,6	NESSUNA
12	Ricevitore	A.F. fondo ricevitore	U.V.C.E.	16	ricevitori
13	colonna	A.F. testa colonna	JET FIRE	0,55	NESSUNA
14	colonna	A.F. fondo colonna	JET FIRE	0,4	NESSUNA
15	colonna	Rottura linea fuel gas in uscita	JET FIRE	4,9	colonna
16	colonna	A.F. fondo colonna	U.V.C.E.	17	Colonne, ricevitori e scambiatori
17	colonna	A.F. testa colonna	JET FIRE	0,5	NESSUNA
18	colonna	A.F. testa colonna	JET FIRE	0,55	NESSUNA
19	ricevitore	A.F. uscita reattore	POOL FIRE	9/21 n	Ricevitori e scambiatori
20	colonna	A.F. testa colonna	JET FIRE	0,7	NESSUNA
21	colonna	A.F. testa colonna	JET FIRE	0,46	NESSUNA
22	colonna	A.F. testa colonna	JET FIRE	0,6	NESSUNA
23	colonna	A.F. fondo colonna	POOL FIRE	3/8 n	NESSUNA
24	colonna	A.F. fondo colonna	POOL FIRE	4/10 n	Solo Gambe colonne protette da fire-proofing
25	Ricevitore	A.F. testa ricevitore	JET FIRE	0,54	NESSUNA
26	Ricevitore	A.F. linea make-up	POOL FIRE	3/14 n	NESSUNA
37	Ricevitore	A.F. testa polmone carica	JET FIRE	0,53	NESSUNA
28	Filtri	A.F. linea lavaggio propano	U.V.C.E.	6	NESSUNA
29	Ricevitore	A.F. fondo ricevitore	POOL FIRE	5/10 n	Ricevitore e pompe
30	scambiatore	testata scambiatore	U.V.C.E.	15	scambiatori
31	Ricevitore	A.F. fondo accumulatore	POOL FIRE	4/18 n	NESSUNA
32	Ricevitore	A.F. testa separatore	JET FIRE	0,55	NESSUNA
33	Ricevitore	A.F. testa separatore	JET FIRE	0,53	NESSUNA
34	compressori	rottura tenuta	JET FIRE	0,95	NESSUNA
35	reattore	A.F. uscita reattore	POOL FIRE	17/30 n	ricevitori
36	pompe	rottura tenuta	U.V.C.E.	3	Pompe stesse

NOTE A.F. Accoppiamento flangiato

Per lo scenario Pool Fire sono riportate il diametro della pozza e la soglia di 12,5 kW/m²;

Per lo scenario Jet Fire è indicata la lunghezza del getto;

Per lo scenario U.V.C.E. è indicata la distanza corrispondente a 0,3 bar.

Nella tabella sottostante sono riepilogati gli scenari incidentali primari e quelli secondari, in modo da rendere comparabili le entità delle conseguenze.

#	Tipologia Apparecc.	Tipologia Scenario	Frequenza [occ/anno]	Soglia Eff Domino[m]	Freq. Eff. Domino [occ/anno]	Apparecch. coinvolta	Tipologia Scenario	I Soglia [m]
1	Separatore	Pool Fire	$7,2 \cdot 10^{-5}$	12 m diam. pozza	$7,2 \cdot 10^{-6}$	Accumulatore e scambiatori	Pool Fire	30
						scambiatore	Jet Fire	2
2	colonna	Pool Fire	$9,5 \cdot 10^{-5}$	6 m diam. Pozza	$9,5 \cdot 10^{-6}$	scambiatore	Pool Fire	30 m
						scambiatore	Jet Fire	1 m
3	Ricevitore	U.V.C.E.	$2,7 \cdot 10^{-3}$	16 m	$2,7 \cdot 10^{-4}$	accumulatore	Jet Fire	0,8 m
4	colonna	JET FIRE	$2,2 \cdot 10^{-2}$	4,9 m	$2,2 \cdot 10^{-4}$	colonna	Jet Fire	5,1 m
5	colonna	U.V.C.E.	$1,6 \cdot 10^{-6}$	17 m	$1,6 \cdot 10^{-7}$	--	--	--
6	ricevitore	Pool Fire	$1,7 \cdot 10^{-5}$	9 m diam. Pozza	$1,7 \cdot 10^{-6}$	accumulatore	Jet Fire	5,2 m
7	Ricevitore	Pool Fire	$1,5 \cdot 10^{-4}$	5 m diam. Pozza	$1,5 \cdot 10^{-5}$	--	--	--
8	scambiatore	U.V.C.E.	$3,2 \cdot 10^{-5}$	15 m	$3,2 \cdot 10^{-6}$	scambiatori	Jet Fire	4,1 m
9	reattore	Pool Fire	$2,1 \cdot 10^{-3}$	17 m diam. pozza	$2,1 \cdot 10^{-4}$	accumulatore	Pool Fire	16 m
						accumulatore	Jet Fire	7,3
						accumulatore	Jet Fire	1,2

10. CONCLUSIONI

La metodologia descritta può permettere di:

- individuare le possibili evoluzioni degli scenari per effetto domino, indicando le protezioni disponibili per evitarne l'accadimento;
- stimare la frequenza di accadimento di ciascun effetto domino;
- stimare l'entità degli effetti conseguenti allo scenario secondario

Alla luce dell'analisi effettuata è possibile concludere che:

- scenari incidentali possono dare origine per effetto domino ad scenari secondari che possono presentare tipologie diverse (ad esempio Pool Fire che provoca Jet Fire);
- anche se l'evoluzione dello scenario iniziale può comportare una tipologia di effetti diversi, nella maggior parte dei casi gli scenari secondari comportano un marginale aggravamento di quello primario, senza impedire le possibilità di intervento sia dal punto di vista impiantistico che di quello di gestione dell'emergenza in campo (squadra di emergenza);
- per un numero significativo di casi, la seconda perdita accelera il processo di depressurizzazione o svuotamento delle apparecchiature comprese tra medesime valvole di blocco;

Viene quindi confermato quanto già espresso in molte sedi, e cioè che in linea di principio l'estensione del secondo scenario di incidente "trasla" l'area interessata dagli effetti dall'apparecchiatura sorgente verso quella coinvolta, senza aumentare in modo significativo l'estensione delle aree di impatto.