

SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFETTO DOMINO E SUA APPLICAZIONE AD UNA RAFFINERIA DI OLI MINERALI

Giacomo Dore – api raffineria di ancona – g.dore@apioil.com
Claudio Paesani – Technip Italy – cpaesani@technip-coflexip.com
Claudio Rapicetta – ENEA – Unità Tecnico-Scientifica Protezione dell'Ambiente
claudio.rapicetta@casaccia.enea.it
Luciana Storti – Technip Italy - Roma – lstorti@technip-coflexip.com
Luciano Terrinoni – ENEA – Unità Tecnico-Scientifica Protezione dell'Ambiente
luciano.terrinoni@casaccia.enea.it

SOMMARIO

L'analisi del rischio di incidenti rilevanti associato ad attività industriali prende tradizionalmente in esame eventi incidentali dovuti a cause primarie come errori operativi, errata manutenzione, difetti meccanici, corrosione.

Il continuo approfondimento necessario a raggiungere livelli di sicurezza e di conoscenza dei rischi sempre più elevati ha evidenziato la necessità di approfondire le interazioni tra gli impianti in caso di incidente (effetto domino).

L'analisi proposta consente di evidenziare se scenari incidentali, ritenuti trascurabili secondo un approccio di tipo tradizionale in quanto valutati molto infrequenti, possano, invece, essere ritenuti credibili in quanto conseguenti ad effetto domino. In aggiunta, essa consente di raggiungere una conoscenza più approfondita dei meccanismi che si possono innescare a seguito di un rilascio anche di piccola entità, e di individuare tipologia e caratteristiche delle misure mitigative in grado di interrompere efficacemente la catena di eventi.

Per raggiungere gli scopi sopra citati è stata definita una metodologia, che conduce sia a risultati qualitativi che quantitativi, per la valutazione degli effetti domino in uno stabilimento complesso. Questa metodologia è stata quindi applicata allo studio degli effetti domino di una raffineria di oli minerali.

1. SCOPO DEL LAVORO

Il lavoro qui presentato è stato sviluppato nel contesto di uno studio di rischi d'area: questo ne ha condizionato sia gli scopi che la scelta metodologica.

Infatti la principale necessità era quella di individuare gli scenari incidentali rilevanti in grado di generare aree di danno all'esterno di una raffineria e la valutazione della concatenazione di eventi in grado di originare gli scenari incidentali rilevanti individuati.

La metodologia, anche al fine di limitare le analisi da effettuare a quelle realmente necessarie allo scopo, è stata impostata "a ritroso", partendo dalla identificazione di possibili scenari finali con effetti gravi all'esterno, per valutarne poi la frequenza di accadimento come derivante dalle possibili catene incidentali innescabili tra i vari impianti di raffineria.

Si è inoltre provveduto, analizzando tale concatenazione, a valutare l'efficacia degli elementi di prevenzione/protezione nell'ambito della sequenza incidentale in grado di intervenire efficacemente sull'evoluzione, con l'obiettivo primario di individuare possibili aree di intervento ed individuare quali misure impiantistiche potessero ridurre la frequenza dello scenario incidentale finale.

Visto quanto sopra, nel lavoro eseguito, si è fatto riferimento alle seguenti definizioni:

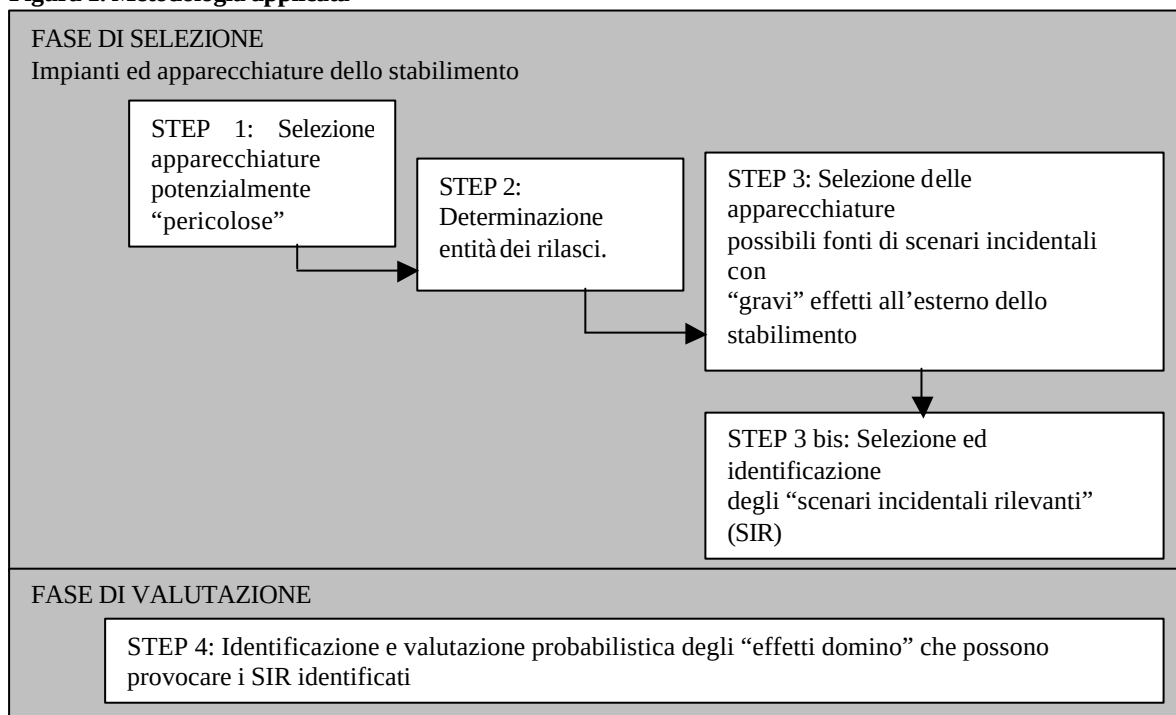
- Gli effetti domino sono fenomeni incidentali caratterizzati da scenari incidentali concatenati ed innescati da uno scenario incidentale primario. L'effetto finale dal punto di vista delle conseguenze risulta amplificato in termini di estensione spazio-temporale o in termini di *magnitudo* dei danni, rispetto allo scenario incidentale primario che ha dato inizio alla successione degli eventi.
- Dal punto di vista della estensione massima delle conseguenze, il fenomeno dell'effetto domino è caratterizzato quindi da quelle relative alla evoluzione del rilascio incidentale avente le maggiori aree di impatto (scenario incidentale finale).

La raffineria oggetto dello studio è uno stabilimento le cui origini risalgono agli anni '50, che ha subito un profondo rinnovamento e adeguamento tecnologico negli ultimi 20 anni; lo schema di lavorazione è del tipo "hydroskimming più thermal", con una capacità di lavorazione pari a circa 4 milioni tonnellate/anno. Integrato con il ciclo di raffinazione è inserito un impianto di gassificazione dei residui pesanti asservito ad un ciclo combinato in grado di produrre circa 290 MWh di energia elettrica.

2. METODOLOGIA

La metodologia utilizzata si basa su due fasi principali, una di selezione e una di valutazione, complessivamente costituite da quattro STEP. Si riporta di seguito lo schema della metodologia utilizzata.

Figura 1. Metodologia applicata



3. STEP 1

Lo step prevede la selezione, tra tutte le apparecchiature o tubazioni presenti in stabilimento, impianto per impianto, di quelle contenenti le seguenti tipologie di sostanze pericolose per intrinseche caratteristiche o per le loro condizioni operative:

- gas liquefatti infiammabili
- gas o vapori tossici
- gas infiammabili
- liquidi infiammabili a $T > \text{flash point}$

I criteri di selezione utilizzati in questa fase sono stati estremamente cautelativi; in particolare:

- le miscele sono state valutate come sostanze infiammabili, se contenenti almeno il 10% di sostanza infiammabile;
- le miscele di vapori sono state valutate come sostanze tossiche, se contenenti almeno l'1% di componenti tossici;
- le miscele con presenza di una fase liquida in equilibrio con fase vapore alla pressione > 6 bar sono state valutate come sostanze tossiche se in esse era presente un componente tossico.

Sono state analizzate, in questo primo step, 41 unità di impianto, contenenti circa 1000 apparecchiature; i dati sono stati estratti da 45 PFD e 225 P&ID.

Il risultato della selezione ha portato ad escludere circa 400 apparecchiature e 9 unità, in quanto i fluidi contenuti, per tipologia e condizioni di esercizio, escludono la possibilità di insorgenza di situazioni pericolose.

4. STEP 2

Lo step prevede la determinazione, per le apparecchiature o tubazioni selezionate nello STEP 1, dell'entità dei massimi rilasci possibili, considerando ipotesi incidentali molto gravose, congruenti con l'eventualità di essere oggetto di "effetto domino" originato da evento incidentale in impianti limitrofi: si sono selezionati così i "rilasci significativi".

Le ipotesi incidentali assunte sono state:

- la rottura catastrofica delle apparecchiature
- la rottura delle tubazioni per almeno il 50% del loro diametro.

L'entità del rilascio considerato è stato pari all'hold up massimo disponibile (tra intercettazioni affidabili di tipo passivo, quali le valvole di non ritorno o di eccesso di flusso)

Sono stati presi in considerazione sia i rilasci di tipo istantaneo che di tipo continuo, o entrambi quando la situazione impiantistica lo imponeva.

Per il calcolo dei rilasci continui, sono state prese in considerazione le portate in entrata per un periodo di trenta minuti, prescindendo dal fatto che il tempo di intercettazione del flusso, per blocco impianto o per intervento operativo, è sicuramente inferiore a tale valore. Per le pompe o compressori è stato considerato il 150% della portata normale della macchina, per una durata pari a trenta minuti.

Sono stati considerati come "significativi" tutti i rilasci tossici ed i rilasci che comportano quantitativi maggiori di 10 m³ di liquidi o vapori infiammabili, e maggiori di 2 m³ di gas liquefatti infiammabili.

Lo STEP 2 ha portato come risultato che tutte le 32 unità selezionate nello STEP 1 possono essere sede di rilasci significativi: sono stati quantificati circa 700 rilasci – continui o istantanei - (liquidi, gas o vapori), a carico di circa 525 apparecchiature.

5. STEP 3

Lo step prevede la selezione, tra le apparecchiature o tubazioni identificate nello STEP 2, di quelle per le quali si verifica che gli effetti di tipo "grave" si estendono all'esterno dei confini di stabilimento.

Per la definizione di effetti "gravi" all'esterno dello stabilimento si è fatto riferimento a due tipologie di elementi vulnerabili.

La prima è rappresentata dalle aree abitate circostanti lo stabilimento, per la quale si è fatto riferimento diretto ai valori di riferimento per la valutazione degli effetti, previsti nei D.M. 15 maggio 1996 e D.M. 20 ottobre 1998, ed in particolare alla soglia relativa alle "lesioni irreversibili" alle persone, che è normalmente utilizzata anche per dimensionare la zona alla quale può essere estesa la pianificazione delle emergenze esterne.

La seconda è relativa ad una linea ferroviaria che attraversa lo stabilimento: le "soglie" per essa adottate tengono conto anche delle intrinseche caratteristiche di protezione offerte dal vagone ferroviario.

In Tabella 1 sono riportati i valori utilizzati.

Tabella 1. Soglie effetti "gravi" per l'esterno dello stabilimento		
EFFETTO "GRAVE" NEI CONFRONTI DELLA POPOLAZIONE		
Nube di vapori infiammabili	Nube di con concentrazione superiore a	1/4 FL
Radiazione termica stazionaria	Flusso termico superiore a	5 kW/m ²
Radiazione termica variabile	Dose termica superiore a	200 kJ/m ²
Sovrapressioni	Superiori a	0,07 bar
Rilascio tossico	Nube con concentrazione di tossico sup. a	IDLH
EFFETTI "GRAVI" NEI CONFRONTI DELLE STRUTTURE FERROVIARIE		
Sovrapressioni	Superiori a	0,4 bar
Rilascio tossico	Nube con concentrazione di tossico sup. a	IDLH

Si specifica che nel caso in cui la concentrazione pari al valore dell'IDLH o quella pari allo LC50 abbia presentato una durata molto inferiore a 30 minuti si è proceduto alla valutazione delle aree di danno mediante Probit (probabilità di mortalità 10⁻⁵)

La selezione delle apparecchiature è operata mediante il calcolo delle distanze di danno derivanti dal rilascio ipotizzato.

Sono stati effettuati i calcoli per le seguenti condizioni atmosferiche:

- 4D: classe di stabilità atmosferica neutra e vento di 4 m/s
- 2F: classe di stabilità atmosferica molto stabile e vento di 2 m/s

Gli “scenari incidentali finali” per i quali sono state calcolate le distanze di danno sono riportate in Tabella 2.

Tabella 2. Scenari incidentali finali considerati		
TIPO DI RILASCIO	INNESCO IMMEDIATO	INNESCO DIFFERITO
Gas infiammabili liquefatti in pressione	Pool fire (+BLEVE), jet fire, early explosion	UVCE, flash fire
Gas o vapori infiammabili	Jet fire, early explosion	UVCE, flash fire
Liquidi infiammabili a $T > \text{flash point}$	Pool fire	UVCE, flash fire
Gas o vapori tossici	Rilascio tossico	

Conservativamente sono stati considerati gli scenari UVCE quando il rilascio ha comportato nubi con contenuto di prodotti, all'interno dei limiti di infiammabilità, superiori a 500 kg; altrimenti si è considerato il solo sviluppo di flash fire.

Lo STEP 3 ha portato come risultato che in 26 unità, delle 32 selezionate nello STEP 2, le conseguenze derivanti da rilasci di grande entità, come quelli ipotizzati, potrebbero causare “effetti gravi” all’“esterno” dello stabilimento indipendentemente dalla presenza di una catena di eventi incidentali credibile in grado di generare la tipologia di rilascio ipotizzata.

6. STEP 3 bis

Lo step prevede la selezione degli Scenari Incidentali Rilevanti (SIR), tra quelli identificati nello STEP 3, tenendo conto delle specifiche tipologie impiantistiche o costruttive presenti nello stabilimento, che sono in grado, intrinsecamente, di incidere sulle massime ipotesi di rilascio adottabili, e quindi sugli effetti incidentali.

Si è tenuto conto, in questa fase, delle seguenti considerazioni:

- i cedimenti catastrofici, da evento esterno, non sono ipotizzabili per le apparecchiature protette con interrimento o tumulazione;
- la presenza di valvole di blocco motorizzate azionabili a distanza (MOV) sulle linee collegate alle apparecchiature in cui si ipotizza una grave rottura, consente di limitare la durata ipotizzabile del rilascio a 3 minuti;
- la presenza di valvole di blocco manuali sulle linee collegate alle apparecchiature in cui si ipotizza una grave rottura, consente di limitare la durata ipotizzabile del rilascio a 15 minuti.

Il risultato di questa fase ha permesso di identificare 134 apparecchiature, contenute in 22 unità, dalle quali possono originarsi 153 rilasci rilevanti, in grado di provocare effetti “gravi” all’esterno dello stabilimento o sulla linea ferroviaria.

Da notare che, per alcune apparecchiature, sono stati identificati più di un tipo di rilascio rilevante (ad esempio per le fasi liquide o vapore, o per cedimento catastrofico o per rilascio continuo), ed inoltre ciascun rilascio può generare più di uno scenario rilevante, per cui il numero totale degli scenari (233) è ben superiore sia al numero di rilasci che al numero delle apparecchiature identificate.

Si puntualizza che i rilasci e gli Scenari Incidentali Rilevanti identificati dallo STEP 3bis derivano all’aver ipotizzato rotture di grandi dimensioni di apparecchiature o componenti, associabili solo ad un loro coinvolgimento in un “effetto domino” molto severo, indipendentemente dalla loro “credibilità”.

Questa scelta è coerente con lo scopo che lo STEP 3bis si prefigge, e cioè di identificare tutti i massimi rilasci teoricamente ipotizzabili.

Il successivo STEP 4 si propone di valutare il grado di “credibilità” dei “rilasci rilevanti” sopra identificati.

7. STEP 4

Lo step prevede la valutazione degli eventi incidentali che, per effetto domino, possono generare uno degli scenari identificati nello STEP 3 bis. Gli scenari incidentali primari, ritenuti in grado di provocare il collasso di una apparecchiatura o la rottura di una tubazione di ampiezza del 50% del suo diametro, sono quelli indicati in Tabella 3.

Tabella 3. Scenari incidentali primari in grado di generare “effetto domino”		
ESPOSIZIONE	SCENARI INCIDENTALE PRIMARI	NOTE
Essere bersaglio di frammenti	BLEVE	Vengono presi in considerazione tutti i BLEVE, sia derivanti da collasso strutturale che da esposizione al fuoco
	Esplosione di apparecchiature	Vengono presi in considerazione tutti gli apparecchi (serbatoi di stoccaggio) nei quali è possibile, in caso di malfunzionamento, la presenza di miscele esplosive (sostanze infiammabili a $T > \text{flash point}$ e presenza di aria)
Esposizione a radiazione termica stazionaria $> 12,5 \text{ kW/m}^2$	Pool fire Jet fire	Vengono presi in considerazione tutti i rilasci di liquidi infiammabili ipotizzabili (da tubazioni $> 3/4"$) a distanze $\leq 20 \text{ m}$ dall'apparecchiatura bersaglio.
Esposizione a sovrappressioni $> 0,3 \text{ bar}$	UVCE	Vengono presi in considerazione tutti i possibili UVCE generati da rilasci continui di gas o vapori infiammabili, da rotture di diametro eq. pari a 1".

Nella analisi degli eventi causali in grado di provocare ciascuno dei SIR selezionati nello STEP 3bis, si è doverosamente tenuto conto che gli scenari UVCE ed i flash fire, per loro natura, possono avvenire solo in concomitanza ad innesco differito (per cui sono impossibili se l'evento causale è tale da comportare l'innesco immediato, come il pool fire o il jet fire); anche le nubi di sostanze tossiche, in quanto risultano essere sempre composte di sostanze anche infiammabili, sono possibili solo in assenza di innesco immediato (e cioè solo se la rottura è causata da impatto di frammenti o da UVCE).

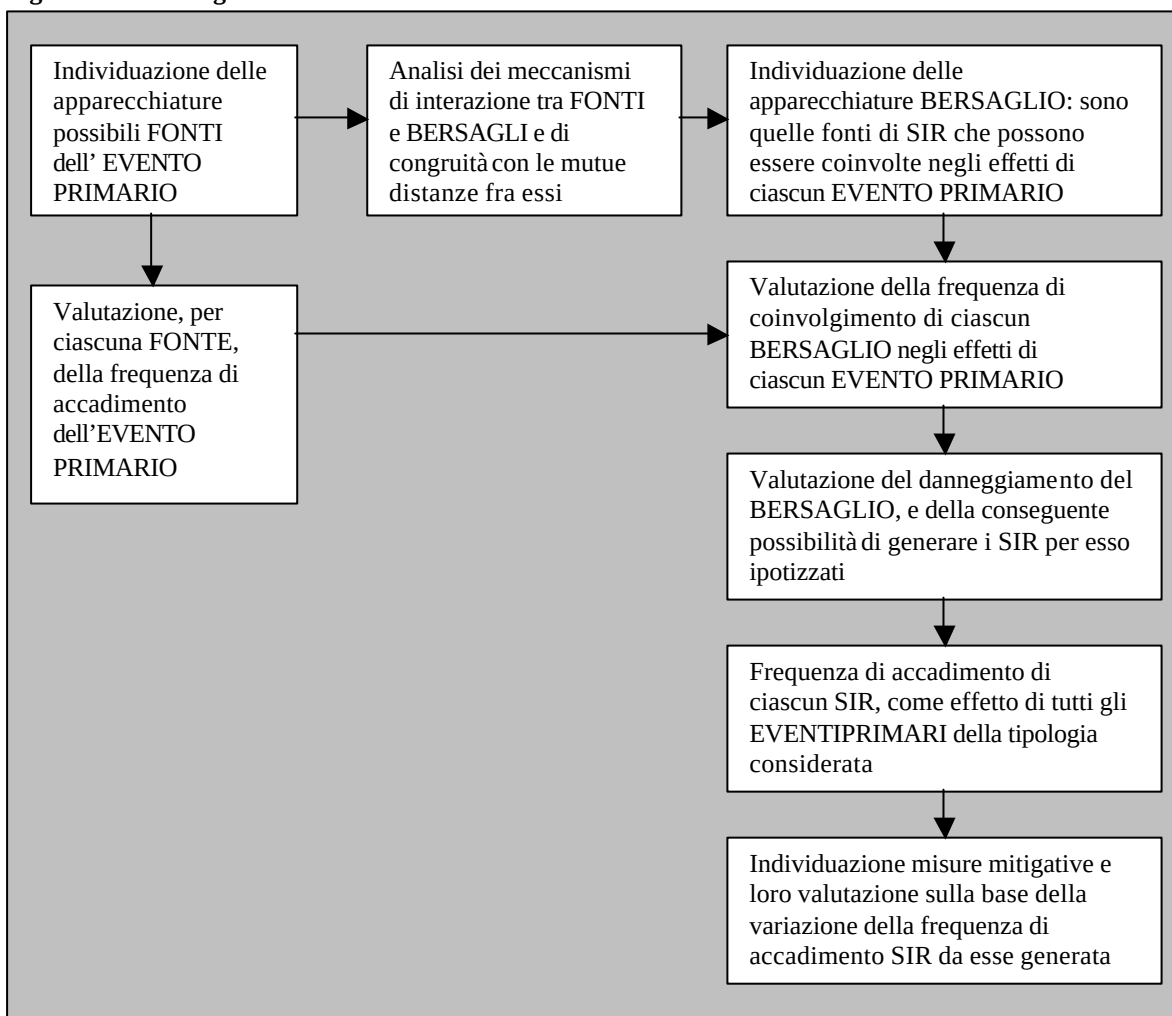
La valutazione della credibilità degli eventi che possono causare uno dei rilasci e dei SIR identificati nello STEP 3bis è effettuata con metodi probabilistici.

Il risultato fornito da questi metodi è quindi espresso in termini di frequenza (numero di eventi/anno) di accadimento del singolo Scenario Rilascio Rilevante per effetto del coinvolgimento della apparecchiatura interessata nell'insieme degli scenari incidentali primari previsti nella analisi; il valore ottenuto viene utilizzato, sostanzialmente, per disporre di una scala di “sensibilità ad un determinato tipo di effetto domino” relativa alle varie apparecchiature suscettibili di “rilascio rilevante”, e conseguentemente per indirizzare le proposte di miglioramenti impiantistici in modo efficace.

Bisogna evidenziare che i metodi di analisi utilizzati per i differenti meccanismi di danno (effetti domino da impatto di frammenti da BLEVE o da esplosione di apparecchiatura, da UVCE, da esposizione a pool fire o jet fire), in quanto disomogenei per tipologia di iter logico e per tipologia di dati utilizzati, non possono fornire risultati tra loro numericamente confrontabili: quindi ciascuna analisi comporta una fase di valutazione autonoma, e conseguentemente fornisce il proprio contributo alla identificazione delle problematiche emergenti e delle misure di sicurezza aggiuntive suggeribili.

Pur con qualche differenza, nelle analisi relative ai quattro “eventi primari”, è stato utilizzato un comune processo logico generale, del quale la figura seguente mostra i passi essenziali.

Figura 2. Metodologia STEP4



Si riporta di seguito il dettaglio delle metodologie utilizzate e dei risultati ottenuti per ciascun meccanismo di danno “effetto domino” ipotizzato.

7.1 Effetti “domino” da proiezione di frammenti originati da BLEVE

METODOLOGIA

Individuazione delle apparecchiature che possono dare luogo ad un BLEVE:

Si considera che il fenomeno possa avvenire solo nelle seguenti due condizioni:

- per apparecchiature contenenti sostanze liquide con $T > 0,89T_c$
- per apparecchiature contenenti sostanze liquide in cui, a seguito di esposizione al fuoco, viene raggiunta una temperatura $T > 0,89 T_c$ (si considera la condizione immediatamente precedente l’apertura delle valvole di sicurezza, e cioè per $T = T_{eq}$ calcolata per il 110% della pressione di progetto).

A seguito della verifica, per tutte le apparecchiature di raffineria, della esistenza delle due condizioni sopracitate, sono state individuate 22 apparecchiature possibili fonte di BLEVE (20 da esposizione al fuoco e 2 da collasso).

Valutazione della frequenza di BLEVE per le apparecchiature individuate

- per il collasso strutturale sono stati adottati dati statistici (EP FORUM) : $8,1 \times 10^{-6}$ eventi/anno
- per l’esposizione al fuoco: per le 20 apparecchiature selezionate, sono stati individuati gli apparecchi e tubazioni, (possibili fonte di incendio da pozza o di jet, di dimensione $\varnothing > 3/4"$) a distanza inferiore a 20m; la frequenza del BLEVE è stata calcolata come somma delle frequenze di

esposizione per un tempo prolungato a ciascun incendio da pozza o jet identificato, tenendo conto dei sistemi di raffreddamento presenti sull'apparecchiatura stessa; Le frequenze di accadimento degli incendi da pozza o dei jet, a loro volta, sono state ricavate come funzione dei sistemi di intercettazione dei rilasci presenti, manuali o automatici, e della presenza di gas detector.

Le frequenze così valutate per i BLEVE delle apparecchiature individuate in raffineria ricadono nell'intervallo 10^{-5} - 10^{-7} eventi/anno.

Valutazione della possibilità di impatto da parte di frammento generato da un BLEVE

Per ciascuna delle 134 apparecchiature selezionate nello step 3bis sono state misurate le distanze rispetto alle 22 fonti di BLEVE identificate.

Utilizzando dati statistici si è ricavata la probabilità che un frammento colpisca l'apparecchiatura target, posta alla distanza data: essa è funzione della tipologia di apparecchiatura che genera il BLEVE (reattore, colonna o serbatoio orizzontale), nonché della posizione relativa tra origine e target del frammento stesso (altezza dell'apparecchiatura target e angolo solido rispetto al quale essa è "vista" dalla fonte di frammenti).

La frequenza di impatto di un frammento, per ciascuna delle apparecchiature, viene ricavata come somma del contributo a tale evento da parte di ciascuna delle apparecchiature fonti di BLEVE.

Le frequenze ottenute ricadono nell'intervallo $4,6 \times 10^{-6}$ - $9,2 \times 10^{-9}$ eventi/anno.

Valutazione del danno indotto sull'apparecchiatura "bersaglio" dall'impatto con il frammento.

Per valutare se il frammento che colpisce l'apparecchiatura è in grado di provocarne la rottura catastrofica (o rottura del 50% di una tubazione), invece di un semplice danneggiamento con eventuali rilasci contenuti di prodotti pericolosi, si è operata una distinzione tra le apparecchiature in funzione del loro spessore (valutato come dipendente dalla pressione di progetto - maggiore o minore di 15 bar).

RISULTATI E MISURE MITIGATIVE

La distribuzione degli scenari all'interno dei vari campi di frequenze mostra un andamento ben distribuito intorno al massimo (tra 1 e $3,33 \times 10^{-7}$) per un campo tra 10^{-9} e 10^{-6} ; questo è indice di un buon comportamento del metodo di analisi utilizzato, che ha saputo distinguere tra le varie situazioni di layout ed impiantistiche.

L'analisi delle frequenze ottenute e della catena di eventi che porta allo scenario incidentale rilevante finale ha portato alla individuazione di misure mitigative specifiche per singoli apparecchi, mirate a limitare la probabilità di accadimento del BLEVE iniziale, attraverso la protezione dell'apparecchiatura origine (raffreddamento a diluvio o l'adeguamento dell'isolamento al fuoco) o la riduzione dello scenario incidentale causa del BLEVE stesso (con valvole di intercettazione azionabili a distanza).

7.2 Effetti "domino" da proiezione di frammenti originati da esplosione di apparecchiatura

METODOLOGIA

Individuazione delle apparecchiature suscettibili di esplosione

Si è considerata possibile la presenza di miscele esplosive (sostanze infiammabili allo stato di vapore a $T > T_{fp}$ di flash point e presenza di aria comburente) solo nei serbatoi a tetto fisso a pressione atmosferica, che sono sempre provvisti di tubazione di ventilazione in collegamento diretto con l'atmosfera, e che possono trovarsi in uno stato di parziale riempimento, con vapore sopra il pelo libero.

Le condizioni di esplosività sono così collegate alla possibilità che il fluido raggiunga temperature superiori al punto di flash.

Questo può avvenire per errori o problemi operativi, che possono determinare una alimentazione dei serbatoi con prodotti a temperatura superiore a quella prefissata oppure per un anomalo riscaldamento del prodotto contenuto, da parte degli appositi serpentini presenti nei serbatoi di stoccaggio.

Complessivamente, tenendo anche conto che possono essere trascurati gli effetti dovuti a proiezione di frammenti a carico di apparecchiature distanti più di 300 m, sono stati identificati 13 serbatoi (su 102 analizzati) presentanti le caratteristiche idonee ad una loro classificazione come fonte efficace di frammenti a seguito di esplosione.

Valutazione della frequenza di esplosione per i 13 serbatoi selezionati

La frequenza dell'evento di presenza di miscela esplosiva è stata valutata utilizzando dati statistici specifici per la tipologia impiantistica considerata, tenendo conto della presenza di indicatori e di allarmi per alta temperatura; la possibilità di innesco della miscela, all'interno o all'esterno del serbatoio, è stata valutata tenendo conto della presenza di efficaci messe a terra delle membrature e della frequenza di fulminazione o di operazioni a caldo nella zona serbatoi.

Le frequenze di accadimento delle esplosioni ricadono nell'intervallo $10^{-6} - 10^{-7}$ eventi/anno.

Valutazione della possibilità di impatto da parte di frammento generato da una esplosione.

Per ciascuna delle 134 apparecchiature selezionate nello STEP 3bis sono state misurate le distanze rispetto alle 13 fonti di esplosione identificate.

Utilizzando dati statistici si è ricavata la probabilità che un frammento colpisca l'apparecchiatura target, posta alla distanza data.

In questo caso, dato che, per i serbatoi a tetto fisso, tenendo presente le tecnologie costruttive di tali apparecchi e comunque sulla base dell'esperienza incidentale, è ipotizzabile che l'esplosione generi il distacco del tetto e la sua proiezione sino a distanze (come sopra accennato) di 300 m max (l'80% delle volte ricade prima di 100m), la frequenza di impatto, relativa alla singola coppia tank-target, è stata conservativamente valutata come funzione della distanza tra i due elementi e della dimensione max del frammento ipotizzato (tetto del tank), risultando ininfluente l'ingombro del target (giacitura, diametro ed altezza).

La frequenza di impatto di un frammento, per ciascuna delle 134 apparecchiature, viene ricavata come somma del contributo a tale evento da parte di ciascuna delle 13 fonti di esplosione.

Le frequenze ottenute ricadono nell'intervallo $1,61 \times 10^{-8} - 3,51 \times 10^{-7}$ eventi/anno.

Valutazione del danno indotto sull'apparecchiatura "bersaglio" dall'impatto con il frammento.

Date le ipotesi adottate sulla dimensione del frammento, si è assunto che l'eventuale impatto provochi la sicura rottura delle tubazioni e, nell'80% dei casi, la rottura catastrofica dell'apparecchiatura, indipendentemente dalle sue caratteristiche di progetto.

RISULTATI E MISURE MITIGATIVE

Si rileva che le frequenze di accadimento calcolate sono di valore decisamente basso, e praticamente tutte appartenenti allo stesso ordine di grandezza (tra $1,61 \times 10^{-8}$ e $3,51 \times 10^{-7}$); questo è dovuto sostanzialmente alla razionale disposizione del parco serbatoi, ed alla loro buona separazione rispetto alle isole produttive, frutto anche delle recenti modifiche apportate alle aree di stoccaggio.

I possibili interventi migliorativi sono diretti, più che alla protezione degli impianti (come detto, l'analisi non evidenzia la presenza di impianti più esposti al rischio rispetto ad altri), alla diminuzione ulteriore dei fattori che potrebbero causare le esplosioni dei tanks: vengono quindi raccomandate accurate verifiche procedurate per il controllo dell'efficienza delle messe a terra, lo studio sulla possibilità, ove applicabile, di inserimento di arrestatori di fiamma sui vent dei serbatoi, l'inserimento di allarmi per alta temperatura, ove non già previsti, sistemi di controllo sulle linee di alimentazione ai serpentine di riscaldamento, ove non presenti.

7.3 Effetti "domino" da pool fire e jet fire

METODOLOGIA

Le rotture derivanti da esposizione ad irraggiamento di tipo stazionario, data la presenza di innesco, non possono produrre scenari che necessitano invece del ritardo o della mancanza dell'innesco, come il flah fire, l'UVCE o la dispersione di prodotti tossici/combustibili.

Tra gli scenari selezionati nello STEP 3BIS devono essere quindi considerati solo quelli legati all'innesco immediato, e cioè le early explosions (dato che non risultano selezionati né i BLEVE né i pool fire).

In questi casi si è quindi stabilito di partire dalla individuazione delle apparecchiature suscettibili di early explosion, a seguito di rottura catastrofica, per poi andare a valutarne la frequenza di accadimento per esposizione a fuoco.

Individuazione delle apparecchiature suscettibili di early explosion

Nello step 3bis sono state individuati 14 scenari di early explosion (e relative apparecchiature) in grado di dare effetti all'esterno o verso la ferrovia.

Valutazione della frequenza di rottura catastrofica per esposizione al fuoco

Identificazione, nell'area di 20 m intorno a ciascuna delle 14 apparecchiature selezionate suscettibili di early explosion, delle fonti possibili di rilasci di prodotti infiammabili in grado di evolvere in pool fire o jet fire (incluso ovviamente la stessa apparecchiatura), escludendo rilasci da diametri $< \frac{3}{4}$ giudicati non in grado di generare jet o pozze, e valutazione delle singole frequenze di rilascio (da banca dati EP FORUM);

Per ognuna delle fonti di rilascio identificate:

- per quanto riguarda i rilasci liquidi, viene valutata la possibilità della loro evoluzione in un pool di durata sufficiente a provocare il cedimento di una struttura loro esposta, tenendo conto della presenza di gas detector e/o di valvole di isolamento automatiche per intercettare il rilascio;
- per i rilasci gassosi, oltre a quanto sopra, viene tenuto conto dell'estensione dell'angolo solido rispetto al quale una struttura "target" viene "vista" da un jet, distinguendo tra strutture verticali ed orizzontali.

Per ciascuna delle 14 apparecchiature selezionate, la frequenza di rottura per esposizione al fuoco è ricavata dalla somma delle frequenze di esposizione ai vari pool o jet possibili, valutata come sopra, corretta in funzione dell'efficacia delle misure di protezione (raffreddamento) presenti sull'apparecchiatura, nonché della sua suscettibilità a generare un BLEVE, per effetto del tipo di prodotto contenuto.

RISULTATI E MISURE MITIGATIVE

I valori assoluti ottenuti sono modesti (anche se presumibilmente sovrastimati, come conseguenza della conservatività della metodologia utilizzata), tanto da consentire di valutare di bassa significatività gli effetti domino da esposizione a radiazione termica stazionaria.

L'andamento dei valori (tutti ricompresi nel campo $10^{-8} - 10^{-5}$), anche a causa del numero relativamente basso di casi trattati (rispetto ai casi precedenti), è piuttosto disuniforme e distribuito in un range di frequenze abbastanza esteso.

Gli interventi sono stati mirati alla protezione delle apparecchiature dal coinvolgimento in pool fire o jet fire - sistema di raffreddamento a diluvio e adeguamento dell'isolamento al fuoco - e a ridurre l'entità dei rilasci in grado di generare tali scenari - installazione di valvole di intercettazione azionabili a distanza.

Buona parte di questi interventi era già previsto nelle considerazioni finali della analisi dell'effetto domino da BLEVE, e ne viene quindi confermata l'opportunità.

7.4 Effetti "domino" da UVCE

METODOLOGIA

Il fenomeno UVCE, per le sue caratteristiche di evoluzione, necessita di una caratterizzazione specifica per tenere in debito conto dell'area in cui la nube di infiammabile può svilupparsi, mantenendo concentrazioni superiori ad LFL (considerata circolare, in quanto non si tiene conto di direzioni privilegiate di vento, di raggio "d"), e dell'area effettivamente soggetta a sovrappressione superiore a 0,3 bar (di raggio "s", molto minore di "d", e con centro nel punto di innesco, interno a "d").

La metodologia di analisi consta di una serie di passi successivi, così sintetizzabili:

- in primo luogo vengono identificate le aree di stabilimento in cui potenzialmente si può sviluppare un UVCE, con effetti di sovrappressioni tali da essere pericolosi per le strutture lì presenti;
- viene quindi calcolato un "peso" da assegnare a ciascuna area per tener conto dei fattori che influenzano l'effettivo insorgere di tale evento, e del fatto che l'evento interesserà effettivamente solo una zona dell'area (la cui ampiezza e localizzazione dipende dalla forma della nube e dalla direzione del vento);
- infine si analizza la posizione reciproca tra gli impianti di stabilimento, le apparecchiature da cui si ipotizza possa generarsi la fuga, nonché le relative aree così dimensionate e "pesate", la localizzazione delle sicure fonti di innesco (i forni), in modo da identificare gli impianti suscettibili di coinvolgimento in un UVCE, e valutare la frequenza di tale coinvolgimento e la frequenza di una sua evoluzione in SIR.

Individuazione delle fonti di UVCE e calcolo delle aree all'interno delle quali l'evento può svilupparsi

Vengono prese in considerazione tutte le apparecchiature che, nello STEP3, erano state individuate come fonte di UVCE, ipotizzando un rilascio da rotture "credibili" di diametro equivalente pari ad un pollice.

Vengono identificate le apparecchiature che, in queste condizioni di rilascio, ed in corrispondenza di condizioni meteorologiche molto sfavorevoli (classe di stabilità F2) possono generare UVCE: vengono così selezionate n. 18 apparecchiature.

Per queste viene calcolata l'ampiezza angolare max della nube, la distanza (d) sino alla quale possono aversi concentrazioni > LFL e la distanza max (s) dal punto di innesco alla quale si possono produrre sovrappressioni > 0,3 bar.

Le aree circolari con centro su ciascuna delle 18 apparecchiature, con raggio pari a d+s, vengono considerate sede di possibile sovrappressione > 0,3 bar, da UVCE.

Per ogni area circolare:

- viene ricavato un valore (Fc) che rappresenta la frequenza accadimento di una sovrappressione maggiore di 0,3 bar a seguito di UVCE, in un punto qualsiasi dell'area; Fc è funzione del numero e del tipo di componenti, possibili causa di rilasci, presenti nell'apparecchiatura "fonte di UVCE"

considerata, della probabilità che la fuga generi effettivamente un UVCE delle dimensioni ipotizzate (presenza di condizioni meteo come quelle ipotizzate, assenza di innesco immediato, non evoluzione in flash fire), ed infine del rapporto tra l'ampiezza della effettiva zona in cui si può generare la sovrappressione e la superficie circolare totale considerata. Il valore F_c non prende in considerazione la probabilità dell'effettivo verificarsi di un innesco ritardato.

I valori ottenuti risultano compresi nell'intervallo $1.27 \times 10^{-4} - 5.67 \times 10^{-6}$ eventi/anno.

Valutazione della frequenza di coinvolgimento in UVCE per ciascuna unità di stabilimento.

Per le 22 unità di stabilimento, selezionate nello STEP 3bis come possibili sede di Rilascio Rilevante, viene valutata la localizzazione rispetto alle aree circolari sopra individuate.

Viene altresì valutata la posizione dei 15 forni presenti nello stabilimento (quali sicuri punti di innesco della nube esplosiva).

Nel caso che esista intersezione tra i confini dell'unità e una o più aree circolari, per valutare la frequenza di coinvolgimento in soprapressioni $> 0,3$ bar:

- viene assegnato un fattore di probabilità di innesco pari a 1 se è presente un forno nell'unità, oppure a una distanza minore di "s" (raggio di danno corrispondente a 0,3 bar)
- viene assegnato un fattore di probabilità di innesco pari a 0,3 se non esistono fonti di innesco certe (forni) nella traiettoria tra "fonte" del rilascio e l'unità in esame, per tener conto della possibile presenza di inneschi non prevedibili;
- viene assegnato un fattore di probabilità di innesco pari a 0 se esiste un forno, vicino alla "fonte" del rilascio nella direzione della sua congiungente con l'impianto, a distanza dall'unità superiore ad "s" (esiste sicuramente un innesco che provoca un UVCE, che però non può interessare l'unità in esame);
- viene altresì operata una ulteriore distinzione per tener conto del fatto che, per una determinata unità, il coinvolgimento negli effetti di un UVCE può avvenire solo per una determinata direzione del vento, e, contemporaneamente, anche i SIR da essa generabili possono dare effetti rilevanti all'esterno solo per una determinata direzione del vento; tali direzioni devono, ovviamente, coincidere o almeno essere compatibili.
- la frequenza di coinvolgimento in UVCE, per ciascuna unità della raffineria è calcolata come somma di quelle calcolate per ciascuna delle 18 apparecchiature individuate come fonte di rilascio.

Delle 22 unità oggetto di analisi, 11 sono risultate coinvolgibili negli effetti degli UVCE identificati come possibili nella raffineria.

Valutazione frequenza di rilascio rilevante da UVCE

Nelle 11 unità selezionate sono presenti 81 apparecchiature che, nello step 3bis, sono state individuate come possibili fonte di 94 rilasci rilevanti.

Per valutare se la soprapressione che interessa ciascuna apparecchiatura è in grado di provocarne la rottura catastrofica (o rottura del 50% di una tubazione), invece di un semplice danneggiamento con eventuali rilasci contenuti di prodotti pericolosi, si è operata una distinzione tra le apparecchiature tenendo conto della loro capacità a resistere a carichi dinamici. Tale capacità viene esplicitata come funzione delle caratteristiche di progettazione (secondo criteri antisismici verificabili oppure no) e del loro tipologia e layout (a sviluppo orizzontale o verticale, in funzione del rapporto H/D).

Il valori mostrano una ampia estensione dei valori di frequenze di accadimento, da valori nel campo tra 10^{-8} e 10^{-5} : questo conferma la buona capacità del metodo utilizzato nel discernere tra le varie situazioni sotto analisi.

RISULTATI E MISURE MITIGATIVE

I risultati ottenuti mostrano che gli impianti maggiormente soggetti ad essere fonte di possibili rilasci rilevanti sono quelli relativi alle unità ad alta pressione.

Si evidenzia che, anche in questa analisi, gli ordini di grandezza delle frequenze di accadimento calcolate sono tali da far presumere "di bassa significatività" i coinvolgimenti in effetto domino da UVCE, tenendo conto anche di una loro presumibile sovrastima, collegata con la conservatività della metodologia utilizzata.

L'esposizione a soprapressioni derivanti da UVCE può essere ritenuta una eventualità connessa alla tipologia stessa di stabilimento, la raffineria, a causa della presenza un gran numero di impianti ed apparecchiature contenenti sostanze liquide e gassose infiammabili, spesso in condizioni di alta temperatura e pressione.

Gli impianti che risultano più esposti al fenomeno sono alcuni tra quelli classificati "ad alta pressione" (Unifining, Platforming, Isomerizzazione, Idrodesolforazione); le sostanze in essi presenti sono del tipo infiammabile o esplosivo, mentre i prodotti tossici presentano concentrazioni relativamente basse.

Gli impianti contenenti prodotti tossici ad elevate concentrazioni, nel caso in esame, risultano meno esposti a rischio di coinvolgimento in UVCE, rispetto agli altri impianti ad alta pressione, tanto che il metodo utilizzato li esclude dall'analisi già nei passaggi iniziali.

Lo studio evidenzia come risulti molto difficile ipotizzare interventi sugli impianti che ne aumentino la protezione nei confronti delle sovrappressioni, e che quindi tutti gli sforzi devono essere diretti a rendere più improbabili le perdite che possono evolvere nell'evento UVCE, o a limitarne le durate.

L'unico intervento mitigativo individuato è volto a eliminare una delle UVCE primarie, che per il suo posizionamento interessa molte delle apparecchiature, ed è consistito nell'asservimento della MOV in aspirazione ad una pompa al segnale di rivelazione di gas da parte di un detector (riduzione del tempo di intercettazione della perdita a 40 secondi); esso ottiene un significativo abbassamento delle frequenze calcolate.

Particolare enfasi viene data alla necessità di minimizzare gli errori umani, mediante l'uso esteso di procedure operative, manutentive e gestionali e, soprattutto, dei controlli sulla loro corretta applicazione.

8. CONCLUSIONI

Il primo passo della presente analisi è stata l'individuazione di rilasci rilevanti in grado di determinare scenari incidentali con effetti nelle aree esterne alla raffineria, indipendentemente dalla effettiva possibilità di sviluppo per effetto domino.

Il primo risultato ha evidenziato che in corrispondenza di tipologie di rottura molto rilevanti si potrebbero avere effetti sulle aree esterne allo stabilimento dovute a esplosioni, flash fire e dispersioni di prodotti tossici.

Tali rilasci sono stati associati a tipologie di rottura di dimensioni molto elevate (generalmente non prese a riferimento nelle analisi di rischio tradizionali) proprio perché nella presente analisi era di primario interesse valutare se tipologie di incidenti particolarmente gravose avessero la possibilità di verificarsi a seguito di una escalation di eventi.

Successivamente è stata valutata la sequenza degli eventi che a partire da un incidente con conseguenze limitate, usualmente ritenuto credibile, potrebbe determinare situazioni potenzialmente ben più gravose (per effetto domino).

I risultati ottenuti da questa analisi hanno evidenziato che, anche se effetti domino sono certamente possibili, è remota la possibilità che questi portino ai rilasci incidentali rilevanti potenzialmente molto gravi che sono stati considerati.

Nell'ambito dell'identificazione della sequenza di eventi è stato possibile valutare la efficacia delle misure preventive/protettive in essere; è stato possibile individuare, inoltre, ulteriori accorgimenti che consentirebbero di raggiungere margini di sicurezza ancora più ampi.

A queste devono essere aggiunte raccomandazioni riguardanti elementi inerenti gli aspetti di sicurezza procedurali, organizzativi, formativi o gestionali che, pur se difficilmente valutabili nel contesto della analisi proposta, sicuramente sono in grado di modificare i valori di frequenza calcolati.

Dall'analisi delle sequenze di eventi, si evince che i valori calcolati di frequenza finale di accadimento del rilascio rilevante presenta una certa indeterminazione, a causa dei numerosi elementi che intervengono nella concatenazione di eventi, e sono affetti da probabile sovrastima, per l'effetto di un elevato grado di conservatività nella selezione dei vari parametri associati a ciascun passo dell'evoluzione della sequenza incidentale.

Tuttavia la metodologia consente di discernere efficacemente tra situazioni di differente criticità ed è in grado di evidenziare l'efficacia delle misure preventive/protettive che vengono proposte.

9. SVILUPPI

La metodologia individuata può essere facilmente applicata anche ad installazioni industriali diverse da quella in esame. I risultati ottenuti sono invece caratteristici dello stabilimento esaminato, facendo emergere utili indicazioni sulle tipologie delle misure mitigative applicabili e sulla maggiore o minore importanza di alcuni eventi incidentali primari nel causare effetti domino.

12. BIBLIOGRAFIA

- [1] DM del 15.5.1996 – *Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di gas e petrolio liquefatto (G.P.L.)* - GU n°113 del 9 luglio 1996
- [2] DM del 20.10.1998 – *Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di liquidi facilmente infiammabili e/o tossici*, GU n°188 del 9 novembre 1998
- [3] DM del 9.5.2001 – *Requisiti minimi di sicurezza in materia di pianificazione urbanistica e territoriale per le zone interessate da stabilimenti a rischio di incidente rilevante*, GU n°151 del 16 giugno 2001
- [4] CCPS, *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs*- American Institute of Chemical Engineers, Center for Chemical Process Safety (1994)
- [5] DELVOSALLE, *A methodology for the identification and evaluation of domino effects* - Belgian Ministry of Employment and Labour - research team Faculté Polytechnique de Mons coordinator dr.ir.Ch. Delvosalle (Nov. 1998)
- [6] EP FORUM, *Hydrocarbon leak and ignition data base* - Report n° 11.4/280 May 1992 - E&P Forum, The Oil Industry International Exploration & Production Forum
- [7] PETTITT, *Evaluating the probability of major hazardous incidents as a result of escalation events* - Pettitt, Schumacher and Seeley - *J. Loss Prev. Process Ind.*, 1993, vol 6, n° 1
- [8] LEES, *Loss Prevention in the Process Industries* - Frank P. Lees OREDA Offshore Reliability Data - OREDA Participants
- [9] HMSO, *Major hazard aspects of the transport of dangerous substances. Report and appendices* – Health & Safety Commission – HMSO – 1991