UNA PROPOSTA PER LA VALUTAZIONE SEMPLIFICATA DEGLI EFFETTI DOMINO

Ing. FRANCESCO FAZZARI
Direzione Regionale VV.F. Sicilia - Via M. Stabile 160 – 90134 Palermo

P.I. VINICIO ROSSINI/Ing. PIERA CARLI
TECSA S.p.A. - Via Figino 101 - 20016 Pero (Milano)

SOMMARIO

L'obbligo di considerare situazioni che possono comportare effetti domino in relazione a quanto previsto dall'art. 12 del D.Lgs. 334/99, nonché le analisi richieste nella redazione del rapporti di sicurezza delle attività a rischio di incidente rilevante, pongono in termini espliciti la necessità di effettuare una corretta identificazione e valutazione degli eventi primari e di determinare la probabilità che eventuali effetti secondari (domino) possano verificarsi.

Il Decreto Ministero Ambiente e Tutela del Territorio "Criteri per l'individuazione e la perimetrazione di aree ad elevata concentrazione di stabilimenti soggetti al D.Lgs. 334/99 e per la predisposizione e la valutazione dello studio di sicurezza integrato", in corso di emissione, definisce i criteri analitici per la stima degli effetti domino, tra i quali assume rilevante importanza anche la durata dell'evento primario (incendio) che può comportare il coinvolgimento nelle fiamme/irraggiamento termico critico di apparecchiature e/o strutture.

Poiché la metodologia proposta costituisce pur sempre una semplificazione dei fenomeni fisici, che sono sempre più complessi di quelli che è possibile schematizzare, risulta di estrema importanza, una accurata e puntuale analisi sia degli eventi primari che delle variabili (impiantistiche e gestionali) che concorrono in modo diretto o indiretto al verificarsi del fenomeno.

Per quanto attiene agli effetti domino causati da irraggiamento riveste particolare importanza, per la possibile evoluzione del fenomeno, anche la definizione dell'effettiva durata dell'evento.

La presente relazione si propone di esaminare la metodologia prevista per l'attribuzione delle probabilità degli effetti domino causati da irraggiamento termico, mediante:

a) l'identificazione, anche sulla base di una "case histories", dei diversi parametri che possono influenzare la durata di un incendio;
b) l'analisi di come tali parametri possono essere utilizzati nell'ambito della modellazione dell'incendio mediante l'ausilio di codici di calcolo testati;
c) il confronto tra i risultati forniti dal modello con il caso reale;
d) l'individuazione degli eventuali scostamenti e le relative cause allo scopo di verificare la stima della durata degli incendi primari, per l'assegnazione delle probabilità degli effetti domino.

1. ANALISI DEI POSSIBILI EFFETTI DOMINO

L'analisi in oggetto prevede lo studio degli effetti di propagazione degli scenari incidentali individuati su parti d'impianto e/o sugli impianti limitrofi, dovuti essenzialmente al mancato intervento e/o inefficacia delle misure di sicurezza attive e passive previste, oppure all'entità degli effetti dell'evento primario.

Per l'analisi degli effetti domino viene adottato l'approccio metodologico proposto in allegato 1 – punto 4 della bozza del DM Ambiente e della Tutela del Territorio "Criteri per l'individuazione e la perimetrazione di aree ad elevata concentrazione di stabilimenti soggetti al Decreto Legislativo 17 Agosto 1999, n. 334, e per la predisposizione e la valutazione dello studio di sicurezza integrato".

In particolare, l'approccio metodologico citato indica come punto particolarmente critico nella valutazione dell'effetto domino la necessità di stimare la probabilità che, dato un determinato effetto fisico su di un obiettivo vulnerabile, si abbia effettivamente il danno ipotizzabile, ovvero, in altri termini, la probabilità di effetto domino, dato l'evento sorgente. Ai fini di tale stima vengono utilizzati i dati specifici per la situazione in esame, così come valutati dai gestori in base a quanto espresso nei Rapporti di Sicurezza

ovvero in altra documentazione analitica pertinente. Eventuali significativi scostamenti da quanto normalmente reperibile, per situazioni analoghe, da fonti autorevoli, deve trovare esplicita espressione e giustificazione, ad esempio per la presenza di particolari sistemi di protezione attivi e/o passivi ovvero di provvedimenti gestionali specifici.

Salva l'esigenza di effettuare comunque le verifiche sopra dette e, in particolare, nel caso di indisponibilità di dati specifici riconducibili alla situazione contingente ovvero di significative incertezze nelle valutazioni analitiche possibili, l'approccio metodologico citato riporta le assunzioni indicative da utilizzare per la stima delle probabilità.

Nella tabella seguente, sono riportate le probabilità di effetto domino per irraggiamento termico, in funzione dell'effetto della sorgente su un possibile obiettivo.

Applicando la probabilità di effetto domino alle frequenze di accadimento degli scenari incidentali ipotizzati, si desume la possibilità che si possano verificare effetti domino.

Tabella 1. Le probabilità di effetto domino in funzione dell'effetto

Effetto sorgente	**Probabilità di effetto domino**	**Nota**
Ingolfamento in fiamma da jet fire con durata ≤ 5 minuti	0	
Ingolfamento in fiamma da jet fire con durata tra 5 e 10 minuti	0.5	
Ingolfamento in fiamma da jet fire con durata > 10 minuti	1	
Irraggiamento superiore a 37,5 kW/m² o ingolfamento in fiamma da pool fire con durata inferiore a 10 minuti	0	1
Irraggiamento superiore a 37,5 kW/m² o ingolfamento in fiamma da pool fire con durata superiore a 10 minuti (per obiettivi come serbatoi atmosferici)	1	2
Irraggiamento superiore a 37,5 kW/m² o ingolfamento in fiamma da pool fire con durata superiore a 10 minuti (per obiettivi come serbatoi pressurizzati e tubazioni)	0.5	2
Irraggiamento superiore a 37,5 kW/m² con durata superiore a 20 minuti	1	2
Irraggiamento inferiore a 12,5 kW/m²	0	1
Irraggiamento tra 12,5 kW/m² e 37,5 kW/m² con durata inferiore a 10 minuti	0	1
Irraggiamento tra 12,5 kW/m² e 37,5 kW/m² con durata superiore a 10 minuti	Vedi nota 4	3
Irraggiamento tra 12,5 kW/m² e 37,5 kW/m² con durata superiore a 20 minuti	Vedi nota 4	3

Note alla tabella:

1. Salvo i casi in cui sia ipotizzabile una propagazione dell'incendio a causa di materiale strutturale o componentistico infiammabile (es. pannellature di materiale plastico, ecc.), ovvero un danneggiamento di componenti particolarmente vulnerabili (es. recipienti o tubazioni in vetroresina, serbatoi o tubazioni con rivestimenti plastici, ecc.)
2. Nel caso in cui siano presenti sistemi di protezione attivi (raffreddamento) automatici o manuali, aventi probabilità P di mancato intervento su domanda o di inefficacia per tutta la durata dell'effetto sorgente, le probabilità di effetto domino vanno moltiplicate per P.
3. Nel caso in cui siano presenti sistemi di protezione passiva (fire proofing, interramento,barriere tagliafiamme) le probabilità di effetto domino sono trascurabili per durata dell'effetto fisico pari o inferiore a quello eventuale di resistenza del sistema.
4. Probabilità interpolata linearmente rispetto alle probabilità corrispondenti ai due estremi del valore di irraggiamento

Per la valutazione dei possibili effetti domino derivanti dai top event considerati nell'ambito dell'analisi di rischio, si procede come di seguito schematizzato:

1) Selezione dei Top Event che danno luogo ad irraggiamenti termici stazionari (pool fire / jet fire) e/o variabili (fireball);
2) Per l'evento pool fire:
   a. Valutazione della durata dell'incendio
   b. Per gli incendi di pozza di durata superiore a 10 minuti:
      - Identificazione delle apparecchiature / strutture coinvolte dalle fiamme (ingolfamento)
      - Identificazione delle apparecchiature soggette ad un irraggiamento compreso tra 12,5 e 37,5 kW/m²
      - Identificazione dei sistemi di protezione attiva e/o passiva presenti o previsti, a protezione delle apparecchiature di cui ai precedenti punti

- Valutazione della frequenza di accadimento relativa all'evento effetto domino, a partire dalla frequenza di accadimento dell'evento primario (per esempio sovrapressione, sovratemperatura, rottura casuale tubazione, ecc.), considerando, ove applicabile:
- La probabilità di innesco immediato della sostanza rilasciata;
- La probabilità di mancata intercettazione in tempi rapidi;
- la probabilità di mancato intervento dei sistemi di protezione attiva presenti (rivelazione gas/incendi, sistemi di raffreddamento fissi ad acqua o a schiuma, ecc);
- la probabilità di effetti domino, desunta dalle "note esplicative all'applicazione dei criteri di attribuzione delle probabilità di effetto domino per irraggiamento".

3) Per l'evento jet fire:
   a. Valutazione della durata del getto
   b. Per i getti incendiati di durata superiore a 5 minuti:
      - Identificazione delle apparecchiature / strutture coinvolte dal dardo di fuoco (ingolfamento)
      - Identificazione delle apparecchiature soggette ad un irraggiamento compreso tra 12,5 e 37,5 kW/m²
      - Identificazione dei sistemi di protezione attiva e/o passiva presenti o previsti, a protezione delle apparecchiature di cui ai precedenti punti
      - Valutazione della frequenza di accadimento relativa all'evento effetto domino, a partire dalla frequenza di accadimento dell'evento primario (per esempio sovrapressione, sovratemperatura, rottura casuale tubazione, ecc.), considerando, ove applicabile:
        La probabilità di innesco immediato della sostanza rilasciata;
        La probabilità di mancata intercettazione in tempi rapidi;
        la probabilità di mancato intervento dei sistemi di protezione attiva presenti (rivelazione gas/incendi, sistemi di raffreddamento fissi ad acqua, ecc);
        la probabilità di effetti domino, desunta dalle "note esplicative all'applicazione dei criteri di attribuzione delle probabilità di effetto domino per irraggiamento".

Considerando quanto riportato in [5], l'utilizzo delle soglie precedenti fa parte di un approccio cosiddetto di tipo "*deterministico*", secondo il quale tubazioni, serbatoi o apparecchiature di processo, coinvolti in un incidente con effetto fisico superiore alle soglie suddette, arrivano al collasso in tempi molto brevi.

Questo approccio è cautelativo, se si considera che le soglie prese a riferimento per l'effetto domino sono quelle "minime" di danno, nel senso che, appena al di sopra di queste, solamente i componenti più vulnerabili subiscono danno, mentre, dalla letteratura sul tema, ben più elevati risultano i limiti per serbatoi e grosse apparecchiature di processo. In questo modo, si assegna una probabilità unitaria a tutte le apparecchiature situate nell'area in cui si hanno effetti fisici superiori a quelli del valore di soglia, per lo scenario considerato. Allo stesso modo, le unità esterne all'area hanno probabilità nulla di danno.

Naturalmente, un approccio di questo genere non tiene conto del fatto che le strutture soggette a irraggiamento non collassano quasi istantaneamente, ma a seconda dell'energia termica assorbita e del tempo in cui sono sottoposte a questa esposizione e della geometria delle stesse. E' quindi necessario prendere in considerazione il tempo di esposizione delle struttura a un determinato irraggiamento, legandolo all'energia e al calore assorbito. Risulta intuitivo che il cedimento di serbatoi, tubazioni e apparecchiature di processo possa avvenire sia con esposizione intensa per brevi periodi, ma anche con un irraggiamento debole, per un lasso di temporale prolungato. Per questo motivo, il "tempo di cedimento" è un concetto molto importante e da prendere in considerazione in questo tipo di analisi.

Per una più approfondita analisi dell'effetto domino occorre focalizzare l'attenzione anche sui seguenti punti:

- individuazione dei soli bersagli che possono incrementare le conseguenze incidentali;
- calcolo della probabilità con cui questi possono venire investiti dall'incidente sorgente;
- valutazione del modo e della probabilità di cedimento.

Per giungere ad un certo grado di dettaglio nell'analisi occorre, quindi, approfondire alcuni concetti attualmente trascurati, come ad esempio l'esame più dettagliato dell'incidente primario.

2. INDAGINE STORICA “CASE HISTORIES”

La ricerca storica è stata condotta al fine di poter individuare informazioni significative circa i parametri che possono influenzare la durata di un incendio reale.

Di seguito si riporta un estratto dell’analisi condotta [1][2][3], con particolare riferimento al comportamento dei sistemi di mitigazione attivi e/o passivi in caso di incendio.

2.1 Incendio, 18 Agosto 1984, Porto Marghera (VE) – ITALIA, fonte 2

[...] a) Gravi danni subiti principalmente dal sistema delle tubazioni e da tutte le strutture metalliche esposte alle fiamme con:
- scoppio di alcune tubazioni adiacenti il luogo dell’incendio (forno B 108) e conseguente fuoriuscita di prodotto;
- scoppio, dopo 10 min, della transfer-line posta a 10 m dal suolo e fuoriuscita del prodotto.

b) Distruzioni gravissime ai rivestimenti dei forni coinvolti nell’incendio
Raffreddamento delle strutture con lance a getto frazionato e spegnimento con schiuma del liquido che fuoriesce. Questa opera evita il collasso delle strutture.

g) Continuo raffreddamento delle strutture per parecchie ore nel timore della presenza di residui di liquido infiammabile [...]

Evidenza: Danneggiamenti dovuti a scoppio e fire-impingement

2.2 Incendio, 2 Febbraio 1984, Porto Marghera (VE) - ITALIA, fonte 2

[...] a) Una vasta superficie della colonna, nel lato Sud-Est risulta messa a nudo a causa della fusione del mantello in lamierino di alluminio che sostiene il coibente (lana di roccia) con corrispondente crollo di quest’ultimo, in parte al suolo ed in parte sulla passerella. Stessa sorte ha subito il materiale di coibentazione che protegge le tubazioni nella zona interessata dall’incendio.

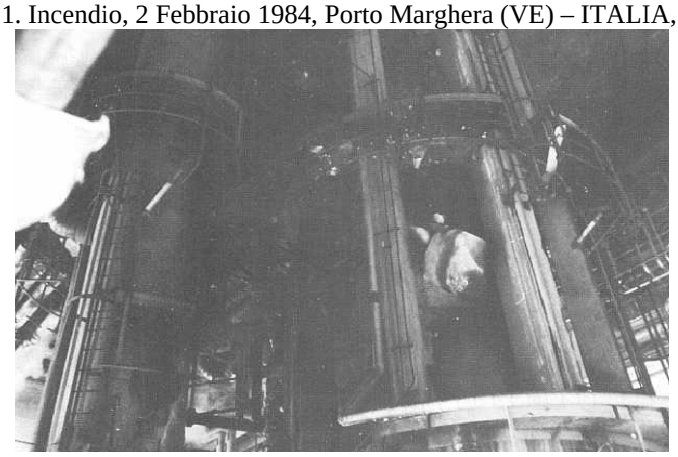
b) Lesioni superficiali, causate soprattutto dallo shock termico conseguente l’azione di spegnimento, si sono riscontrate nella struttura di cemento armato che sostiene la colonna di distillazione.

d) Scoppio della valvola automatica LIC-V5 di controllo del prelievo del 4° taglio (gasolio 2°) per esposizione alle fiamme.

d) Il danno è rimasto limitato alla parte di torre investita dall’incendio [...].

Evidenza: Danneggiamento superfici e coibentazioni e scoppio di valvole.

Figura 1. Incendio, 2 Febbraio 1984, Porto Marghera (VE) – ITALIA, fonte 2



2.3 Incendio del 21 Gennaio 1987 – UK, Essex, fonte 3

AN: 2531
ME: N
CR: SRD
DA: 21/01/1987
LO: UK; ESSEX; CORRINGHAM
MN: HYDROGEN

MH: FI fire
MC: 1049
IT: RELEASE release-; FIRE fire-
OG: PROCESS process-; PIPEWORK
NP: Killed: 0; Injured: 0; Evacuated: --
GC: MECHANICAL mechanical-failure
KW: AREA Size of the area affected; COMPANY Firm or company involved; DURATION Duration of the incident; TIMING Timing of the incident, time of day, shift, handover, lunch break, etc.; RESPONSE Emergency response to the incident
AB: HYDROGEN PIPE FRACTURED AT OIL REFINERY. ENSUING FIRE RESTRICTED TO AREA OF 12ft*10ft AROUND FRACTURE. 15 COOLING JETS USED TO PROTECT SURROUNDING AREA.
ID: 19870121
IY: 1987

3. ANALISI DEI PARAMETRI CHE INFLUENZANO LA DURATA DI UN INCENDIO

3.1 Verifica dei termini sorgente

Nelle seguenti tabelle sono riportati alcuni esempi dei criteri che devono essere adottati per la definizione dei termini sorgente di uno scenario incidentale ai fini della modellizzazione.

Tabella 2.

--	Sostanza predominante	Singolo componente	Da bilanci di materia
		Miscela con utilizzo di programma di calcolo	Creazione miscela componenti con concentrazione da bilanci di materia
		Miscela con utilizzo di programma di calcolo	Modellazione singolo componente della miscela, da bilanci di materia
--	Fase della sostanza	--	Bilanci di materia
Cd	Coefficiente di efflusso	Rilascio da accoppiamento flangiato:	0,21
		Rottura tenuta a labirinto:	0,21
		Rottura tenuta semplice:	0,6
		Foro tubazione	0,6
D	Diametro tubazione / accoppiamento flangiato / tenuta pompa	--	Da P&I, e/o schemi di flusso quantificati, e/o bilanci di materia e/o specifiche
T	Temperatura di esercizio		
P	Pressione di esercizio		
T_{max}	Temperatura di progetto	--	specifiche tecniche delle apparecchiature
P_{max}	Pressione di progetto	--	specifiche tecniche delle apparecchiature

Tabella 3. – Durata del rilascio

Durata del rilascio (s)	
60 – 300	In presenza di sistemi di rilevazione gas infiammabili e/o tossici, ovvero nel caso di operazioni presidiate in continuo, con allarmi e pulsanti di emergenza per chiusura valvole di intercettazione motorizzate
600 – 900	In presenza di sistemi di rilevazione gas infiammabili e/o tossici, ovvero nel caso di operazioni presidiate in continuo, con allarmi ed in presenza di valvole di intercettazione manuali
1200 – 1800	Negli altri casi

Tabella 4. – Condizioni meteorologiche

Velocità del vento	Predominanti del sito (da annuario ISTAT o postazioni meteorologiche Stabilimento)	2 m/s	5,0 m/s
Temperatura ambiente		Predominanti del sito (da annuario ISTAT o postazioni meteorologiche Stabilimento)	Predominanti del sito (da annuario ISTAT o postazioni meteorologiche Stabilimento)
Umidità atmosferica			
Classe di stabilità secondo Pasquill	(da postazioni meteorologiche Stabilimento o, in alternativa da tabella di Pasquill-Gifford)	F	D

3.2 Effetti sui materiali dovuti all'irraggiamento termico

Di seguito viene riportata una descrizione della tipologia di danno che possono subire diversi materiali, in assenza di protezione attiva e/o passiva, in funzione dell'intensità di irraggiamento alla quale essi sono sottoposti, e della relativa durata di esposizione all'irraggiamento[4].

3.2.1 Irraggiamento termico – Tipologia di danno sui materiali

In funzione dell'intensità di irraggiamento alla quale può essere esposta una superficie e della relativa durata, si possono individuare due livelli di danno:

Livello di danno 1: Innesco delle superfici esposte all'irraggiamento e/o collasso degli elementi strutturali

Livello di danno 2: "Scrostatura e sverniciatura del rivestimento superficiale dei materiali; apprezzabile deformazione degli elementi strutturali, senza collasso.

Il livello di danno su una struttura e/o apparecchiatura soggetta ad un irraggiamento termico stazionario derivante da un incendio è funzione di:

- TIPO DI MATERIALE
- INTENSITÀ DI IRRAGGIAMENTO TERMICO
- DURATA DELL'ESPOSIZIONE ALL' "IRRAGGIAMENTO CRITICO"

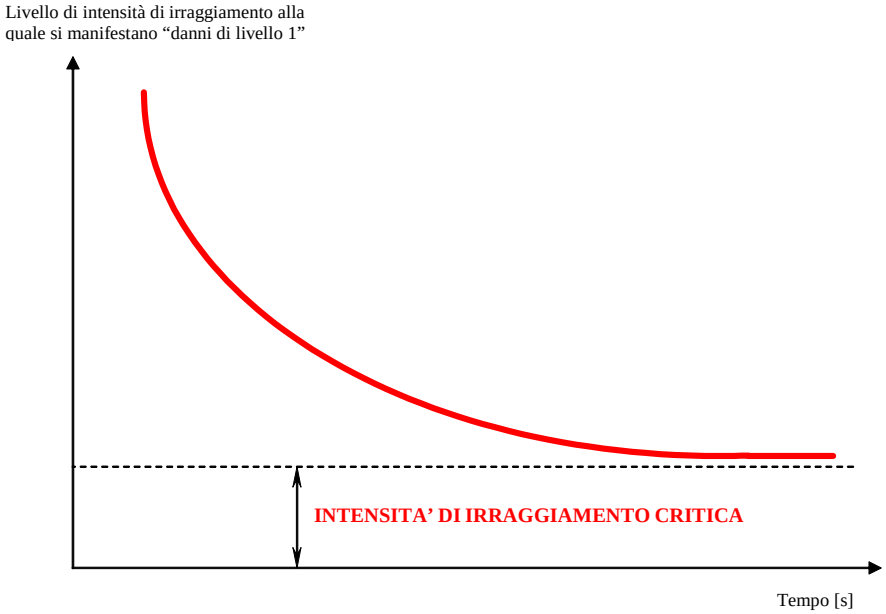
L'intensità di irraggiamento necessaria per produrre gli effetti di danno sopra esposti è inversamente proporzionale alla durata dell'esposizione; più è elevato il tempo di esposizione, più bassa sarà l'intensità di irraggiamento richiesta per determinare conseguenze significative sui materiali interessati dall'irraggiamento.

Al di sotto di un certo valore di intensità di irraggiamento, i materiali non subiscono danni, indipendentemente dalla durata di esposizione. Tale soglia è definita come INTENSITÀ DI IRRAGGIAMENTO CRITICA.

Il valore di intensità di irraggiamento critica dipende, oltre che dal tipo di materiale, prevalentemente da:

- presenza di fiamma a diretto contatto con il materiale;
- presenza di fiamma, ma non diretto contatto con il materiale;
- assenza di fiamma.

Figura 2. Concetto di intensità di irraggiamento



3.2.2 Relazione tra temperatura delle superfici irraggiate e intensità di irraggiamento critica

In questo paragrafo sono riportate, per diverse tipologie di materiale, le equazioni che correlano l’andamento della temperatura di un corpo irraggiato, in funzione del flusso di calore che interessa la sua superficie.

Sono applicate le equazioni di bilancio di calore semplificate, considerando un flusso di calore stazionario sulle superfici soggette ad irraggiamento termico.

Inoltre, per i materiali a bassa conducibilità termica, come il legno e la plastica, viene trascurato il trasporto di calore sul corpo per convezione.

Materiali a bassa conducibilità

Bilancio di calore per materiali a bassa conducibilità termica (legno, plastica, ecc), soggetti a irraggiamento termico stazionario.

$$a \cdot q_i - \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T)^4 - \alpha \cdot (T-T_0) = 0 \qquad (1)$$

dove:

q_i	=	intensità di irraggiamento	[W/m²]
T	=	temperatura superficiale	[K]
T_0	=	temperatura ambiente	[K]
a	=	coefficiente di assorbimento	[--]
α	=	coefficiente convettivo	[W/m²·K]
σ	=	costante di Stephan-Boltzman	[5,67·10^{-8} W/m²·K^4]
ε	=	coefficiente di emissione	[--]

Vetro

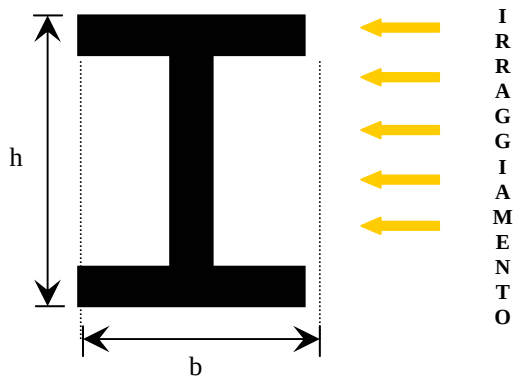
Per un elemento in vetro sottoposto ad irraggiamento, assumendo che la superficie irraggiata sia pari alla metà della superficie totale, e che la temperatura sia uniformemente distribuita su tutto il corpo (raggiungimento delle condizioni di stazionarietà), il bilancio di calore risulta:

$$a \cdot qi - 2 \cdot \{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T)4 + \alpha \cdot (T-T_0)\} = 0 \qquad (2)$$

Acciaio

Per elementi strutturali in acciaio sottoposti ad irraggiamento termico, l'andamento della temperatura è anche funzione della geometria dell'elemento stesso.

Figura 3.



$s_i = h$
$s_u = 2 \cdot (h+b)$

Sia $s_i = h$ la superficie irraggiata, per unità di lunghezza.

Sia $s_u = 2 \cdot (h+b)$ la superficie per unità di lunghezza non irraggiata, sulla quale il calore è trasmesso per conduzione.

Si assume, conservativamente, che il trasporto di calore per convezione avvenga attraverso una superficie equivalente pari a b x h.

Il bilancio di calore risultante dall'irraggiamento termico é:

$$a \cdot qi - (S_u/S_i) \cdot \{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T)4 + \alpha \cdot (T-T_0)\} = 0 \qquad (3)$$

3.3 Calcolo dell'intensità di irraggiamento critico per elementi in acciaio

Si è in questo paragrafo proceduto alla determinazione dell'intensità di irraggiamento critica per elementi strutturali in acciaio, in funzione delle temperature, determinate su base sperimentale (cfr. Green Book – TNO – Par. 7.3), alle quali tali elementi hanno subito danni di livello 1 (collasso strutturale) e danni di livello 2 (deformazioni delle strutture).

Per la determinazione di tali soglie di irraggiamento è stata applicata "l'equazione 3" riportata al precedente paragrafo.

LIVELLO DI DANNO 1

$$a \cdot qi - (S_u/S_i) \cdot \{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T)4 + \alpha \cdot (T-T_0)\} = 0 \qquad (3)$$

Parametri adottati:

T_0: 20 °C = 298 K

a: 1

ε: 1

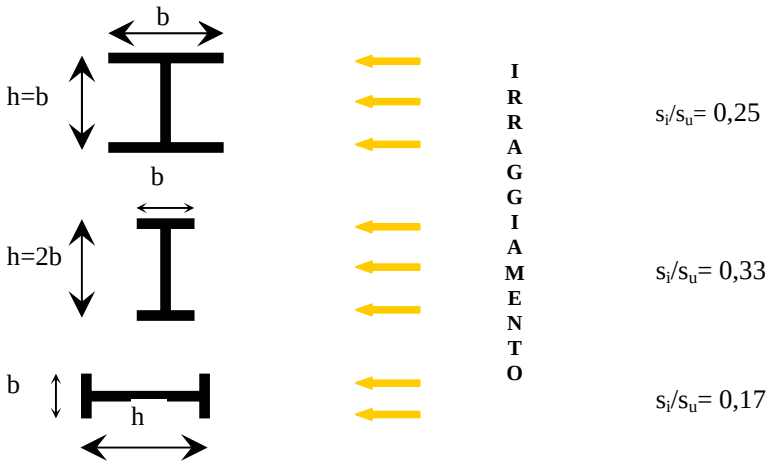
σ: $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/m²·K⁴

T: Sulla base di prove sperimentali, elementi in acciaio sottoposti a riscaldamento hanno subito danni strutturali rilevanti (collasso), ad una temperatura variabile tra 400 °C e 600 °C.
Si considera pertanto un valore medio di temperatura di collasso dell'acciaio pari a 500 °C = 773 K

α: il valore del coefficiente convettivo dipende dalla temperatura dell'elemento, dalla superficie esposta all'irraggiamento e dalle condizioni di vento. Conservativamente è stata considerata la condizione di assenza di vento (convezione libera). In tali circostanze, i valori di α variano da 2 W/m²·K (ad una temperatura T = 293 K) a 7 W/m²·K (ad una temperatura T = 473 K).
L'apporto della quantità di calore trasmesso per convezione a temperature superiori a 473 K risulta trascurabile, se confrontato con il trasporto di calore per irraggiamento.
Sulla base di tali considerazioni si assume un valore di α pari a 7 W/m²·K.

$\frac{S_i}{S_u}$ Tale valore dipende dalla geometria dell'elemento irraggiato, come riportato nella seguente pagina. Si considera un valore medio pari a 0,25

Figura 4.



Sulla base delle precedenti considerazioni, ne deriva un valore di intensità di irraggiamento critica, con conseguente livello di danno 1, pari a:

qi (1) = 100 kW/m².

LIVELLO DI DANNO 2

Parametri adottati:

T_0 : 20 °C = 298 K

a : 0,7

ε : 1

σ : $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/m²·K⁴

T : 473 K, pari alla temperatura, desunta da prove sperimentali, alla quale si ha la sverniciatura e la deformazione delle strutture in acciaio, senza arrivare al collasso termico.

α : 7 W/m²·K

$\frac{S_i}{S_u}$: 0,25

L'intensità di irraggiamento critico, con conseguente livello di danno 2, risulta pari a:
q_i (2) = 25 kW/m².
Analoghe considerazioni possono essere effettuate per strutture in legno, plastica e vetro.

Nella seguente tabella sono riassunti i valori di irraggiamento critico per livelli di danno 1 e 2, in funzione del tipo di materiale.

Tabella 5. – Intensità di irraggiamento critiche

Materiale	**Intensità di irraggiamento critica [kW/m²]**	
	Livello di danno 1	*Livello di danno 2*
Legno	15	2
Plastica	15	2
Vetro	4	--
Acciaio	100	25

4. DURATA DI ESPOSIZIONE ALL'IRRAGGIAMENTO CRITICO

Nel precedente paragrafo sono stati valutati i valori di "intensità di irraggiamento critico" per diversi materiali, indipendentemente dalla durata di esposizione all'irraggiamento stesso.

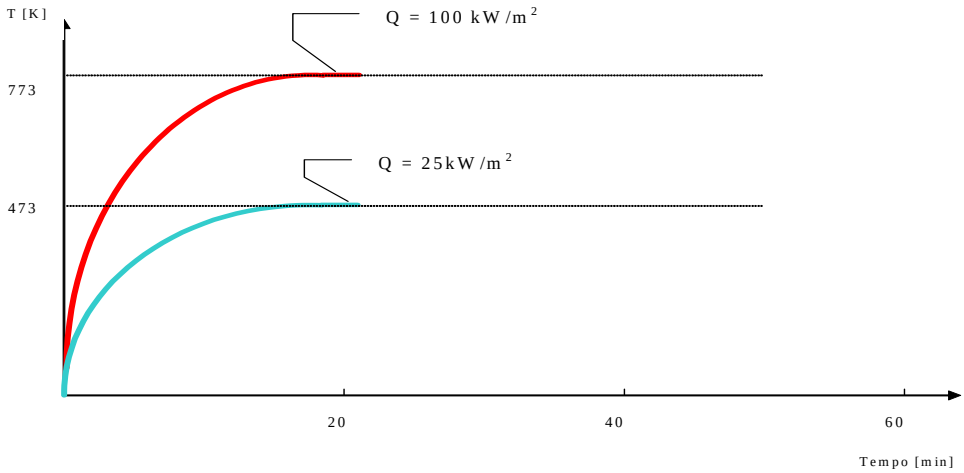
Per raggiungere le temperature che conducono al collasso termico di una struttura (livello di danno 1), o alla deformazione della stessa (livello di danno 2), è necessario che le superfici siano esposte per un tempo sufficiente a raggiungere le condizioni di stazionarietà supposte.

Il concetto di " irraggiamento critico" fornisce una prima idea sulle condizioni di stabilità dei materiali sottoposti ad irraggiamento, in quanto dati sperimentali hanno evidenziato risultati in parte diversi da quelli derivati dall'analisi termodinamica teorica, soprattutto per incendi di breve durata

Ad esempio, dall'esame di alcune prove sperimentali riportate sul Green Book – TNO, è risultato quanto segue:

- Un pannello di vetro sottoposto ad un valore di irraggiamento critico pari a 4 kW/m², ha raggiunto la temperatura di collasso (393 k), in ca. 10 minuti.
- Una trave in acciaio del tipo IPE (si/su=0,33) sottoposta ad un irraggiamento critico per livello di danno 1 pari a 100 kW/m², ha raggiunto una temperatura prossima a quella di collasso (773 k), in un tempo di ca. 20 minuti; la stessa trave sottoposta ad un irraggiamento critico di 25 kW/m², ha raggiunto una temperatura prossima a quella di deformazione (473 k), in un tempo di ca. 15 minuti.
- Travi in acciaio di diverse geometrie (HEA, HEB) raggiungono temperature di collasso e/o di deformazione, se sottoposte alle rispettive soglie di irraggiamento critico, in tempi dell'ordine di 30 minuti o superiori.

Di seguito si riporta l'andamento della temperatura di un profilo in acciaio a I, sottoposto a valori di irraggiamento pari a 100 kW/m² e 25 kW/m², in funzione del tempo di esposizione.



Sulla base delle considerazioni fin qui esposte, affinché vengano raggiunte le condizioni di "collasso termico", o di "deformazione" delle strutture di sostegno soggette alle soglie di irraggiamento "critico" per "pool fire", si può assumere, conservativamente, un tempo medio di esposizione pari a 15 minuti in assenza di protezione attiva e/o passiva in linea con i valori di Tab. 1.

I risultati fin qui esposti sono peraltro coerenti con i valori di "irraggiamento termico e conseguenti danni a strutture in acciaio" riportati in allegato 3 alla "Circolare del Ministero dell'Interno n. 6 del 10 marzo 1986".

5. ESEMPIO APPLICATIVO (DA RAPPORTO DI SICUREZZA)

Rilascio per sovratemperatura da scambiatore di calore

Questo scenario considera la possibilità di rilascio di idrocarburi medio/pesanti dagli scambiatori di calore che costituiscono il treno di scambio termico principale dell'impianto. In questo tipo di apparecchiatura la perdita si manifesta in genere dall'accoppiamento flangiato presente tra distributore e piastra tubiera e su quello tra piastra tubiera e mantello.

Date le condizioni al contorno del rilascio e quelle relative ai parametri operativi, si ipotizza la formazione di una pozza di prodotto non confinata. Il fluido sarà un bifasico in cui alcuni idrocarburi si troveranno già allo stato vapore.

Le condizioni di rilascio sono tali da considerare una portata pari a 3 kg/s.

Il tempo di intervento stimato per contenere l'entità del rilascio è pari a 5 ÷10 minuti richiesti per intercettare con valvola a distanza.

5.1 Risultati della simulazione con modello di calcolo

Geometria della fiamma (pool fire):
Diametro medio della fiamma (m) 7
Altezza media della fiamma (m) 13
Potere emissivo eff. (kW/m^2) 49

Le distanze a cui si verificano le soglie di irraggiamento di interesse sono le seguenti:

Tabella 6. – Intensità di irraggiamento critiche

SOGLIE DI DANNO ($kW/m^{2)}$	**DISTANZE (vento F 2) m**	**DISTANZE (vento D 5) m**
37,5	Nell'intorno del punto di rilascio	Nell'intorno del punto di rilascio
12,5	12	15
5	20	22

Dall'analisi dei risultati si evince che:

- la durata dell'incendio, considerando la quantità rilasciata in relazione ai tempi di intercettazione previsti, il tasso di bruciamento del prodotto rilasciato e la superficie dell'incendio, risulta inferiore a 10 minuti;
- la soglia più critica ($\geq$ 37,5 kW/m^2) interessa il treno di scambio termico e le strutture di sostegno (pipe-rack) degli scambiatori.

Considerando i criteri per assegnazione della probabilità, di cui alla Tabella 1, non si evincono possibili effetti domino.

5.2 Conseguenze registrate a seguito dell'effettivo accadimento dell'evento

A seguito dell'accadimento di uno scenario riconducibile a quello stimato nell'analisi di rischio, i principali elementi da considerare sono i seguenti:

- la durata dell'incendio è stata di ca. 20 minuti a causa del ritardo, rispetto a quanto ipotizzato, nell'eseguire l'intercettazione della perdita da parte del personale di esercizio dell'impianto mediante valvola posta a distanza dal punto di rilascio;
- l'irraggiamento termico che ha interessato le strutture di sostegno del treno di scambio è stato contrastato dal raffreddamento con acqua mediante mezzi fissi antincendio presenti nell'area, azionati dalla squadra di emergenza.

6. CONSIDERAZIONI FINALI

La metodologia di approccio si basa sulle seguenti principali attività:

- individuazione delle apparecchiature e degli incidenti "sorgente". Questi sono quelli che possono dare origine a effetto domino e che sono già stati ipotizzati nell'analisi di sicurezza svolta nell'ambito del Rapporto di Sicurezza, per i quali sono già state determinate le relative aree di impatto;
- individuazione di elementi a rischio di incidente rilevante, valutando l'efficacia di protezioni attive o passive , la tipologia di fluidi trattati e le relative quantità. Per far questo, è possibile, ad esempio, individuare le apparecchiature che contengono sostanze "pericolose" in quantità tali da definirle "critiche";
- selezione dei "bersagli" che possono amplificare effetti e conseguenze dell'incidente primario. Occorre valutare l'area di danno generata da un probabile cedimento catastrofico di queste apparecchiature attraverso l'utilizzo di consolidati modelli di simulazione ed analizzare solamente quelli per cui l'area è superiore a quella dell'incidente primario. Ciò permette di considerare solo i bersagli realmente significativi, che incrementerebbero i danni causati dall'incidente sorgente, così da condurre solamente su questi le successive più approfondite analisi.

La metodologia elaborata risulta essere sistematica e compatibile con i tempi necessari a una corretta analisi di sicurezza.

I risultati dell'analisi permettono di apportare migliorie sia a livello di prevenzione che di protezione attiva e passiva, così da ridurre sia la frequenza che la magnitudo di particolari incidenti rilevanti.

Risulta inoltre evidente la possibilità di implementare il metodo sviluppato come strumento per verifiche progettuali o per l'individuazione di piani di miglioramento delle condizioni di sicurezza degli impianti.

BIBLIOGRAFIA

[1] Marsh, "The 100 largest losses 1972-2001: large property damage losses in the hidrocarbon – chemical industries", Marsh's Risk Consulting Practice – Marsh & Mc Lennan Companies, 2003 (USA).

[2] Ministero dell'Interno, Direzione generale della protezione civile e dei servizi antincendio, Servizio tecnico centrale, "Rassegna comparata incidenti di notevole entità". (Incendi, esplosioni e scoppi, loro evoluzione ed effetti prodotti). Servizio documentazione e relazioni pubbliche VV.F Roma, 1986 (I).

[3] MHIDAS© Health and Safety Executive (HSE) Croner, Major Hazard Incident Data Service, developed by AEA Technology on behalf of the Major Hazards Assessment Unit of the United Kingdom Health and Safety Executive. British Crown Copyright 1985 to present, Edizione Aggiornata a Ottobre 2003.

[4] "Methods for determination of possibile damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials – CPR 16E (Green Book)" – TNO – Ed. 1992

[5] "Sulla valutazione dell'effetto domino quale le soluzioni per l'industria" – A. Monetti, C. Ferri, L. Tomiato – Ambiente & Sicurezza Il Sole 24 Ore – Aprile 2004 (n° 17)